

Jean-Gaël Gricourt
e-mail: jgricourt@gmail.com

Version 7.0

27 janvier 2025

Résumé

Ce glossaire est pour l'instant très orienté matériel et optique instrumentale, mais il est en mesure d'évoluer vers d'autres sujets. Tout le contenu de ce glossaire est critiquable donc vos commentaires positifs ou négatifs ainsi que vos suggestions et rectifications seront les bienvenus !

Contact : jgricourt@gmail.com

Table des matières

1 DicoAstro **5**

2 Astronomie **7**

2.1 Les Éphémérides . . . 7
2.2 Les Temps . . . 7
2.3 Les Positions . . . 12
2.4 Mécanique Céleste . . . 19
2.5 L'Atmosphère, la PL, le Seeing, la Nuit . . . 26
2.6 La Magnitude . . . 42
2.7 Les Expressions . . . 57
2.8 Livres . . . 59
2.9 Les Fabricants . . . 61
2.10 Les Vendeurs . . . 65
2.11 Les Médias . . . 66
2.12 Les Organisations . . . 66
2.13 Les Événements . . . 66
2.14 Divers . . . 67

3 Astrophysique **68**

3.1 Les Corps Célestes . . . 68
3.2 Les Étoiles . . . 74
3.2.1 Étoile . . . 74
3.2.2 L'Évolution Stellaire . . . 78
3.2.3 Le Soleil . . . 85
3.2.4 Les éclipses solaires . . . 94
3.3 Les amas d'étoiles . . . 97
3.4 La Voie Lactée . . . 97
3.5 Les Nébuleuses . . . 98
3.6 La Lune . . . 99
3.7 Mécanique théorique (aperçu) . . . 100

4 La Vie **107**

4.1 La Vie sur Terre . . . 107
4.2 L'Holocène . . . 110
4.3 La Vie extra-terrestre . . . 111

5 Optique **114**

5.1 Généralités . . . 114

5.2 La Résolution et le Contraste . . . 123
5.3 Le Grossissement . . . 144
5.4 L'Optique Géométrique . . . 148
5.5 Les Aberrations . . . 162
5.6 Les Distorsions . . . 182
5.7 Le Vignetting . . . 187
5.8 Les Miroirs . . . 189
5.9 Les Tests . . . 198
5.10 Diamètre efficace . . . 208
5.11 Haute résolution planétaire . . . 209
5.12 Techniques avancées . . . 210

6 Les Instruments **213**
6.1 Généralités . . . 213
6.2 Les Jumelles . . . 226
6.3 Les Lunettes . . . 232
6.4 Les Newtons . . . 246
6.4.1 Généralités . . . 246
6.4.1.0.1 SSE . . . 253
6.4.2 La Collimation . . . 261
6.5 Les Catadioptriques . . . 272
6.6 Les autres Instruments . . . 280
6.7 Les instruments du Solaire . . . 281
6.8 Les Accessoires . . . 297
6.8.1 Le Porte Oculaire . . . 297
6.8.2 Les Adaptateurs . . . 303
6.8.3 Les Oculaires . . . 304
6.8.4 Les Barlows . . . 321
6.8.5 Les Correcteurs . . . 327
6.8.6 Les Renvois Coudés . . . 331
6.8.7 Les Chercheurs . . . 336
6.8.8 Les Binoculaires . . . 339
6.8.9 La NVA . . . 341
6.8.10 L'Apodization . . . 345
6.8.11 Les Autres Accessoires . . . 346
6.9 Les Filtres . . . 347
6.9.1 Les Filtres pour le ciel profond . . . 352
6.9.2 Les Filtres Solaires . . . 353
6.9.3 Les Filtres Planétaires . . . 366
6.9.4 Les Filtres Neutres . . . 367
6.10 Les Accessoires pour Dobson . . . 368
6.11 La Conception . . . 370
6.12 Etude de dimensionnement d'un dobson . . . 383
6.12.1 Première version . . . 383
6.12.2 Seconde version . . . 388
6.12.3 Remarque concernant le choix du secondaire . . . 391

7 La Monture **394**
7.1 Généralités . . . 394

7.2 Le Suivi . . . 410
7.3 Les Accessoires . . . 419

8 La Physiologie **421**
8.1 Les Généralités . . . 421
8.2 Effet des rayonnements . . . 430
8.3 Les Défauts de la Vision . . . 432

9 L'Astrophoto **438**
9.1 Généralités . . . 438
9.2 Les Capteurs et le Matériel . . . 441
9.3 Le Bruit . . . 453
9.4 L'imagerie . . . 464
9.4.1 Généralités . . . 464
9.4.2 Photo planétaire . . . 474
9.4.3 Photo du ciel profond . . . 475
9.4.4 Le Lucky Imaging en ciel profond . . . 476
9.4.5 Visuel Assisté . . . 477
9.4.6 Le masque flou . . . 484
9.5 La Calibration . . . 484
9.6 Workflow Astrophoto Planétaire . . . 488
9.7 La mise au point . . . 489

10 Les Matériaux **490**
10.1 Généralités . . . 490
10.2 Traitement Optique . . . 497
10.3 Les Verres . . . 499
10.4 Divers . . . 502

11 Appendice A **505**
11.1 Recommandations . . . 505
11.2 Les forums . . . 505
11.3 Les chaînes Youtube . . . 506
11.4 Les magazines . . . 507

12 Appendice B **508**
12.1 Bibliothèques astro photos . . . 508
12.2 Bibliothèques astro dessins . . . 508
12.3 Pollution lumineuse . . . 509
12.4 Météo / Seeing . . . 509
12.5 Des outils de calculs et de modélisation . . . 509
12.6 L'optique instrumentale . . . 510
12.7 Les filtres . . . 510
12.8 Des simulateurs de télescopes . . . 510
12.9 Astrophoto . . . 511

13 Appendice C **512**
13.1 Des cartes du ciel . . . 512
13.2 La Lune - cartes . . . 512
13.3 La Lune - Livres . . . 512
13.4 Événements . . . 513

13.5 Catalogues d'objet . . . 513
13.6 Catalogues amateurs de DSO notables . . . 514
13.7 Ephémérides & calculs & Cours . . . 514

14 Appendice D **516**
14.1 Applications Planétarium . . . 516
14.2 Applications Planétarium Smartphone . . . 517
14.3 Applications Astrophoto . . . 517
14.4 Applications Astrophoto Smartphone . . . 517
14.5 Info Matériel / Métrologie . . . 517
14.6 Galleries Amateurs (voir aussi AstroBin) . . . 518
14.7 Amateur mags / blogs . . . 518
14.8 Usinage . . . 518

15 Appendice E **519**
15.1 Télescopes et montures . . . 520
15.2 Miroirs artisanaux . . . 522
15.3 Lunettes . . . 522
15.4 Montures et accessoires . . . 523
15.5 Réparation instruments . . . 523

16 Appendice F **524**
16.1 La petite histoire des télescopes amateurs . . . 524
16.2 Portrait de Donald E. Pensack . . . 527
16.3 Des Astrophotographes . . . 528

17 Réflexions **529**
17.1 Combien coûte le dobson de ses rêves ? . . . 529
17.2 Un instrument à rapoprt F/D court n'est pas fait pour le planétaire ? . . . 529
17.3 Quelle lunette semi APO ou APO pour l'observation ? . . . 530
17.4 Il faut choisir son miroir par rapport à certaines caractéristiques techniques . . . 530
17.5 Un miroir ou un objectif sale doit être nettoyé . . . 531
17.6 Un miroir parabolique façonné par une machine sera de meilleure qualité . . . 531
17.7 Quel instrument choisir ? . . . 531
17.8 A propos des "Smart Telescopes" . . . 533
17.9 Visuel ou Astrophoto 2 hobbies ? . . . 534
17.10 Si l'on était "riche" qu'achèterait-on ? . . . 535
17.11 Je viens d'acheter un télescope, mais je vois la Lune floue ? . . . 536
17.12 Les forums sont-ils une bonne source d'information ? . . . 536
17.13 AliExpress c'est fiable ? C'est de la qualité ? . . . 537
17.14 Comment nettoyer ma lunette mon télescope ? . . . 538
17.14.1 La Lunette . . . 538
17.14.2 Le Télescope . . . 539
17.15 Arnaques comment les éviter ? . . . 541

Chapitre 1

DicoAstro

Voici un travail que j'ai commencé en Janvier 2017 et nous voici en 20247 cela fait donc 7 ans que je construis patiemment ce document, mais le temps passe si vite ! Il s'agissait depuis le départ de réaliser un petit glossaire de définitions des termes couramment utilisés dans l'astronomie amateur. Je l'avais initialement présenté comme un dictionnaire classique et je l'ai depuis profondément réorganisé afin de le chapitrer, car je me suis rendu compte que des parties cohérentes se dégageaient naturellement de tous ces paragraphes écrit individuellement.

J'ai d'abord écrit ce document dans le but de rassembler diverses notes et connaissances acquises aux cours de mes lectures ou interventions dans les fils de discussion de mes forums favoris. Certains termes sont familiers et d'autres sont beaucoup plus exotiques, faisant parfois référence à des concepts ardus à comprendre et surtout à vulgariser, mais en général cela vaut la peine de s'accrocher pour finalement tout comprendre. C'est alors une immense satisfaction d'arriver à transmettre certaines connaissances mais aussi d'arriver à débusquer ("Debunker" en anglais) les nombreuses erreurs ou omissions que l'on retrouve fréquemment sur Internet sur tous ces sujets qui nous passionnent.

Même si je n'incrémente pas toujours la version du document, celui-ci subit de nombreuses corrections et modifications tous les mois. Je le maintiens le plus à jour possible et cela passe souvent par la réécriture complète de certains paragraphes lorsque j'estime que c'est nécessaire. Malheureusement à ce jour, je n'ai presque pas de retour sur ce travail et j'ai donc très peu de recul sur la qualité de ce glossaire donc soyez indulgent et transmettez-moi vos remarques, celles-ci me seront très utiles pour y apporter des rectifications :-)

Puisque je profite de vos connaissances, donc j'estime qu'il est tout à fait normal que vous ayez aussi un droit de regard sur ce que j'écris, c'est comme cela que l'on progresse dans la connaissance selon moi.

Ce document organisé en 12 chapitres comporte à présent plus de 500 termes expliqués et minutieusement annotés et référencés sur lesquels je me suis appuyé pour écrire ces paragraphes. Il est bien sûr possible de retrouver certains résultats dans des ouvrages scientifiques ou des manuels de physique, cependant pour ne pas alourdir ce document, les développements plus terre à terre et donc mathématiques ;-) seront consignés dans d'autres documents annexes disponibles à la demande.

Enfin, si certains liens ne fonctionnent plus aujourd'hui, il suffit de consulter le site Web Archive pour retrouver les pages Web ou les documents correspondants. Je fais les mises à jour de ces liens dès que possible.

Merci à ces auteurs qui m'ont inspiré pour écrire ce document, en particulier :

— Starman1 alias Don Pensack [1] (CN) : un amateur passionné qui possède des connaissances pratiques pointues à la fois sur l'optique et le matériel astro.
— BillP alias Bill Paolini : un amateur passionné ayant testé à peu prêt tout ce qui existe en terme d'oculaire, de renvoi coudés etc ... ses reviews sont publiées sur CN et d'autre sites importants
— wh48gs alias Vladmir Sacek (CN) : est un opticien professionnel très pointu dans l'optique appliquée, pas toujours facile à relire en raison d'un système de notation pas toujours très claire mais c elà vaut la peine de s'accrocher [2]
— Jon Isaacs alias Jon Isaacs (CN) : un amateur très assidu, ses interventions sont toutes pertinentes et amène souvent vers d'autres références
— Thierry Legault [3] (AS,WA) : référent en France dans l'astrophotographie amateur
— Christophe Pellier [4] (AS,WA) : référent en France dans l'astrophotographie planétaire
— Norma,NDesprez alias Norma Desprez (AS,WA) : un spécialiste incontournable de l'astre Sélène en France !
— Christian Viladrich : ingénieur de formation, Christian est spécialiste du solaire mais aussi des filtres utilisés en astronomie, il la écrit aussi plusieurs ouvrages.
— 'Bruno alias Bruno Salque (AS,WA) : un autodidacte des sciences et fin observateur visuel, Bruno prend part à de nombreuses discussions en particulier celles démarrées par des débutants.
— Lyl alias Myriam ou Lylver ou lyl (AS,WA,CN) : opticienne de formation et adepte des lunettes anciennes
— Skywatcher707 alias Laurent Vadrot (WA) : encyclopédie vivante du matériel astro d'hier et d'aujourd'hui, il a fait de l'astro son métier.
— Jason D alias Ghassan Jason Khadder (CN) : co-inventeur du collimateur Catseye et spécialiste incontournable de l'optimisation des Newtons qu'il a étudié sous toutes les coutures.
— EdZ alias Edward Zarenski (CN) : un grand spécialiste des jumelles, celui qui a certainement produit le plus d'information pratique sur leur utilisation.
— denis0007dl alias Denis Levatić (CN) : un spécialiste de l'optimisation des binoculaires
— Johninderby alias John (SGL), johninderby-uk (CN) : un beta testeur de matériels de chez FirstLight Optics UK (montures, lunettes)
— Sixela Alexis (WA,CN) : un amateur de Belgique spécialiste des dobsons de grands diamètre et aussi d'autres instruments.

1. Starman1 : EyepiecesEtc
2. Vlad : Notes on Amateur Telescope Optics
3. Thierry Legault : Astrophoto
4. Christophe Pellier : Planetary Astronomy

Chapitre 2

Astronomie

2.1 Les Éphémérides

Éphémérides désigne les tables qui permettent de prédire la position des planètes dans le ciel (y compris de la Lune). Le calcul des éphémérides repose sur des théories planétaires :

- VSOP87 : équations polynomiales publiées par le BDL [394]
- DE4XX : coefficients d'un polynômes de Chebyshev modélisant des segments de trajectoires publiées par la NASA/JPL [348]

La précision atteinte par la théorie DE donne la position de la lune à 25m (théorie DE431). Le JPL propose une interface pour générer les éphémérides de pratiquement tous les corps connus : Horizons.

Epoque J2000.0 désigne l'époque de référence de coordonnées équatoriales. L'époque précédente était 1950.0. L'époque J2000.0 débute le 1er Janvier 2000 à 12h UT (voir date du calendrier Julien).

Pour retrouver les coordonnées réelles observées des astres, il faut apporter des corrections :

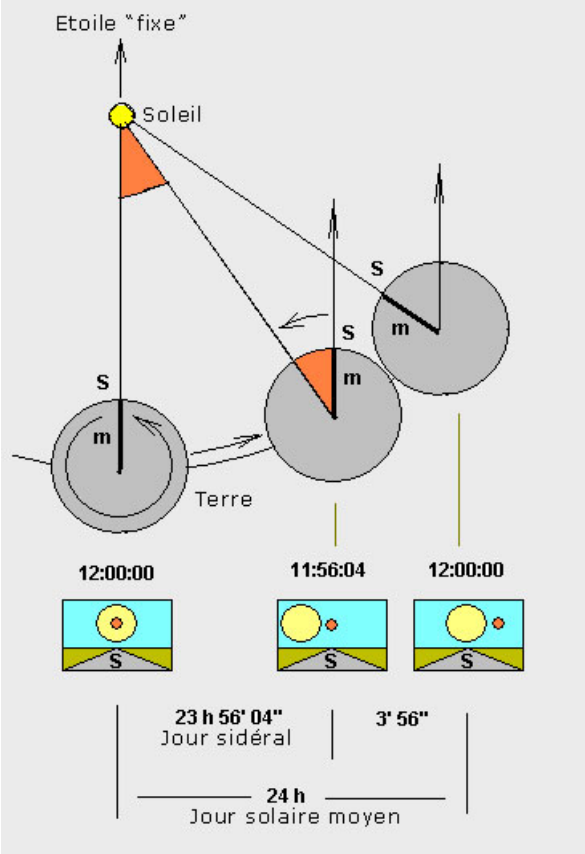
- La précession des pôles, jusqu'à 50 arcmin /an de décalage à l'équateur
- La nutation des pôles, jusqu'à 0.1 arcmin /an de décalage à l'équateur
- La composante annuelle de l'aberration de la lumière, jusqu'à 20 arcmin de décalage
- La composante annuelle diurne de l'aberration de la lumière, jusqu'à 0.31 arcmin de décalage
- La réfraction atmosphérique, jusqu'à 36 arcmin de décalage à l'horizon
- La parallaxe annuelle pour les étoiles proche, jusqu'à 0.8 arcmin de décalage pour l'étoile Proxima
- La parallaxe diurne pour les planètes, jusqu'à 57 arcmin pour le Lune
- Le mouvement propre des étoiles, jusqu'à 10.27 arcmin /an pour l'étoile de Barnard
- Le mouvement de rotation des étoiles faisant parti d'un système binaire (ou multiple)
- La déviation relativiste au passage de la lumière à proximité d'un astre massif, jusqu'à 1 arcmin au passage au bord du soleil.

2.2 Les Temps

Jour stellaire désigne le temps écoulé pendant 1 rotation complète (360 °) de la Terre autour de son axe polaire ou entre 2 passages d'une étoile au même endroit dans le ciel (par ex : le méridien) soit 23h 56 m 04.09 s. On confondra le jour stellaire

et le jour sidéral la plupart du temps en raison de la différence minime entre les deux.

Jour sidéral désigne le temps écoulé entre 2 passages du point vernal au même endroit dans le ciel (par ex : le méridien). La différence avec le jour stellaire est de 8.3ms en raison de l'effet de précession des pôles sur le point vernal pendant ce laps de temps. Le point vernal n'est pas fixe dans le ciel car il s'agit de l'intersection du plan de l'équateur céleste avec le plan de l'écliptique (orbite de la Terre).



Credit : Guy Doyen

Jour solaire moyen désigne le temps écoulé entre 2 passages du soleil fictif moyen au même endroit dans le ciel (par ex : le méridien) soit 24h exactement. C'est aussi la durée légale du jour.

Jour solaire désigne le temps écoulé entre 2 passages soleil vrai au même endroit dans le ciel (par ex : le méridien) soit 24h environ : [23h 59m 39s, 24h 0m 30s].

Année sidérale désigne le temps écoulé entre 2 passages soleil vrai au même endroit dans le ciel par rapport aux étoiles fixes.

Année tropique ou "Année solaire"désigne le temps écoulé entre 2 passages soleil vrai au même endroit dans le ciel sur le cercle de l'écliptique soit 365,2422 jours solaires. On a aussi 1 année tropique = 1 année sidéral - 20min.

Année calendaire désigne la durée légale d'une année soit en moyenne 365.2425 jours solaire moyen. La durée exacte de l'année calendaire est de 365 jour les années classiques et de 366 jours pour les années bissextiles.

Temps légal ou "Legal Time" désigne le temps légal affiché sur la montre en un lieu donné sur Terre. Le temps légal s'écrit : LT = UTC + TZ + DST. A Greenwich LT = UTC + DST puisque TZ = 0.

Fuseau horaire ou “TZ” ou “Timezone” désigne la zone géographique où l’heure est la même partout. Chaque fuseau horaire correspond à un décalage d’un nombre d’heure fixe par rapport à Greenwich.

Temps sidéral apparent ou “LST” ou “Local Sidereal Time” désigne le temps sidéral local apparent soit le temps écoulé depuis le passage du point Vernal γ par le méridien du lieu. Il s’agit aussi de l’angle horaire du point Vernal γ (mesuré localement) : $\text{LST} = H_\gamma$.

Temps sidéral moyen ou “LMST” ou “Local Mean Sidereal Time” désigne le temps sidéral moyen local.

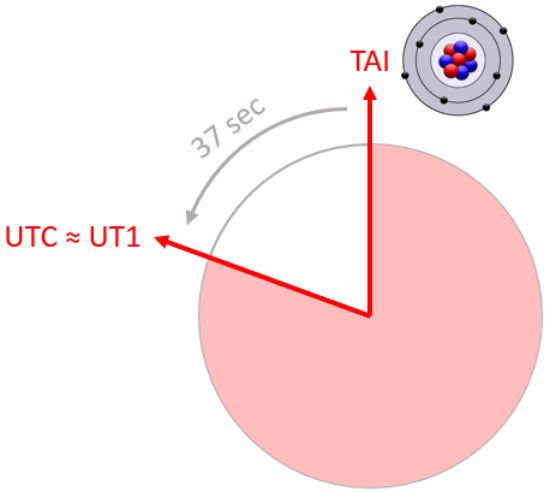
Temps sidéral apparent à Greenwich ou “GST’ ou “Greenwich Sidereal Time” désigne le temps sidéral apparent à Greenwhich. On a aussi : $\text{GST} = \text{LST} - \lambda = \text{GMST} + \frac{\Delta\Psi \cos\epsilon}{15}$ où $\Delta\Psi$ est la correction de nutation en longitude et ϵ l’obliquité vraie de l’axe des pôles (effet de nutation pris en compte).

Temps sidéral moyen à Greenwich ou “GMST” ou “Greenwich Mean Sidereal Time” désigne le temps sidéral moyen à Greenwich. On a aussi : $\text{GMST} = \text{GMST0h} + UT \times 1.002737908$ où GMST0h est le temps sidéral moyen à Greenwich à 0h UT qui peut être calculé à partir d’un polynôme fonction du temps écoulé en siècle depuis le 1er Jan 2000 à 12h UT (effet de précession pris en compte). On notera aussi : $24/23h56m04s = 1.002737908$. On a aussi : $\text{GMST} = \text{LMST} - \lambda$

Leap Second désigne la seconde intercalaire ajoutée à UTC afin d’obtenir le temps UT. Lorsque la différence entre UT et UTC dépasser 0.9 sec il faut ajouter une seconde intercalaire à UTC. La prise de cette seconde intercalaire devrait être abandonnée en 2035 [643].

Temps TAI ou “Temps Atomique International” désigne le temps des horloges atomiques non ajusté donc : $\text{TAI} = \text{UTC} + \text{dAT}$ ou $\text{dAT} = \sum \text{Leap seconds}$ la somme de toutes les leap secondes déjà accumulées depuis 1972 et vaut +37 sec depuis 2017 et encore en 2024 [760]. Aussi le 1er Janvier 1958 : $\text{dAT} = 0$ alors $\text{TAI} = \text{UT1}$ et aussi $TT = \text{UTC} + 32.184\text{sec}$.

Différence TAI / UTC en 2024



Credit : J.G. Gricourt

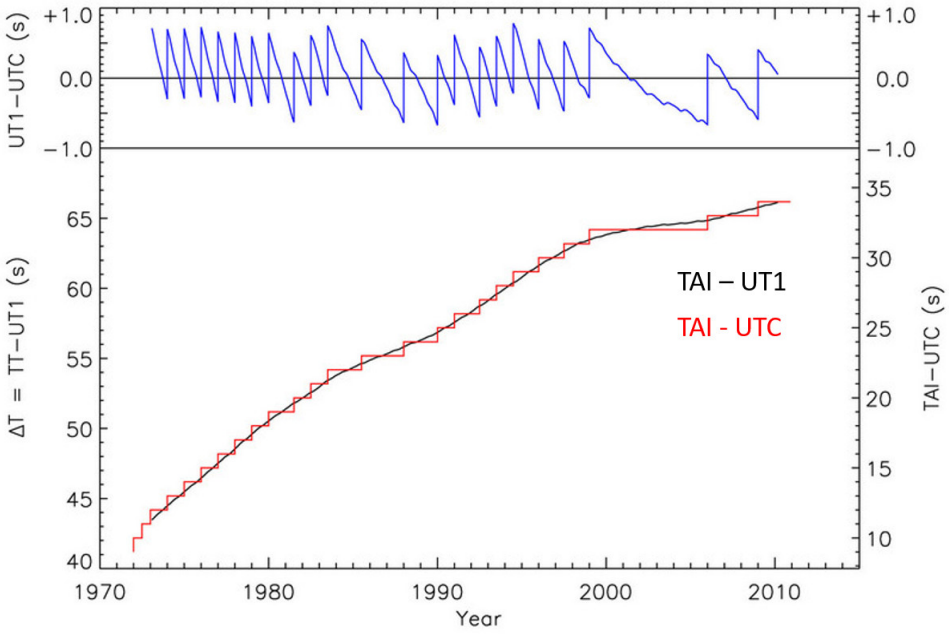
Donc au moins depuis 1972 la Terre ralenti mais celle ci semble s’accélérer en 2024.

Temps GPS est le temps utilisé par le système de navigation par satellite et repose sur des horloges atomique très stables. Par définition : $\text{TAI} - \text{GPS} = 19sec$. Ce temps affichait zéro le 6 Janvier 1980 lorsqu’il fût mis en route.

Temps TT ou “Terrestrial Time” ou “Terrestrial Dynamic Time” ou “TDT” ou “JDE” ou “TE” désigne une base de temps indépendante des irrégularités de la rotation terrestre. Ce temps est utilisé dans le calcul des éphémérides. TT peut être calculé par l'observation des leap seconds cumulées dAT, par définition : $TT - \text{TAI} = 32.184\text{sec}$ et par déduction : $TT = \text{UTC} + \text{dAT} + 32.184\text{sec}$. Depuis 2017 on a : $TT - \text{UTC} = 37 + 32.184 = 69.184\text{sec}$. TT peut aussi être estimé pour n'importe qu'elle période par la différence : $dT = TT - \text{UT1}$ où $\text{UT1} \approx \text{UTC}$ qui est donnée par des formules polynomiales [334, 322]. Dans le livre de Jean-Meeus : $\text{JDE} = TT = \text{UTC} + dT$.

Temps TZ ou “Time Zone” désigne le fuseau horaire d'un lieu utilisé dans le calcul du temps légal : LT = UTC+TZ+DST.

Temps UT ou “TU” ou “Universal Time” ou “UT” ou “UT1” désigne le temps basé sur l'observation de la rotation de la Terre pa rapport au soleil. Cette rotation étant irrégulière cette base de temps ne peut pas être utilisée au quotidien, c'est le temps UTC qui est alors utilisé. La différence entre UT et UTC ne doit pas dépasser 0.9 sec. UT est donc le temps solaire moyen à Greenwich : UT = GMSOT.



Credit : Robert Harry van Gent

Temps UTC ou “Universal Coordinated Time” ou “Temps Universel Coordonné” désigne le temps des horloges atomiques ajusté régulièrement par la leap seconde pour garantir que : $\text{UTC} - \text{UT1} \leq 0.9$ sec et cela depuis 1972. Les serveurs informatiques NTP sur lesquels se synchronise tous les ordinateurs personnels donne le temps UTC.

Temps solaire apparent ou “LSOT” ou “Local Solar Time” désigne le temps solaire, c'est à dire le temps écoulé depuis le passage du soleil par le méridien du lieu c'est le temps indiqué par le cadran solaire. Il s'agit aussi de l'angle horaire du soleil auquel on a ajouté 12h : $\text{LSOT} = H_{\text{soleil}} + 12h$ car par définition lorsque le soleil passe par le méridien du lieu il est 12h. On a aussi : $\text{GSOT} = \text{LSOT} - \lambda$

Temps solaire apparent à Greenwich ou “GSOT” ou “Greenwich Solar Time” désigne le temps solaire vrai à Greenwich.

Temps solaire moyen ou “LMSOT” ou “Local Mean Solar Time” désigne le temps solaire moyen.

Temps solaire moyen à Greenwich ou “GMSOT” ou “Greenwich Mean Solar Time” désigne le temps solaire moyen à Greenwich. On a aussi : $\text{GMSOT} = \text{LMSOT} - \lambda$

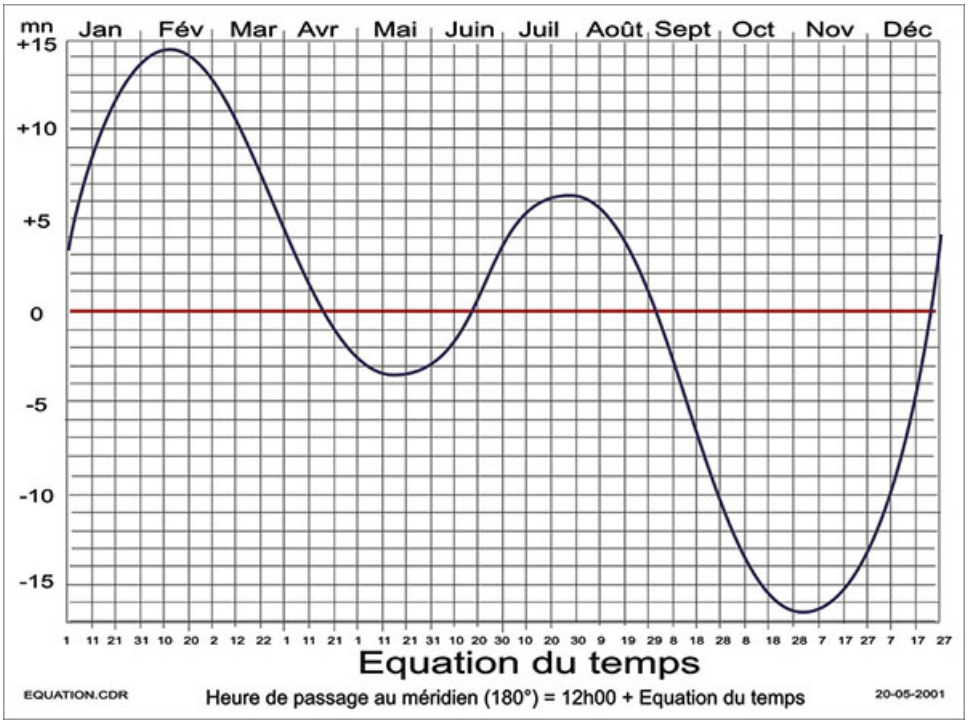
Equation du Temps désigne la différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire apparent (observé) selon la définition de Jean Meeus et des Almanachs. : $E = \text{LMSOT} - \text{LSOT} = \text{GMSOT} - \text{GSOT}$. Le temps solaire moyen est basé une durée du jour de 24h exactement alors que la durée du jour du temps solaire observé peut varier de -14 min à +16 min. La raison de ces avances ou retards sont :

1. La vitesse apparente variable du soleil projetée sur l'équateur en raison de l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'écliptique
2. La vitesse de la Terre variable sur son orbite en raison de l'excentricité de l'orbite (2ème lois de Kepler)

Par définition le temps solaire local observé du lieu s'écrit : $\text{LSOT} = UT + \lambda - E$.

L'équation du temps est aussi la différence entre l'ascension droite apparente du soleil et l'ascension droite moyenne du soleil : $E = \alpha_{\text{mean}} - \alpha$.

Equation du Temps



Credit : Jacques DASSIÉ

Calendrier grégorien désigne le calendrier encore en vigueur aujourd'hui. Ce calendrier a remplacé le calendrier Julien qui était en place depuis l'époque romaine où l'année moyenne durait 365.25 jours. Au moment du changement de calendrier, le jeudi 4 octobre 1582 devint le vendredi 15 octobre 1582 et cela afin de recaler l'année courante sur l'année tropique et d'instaurer de nouvelles règles pour les années bissextiles de manière que le retour du soleil au point Vernal γ se produise invariablement à la même date (le 20 mars actuellement). Grace à l'introduction des années bissextiles, les saisons ne se décalent plus autant au cours des siècles. Dans le calendrier Grégorien l'année dure en moyenne 365.2425 jours une valeur très proche de la durée effective de l'année tropique 365.2421898 jours.

Années bissextiles désigne les années du calendrier Grégorien auxquels on a ajouté 1 jour supplémentaire qui devient le 29 Février. Les années sont considérées bissextiles que si elles sont divisible par 4 sauf les années se terminant par zéro qui doivent aussi être divisible par 400. Le calendrier Julien antérieur au calendrier Grégorien incluait déjà la règle de divisibilité par 4 ce qui donnait déjà une année moyenne de 365.25 jours.

Jour julien ou “Julien Day” ou “JD” désigne le temps UT exprimé en jour écoulés depuis le 1er janvier -4712 à 12h UT. Cette base de temps stable ayant pour origine le calendrier Julien est celle utilisée par le CNES et la NASA pour mesurer le temps écoulé.

Jour julien des éphémérides ou “JDE” ou “Julian Ephemeris Day” désigne le le temps TT exprimé en jour écoulé depuis le 1er janvier -4712 à 12h TT.

Temps moyen de Greenwich “GMT” ou “Greenwich Mean Time” désigne une base de temps obsolète qui a été longtemps utilisée dans le sens de temps solaire moyen à Greenwich où la journée commençait alors à 12h (soit 0h GMT) comme c'est le cas pour le jour julien, et cela, jusqu'en 1925. Depuis, cette base de temps est utilisée dans le sens UT et ensuite au sens UTC depuis 1972.

Temps légal moyen d'été “LMT” ou “Legal Mean Time” désigne l'heure légale “moyenne” c'est à dire l'heure légale sans tenir compte de la DST locale qui s'appliquerait. En France le temps au légal moyen vaut : $\mathrm{LMT} = \mathrm{UTC} + 1h$ car $TZ = 1h$.

Heure d'été ou “DST” ou “Daylight Saving Time ’ désigne la convention local de changement d'heure été / hiver, c'est à dire le temps ajouté ou retranché à certain moment de l'année au temps du fuseau horaire local pour obtenir l'heure légale. En France, il s'agit de l'ajustement de l'heure d'hiver/heure d'été pour lequel on rajoute 1h en été à l'heure LMT : $\mathrm{LT}_{\text{été}} = \mathrm{LMT} + 1h$ et on retranche 1h en hiver à l'heure légale : $\mathrm{LT}_{hiver} = \mathrm{LT}_{\text{été}} - 1h$ donc $\mathrm{DST} = +1h$ en été et $\mathrm{DST} = +0h$ en hiver.

2.3 Les Positions

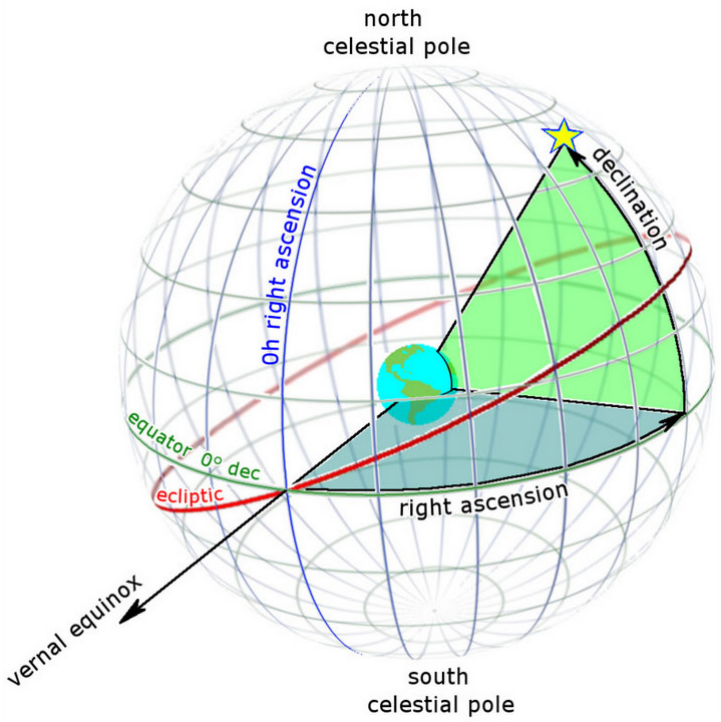
Coordonnées Equatoriale désigne un système de coordonnées permettant de localiser les objets sur le ciel. La première coordonnée est l'ascension droite α mesurée sur l'équateur terrestre et exprimé en angle horaire. La seconde coordonnée est la déclinaison δ mesurée sur le méridien et exprimé en degré.

Ascension Droite ou “AD” ou α désigne l'une des 2 composantes du système de coordonnées équatoriales permettant de localiser les objets dans le ciel. L'origine des ascensions droites est le point Vernal γ.

Angle Horaire désigne l'angle parcouru par un astre depuis son passage par le méridien du lieu et compté positivement vers l'Ouest. L'angle horaire s'écrit : $H = \mathrm{LST} - \alpha$.

Déclinaison ou “DEC” ou β désigne l'une des 2 composantes du système de coordonnées équatoriales permettant de localiser les objets dans le ciel.

Sphère celeste



Credit : Sky & Telescopes

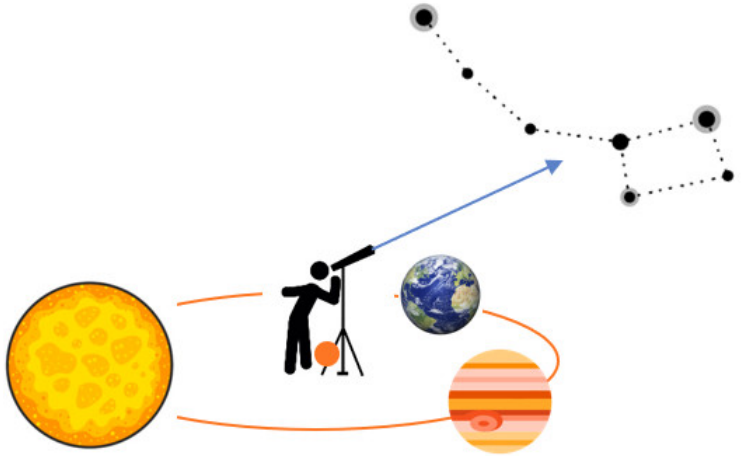
Coordonnées Azimutales ou “Coordonnées Horizontales” désigne un système de coordonnées permettant de localiser les objets sur le ciel. La première coordonnée est la hauteur h mesurée depuis l'horizon du lieu et exprimé en degré. La seconde coordonnée est l'azimut A mesurée à partir du Nord en direction de l'Est et exprimé en degré.

Coordonnées des astres désigne les coordonnées des astres (étoiles, galaxies, planètes) dans un référentiel donné. Les coordonnées des étoiles et des galaxies sont données dans le référentiel du barycentre du système solaire (ICRS). La position astrométrique est celle qui permet de localiser un astre dans le référentiel ayant pour centre le barycentre du système solaire. La position apparente est celle qui permet de localiser un astre dans le référentiel ayant pour centre celui de la Terre. La position topocentrique est celle qui permet de localiser un astre dans le référentiel ayant pour centre celui du point du globe terrestre où est situé l'observateur.

ICRF désigne le repère de référence global dont est issu le répère ICRS. Ce repère est définit par la position de 608 sources radio extragalactiques. Seules 212 de ces sources radio sont utilisé pour définir le répère ICRS.

ICRS désigne le repère de référence dans lequel sont mesurées les coordonnées équatoriales des étoiles. Ce repère est formé à partir de la direction de radios source observées par le VLBI et son centre correspond au barycentre du système solaire. L'ICRS a remplacé l'ancien repère FK5 en 1998.

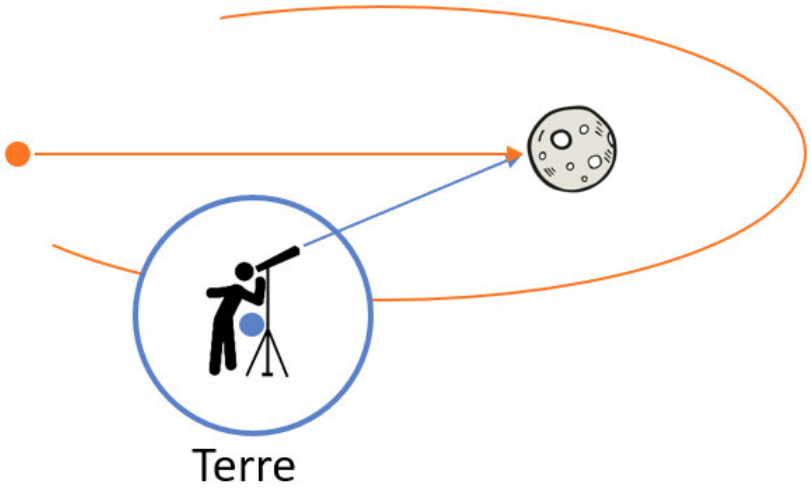
Position Astrométrique :



Système solaire

— Coordonnées équatoriale (α, δ) des étoiles et des objets lointains issues des campagnes de mesures astrométriques des satellites (Hipparcos, Gaia) mesurés à J2000.0
— Coordonnées géométrique (X,Y,Z) position des planètes et des astéroides calculés à l'instant t à partir des théories planétaires (BDL VSOP87, JPL DE430).

Position Apparente ou Géocentrique : le passage à la position apparente se fait en appliquant la correction de parallaxe annuelle et d'autres corrections :

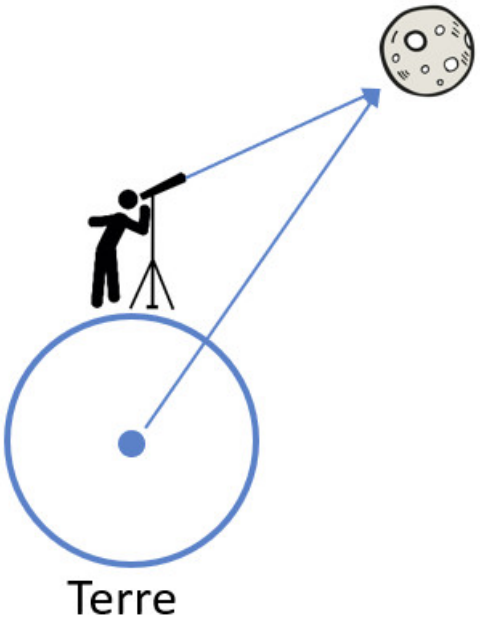


Terre

— Parallaxe annuelle (orbite terrestre, négligeable pour les étoiles lointaines)
— Précession, le mouvement apparent lent (26 000 ans) des pôles
— Nutation, le mouvement apparent rapide (18.6 ans) des pôles
— Aberration annuelle ou "Annual Aberration", une correction de direction apparente liée à $v_{\text{Terre sur son orbite}}/c$
— Mouvement propre (impact la position des étoiles uniquement) : déplacement ou rotation de l'étoile dans le cas d'un système binaire
— Déviation gravitationnelle de la lumière par le soleil (impact la position des étoiles uniquement)
— Correction de la lumière ou "Light-time Correction", une correction de direction apparente liée à $v_{\text{planète sur son orbite}}/c$

Note : la position des planètes est souvent déjà donnée en coordonnées apparentes donc dans le référentiel géocentrique terrestre.

Position Topocentrique : le passage à la position topocentrique se fait en appliquant la correction de parallaxe diurne et d'autres corrections :



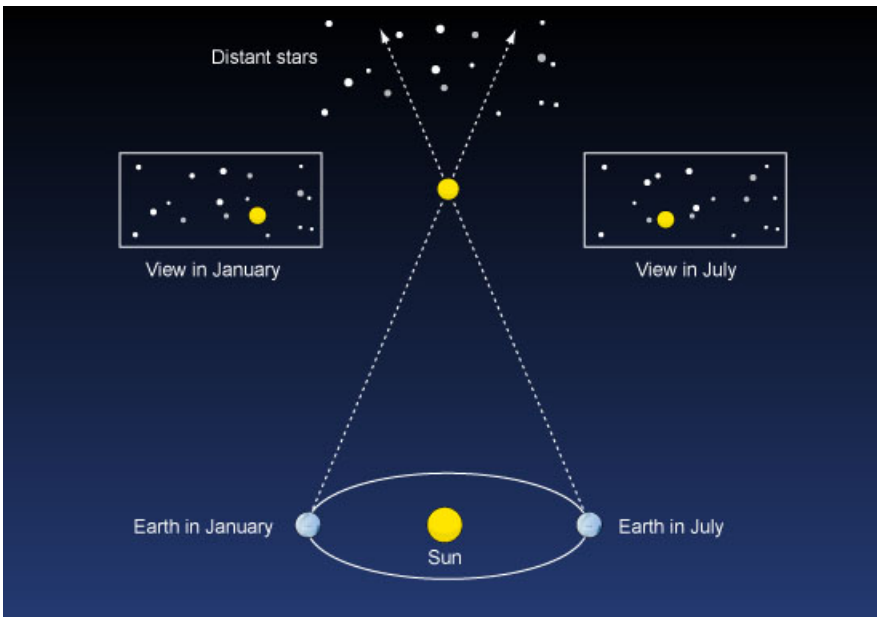
- Parallaxe diurne (rotation terrestre, impact la position des planètes, négligeable pour le étoiles)
- Réfraction atmosphérique
- Aberration diurne ou "Diurnal Aberration", une correction de direction apparente liée $v_{\text{rotation Terre}}/c$
- Mouvement des pôles (axe de rotation / croute terrestre) [1]

Distances il existe plusieurs manières de calculer la distance des objets du ciel.

- Les planètes et les objets du système solaire : la parallaxe diurne (base = diamètre terrestre)
- Les étoiles de la Voie lactée : la parallaxe annuelle (base = orbite autour du soleil)
- Les étoiles variables : la période de variabilité des Céphéides (Type I et II), RR Lyra
- Les supernovas et donc les galaxies qui les contiennent : la courbe de décroissance des Supernova de type Ia
- Les galaxies et les quasars : le redshift

Distance : Parallaxe annuelle désigne l'angle que ferait la distance Terre - Soleil, soit exactement 1 unité astronomique vue depuis cette étoile. La parallaxe permet de calculer la distance des étoiles.

1. Polar Motion



Credit : BBC Science

La mesure de la parallaxe présente des difficultés :

- Ce sont de très petits angles, p = 0.74" pour Proxima Centauri par exemple, à comparer avec la dimension de la figure de Airy produite par l'instrument
- La plupart des étoiles ont un mouvement propre annuel plus important que la mesure de la Parallaxe annuelle
- Les étoiles faisant partie d'un système multiple présentent un mouvement de parcours d'une orbite dont la projection s'ajoute au mouvement propre

La distance se calcul avec : $d = 1/\theta$, où d est exprimé en Parsec et l'angle de Parallaxe est exprimé en arcmin.

Etoile	Constellation	Magnitude	Mouvement propre μ arcmin	Parallaxe arcmin
Proxima Centauri (HIP 70890)	Centaure	11.13	3.86	0.77
Étoile de Barnard (HIP 87937)	Ophiuchus	9.51	10.39	0.55
Wolf 359 (TIC 365006789)	Leo	13.51	4.72	0.42
Lalande 21185 (HD 95735)	Ursa Majoris	7.52	4.81	0.39
Sirius	Canis Majoris	-1.46	1.34	0.38
61 Cygni	Cygnus	5.2	5.28	0.29

Credit : J.G. Gricourt

Calcul de l'amplitude du mouvement propre : $\mu^2 = \mu_{\alpha*}^2 + \mu_\delta^2$, où μ_δ et $\mu_{\alpha*} = \mu_\alpha \cos\delta$ sont donnés dans les catalogues d'étoiles.

Distance : Parsec désigne la distance d'une étoile dont la parallaxe vaudrait exactement 1 arcmin.

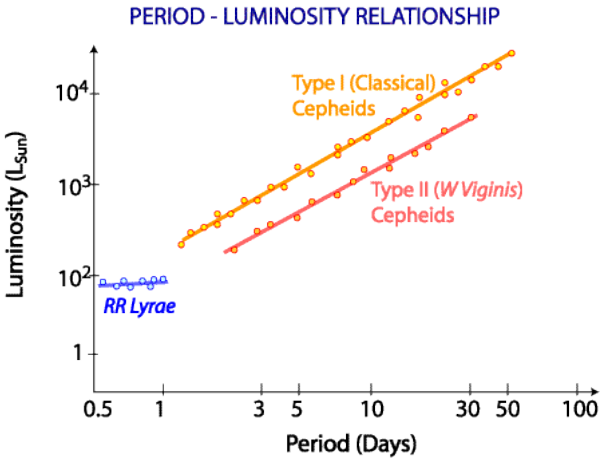
Distance : Année Lumière ou "AL" désigne la distance parcourue par la lumière dans le vide ou par approximation dans l'espace interstellaire en une année. Cette distance correspond à 236 millions de fois le tour de la Terre ou 25 millions de fois la distance Terre/Lune, l'étoile la plus proche Proxima Centauri se trouve à 4.2 AL.

La distance se calcule avec : $d_{\mathrm{AL}} = d/c$, où d est exprimé en km, c'est la vitesse constante de la lumière dans le vide = 299

792 km/sec.

Distance : Période des Céphéides désigne la méthode de détermination de la distance des galaxies contenant des étoiles variables de type Céphéides. Il existe une relation unique entre la période de l'étoile Céphéide et sa luminosité intrinsèque.

Cepheid Variable Stars & Distance Determination



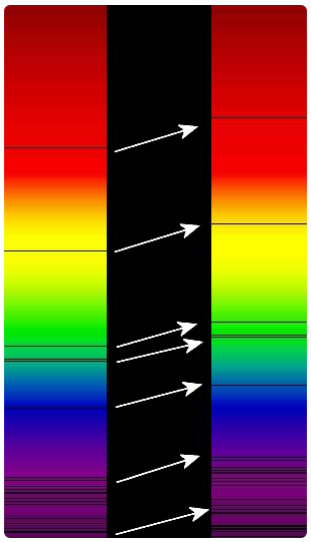
Credit : Australia Telescope National Facility

La distance se calcule avec : $5 \log d = MV + a \log P - b(MV - MI) + c$, où P est la période de variation de l'étoile, MI est la magnitude de l'étoile dans l'IR et MV est la magnitude visuelle de l'étoile.

Les coefficients sont estimés à : [a,b,c] = (3.34,2.45,7.52)

Distance : Redshift désigne la mesure du décalage vers le rouge du spectre des galaxies lointaines en raison de leur vitesse d'éloignement v ou vitesse de récession. L'effet Doppler indique la vitesse : $v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e}$, où λ_e est la longueur d'onde observée du photon au moment de son émission. Le Redshift est la relation : $z = v/c$. C'est la loi découverte par Hubble qui permet de mettre en relation le Redshift avec la distance.

Décalage spectral

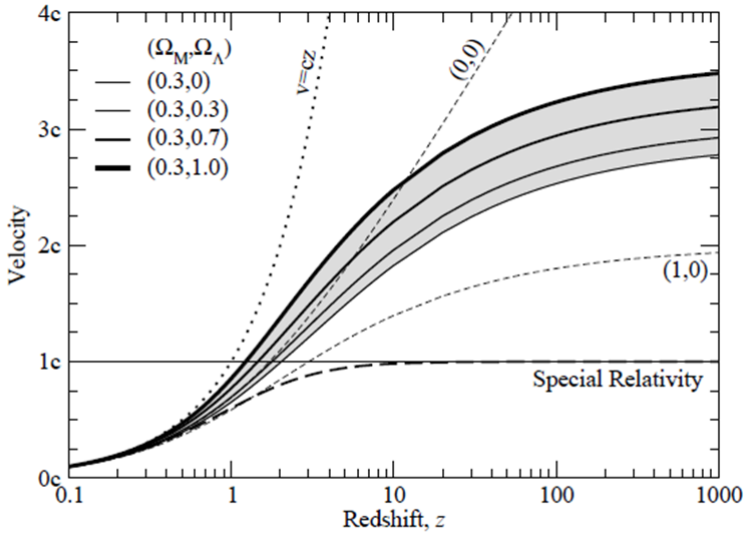


Credit : What do redshifts tell astronomers?

Lorsque $v << c$ ou $z << 1$ la distance exprimée en Mpc se calcul avec : $v = H_0 d \implies d = \frac{cz}{H_0}$, où $H_0 = 70 km/s/Mpc$ est la constante de Hubble.

Lorsque v est proche de c soit z proche de 1 il faut ajouter un terme correctif à la formule dépendant des paramètres cosmologique : Ω_Λ et Ω_M. De même lorsque la galaxie est proche d'un cluster de galaxies, par ex : Virgo Cluster) le modèle n'est plus pertinent.

Redshift and the consmological parameters



Recession velocity vs redshift – shaded region shows the *correct* calculation for a range of cosmological parameters – from Davis & Lineweaver (2003)

Credit : How is the speed in Hubble's law determined, if not from the Doppler shift?

Similairement, un redshift changeant peut être détecté avec des étoiles ordinaires, vers le rouge s'il y a éloignement et vers le bleu s'il y a rapprochement. Cela signifie que l'étoile orbite autour d'un barycentre partagé avec un autre corps céleste invisible qui ne peut être qu'une planète.

Echelles de Distance dans l'Univers ou "Cosmological Distance Ladder" désigne les différentes méthodes permettant de mesurer les distances dans l'univers.

Echelle	Méthode	Objets
En dessous de 12 500km	Radar, Satellites GPS	Les objets terrestres
12 700km - 500 AU	Parallaxe d'après le diamètre terrestre	Les planètes du système solaire
500 AU - 500 pc	Parallaxe d'après le diamètre de l'orbite terrestre	Les étoiles proches
500 pc - 50 kpc	Variable de type RR Lyrae Parallaxe spectroscopique	Les étoiles de la Voie Lactée
50 kpc - 30 Mpc	Variable de type Cepheid	Les galaxies proches
30 Mpc - 3 Gpc	Supernova de type Ia Relation de Tully-Fisher	Les galaxies lointaines
3 Gpc et au delà	La loi de Hubble basée sur le Redshift des galaxies	Les galaxies lointaines et les quasars

Credit : J.G. Gricourt

Note : Parallaxe spectroscopique = voir classement dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, Tully-Fisher = prise en

compte de la vitesse de rotation des galaxies

Distance Cosmologique désigne les différentes notions de distances dans l'univers. Dans un univers en expansion, les galaxies dont la lumière nous parvient maintenant apparaissent plus grandes et moins lumineuses. En effet, celles-ci étaient beaucoup plus près de nous D_A au moment de l'émission de cette lumière et que cette lumière s'est finalement étalée sur une sphère plus grande (perte d'éclat) durant l'expansion de l'univers correspondant à une distance virtuelle D_L.

La distance angulaire D_A est la distance de la galaxie au moment où la lumière avait été émise : $D_A = \frac{D_C}{1+z}$

La distance comobile D_C est la distance de la galaxie au moment où la lumière a été reçue, du fait de l'expansion de l'univers, elle se calcule directement par la loi de Hubble : $D_C = \frac{c \times z}{H_0}$ où $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_e}$ est le redshift observé de la galaxie, H_0 la constante de Hubble, λ_e la longueur d'onde à l'émission et $\Delta\lambda = \lambda_o - \lambda_e$ la différence avec l'observation (décalage vers le rouge) [297]. La distance comobile donnée par la loi de Hubble est une approximation grossière valable pour $z < 0.1$.

La distance de luminosité D_L est la distance virtuelle de la galaxie correspondant à son éclat observé (moindre qu'attendu) par rapport à son éclat absolu $D_L = (1+z)D_C$

La distance D_P est la distance parcourue par la lumière au moment où la lumière avait été émise.

La magnitude absolue (à 10 parsec) de la galaxie s'écrit : $M = m - 5\,[Log_{10}(D_L) - 1]$

Enfin il y a la distance parcourue par la lumière D_P depuis l'instant où celle-ci a été émise jusqu'au moment où celle-ci a été reçue : $D_A < D_P < D_C < D_L$.

L'univers observable est âgé de 13 Milliards d'années. Les objets les plus anciens que nous observons étaient situés à 13 Gly est celui dont nous recevons la lumière actuellement et qui était situé à une distance de 13 AL au moment de l'émission de cette lumière. Aujourd'hui du fait que l'univers s'étend, cette limite a été reléguée à 46 AL, c'est l'horizon cosmologique.

2.4 Mécanique Céleste

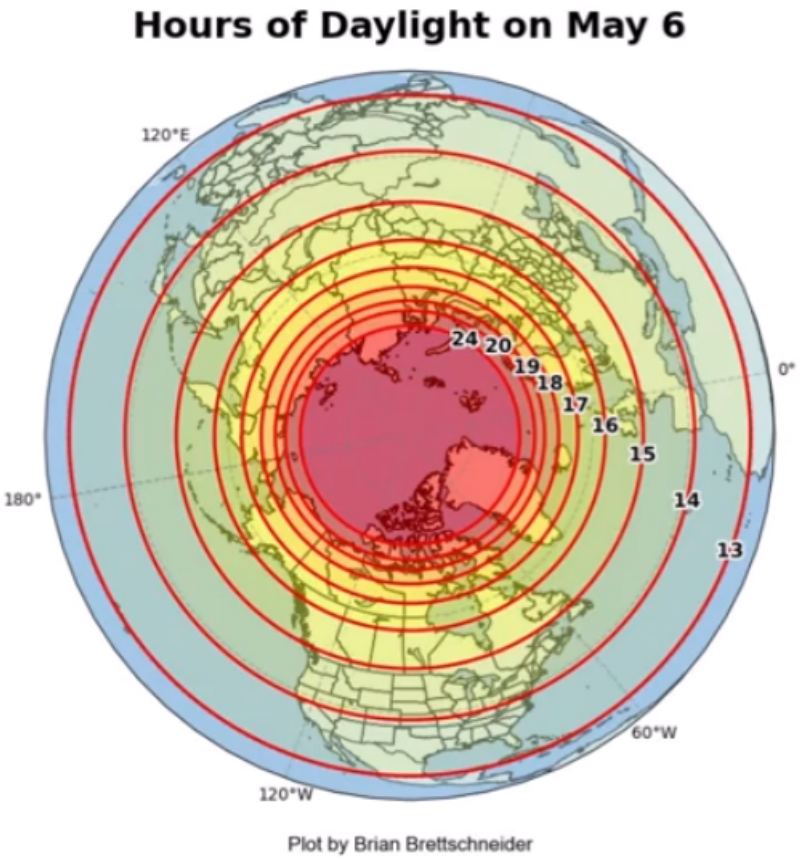
Solstice désigne 2 dates dans l'année, le 21 Décembre et le 21 Juin.

Dans les régions du Nord situées au dessus de l'équateur c'est au moment du solstice d'hiver que le soleil est le plus bas sur l'horizon au moment du passage au méridien vers 12h et c'est au moment du solstice d'été que le soleil est au plus haut au moment du passage au méridien vers 12h. Dans la bande inter-tropical donc entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne le soleil se trouve à la vertical du lieu au moment du solstice d'été pour la zone intertropicale Nord et au moment du solstice d'été pour la zone intertropicale Sud. La durée du jour atteins son minimum au moment du Solstice

Régions du Boréales situées au dessus de l'équateur :

- Les solstices sont : 21 Décembre = Solstice d'hiver et le 21 Juin = Solstice d'été
- C'est au moment du solstice d'hiver que le soleil est le plus bas sur l'horizon au moment du passage au méridien vers 12h
- C'est au moment du solstice d'été que le soleil est au plus haut au moment du passage au méridien vers 12h
- Le soleil se trouve à la vertical du tropique du Cancer au moment du solstice d'été
- Le soleil se trouve à la vertical du tropique du Capricorne au moment du solstice d'hiver
- Au pôle Nord il y a 6 mois de jours et 6 mois de nuit permanente

La durée du jour tout au long de l'année (animation)

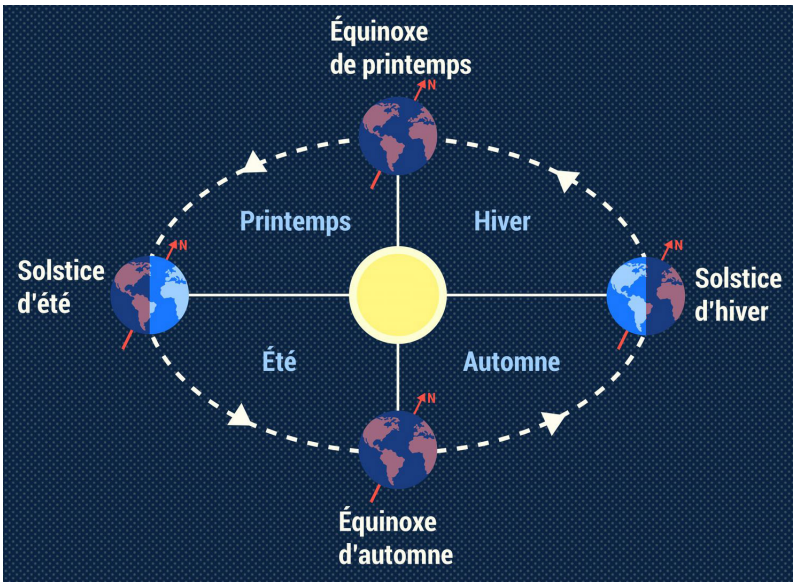


Credit : Brian Brettschneider

Régions du Australes situées au dessus de l'équateur :

- Les solstices sont : 21 Décembre = Solstice d'été et le 21 Juin = Solstice d'hiver
- C'est au moment du solstice d'hiver que le soleil est le plus bas sur l'horizon au moment du passage au méridien vers 12h
- C'est au moment du solstice d'été que le soleil est au plus haut au moment du passage au méridien vers 12h
- Le soleil se trouve à la vertical du lieu au moment du solstice d'été sans la bande inter-tropical Nord (entre le tropique du Cancer et le tropique du Capricorne)
- Le soleil se trouve à la vertical du tropique du Cancer au moment du solstice d'hiver
- Le soleil se trouve à la vertical du tropique du Capricorne au moment du solstice d'été
- Au pôle Sud il y a 6 mois de jours et 6 mois de nuit permanente

Les saisons



Credit : RTBF Actu

Equinoxe désigne 2 dates dans l'année, le 21 Septembre = Equinoxe d'automne et le 20 Mars = Equinoxe de printemps.

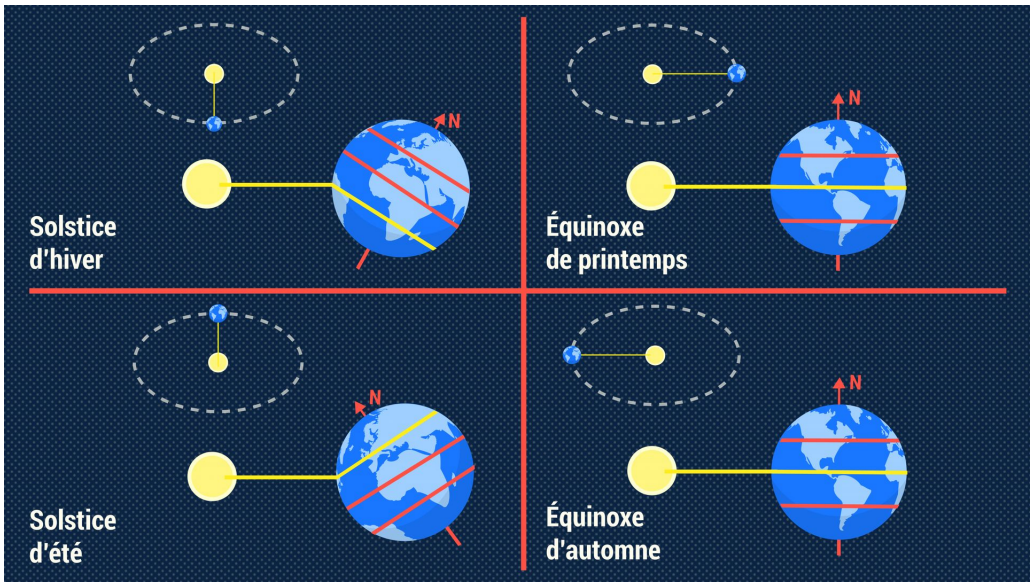
Régions du Boréales situées au dessus de l'équateur :

- Les équinoxes sont : 21 Septembre = Equinoxe d'automne et le 20 Mars = Equinoxe de printemps
- C'est au moment des équinoxes que la durée du jour égale celle de la nuit
- Le soleil se trouve à la vertical de l'équateur au moment des 2 équinoxes

Régions du Australes situées au dessus de l'équateur :

- Les solstices sont : 21 Septembre = Equinoxe de printemps et le 20 Mars = Equinoxe d'automne
- C'est au moment des équinoxes que la durée du jour égale celle de la nuit
- Le soleil se trouve à la vertical de l'équateur au moment des 2 équinoxes

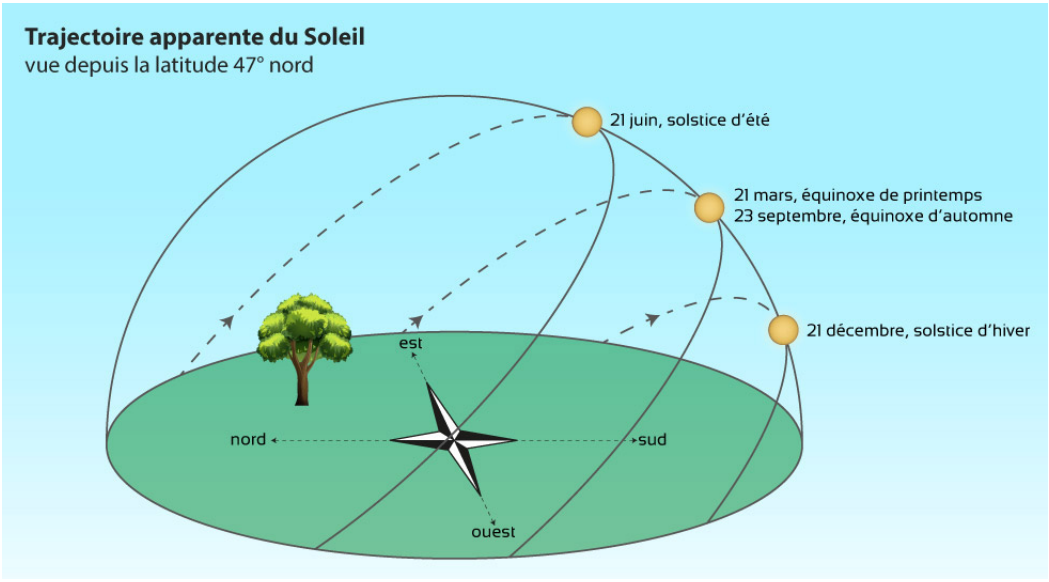
Equinoxes et Solstices



Credit : RTBF Actu

Lever/coucher désigne le moment où un astre se lève ou se couche à l'horizon. Pour déterminer ce moment il faut calculer la position de l'astre lorsque celui-ci franchi l'horizon. Pour la lune et le soleil, c'est la position de leur centre qui est pris en compte. Il faut ensuite prendre en compte un facteur correctif h0 qui est la somme de plusieurs corrections : $h0 = \pi - R - d/2 - \eta 1 + \eta 2$

Lever / Coucher du soleil



Credit : Stelvision

Détail des corrections :

— π : la parallaxe éventuelle de l'objet pour la lune c'est 57.5' mais négligeable pour les autres objets
— R : la réfraction atmosphérique = 36' 36" (théorie de Radeau)

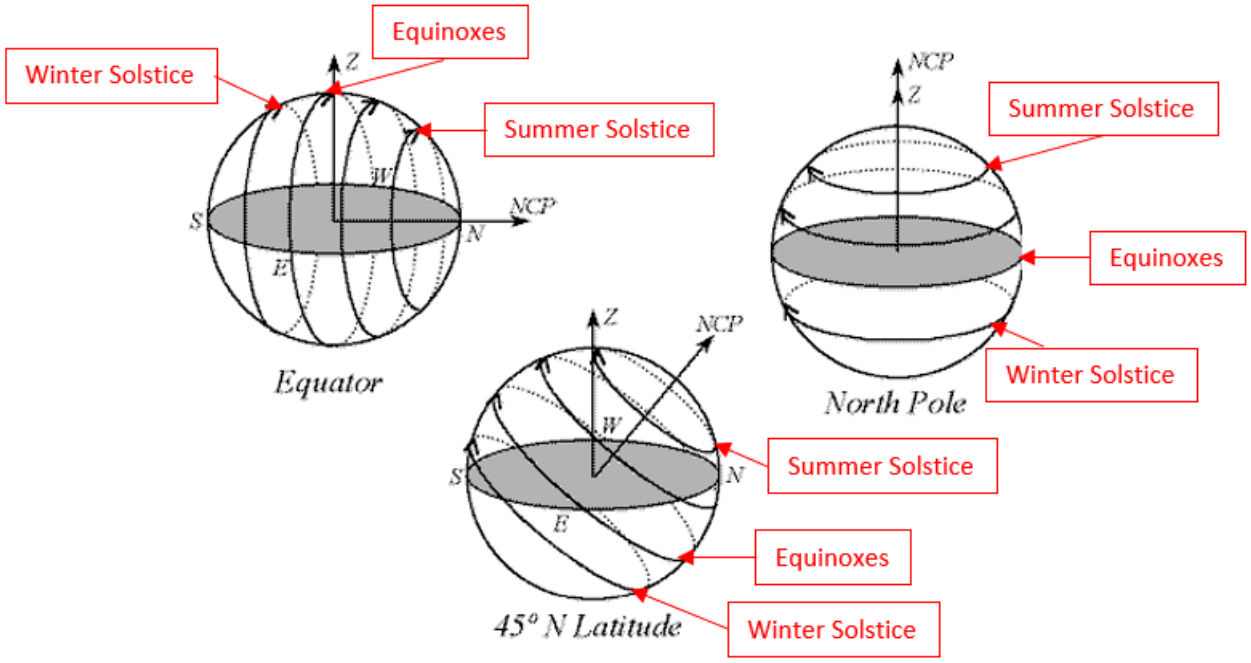
— d/2 : le demi diamètre angulaire de l'objet pour la lune et le soleil, c'est environ 16', mais négligeable pour les autres objets
— $\eta 1$: c'est la correction angulaire de l'altitude de l'observateur
— $\eta 2$: c'est la hauteur angulaire d'un éventuel obstacle

Au total :

— $h0 = -34'$: Etoiles (réfraction)
— $h0 = -34' - 16' = -50'$: Soleil (réfraction + demi diamètre)
— $h0 = -34' - 16' - 57.5' = +7.5' = +0.125°$: Lune (réfraction + demi diamètre + parallaxe)

Astre Circumpolaire désigne une astre dont le cercle de rotation est constamment visible depuis un lieu donné sur Terre.

Daily & Annual Motions



Credit : Richard Pogge - Ohio State University

La condition à respecter est la suivante :

— Depuis les latitudes de l'hémisphère nord $\phi > 0$: $\delta + \phi \geq 90°$
— Depuis les latitudes de l'hémisphère sud $\phi < 0$ sud : $\delta + \phi \leq -90°$

Le pôle Nord :

— Le pôle Nord voit en permanence la moitié de la sphère céleste c'est à dire toutes les étoiles dont $\delta > 0°$.
— La course du Soleil se faisant sur le plan de écliptique, celui ci est en permanence invisible (nuit polaire) durant l'hiver boréal à partir du solstice d'hiver (21 Décembre), c'est au moment de l'équinoxe de printemps (20 Mars) que celui ci ré-apparait (au raz de l'horizon au début), c'est au moment du solstice d'été (21 Juin) que celui ci atteint sa hauteur maximale de 23.5° (inclinaison écliptique / équateur), et il disparait du ciel (au raz de l'horizon au début) à partir de l'équinoxe d'automne (23 Septembre).

En conséquence la lumière du jour n'est visible que 6 mois dans l'année.

C'est à partir du cercle arctique Nord que le soleil ne se couche pas au moins 1 jour dans l'année, au solstice d'été sur le cercle exactement et ne se lève pas au moins 1 jour dans l'année, ce jour correspond au solstice d'hiver sur le cercle exactement.

Le pôle Sud :

— Le pôle Nord voit en permanence la moitié de la sphère céleste c'est à dire toutes les étoiles dont $\delta < 0°$.
— La course du Soleil se faisant sur le plan de écliptique, celui ci est en permanence invisible (nuit polaire) durant l'été boréal à partir du solstice d'été (21 Juin), c'est au moment de l'équinoxe d'automne (21 Septembre) que celui ci ré-apparait (au raz de l'horizon au début), c'est au moment du solstice d'hiver (21 Décembre) que celui ci atteint sa hauteur maximale de 23.5° (inclinaison écliptique / équateur), et il disparait du ciel (au raz de l'horizon au début) à partir de l'équinoxe de printemps (20 Mars).

En conséquence la lumière du jour n'est visible que 6 mois dans l'année.

C'est à partir du cercle arctique Sud que le soleil ne se couche pas au moins 1 jour dans l'année, au solstice d'été sur le cercle exactement et ne se lève pas au moins 1 jour dans l'année, ce jour correspond au solstice d'hiver sur le cercle exactement.

L'équateur :

— Les pôles célestes sont invisibles car ils touchent l'horizon.
— L'écliptique étant très haut sur l'horizon comme dans toute la bande inter-tropicale, ce sont les endroits les plus favorables pour observer les planètes (hautes dans el ciel).
— La course du Soleil se faisant sur le plan de écliptique, celui ci est au zénith au moment des équinoxes, celui ci ne descend jamais plus bas que $90 - 23.5 = 66.5°$.

En conséquence la lumière du jour est visible 12h chaque jour et toute l'année (levé à 6h et couché à 18h).

Astre Invisible désigne une astre dont le cercle de rotation est constamment invisible depuis un lieu donné sur Terre. La condition à respecter est la suivante :

— Depuis les latitudes de l'hémisphère nord $\phi > 0 : \delta - \phi \geq 90°$
— Depuis les latitudes de l'hémisphère sud $\phi < 0 : \delta - \phi \leq -90°$

Astre Altitude Max désigne l'atitude maximum ou hauteur au dessus de l'horizon d'un astre : $\text{Alt} = 90 - |\phi - \delta|$. Un astre invisible sous une certaine latitude ne dépasse jamais l'horizon. Cette altitude max est atteinte au passage du méridien du côté sud pour l'hémisphère sud et du côté nord pour l'hémisphère sud.

Précession des Equinoxes désigne le mouvement des pôles autour d'un cercle en 26 000 ans dû à l'attraction combinée de la lune et du soleil, c'est ce que l'ont appel la précession des équinoxes. Depuis la réforme Grégorienne notre calendrier suis l'année tropique pour être calé sur l'équinoxe de printemps (donc pas de décalage). D'autres éléments viennent cependant perturber ce cycle de :

1. Glissement du périhélie de l'orbite terrestre (période de 135 000 ans)
2. Variation de l'excentricité (période de 413 000 ans)

Actuellement, en raison de la précession, le point vernal se décale de 50" sur l'écliptique tous les ans.

Calendrier Grégorien

JULIAN 1582		October			Gregorian 1582	
Sun	Mon	Tues	Wed	Thurs	Fri	Sat
	1	2	3	4	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

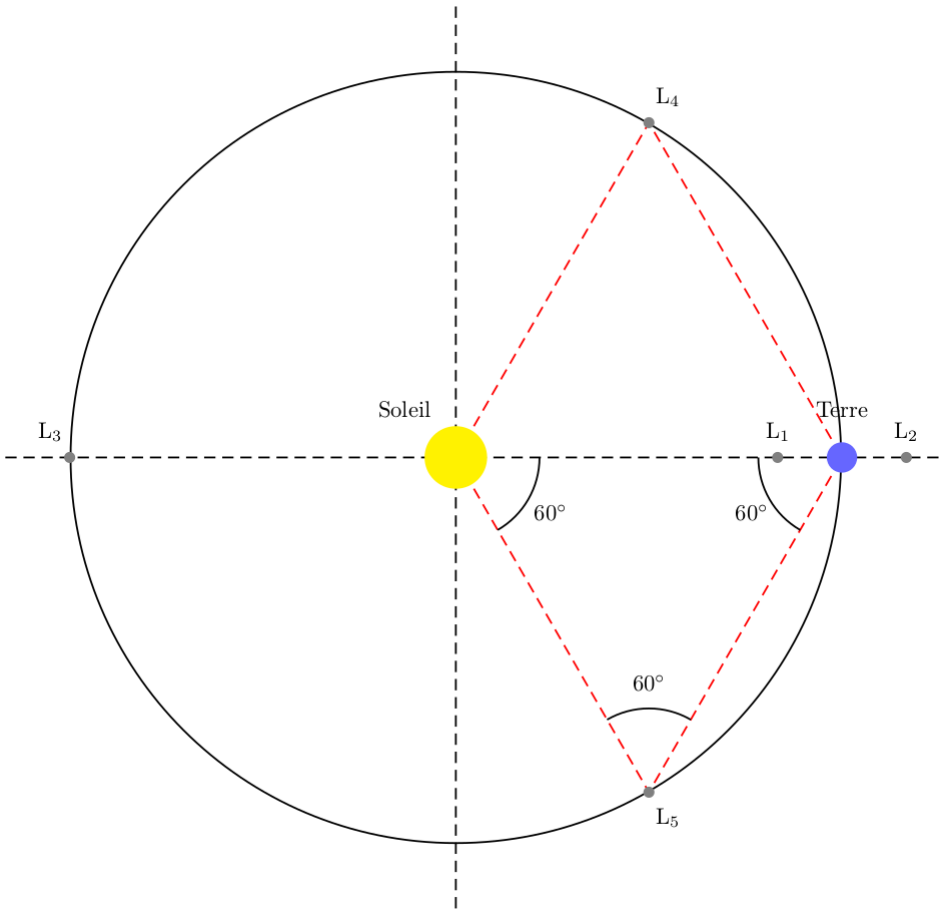
Credit : Carteland

Nutation désigne le mouvement oscillatoire des pôles autour de la position moyenne sur le cercle de précession. Ce mouvement dû à l'attraction de a lune à une période de 18.3 ans. Cet effet s'ajoute aux variations millénaires de l'obliquité de l'axe des pôles de la Terre.

Obliquité de l'Ecliptique désigne l'inclinaison de l'axe des pôles par rapport à l'axe du plan de l'écliptique (le plan orbital sur lequel se déplace la Terre). Cette inclinaison de 23.3 arcmin en moyenne varie sur un cycle de 42 000 ans auquel il faut ajouter l'effet de la nutation.

Lagrange ou "Points de Lagrange" sont des points remarquables de l'espace dans un système à 2 corps, ex : Terre - soleil. Lorsqu'un corps de masse négligeable est positionné sur ces points, l'ensemble des forces qui s'exerce sur lui s'annulent et sa position devient alors stable. Il existe 3 points de Lagrange instable : L1, L2, L3, ils sont instables, car une petite erreur de positionnement sur ces points et le corps se met à dériver, et 2 points stables : L4 L5. Dans le cas du système Jupiter - Soleil les points L4 et L5 sont occupés par les astéroïdes Troyens.

Poisition des 5 points de Lagrange



Credit : Wikipedia

Point Vernal désigne l'intersection de l'équateur céleste avec l'écliptique. Le point Vernal γ correspond à la direction du Soleil à l'équinoxe de printemps. Étant donnée le mouvement de précession des pôles le point vernal se déplace actuellement de 50 arcmin soit 1 arcmin tous les 72 ans environ sur l'écliptique.

2.5 L'Atmosphère, la PL, le Seeing, la Nuit

Diffusion Atmosphérique désigne la diffusion de la lumière du soleil par la haute atmosphère.

Il existe 2 types de diffusion :

- La diffusion de Rayleigh est provoquée par les atomes ou les molécules, car celles-ci sont inférieures à la longueur d'onde de la lumière $\lambda < 1/10$
- La diffusion de Raman est un cas particulier de la diffusion de Rayleigh où les choc entre photons et molécules est inélastique, perte d'energie des photons et donc changement de longueur d'onde, cet effet est insignifiant par rapport à la diffusion (élastique) de Rayleigh.
- La diffusion de Mie provoquée par des poussières ou des gouttes d'eau de l'atmosphère dont la taille est supérieure à la longueur d'onde de la lumière.

La couleur bleue du ciel ou rougeâtre au moment du coucher du soleil provient de la diffusion de Rayleigh, la lumière de longueur d'onde plus courte (bleu) est diffusé par les molécules de l'air alors que la lumière d'onde plus longue passe au

travers. C'est la diffusion de Rayleigh qui donne la couleur bleue au ciel et rend le soleil rouge lorsqu'il est bas sur l'horizon. La couleur blanche ou grise des nuages ainsi que les couleurs de l'arc-en-ciel proviennent de la diffusion de Mie uniquement.

Turbulence Atmosphérique désigne les mouvements d'air chaotiques qui se produisent dans l'atmosphère entre 0 et 100km. Le turbulence se produit en raison des différentes bulle d'air chaudes et froides qui interagissent dans l'atmosphère. La turbulence est le résultat de la variation temporelle de l'indice de réfraction de l'air le long de la ligne de visée [2].

André Couderc à dit : *L'air est la plus mauvaise partie de l'instrument... Construction du télescope d'amateur - page 263*

L'indice de réfraction n de l'air moyen est de 1.0 mais il peut varier selon [644] :

- Pression atmosphérique P (hPa)
- La température T (Kelvin)
- Pression en vapeur d'eau e (hPa)

Formule du co-indice $N = (n-1)10^6$ vaut : $N = 77.6 \times \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$

La turbulence se manifeste en faisant scintiller les étoiles ou en produisant des ondulations visibles la surface des planètes observées au travers d'instruments. La turbulence atmosphérique détériore la netteté des images que ce soit lors d'observation visuelle ou en imagerie [397].

L'angle d'isoplanétisme θ_0 mesure l'influence de la turbulence localement sur l'image. Il s'agit de l'angle de distance angulaire maximal entre 2 étoiles pour lequelles la turbulence influera de manière identique on obtient alors exactement le même schéma (pattern) de tavelures pour les 2 étoiles [562, 54, 59] : $\theta_0 = 0.314 \times \frac{r_0}{h}$ où h est l'altitude des couches turbulentes [148].

Le temps de cohérence τ_0 mesure l'influence de la turbulence temporellement sur l'image. Il s'agit, du laps de temps de déplacement du front d'onde sur la dimension du paramètre de Fried r_0 = la plus grande cellule d'air stable : $\tau_0 = \frac{r_0}{v}$ où v est la vitesse du vent de l'atmosphère [791]. Un temps de cohérence court nécessite de poser plus court en astrophoto pour juguler la turbulence [113].

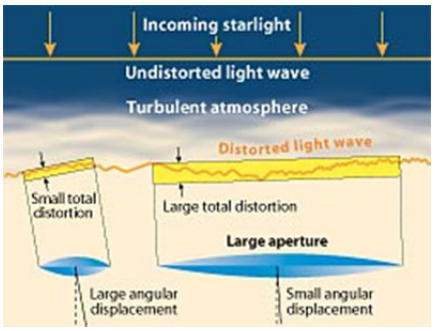
Pour pratiquer du Lucky Imaging il faut 2 conditions :

- $D \leq r_0$ (diamètre)
- $tp \leq \tau_0$ (temps de pose)

Les instruments de grands diamètres sont plus sensibles à la turbulence car ils regardent au travers une plus large couche de l'atmosphère que les petits diamètres. Sans atmosphère, le front d'onde d'une étoile est normalement plat, perpendiculaire à l'axe de visée et ne subissant aucun déphasage,. Avec de la turbulence le front d'onde devient très chaotique à grande échelle, mais plus faiblement chaotique à petite échelle. Cela a pour conséquence de limiter les grossissements utilisables pour les grands diamètres et de favoriser les petits diamètres (lunette de 100 mm) pour les forts grossissements [27].

2. "Large apertures are disproportionately handicapped by atmospheric turbulence." Page 60, Sky & Telescope, January 2022.

How to Successfully Beat Atmospheric Seeing



Credit : Sky & Telescopes

Calcul de la FWHM de l'étoile sur la photo en valeur σ_{RMS} [411] :

$$\sigma_{\text{FWHM (photo)}} = 2.355\sqrt{\sigma^2_{\text{RMS (seeing)}} + \sigma^2_{\text{RMS (suivi)}} + \sigma^2_{\text{RMS (aberrations instrument)}}}$$

Lorsque l'instrument et le suivi de la monture ne sont pas les facteurs limitant alors la FWHM observée correspond bien au seeing.

Lorsque l'on généralise par exemple le critère de Maréchal on doit écrire qu'un instrument est limité par la diffraction si [114] :

$$\sqrt{\sigma^2_{\text{RMS (seeing)}} + \sigma^2_{\text{RMS (suivi)}} + \sigma^2_{\text{RMS (aberrations instrument)}}} < \frac{\lambda}{14}$$

Attention l'utilisation d'une distribution de Gauss pour modéliser la PSF d'une étoile en photo (les formules données plus haut) est une approximation plutôt pessimiste, on préférera utiliser une distribution de Moffat pour plus de précision.

Le paramètre de Fried r_0 Ce paramètre mesure la dimension de la plus grande cellule d'air stable avec une variation RMS du front d'onde égale ou meilleure que $PV = \lambda/(2\pi) = \lambda/6.28$ (1 radian sur le ciel) et ce sur une période donnée on parle alors de zones cohérentes. Par déduction ce paramètre donnera la diamètre maximum de l'instrument qui pourra bénéficier de sa résolution théorique sous des conditions de turbulence données. En général le paramètre de Fried atteint rarement un niveau permettant d'exploiter les 200 mm au sol toutefois un gros diamètre peut profiter de manière épisodique des trous de turbulence, ces instants où la turbulence se fige momentanément et où tout le potentiel de l'instrument peut alors être exploité. Cependant, c'est dans l'apport de lumière dans des grossissements plus importants que les gros diamètres sont malgré tout utiles, même si la turbulence limite la résolution effective.

La relation permettant de retrouver le seeing en arcsec par rapport au paramètre de Fried : $R_{\text{seeing}} = \frac{138}{r_0}$

Bruce McEvoy à dit : *Some of the best observing sites in the world average an r0 of 10 to 15 cm, which means that all telescopes of aperture greater than about 6" would perform at less than their diffraction limits.* [82]

Enfin, la perception des contrastes par l'oeil est aussi fortement améliorée avec la quantité de lumière reçue, donc les

instruments à gros diamètres sont intéressants même si la turbulence limite toujours leur grossissement.

L'équation modélisant le paramètre de Fried :

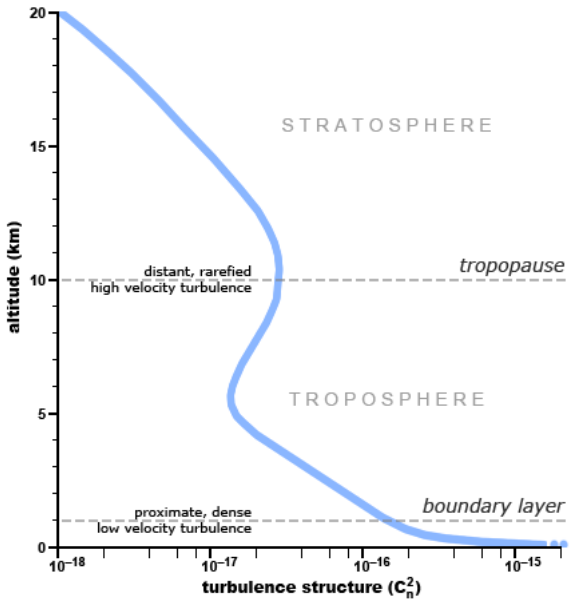
$$r_0 = \left[0.423 \times \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \times cos(z)^{-1} \times \int_{h_o}^{h_1} C_n^2(h)dh)\right]^{-3/5}$$

où λ est la longueur d'onde considérée (550 nm en général), z est la distance (angulaire) zénital du point visé, C_0^2 est le terme de Komolgorov-Tatarski ou "Refractive Index Structure", h_o l'altitude de l'observateur, h_1 l'altitude où la turbulence peut être considérée comme nulle (e-g 20km).

Plus précisément, Fried définit r_0 comme le diamètre de la zone de l'atmosphère pour laquelle la variation de phase du front d'onde vaut exactement 1 radian soit une erreur $\sigma_{\text{RMS}} = \frac{\lambda}{2\pi} = \lambda/6.28$ équivalent à PtV $= \lambda/2$.

On remarque aussi que le paramètre de Fried est proportionnel à la longueur d'onde : $r_0 \propto \lambda^{6/5}$.

The atmospheric Hufnagel-Valley model



Credit : ESO Search for Potential Astronomical Sites

L'intégral des termes de Komolgorov-Tatarski de la formule du paramètre de Fried (l'intégrale en 3e position) représente l'aire sous la courbe de Hufnagel.

La dimension de la figure de Airy d'un instrument parfait non soumis à la turbulence atmosphérique : PSF $= \theta_{\text{rad}} = 2.44 \times \frac{\lambda}{D}$ et ce disque contient 84% de l'énergie.

Lorsque le facteur limitant est l'instrument $D \leq r_0$: la figure de Airy (PSF) est le résultat l'interférence des rayons au passage par l'ouverture de l'instrument. La dimension angulaire du disque de la FWHM de la PSF d'un instrument parfait non soumis à la turbulence atmosphérique et mesurée après un long temps de pose vaut : $\text{FWHM}_{\text{rad}} = 1.028 \times \frac{\lambda}{D}$ (ce disque contient 50% de l'énergie) [78]. Dans ce cas la cohérence spatiale est conservée car l'atmosphère joue le rôle d'une lentille

soit neutre vis-à-vis de l'étoile, soit convergente ou divergente selon les instants c'est le phénomène de scintillation (perte de luminosité).

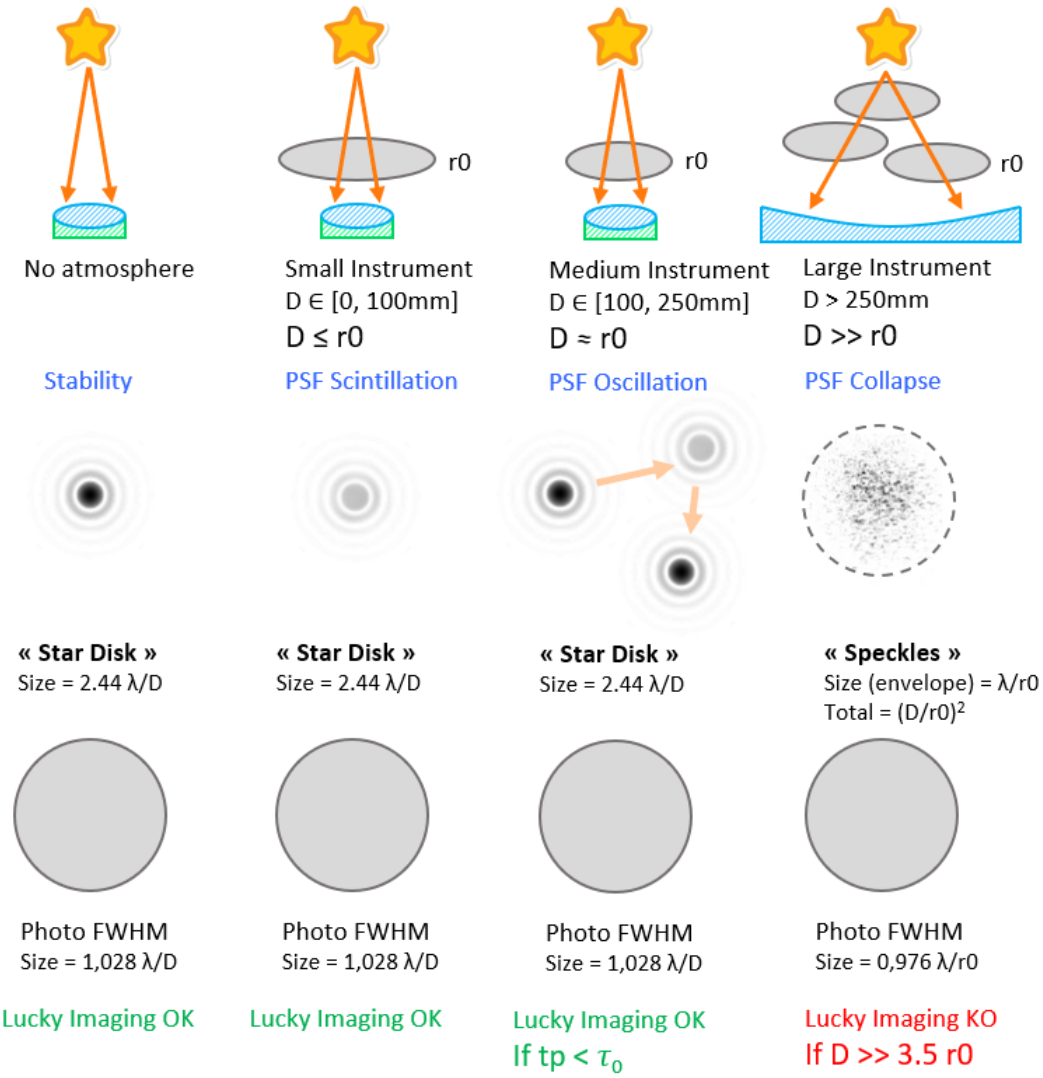
Lorsque le facteur limitant n'est pas l'instrument $D \gg r_0$: la figure de Airy n'existe pas car il y a perte de la cohérence spatiale. On constate à l'instant t la production de plusieurs points "Speckle" ou "Tavelure" résultat de l'interférence des rayons désorganisés par l'atmosphère à chaque l'instant. Ces "Speckle" ne doivent pas être confondus avec la PSF. Les rayons du front d'onde traversent alors plusieurs cellules d'air de taille r0 alors l'instrument se comporte comme un instrument à ouverture (pupille) multiple de dimension r0 produisant chacune une image et les tavelures sont le résultat de la superposition de ces images.

Les tavelures ne se forment qu'à partir d'un certain niveau de perturbation du front d'onde, en deçà l'image d'une étoile reste la PSF [57].

Effets possibles de l'atmosphère selon le diamètre de l'instrument D (cas général) :

— Si $D \leq 100mm$ il y a défocalisation de l'étoile, aberration de type defocus ou déformation Tip / Tilt du front d'onde diminuant l'éclat de la figure de Airy = Scintillation
— Si $100mm < D \leq 250mm$ il y a déplacement rapide la figure de Airy dans le champ = Agitation (Oscillation) [82]
— Au delà de 250mm il y a destruction de la planéité du front d'onde et donc la figure de Airy pour former des "Speckles"

Effet de la turbulence selon les instruments [148]



Credit : J.G. Gricourt

Les tavelures sont contenues dans un disque correspondant à la dimension de la figure de Airy d'un instrument de diamètre égal à r_0. Le nombre de total de "Speckles" produite à l'instant t augmente avec le diamètre et vaut : $N_{\text{speckles}} = (D/r_0)^2$ [56, 786], cependant la dimension de l'enveloppe des "Speckle" restera inchangée lorsque $D \leq r_0$ [786]. La taille de l'enveloppe globale des "Speckles" de 1er ordre devient est indépendant de D et vaut : $d = \frac{\lambda}{r_0}$, c'est donc r_0 qui devient le facteur limitant la résolution.

En intégrant l'image durant un temps de pose plus lent que la vitesse d'évolution de la turbulence (en moyenne de 10 fois / seconde) alors la dimension angulaire du disque de la FWHM du seeing vaut : $R = \epsilon_0$ = seeing = Kolmogorov PSF = $\text{FWHM}_{\text{rad}} = 0.976 \times \frac{\lambda}{r_0}$ d'après Roddier (1981)[580, 562, 174] et proche de la formule de Dierickx P. [170] (r_0 millimètres, R arcmin, λ mètre). Dans ce cas, la cohérence spatiale est détruite par l'atmosphère, car les rayons incidents de l'étoile ne semblent plus provenir d'une source unique.

Lorsqu'on fait du "Lucky Imaging", c'est-à-dire des poses de 10 à 50ms en restant inférieur au temps de cohérence de l'atmosphère, on peut déterminer la probabilité P d'avoir une image photographique dont la définition est meilleure ou égale à $PV = \lambda/(2\pi) = \lambda/6.28$ vaut : $P = 5.6e^{-0.1557(D/r_0)^2}$. La probabilité diminue avec l'augmentation du diamètre relativement au seeing [408, 136, 82].

— $P < 1$ si $D > 3.5r_0$
— $P = 1$ si $D = 3.5r_0$

Le r_0 maximum autorisé pour un diamètre D donné afin d'avoir une probabilité non nulle d'avoir une image correcte vaut $r_{\max} = D/3.5$.

Etude de l'effet de la turbulence selon la longueur d'onde sur 2 instruments, l'un de 250mm et l'autre de 350mm :

Sans turbulence :

— Si D = 250mm avec un filtre bleu $\lambda = 450nm$
— Si D = 350mm avec un filtre rouge $\lambda = 630nm$

Dans les 2 instruments la résolution sera la même car Ps = $\frac{\lambda}{4D} = 0.45$"

Avec turbulence :

On suppose que le niveau de turbulence r0 = 350mm pour la longueur d'onde $\lambda = 630nm$ = filtre rouge alors pour la longueur d'onde $\lambda = 450nm$ = filtre bleu on obtiendra :

$$r_0 = 350/\left[\frac{630}{450}\right]^{1.2} \quad \text{car le paramètre de Fried vaut : } r0 \propto \lambda^{6/5} \quad \text{avec } 6/5 = 1.2$$
$$r_0 = 233mm$$

L'instrument de 350mm sous un filtre rouge ne sera pas limité par la turbulence par contre l'instrument de 250mm sous un filtre bleu lui sera limité par la turbulence car son diamètre est inférieur à $r_0 = 350mm$ [114].

On suppose le temps de cohérence $\tau_0 = 3ms$ pour la longueur d'onde $\lambda = 450nm$ = filtre bleu alors pour la longueur d'onde $\lambda = 630nm$ = filtre rouge on obtiendra :

$$\tau_0 = 3 \times \left[\frac{630}{450}\right]^{1.2} \quad \text{car le temps de cohérence vaut : } \tau_0 \propto \lambda^{6/5}$$
$$\tau_0 = 4.5ms$$

L'instrument de 350mm sous un filtre rouge sera soumis à un temps de cohérence plus favorable pour faire du Lucky Imaging que celui de 250mm sous un filtre bleu !

L'utilisation d'un filtre rouge pour contrer les effets de la turbulence sera toujours plus intéressant.

A prendre en compte aussi pour être plus précis :

— La résolution de l'instrument entachée par l'erreur RMS dû au polissage des optiques le constituant + l'effet destructeur de l'obstruction
— La dispersion atmosphérique jouant selon l'angle de visée

Seeing désigne le niveau de turbulence atmosphérique du ciel. La turbulence correspond à l'agitation thermique de l'air sévissant dans les 100 premiers kilomètres de l'atmosphère. Les gradients de température façonne des couches d'air de densité différentes or) une densité donnée correspond à un indice de diffraction de l'air légèrement différent. La lumière des étoiles formant un faisceau parfaitement parallèle (les étoiles sont très lointaines) celui ci ressort des différentes couches d'air déformé en raison de la réfraction différente selon la zone traversée. Le seeing est de très loin le facteur prépondérant impactant la résolution devant l'instrument et les optiques.

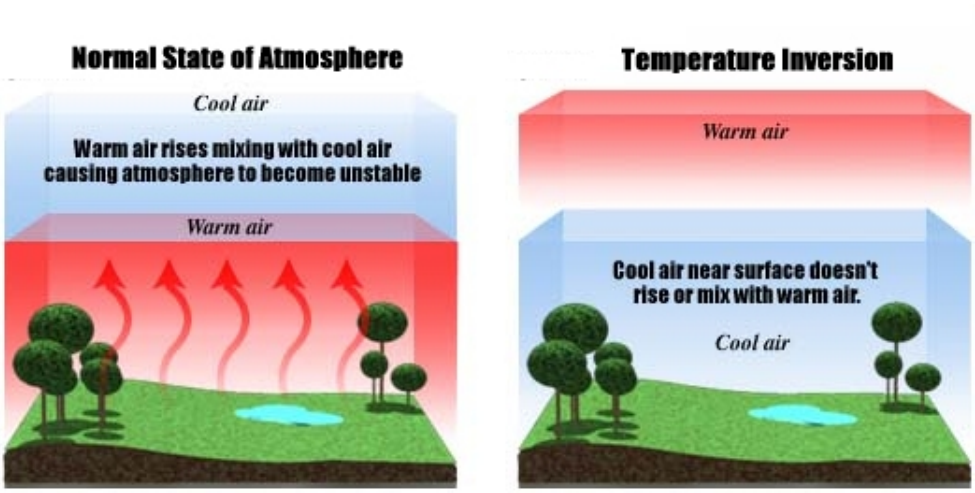
Don Pensack a dit : *"Pickering 10. 456x. 12.5" f/5.75 (with Paracorr), 8 mm Ethos in 2X PowerMate. Jupiter was steady and sharp 59 seconds out of 60. Focus wasn't mushy, more like a "click". And in color : blue, yellow, white, ivory, grey-green, ocher, red, orange, grey, black. And it looked 3D, like a globe. The Galilean Moons were colored and had different sizes. Ganymede has some grey markings. It was like a Christopher Go image only sharp, not soft in focus like his images. There was a white spiral inside the orange GRS that had knots in it down it's length. And the GRS was surrounded by small grey and white storms. Yes, 18 elements in the focuser. 4 + 5 + 9.* ***It convinced me then and there that element count means nothing and seeing means everything****. I never saw an image before that or since that was that good."* [243]

Certains lieux et certaines conditions climatiques sont plus favorables au seeing [139, 103] :

- Plus, on s'éloigne de l'horizon, plus le seeing sera meilleur, car la lumière traverse moins d'épaisseur d'air en direction du zénith.
- Une vue dégagée et où les vents dominant arrivant sur site ne rencontrent pas d'obstacle alors le flux d'air est laminaire (très stable) :
  - Au bord de l'océan : les observatoires du Mauna Key (Hawai)
  - Les plateaux en altitude : l'observatoire du VLT au Mont Paranal (Chili)
  - Les lacs de montagne : l'observatoire solaire Inouye au Big Bear Lake (Californie)
- Les lieux où la couche atmosphérique basse est parcourue en permanence par des flux d'air laminaires comme les vastes plateaux en Antarctique où la "Boundary Layer" (couche d'air turbulente) est alors très fine et basse (moins de 10 mètre au dessus du sol) [61].
- Les situations d'inversion thermique où la couche d'air est plus froide au niveau du sol qu'en altitude. Ce qui peut se produire lorsqu'un anti-cyclone puissant et stable stagne au dessus du lieu d'observation.

Les cas d'inversion thermique sont favorables au seeing :

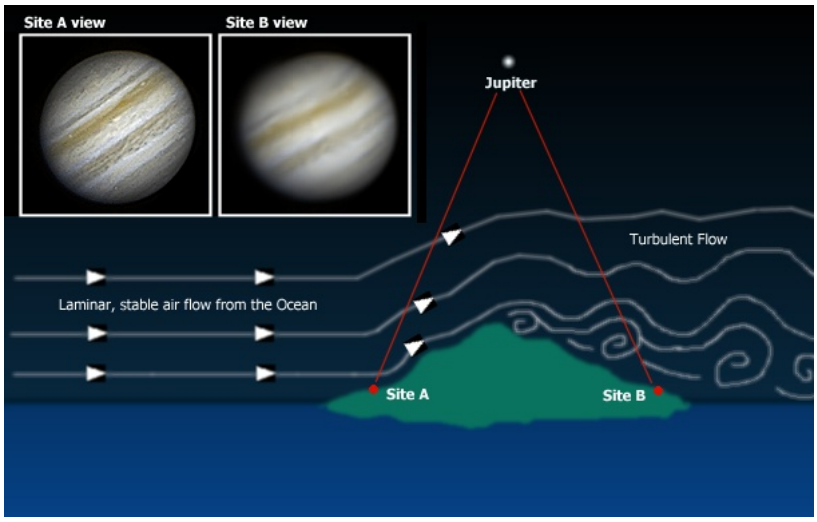
The Ultimate Location for Amateur Astronomy ?



Credit : Damian Peach

Le bon et le mauvais côté en montagne :

The Atmosphere and Observing



Credit : Damian Peach

Le seeing est en général mauvais dans les cas suivant :

— La température de l'air au sol est supérieure à la température de l'aire en moyenne altitude
— Le Jet Stream passe au-dessus du lieu d'observation

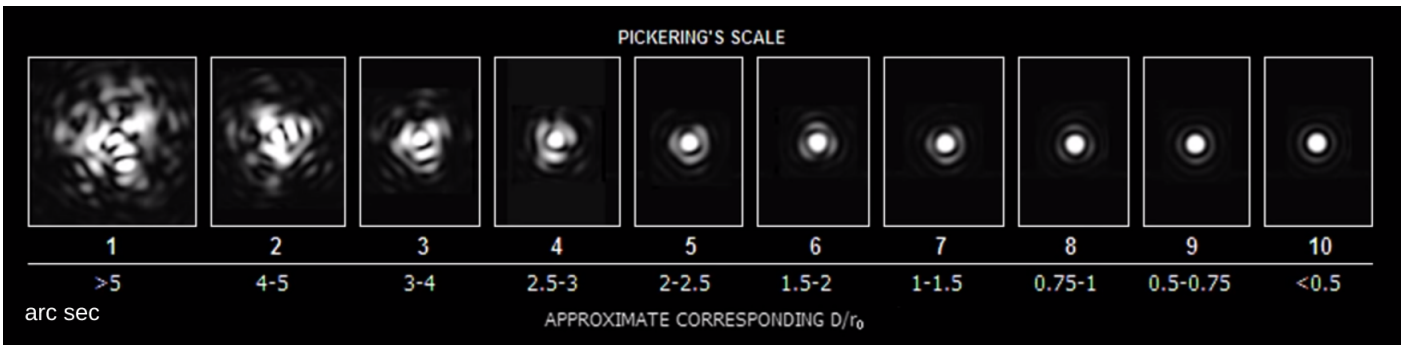
Le seeing n'est pas lié à la saturation de l'atmosphère en vapeur d'eau, on peut avoir un mauvais seeing par beau temps et un bon seeing par temps brumeux [28].

Afin de juguler le seeing il existe aussi des moyens techniques :

1. Utiliser l'optique adaptative (quasi hors de porté des amateurs)
2. En imagerie on utilisera la technique de "Lucky Imaging"

On peut mesurer la turbulence en appréciant l'aspect de la figure de Airy, ex : échelle de Pickering. Les grands diamètres seront plus affectés par la turbulence étant donné la portion d'atmosphère instable plus large traversée par le front d'onde [675].

The Pickering Scale



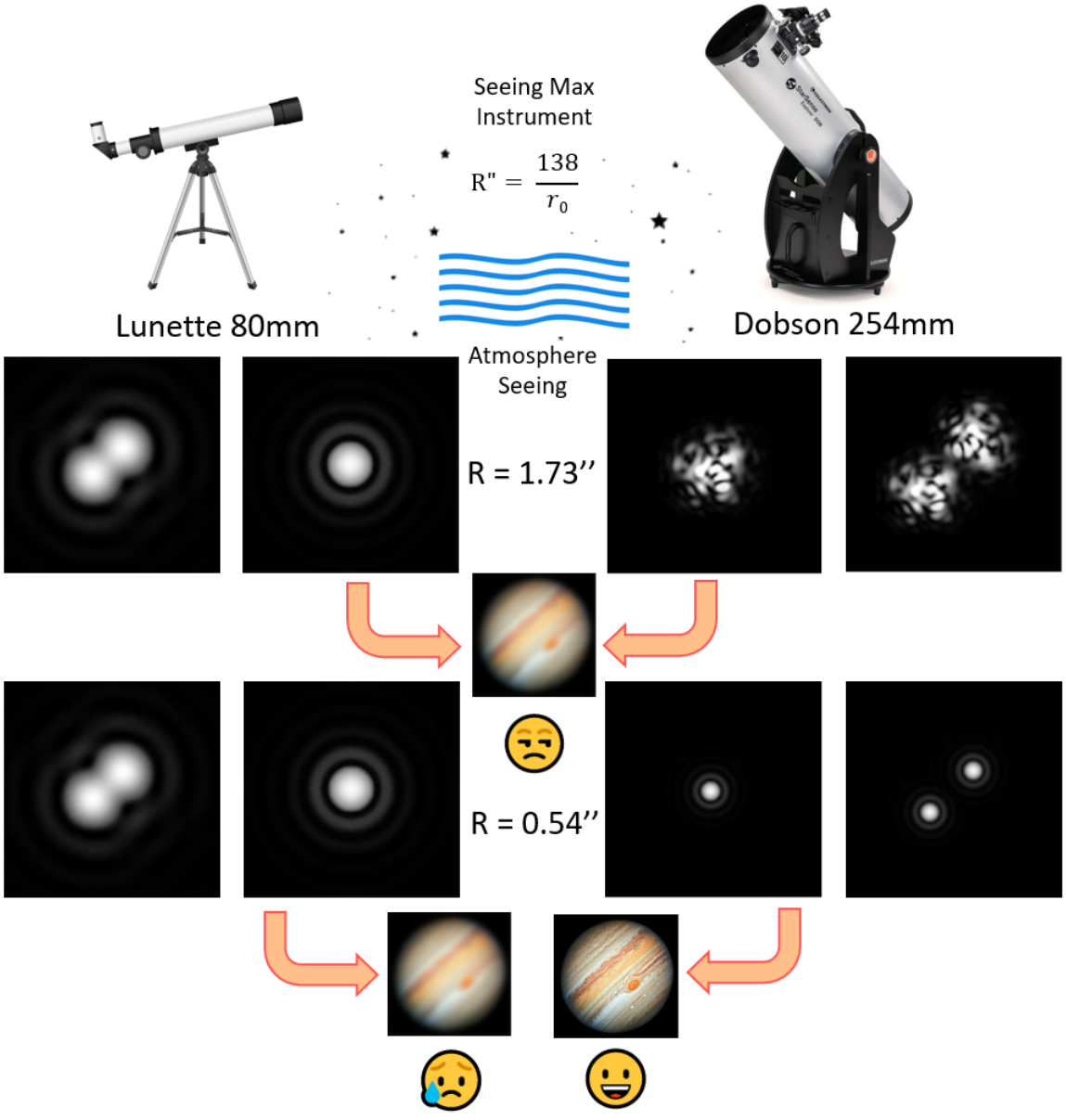
Credit : Vladimir Sacek

Sachant que $Ps = R_{\text{arcsec}} = \frac{\lambda}{4D}$, on peut prendre $\lambda = 550nm$ comme longueur d'onde de référence en visuel, le diamètre minimum permettant d'exploiter le seeing vaut alors : $D = \frac{138}{R_{\text{seeing}}}$. En moyenne le seeing par chez nous est de l'ordre de 2 arcsec (dans le visible) donc $r_0 = 70mm$.

Sites d'observation astronomique

Site	Seeing moyen R (arcsec)	Fried $r_0 = D_{\text{inst.}}$ (Rayleigh)
Dome C Antarctique	0.23	600 mm
Mauna Key	0.64	216 mm
VLT - Chile	0.69	200 mm
La Palma - Canaries	1.03	134 mm
Pic du Midi	1.38	100 mm

Effet du seeing (par exemple r0 = 80mm) [166]



Credit : J.G. Gricourt

Il existe des appareils de mesure du seeing tel que le Solar Scintillation Monitor

Turbulence Instrumentale désigne les mouvements d'air chaotiques qui se produise à l'intérieur du tube de l'instrument.

La chaleur à l'origine de la turbulence instrumentale peut avoir plusieurs origines :

- La convection de l'air qui facilite l'échange de chaleur avec d'autres matériaux
- La conduction entre 2 matériaux différents comme le miroir en verre ou la paroi métallique du tube
- Le rayonnement IR émanant des bâtiments

Avantage des lunettes sur les télescopes [723] :

- La déformation d'une lentille de verre dû à la chaleur représente 1/4 de celle subie par un miroir primaire.
- Une veine d'air chaud ne traverse qu'une seule fois le tube d'une lunette alors que dans le cas du télescope Newton, c'est 2 fois et pour le télescope Cassegrain, c'est 3 fois.
- Le faisceau incident s'écarte des parois du tube à mesure qu'il se dirige vers le porte-oculaire dans le cas d'une lunette alors que dans le cas de télescopes à miroirs comme les SCT, celui-ci frôle les parois du tube dès l'entrée.
- L'objectif d'une lunette montée sur monture EQ est plus éloigné du sol et de l'observateur générateur de chaleur que le miroir primaire d'un télescope qui se trouve proche du sol (Dobson notamment).
- Il n'y a pas d'air stationnant par gravité au-dessus d'un objectif de lunette, comme c'est souvent le cas des télescopes à miroir au fond d'un tube fermé.

L'inconvénient des lunettes à lentilles (doublets ou triplets) "Air Spaced" c'est que 2 lames de verre séparées par de l'air agissent comme un double vitrage. La face exposée est plus froide que la face arrière, car l'air agit comme un isolant. Donc le temps que les 2 lentilles arrivent à la même température, l'objectif peut présenter de l'aberration sphérique [731]. Un phénomène proche se produit lorsque le miroir est en train de refroidir, on parle de "Rolled Off Edge" celui présente alors de l'aberration sphérique.

Les circonstances courantes où la turbulence instrumentale peut se manifester :

1. L'été, la température peu diminuer très rapidement au cours de la nuit
2. L'hiver, la différence de température et le lieu d'entreposage (intérieur chauffé) peut être très importante

La turbulence affecte la MAP (le point de focus) en la faisant varier d'autant que le ratio F/D est long [84], ce qui annule exactement l'avantage d'avoir une MAP plus tolérante avec un F/D long. La turbulence affecte de manière égale les instruments de même diamètre quel que soit leur ratio F/D.

L'effet de la turbulence augmente avec la diminution de longueur d'onde donc la turbulence est forte pour le violet (356 nm) et très stable pour le rouge (656 nm) [105].

Schlieren Effect il s'agit de l'image de la turbulence de l'air devant un miroir parabolique vue sous un test de Foucault. Dans les télescopes il s'agit de la turbulence instrumentale caractéristique des tubes pleins non ventilés.



Credit : MathIndy

Trou De Turbulence désigne l'instant éphémère (quelques secondes au plus) pendant lequel la turbulence atmosphérique disparaît localement et fige l'image les planètes observées, permettant ainsi d'approcher la résolution théorique de l'instrument.

Boundary Layer ou "Thermal Boundary Layer" ou "TBL", désigne un type de turbulence instrumentale qui ne concerne que les instruments à miroir. C'est précisément juste au-dessus de la surface du miroir primaire que les échanges sont les plus turbulents car le miroir est alors en train de refroidir. On appelle cette couche d'air la TBL [8]. Supprimer la TBL est déterminant pour l'observation planétaire [257, 85, 87]. La turbulence instrumentale diminue dès que le miroir primaire est à température ambiante et que l'air chaud à l'intérieur du tube a été chassé dans le cas d'un tube fermé.

L'effet néfaste de la "TBL" est largement plus important que la déformation du miroir sous l'effet d'un gradient de température [229].

La pose d'un ventilateur de côté permet de supprimer la TBL rapidement et un autre en dessous soufflant dans le dos du miroir permet d'accélérer son refroidissement [663]. Un miroir 2 fois moins épais (e = épaisseur) refroidira 4 fois plus vite $\Delta t = k \times e^2$. L'utilisation d'un "Mauro da Lio baffle" permet d'optimiser l'extraction d'air (voir aussi avis divergents [369, 35, 502]). Quelque ce soit le mode de ventilation choisi, il faut que les flux d'air crée artificiellement soit des flux laminaires (le plus stable possible).

La Pollution Lumineuse ou "PL" ou "Sky Glow"désigne l'effet opacifiant sur le ciel de la lumière, le plus souvent d'origine artificielle ou provenant de la Lune. La pollution Lumineuse est d'autant plus élevée que le point visé est proche de l'horizon.

Méthode d'estimation et mesures

- En estimant la magnitude limite visuelle en utilisant les méthodes NELM ou MVLON qui consistent à compter les étoiles visibles d'une constellation assez haute dans le ciel.
- En estimant la qualité du ciel sur l'échelle de Bortle
- En mesurant objectivement la luminosité du fond du ciel (Luminance) en mag/arcmin^2 à l'aide d'un SQM-L cependant il faut que le ciel soit exempt de voile nuageux pour obtenir des mesures exploitables.

La pollution lumineuse sera plus faible dans les cas suivants :

- Le site comporte un taux d'artificialisation faible
- Le ciel est exempt de voile nuageux ou brumeux
- Le site est situé en altitude
- La Voie lactée est plus basse (pas au zénith)
- L'absence de Lune
- Période hors maxima solaire

La pollution lumineuse peut être modélisée de plusieurs façons :

- En prenant en compte le taux d'artificialisation du sol (cartes AVEX)
- En prenant en compte des images satellites prises sur le côté nuit du globe terrestre (cartes DarkSkyLab)
- En prenant en compte l'élévation des sites
- En prenant en compte le nombre, le type (LED ou Sodium) et la présence de lampadaires effectivement allumés la nuit
- En prenant en compte des mesures SQM-L depuis le sol réalisé sur le territoire

Note : les données européennes en accès libre Corine data land cover donnent l'occupation des sols en France (habitation, forêts, zones agricoles, fleuve, axes routiers, industries, champs d'éoliennes, serres agricoles) et permette d'en déduire le taux d'artificialisation d'une zone sur une carte.[3]

Corine Land Cover Classes



Credit : Land.copernicus.eu

3. Corine map

La Nuit la nuit noire est indispensable pour observer les objets faibles du ciel profond. Les planètes peuvent être encore observées même si la nuit n'est pas complètement noire et en particulier en ville ou au moment de la pleine lune.

On distingue plusieurs phases de descente du soleil menant à la nuit totale :

- Le crépuscule civil : 6 arcmin sous l'horizon
- Le crépuscule nautique : 12 arcmin sous l'horizon
- Le crépuscule astronautique : 18 arcmin sous l'horizon

Par exemple, sous une latitude de 50° (Dieppe 76) la nuit ne dure que 8h sur les 24h de la journée au moment du solstice d'été et le crépuscule astronomique ne se termine jamais donc la nuit n'est pas noire comme en hiver.

L'été la nuit peut être de mauvaise qualité en raison de :

- La nuit est 2 fois plus courte que l'hiver dans nos contrées
- Le soleil ne descend pas aussi bas que l'hiver et il continue d'éclairer même très faiblement le ciel toute la nuit ce qui est plus encore plus vrai à mesure que l'on va vers le Nord.
- Les particules chauffées par la chaleur se dilatent et volent dans l'air

Lors des maxima solaire tous les 11 ans, l'atmosphère fini par se charger en particules solaire qui produisent une émission de lumière à l'instar des aurore boréales. Cet effet fait perdre au nuit de 0.2 à 0.3 MPSAS en moyenne mesuré par un SQM-L [251]. Il ne faut pas confondre cet effet sur la nuit avec la lumière zodiacale qui elle provient de la diffusion de la lumière par des particules d'origine planétaire sur l'écliptique = le plan des orbites de la plupart des planètes du système solaire [504].

Le Jet Stream désigne un courant d'air d'altitude puissant se déplaçant d'Ouest en Est (sens de rotation de la Terre) et situé au dessus de 20° de latitude à la frontière entre l'air chaud provenant de l'équateur et l'air froid provenant du Pôle. L'air chaud se déplace vers les zones polaires. Ce courant existe aussi bien dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud. On trouve le Jet Stream dans la partie haute de la Troposphère, son évolution peut être influencé par :

- Le passage au dessus des continents
- L'effet Coriolis
- L'hiver et les températures froides

Il existe différents Jet selon la latitude :

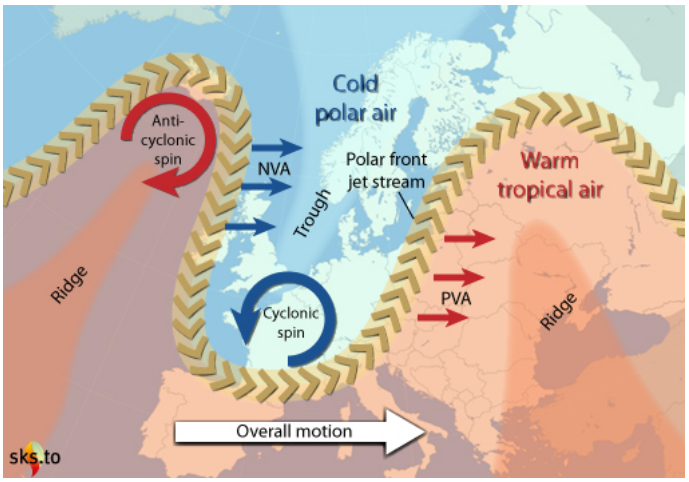
- Polar Jet
- Sub-Tropical Jet
- Tropical Jet

Entre les différents Jet il se forme des cellules de convection (zones d'échanges de chaleur) :

- Polar Cell
- Ferrel Cell
- Hadley Cell

Le Jet Stream n'est pas exactement horizontal et forme des lacets mouvants. Dans l'hémisphère Nord un lacet en creux contient une masse d'aire froide de basse pression alors qu'un lacet bombé contient une masse d'air chaude = un anti-cyclone de forte pression.

Les lacets du Jet Stream



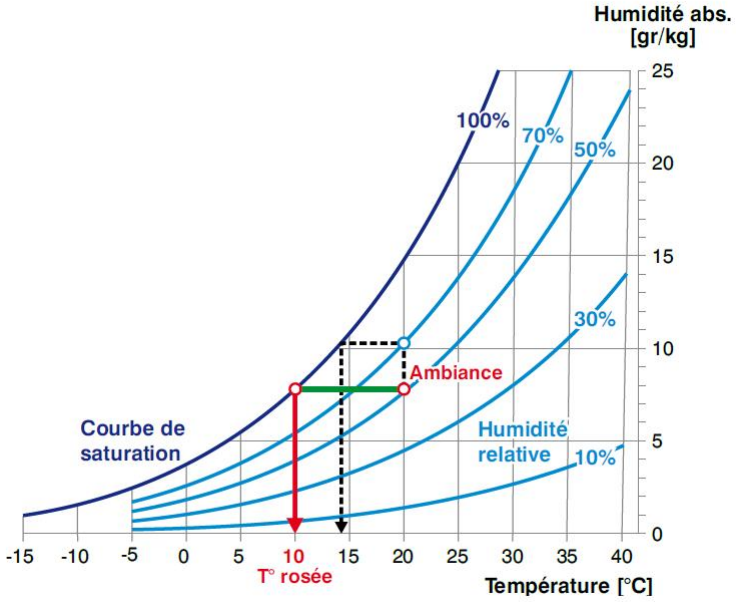
Credit : John Mason

La vitesse de ces vents d'altitude va de 50km/h l'été et 120km/h l'hiver. En hiver c'est le Jet Stream polaire qui affecte le plus le Nord de l'Europe et qui dégrade le seeing [140].

La Rosée désigne le dépôt d'eau liquide sur les surfaces des objets lorsque ces objets froids rencontrent un air chaud. L'eau se condense en passant de l'état gazeux à l'état liquide. La capacité de l'atmosphère à retenir l'eau sous forme de vapeur, mesuré par le taux d'humidité relative qui mesure le taux d'humidité de l'air relative à sa température. En effet un air chaud est capable de retenir plus d'eau que de l'air froid. Un air froid à 10°C chargé à 100% d'humidité contient autant d'humidité qu'un air chaud à 25°C chargé à 40%.

Il existe alors une température de l'air en dessous de laquelle la vapeur d'eau contenu dans l'air se condense, c'est le point de Rosée, car l'air est arrivée à saturation d'eau soit 100% d'humidité relative et ne peut plus retenir l'eau.

Diagramme de Mollier

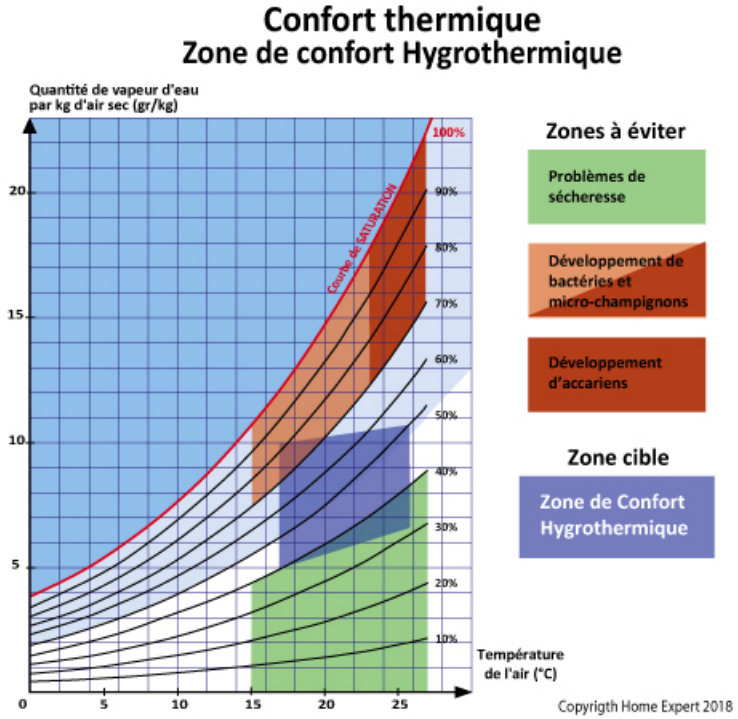


Credit : Easy Therm

Dans ce diagramme le passage de 20 degré à 10 degré au moment de la tombée de la nuit par exemple produira de la condensation car l'air sera arrivé à saturation de vapeur d'eau (humidité relative = 100%).

De plus un air trop humide génère l'apparition de moisissures et il faut donc absolument éviter de stocker du matériel optique dans des conditions inadaptées.

Confort Thermique



Credit : Home Expert

Dans le domaine de l'astronomie amateur, cela se traduit par l'humification parfois très importante (de l'eau dégouline) des matériels dont les instruments lorsque l'on rentre ceux-ci dans une pièce plus chaude que la température extérieure. Un objet froid dans une atmosphère chaude et saturée d'eau, comme souvent dans un intérieur, va précipiter l'eau contenue dans l'air en refroidissant celui-ci.

De manière générale, il faut éviter que l'humidité s'installe sur le matériel :

- La fine couche d'aluminure des miroirs de télescope va finir par s'oxyder avec le temps pour disparaitre
- La visserie souvent en acier va rouiller
- Des champignons vont se développer à la surface des lentilles des lunettes
- Les dobsons chinois souvent construit à base de planche de mélaminé risquent de gonfler et de se détériorer soumis à la condensation

Les champignons (Fungus) se développent avec l'humidité et l'absence de lumière (UV) à partir de spores aériens déposés sur les surfaces de verre. Ces champignons produisent de l'acide fluorhydrique capable de dissoudre les matériaux organiques tel que les traitement anti-reflet sur les verres [613]. La densité de spore dans l'air est plus élevée en dehors de la période hivernale. Le traitement des fungus (champignons) nécessite l'utilisation d'un antiseptique le Chlorure de Benzalkonium.

Conditions de développement [364] :

- Pas de renouvellement d'air comme enfermé hermétiquement dans un sac plastique
- Un taux d'humidité supérieur 70% pendant 3 jours
- Pas de lumière (les UV détruisent les champignons)
- Présence de poussière ou de graisse organique (nutriments)

2.6 La Magnitude

Magnitude Visuelle ou "Magnitude Apparente" désigne l'éclat d'une étoile vue à l'oeil nu. On parle d'éclat E d'une étoile sa luminosité vue à l'oeil nu. En photométrie l'éclat est l'intensité I rayonnée par l'étoile en direction de l'observateur. La magnitude d'une étoile se définit (arbitrairement) par une relation de type : $m = klogE + C$. La loi de Pogson définit (arbitrairement) qu'une étoile E2 de magnitude 6 est 100 fois moins lumineuse qu'une étoile E1 de magnitude 1 donc on peut écrire :

$$\begin{aligned} 1 &= klogE_1 + C \\ 6 &= klogE_6 + C \end{aligned}$$

Si l'on fait la différence des 2 équations :

$$\begin{aligned} 1 - 6 &= klogE_1 + C - klogE_6 - C \\ -5 &= k(logE_1 - logE_6) \\ -5 &= klog\frac{E_1}{E_6} \\ -5 &= klog100 \\ -5 &= k \times 2 \\ k &= -2.5 \end{aligned}$$

Donc : $m = -2.5logE + C$

De manière générale la différence de magnitude entre 2 étoiles s'écrit :

$$\begin{aligned} m_2 - m_1 &= -2.5logE_2 + C + 2.5logE_1 - C \\ m_2 - m_1 &= -2.5(logE_2 - logE_1) \\ m_2 - m_1 &= -2.5log\frac{E_2}{E_1} \end{aligned}$$

La formule inverse s'écrit :

$$\begin{aligned} 10^{\frac{(m_2-m_1)}{-2.5}} &= 10^{log(\frac{E_2}{E_1})} \\ 10^{\frac{2(m_1-m_2)}{5}} &= \frac{E_2}{E_1} \\ \frac{E_2}{E_1} &= 100^{\frac{m_1-m_2}{5}} \\ \frac{E_2}{E_1} &= 2.512^{m_1-m_2} \end{aligned}$$

On prend comme référence l'étoile Véga on dira que son éclat vaut $E_1 = 1$ et par convention sa magnitude vaut $m_1 = 0$ alors E_2 s'exprime dans un unité d'éclat de Véga :

$$\begin{aligned} m_2 - 0 &= -2.5log\frac{E_2}{1} \\ m &= -2.5logE \quad \text{où E est exprimé en unité = éclat de Véga} \end{aligned}$$

Et à l'inverse :

$$\begin{aligned} 10^{\frac{m}{-2.5}} &= 10^{logE} \\ E &= 10^{-0.4m} \end{aligned}$$

Une différence de magnitude de 5 correspond à une différence d'éclat de 100

Une différence de magnitude de 1 correspond à une différence d'éclat de $10^{\frac{2}{5}} = 10^{0.4} = 2.512$

Par exemple l'étoile κ Her est une étoile de magnitude 5 donc son éclat $E = 1/100$, elle donc 100 fois moins lumineuse que Véga l'étoile de référence.

A l'origine de l'échelle des magnitudes classiques est Véga (Lyr) dont la magnitude vaut par définition 0. Le système Vega ou VEGAMAG $= -2.5\log_{10}(\frac{F}{F_{\text{Vega}}})$, on suppose dans ce système que Véga rayonne de la même manière sur toutes les longueurs d'onde lumineuse : $F_{\text{Vega}} = 3.63 \times 10^{-11}\ J^{-1}s^{-1}m^{-2}nm^{-1}$.

Il est possible de calculer le nombre de photons arrivant par unité de surface provenant du fond du ciel si sa magnitude surfacique est par exemple de $m_{\text{sky}} = 19.64$ par arcmin au carré de ciel = MPSAS [595] :

$$2.512^{(m_{\text{sky}}-0)} = \frac{F_{\text{Vega}}}{F_{\text{sky}}}$$
$$F_{\text{sky}} = \frac{F_{\text{Vega}}}{2.512^{m_{\text{sky}}}} = \frac{3.63 \times 10^{-11}}{2.512^{19.64}} = 5.05 \times 10^{-19}$$

Si l'on considère la bande visible [493, 600 nm] alors le flux du fond du ciel vaut :

$$F_{\text{sky_bande_V}} = F_{\text{sky}} * (600 - 493)$$
$$F_{\text{sky_bande_V}} = F_{\text{sky}} * 107$$

Si l'on considère l'énergie d'un photon unique pour le vert donc $\lambda = 552nm$:

$$E_p = \frac{hc}{\lambda} = 3.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

Le nombre de photons venant du fond du ciel (1 arcmin au carré) par seconde et par unité de surface éclairée (exemple un capteur photo) :

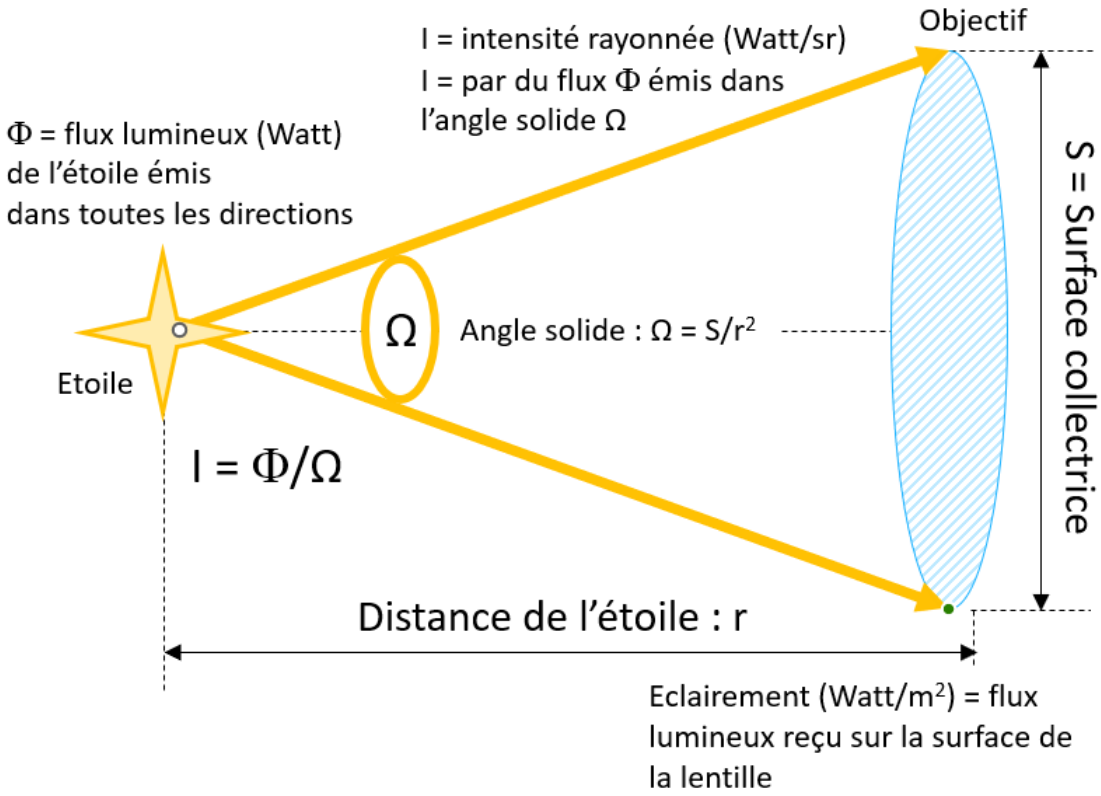
$$n = \frac{F_{\text{sky_bande_V}}}{3.6 \times 10^{-19}} s^{-1} m^{-2}$$

Le champ capturé en arcmin par 1 seul pixel du capteur photo vaut $e = 206 \times p/F$ donc le nombre de photons arrivant chaque seconde sur le pixel vaut :

$$\text{Nombre de photons du fond du ciel} = n \times e \times p \times p \quad \text{où surface du pixel} = p \times p \text{ avec p converti en mètre}$$

Il existe d'autres systèmes de magnitudes photométriques comme le UBVRI de Johnson [123], le système STMAG du Hubble space Telescope, le système ABMAG du Sloan Digital Survey [352].

Magnitude Limite Lorsqu'on considère le flux intercepté par différentes surfaces collectrices, l'angle solide vaut : $\Omega = S/r^2$ où S est la surface collectrice, par exemple un miroir primaire ou un objectif ou l'oeil humain et r est la distance de l'étoile. On suppose aussi que l'intensité lumineuse produite par l'étoile est constante.



Credit : J.G. Gricourt

L'expression générale de la magnitude limite m d'un télescope dépend de la clarté C apportée par le télescope comparé à l'oeil nu :

$m = m_o + 2.5 \times logC$.

La clarté vaut :

- Pour les étoiles on compare les diamètres : $C = D^2/d_o^2$, où D est le diamètre d'entrée de l'instrument et d_o est le diamètre d'entrée de l'oeil (la pupille).
- Pour les objets étendus : galaxie, nébuleuse et fond du ciel on compare les pupilles : $C = p^2/p_o^2$, où $p = D/G$ est le diamètre de la pupille de sortie de l'instrument et p_o le diamètre de l'oeil.

Calcul de la magnitude stellaire limite octroyée par un instrument, où $\Delta m = m_t - m_o$, m_t = magnitude max du télescope et m_o = magnitude max de l'oeil :

$$\Delta m = -2.5log\frac{E_{\text{telescope}}}{E_{\text{oeil}}} \quad \text{où } E = \text{Eclat} = I = \frac{\Phi}{\Omega}$$
$$\Delta m = -2.5log\frac{\frac{\Phi}{\Omega_t}}{\frac{\Phi}{\Omega_o}}$$
$$\Delta m = -2.5log\frac{\Omega_o}{\Omega_t} \quad \text{où l'angle solide vaut } \Omega = \frac{S}{r^2}$$
$$\Delta m = -2.5log\frac{S_o}{S}$$
$$\Delta m = -2.5log\frac{\pi(D_o/2)^2}{\pi(D/2)^2}$$
$$\Delta m = 5log\frac{D}{D_o} \quad \text{où pupille de l'oeil} = 6\text{mm}$$
$$\Delta m = 5log\frac{D}{6}$$
$$\Delta m = 5logD - 5log6$$
$$m_t = m_o + 5logD - 3.89 \quad \text{où magnitude max de l'oeil} = 6$$
$$m_t = 6 + 5logD - 3.89$$
$$m_t = 2.1 + 5logD$$

Note : on gagne donc 2 magnitudes en multipliant par 2.5 le diamètre de l'instrument.

Synthèse : $\Delta m = 5log\frac{D_2}{D_1}$ et Gain Flux $= \frac{D_2}{D_1}$

Gain d'1 magnitude complète [13] :

- 4" » 6" » 10" » 16" » 25" » 40" [204] ou encore en mm : 102 » 152 » 254 » 406 » 635 » 1016
- 3" » 5" » 8" » 12" » 18" » 28" » 45" ou encore en mm : 76 » 127 » 203 » 305 » 457 » 711 » 1143

Gains selon le diamètre

Diamètre inch	Diamètre mm	Gain Magnitude	Gain Résolution
4"	101 mm	0.0	0.00
5"	127 mm	0.5	0.27"
6"	150 mm	0.9	0.45"
8"	100 mm	1.5	0.68"
9.25"	235 mm	1.8	0.77"
10"	254 mm	2.0	0.81"
12"	305 mm	2.4	0.91"
12.5"	318 mm	2.5	0.92"
14"	356 mm	2.7	0.97"
15"	381 mm	2.9	1.00"
16"	406 mm	3.0	1.02"
18"	457 mm	3.3	1.06"
20"	508 mm	3.5	1.09"
22"	559 mm	3.7	1.11"
24"	610 mm	3.9	1.13"
25"	635 mm	4.0	1.14"
28"	711 mm	4.3	1.16"
30"	762 mm	4.4	1.18"
32"	813 mm	4.4	1.19"
36"	914 mm	4.8	1.21"
40"	1016 mm	5.0	1.22"

Si on considère que la magnitude limite de l'oeil vaut $m_{\text{oeil}} = 6$ et $d_0 =$ pupille de l'oeil $= 6mm$ on obtient :

$m = 2.1 + 5 \times \log D_{mm}$.

Pour compenser une perte de magnitude limite Δm il faut prendre un instrument de diamètre plus grand : $D = 10^{\frac{\Delta m}{5}} \times D_0$ où D_0 le diamètre de l'instrument de magnitude limite initiale (avant perte).

On peut aussi tenir compte du grossissement G et de la transmission globale T de l'instrument.

Selon Bowen (1947) :

$m = m_0 - 2 + 2.5 \times \log(D \times T \times G)$

Selon E. Shaeffer [320] :

$m = 4.5 + 4.4 \times \log D$

Selon Don Pensack [203] :

$m = 4 + 5 \times \log D$

Selon Roger N. Clark [4] :

$m = m_0 + 5 \times \log(D \times \sqrt{T}/d_0)$

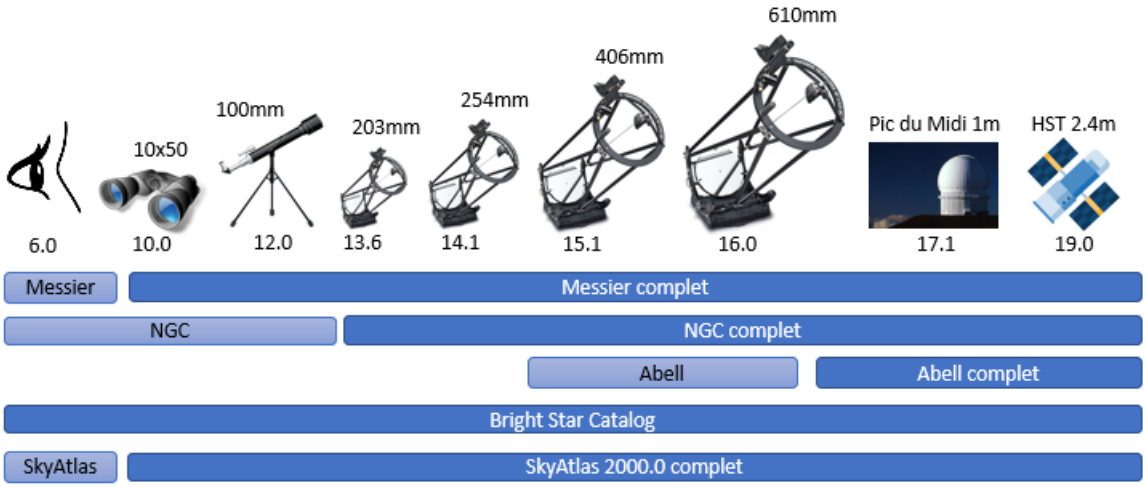
Roger N. Clark dit que la magnitude limite des objets étendus est largement rehaussée par l'assombrissement du fond du ciel (Sky Brightness) via l'augmentation du grossissement (diminution de la pupille de sortie). L'augmentation de magnitude du fond du ciel résultante après grossissement : $\Delta S_b = -5 \times \log(\frac{D \times \sqrt{T}}{G \times d})$, la magnitude du fond du ciel (en MPSAS) vue au travers de l'instrument : $S_b = S_b0 + \Delta S_b$ où S_b0 est la magnitude du fond du ciel à l'oeil nu. Enfin, la conversion de $m_{\text{oeil}} = f(S_b)$ [757] (voir formule du Sky Quality Meter S_b = MPSAS et m_0 = NELM) donne la magnitude visuelle limite : $m = m_0 + 5 \times \log(D \times \sqrt{T}/d_0)$

Roger N. Clark propose aussi une théorie basée sur une précédente étude de 1946 due à H. Richard Blackwell [615, 492] sur la détection des faibles contrastes, cependant cette théorie de 1956 basée sur la vision binoculaire diurne a été largement invalidée par Nils Olof Carlin dans un article publié en 1991 [550]. JR Torres en 2000 propose sa propre méthode "Threshold Method" une variante de la méthode de Clark [435].

La magnitude limite générale d'une paire de jumelles est donnée selon Nils Olof Carlin par :

$m_{\text{jumelles}} = m_0 + 3 \times \log(D/d) + 2 \times \log(G)$

La magnitude limite photographique avec les capteurs électroniques actuels permettent de capturer des étoiles de mag 26 par exemple au Chili, et cela, même si le fond du ciel ne dépasse pas 22.5 MPSAS sur Terre (et pas 24 comme le pensait Roger N. Clark).



Credit : J.G. Gricourt

A voir aussi :

- La méthode Cruxis [237]
- Le graph de visibilité des objets du ciel profond par Glenn Le Drew [326, 327]

La magnitude limite théorique doit être nuancée / minorée, car il existe d'autres facteurs qui vont modifier cette valeur :

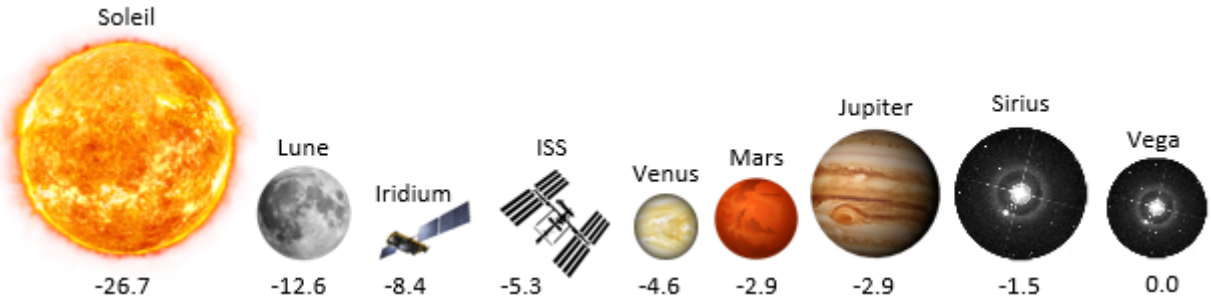
1. La pollution lumineuse mesurée empiriquement avec l'échelle de Bortle, NELM ou bien avec un appareil sensible au

4. Visual Astronomy Of The Deep Sky - p 49

fond du ciel comme le SQM-L.

2. Le seeing provoquant une perte de résolution en étalant le flux lumineux des étoiles
3. L'extinction atmosphérique importante lorsque les objets observés sont bas au-dessus de l'horizon
4. Le diamètre de l'instrument qui détermine la pupille de sortie pour un grossissement donné et donc quantité de lumière entrante dans l'oeil
5. Le grossissement utilisé, car plus on grossit, plus le gain en résolution sera important grâce :
   — A l'assombrissement du fond du ciel alors que la luminosité des étoiles ne change pas [489] (voir les études de Roger N. Clark)
   — A l'augmentation de l'image des objets étendus sur la rétine par le grossissement
6. Les défauts optiques, l'astigmatisme, aberration de sphéricité, ces défauts provoquent de la diffusion et donc une perte de lumière en dehors de la figure de Airy
7. L'obstruction par un miroir secondaire vignette le champ et diminue la quantité de lumière entrante, le centre du primaire n'est alors pas utilisé
8. La dimension maximale de la pupille de l'oeil qui varie selon l'age, plus celle-ci est dilatée, plus, il y a de lumière qui rentre
9. Les défauts optiques de l'oeil : défaut de courbure du cristallin (astigmatisme) ou de la sensibilité de la rétine
10. L'utilisation de la vision décalée faisant intervenir les bâtonnets de la rétine plus sensibles.
11. Le taux de transmission lumineuse de la lunette améliorée par les traitement multi-couche évitant l'absorption de la lumière par les verres
12. Le taux de réflexion du télescope à miroir améliorée les couche réfléchissante en diélectrique
13. L'état des surfaces optiques (salissures)
14. La couleur de l'objet observé voir (color temperatures) [5]
15. L'expérience de l'observateur pour détecter les différences de tonalité faibles, les variabilistes sont capables de détecter des différences de magnitude aussi faible de 0.1
16. L'hyperventilation ou l'oxygénation permettent de gagner 0.3 magnitude
17. L'expérience de l'observateur, un entrainement régulier à observer permet de gagner un peu en magnitude
18. La vision binoculaire augmente la détection oculaire [71]
19. L'objet visé, car la magnitude d'une étoile, un point ponctuel n'est pas celle des objets étendus qui ont aussi une magnitude dite "surfacique" en plus d'une magnitude globale ou dite "Intégrée"

Magnitude des objets courants



Credit : J.G. Gricourt

5. ASTROMETRICS: Limiting Magnitude Calculator

Millennium Star Atlas Vol I, chapitre VII (Tycho Catalog)

Mag	Range	Stars	Cumulative Stars	Increase
-1	-1.50 to -0.51	2	2	0%
0	-0.50 to +0.49	6	8	400%
1	+0.50 to +1.49	14	22	275%
2	+1.50 to +2.49	71	93	423%
3	+2.50 to +3.49	190	283	304%
4	+3.50 to +4.49	610	893	316%
5	+4.50 to +5.49	1,929	2,822	316%
6	+5.50 to +6.49	5,946	8,768	311%
7	+6.50 to +7.49	17,765	26,533	303%
8	+7.50 to +8.49	51,094	77,627	293%
9	+8.50 to +9.49	140,062	217,689	280%
10	+9.50 to +10.49	409,194	626,883	288%
11	+10.50 to +11.49	1,196,690	1,823,573	291%
12	+11.50 to +12.49	3,481,113	5,304,685	291%
13	+12.50 to +13.49	10,126,390	15,431,076	291%
14	+13.50 to +14.49	29,457,184	44,888,260	291%
15	+14.50 to +15.49	85,689,537	130,577,797	291%
16	+15.50 to +16.49	249,266,759	379,844,556	291%
17	+16.50 to +17.49	725,105,060	1,104,949,615	291%
18	+17.50 to +18.49	2,109,295,881	3,214,245,496	291%
19	+18.50 to +19.49	6,135,840,666	9,350,086,162	291%
20	+19.50 to +20.49	17,848,866,544	27,198,952,706	291%

Credit : David Haworth

Formule [333] pour déterminer le nombre d'étoiles N visibles à partir d'une magnitude donnée m.

$$\log_{10}(N) = -0.0003 \times m + 0.0019 \times m + 0.484 \times m - 3.82$$

Magnitude Absolue désigne la magnitude d'une étoile si celle-ci était placée à une distance de 1 parsec. À cette distance, l'étoile aurait alors une parallaxe de 1 arcmin précisément. Cette magnitude plaçant tous les objets à une distance fixe alors celle-ci est directement reliée à la luminosité absolue. Une étoile rayonne sa puissance lumineuse $L = \Phi$ dans toutes les directions donc l'angle solide interceptant cette puissance vaut : $\Omega = 4\pi d^2$ où d est la distance de l'étoile.

Donc l'intensité lumineuse I produite par l'étoile diminue avec la distance et vaut :

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$
$$I = \frac{\Phi}{4\pi d^2}$$

La relation des magnitude avec l'éclat E = I en considérant l'intensité de l'étoile à une distance à 10 parsec puis à une

distance arbitraire d exprimée aussi en parsec :

$$
\begin{aligned}
m_2 - m_1 &= -2.5log\frac{E_2}{E_1} \\
m - M_{\text{abs}} &= -2.5log\frac{\frac{\Phi}{4\pi d^2}}{\frac{\Phi}{4\pi 100}} \\
m - M_{\text{abs}} &= -2.5log\frac{100}{d^2} \\
m - M_{\text{abs}} &= -2.5log100 + 2.5logd^2 \\
m - M_{\text{abs}} &= -5 + 5logd \\
M_{\text{abs}} &= m - 5logd + 5
\end{aligned}
$$

La distance exprimée en parsec est par définition égale à sa parallaxe exprimée en arcsec donc : $M_{\text{abs}} = m - 5log(\text{Parallaxe}) + 5$

Pour compléter cette équation il faudrait prendre en compte l'absorption interstellaire provoquée par les poussières et les gaz présents sur la ligne de visée Pour cela on pourra appliquer une correction A : $M_{\text{abs}} = m - 5logd + 5 - A$

Magnitude Bolométrique désigne la magnitude d'une étoile en prenant en compte toutes ses longueurs d'onde depuis le domaine radio jusqu'au rayonnement gamma. Cette magnitude est reliée à la température et à la couleur de l'étoile car on considère les étoiles comme des corps noirs rayonnant dans toutes les longueurs d'onde et dont la couleur ne dépend que de sa température (loi de Wien) [15]. Ce type de magnitude ne s'applique pas aux objets du ciel profond car ils n'ont rien de commun avec un corps noir.

La correction de magnitude bolométrique BC permet de passer à la magnitude visuelle : $\text{BC} = m_{\text{bol}} - m$ ou bien an magnitude absolue $\text{BC} = M_{\text{bol}} - M$.

La magnitude colométrique absolue peut être calculée à partir de la magnitude bolométrique du soleil pris comme référence : $M_{\text{bol}} = 4.75 - 2.5log(L/L\bigodot)$ où $M_{\text{sun}} = 47.75$.

La luminosité L totale exprimée en Watts rayonnée par le corps noir (l'étoile) selon, la loi de Stefan-Boltzmann : $L = 4\pi\rho R^2 T^4$

On peut aussi relier le type spectral d'une étoile à sa magnitude bolométrique par la connaissance de BC.

Magnitude Surfacique ou "Brillance de surface" ou "Surface Brightness" désigne l'éclat d'un objet étendu telle qu'une nébuleuse ou une galaxie. La magnitude surfacique donne la magnitude de l'objet de surface angulaire A par unité de surface sur le ciel $E_A = E/A$. Il s'agit d'une moyenne sur toute la surface, car en réalité l'éclat des objets n'est pas uniforme :

A partir de la formule des différences de magnitude on calcul la magnitude surfacique :

$$
\begin{aligned}
m_2 - m_1 &= -2.5log\frac{E_2}{E_1} \\
ms_2 - ms_1 &= -2.5log\frac{E_2/A_2}{E_1/A_1} \\
ms_2 - ms_1 &= -2.5log\left(\frac{E_2}{E_1} \times \frac{A_1}{A_2}\right) \\
ms_2 - ms_1 &= -2.5log\frac{E_2}{E_1} - 2.5log\frac{A_1}{A_2}
\end{aligned}
$$

On prend comme référence un objet du ciel profond dont l'éclat total vaut $E_1 = 1$ répartie par convention sur une surface unitaire $A = 1$ avec une magnitude $ms_1 = 0$

$$
\begin{aligned}
ms_2 - 0 &= -2.5log\frac{E_2}{1} - 2.5log\frac{1}{A_2} \\
ms_2 &= m_2 + 2.5logA_2 \\
ms &= m + 2.5logA
\end{aligned}
$$

Soit a le petit axe de l'objet et b le grand axe de l'objet exprimés en arcmin, sa surface vaut :

$$
\begin{aligned}
A &= \pi.a/2.b/2 \\
A &= \pi\frac{ab}{4}
\end{aligned}
$$

Finalement [213, 325, 590] :

$m_{\mathrm{MPSAM}} = m_v + 2.5 \times \log A$ où mv est la magnitude visuelle ou "Integrated Magnitude"

Ici mag/arcmin^2 ou MPSAM = "Magnitudes Per Square Arcmin".

Lorsque $A = 1$ arcmin^2 alors la magnitude surfacique et visuelle sont égales : $ms = m$.

Exemples de magnitudes surfaciques

Object	Mag V	Mag MPSAM	Size (arcmin)
M57	9.4	9.6	1.47 x 1
M27	7.4	11.29	8 x 5.7
M31	3.4	13.26	178 x 63

Lorsque qu'un objet du ciel profond s'étend sur une surface de 1 arcmin alors sa magnitude surfacique égale à sa magnitude intégrée, c'est le cas de M 57.

Ce type de mag reste parfois théorique et cela pour plusieurs raisons :

— Beaucoup d'objets du ciel profond n'ont pas une magnitude surfacique uniforme, ils sont formés de parties plus lumineuses (nodosités) et d'autres parties quasi invisibles à la vision humaine ou à la photo.
— L'extension de l'objet dépend du grossissement utilisé, de la qualité du ciel, de la longueur d'onde et donc du filtre utilisé.
— La dimension d'un objet varie énormément d'un catalogue à l'autre car personne n'a vraiment définit en quoi cela consistait. Le catalogue RC3 = "Third Reference Catalogue of Galaxies" définit plus précisément cette notion.
— Il faut tenir compte de la brillance du fond du ciel avant de parler de détection
— Les objets du ciel profond émettent parfois dans des bandes très étroites : OIII, $H\alpha$ etc ... ce qui les rend encore plus difficile à détecter que des galaxies ou des étoiles à l'oeil nu pour lesquelles le spectre lumineux est mieux représenté en général

La dimension d'une galaxie dans RC3 est déterminée par son extension jusqu'à l'isophote $D_{25} = 25.0$ MPSAS.

En général les catalogues dont le RC3 donne la magnitude surfacique dans la bande B (Blue) pour trouver la magnitude dans le visuel soit la bande V il faut calculer : $m_V = m_B - (B-V)_{\text{index}}$ [162]

L'influence de la brillance du fond du ciel joue un rôle très important dans la détection d'un objet par le biais d'un instrument, à lire l'ouvrage "Visual Astronomy Of The Deep Sky" de Roger N. Clark.

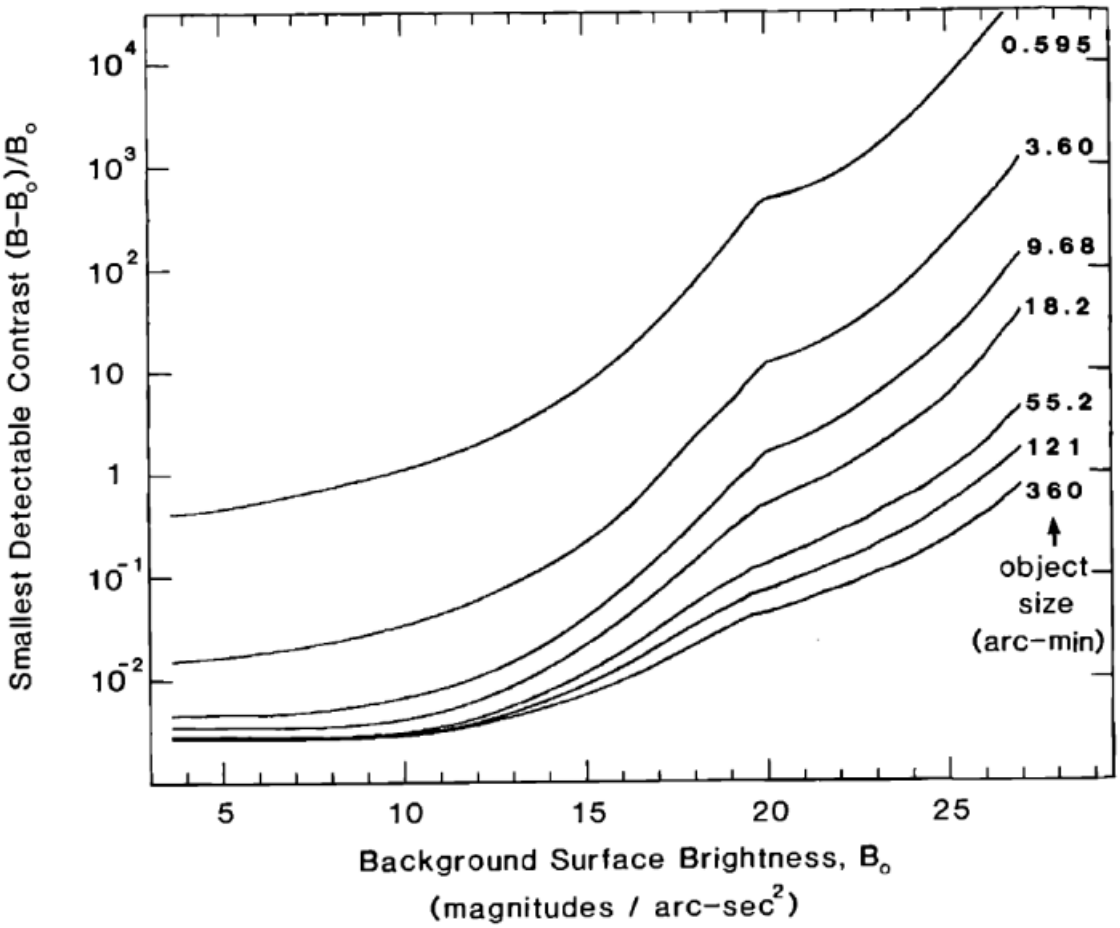


Figure 2.5. The minimum contrast needed to detect an object of a given angular size shown as a function of background surface brightness, B_o. The larger an object appears to the eye, the easier it is to detect. For small, bright objects on a bright background, a contrast less than 0.01 is enough for detection. But against the very dim night-sky background seen in a telescope (fainter than 25 magnitudes per square arc-sec), a large object must have a contrast of nearly 1.0, and a small object more than 100, to be detected. Derived from data in Table VIII of Blackwell (1946).

Credit : Roger N. Clark

Conversion en MPSAS : MPSAS = MPSAM + 8.89

Conversion en luminance (candela/m^2) [758] avec m exprimé en MPSAS. :

$$L = 108000 \times 10^{-0.4m}$$
$$L = 10^{log(108000)} \times 10^{-0.4m}$$
$$L = 10^{log(108000)-0.4m}$$
$$L = 10^{-0.4(m-log(108000)/0.4)}$$
$$L = 10^{-0.4(m-12.58)}$$

Lorsque le ciel est dépourvu de pollution lumineuse et que sa transparence est claire, sa magnitude surfacique vaut 22.5 mag/arcmin^2 (niveau Bortle 1 et mesurée par un Unihedron Sky Quality Meter), cependant beaucoup d'objets étendus comme M31 ont des magnitudes supérieures et sont donc indiquées comme étant plus faibles que le fond du ciel cependant ceux ci restent visibles sans difficulté même avec le plus petit des instruments, et cela, dans des condition de ciel moyen, il y a des raisons à cela :

— La dimension des galaxies et autres objets étendus du ciel profond indiquée dans les catalogues est très large, or la luminosité émanant de ces objets n'est pas uniforme et c'est en général au centre que la luminosité est la plus forte (noyau des galaxies par exemple).
— Le fond du ciel s'ajoute à la lumière de l'objet étendu et la composition des 2 montre un différentiel de luminosité encore détectable.

NELM ou "Naked Eye Limiting Magnitude" ou "MVLON" ou "Magnitude Visuelle Limite à l'oeil Nu" désigne la magnitude limite des étoiles vu à l'oeil nu au zénith [602, 294, 26].

Les conditions de l'évaluation de l'indice NELM sont :

1. Attendre que les yeux se soient adapté à l'obscurité
2. Prendre comme référence des étoiles proches de la Polaire (constellation UMi)
3. Utiliser sa vision décalée pour observer.

Il est possible de compter les étoiles visibles dans différentes constellations pour déterminer la magnitude limite [6].

Cette mesure reste très empirique puisque plusieurs paramètres peuvent varier et conduire à des estimations non concordantes :

1. L'acuité visuelle et l'adaptation à l'obscurité est variable d'un individu à l'autre
2. L'altitude du lieu d'observation
3. Le ciel est rarement uniformément éclairé (surtout en zone péri-urbaine).

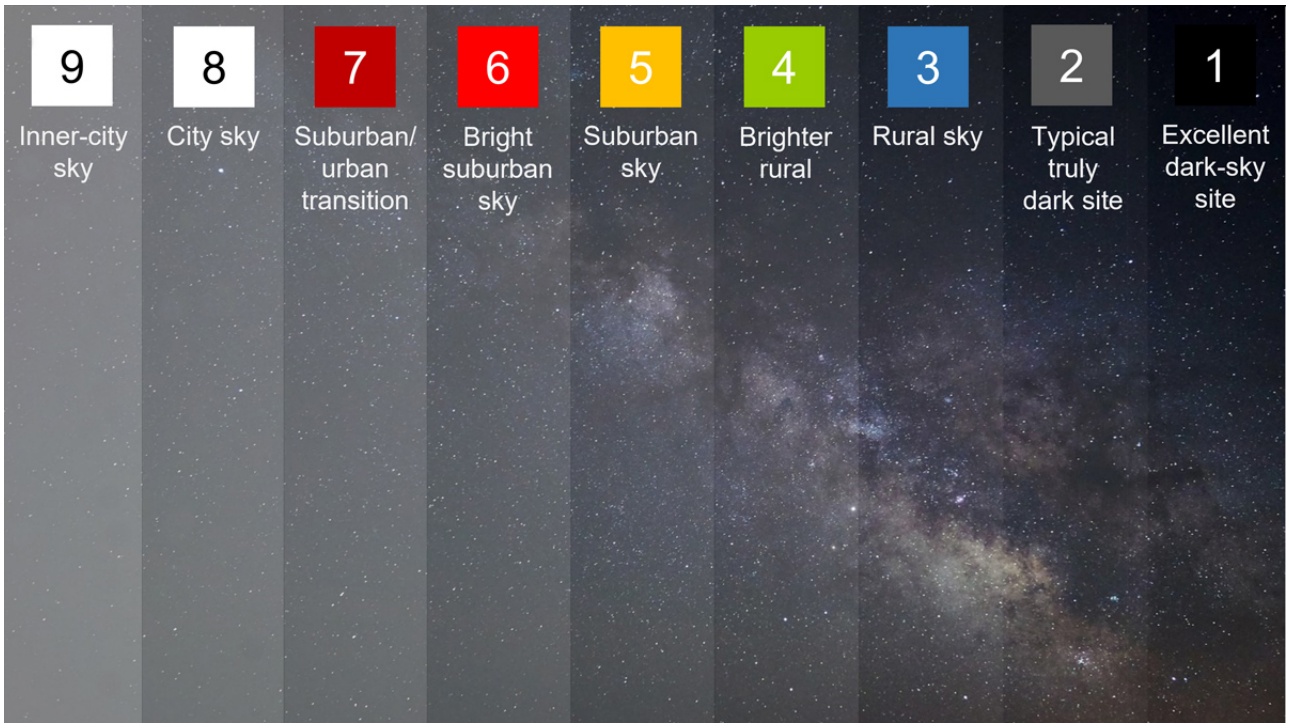
ZLM ou "Zenith Limiting Magnitude" désigne une variante de la magnitude NELM où la mgnitude est estimée au alentour du Zénith.

Transparence désigne le qualificatif d'un dispositif optique à laisser passer la lumière sans perte. Ce concept rejoint celui de la transmission lumineuse des oculaires et des lunettes. On parle aussi de transparence pour le ciel pour parler de la capacité de l'air atmosphérique à ne pas faire obstacle à la lumière. Le plus souvent, lorsque le ciel n'est pas transparent, il réfléchit la lumière émise depuis le sol et produit alors de la pollution lumineuse. Le niveau de transparence du ciel est directement lié à l'estimation de la magnitude limite visuelle NELM.

Echelle de Bortle désigne une échelle de 9 niveaux décrivant avec précision l'environnement correspondant et ce qui peut être vus pour chacun d'entre eux [119] [253]. Cette échelle a été publiée dans Sky&Telescope en 2001 par John Bortle [674].

6. https ://nineplanets.org/estimating-limiting-magnitude

Bortle Scale



Credit : Sky & Telescope

MPSAM signifie “Magnitude Per Square Arcmin” désigne une magnitude de surface. La conversion avec l’unité MPSAS est la suivante : MPSAS = MPSAM + 8.89 où $8.89 = 2.5 \times log(3600)$

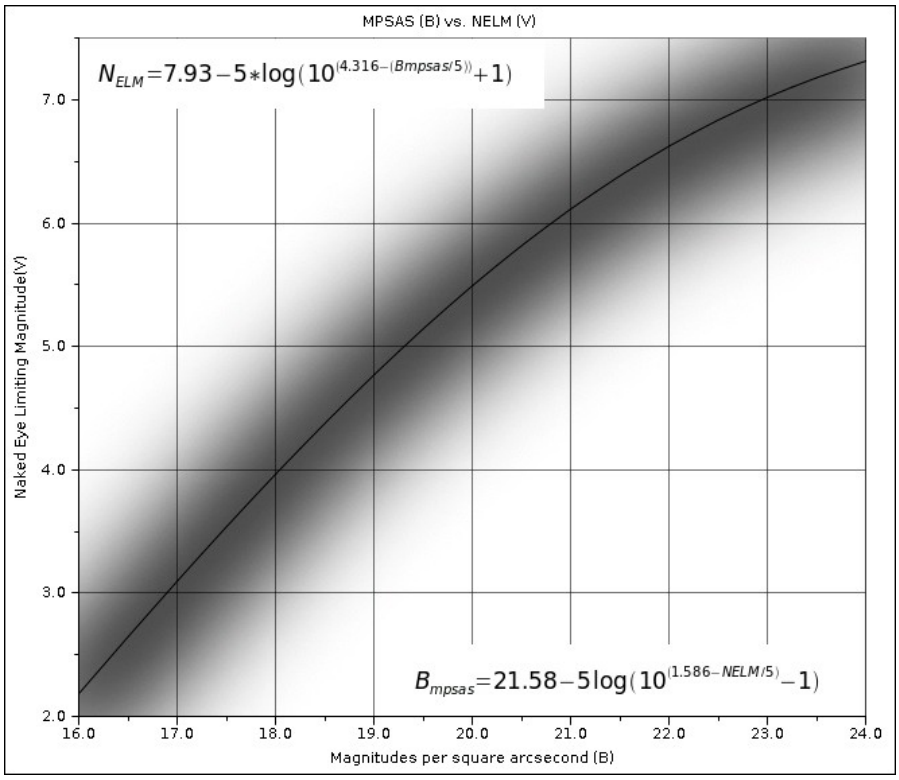
MPSAS signifie “Magnitude Per Square Arcsec” désigne une magnitude de surface. Le SQM donne la luminosité du fond du ciel mesuré en MPSAS.

MPSAS of natural light sources

	Luminance Nit = cd/m2	Magnitudes per square arcsec	arcmin
Sun	3E+9	-10.7	-19.6
Venus (max elong)	15000	+1.9	-7
Clear daytime sky (at horizon)	10000	+3	-6
Full Moon	6000	+3.6	-5.3
Mars at perihelion	4000	+3.9	-5.0
Overcast daytime sky (at horizon)	1000	+5	-4
Jupiter	800	+5.7	-3.2
Saturn	700	+5.9	-3.0
Heavy daytime overcast (at horiz)	100	+8	-1
Uranus	60	+8.6	-0.3
Neptune	30	+9.3	+0.4
Sunset at horizon, overcast	10	+10	+1
Clear sky 15 min after sunset (horiz)	1	+13	+4
Clear sky 30 min after sunset (horiz)	0.1	+15	+6
Fairly bright moonlight (at horizon)	0.01	+18	+9
Moonless, clear night sky (at horiz)	1E-3	+20	+11
Moonless, overcast night sky (at horiz)	1E-4	+23	+14
Dark country sky between stars (zenith)	3E-5	+24	+15

Credit : Paul Schlyter

Correspondance avec la magnitude limite visuelle NELM



Credit : Unihedron

Sky Quality Meter ou “SQM” est un appareil produit par la société Unihedron permettant de mesurer la luminosité du fond du ciel = sa Luminance et donc d’évaluer de manière fiable l’extinction atmosphérique dont le niveau de pollution lumineuse du ciel. L’unité de mesure est le MPSAS mag/arsec^2. On peut convertir cette valeur en équivalent NELM = $7.93 - 5 \times log(10^{4.316-(\text{MPSAS}/5)} + 1)$ [757]. Une autre formule empirique : NELM = $[(\text{MPAS} - 8.89)/2] + 0.5$ [200]. Il existe un produit alternative Lunatico.

B-V Index désigne une mesure de la couleur de l’étoile permettant de déduire sa température effective T si celle-ci est modélisée comme un corps noirs parfait, l’index correspond à la différence de magnitude entre le bleu et le vert : B-V = $m_B - m_V = -0.72 \times \frac{7090}{T}$ [366]

2.7 Les Expressions

Astram voir “Astro Amateur”

Astro Amateur désigne un astronome amateur. On peut être considéré comme étant astronome amateur si l’on s’intéresse à l’astronomie en général par le biais de ses lectures ou si l’on observe régulièrement le ciel à l’aide d’un instrument ou encore si l’on s’adonne à la photographie astronomique.

Barlowter désigne le fait d’ajouter une barlow dans sa configuration afin de doubler le grossissement de l’oculaire ou de changement le facteur d’agrandissement de l’image (en imagerie).

Bouzoscope est une expression pour désigner un instrument, souvent un Newton, de très mauvaise qualité, très souvent à miroir sphérique ou doté d’une barlow intégrée pour rallonger artificiellement une focale trop courte. Des marques à éviter : Mizar, Seben ou Omegon. Beaucoup de ces télescopes vendus à très bas prix sont de type “Bird-Jones” et ont des miroirs

sphériques ou incorporent des barlows en plastique pour rallonger artificiellement la focale du point de vue des oculaires pour les aider à mieux fonctionner en diminuant l'angle d'incidence des rayons lumineux (ex : Telescope Seben 150 F/5 à 1400 mm de focale résultante). La monture EQ fournie avec n'est pas stable et se délite en morceaux après quelques utilisations seulement.

Caillou désigne soit un oculaire, soit un objectif photographique selon le contexte.

Collim. désigne la collimation, la procédure de réalignement des optiques

CROA ou "Compte-Rendu d'Observation Astronomique" terme qui serait inventé en 2002 (durant une nuit du 14 au 15 Août !) par Bruno Salque alias 'Bruno sur les forums (Webastro ou Astrosurf). Un CROA est une petite note écrite permettant de rendre compte d'une séance d'observation visuelle et généralement partagée dans les forums.

Diamétrite Aigüe ou "Aperture Fever" désigne la maladie imaginaire dont souffre l'astram qui n'est jamais satisfait de son instrument et désire acquérir un instrument de diamètre toujours supérieur.

Dob 250 signifie "Dobson de 250 mm Diamètre" voir "Dobson"

DIY signifie "Do It Yourself" ou "Homemade" désigne une expression voulant dire "A Faire Soi-même".

Faint Fuzzies désigne une expression rencontrée dans les forums US et voulant dire "Objets du Champ Profond" tels que les galaxies et les nébuleuses mais accessibles que par les plus gros instruments amateurs, c'est-à-dire 300 mm et plus.

Faire du CP signifie "Faire du Ciel Profond" désigne une expression courante voulant dire utiliser son instrument pour observer ou photographier des objets lointains en dehors du système solaire.

Faire du Planétaire est une expression courante voulant dire utiliser son instrument pour observer ou photographier les planètes (la Lune y compris).

Faire du Visuel est une expression courante voulant dire utiliser son instrument pour observer le ciel.

Galette désigne une expression décrivant un miroir primaire d'un télescope.

Juju voir "Jumelles"

Planet Killer désigne un instrument de longue focale permettant des grossissement important sans perte de qualité d'image pour observer les planètes. Ce sont en général soit des lunettes de longue focale achromatique ou ED, ou encore des dobsons de longue focale (coma très réduite).

Scope voir "Téléscope" (par abus de langage).

T250 signifie "Télescope de 250 mm de Diamètre"

Turbuler désigne l'effet de la turbulence, on dit que l'image turbule ou que l'image est turbulente. Lorsque l'image turbule celle-ci ondule sous l'effet de la turbulence.

2.8 Livres

Burnham's Celestial Handbook désigne un ouvrage de descriptions des objets du ciel profond visibles sous nos latitudes publié en 3 volume et devenu culte outre atlantique. Ce livre a été édité la première en 1966 par Robert Burnham, Jr. un astronome autodidacte qui travailla à l'observatoire Lowel aux USA .

IDSA ou "Interstellarum Deep Sky Atlas" est un grand atlas du ciel profond. Les objets sont catégorisés selon le diamètre des instruments à partir desquels ils sont accessibles.

NSOG ou "Night Sky Observer Guide" désigne un ouvrage en 3 volumes de description des objets du ciel profond vus dans divers instruments. Chaque volume fait environ 500 pages, le dernier volume est consacré au ciel de l'hémisphère sud. Ces ouvrages peuvent être considérés comme l'équivalent US de "La Revue des Constellations" de Robert Sagot et Jean Texereau.

PSA voir "Pocket Sky Atlas"

S&V désigne "Sciences & Vie" le magazine mensuel de vulgarisation scientifique français crée en 1913. Il est inspiré du magazine américain "Popular Science".

La Revue des Constellation désigne le tout premier ouvrage de descriptions visuelles des objets du ciel profond visibles sous nos latitudes. Ce livre édité par la SAF en 1963 et 1982 est coécrit par de Robert Sagot et Jean Texereau comprend des descriptions très précises des objets vus dans divers instruments, des jumelles de 50 mm jusqu'au télescope de 300 mm. Le livre contient aussi des cartes des différentes constellations. Ce livre qui regroupait une série d'articles parus initialement dans différents numéros de la revue éponyme qui n'est plus édité depuis longtemps. Ce livre fût le livre de chevet de plusieurs générations d'astro amateurs est désormais devenu collector. Outre Atlantique, l'équivalent de la revue est le "Burnham's Celestial Handbook".

REVUE DES CONSTELLATIONS

15. — *Carte* 6 : **LA GRANDE OURSE, URSA MAJOR, URSÆ MAJORIS, UMa**

Très belle constellation connue de tous les amateurs d'astromonie. Par son étendue, 1 280 degrés carrés, elle vient au troisième rang après l'*Hydre* et la *Vierge*. Les sept étoiles classiques constituant le *Grand Chariot* n'occupent, en réalité, qu'une partie de la constellation ; aussi, les nombreux objets célestes décrits dans cet article et le suivant seront souvent à rechercher assez loin des sept étoiles principales.

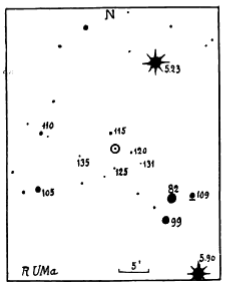


Fig. 1.

Avant de passer en revue les variables et les doubles, signalons une étoile de magnitude visuelle 6,46 ($\alpha = 11^h50^m,1$; $\delta = +38°05'$) que l'on trouvera sur la carte à 1° au N de NGC 3 941 : c'est *Groombridge 1830*. Pendant longtemps elle a été considérée comme l'étoile la plus rapide du ciel : 7″,05 par an vers 145°. Distance 10 parsecs. On ne connaît actuellement que deux étoiles (Étoiles de *Barnard* et de *Kapteyn*) ayant des déplacements apparents plus grands.

ÉTOILES VARIABLES. — Une quarantaine d'étoiles variables, dont quelques-unes particulièrement intéressantes mais trop faibles pour être suivies avec des instruments d'amateurs. Voici quelques variables à forte amplitude que l'on pourra surveiller avec des ouvertures faibles ou moyennes :

R UMa. — $\alpha = 10^h41^m,1$; $\delta = +69°02'$; var. de $m_v = 6,2$ à 13,6 en 301 jours ; sp. M4e ; dernier max. prévu le 23 décembre 1953 (fig. 1).

TX UMa. — $\alpha = 10^h42^m,4$; $\delta = +45°50'$; var. à éclipses de $m_{pv} = 6,8$ à 8,9 en 3j,06 ; l'éclipse principale dure 11h.

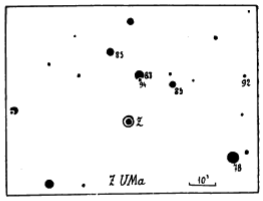


Fig. 2.

Z UMa. — $\alpha = 11^h53^m,9$; $\delta = +58°09'$; var. semi-régulière de $m_v = 6,6$ à 9,1 en 198 jours ; apparentée au type *RV Tauri* ; sp. M6e (fig. 2).

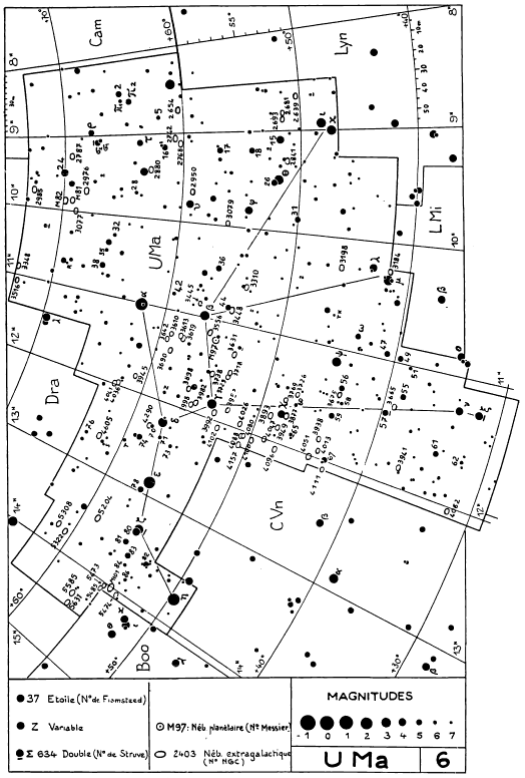
T UMa. — $\alpha = 12^h34^m,1$; $\delta = +59°46'$; var. de $m_v = 6,4$ à 13,5 en 256 jours ; sp. M4e ; dernier max. vers le 7 septembre 1953.

S UMa. — $\alpha = 12^h41^m,8$; $\delta = +61°22'$; var. de $m_v = 7,1$ à 12,9 en 225 jours ; sp. S2e ; dernier max. prévu le 3 décembre 1953.

ÉTOILES DOUBLES. — Particulièrement nombreuses, Citons, entre autres :

Σ 1258. — $\alpha = 8^h39^m,9$; $\delta = +49°03$; $m_v = 7,53$ et 7,74 ; $\theta = 330°,8$; $\rho = 9″,97$ (ph. Strand, 1941,1). Facile avec L 55 et L 80 × 50 (G. Ga).

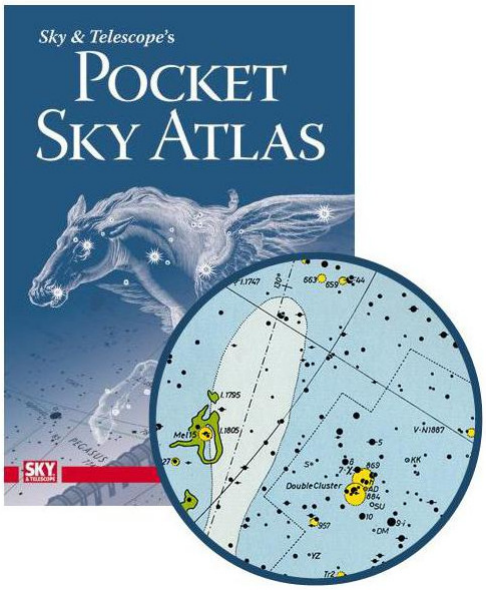
(*Suite, page 276.*)



Credit : R. Sagot & J. Texereau

Rükl ou “Atlas Of The Moon” désigne un atlas de la Lune écrit par Antonin Rükl et édité par Gründ. Il s’agit d’un atlas dessiné avec une très grande précision sans équivalent encore aujourd’hui. Ce livre qui n’est plus édité est devenu collector chez les astro amateurs.

Pocket Sky Atlas désigne l’atlas du ciel de poche de Roger W. Sinnott édité par le magazine Sky&Telescope et sorti en 2006. Cet atlas de terrain est devenu très populaire parmi les astrams, car il est solide et résiste à l’humidité. Une nouvelle version grand format “Jumbo” est sorti en 2015.



Credit : Sky & Telescope

Texereau désigne l'ouvrage de référence des constructeurs de télescope amateurs : "La Construction du Télescope d'Amateur" [396]. Ce livre écrit par Jean Texereau, un opticien ingénieur et ancien membre de la SAF, guide le lecteur pas à pas dans la réalisation d'un miroir parabolique à partir d'un disque de verre.

Willman Bell désigne l'éditeur de nombreux ouvrages de référence sur l'astronomie repris en 2022 par la société Sky Publishing propriétaire du magazine Sky&Telescopes.

2.9 Les Fabricants

Astro-Physics où "AP" désigne la société US dont le dirigeant est de Roland Christen le designer de lunettes apochromatiques de grands diamètres ainsi que les montures GTO et ce depuis 1981.

Bresser désigne un fabricant de matériel astronomique basé en Allemagne, mais fabriquant en Chine. Bresser fait partie du groupe chinois JOC. Ils produisent toutes sortent d'instrument sous leur nom et vendent d'autres marques du même groupe comme Explore Scientific.

Canon Optron désigne une filiale de Canon, un fabricant japonais sous-traitant de Takahashi pour la fabrication des lentilles de leurs fameuses lunettes.

Clavé désigne une marque d'oculaire française (la seule à ce jour) fabriquée dans les années 60/70 et prisée par certains astrams collectionneurs aujourd'hui.

CFF Telescopes désigne un fabricant européen de télescopes Cassegrain et de lunettes APO haut de gamme à bain d'huile comme séparateur des lentilles.

Airy-Disk Photoelectric Instruments désigne un fabricant Chinois et distribué aux US de lunettes ED et APO haut de gamme à prix très compétitifs.

DKD ou "DKD Optics" est un fabricant Chinois d'objectif achromatiques pour lunettes astronomiques. DKD est fournisseur de Istar et Barride Optics.

Explore Scientific ou “ES” désigne un fabricant de matériel astronomique basé aux USA propriété de Journey North Inc. (USA) mais fabricant en Chine par JOC. Leur réputation a été faite sur leur gamme d’oculaire très grand champ 82° et 100° qui sont des copies de grande qualité des oculaires Tele Vue Ethos. Ils produisent toutes sortent d’instrument sous leur nom.

GSO signifie “Guan Sheng Optical” désigne un fabricant taiwanai de matériel optique. GSO est une marque blanche ou “OEM” de télescopes des marques Kepler (OU), TS-Optics (Teleskop Service), Zhumell (n’existe plus en 2018), Apertura ou Omegon. Le nom est souvent utilisé pour désigner un miroir ou un télescope provenant de ce fabricant. GSO fourni aussi les miroirs pour toutes les marques blanches mais aussi pour la marque Lightbridge (Meade). Les miroirs sont le plus souvent en BK7 un verre quasi ordinaire n’ayant pas les propriétés du Pyrex ou équivalents. Attention le BK7 utilisé par GSO n’est pas de même qualité que celui produit par Schott qui possède la marque déposée, car ce premier présente toujours des tensions résiduelles à partir de 300 mm de diamètre.

Istar ou “Istar Optical” désigne un fabricant US d’objectifs achromatiques de grande qualité pour lunettes astronomiques. Istar travaille avec DKD un autre fabricant chinois [7]. Les dénominations “R30” ou “R35” par exemple indiquent le pourcentage virtuel d’augmentation de la longueur focale par rapport à un doublet achromatique BK7-F2 classique de même focale [500]. Leurs objectifs sont surtout calés chromatiquement sur les raies des nébuleuses (calage entre C et F) et sont donc plus adaptés au ciel profond qu’au planétaire [538]

Kunming United Optics désigne un fabricant de jumelles et lunettes chinois fournissant de nombreux revendeurs : TS, SV, Altair Astro. Leur site Kunming United Optics

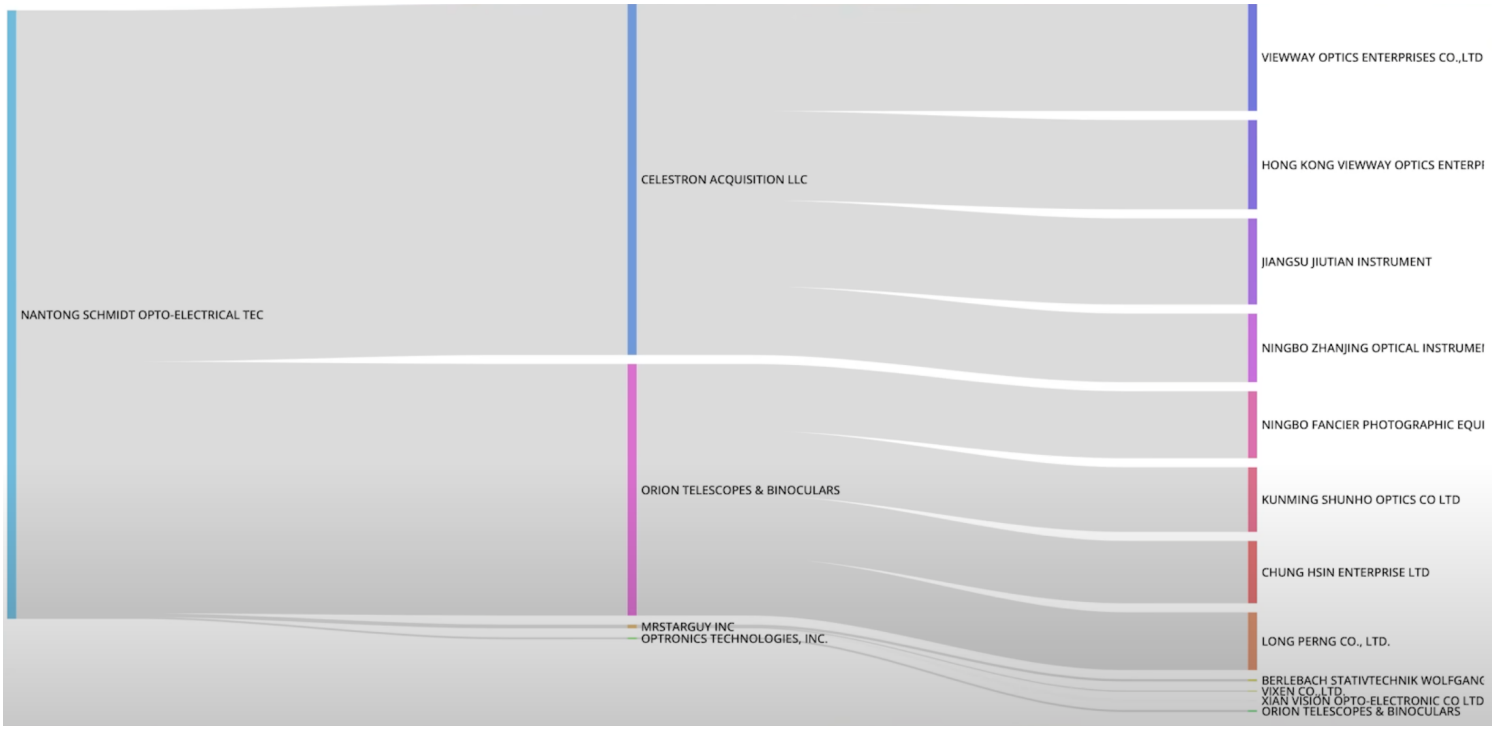
Long Perng est un fabricant de lunette basé à Taiwan pour le distributeur Skywatcher.

JOC signifie “Jinghua Optics & Electronics Co.” désigne un fabricant chinois de télescopes et de matériel pour l’astronomie. JOC produit pour les marques Bresser, Lunt et Explore Scientific. JOC fourni notamment SurplusShed.

LZOS est un fabricant de lunettes APO très haut de gamme. LZOS est basé en Russie et appartient à la société d’état Rostec. LZOS est le fabricant des verres des objectif de lunette de design TMB.

Nantong Schmidt Opto Electrical Technology est l’industriel fabricant pour la quasi totalité des marques “concurrentes” du marché, les liens entre ces companies d’état chinoises semblent plus étroit qu’il n’apparaisait avant et qu’il y a bien un vaste monopole caché derrière

7. Jean-Pierre Brahic : objectif de 230 mm de ma Lunette $H\alpha$ a été taillé par DKD suivant un cahier des charges bien précis demandé par Istar Optical



Credit : Dylan O'Donnell

Nimax est un groupe allemand spécialisé dans le matériel astro, c'est la maison mère de Omegon et c'est aussi le distributeur exclusif en Europe de Meade et Coronado. Nimax possède les magasins : Astroshop et Optics-Pro.

Oberwerk est le plus gros revendeur de jumelles d'observation sur le marché US. La totalité des jumelles vendues par Oberwerk sont fabriquées en Chine.

Omegon est une marque allemande de matériel astro appartenant au revendeur Astroshop qui lui-même appartient à Nimax.

Orion Telescopes est le plus gros vendeur de matériel d'astronomie aux USA. Jusqu'en 2021 ils importaient et revendaient aussi leur matériel en Europe, mais depuis la plateforme EU a fermé, seuls les magasins US revendant la marque Orion sont accessibles aux acheteurs européens. En 2021 Orion rachète Meade / Coronado en cessation de paiement. En 2024 Orion ferme son siège social et tombe sous le coup du chapitre 11 avant la fermeture de l'entreprise. 1.

Sharpstar désigne un fabricant lunettes Chinois fournissant de nombreux revendeurs : TS, Altair Astro. Leur site Sharpstar Optics

Skywatcher ou "SW" est un distributeur de matériel astronomique basé au Canada. Skywatcher fait partie du groupe Synta. Skywatcher produit une large gamme de dobsons classiques, Dobson Flextube, Mak, Lunette ED et APO ainsi que les montures EQ.

Sunny Optics une filiale de "Ningbo Sunny Electronics" est un fabricant chinois de matériel optiques. Sunny Optics possédait la marque Meade jusqu'en Mars 2021 avant le rachat de Meade par Orion Telescopes.

Synta ou "Synta Technology Corporation Of Taiwan" est un fabricant chinois de matériel optique. La filiale principale est "Suzhou Synta Optical Technology" en Chine mainland. Synta possède la marque Skywatcher et produit des télescopes pour Celestron depuis 2005 (une marque du groupe via la filiale SW Technology Corporation), Orion Telescopes & Binoculars

(distributeur de la marque Orion) et Medas distributeur de la marque PERL. Synta est donc liée à ces sociétés : Orion, Celestron, Sky-Watcher, Meade, Medas.

Takahashi ou “Taka” désigne une lunette de la société japonaise éponyme. Takahashi fondé au Japon en 1932 et oeuvrant dans le domaine de la sidérurgie puis reconvertie dans la fabrication de lunettes en 1971 [8]. Takahashi est renommé pour ses lunettes de type APO très haut de gamme essentiellement destinées à la photo grand champ du ciel profond. Ils sont les premiers à avoir commercialisé des lunettes à base de verres à très faible dispersion en Fluorite. Takahashi fait réaliser toutes ses optiques par Canon Optron [687, 688, 90]

Exemple de séries bien connues extraites du catalogue 2024 :

Lunettes Takahashi

Nom	⌀ mm	F/D	Formule	PO	Poids kg	Pbr	Lmin	Petzval	📷	Web
FC-100DL	100	9	Doublet ED Fluorite	2	3.8		940			🏠
FC-100DC	100	7.4	Doublet ED Fluorite	1.25	2.8		815			🏠
FC-100DF	100	7.7	Doublet ED Fluorite	2	3.6		785			🏠
FC-100DZ	100	8	Doublet ED Fluorite	2	3.9	✓	770		✓	🏠
TSA 102	102	8	Triplet APO S-FPL53	1.25	5.4	✓	625			🏠
TSA 120	120	7.5	Triplet APO S-FPL53	2	6.7	✓	870		✓	🏠
TOA 130NS	130	7.7	Triplet APO S-FPL53	2	10.5	✓	1012		✓	🏠
TOA 150B	150	7.3	Triplet APO S-FPL53	2	15.2	✓	1110		✓	🏠
FS-78	78	8.1	Doublet ED Fluorite	1.25	5.3		930		✓	🏠
FS-102	102	8.1	Doublet ED Fluorite	1.25	2.6		740		✓	🏠
FS-128	128	8.1	Doublet ED Fluorite	1.25	7.5		1176		✓	🏠
FS-152	152	8.1	Doublet ED Fluorite	2	7.5		1176		✓	-
FSQ-85EDX	85	5.3	Quadruplet Petzval S-FPL53	2	3.6	✓	535	✓	✓	🏠
FSQ-106EDX4	106	5	Quadruplet Petzval S-FPL53	2	7	✓	675	✓	✓	🏠

Note : Pbr = Par buée rétractable, Lmin = Longueur minimum par buée rétracté, 📷*= Astrograph.*

Le cas de la FSQ-85EDX : cette lunette est une apochromatique dotée d’un correcteur de champ interne = “Field Flattener” cependant la correction apportée est mauvaise autour du centre du champ lorsqu’on utilise des capteurs à petits pixels, inférieurs à 9 μm [600] alors Takhashi a sorti un correcteur externe afin de régler le problème.

A l’origine Takahashi produisait des formules Steinheil donc en renversant le doublet [627] avec le verre Crown à l’arrière afin de protéger la Fluorite mais aussi de descendre en dessous de F/8 contrairement à la formule Fraunhofer [506, 626]. Dans les années 90s avec le progrès des traitements les Takahashi FS-* de type Fraunhofer ont un verre Crown en Fluorite à l’avant. Dans les années 2000 c’est le retour des Takahashi FC-100* (DL, DC, DF, DZ) et on revient à la formule Steinheil donc Fluorite à l’arrière mais dotée des derniers traitements malgré tout. Les lunettes TOA/FSQ/TSA sont aussi connues pour avoir des traitements de lentilles sensibles, les optiques de ces lunettes ne peuvent donc être nettoyées qu’avec de l’eau déminéralisée ou du Purosol en dernier recours [611].

TMB ou “Thomas Back” est un fabricant de lunette APO très haut de gamme, concurrent de Astrophysics aux USA depuis 1989. Depuis l’origine les objectifs APO de ces lunettes sont fabriqués par LZOS en Russie, APM est le fabricant des tubes. Ces lunettes sont vendues sous le nom APM LZOS depuis la disparition de l’opticien Thomas Back en 2006 [734].

8. Le processus de fabrication de Takahashi

Tele Vue ou “Tele Vue Optics” ou “TVO’ ou “TV” désigne un fabricant américain de matériel astronomique basé aux USA. Son fondateur emblématique Al Nagler [709] est un ingénieur opticien de la NASA qui a travaillé sur le simulateur du programme Apollo dans les années 60s et qui a révolutionné l’astronomie amateur depuis 1982. Sa réputation s’est faite dès l’introduction du Nagler une formule optique devenue célèbre. Il s’agit d’un oculaire de 82° de champ. Depuis, Tele Vue n’a cessé d’innover dans des optiques toujours dédiées à l’astronomie amateur : oculaires Ethos 100°, oculaires Delos, correcteur de coma Paracorr II. Le Paracorr II est un correcteur de coma qui corrige complètement la coma sur des Newtons aussi court que F/3. Les oculaires Tele Vue ont depuis été largement imité par des fabricants chinois (Explore Scientific) à moindre coût, mais sans toutefois jamais atteindre le niveau de correction des originaux. Les Ethos et les Naglers ont été spécifiquement développés pour l’astronomie et particulièrement les instruments très court (en dessous de F/5) car ils sont capables de fonctionner avec des angles d’incidences élevés, ce qui n’est pas le cas des autres formules optiques existantes.

De plus, ils sont conçus pour minimiser la distorsion de grossissement angulaire ou “AMD” [9] et de fait :

1. Les droites verticales ou horizontales restent des droites même proche du bord
2. Les planètes restent approximativement rondes vers le bord

Attention, les oculaires Naglers et les Ethos ne sont pas adaptés pour des instruments à longues focale (F/8 et au delà).

Tele Vue a aussi développé des lunettes astronomiques APO de grande qualité utilisées dans un premier temps pour tester les oculaires fabriqués par Tele Vue. La série légendaire des Tele Vue NP101 ou Tele Vue NP127 sont des lunettes à 4 lentilles dont un doublet correcteur de Petzval interne corrigeant ainsi complètement la courbure de champ inhérente aux lunettes courtes. Ce sont des lunettes dédiées à l’astrophoto et a l’observation grand champ essentiellement.

Exemple de lunettes bien connues (catalogue 2021) :

Lunettes Tele Vue

Nom	⌀ mm	F/D	Formule	PO	Poids kg	Pbr	Lmin	🏞	Web
Tele Vue NP-127is	127	5.2	Quadruplet Petzval	2	6.6	✓	902	✓	🏠
Tele Vue NP-101is	101	5.4	Quadruplet Petzval	2	4.9	✓	648	✓	🏠
Tele Vue 85	85	7	Doublet ED	2	6.0	✓	483	✓	🏠
Tele Vue 76	76	7	Doublet ED	2	2.3	✓	368	✓	🏠

Note : Pbr = Par buée rétractable, Lmin = Longueur minimum par buée rétracté, 🏞= Astrograph.

Vixen désigne un fabricant et un revendeur de matériel astronomique fondé en 1949 et basé au Japon. La renommée de cette marque a été faite sur ses lunettes à base d’objectif en Fluorite dans les années 80-90s. Maintenant, une bonne partie de ses lunettes sont fabriquées en Chine. En dehors du Japon, la marque Vixen est distribuée par Bresser.

2.10 Les Vendeurs

Optique Unterlinden ou “OU” est un revendeur français de matériel astronomique ayant une surface commerciale à Colmar ainsi qu’un site Internet de vente.

Surplusshed désigne un revendeur de pièce d’optique d’occasion situé aux USA dans l’état de Pennsylvanie. Il est notamment le propriétaire de la marque Wollensack et fabrique les objectifs achromatiques de cette marque.

9. English : Angular Magnification Distorsion

Teleskop Service ou “TS” désigne un revendeur allemand de matériel astronomique sur Internet très réputé.

Univers Astro ou “UA” est un revendeur français de matériel astronomique en ligne.

2.11 Les Médias

AVEX signifie “Astronomie du Vexin” désigne les “Cartes AVEX”, des cartes de pollution lumineuse éditées par Frédéric Tapissier depuis 2011. Ces cartes montrent avec un code couleur le niveau de pollution lumineuse sur tout le territoire européen. Ces cartes reposent sur les cartes d’artificialisation des sols de la base européenne “Corine Land Cover”. Par conséquent, ces cartes ne donnent pas exactement des mesures de la pollution lumineuse, mais seulement une estimation.

AFA signifie “Association Française D’Astronomie” la toute première association d’astronome amateur de France. Fondée 1946 par Pierre Bourge, l’AFA édite le magazine bimestriel “Ciel et Espace”.

C&E signifie “Ciel Et Espace” le magazine de l’AFA dont Alain Cirou est le rédacteur en chef.

2.12 Les Organisations

BDL signifie “Bureau des Longitudes” est une institution très ancienne (1795) regroupant des astronomes et des géophysiciens chargés de définir les missions de l’IMCCE de l’Observatoire de Paris.

CDS ou “Centre de données Astronomiques de Strasbourg” est une base de données d’information de référence astronomique en libre accès à destination des professionnels et des amateurs. Le CDS héberge notamment la base de données SIMBAD contenant la quasi-totalité des catalogues d’objets du ciel des plus anciens aux plus récentes compagnes de collecte de données des différentes missions satellitaires d’étude du ciel. Vizier est la base de données des catalogues. Le site comprend également des banques d’image d’objet du ciel profond, des atlas du ciel interactifs etc ...

IMCCE signifie “Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides” est une institution au sein de l’Observatoire de Paris chargée notamment de préparer les éphémérides officielles nationales afin de les publier dans l’ouvrage de parution annuelle “La Connaissance des Temps” et cela depuis 1678 sans interruption.

2.13 Les Événements

JOA signifie “Journée de l’Occasion de l’Astronomie” est une bourse d’échange de matériels optiques dédiés à l’astronomie se tenant à Communay (69) tous les ans en Mars.

NEAF ou “Northeast Astronomy Forum” est une exposition de matériel d’astronomie pour l’observation se tenant en Avril au Rockland Community College à Suffern (New York). Cet évènement est de renommée mondiale et beaucoup de marques du secteur y sont représentées.

NEAIC ou “Northeast Astro-Imaging Conference” est une exposition de matériel d’astronomie pour l’imagerie se tenant en Avril au Rockland Community College à Suffern (New York). Cet évènement est de renommée mondiale et beaucoup de marques du secteur y sont représentées.

RAAGSO signifie “Rassemblements de l’Astronomie Amateur dans le Grand Sud-Ouest” désigne une manifestation annuelle en Septembre et rassemblant la communauté des astrams et se tenant à Ambeyrac (12).

RAP signifie “Rencontres Astronomiques du Printemps” désigne une manifestation annuelle qui se déroule le premier weekend de l’Ascension et rassemblant la communauté des astrams en se tenant à Craponne sur Arzon (43) dans la Haute-Loire.

RCE ou “Rencontres du Ciel et de l’Espace” est une exposition de matériel d’astronomie se tenant en Novembre à la Cité des sciences et de l’industrie de Paris et où beaucoup de marques du secteur sont représentées.

ROS ou “Rencontres des Observateurs Solaires” désigne une manifestation annuelle qui se déroule en Juin à Serbannes près de Vichy et rassemblant la communauté des observateurs du soleil.

Stellafane Convention désigne la manifestation annuelle rassemblant la communauté des astrams US et se tenant à l’origine à Springfield (Vermont USA) au mois d’août : https ://stellafane.org/convention/2021/index.html. C’est la manifestation publique des astro amateurs la plus ancienne puisqu’elle déroule chaque année depuis 1924.

Valdrôme est une manifestation annuelle (Août) rassemblant la communauté des astrams et se tenant à Valdrôme (26).

2.14 Divers

Objet ou “Objets Célestes” désigne de manière générique un sujet d’observation du ciel faisant généralement soit parti du ciel profond, soit du système solaire (planètes, lune, astéroïdes).

Catalogue désigne une base de données d’objets célestes. Les catalogues sont en général spécialisés pour un type d’objet :

1. Étoiles : Bayer, Bright Star, HD, SAO, Hipparcos, Tycho-2, Gaia
2. Étoiles doubles : WDS, StelleDoppie
3. Étoiles variables : GCVS, AAVSO
4. Nébuleuses et Galaxies : Messier, RNGCIC, LEDA ...

Ciel Profond désigne les objets lointains situés en dehors de notre système solaire : nébuleuses, galaxies, amas d’étoiles etc ...

Chapitre 3

Astrophysique

3.1 Les Corps Célestes

Luminosité des planètes désigne la luminosité des surfaces planétaires en $candela/m^2$. Cette luminosité dépend de la phase de la planète.

The planets and their surface Brightness

Planet	Phase angle	Phase factor	Brightness
Mercury	50°	32%	7 700 cd/m^2
	90°	17%	4 200 cd/m^2
	130°	7.2%	1 800 cd/m^2
Venus	50°	73%	29 000 cd/m^2
	90°	48%	20 000 cd/m^2
	130°	45%	18 000 cd/m^2
	0°	100%	4 100 cd/m^2
	50°	34%	1 400 cd/m^2
	90°	17%	700 cd/m^2
	130°	8.4%	340 cd/m^2
Mars	0°	100%	2 350 cd/m^2
	47°	62%	1 400 cd/m^2
Jupiter			585 cd/m^2
Saturne			180 cd/m^2
Uranus			54 cd/m^2
Neptune			20 cd/m^2

Source : “Observing the moon, planets and comets” - Clark R. Chapman and Dale P. Cruikshank

Note : B *= Brightness,* $B_{Jupiter\ Satellite\ I,\ II} > 2 \times B_{Jupiter}$, $B_{Jupiter\ Satellite\ III} = B_{Jupiter}$, $B_{Jupiter\ Satellite\ IV} = B_{Jupiter}/2$, $B_{Daylight} = 8000cd/m^2$.

Taille apparente des planètes désigne la dimension angulaire des planètes qui varie selon la distance à la Terre.

Dimension apparent des planètes

Planètes	Dimension
Soleil	31’27" - 32’ 32"
Lune	29’20" - 34’6"
Vénus	9.7" - 1’6"
Jupiter	29.8" - 50.1"
Saturne	14.5" - 20.1"
Mars	3.5" - 25.1"
Mercure	4.5" - 13.0"
Uranus	3.3" - 4.1"
Neptune	2.2" - 2.4"
Ceres	0.33" - 0.84"
Vesta	0.20" - 0.64"
Pluton	0.06" - 0.11"
R Doradus	0.052" - 0.062"
Betelgeuse	0.049" – 0.060"

Effet Seeliger ou “Effet d’opposition” ou “Opposition surge” correspond à l’augmentation brusque de luminosité = d’albédo de la surface d’une planète lorsque les rayons du soleil frappant sa surface proviennent de derrière l’observateur. Cela est du au fait qu’une planète à la surface rugueuse donc avec du relief produit suffisamment d’ombre en dehors des phases d’opposition pour réduire significativement l’éclairement de sa surface alors couverte par les ombres du relief. Ce n’est que lorsque ces ombres disparaissent complètement que la luminosité globale de la surface augmente brutalement. Pour les planètes externes (à l’orbite terrestre) ce n’est que lors des phases d’opposition que ce phénomène se produit. L’albédo de la Lune augmente d’environ 40% entre 4° et 0° d’angle de phase. Cette effet peut être observé aussi sur les anneaux de Saturne mais uniquement lors des phases d’opposition.

Grande Tache Rouge ou “Great Red Spot”, “GRS”, “GTR”, désigne la grande tache rosée sur le disque de Jupiter qui en réalité est un immense cyclone (plusieurs fois la Terre). En 1800 la tache était 3 fois plus grande qu’actuellement et en 2030 celle-ci aura quasiment disparu [252]

NEB signifie “North Equatorial Belt”’ désigne la bande principale nord de Jupiter.

SEB signifie “South Equatorial Belt” désigne la bande principale sud de Jupiter.

Comètes désigne les objets gravitant autour du Soleil selon des orbites souvent très excentrées.

Les différents types de comète :

— Comètes à courte période dite de type “Halley” : période entre 20 et 200 ans situées entre Saturne et Neptune
— Comètes à longue période : période entre 200 et 1000 ans sont situées dans la ceinture de Kuiper
— Comètes à orbite hyperboliques : période supérieure à 1000 ans sont situés dans le nuage d’Oort

Les comètes sont constituées de roches et glaces et lorsque celles-ci approchent du soleil, elles rejettent de la glace sous forme d’une trainée ou d’une chevelure, toujours dans la direction opposée au soleil. C’est également l’approche du soleil que la chevelure est la plus visible.

Comètes les plus lumineuses déjà observées

Year	Name	Other	Mag.	Period	Perihelion
1106	X/1106 C1	Great Comet of 1106	-	-	02/02/1106
1680	C/1680 V1	Great Comet of 1680 / Kirch's Comet	-	10 400	18/12/1680
1744	C/1743 X1	Great Comet of 1744 / Klinkenberg-Chéseaux	-7		1/03/1744
1843	C/1843 D1	Great Comet of 1843	-	600 - 800	27/02/1843
1882	C/1882 R1	Great Comet of 1882	-15	670 - 950	17/09/1882
1901	C/1901 G1	Viscara	-1.5	5 400	18/11/1901
1910	C/1910 A1	Great Comet of 1910	-7	9 200	17/01/1910
1927	C/1927 X1	Skjellerup-Maristanny	-6	36 600	18/12/1927
1936	C/1936 K1	Peltier	3.3	1 600	08/07/1936
1937	C/1937 N1	Finsler	3.9	2 300	05/04/1937
1939	C/1939 H1	Jurlof-Achmarof-Hassel	3.5	490	10/04/1939
1940	C/1940 R2	Cunningham	3.5	1 204	02/01/1941
1941	C/1941 B2	Kock-Paraskevopoulos	2	non periodic	27/01/1941
1943	C/1942 X1	Whipple-Fedtke-Tevzadze	3.5	2 072 - 1 586	06/02/1943
1947	C/1947 X1	Southern Comet	-3	5 100 - 18 500	02/12/1947
1948	C/1948 V1	Eclipse Comet	-1	62 494.39	27/10/1948
1955	C/1955 L1	Mrkos	3.5	5 800	03/08/1955
1956	C/1956 R1	Arend-Roland	-0.5	non periodic	08/04/1957
1957	C/1957 P1	Mrkos	1	non periodic	01/08/1957
1959	C/1959 Y1	Burnham	3.5	non periodic	20/03/1960
1961	C/1961 O1	Wilson-Hubbard	3.5	11 000	17/07/1961
1962	C/1962 C1	Seki-Lines	0	non periodic	01/04/1962
1963	C/1962 A1	Ikeya	2.8	934	21/03/1963
1964	C/1964 N1	Ikeya	2.7	418	01/08/1964

Comètes les plus lumineuses déjà observées

Year	Name	Other	Mag.	Period	Perihelion
1965	C/1965 S1	Ikeya-Seki	0	795 - 946	21/10/1965
1969	C/1969 T1	Tago-Sato-Kosaka	3.5	512 288	21/12/1969
1970	C/1970 K1	White-Ortiz-Bolelli	1	2 291.04	14/05/1970
1972	C/1969 Y1	Bennett	0	1 747	20/03/1972
1973	C/1973 E1	Kohoutek	0	80 000 - 11 000 000	28/12/1973
1975	C/1974 C1	Bradfield	3.9	6.6	03/05/1975
1976	C/1975 V1	West	-3	558 000	25/02/1976
1976	C/1975 N1	Kobayashi-Berger-Milon	3.7	5 600	11/03/1976
1981	C/1980 Y1	Brafield	4.8	72	19/04/1981
1983	C/1983 H1	IRAS-Araki-Alcock	1.7	970.49	21/05/1983
1986	C/1982 U1 - 1P/Halley	Halley's Comet	2.4	76	09/02/1986
1989	C/1989 W1	Aarseth-Brewington	2.8	non periodic	27/12/1989
1990	C/1990 K1	Levy	3.6	non periodic	24/10/1990
1993	D/1993 F2	Shoemaker-Levy	13	disintegrated	01/05/1994
1996	C/1996 B2	Hyakutake	0	17 000 - 72 000	01/05/1996
1997	C/1995 O1	Hale-Bopp	-0.8	2 364 - 2 520	01/04/1997
1998	C/1998 J1	SOHO	3.2	non periodic	08/05/1998
2001	C/2001 A2	LINEAR	3	37 400 - 127 300	24/05/2001
2002	C/2000 WM1	LINEAR	2.5	non periodic	22/01/2002
2002	153P C/2002 C1	Ikeya-Zhang	2.9	366.51	18/03/2002
2003	C/2002 V1	NEAT	-0.5	32 123	18/02/2003
2004	C/2001 Q4	NEAT	2.8	non periodic	15/05/2004
2004	C/2002 T7	LINEAR	2.2	non periodic	23/04/2004
2005	C/2004 Q2	Machholz	3.5	117 147.39	28/03/2005
2005	C/2004 Q2	Machholz	7.4	12 400 - 130 000	24/01/2005
2007	C/2006 P1	McNaught	-5.5	92 600	12/01/2007
2010	C/2010 F4	Machholz	3.3	67 500	01/04/2010
2011	C/2011 W3	Lovejoy	-1	622	16/12/2011
2013	C/2011 L4	PanSTARRS	1	107 000	10/03/2013
2014	17P/Holmes	Holmes	2.8	7067.9	22/03/2014
2018	21P/Giacobini–Zinner	Giacobini–Zinner	5	6.549	10/09/2018
2020	C/2020 F3	Neowise	-1	4 500 - 6 800	03/07/2020
2022	C/2021 A1	Leonard	1.5	83 000	03/01/2022
2023	C/2023 P1	Nishimura	2	406 - 431	17/09/2023
2024	C/2023 A3	Tsuchinshan-ATLAS Tsuchinshan-ATLAS	-4.9	83 000 000	27/09/2024
2025	C/2024 G3	ATLAS ATLAS	-1	180 000 - 600 000	13/01/2025

Astéroïdes ou "Minor Planets" désigne les objets gravitant autour du Soleil qui ne sont suffisamment massifs pour être qualifié de planète. Le JPL répertorie les astéroïdes dans une base commune "JPL Small-Body Database". Il existe différentes zones où circulent les astéroïdes :

Near Earth Asteroids (NEA) : 20 000 objets

Exemples		
Astéroide	Taille	Période
(163693) Atira	4.8 km	233 jours
(1862) Apollo	1.5 km	650 jours
(2062) Aten	1.3 km	347 jours
(1221) Amor	1 km	972 jours

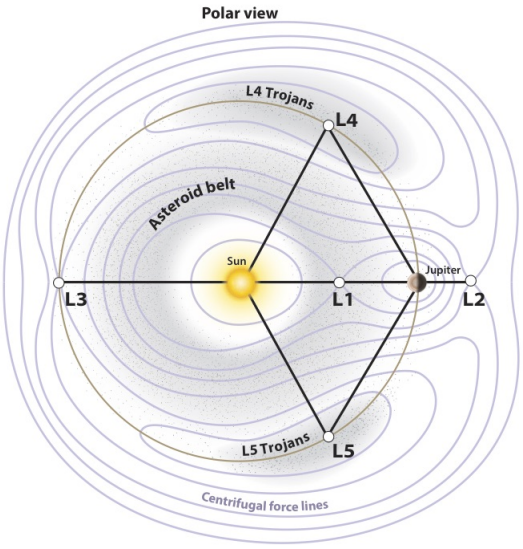
Ceinture principale entre Mars et Jupiter : 720 000 objets

Exemples			
Astéroide	Taille	Période	magnitude (max)
(1) Ceres	939 km	4.61 ans	6.65
(4) Vesta	525 km	3.63 ans	5.20
(2) Pallas	545 km	4.62 ans	6.49
(10) Hygiea	407 km	5.57 ans	9
(704) Interamnia	306 km	5.35 ans	9.9
(52) Europa	304 km	5.44 ans	-
...			
(7) Iris	200 km	3.68 ans	6.73
(433) Eros	17 km	1.76 ans	6.8

Les objets “Troyens” sur la trajectoire de Jupiter : 7 079 objets

Exemples			
Groupe	Astéroide	Taille	Période
Troyens au point de Lagrange L5 : 2 476 objets	(617) Patroclus	140 km	11.91 ans
	(3451) Mentor	126 km	11.66 ans
	(3317) Paris	119 km	11.93 ans
	(1172) Aneas	118 km	11.92 ans
	(1867) Deiphobus	118 km	11.61 ans
Troyens au point de Lagrange L4 : 4 603 objets	(624) Hektor	403 km	12.05 ans
	(911) Agamemnon	131 km	12.12 ans
	(588) Achilles	130 km	11.89 ans
	(1437) Diomedes	118 km	11.86 ans
	(1143) Odysseus	115 km	12.02 ans

Positions des Troyens sur l'orbite de Jupiter



Credit : Exploring Jupiter's Trojan Asteroids - Astronomy magazine

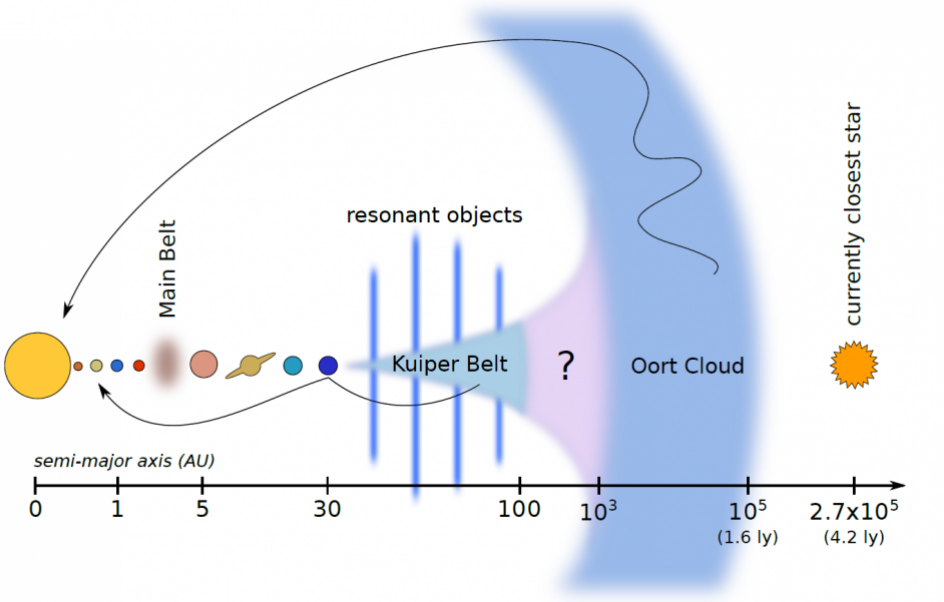
Les Centaures entre Jupiter et Neptune : 44 000 objets

Exemples		
Astéroide	Taille	Période
(10199) Chariklo	302 km	63 ans
(5145) Pholus	190 km	92 ans
(2060) Chiron	166 km	51 ans
(8405) Asbolus	66 km	76 ans
(7066) Nessus	60 km	122 ans
(944) Hidalgo	38 km	14 ans

Les objets "Transneptuniens" (TNO) : 3 200 objets

Exemples			
Groupe	Astéroide	Taille	Période
Ceinture de Kuiper : 70 000 objets	(134340) Pluto	1 188 km	248 ans
	(134340) Charon (Satellite de Pluton)	1214 km	6.39 jours
	(136199) Eris	2 326 km	558 ans
	(136472) Makemake	1 420km	308 ans
	(136108) Haumea	1 960 km	285 ans
	(2000) Varuna	668 km	280 ans
	(28978) Ixion	759 km	251 ans
	(50000) Quaoar	1 110 km	289 ans
	(90482) Orcus	479 km	246 ans
	(90482) Sedna	1 568 km	10 513 ans
Nuage d'Oort situé entre 20 000 et 30 000 UA	Comètes à longue période	-	-

Les objets Transneptuniens



Credit : IMCEE

Les météorites tombant sur Terre proviennent à 99% de la ceinture d'astéroïdes principale.

Les NEAs sont des astéroïdes géocroiseurs dont le périhelion est inférieur à 1.3 AU environ la distance Terre / soleil. Ils sont classés en 5 types : Atiras (total 18), Atens (total 1490), Apollos (total 10325), Amors (total 7427) et les "Potentially Hazardous Asteroid" ou PHA dont la distance à la Terre peut être inférieure à 0.05 UA par exemple : Toutatis (4.5 km). L'échelle de Torino permet de classer leur dangerosité, par exemple (99942) Apophis qui a croisé la Terre en 2004 était classé 4/10.

Bolide désigne un météore en phase de rentrée dans l'atmosphère et devenu visible depuis le sol par sa traînée lumineuse et verdâtre qu'il laisse derrière lui.

Lumière Zodiacale ou ' Gegenschein'" désigne le halo lumineux situé à l'opposé du Soleil le long du plan de l'écliptique. Ce halo est surtout visible avant le coucher du soleil au printemps ou avant le lever du Soleil à l'automne, le halo est alors perpendiculaire à l'horizon. Ce halo est provoqué par les poussières du milieu interplanétaire issues à 90% des rejets cométaires des comètes circulant entre Jupiter et le Soleil.

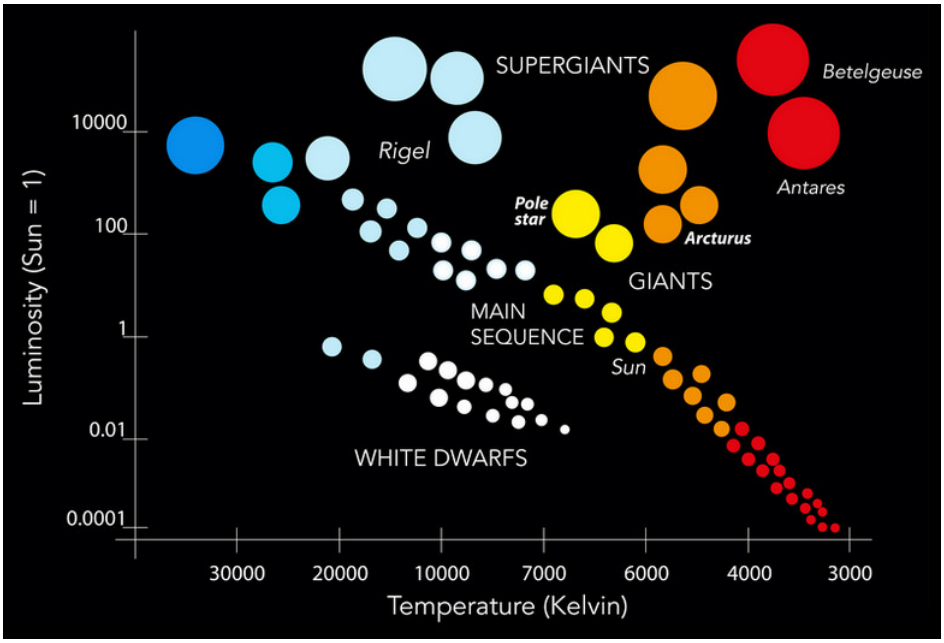
3.2 Les Étoiles

3.2.1 Étoile

désigne les astres constitués de gaz chaud et qui rayonne leur propre lumière par réaction de fusion nucléaire où 2 atomes d'hydrogène (2 protons) fusionnent en 1 atome d'hélium He ← H + H. La masse d'une étoile détermine sa température et sa luminosité. Les étoiles sont classées dans un diagramme mettant en relation sa magnitude absolue (sa luminosité) et son type spectral, c'est le diagramme de "Hertzsprung-Russell". La vaste majorité des étoiles figurent dans la séquence principale du diagramme, comme le soleil. Le soleil (fusion H en He) évoluera vers la géante rouge (fusion He en C ou O) et enfin la naine blanche composée de carbone et d'oxygène entourée d'une nébuleuse planétaire.

Les étoiles sont toujours dans un équilibre hydrostatique, d'abord par l'action de la force de gravitation qui tend à contracter les étoiles jusqu'à un éventuel effondrement et ensuite par l'action de la pression cinétique des réactions de fusion nucléaire

qui tend gonfler le volume de l'étoile.



Credit : Shutter Stock

L'énergie dissipée par l'étoile l'est par :

— Par conduction avec le milieu externe (très faible)
— Par convection avec le vent solaire (particules ou neutrons)
— Par rayonnement de lumière visible jusqu'aux UV, rayons X, rayons Gamma, ondes radio

Type spectral désigne la classification des spectres des étoiles que l'on différencie selon les bandes d'absorption, ce qui leur donne une couleur caractéristique. Un type spectral détermine :

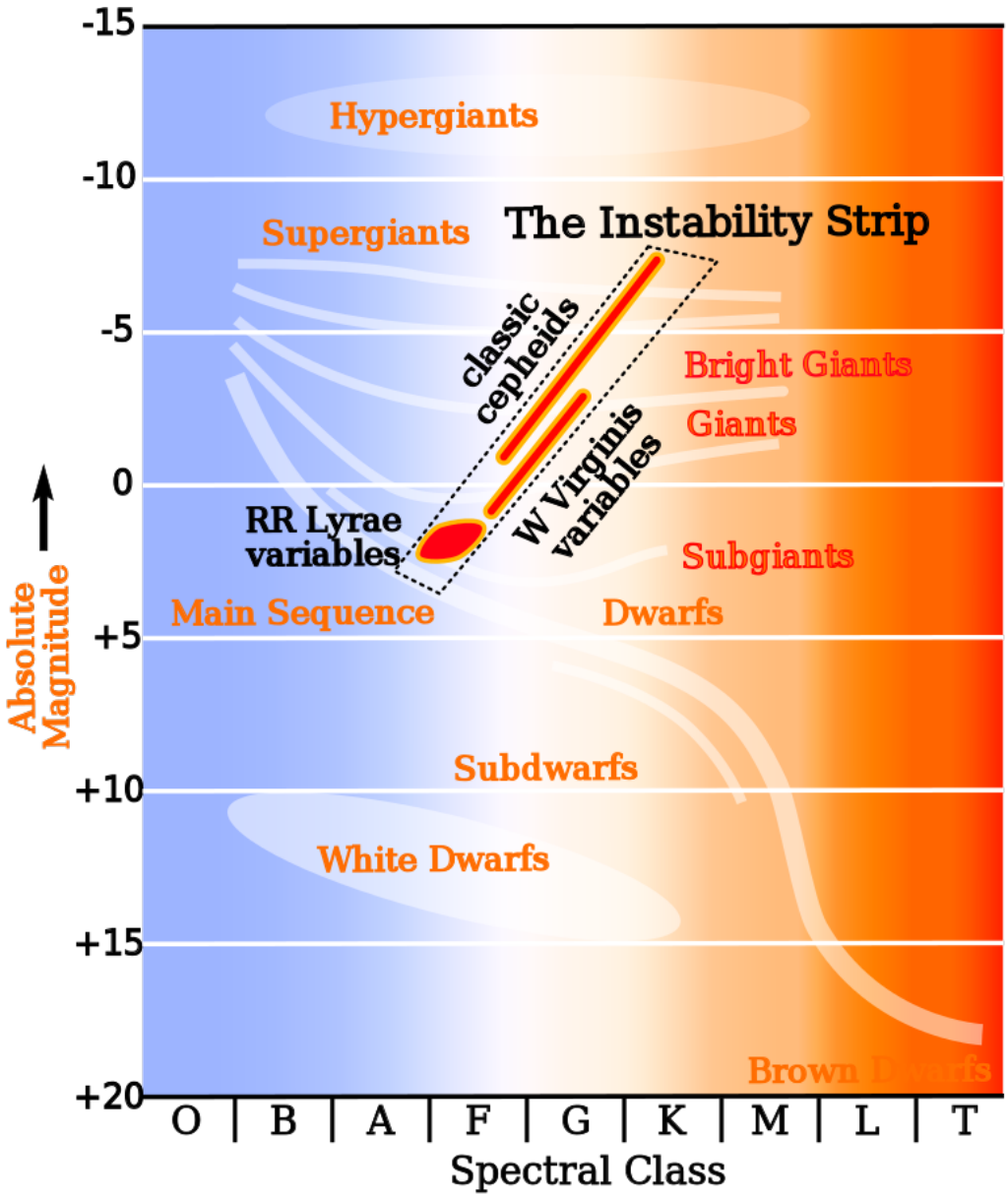
— La couleur
— La masse
— La luminosité
— La température (loi de Wien)

Les étoiles chaudes sont bleues tandis que les étoiles plus froides sont rouges. On désigne des différentes classes spectrales par des lettres de l'alphabet.

Type Spectral Harvard

Type	Couleur	Température	Raies d'absorption	Etoile
O	Bleue	$> 25\,000$ K	N, C, H, O	δ Orionis, ζ Puppis
B	Bleue / blanche	10 000 - 25 000 K	He, H	Rigel, ζ_1 Scorpii
A	Blanche	7 500 - 10 000 K	H	Deneb, Sirius
F	Jaune blanche	6 000 - 7 500 K	Fe, Ti, Ca, Sr, Mg	Polaris, Canopus, Procyon, α Ursa Minoris,
G	Jaune	5 000 - 6 000 K	Ca, He, H, métaux	Sun, α Centauri, ρ Cassiopeiae
K	Orange	3 500 - 5 000 K	Ti, métaux	α Centauri B, α Bootis
M	Rouge	$< 3\,500$ K	Ti, métaux	Bételgeuse, Antarès, Proxima Centauri

Le type spectral des étoiles



Credit : Sky & Telescopes

On détermine la couleur des étoiles au travers de filtres standardisés UBVRI qui servent à mesurer leur magnitude dans ces filtres.

- U = Ultraviolet
- B = Blue
- V = Visual
- R = Red
- I = Infrarouge

Ces filtres permettent ensuite de calculer des “Color Index” comme le B-V index $= B - V$ selon la valeur, on obtient une couleur dominante et donc une température.

Température en Kelvin : $T = 4600\left[\frac{1}{92(B-V)+1.7} + \frac{1}{92(B-V)+0.62}\right]$, la relation température et couleur RGB est donnée par le

“Planckian Locus” (ou Black Body Locus) [497].

Color Index

Type	B-V	U-B	V-R	R-I	Température
O5V	-0.33	-1.19	-0.15	-0.32	42 000 K
B0V	-0.30	-1.08	-0.13	-0.29	30 000 K
A0V	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	9 790 K
F0V	0.30	0.03	0.30	0.17	7 300 K
G0V	0.58	0.06	0.50	0.31	5 940 K
K0V	0.81	0.45	0.64	0.42	5 150 K
M0V	1.40	1.22	1.28	0.91	3 840 K

Credit : Wikipedia

Luminosité désigne la classification des luminosités des étoiles. La luminosité exprimée en Watts peut être déduite de la loi de Stefan-Boltzmann $L = 4\pi\rho R^2 T^4$ où R = rayon de l'étoile et T sa température et ρ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Classification MKK (Morgan-Keenan)

Class MKK	Etoiles
I	Supergéantes
II	Géantes brillantes
III	Géantes normales
IV	Sous géantes
V	Etoiles de la séquence principale (étoiles naines)
VI	Sous-naines
VII	Naines blanches

Credit : Wikipedia

Wolf–Rayet stars désigne un type d'étoile à l'origine massive ayant rapidement consommé tout leur hydrogène et fusionnant essentiellement de l'hélium. Leur spectre caractéristique est divisé en 3 catégories selon les lignes d'émission dominantes : azote ionisé, carbone ionisé ou oxygène ionisé. Exemple d'étoile de ce type : Gamma Velorum, θ Muscae.

Les exoplanètes ce sont des planètes orbitant des étoiles, donc situées en dehors du système solaire. Des exoplanètes sont détectées autour d'étoiles depuis les années 90s.

Méthodes de détection :

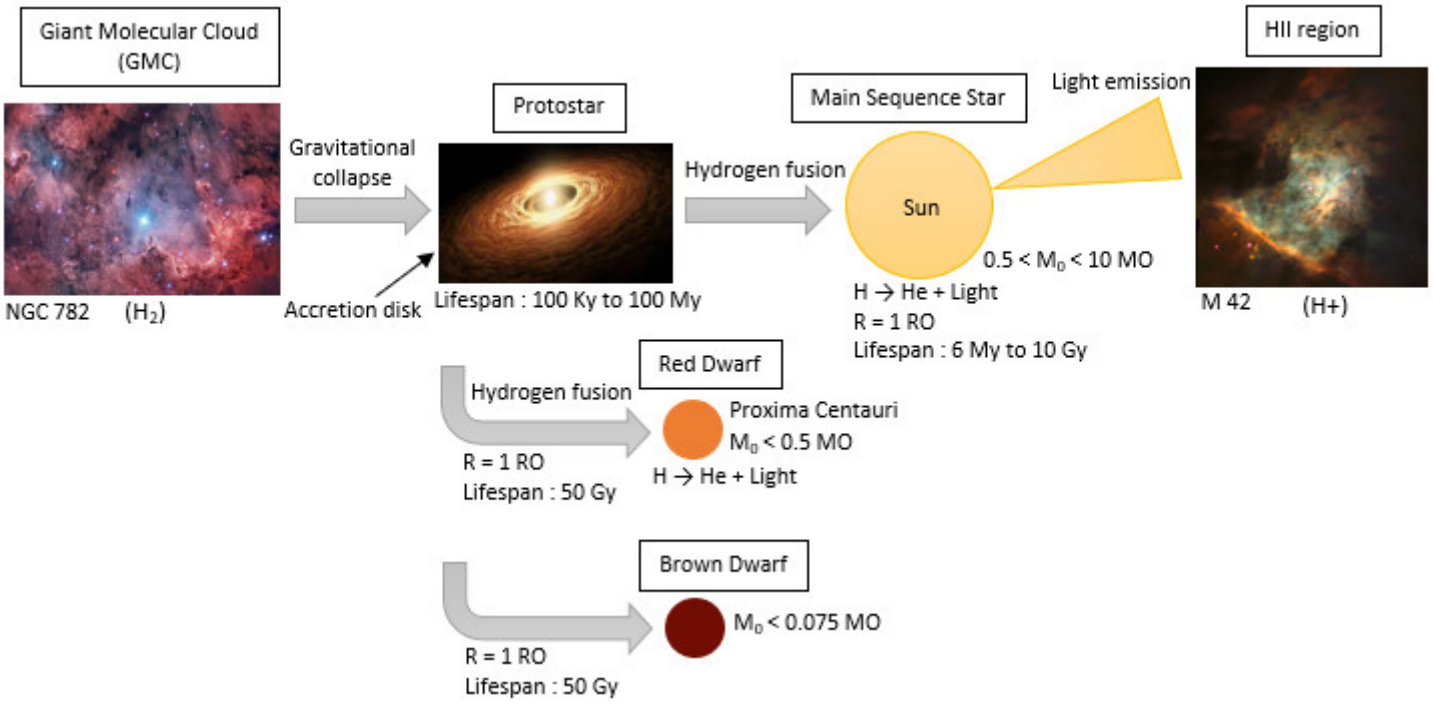
— Spectroscopie : l'étoile sous influence de la planète bouge sur une orbite propre et sa vitesse radiale induit un effet Doppler mesurable sur son spectre. Cette méthode est plus efficace si la vitesse radiale est importante et donc si la planète est très proche de son étoile et / ou si la planète est très massive.
— Transit : lorsque la planète passe devant l'étoile le flux lumineux baisse, la présence d'un creux sur la courbe de lumière de l'étoile indique le passage d'un objet
— Imagerie directe : il est possible d'imager la planète si celle-ci est suffisamment lumineuse et si elle est éloignée au moins de 500 milli-arcmin de son étoile.

3.2.2 L'Évolution Stellaire

Les nuages moléculaires les étoiles se forment suite à l'effondrement gravitationnel de vastes nuages d'hydrogène moléculaire H_2 très denses. Ces nuages froids de 10 à 20 kelvin sont visibles sous forme de :

— Nébuleuses par réflexion
— Nébuleuses sombres
— Globules de Bok

Les GMC représentent 1% du volume du milieu interstellaire et 50% de sa masse. Ils contiennent 100 molécules par cm^3. Lorsque les jeunes étoiles se forment, celles-ci ionisent l'hydrogène moléculaire en $H+$ pour former une région HII = nébuleuse à émission, ex : M16, M42.



Credit : DJ Jeffery

Une protostar finie par évoluer soit en :

— Étoile de la séquence principale si sa masse est supérieure à 0.5 M$\odot$, ex : Soleil
— Naine rouge, une étoile de masse inférieure à 0.5 M$\odot$ et de classe spectrale K et M. Il s'agit de la majorité des étoiles, ex : Proxima Centauri
— Naine brune, une étoile de masse trop faible pour que la réaction de fusion de l'hydrogène puisse débuter.

Données sur les étoiles de la séquence principale :

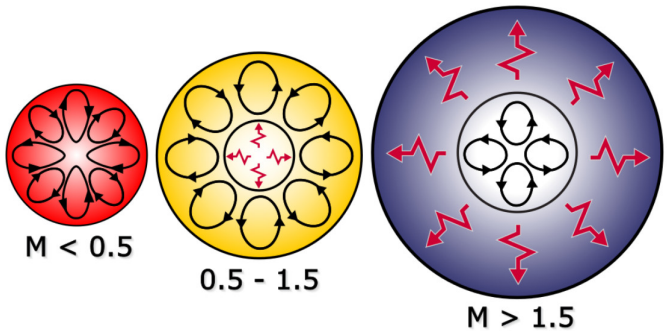
— Luminosité : $L/L\odot = (M/M\odot)^{3.5}$
— Durée de vie : lifespan/lifespan$\odot = (M/M\odot)^{-2.5}$

Plus les étoiles sont massives plus :

— La pression est élevée

— La température est élevée
— La fusion est rapide
— Sa durée de vie est courte

Les étoiles massives de plus de 1.5 $M\odot$ sont radiatives vers l'extérieur alors que les autres étoiles de plus faible masse sont convectives.

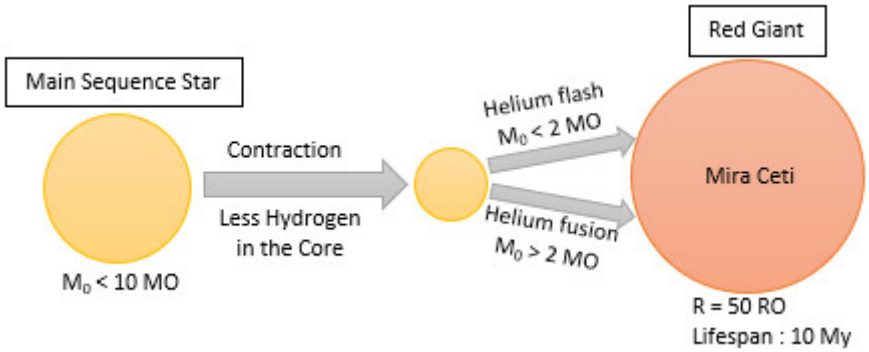


Lorsque le gaz est suffisamment contracté par la gravité et que la pression et la température son suffisante, la fusion nucléaire débute et l'hydrogène du coeur est transformé progressivement en hélium. L'étoile est alors à l'équilibre hydrostatique : gravité = pression du gaz.

La géante rouge Dans une seconde phase de l'évolution des étoiles de la séquence principale, lorsque l'hydrogène vient à manquer dans le coeur de l'étoile celle-ci se contracte car la gravité prend le dessus. La pression et la température augmente à nouveau permettant :

— La fusion de l'Helium dans le coeur
— La fusion de l'Hydrogène dans couche périphérique

L'étoile augmente considérablement de volume, sa température diminue progressivement pour devenir Géante rouge.



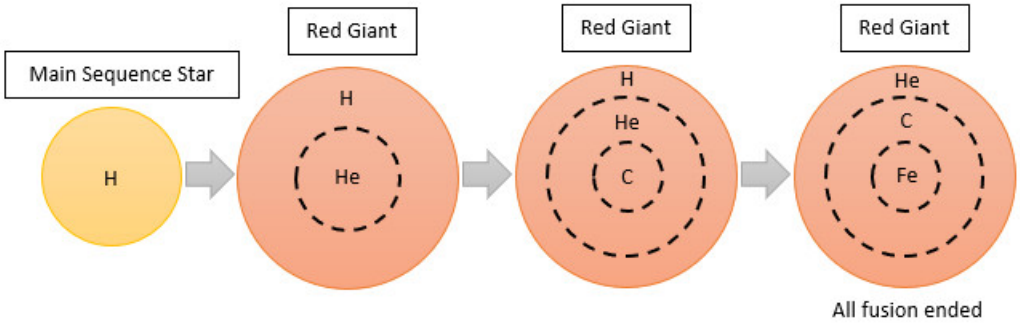
Si la masse de l'étoile initiale était inférieure à 2 M$\odot$ (ex : le Soleil = 1 M$\odot$) alors il pourrait se produire un "Helium Flash" au sein de la géante rouge. Le coeur constitué d'hélium fusionne pour être transformé en carbone et cela en totalité en quelques secondes. Pendant ce laps de temps très court la luminosité de l'étoile ne change pas alors que sa température augmente.

Pour les autres étoiles de masse initiale supérieure à 2 M$\odot$ la fusion de l'hélium sera beaucoup plus lente.

Enfin lorsque la fusion de l'hélium est terminée pour les géantes rouges et lorsque la fusion de l'hydrogène est terminée pour

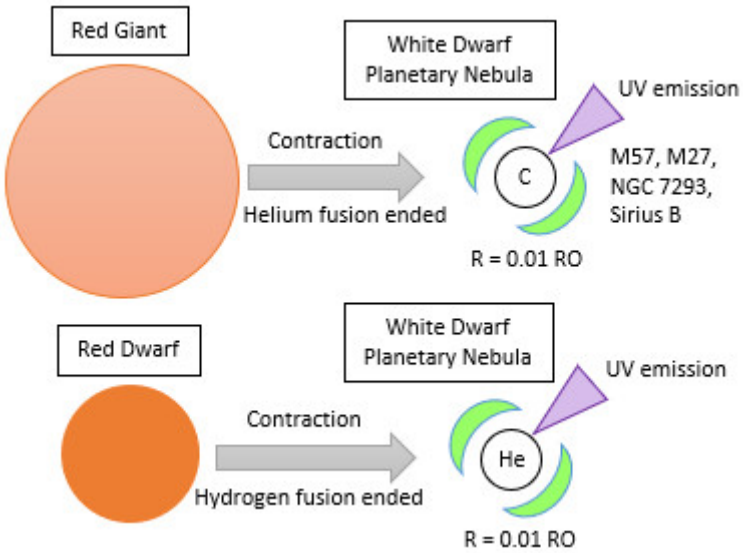
les naines rouges, celles ci se contractent pour devenir une naine blanche entourée de gaz éjectés. L'ensemble forme une nébuleuse planétaire.

Les géantes rouges continuent de fusionner des éléments de plus en plus lourds (vers les métaux) jusqu'à épuisement des ressources.

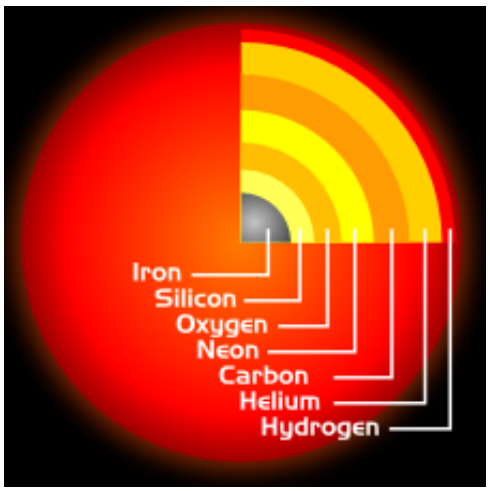


Ce chemin de l'évolution est appelé AGB = "Asymptotic Giant Branch" du diagramme de Hertzsprung-Russell. La majorité des étoiles, c'est-à-dire celles entre 0.5 et 10 $M_{\odot}$ passent par cette branche.

La naine blanche Dans une dernière phase, les étoiles géante rouge finissent par épuiser l'hélium du coeur. La gravité reprend le dessus, l'étoile expulse ses couches extérieures tout en se contractant jusqu'à devenir une naine blanche constituée de carbone, le dernier élément fabriqué. Le même processus se produit pour la naine rouge qui deviendra une naine blanche constituée d'hélium. Cette dernière n'était pas suffisamment massive au départ pour fusionner l'hélium produit. Il en résulte dans les 2 cas une nébuleuse planétaire.

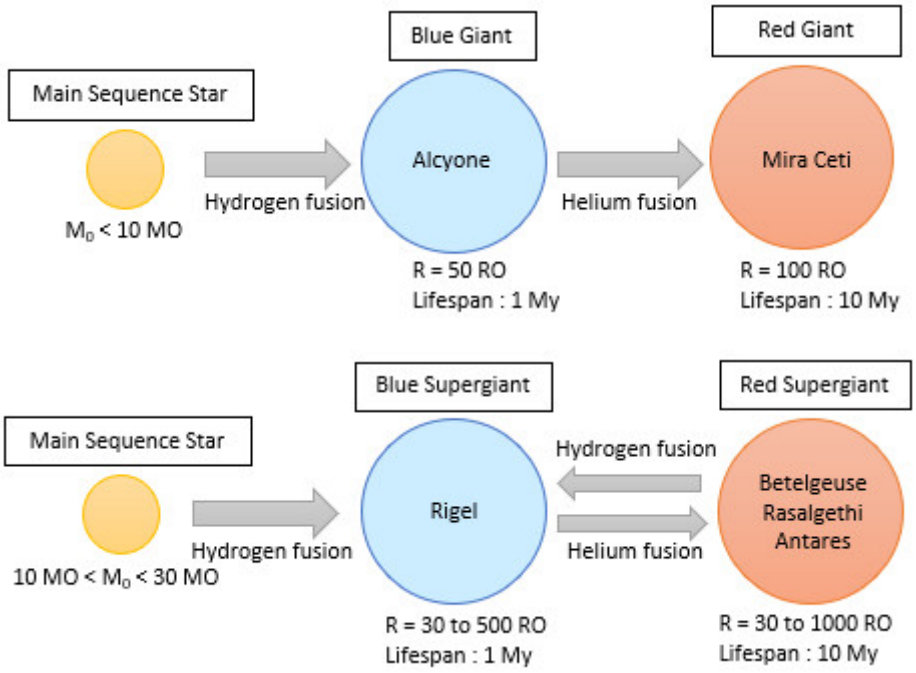


Les étoiles massives sont capables de produire beaucoup plus d'éléments lourds que le stade de la production de carbone. C'est lorsque le coeur n'est plus constitué que de Fer que la fusion s'arrête. Des éléments lourds peuvent également être produits lors de l'explosion d'une supernova.



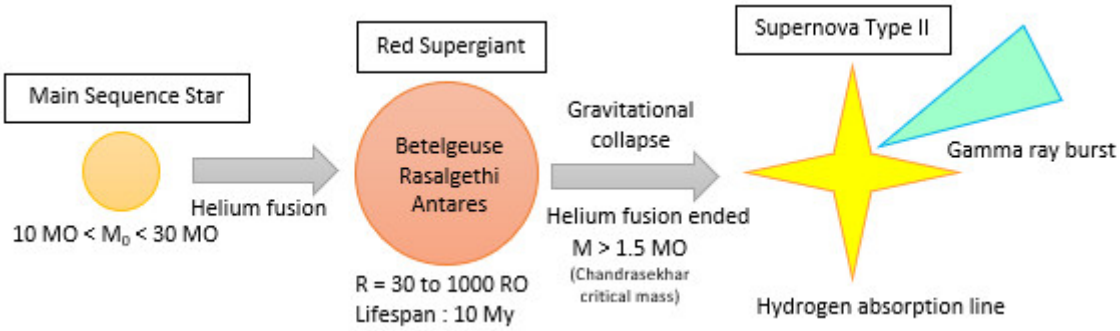
Credit : Aspire Project

La géante bleue Les étoiles de la séquence principale peuvent aussi passer par le stade géante bleue ou super-géantes bleue avant d'arriver au stade de géante rouge. Les géantes bleues sont des étoiles massives, très chaudes et de type spectral O,B,A. Ces étoiles consomment leur hydrogène en quelques millions d'années seulement. Les supergéantes bleues peuvent se transformer en supergéante rouge et inversement.



Il existe aussi un type d'étoile bleue que l'on ne trouve que dans les amas globulaires, les "Blue Stragglers". Ce sont des étoiles très jeunes comparées à la majorité des étoiles des amas globulaire qui sont les plus anciennes de l'univers. Ces étoiles sont probablement formées à partir de transfert de masse entre les composantes d'une étoile double.

Les supernovas de type II Les étoiles de la séquence principale plus massive que 10 $M_\odot$ évoluent en supergéante bleue puis en supergéante rouge. Ces dernières représentent la classe d'étoiles la plus volumineuse de l'univers. Au bout du processus, lorsque la fusion de l'hélium au coeur de l'étoile est complète, éventuellement l'étoile continuera de fusionner d'autres éléments plus lourds pendant un temps très court, puis lorsque la fusion s'arrête, la gravité reprendra le dessus et l'étoile va s'effondrer rapidement sur elle-même. Si à ce moment-là la masse de l'étoile est supérieure à la masse critique de Chandrasekhar celle-ci explosera en Supernova de type II.

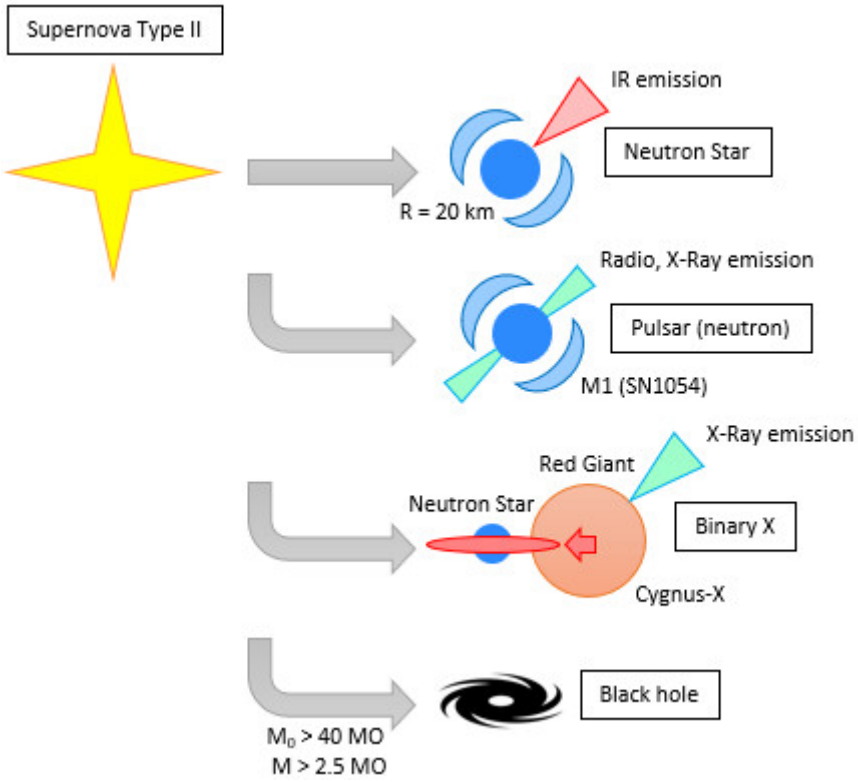


L'issue de l'explosion d'une supernova de ce type peut résulter soit dans la création :

- D'une étoile à neutron simple
- D'une étoile à neutron de type pulsar
- D'une étoile à neutron associée à une géante rouge compagnon
- D'un trou noir si la masse initiale de l'étoile était de 40 $M_\odot$ au moins

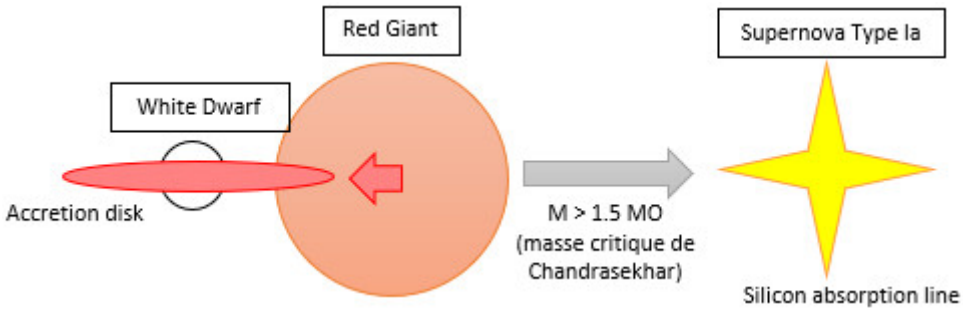
Les étoiles à neutron sont en général entourées des restes de l'enveloppe de gaz éjectée de l'étoile initiale pour former une nébuleuse planétaire.

Le pulsar est une étoile à neutron tournant très vite sur elle-même tout en produisant un faisceau lumineux directif. Cette étoile clignote littéralement.



Les supernovas de type Ia Les supernovas de type Ia sont la dernière phase de l'évolution d'une étoile binaire constituée d'une naine blanche qui absorbe la matière d'une étoile plus massive en fin de vie comme la géante rouge. Lorsque la naine blanche n'arrivera plus à consommer la matière de son compagnon, celle-ci s'effondrera. Si à ce moment-là la masse de l'étoile est supérieure à la masse critique de Chandrasekhar celle-ci explosera en Supernova de type Ia. Nous observons 4 fois plus

de supernova de type Ia que de type II [622].



Supernova historique peu de nombreuses supernovas ont été répertoriées, car longtemps celles-ci ne pouvaient être observées qu'à l'oeil nu par des observateurs avisés.

Supernovas ayant eu lieu dans notre galaxie [652]

Nom	Type	Dist. Al	Date	Durée	Const.	Mag.	Obs.	Commentaire
Vela Nova	II	800	-10000 BC	-	Voiles	-	Bolivie	Gum 16
Dentelles	II	1440	-6000 BC	-	Cygne	-	-	Sh2-103
SN 185	Ia	8000	7 Dec. 185	20 mois	Centaure	-8	Chine	Proche de α Cen
SN 386	-	-	15 Avr. 386	4 mois	Sagittaire	-	Chine	Possible Nova ?
SN 393	II, Ib	33300	27 Fev. 393	8 mois	Scorpion	-3	Chine	-
SN 1006	Ia	7100	17 Avr. 1006	24 mois	Centaure	-9.5	Yémen	Ombres portées
SN 1054	II	7175	4 Juil. 1054	22 mois	Taureau	-5	Chine	Crab Nebula Messier 1
SN 1181	II	8000	6 Aout 1181	6 mois	Cassiopée	-1	Chine, Japon	-
SN 1572	Ia	7500	11 Nov. 1572	16 mois	Cassiopée	-4	Tycho Brahé	-
SN 1604	Ia	20000	8 Oct. 1604	12 mois	Ophiuchus	-3	Johannes Kepler	Proche de β Lupi
SN 1667	IIb	11000	29 Mai 1630 ?	-	Cassiopée	-	John Flamsteed ?	The noon star ?
η Car	Nova	7500	1843	10 ans	Carina	-0.8	Sir Thomas Maclear	

Note : SN 1667 = Cassiopeia A.

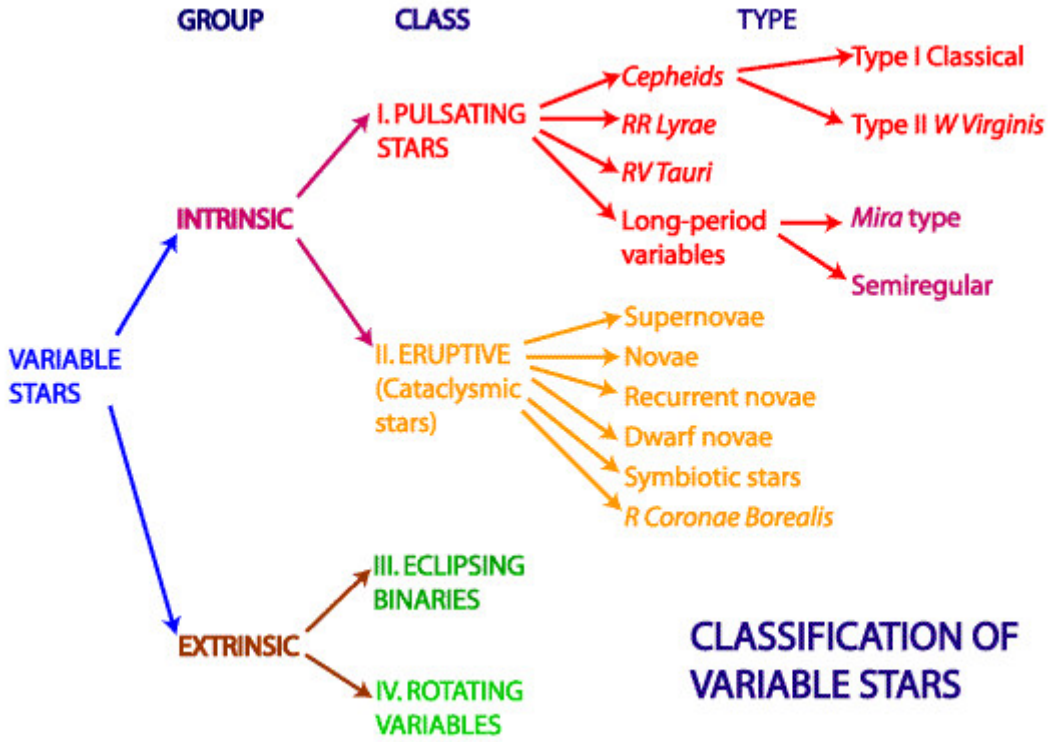
Nova Les novas sont des étoiles binaires similaires aux binaires impliquées dans l'explosion des supernovas de type Ia et sont constituées d'une naine blanche qui absorbe la matière d'une étoile plus massive au stade de pré-géante rouge. Lorsque la naine blanche consomme suffisamment d'hydrogène de l'étoile compagnon, celui-ci soumis alors à une forte pression est transformé instantanément en hélium produisant une explosion, la luminosité de la naine blanche augmente alors subitement avant de retrouver sa luminosité initiale quelques jours plus tard. L'énergie de l'explosion produite reste beaucoup plus faible que celle des supernovas de type Ia. Des Nova bien connues : T Coronae Borealis, RS Ophiuchi, T Pyxidis.

Les populations d'étoiles Les étoiles de population II sont les plus anciennes, car elles sont pauvres en métaux (analyse spectrale) leur âge est supérieur à 11 milliards d'années. Les étoiles de la population II se trouvent dans les halos galactiques, mais aussi dans les amas globulaires qui en sont exclusivement constitués. Les étoiles de population I qui constitue la majorité des étoiles visibles dans le ciel, sont les plus récentes et sont très riches en métaux, leur age est inférieur à 11 milliards d'années. Il existe une population III plus ancienne encore qui correspond aux premières étoiles formées dans l'univers, mais du fait leur masse très importante ont toutes fini en Supernova, il n'en resterait plus aucune aujourd'hui.

Étoiles Variables désigne les étoiles dont la luminosité exprimée en magnitude peut varier soit de manière périodique ou de manière irrégulière comme les Novas. Ils existent plusieurs modes de variabilité :

— Pulsating Variable : ce sont des étoiles qui connaissent des phases d'expansion et de contraction, par exemple : les Céphéides.
— Éruptive Variable : ce sont des étoiles connaissant de brusques changements de luminosité pouvant conduire à la destruction de l'étoile, par exemple : les Novas et les Supernovas, par exemple : T Pys, U Sco.
— Eclipsing Binaries : ce sont des étoiles binaires dont l'une des composantes moins lumineuses occulte partiellement l'étoile principale en passant devant, par exemple : Algol
— Rotating Variables : ce sont des étoiles dont la surface n'est pas homogène et comporte des zones sombres (comme des taches solaires) qui se présente sur la surface visible grâce à la rotation de l'étoile sur elle-même.

Variable Stars



Credit : Australia Telescope National Facility

Céphéide désigne un type d'étoile variable à courte période (moins de 50 jours) ayant joué un rôle fondamental dans la mesure des distances des galaxies. Henrietta Leavitt astronome au Harvard College Observatory en 1900 découvre une relation étroite entre la période et la luminosité intrinsèque des Céphéides. Les premières Céphéides étudiées furent η Aqu, δ Cep, ζ Gem. Lorsqu'on connaît la luminosité (exprimée en luminosité solaire équivalente) d'une étoile et sa magnitude, c'est-à-dire sa luminosité visible à l'oeil nu. On peut alors en déduire directement sa distance d par la formule suivante : $m - M = 5 \times log(D) - 5$ où M est la magnitude absolue de l'étoile (fonction de la luminosité solaire), m sa magnitude visuelle et D sa distance en parsecs.

Similairement, les supernovas de Type Ia ont toutes la même courbe de luminosité intrinsèque. Ainsi, l'observation de leur courbe de décroissance permet de les identifier comme de type Ia et de déterminer leur distance par le même calcul que pour les Céphéides.

Carbonée désigne les étoiles très rouges prisées par les observateurs pour leur aspect esthétique : T Lyra, R Leporis (Hind's Crimson Star). Ces étoiles sont en général des géantes rouges riches en carbone, leur température est plus basse que les autres étoiles et sont en général de type spectral : M (nomenclature Harvard).

R Leporis

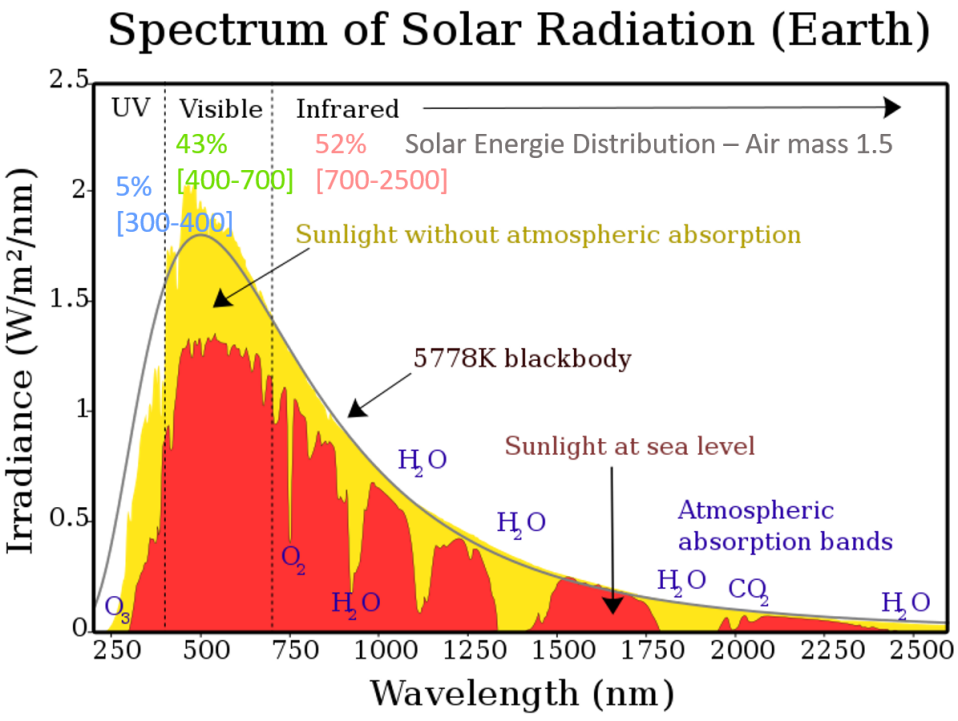


Credit : Martin Pugh

3.2.3 Le Soleil

Soleil est l'étoile la plus proche de nous et autour de laquelle orbite l'ensemble des planètes du système solaire. Le soleil est une étoile de luminosité = 1 et de couleur spectrale G. Son évolution conduira à la formation d'une géante rouge. Le soleil en raison de son activité génère des champs magnétiques intenses depuis sa surface jusqu'à 3 000G au coeur des taches solaires (Terre CM = 0.7G aux pôles). La couche d'atmosphère à l'équateur absorbe 18% de l'énergie solaire lorsque le soleil est au zénith. Le spectre solaire correspond par approximation à un corps noir théorique soumis à une température de 5778K (loi de Planck). La durée d'une rotation complète du disque solaire varie de 27 jours à l'équateur et 30 jours à 60° de latitude.

Rayonnement solaire



Credit : Wikipedia

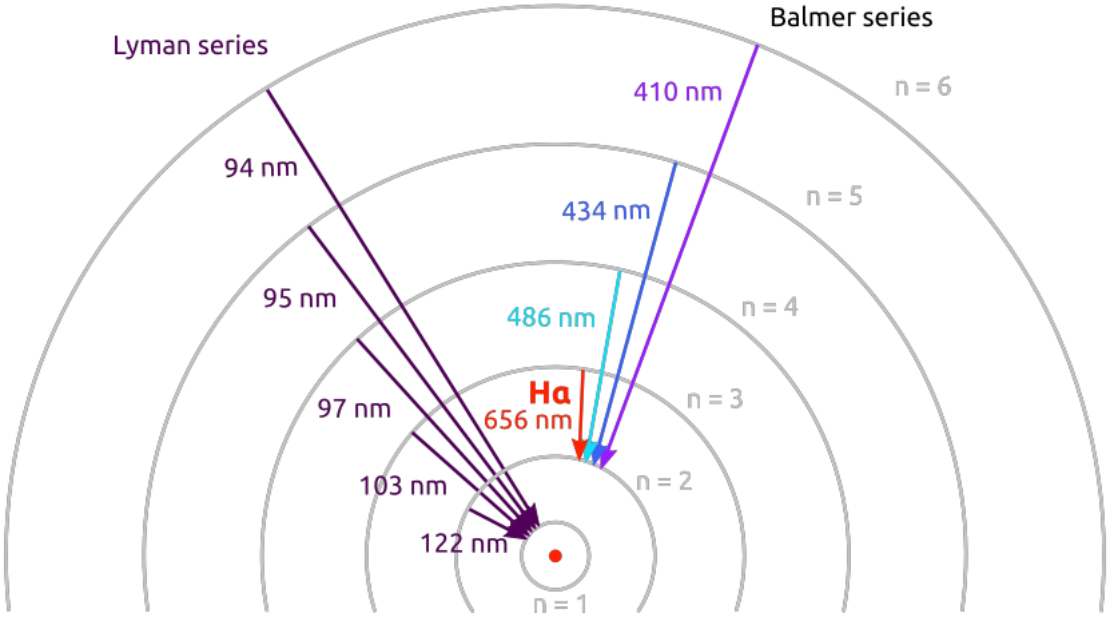
Note : la courbe noire est celle du rayonnement d'un corps noir chauffé à 5778K.

L'irradiance I dépend de la longueur d'onde sur le graphique donc la puissance totale en Watt par mètre carré s'écrit : $P(W/m^2) = \int_0^{2500} I(\lambda)\, d\lambda$ (il s'agit de l'aire sous la courbe) ce qui représente pour le soleil un total de $1361 W/m^2$ avant absorption atmosphérique et $1000 W/m^2$ au niveau de la mer.

L'hydrogène de la couche basse, la Photosphère du soleil plus froide, absorbe la ligne $H\alpha$ alors que l'hydrogène de la couche au-dessus, la Chromosphère émet la ligne $H\alpha$. Le résultat est que dans le spectre solaire non filtré, on ne voit que la ligne d'absorption à cet endroit car la ligne d'émission au même endroit est très faible comparativement à l'intensité lumineuse émise par le soleil [67].

De manière générale les transitions des électrons d'une niveau d'énergie à un autre produisent les différentes raies d'émission du spectre solaire :

Les transitions d'énergie de l'hydrogène



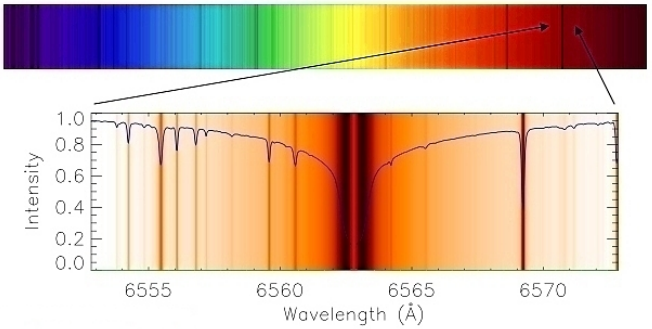
Credit : Karthikeyan KC

L'energie produite et donc la fréquence lumineuse (en nanomètre) correspondante au passage d'un électrons au niveau inférieur est donnée par la formule de Balmer-Rydberg $1/\lambda = R(\frac{1}{m} - \frac{1}{n})$ où m est un niveau d'énergie inférieur, où n est un niveau d'énergie supérieur et la constante de Rydberg $R = 1.097 \times 10^2 nm^{-1}$.

La transition d'un electron du niveau n=3 au niveau inférieur m=2 produit la lumière $H\alpha$.

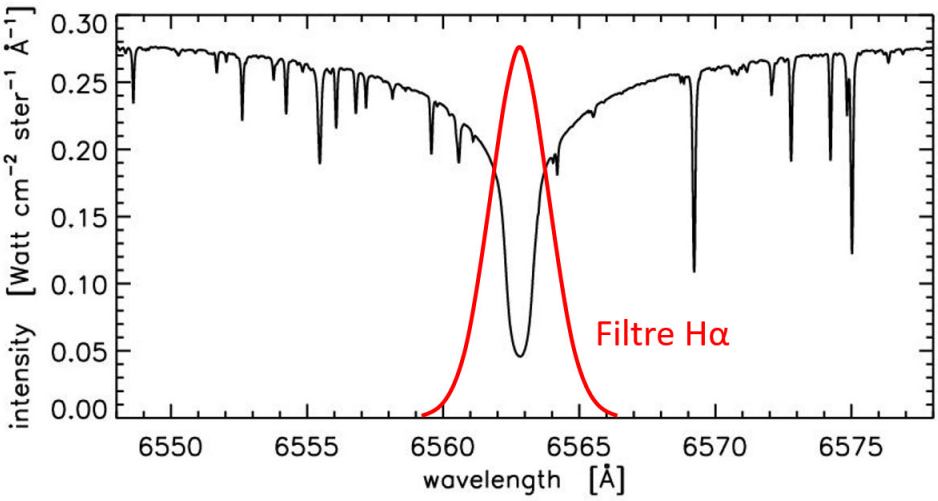
La raie $H\alpha$ ne fait que 0.12nm de large dans le spectre solaire il faut donc des filtres très étroits afin de l'isoler des fréquences adjacentes beaucoup plus puissantes.

La raie $H\alpha$



Credit : Bob Yoesle

Spectre solaire autour de 656.3 nm

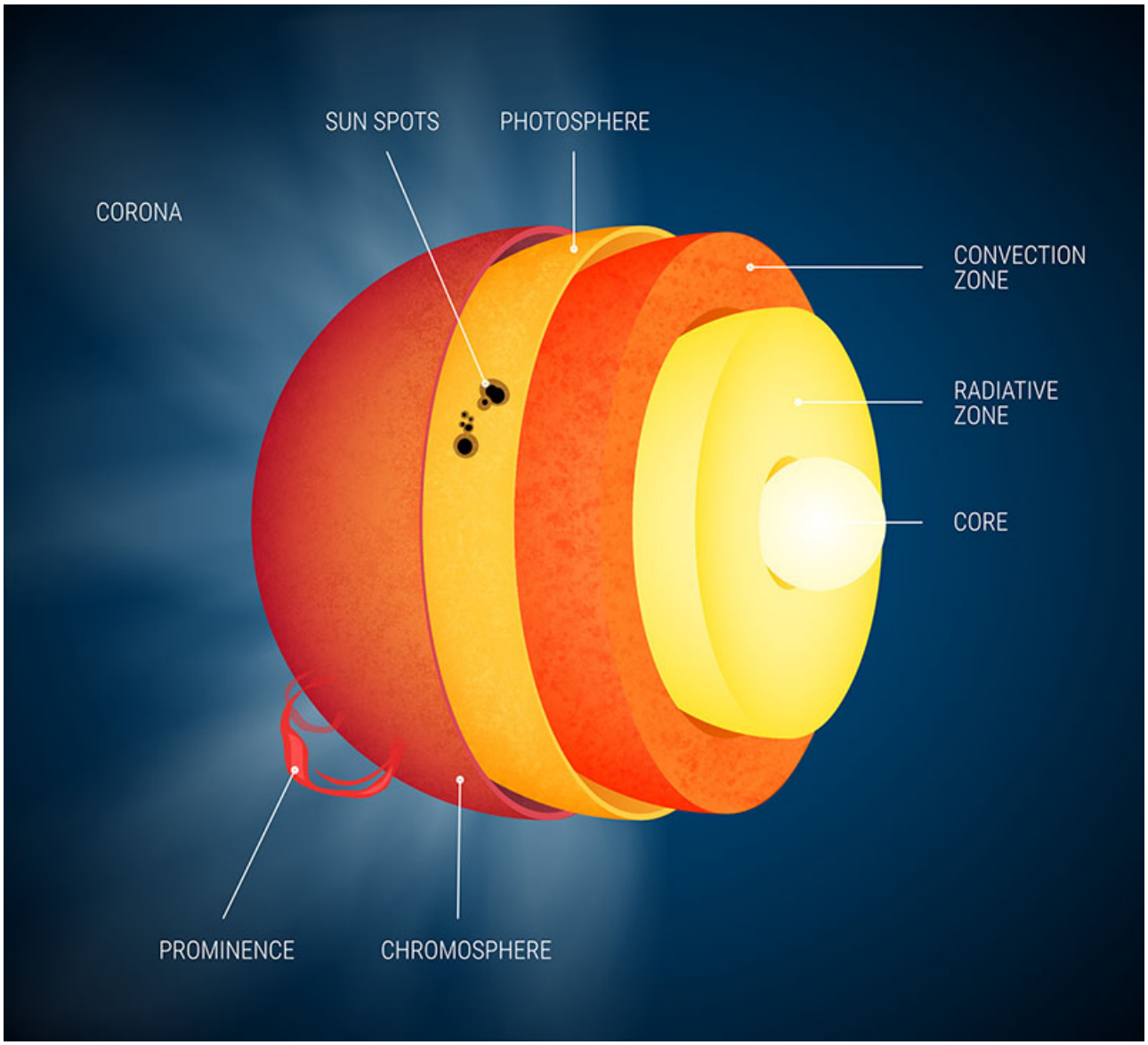


Credit : R. J. Rutten

Le soleil est constitué de plusieurs couches[561] des plus hautes vers les plus basses :

1. La couronne solaire (auréole blanchâtre) visible seulement lors des éclipses
2. La chromosphère, une fine couche rougeâtre là où se situe les éruption visible dans la bande $H\alpha$
3. La photosphère constitue la partie visible de la surface solaire là où se situent les taches solaires
4. Le noyau = “Core” qui nous est invisible

Sun Structure



Credit : Vaonis

La température décroit en descendant dans les couches basses.

Il existe plusieurs classifications des formations solaires :

- Classification des proéminences de H. Zirin (1988)
- Classification des groupes de taches solaires de McIntosh revised version of the old Zürich classification (1990)
- Classification des groupes de taches solaires selon le Mount Wilson magnetic patterns $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ (1938)
- Classification des groupes de taches solaires de Cortie (1901)

Couronnne Hauteur = [2 000km - ∞] et T = 1 million K, visible à l'aide d'un coronographe ou lors des éclipses solaires.

- Protubérances
- CME
- Boucles coronales

— Vent solaire

Chromosphère Hauteur = [500 - 2 000km] et T = [4 200 - 10 000K], visible à l'aide de filtre $H\alpha$ (filtre Etalon + blocking filter).

— Protubérances
  — Filaprom
  — Coronal Rain
  — Coronal Bomb
  — Loop
  — Quiet Region Filament (QRF) = Quiescent Prominence / are long lived filaments
  — Hedgerow Prominence = filaments en hauteur d'apparence herbeuse
    — Plume
    — Bubble
  — Eruptive Prominence
— Active Region Filaments (ARF) = Surge Filament = Moustache / are long lived filaments
— Spray
— Ellerman's Bomb = petits points blancs dans le voisinage des taches solaires
— Moreton Wave = onde de choc rapide traversant les filaments
— Minor Flare
— Filament
  — Spicule
    — Fibril (1 arcmin)
  — Mottle

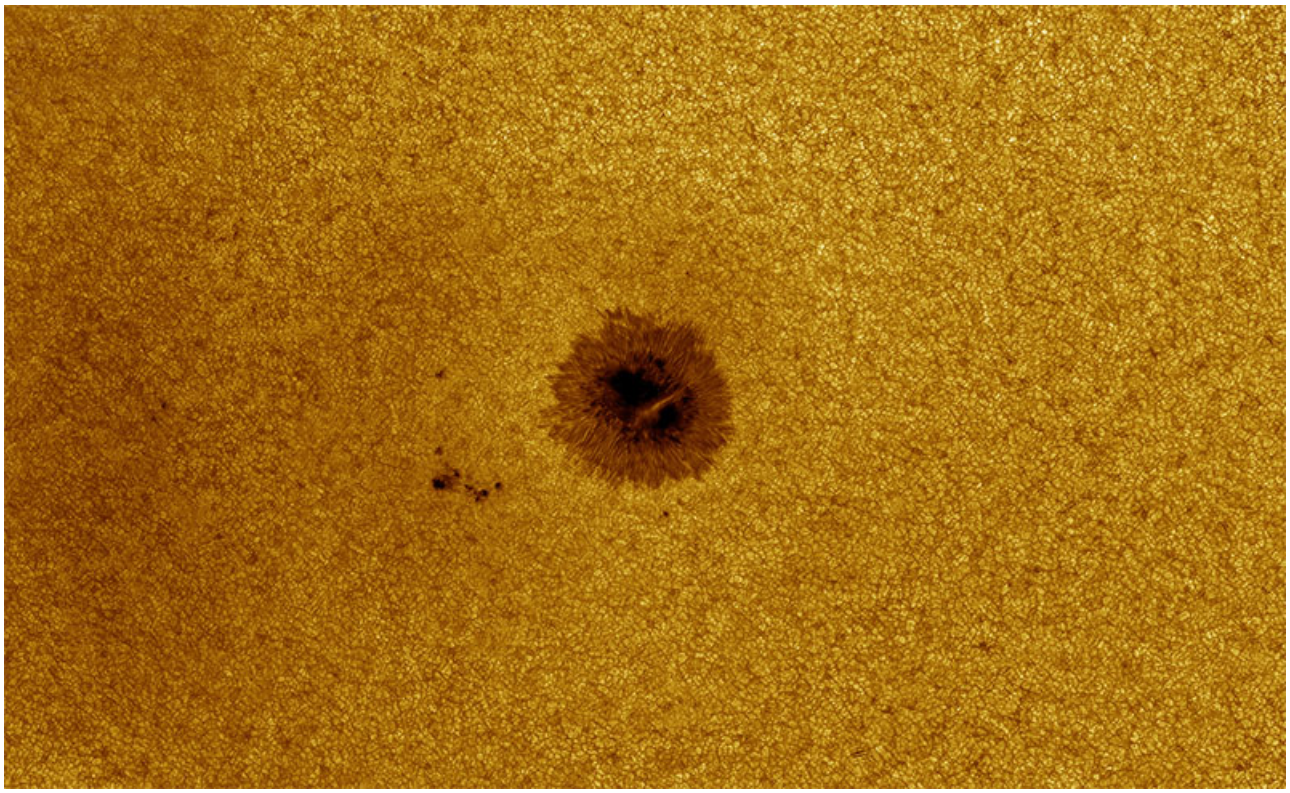
Pendant l'éjection de matière, la vitesse peut très importante et provoquer un décalage Doppler = "Doppler Shift" des raies d'émission, ce qui se traduit par un boost de luminosité lors d'observation en H_α.

Photosphère Hauteur = [500km] et T = [4 200 - 5 800K], visible à l'aide de filtre lumière blanche (prisme de Herschel ou filtre Baader).

— Taches solaires = Sun Spot
  — Umbra
  — Penumbra
  — Active Region Filaments (ARF) / are short lived filaments
  — Bridge (ARF) / are short lived filaments
  — Wilson Effect
— Granules = granulation
— Filigree (1 arsec)
— Plages faculaires
  — Facule

La granulation solaire : BBSO / NST

La granulation solaire (lunette 150 mm)

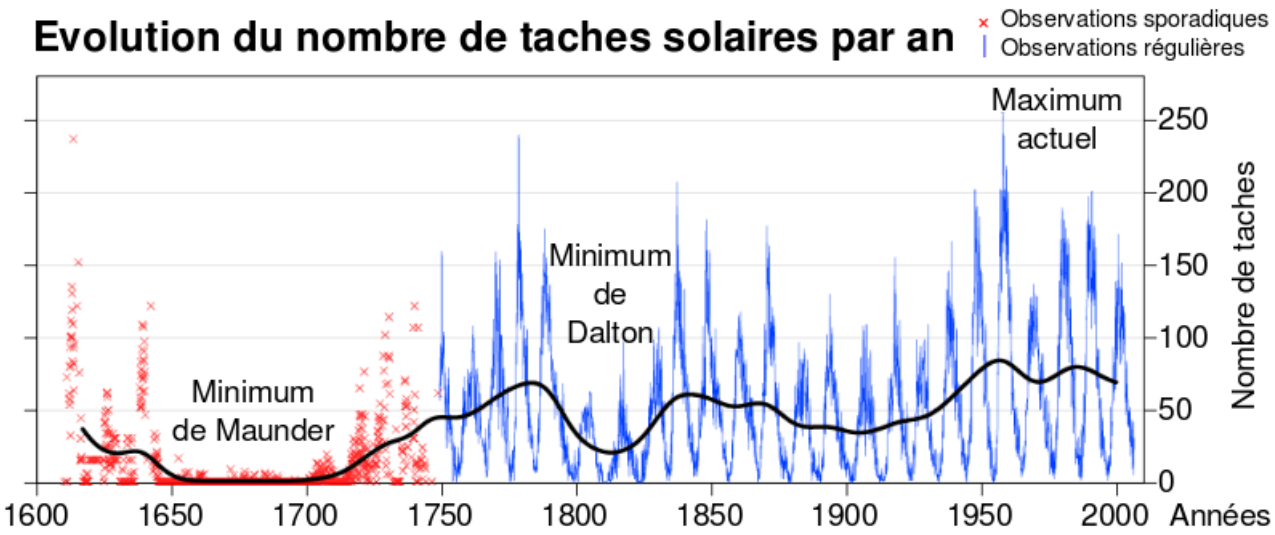


Credit : Martin Wise - MalVeauX

Baily's Beads ou "Diamond Ring Effect" est un effet de perles lumineuses se produisant sur le pourtour solaire lors d'eclipse totale ou annulaire. Les irrégularités du bord lunaire correspondant au relief (montagnes) laisse passer ou bloque par endroit les rayons du soleil.

Le Cycle de Wolf désigne le cycle de 11 ans d'apparition et de disparition des taches solaires à la surface du soleil. Le nombre de Wolf : $R = t + 10g$ permet de connaitre le stade du cycle en fonction du nombre de taches t et du nombre de groupes de taches visibles à la surface du soleil (une tache isolée compte pour un groupe). Le nombre de taches au pic de l'activité peut aller de 100 à 300. Il a aussi été constaté des décennies où le soleil n'avait plus de taches, en particulier les périodes du minimum de Maunder et du minimum de Dalton.

Sunspot number



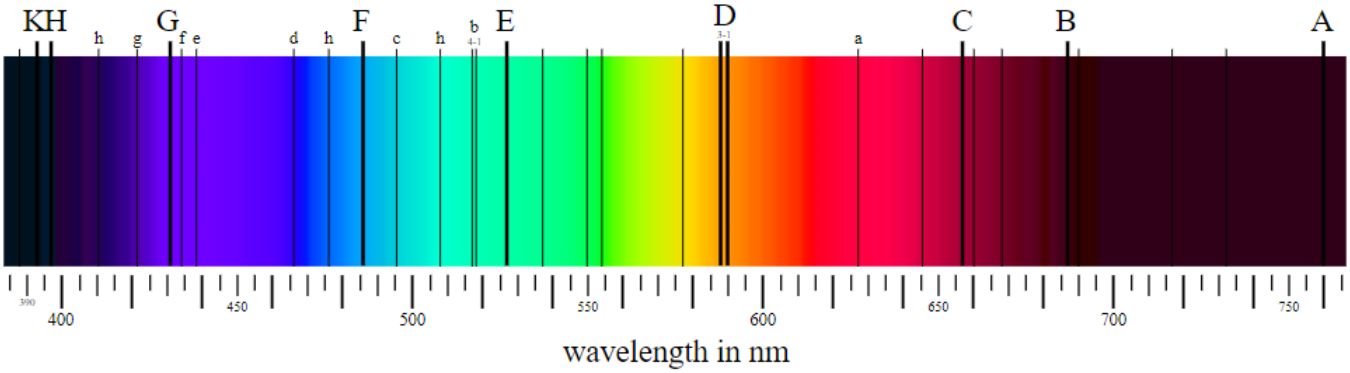
Credit : Wikipedia

CME ou “Coronal Mass Ejection” = “Solar Flares” désigne une explosion très puissante se produisant à la surface du soleil. L’explosion expulse une très grande quantité de matière ionisées qu’en quelques heures ionisant l’atmosphère ce qui a pour effet d’empêcher la propagation des onde radio jusqu’à 300Mhz = “Blackout Radio”, c’est l’effet “Dellinger” [470, 447].

Le Saros désigne le cycle des éclipses solaires en un lieu donné. Le Saros est d’une durée de 223 mois synodiques (lunaison) soit 18 ans. Pour rappel 1 mois synodique = 29.53 jours.

Raies de Fraunhofer il s’agit des lignes d’absorption observées dans le spectre de la lumière émise par le soleil. Chaque ligne correspond à un élément chimique présent à la surface du soleil. Les fréquences de ces lignes de Fraunhofer sont utilisées pour calibrer les objectifs de lunette astronomiques. On nomme aussi ces lignes par une lettre de l’alphabet.

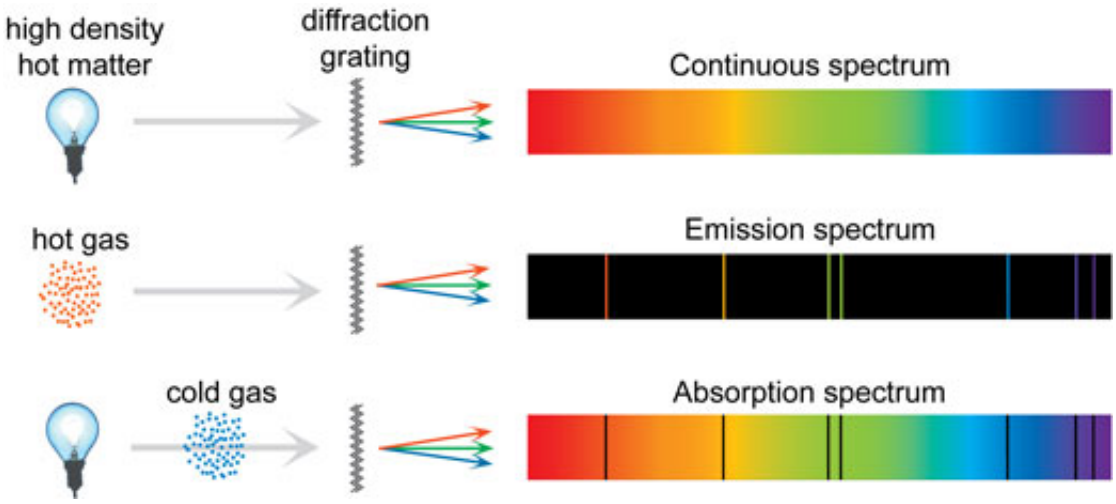
Lignes d’absorptions du Soleil



Credit : Joseph Fraunhofer

Un corps chauffé se comporte comme un “Corps Noir” (corps théorique idéal) et émet donc de la lumière dans toutes les longueurs d’onde sans discontinuités. Cependant, un gaz froid devant une source de lumière absorbe certaines fréquences (le gaz à la surface du soleil). De même qu’un gaz chauffé émet de la lumière seulement dans certaines fréquences caractéristiques pour produire des lignes d’émission, les mêmes fréquences observées dans le cas ou le gaz plus froid absorberaient la lumière pour produire des lignes d’absorption.

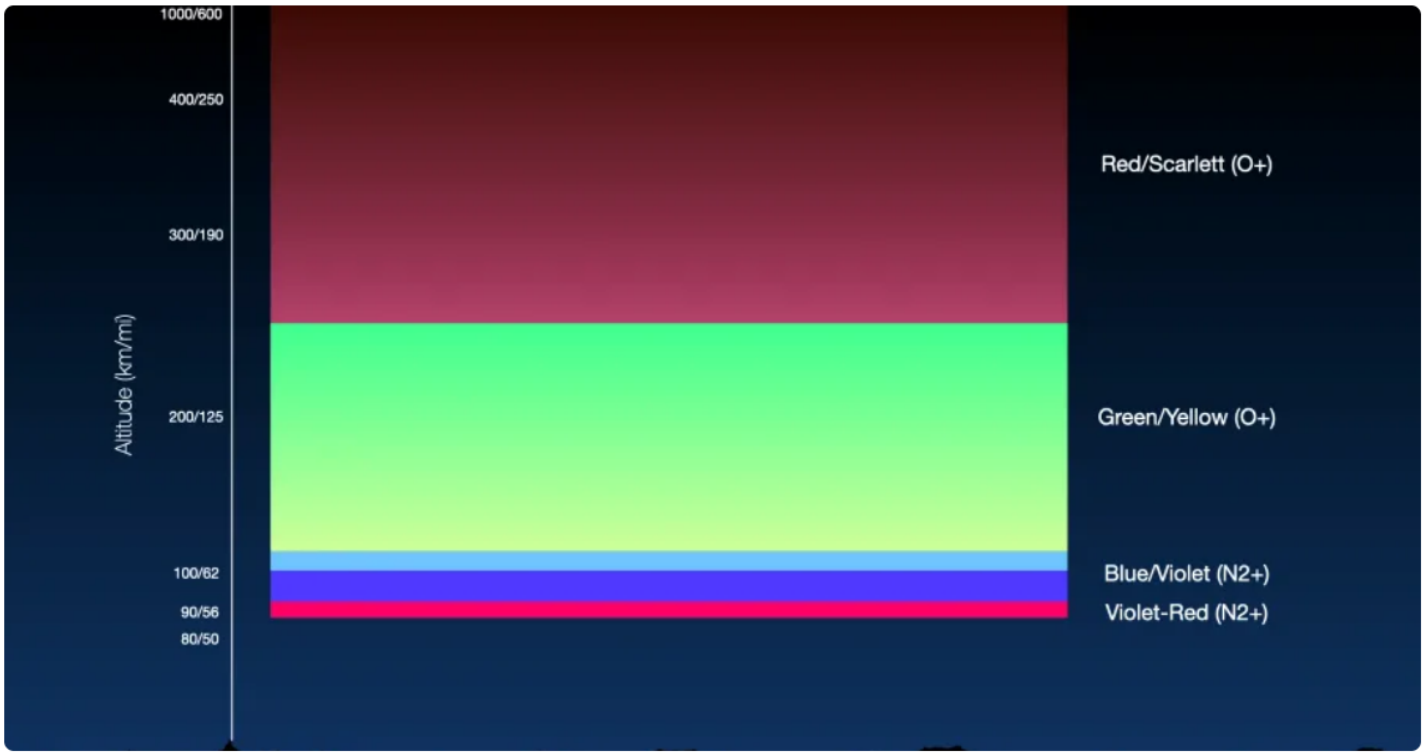
La lumière des gaz



Credit : Mark Tiele Westra

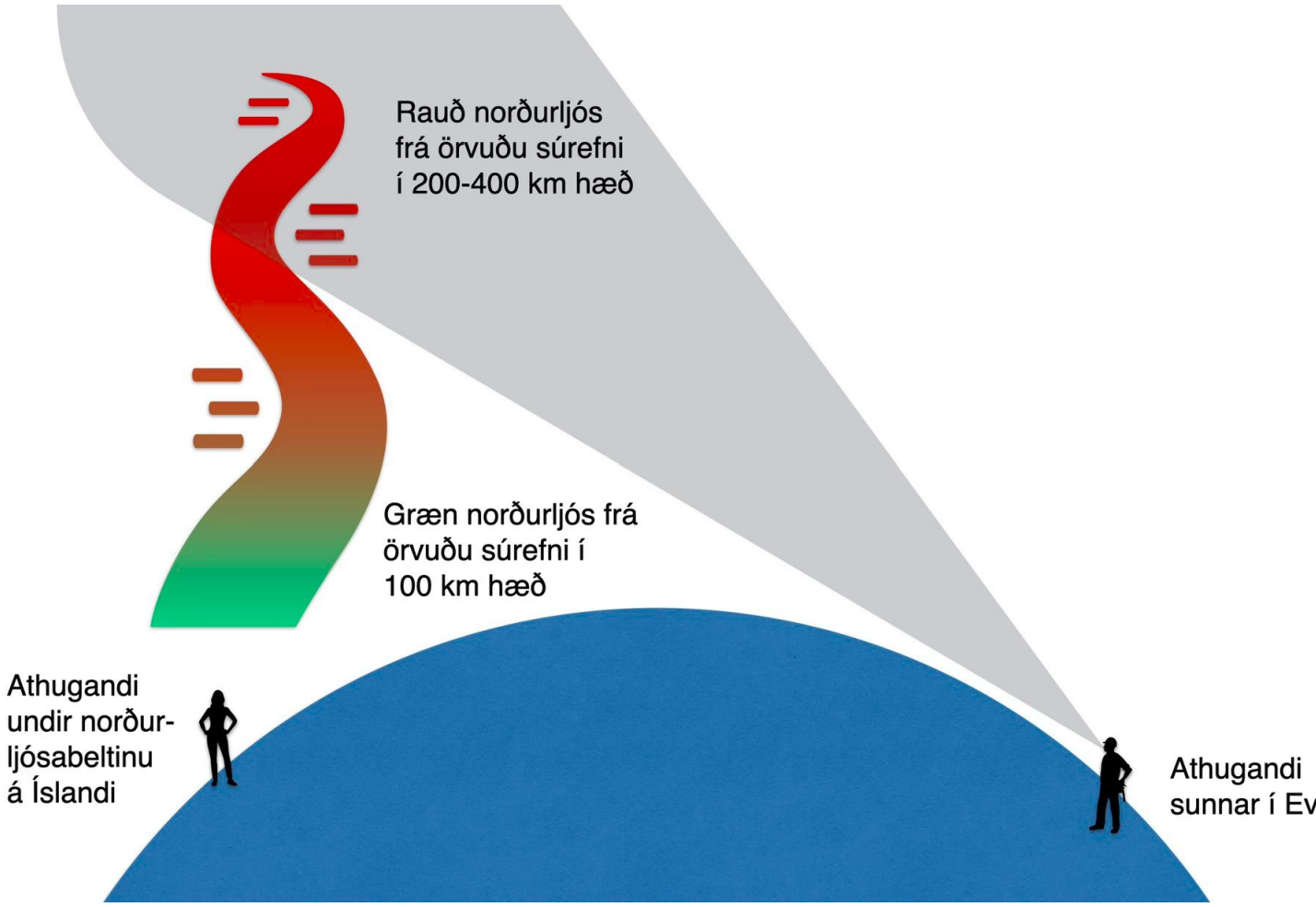
Les aurores boréales désigne le phénomène rencontrée dans les régions de très hautes latitude entre 65° et 75° où le ciel se pare de drapées de couleur allant du vert au rouge. Les aurores corresponde à l'interaction du vent solaire = un flux de particles chargées provenant du soleil avec les molécules de l'atmosphère.

La couleur des aurores boréales



Credit : Hurtigruten

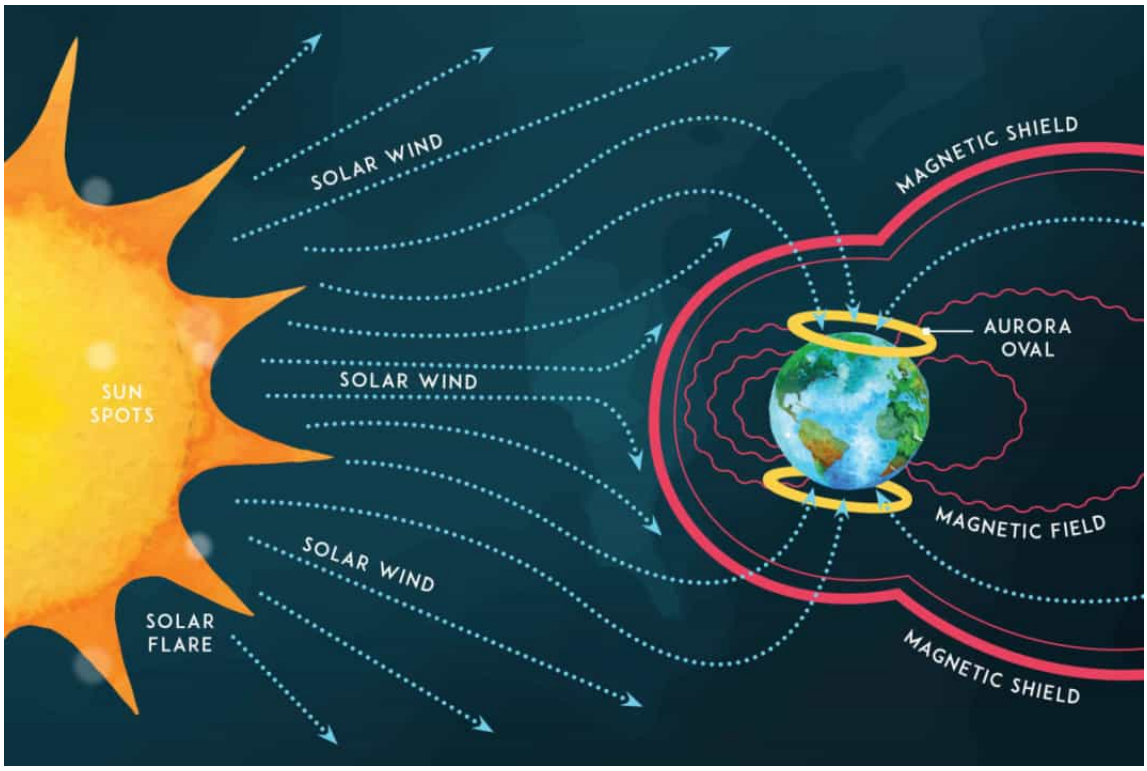
Selon la lattitude d'observation la couleur dominante des aurores boréales peut varier, celles ci seront plutôt rouge en France et plutôt verte dans les pays nordiques.



Credit : Eric Lagadec

La ceinture de an Allen est un bouclier magnétique qui empêche les particules chargées de traverser l'atmophère cependant ce sont aux pôles que cette ceinture est la moins efficace.

Le ceinture de Van Allen



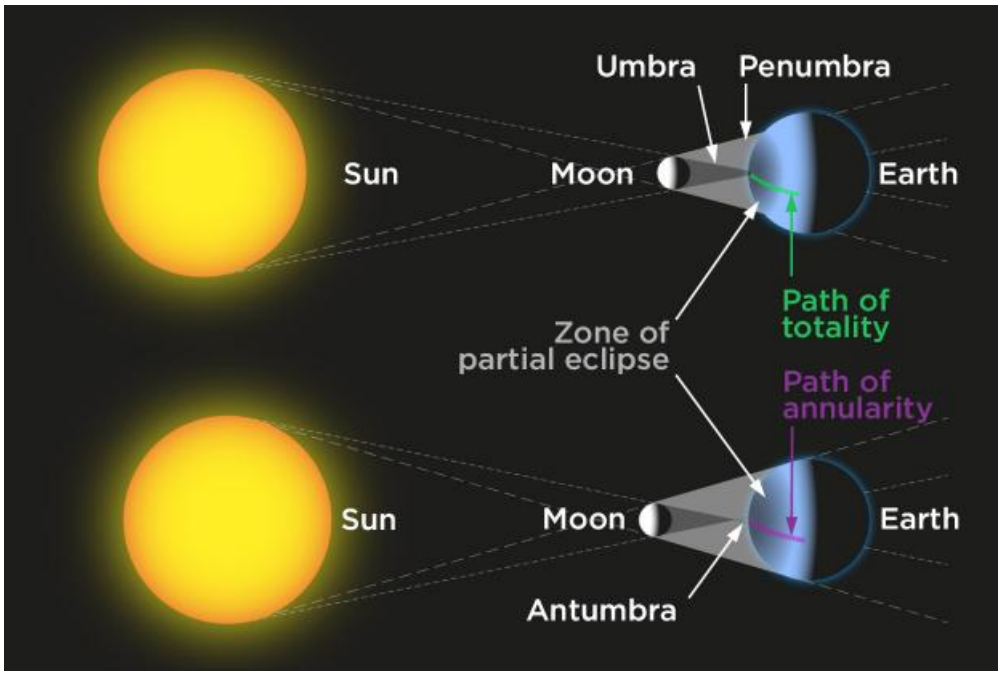
Credit : Vincent Berdez

La fréquence et l'intensité des aurores boréales est plus importante lors des pic d'activité solaire (cycle de 11 ans) et tout particulièremnt lors de CME NOAA Aurora Forecast.

3.2.4 Les éclipses solaires

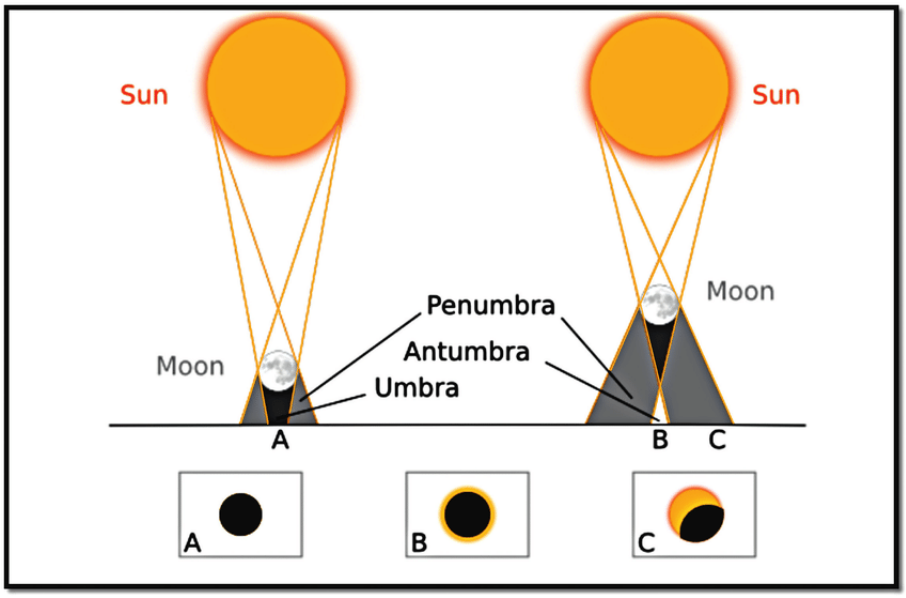
Les éclipses solaire par la Lune sont possible car le hasard à fait que la Lune possède une dimension angulaire équivalente à celle du Soleil, en effet la Lune est 390 fois plus proche de nous que le Soleil mais est aussi 390 fois plus petite que le Soleil. On parle d'éclipse totale lorsque la totalité du disque solaire est recouvert par la Lune et on parle d'écplise partielle voir annulaire dans les autres cas de figure.

Eclipse totale / partielle (annulaire)



Credit : Marc Jobin

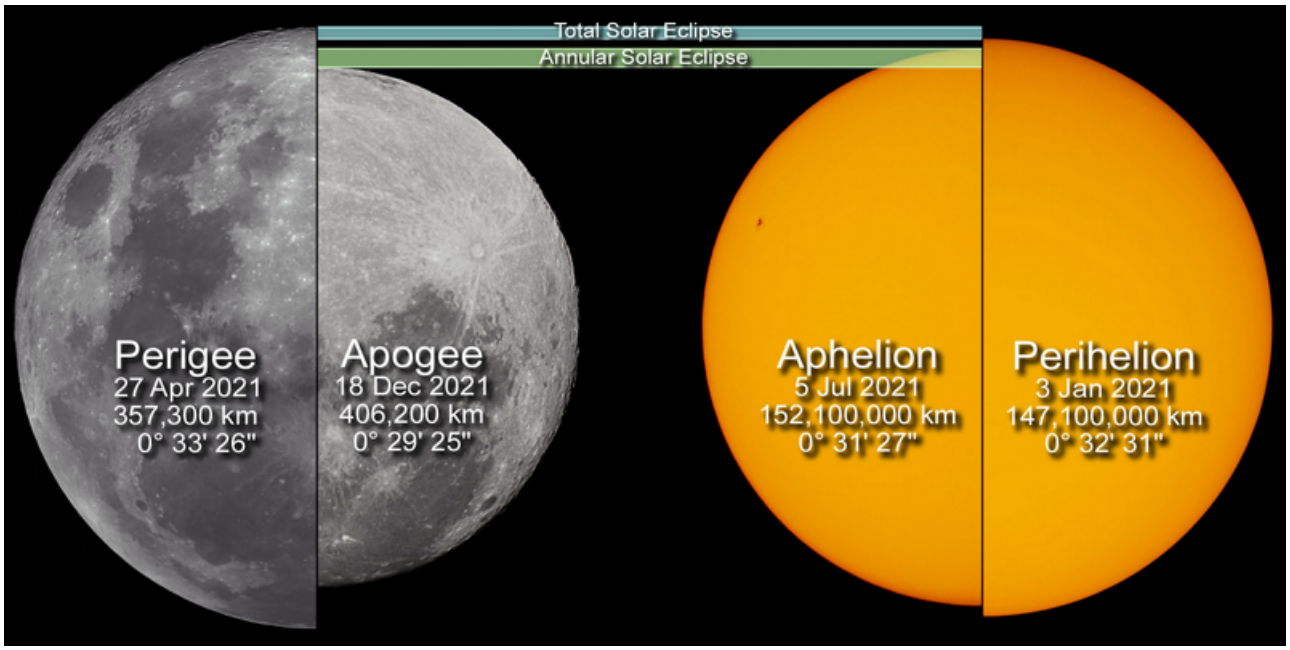
Les 3 types d'éclipses solaires



Credit : Uzi Avner

La durée moyenne d'une éclipse totale est va de 2 min à 7 min 32sec (le record de 2010) et concerne en générale une bande souvent étroite de territoires de 27 km à 781km (2033) [795]. La éclipses totales se reproduisent de la même manière avec un certaine fréquence que l'on appel le Saros et qui correspond à un cycle de 223 mois synodiques (18 ans). Un mois synodique correspond au temps écoulé entre 2 phases de la Lune soit 29.53 jours (1 mois). Chaque Saros verra survenir de 69 à 87 éclipses solaires de tout type confondus soit à minima 4 éclipses solaires par an. Il y aura entre 2 et 5 éclipses solaires totales tous les 18 mois et enfin en tout point du globe une éclipse solaire totale se produira tout les 400 ans.

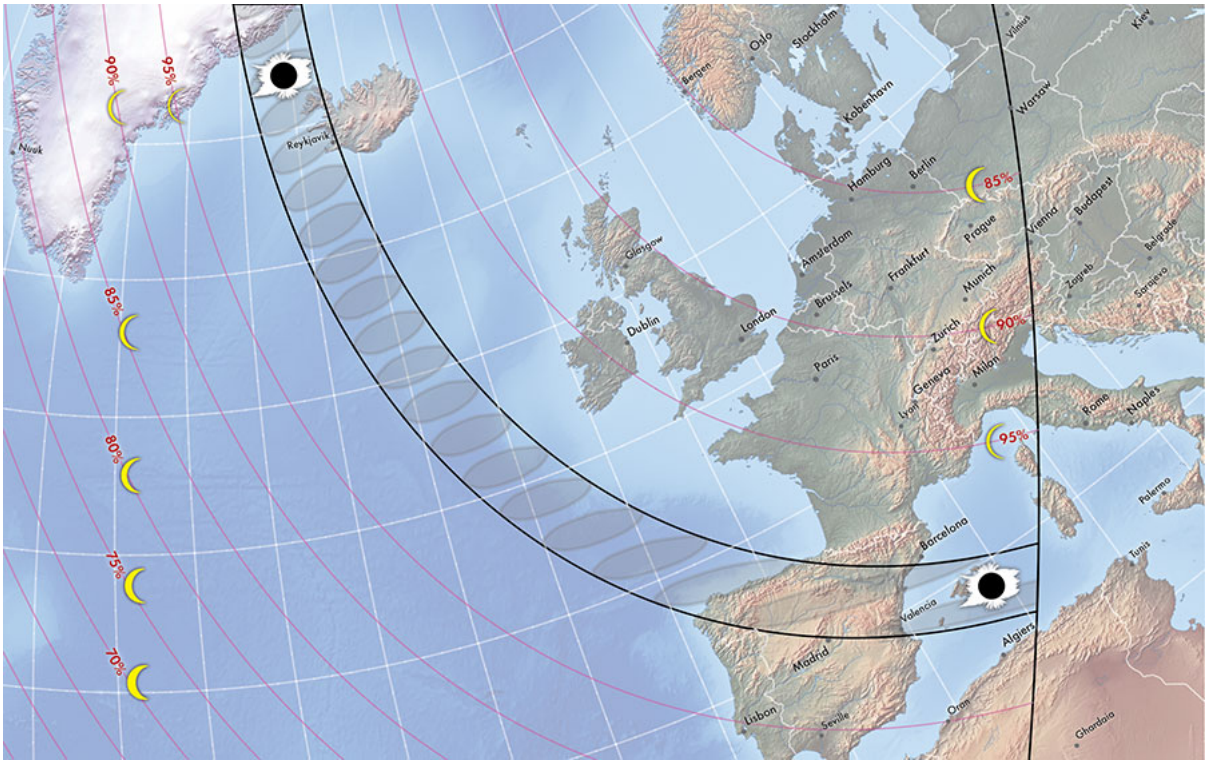
Dimensions Lune / Soleil



Credit : Astronomical Association Queensland

Le prochaine éclipse totale en Europe aura lieu en 2026.

Eclipse du 12 Août 2026



Credit : Sky & Telescope

3.3 Les amas d'étoiles

Les amas ouverts ou "Amas Stellaires", ce sont des amas regroupant des étoiles formées initialement par le même nuage moléculaire ou "Molecular Cloud" et liées entre elles par la gravitation, cependant ces étoiles ne gravitent pas nécessairement les unes autour des autres comme pour les étoiles binaires. Ces amas finissent toujours pas s'évaporer avec le temps.

Les amas globulaires ce sont des amas compacts d'étoiles de 20 à 100 AL de diamètres lié fortement par la gravitation et rassemblant les étoiles plus anciennes de l'univers. Ces amas sont exclusivement situés à la périphérie des galaxies ou "Halo Galactic" qui les hébergent. Il en existe 150 dans notre voie l'actée. Cependant, de ses amas contiennent en partie des étoiles bleues donc plus jeunes, les "Blue Stragglers" leur origine n'est pas connue.

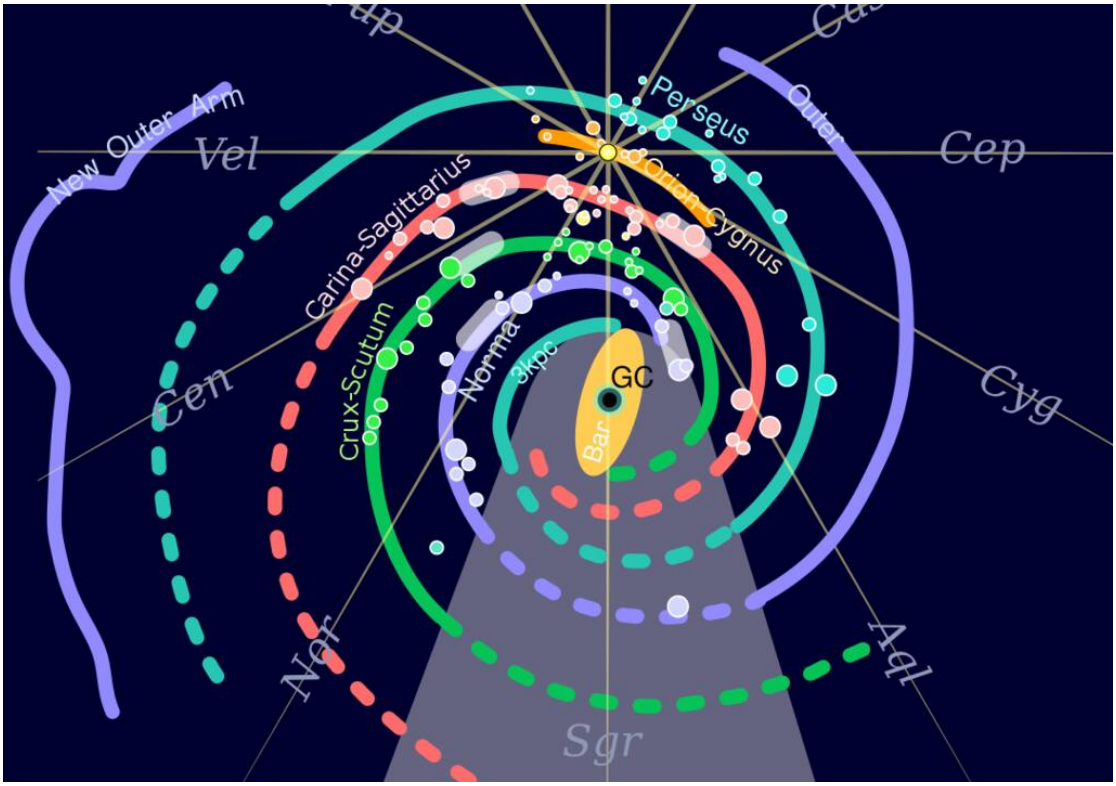
Les associations stellaires ou "Moving Group" sont des amas d'étoiles qui ne sont plus liées par la gravitation, mais dont le mouvement propre trahit une localisation commune dans le passé, suggérant que ces étoiles faisaient partie du même nuage moléculaire qui leur a donné naissance ou bien proviennent d'amas d'étoiles qui se sont évaporé avec le temps.

Les OB associations il s'agit d'un type particulier d'association stellaire où les étoiles qui en font partie sont des super-géantes bleues de type spectral O ou B très lumineuses. Les étoiles de type O ont la durée de vie la plus courte. Ce type d'association concerne probablement la majorité des étoiles formées dans la galaxie au sein d'un nuage moléculaire originel.

3.4 La Voie Lactée

La voie lactée ou "Milky-Way" est la galaxie de type spirale barrée à 4 bras dans laquelle nous vivons, celle ci héberge donc le système solaire. Notre soleil se situerai sur la bras de Orion.

La galaxie

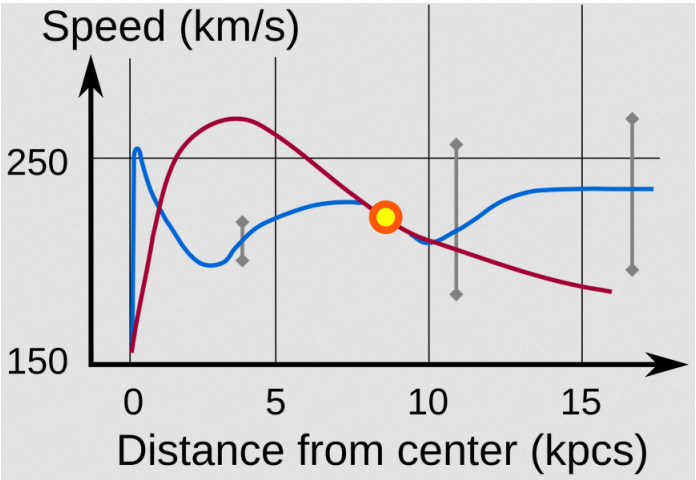


Credit : Wikipedia

La vitesse de rotation de la galaxie présente une anomalie similaire à toutes les autres galaxies dont la rotation a été mesurée.

Cette anomalie indique que la vitesse de rotation au lieu de diminuer à mesure que l'on s'éloigne du centre en raison de la diminution de densité de matière, celle ci reste relativement stable à contre courant des résultats théoriques. Pour d'autres galaxies de l'univers la vitesse de rotation augmente. Ceci a des répercutions fondamentales en cosmologie car cela suggérerait qu'il existe de la matière non visible et donc non répertoriée dans l'univers, de la matière "noire" représentant 6 fois plus de matière que de matière baryonique.

Vitesse de rotation de la galaxie



Credit : Wikipedia

Composition de l'univiers :

- 5% matière baryonique + rayonnement
- 27% matière noire
- 68% energie noire

3.5 Les Nébuleuses

Proplyd désigne des disque proto-planétaires de gaz ionisés entourant les jeunes étoiles des nébuleuses de type HII. La grande nébuleuse d'Orion M42 en contient 180.

Herbig-Haro désigne des nébuleuses remplies de gaz dense expulsés par des étoiles variables jeunes de type T-Tauri. On les trouve le plus souvent à l'intérieur des globules de Bok au sein des nuages moléculaires. Le résultat de la collision de la matière de l'étoile et du gaz interstellaire environnant en font des nébuleuses variables de quelque mois à quelques années. Exemple d'objet HH : Hind's Variable Nebula.

Globules de Bok désigne des amas sombre de poussières et gaz que le trouve au sein des nébuleuses de type HII. Les globules de Bok permettent la formation des disques proto-planétaires.

IFN ou "Integrated Flux Nebula" ou "Cirrus Galactique" désigne les fines nébulosités constituée de gaz et de poussières étendues sur de vaste champs stellaires révélées par la photographie. Ces nébulosité sont éclairées par le halo lumineux de la Voie Lactée. On parle aussi de "Integrated flux of all the stars in the Milky Way". Pour bien voir ces nébulosités il faut utiliser des cameras numériques performantes et des temps de pose très long. A la différence des nébuleuses par réflexion qui sont principalement illuminées par les étoiles environnantes.

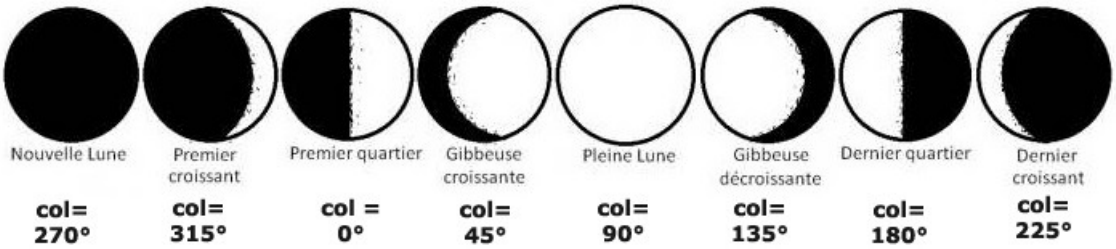
3.6 La Lune

La Lune est l'unique satellite naturel de la Terre, la Lune opère une révolution complète sur son orbite en 28 jours mais du point de vue d'un observateur terrestre la Lune montre la même phase tous les 30 jours = révolution synodique.

(à compléter)

Colongitude désigne la hauteur du soleil sur la Lune du point de vue d'un observateur sur Terre. La colongitude J vaut $J = L_T$ où L_T est la longitude du terminateur donnée par les éphémérides. La colongitude sert donc de mesure de la phase de la Lune. Le meilleur moment d'observation d'un élément du relief de longitude L_P de la Lune est lorsque : $L_P \approx L_T$.

Les colongitudes de la Lune

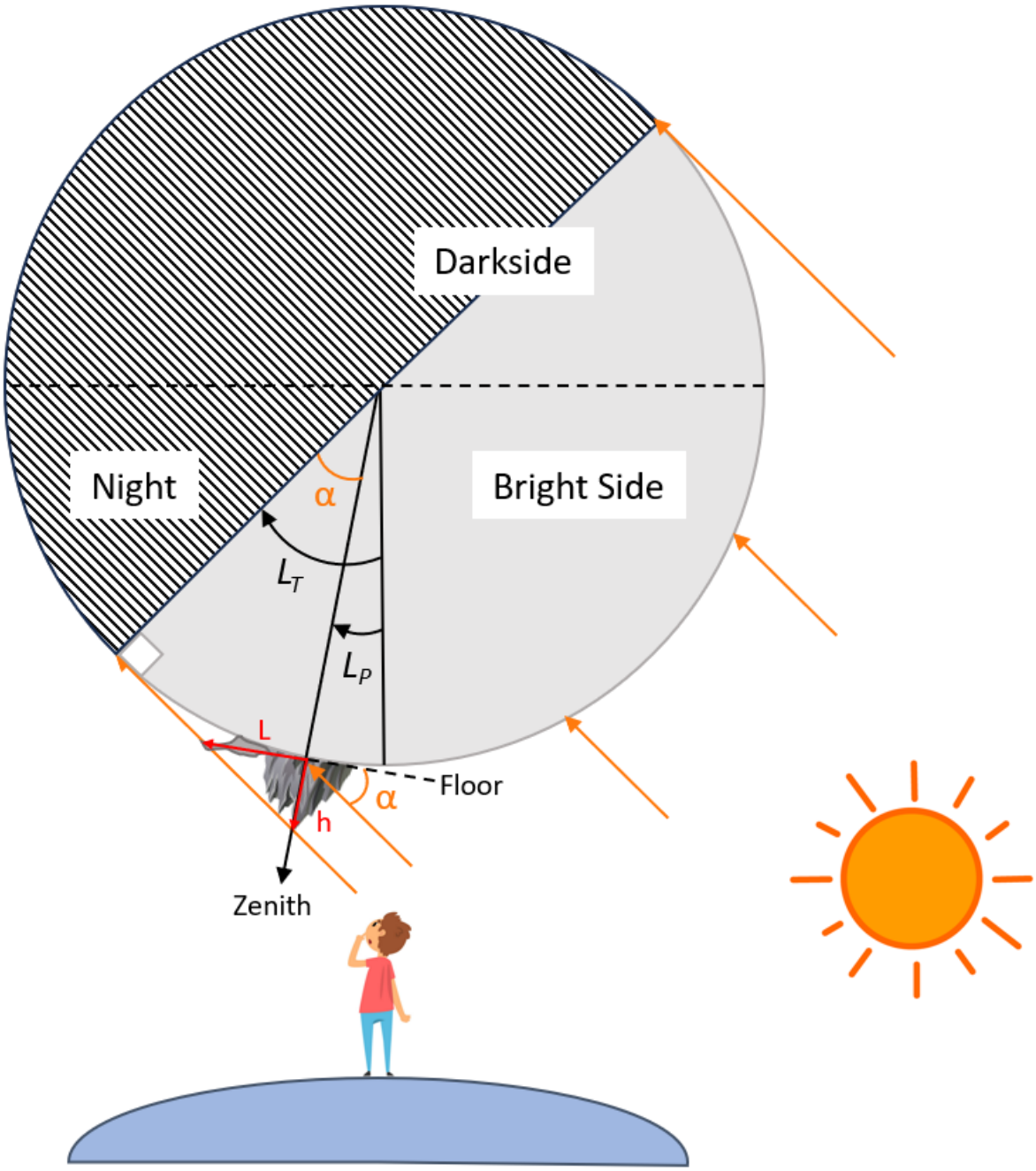


Credit : Bel Horizon

La colongitude permet de calculer la hauteur h des reliefs Lunaire au niveau du terminateur, L = longueur de l'ombre et α l'angle de la hauteur du soleil et L_T la longitude du terminateur :

$$h = L \times \tan \alpha$$
$$h = L \times \tan(L_T - L_P)$$

Les ombres portées par la lumière du soleil



Credit : J.G. Gricourt

Les ombres deviennent plus étendues à mesure que l'on s'approche du terminateur.

3.7 Mécanique théorique (aperçu)

Mécanique Newtonienne ou "Mécanique Classique" est la discipline qui traite du mouvement des corps à l'échelle macroscopique.

Du point de vue de la mécanique, un corps est défini par :

— Sa masse m

— Sa position x à l'instant t
— Sa vitesse : $v = \frac{dx}{dt}$

Un référentiel est un repère dans l'espace permettant de définir la position et la vitesse d'un objet.

Un référentiel Galiléen est un référentiel en mouvement rectiligne uniforme donc à vitesse non nulle constante ou à vitesse nulle.

Les lois de la mécanique Newtonienne s'appliquent dans tout référentiel Galiléen et uniquement Galiléen.

Un objet isolé donc soumis à aucune force suit toujours un mouvement rectiligne uniforme donc à vitesse constante (peut être nulle).

La masse

Désigne la grandeur d'un objet caractérisant sa résistance au mouvement de translation.

Masse = m

Lorsque l'objet est constitué de plusieurs masses reliées entre elles, on définit son centre d'inertie ou centre de gravité comme le barycentre des masses.

Le centre de gravité

Le barycentre G d'un objet constitué de plusieurs masses m est calculé selon : $\overrightarrow{OG} = \frac{1}{m_{\text{total}}} \sum_{i=1}^{n} m_i \overrightarrow{OM_i}$ où O est un point quelconque de l'espace.

Le centre de gravité ou centre d'inertie G d'un objet constitué de plusieurs masses soumis au champ gravitationnel m est calculé selon : $\sum_{i=1}^{n} m_i \overrightarrow{GM_i} = 0$

On peut toujours réduire un objet à un point, son barycentre, doté de la somme des masses qui le constitue, et cela, afin d'en déduire son mouvement.

Le moment d'inertie

Désigne la grandeur d'un objet constitué de plusieurs masses et caractérisant sa résistance au mouvement de rotation. Il s'agit de l'homologue de la masse pour les objets en rotation.

$J_O = mr^2$ où r est la distance de la masse à un point O de l'espace.

La quantité de mouvement

Quantité de mouvement d'un point

$\vec{p} = m\vec{v}$

De manière générale, la quantité de mouvement d'un objet vaut la somme des quantités de mouvement de tous les points matériels qui le constituent

$\overrightarrow{p}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{v_i}$

Le moment cinétique

Moment cinétique d'un point matériel M par rapport à un point O

$L(\vec{M}/0) = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{p} \quad \text{où} \quad \vec{p} = m \times \vec{v}$

De manière générale, le moment cinétique d'un objet vaut la somme des moments de tous les points matériels qui le constituent

$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} \overrightarrow{OM}_i \wedge \vec{p_i}$

La force

Lorsqu'une force s'applique sur l'objet, celui-ci subit une accélération $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

$\vec{F} = m\vec{a}$

De manière générale, la force globale s'appliquant sur l'objet vaut la somme des forces qui s'appliquent

$\sum_{i=1}^{n} \vec{F_i} = \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{a_i}$

A l'équilibre

$\sum_{i=1}^{n} \vec{F_i} = 0.$

Moment d'une force

Moment d'une force F par rapport à un point O où M est le point d'application de la force

$M(\vec{F}/O) = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{F}$

De manière générale, le moment d'une force vaut la somme des moments des forces appliquées à tous les points matériels qui le constitue, c'est le théorème de Varignon.

Si $\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F_i}$ alors $M(\vec{F}/O) = \sum_{i=1}^{n} M(\vec{F_i}/O)$

Théorème du moment cinétique

$\sum_{i=1}^{n} M(\vec{F_i}/O) = \frac{dL(\vec{M}/O)}{dt}$

A l'équilibre :

$\sum_{i=1}^{n} M(\vec{F_i}/O) = 0$ et aussi $\sum_{i=1}^{n} \vec{F_i} = \vec{0}$

Exemple

Un tube de dobson posé sur l'axe O de sa base MN où s'exerce les forces F_1, F_1 aux extrémités du tube et R la force de réaction au niveau de l'axe soutenant le tube, on calcule la somme des moments des forces en jeu :

$M_{\text{total}} = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{F_1} + \overrightarrow{OO} \wedge \vec{R} + \overrightarrow{ON} \wedge \vec{F_2} = OM \times F_1 - ON \times F_2$

A l'équilibre $M_{\text{total}} = 0$:

$OM \times F_1 = ON \times F_2$

F_1 peut représenter le poids du miroir en M et à l'autre bout du tube en N, F_2 peut représenter le poids du porte-oculaire + oculaire. Si $ON \gg OM$ alors la force F_2 nécessaire pour maintenir l'équilibre du tube sera beaucoup plus faible que la force F_1 c'est l'effet du bras de levier. Les longues lunettes sont très sensibles à cet effet, ce qui rend son équilibre précaire.

L'énergie cinétique

L'énergie cinétique d'un objet d'un objet en mouvement rectiligne uniforme de vitesse v constante.

$Ec = 1/2 \times m \times v^2$

L'énergie cinétique d'un objet en rotation

L'énergie cinétique d'un objet en rotation à la vitesse angulaire constante w autour d'un axe Δ vaut :

$Ec = 1/2 \times J_\Delta \times w^2$ où J_Δ est le moment d'inertie de l'objet autour de l'axe de rotation Δ.

Le moment d'inertie est une caractéristique de l'objet et est la somme des moments d'inertie des masses constituant l'objet et vaut : $J_\Delta = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$ où r_i est la distance de la masse m_i à l'axe de rotation Δ.

Mécanique non Newtonienne La mécanique Newtonienne ne s'applique plus dans 2 cas :

- Lorsque les objets sont des particules (mécanique quantique)
- Lorsque la vitesse des objets se rapproche de celle de la lumière (mécanique relativiste)

Formules de mécanique relativiste :

Énergie total : $E^2 = (E_0 + E_c)^2 = (m_0c^2)^2 + (pc)^2 = \gamma m_0 c^2$

Momentum : $p = \gamma m_0 v$ où m_0 est la masse au repos

Énergie cinétique : $Ec = E - E_0 = (\gamma - 1)E_0$

Énergie au repos : $E_0 = m_0c^2$

Énergie du photon : $E = h\nu$

Espace de Minkowski désigne un espace mathématique modélisant l'espace physique de la Relativité restreinte au même titre que l'espace euclidien modélise l'espace physique de Newton. L'invariant de Lorentz est la relation fondamentale qui relie le temps à la géométrie de l'univers. Soit une particule qui parcourt 2 points A et B de l'univers définit à différents instants ayant les coordonnées suivantes $A(x_A, y_A, z_A, t_A)$ et $B(x_B, y_B, z_B, t_B)$, alors l'intervalle d'univers correspondant est : $(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2 = c^2(\Delta t)^2 - d^2$ où Δt est la durée séparant les 2 événements t_A et t_B et d est la distance séparant A et B. Ici s est invariant lors de changement de repère Galiléen (x, y, z, t). Dans le cas où $(\Delta s)^2 > 0$ alors les 2 événements sont nécessairement connectés causalement, B est informé par A au passage de la particule et de plus :

$c\Delta t > d$ dans ce cas la distance parcourue par la lumière entre les 2 instants est supérieure à celle parcourue par la particule. On définit le temps propre de la particule comme : $\tau = \frac{s}{c}$, τ est invariant et ne dépend pas du système de coordonnée.

Principe d'invariance désigne un principe fondamental (postulat) de la relativité restreinte où il n'est pas possible de distinguer la physique qui se déroule à l'intérieur d'un bateau à quai d'un autre bateau naviguant en mouvement rectiligne à une vitesse constante. On appelle ces 2 référentiels "galiléens".

Vitesse des particules sans masse désigne un principe fondamental (postulat) de la relativité restreinte où la vitesse des particules sans masse dans le vide, par exemple la lumière, est la même dans tous les référentiels galiléens.

Principe d'équivalence désigne un principe fondamental (postulat) de la relativité générale où il n'est pas possible de distinguer la physique qui se déroule à l'intérieur d'une fusée posée (statique) sur Terre d'une autre fusée ayant décollé qui accélère avec l'accélération $a = g = 9.8m/s^2$ tout comme il n'est pas possible de distinguer la physique qui se déroule à l'intérieur d'un ascenseur en orbite autour de la Terre d'un autre ascenseur en chute libre.

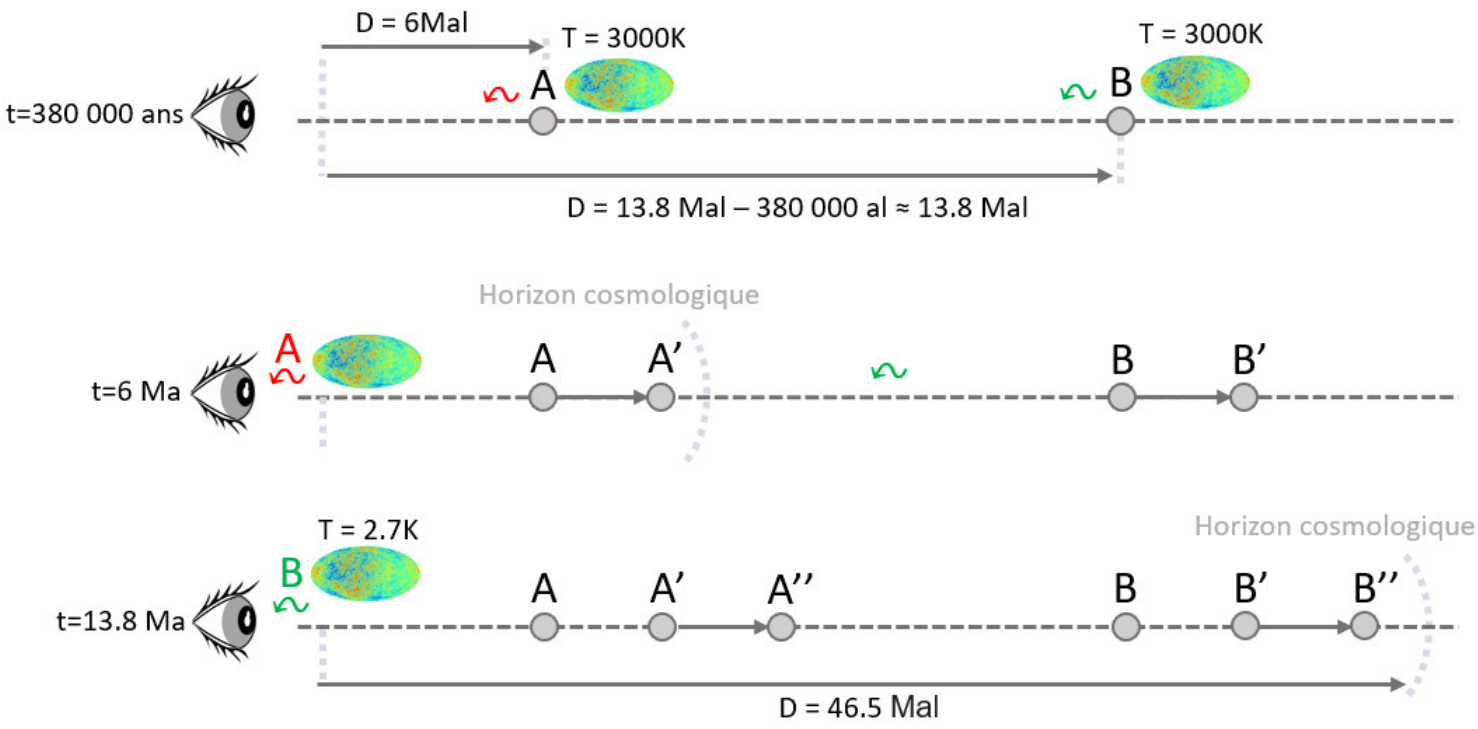
Décalage du à la rotation de la planète désigne l'effet de flou produit du à la rotation d'une planète en imagerie. Certaines planètes ont des vitesses de rotation rapide qui limite le temps de poses unitaire en astrophoto si l'on veut éviter le flou. Le temps de pose maximum Tp permit selon le décalage d_p en pixel autorisé (arbitraire ici) est : $T_e = \frac{T_r \times \arcsin \frac{d_p}{D_p}}{2\pi}$, où Dp le diamètre en pixel de la planète sur l'image et Tr la période de rotation complet de la planète.

Période de rotation équatoriale des planètes

Planète	Période
Mercure	58j 15.5h
Vénus	243j 26h
Mars	1d 36h
Jupiter	9h 55m
Saturne	10h 40m
Uranus	17h 14m
Neptune	16h

Le soleil a une période de rotation de 25j à l'équateur et 35 jours aux pôles.

Univers Observable désigne la taille de la sphère délimitant l'horizon cosmologique. Les objets ayant émis de la lumière depuis l'instant zéro (le Big Bang originel) et arrivés jusqu'à nous après un périple de 13.8 milliards d'années, soit l'âge de l'univers, sont maintenant plus loin de nous que la distance de 13.8 milliards d'années-lumière du fait de l'expansion de l'univers et se retrouvent donc à une frontière celle de l'univers observable. Au-delà de cette frontière virtuelle, nous ne voyons pas encore les objets qui s'y trouvent, car leur lumière n'a pas encore terminé son voyage jusqu'à nous. Chaque seconde qui s'écoule, nous découvrons ainsi 300 000 km de plus parce que l'horizon cosmologique recule d'autant. La taille de l'univers observable est de 46.5 milliards d'années-lumière de rayon. En pratique les photons qui nous arrivent des objets de l'horizon cosmologique n'existe pas, car la lumière n'a été émise que plus tard après le big bang soit à l'âge de 380 000 ans donc bien avant la formation des galaxies, c'est le fond diffus cosmologique un rayonnement à 2.7 kelvin (redshift z = 3000K / 2.7K = 1100).

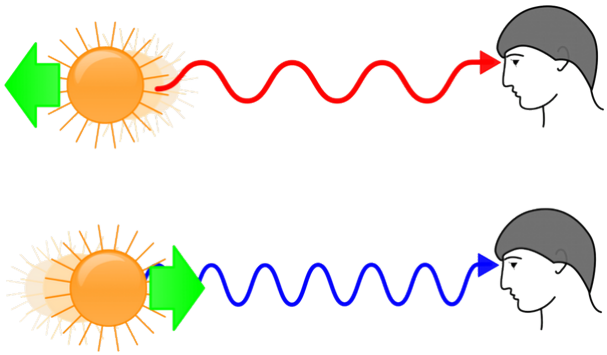


Credit : J.G. Gricourt

La loi d'Hubble permet de connaitre la vitesse de récession v des objets en fonction de leur distance D : $v = H_0 D$, H0 est la valeur de la constante d'Hubble actuellement (temps 0). Plus cette vitesse est élevée, donc pour les objets les plus lointains, plus leur couleur est décalée vers le rouge (effet Doppler).

Décalage Spectral ou "Redshift" désigne le décalage vers le rouge des longueurs d'onde de la lumière émise par les galaxies lointaines. Edwin Hubble, astronome de l'observatoire du Mont Wilson (USA) en 1929, est le premier à avoir mis en évidence ce phénomène qui démontre que l'univers est en expansion. La métrique de l'univers s'agrandissant à mesure que l'on s'éloigne d'un point d'observation et les galaxies s'éloignent. La lumière subit alors un décalage vers le rouge dans le spectre lumineux lorsque sa source est en mouvement par rapport à l'observateur, il s'agit du même phénomène que l'effet Doppler.

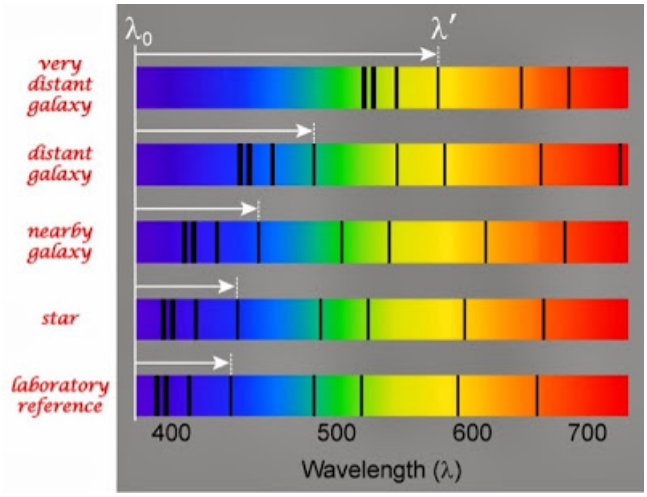
L'effet Doppler de la lumière



Credit : PinClipart

Calcule de l'effet Doppler de la lumière : $\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ où v est la vitesse de la source par rapport à l'observateur et $\Delta\lambda$ le décalage de la longueur d'onde par rapport à la longueur d'onde initiale λ_0 (lorsque la source ne bouge pas).

On mesure ce décalage grâce à l'identification de certaines raies d'émission ou d'absorption qui se retrouvent systématiquement décalée vers la droite et donc vers le rouge en raison de leur vitesse d'éloignement.



Credit : Ben Schiher

Le redshift permet donc de mesurer indirectement les distances des galaxies. Le redshift se calcul à partir de la longeur d'onde à l'émission λ_0 et de la longeur d'onde à la reception λ, donc : $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ [560]. La vitesse : $v = \frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}$. La distance est directement déduite de la loi empirique d'Hubble : $D = v/H_0$ où la constante d'Hubble vaut : $H_0 = 70(km/s)/Mpc$.

Chapitre 4

La Vie

4.1 La Vie sur Terre

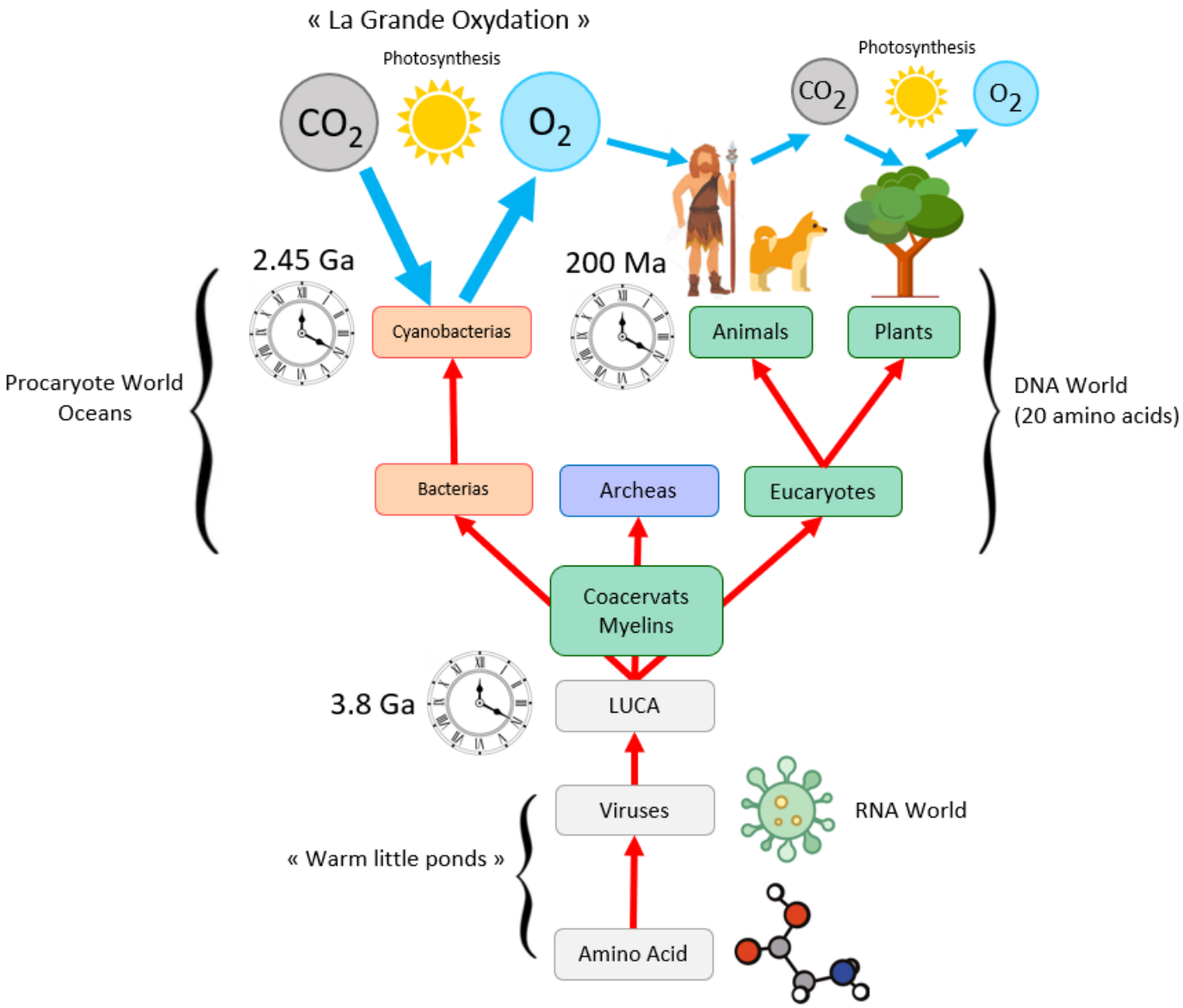
Vie la vie à évoluée à partir de 3.8 milliards d'années dans un premier temps grâce à la formation spontanée d'acides aminés dans ce que l'ont appel les "Warm Little Pond" qui sont des sources thermales terrestres associées au volcanisme. Donc contrairement aux idées reçues, les premiers maillons de la vie n'ont pas été formés dans les océans.

Le "RNA World" désigne l'apparition d'assemblage de molécule complexes capables de se répliquer qui a permit ensuite la sélection naturelle permettant à ces assemblages de molecules de se spécialiser et se perfectionner au grès des mutations [49]. C'est le monde de l'acide ribonucléique = RNA dont les représentants les plus évolué à l'apoque sont les virus. Ensuite est arrivé LUCA = "Last Universal Common Ancestor" le premier être vivant constitué des 20 premiers acides aminés et depuis tout le vivant a hérité de ces mêmes briques primitives.

Les Myelins sont des assemblage allongés en filaments formés naturellement lorsque des lipide secs sont mis au contact de l'eau. Il semblerait que ce soit le premier stade de formation des vésicules dont la membrane rappel la structure des cellules vivantes [159].

Les Coacervats sont de petites gouttelettes lipidiques plus évolués que les Myelins car il contiennent des substances dont la masse moléculaire est élevée. Ceux ci sont aussi formés en milieu aqueux et semblent être à l'origine des Procaryotes. Ces Coacervats sont relativement assez facile à obtenir en laboratoire [287] et peuvent même évoluer naturellement avec la baisse du ph vers des vésicules complètes pré-curseur de la cellule [363].

Apparition de la vie



Credit : J.G. Gricourt

Dates importantes :

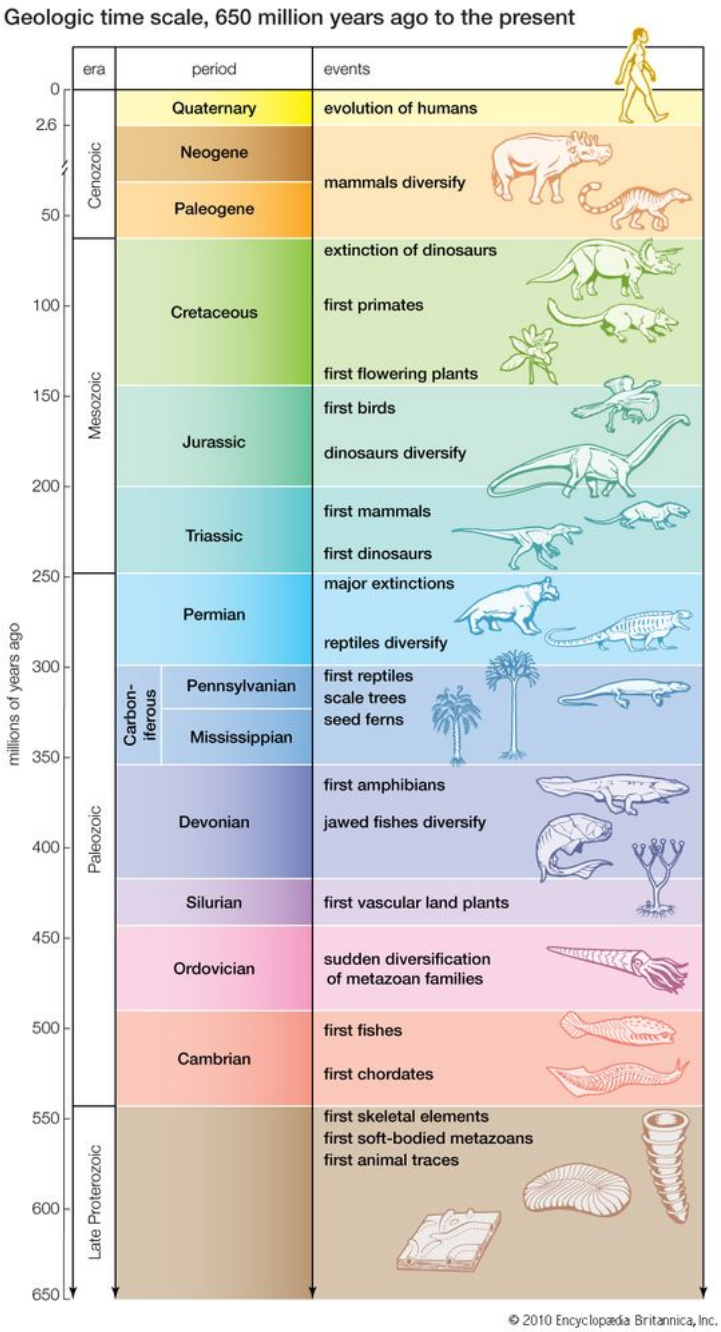
- Création des océans de 2.45 à 1.85 Ga
- Création de la couche Ozone de 1.85 à 0.85 Ga
- Création de l'atmosphère de 0.85 Ga à 0.54 Ga

Par la suite, c'est dans les océans que la vie se développe avec 3 grandes branches :

- Procaryotes / Bactéries : les cyanobactéries
- Procaryotes / Archées : les bactéries méthanogènes
- Eucaryotes : le règne animal, le règne végétal et les champignons

L'ensemble des organismes multicellulaires dont les animaux et les plantes se sont développés à partir des Eucaryotes. L'homme quant à lui est apparu il y a environ 200 millions d'années.

Les grandes Ères de l'histoire de la Terre



Credit : Britannica

On distingue 3 grandes ères du développement de l'oxygène sur Terre que l'on appelle "Grandes Oxydations" :

— 2.45 à 1.85 milliard d'années : l'oxygène est fabriqué par les cyanobactéries
— 1.85 à 0.85 milliard d'années : absorption de l'oxygène par les terres et formation de la couche Ozone
— 0.85 à 0.54 milliard d'années : période de saturation de l'atmosphère en oxygène

Les cyanobactéries ont fabriqué de l'oxygène à partir du CO2 puis l'ont libéré dans les océans. L'oxygène va rentrer dans la composition de l'atmosphère et ensuite permettre de constituer la couche d'ozone qui servira à protéger la Terre des rayonnements UV dangereux pour la vie, ce phénomène permettra l'accroissement de la biodiversité plus tard. Enfin l'atmosphère se sature progressivement en oxygène à partir de 0.85 milliard d'années pour arriver à un taux de 78% comme actuellement.

Les cyanobactéries ont aussi transformé le Fer ferreux Fe en rouille : Fe2 + O2 → Fe2O3 par oxydation, ce qui a donné le Fer rubané emprisonnés dans certaines roches et constitue la forme majoritaire du minerai de Fer exploité aujourd'hui.

Les organismes de l'époque y compris les cyanobactéries qui transformaient aussi l'azote N2 et utilisait du Fer ferreux soluble dans l'eau, on vu leurs nutriments s'appauvrir en raison de l'activité des cyanobactéries ce qui provoqua une chute brutale de leur activité pendant 1 milliard d'année jusqu'à l'apparition de nouveaux organismes plus adaptés aux nouvelles condition terrestre [604].

La vie a ensuite continué à se développer pour donner les invertébrées jusqu'aux premiers hominidés. Cependant, la Terre a connu entre-temps plusieurs extinctions de masse, dont la plus connue, celle du Permien, où la vie avait été presque été éradiquée de la surface de la Terre. Les températures frôlaient alors les 60° en surface, le réchauffement climatique était à son apogée.

Mass Extinctions

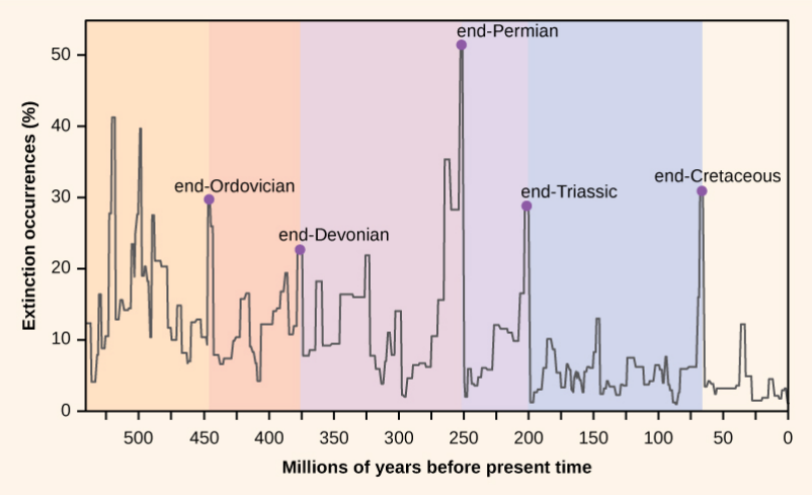


Figure 1. Percent extinction occurrences as reflected in the fossil record have fluctuated throughout Earth's history. Sudden and dramatic losses of biodiversity, called mass extinctions, have occurred five times.

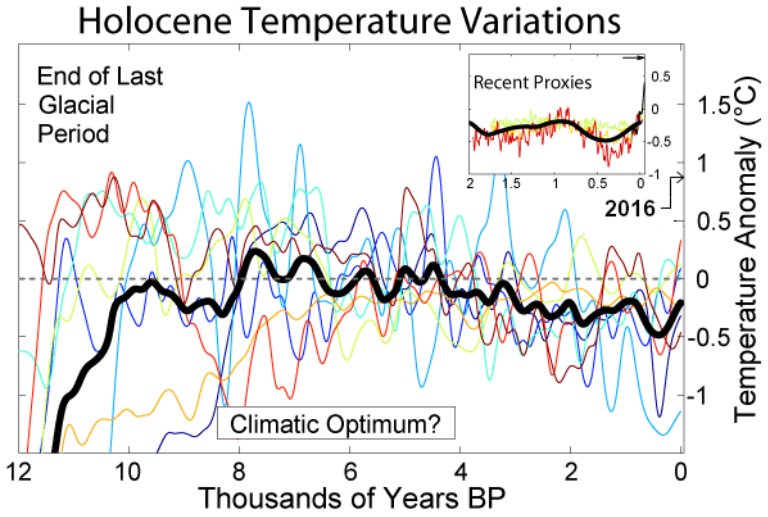
Credit : Lumenxwaymaker

4.2 L'Holocène

L'Holocène désigne une période climatique particulière de l'histoire de l'humanité. L'Holocène correspond à la période interglaciaire qui a débuté il y a 12 000 ans et se poursuit actuellement et on suppose qu'il y aura une autre période glaciaire juste après notre période de réchauffement étant donnée le caractère fortement cyclique de ces périodes dans l'histoire de la Terre. Pour rappel, il y a 12 000 ans, c'est la fin du Paléolithique, et à -3 300 ans, c'est l'apparition de l'écriture en Iran et donc la fin de la Préhistoire de l'Homme. Le Néolithique début à -8 500 en Anatolie avec l'agriculture qui sédentarise les hommes à l'origine des chasseurs / cueilleurs nomades.

Durant l'Holocène la température s'élève de +3°C au maximum jusqu'à - 8 000 ans. Ce changement a eu des répercussions considérables sur Terre. Les déserts comme Sahara redeviennent verdoyants, les zones habitables se décalent vers les contrées du Nord qui deviennent un refuge pour la faune et la flore tempérées. Les Vikings colonisaient les bords du Groenland et vivaient de l'élevage de bétail se nourrissant de pâturage et ce jusqu'au petit âge glaciaire vers 1200 qui a mis fin à cette colonisation [101]. Le petit âge glaciaire a vu la température baisser de 1° probablement en raison du minimum solaire Maunder et de la forte activité volcanique sur Terre à ce moment-là.

Selon la théorie dominante jusqu'à présent la Néolithisation a été favorisée justement par ce maximum climatique de l'Holocène en permettant la domestication des plantes et des animaux. On sait aussi des changements climatiques rapides ont eu cours c'est-à-dire en l'espace d'une génération seulement et ce sur une période couvrant entre -6 250 et -5 350. En conséquence les terroirs se sont agrandis et rétractés et les populations sédentarisées ont dû développer des capacités d'adaptation à leur environnement changeant [388].



Credit : Wikipedia

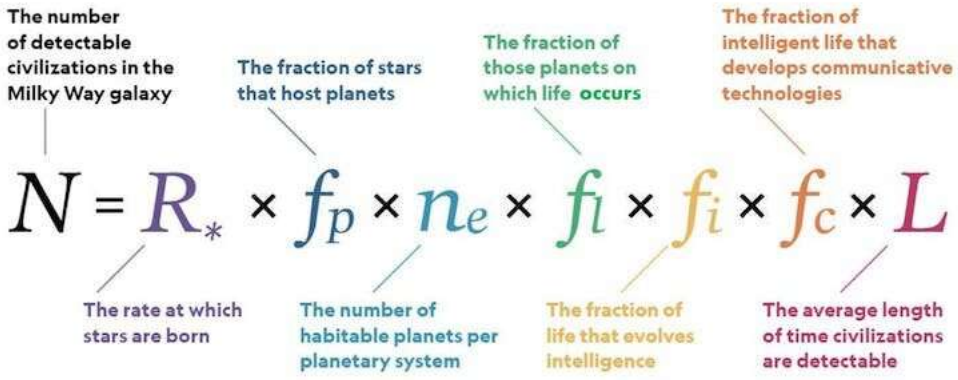
4.3 La Vie extra-terrestre

La recherche de la vie extra-terrestre consiste à rechercher la vie sur Mars ou des planètes extra-solaires.

Le paradoxe de Fermi indique très tôt que s'il y avait des civilisations extraterrestres, leurs représentants devraient être déjà chez nous, mais ils sont pourtant introuvables.

Du point de vue statistique, Frank Drake a théorisé l'opportunité de trouver la vie dans l'univers par le biais de l'équation de Drake :

Frank Drake Equation



Credit : David Rothery

Nikolai Kardachev a imaginé une échelle de l'évolution des civilisations extra-terrestres, c'est l'échelle de Kardachev partant de 0 pour aller jusqu'au stade ultime 4. Carl Sagan a complété cette échelle en donnant la formule permettant de déduire le

stade d'évolution dans l'échelle à partir de la puissance consommée : $K = \frac{\log_{10} P - 6}{10}$

Civilizations Through the Eye of Kardashev

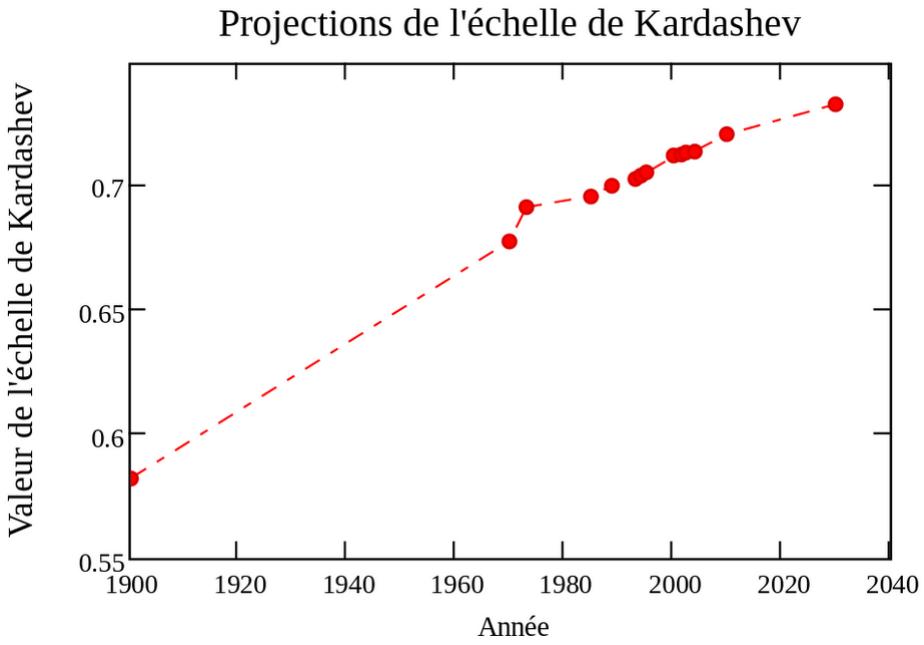
Type	Civilization Description	Power(W*)	Example	Example Power (W)	Power Consumption (erg/sec)
0	Biological	10^{6}	Maximum for terrestrial organisms	4.6×10^{5}	–
1	Planetary	10^{16}	Insolation of a planet like Earth	1.7×10^{17}	~4 x 10^{19}
2	Stellar	10^{26}	Luminosity of a star like Sun	3.8×10^{26}	~4 x 10^{33}
3	Galactic	10^{36}	Luminosity of galaxy like MilkyWay	1.2×10^{37}	~4 × 10^{44}
4	Observable Universe	10^{46}	Luminosity of observable Universe	~10^{48}	–

* W = Power in Watt

Credit : Anuj Sonia, Koena Majia, Aniket Prasad

Les hommes sont arrivés au niveau $K = 0.73$ en très peu de temps sachant que le niveau 1 correspond à l'exploitation de toutes les ressources de la Terre.

Projection de l'échelle de Kardachev jusqu'en 2040



Credit : Wikipedia

Freeman Dyson a imaginé qu'une civilisation extra-terrestre avancée de type II dans l'échelle de Kardachev serait en mesure de capter totalement l'énergie d'une étoile par le moyen d'une "Sphère de Dyson" qui serait un objet détectable depuis la Terre dans le domaine des IR.

Carl Sagan propose sa propre échelle en parlant de la quantité de bits d'information nécessaire pour produire la totalité du savoir de la civilisation : "Information Mastery Scale". L'échelle démarre à 10^6 bits correspondant à la lettre A de l'échelle. La civilisation humaine en serait donc à l'échelle R et atteindra la lettre Z en 2025 ! [573].

Lyfe est un concept d'exobiologie permettant de définir le concept de la vie sans avoir recours à la nécessité des acides nucléiques comme la vie sur Terre.

La vie définie en général doit répondre à ces 4 critères :

- Dissipation = capacité à exploiter et à convertir des sources d'énergie
- Autocatalyse = capacité à croître ou à se développer de manière exponentielle
- Homéostasie = capacité à limiter les changements internes lorsque les choses changent à l'extérieur
- Apprentissage = capacité à enregistrer, traiter et réaliser des actions basées sur des informations

Chapitre 5

Optique

5.1 Généralités

Vitesse Onde Électromagnétique il existe plusieurs notions de vitesse de la lumière. Il y a la vitesse de la lumière classique valant c dans le vide, c'est la vitesse de phase. Il y a aussi la vitesse de groupe qui correspond à la vitesse de l'addition de plusieurs ondes électromagnétiques ou paquet d'onde, il s'agit de la vitesse de l'enveloppe résultante. La vitesse de groupe est un artifice mathématique sans réalité physique, celle-ci peut être éventuellement en sens opposés à la vitesse de phase, mais aussi stationnaire ou bien plus élevée que la vitesse C.

Vitesse de la lumière dans un milieu lorsque la lumière traverse un milieu constitué d'atome donc différent du vide celle ci est ralentie dans ce milieu et change de direction à la transition entre le vide et ce milieu, la même chose arrive à la sortie du milieu. On trouve beaucoup d'explications vraisemblable sur Internet totalement erronées :

— La lumière est déviée lorsque celle ci rencontre un atome, ce qui fait que le chemin parcouru dans le milieur est plus long donc sa vitesse apparente semble plus faible du point de vue de l'observateur.
— La lumière est absorbée puis ré-emise par les atomes du milieu ce qui occasionne un délai à la fin et donc un vitesse apparent plus faible du point de vue de l'observateur.

Il faut savoir que lorsque la lumière interagit avec un atome de quelque manière que ce soit il n'y a aucune raison que la lumière ressorte ensuite exactement dans la même direction que la faisceau entrant et pourtant lo'bservation montre que la direction est la même. De plus chaque photons auraient des vitesse très différentes en ressortant du milieu ce que ne confirme pas l'observation.

L'explication tiens dans la notion de **vitesse de phase et de vitesse de groupe** de l'onde électromagnétique. Lorsque la lumière passe devant un atome, son champ électrique produit une oscillation des électrons qui produisent alors une onde électrique oscillante de même fréquence mais avec un vitesse différente (phase différente) alors les 2 ondes, le champ électrique de la lumière et le champ produit par l'electron s'additionnent [301, 612] pour produire une onde résultante dont la phase est décalée (effet retard) alors la vitesse de groupe (l'enveloppe) devient plus faible que celle de la lumière dans le vide. Dans ce processus la direction de la lumière reste la même dans le milieu et sa vitesse indépendamment de l'électron est toujours c.

Le changement d'angle au passage du vide vers le milieu répond au principe de Fermat qui explique que la lumière emprunte le chemin dont le temps totale pour aller d'un point A vers un point B est soit un maximum ou soit un minium le plus souvent. Ce principe est correcte mais ne fournit pas l'explication.

Il existe encore des explications erronées pour expliquer sur ce changement de direction :

- L'analogie du bataillon rangé de soldats traversant un champs boueux sensé les ralentir
- Le principe de Huygens invoqué pour montrer que le front d'onde à changé, bien qu'applicable ce prinbcipe est toutefois mais mal interprété dans cette explication

L'explication tiens dans les **Equations de Maxwell** du champ électromagnétique qui régit notamment la formation du champ électrique composant la lumière [301]. Le champ électrique est toujours perpendiculaire à la direction de la lumière et celui ci est composé de 2 composants qui s'additionne sous forme de 2 vecteurs, $\vec{E_1}$ parallèle à la surface du milieu et $\vec{E_2}$ perpendiculaire à la surface du milieu : $\vec{E} = \vec{E_1} + \vec{E_2}$. Les équations de Maxwell indiquent que alors que $\vec{E_1}$ ne change pas au passage dans le milieu par contre $\vec{E_2}$ est changé donc le vecteur résultant est changé mais comme il est toujours perpendiculaire à la direction de l'onde lumineuse alors celle ci à également changé de direction une fois dans le milieu.

Selon Maxwell :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\partial \vec{B}/\partial t$$
$$\epsilon \vec{\nabla}.\vec{E} = \rho$$

Par définition :

$\overrightarrow{E_A} = \overrightarrow{E_{A1}} + \overrightarrow{E_{A2}}$ où $\overrightarrow{E_A}$ est perpendiculaire à la direction du faisceau lumineux dans le milieu A = le vide
$\overrightarrow{E_B} = \overrightarrow{E_{B1}} + \overrightarrow{E_{B2}}$ où $\overrightarrow{E_B}$ est perpendiculaire à la direction du faisceau lumineux dans le milieu B = le milieu

A la surface on a donc les égalités suivantes sachant que A = le vide et B = le milieu :

$$\vec{\nabla} \wedge \overrightarrow{E_{A1}} = \vec{\nabla} \wedge \overrightarrow{E_{B1}} = -\partial \vec{B}/\partial t$$
$$\epsilon_A \vec{\nabla}.\overrightarrow{E_{A2}} = \epsilon_B \vec{\nabla}.\overrightarrow{E_{B2}} = \rho \quad \text{où} \quad \epsilon_A = 1 < \epsilon_B$$

Par conséquent :

$$\overrightarrow{E_{A1}} = \overrightarrow{E_{B1}}$$
$$\epsilon_1.\overrightarrow{E_{A2}} = \epsilon_2.\overrightarrow{E_{B2}}$$

Donc la composante du champ électrique $\overrightarrow{E_{B2}}$ dans le milieu représente une fraction du champ électrique $\overrightarrow{E_{A2}}$ dans le vide.

L'indice de réfraction du milieu $n > 1$ indique le changement de vitesse $v = \frac{c}{n}$, et dans le vide $n = 1$. Lorsque l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde alors le milieux est dispersif et comme les directions prise par la lumière dépendra aussi de la longueur d'onde alors le milieu dispersera les différentes couleurs = décomposition de la lumière.

Lumière Cohérente désigne un type de lumière émettant des trains d'onde tous en phase (exemple le Laser) ayant la même cohérence spatiale et temporelle. La cohérence temporelle assure que la phase du train d'onde ne change pas dans le temps (même fréquence pour tous à chaque instant). La cohérence spatiale assure qu'à un instant t tous les points des fronts d'onde sont dans le même état de phase [144].

Cohérence temporelle désigne la capacité d'une source lumineuse ponctuelle à interférer. Pour interférer, une onde doit se séparer en 2 rayons distincts via un dispositif optique et se recombiner ensuite. Certaines interférences sont constructives lorsque les 2 rayons se recombinent en phase d'amplitude, alors dans ce cas l'amplitude résultante est doublée. D'autres sont destructives si les 2 rayons se recombinent, opposition de phase d'amplitude, l'amplitude résultante vaut alors zéro (extinction de lumière). Le temps de cohérence d'une source de lumière vaut $\tau_c = \frac{1}{\Delta\nu}$ ou $\Delta\nu$ est la largeur de bande spectrale de la source de lumière. Pour interférer, il faut que la différence de marche de la lumière soit inférieure à sa longueur de cohérence $L_c = \tau_c \times c > \Delta_{\text{chemin}}$. Plus la largeur de bande sera étroite (source monochromatique laser) plus sa longueur de cohérence sera proche de l'infini et sera donc à même d'interférer plus facilement. Si l'on considère la bande suffisamment étroite, on peut même écrire $L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$, pour rappel $\nu = c/\lambda$.

Cohérence spatiale désigne la capacité du front d'onde d'une source lumineuse à interférer. Chaque point d'un front d'onde peut être considéré comme une source lumineuse ponctuelle interférant avec les points voisins (aussi des sources lumineuses ponctuelles). La mise en évidence de ce phénomène est l'expérience des fentes de Young où la formation de la figure de Airy au passage d'une ouverture (un télescope ou une lunette).

Front d'Onde ou "Wavefront" désigne la surface virtuelle où les ondes lumineuses arrivent en même temps à un instant t. Un front d'onde plan traversant une parabole ou une lentille mince convergente ressortira sous forme d'un front d'onde sphérique. Donc tout écart, mesuré en PtV, du front d'onde réel à la sphère induit une perte de pouvoir séparateur de l'instrument par rapport à son pouvoir séparateur théorique. Le critère de Rayleigh appliqué à un front d'onde de 550 nm requiers que PtV $\leq \lambda/4$. Cependant, la valeur du PtV ne prend pas en compte l'état de surface, car un miroir. Un miroir présentant un écart PtV en pente douce et un autre miroir présentant le même écart, mais constitué d'un mamelonnage important n'auront pas les mêmes performances parce que l'énergie lumineuse de ce dernier sera moins concentrée dans la figure de Airy ce qui se manifeste par de la diffusion autour des objets observés. Les écarts peuvent aussi être analysés plus finement par décomposition en polynôme de Zernike pour cela il faut utiliser soit un interféromètre de Bath (Zemax), un interféromètre de Fizeau (ex : Zygo) ou un analyseur de front d'onde Shack-Hartmann.

OPD ou "Optical Path Difference" désigne l'erreur de front d'onde ou la différence de marche.

Optique Adaptative ou 'AO" désigne un procédé combinant plusieurs éléments formant une boucle de rétroaction :

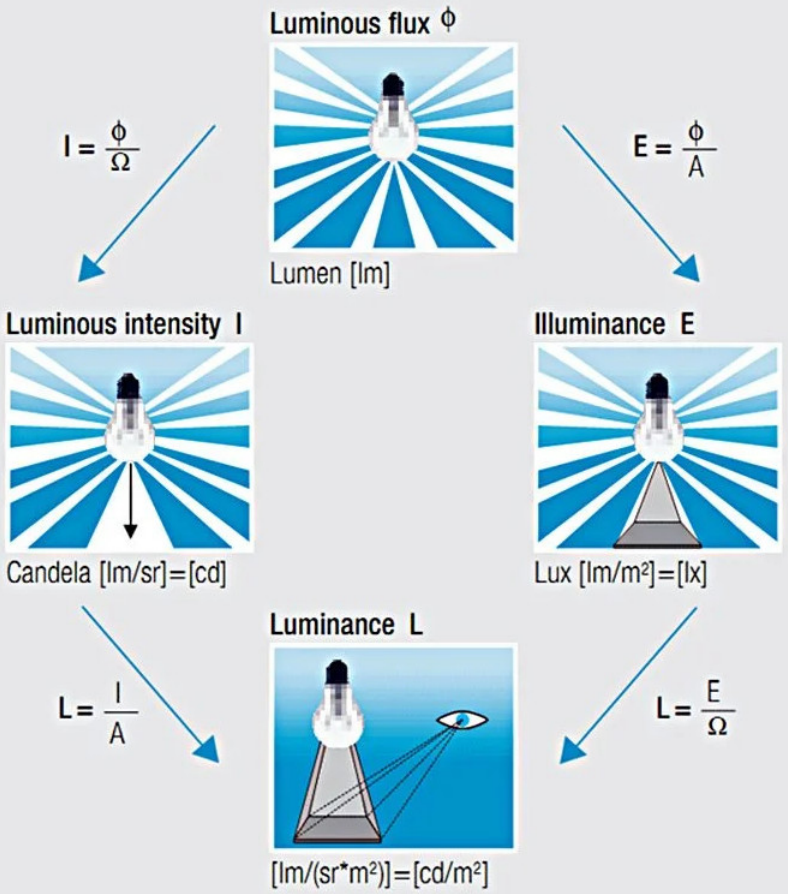
Polynômes de Zernike désigne une série de polynômes utilisés par les opticiens pour modéliser l'écart à un front d'onde plat ou sphérique (rendu plat par soustraction de la sphère) afin de mettre en évidence les défauts d'un système optique (matériel ou oeil humain). Tout comme un signal fini peut être décomposé en une série de Fourier (des sinus et des cosinus), un front d'onde peut être décomposé par une série de polynômes. Les polynômes de Zernike remplacent la somme des 5 aberrations Seidel qui était utilisés auparavant : aberration de sphéricité, coma, astigmatisme, courbure de champ, distorsion géométrique. Une source ponctuelle sur le plan focal voit ses rayons renvoyés sous forme d'un front d'onde plan (rayons parallèles) après avoir traversé un système optique parfait. Le polynôme de Zernike permet donc de rendre compte des variations ou déphasage du front d'onde réel par rapport au front d'onde plat de référence. Les polynômes par ordre d'aberration ou degré croissant sont :

1. Piston (front d'onde parfait)
2. Tilt (erreur de centrage)
3. Defocus (erreur de mises au point) et astigmatisme
4. Coma et Astigmatisme de trefoil (contrainte du miroir)
5. Aberration de sphéricité
6. etc ...

Photométrie désigne la discipline scientifique qui étudie les rayonnements du point de vue de la perception humaine. La radiométrie est une discipline similaire, mais étudiant les flux lumineux du point de vue énergétique. Les unités utilisées en photométrie peuvent être converties directement dans les unités SI usuelles. Ici seuls les rayonnements visibles sont pris en compte.

- **Φ** : le flux lumineux émit par une source ponctuelle dans toute les directions, unité = Lumen
- **I** $= \frac{d\Phi}{\Omega}$: l'intensité lumineuse d'une source est le flux lumineux émit dans une direction particulière et traversant un angle solide Ω, unité = Candela.
- **E** $= \frac{d\Phi}{dS}$: l'éclairement ou illuminance d'une surface éclairée par une source, unité = Lux = Lumen / m^2 = candela . sr / m^2
- **L** $= \frac{I}{dS}$: la luminance est l'intensité lumineuse ré-émise par une surface éclairée rapportée à sa surface, unité = candela / m^2, c'est communément la luminosité perçue à l'oeil nu.
- **M** $= \frac{d\Phi}{dS}$: l'émittance ou excitance M d'une surface est le flux lumineux émit par une source, et ce, par unité de surface, unité = Lumen / m^2

Relations photométriques



Credit : Edvard

Lorsque la source de lumière n'est pas à la verticale $\alpha = 0$ alors :

- L'illuminance (lumière incidente) s'écrit : $E = E_{(\alpha=0)} cos\alpha$
- La luminance (lumière réfléchie) s'écrit : $L = \frac{L_{(\alpha=0)}}{cos\alpha}$

Dans le cas d'une source lumineuse isotrope, le lien entre l'illuminance E d'une surface et sa luminance L renvoyée : $L = \frac{\rho E}{\pi}$

où ρ est la réflectance de la surface.

En photo diurne, la luminance mesurée par le “Spot Meter” qui prend en compte la lumière ré-émise par les objets, l’illuminance mesurée par le “Incidence Meter” prend en compte la lumière incidente provenant des sources de lumière. La mesure du “Spot Meter” varie beaucoup selon la texture et la couleur de l’objet mesuré, la mesure du “Incidence Meter” est plus constante, car elle ne dépend pas de l’objet visé, en revanche sa mesure peut varier selon la température de couleur de la lumière incidente.

La pleine lune produit une luminance de 2500 candela/m^2 et au sol une illuminance de 0.20 lux. Un paysage ensoleillé à une luminance de 5000 candela/m^2 et un ciel clair de 7000 candela/m^2.

Éclairements au sol

Objet	Eclairement (Lux)
Nuit sans lune et sans PL	0.002
Soleil à -16°	0.02
Transition vision Mesopic / Scotopic	0.025
Ciel nocturne de banlieue	0.063
Pleine Lune	0.20
Soleil à -12°	0.20
Soleil à -4°	2
Rue et route	15 - 50
Transition vision Photopic / Mesopic	20
Temps couvert	40
Eclairement necessaire à la lecture	100
Local bien éclairé	100 - 200
Soleil à l’horizon	200
Salle de conférence éclairée	500
Stade de foot	1 500
Ciel bleu	20 000
Soleil à midi	130 000

Albédo de différentes surfaces

Surface	Albédo (%)
Miroir	1
Neige fraîche soleil bas	0.90 - 0.95
Neige fraîche soleil haut	0.80 - 0.85
Planète Vénus	0.77 (*)
Nuage épais	0.70 - 0.80
Glace	0.60
Eau soleil couchant	0.50 - 0.80
Vieille neige	0.50 - 0.60
Calcaire	0.40
Feuille blanche	0.40
Planète Jupiter / Saturne	0.34 (*)
Planète Terre	0.31 (*)
Tuile rouge	0.30 - 0.35
Nuage mince	0.25 - 0.50
Sable	0.20 - 0.30
Culture, Herbe	0.20 - 0.25
Goudron, Zone urbaine	0.15 - 0.25
Terre sèche	0.15 - 0.25
Terre humide	0.10
Lune	0.11
Charbon	0.05
Forêt	0.05 - 0.10
Eau soleil au zénith	0.03 - 0.05
Corps noir (à 0K)	0

Note : voir Albédo de Bond

Lien avec la radiométrie une valeur de 1 candela correspond à un flux lumineux émettant une puissance de 1/683 Watts par Stéradian pour une longueur d'onde 540 nm (sensibilité maximal de l'oeil humain dans le vert) [454]. L'oeil humain en vision photopique (diurne) perçoit 683 lumen / Watt [596].

A l'origine, une candela est l'intensité lumineuse émise par une bougie. Une source émettant 1 candela émet un flux lumineux total de $\Phi = 1 \times \frac{S}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi = 12.56$ lumen dans toutes les directions.

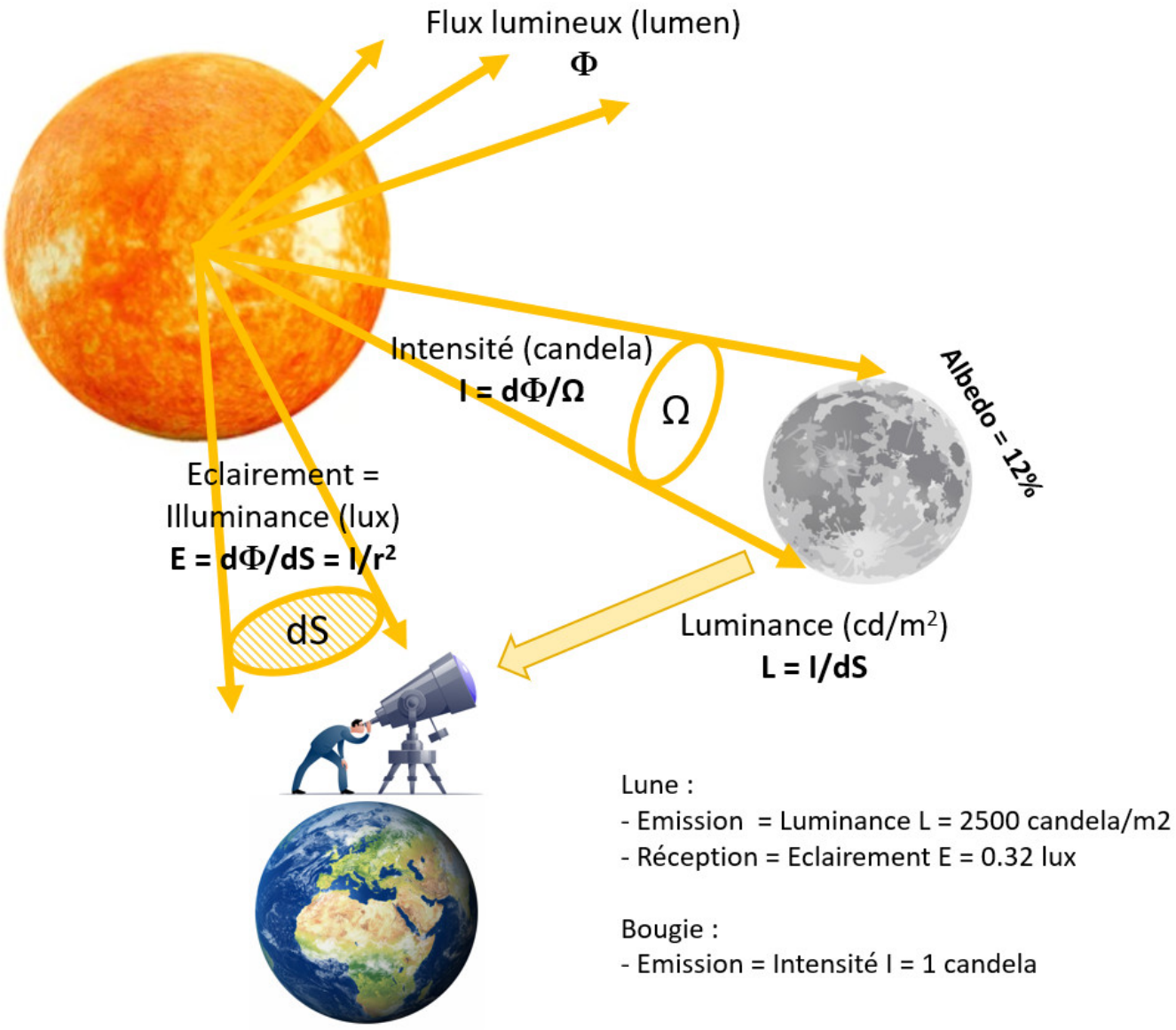
La loi de Lambert pour une source de lumière orthotrope (dont la luminance est la même dans toutes les directions) : $M = \pi L$ or on peut aussi exprimer $M = E \times R$ où R est la réflectance de l'objet en %.

Pour une source de lumière isotrope = flux lumineux identique dans toutes les directions : $I = \frac{\Phi}{4\pi}$. Pour une source de lumière orthotrope = luminance identique dans toutes les directions, la loi des cosinus Lambert s'applique : $I(\theta) = I(0)cos\theta$

L'illuminance dépends :

— La distance de la source de lumière produisant cette illuminance (diminue avec la distance)
— La distance angulaire de la source de lumière produisant cette illuminance par rapport au zénith
— La diffusion atmosphérique

— L'absorption atmosphérique



Credit : J.G. Gricourt

Radiométrie désigne la discipline scientifique qui étudie les rayonnements du point de vue énergétique.

- **Φ** : le flux énergétique émit par une source ponctuelle dans toute les directions, unité = Watt
- **I** $= \frac{\delta\Phi}{\Omega}$: l'intensité énergétique d'une source est le flux énergétique émit dans une direction particulière et traversant un angle solide Ω, unité = Watt/sr
- **E** $= \frac{\delta\Phi}{\delta S}$: l'éclairement ou irradiance (IR) ou densité de flux (F) d'une surface éclairée par une source, unité = Watt/m^2
- **L** $= \frac{I}{S}$: la luminance ou radiance est l'intensité lumineuse réémise par une surface éclairée rapportée à sa surface, unité = Watt/m^2/sr
- **M** $= \frac{\delta\Phi}{\delta S}$: l'émittance ou excitance M d'une surface est le flux énergétique émit par une source, et ce, par unité de surface, unité = Watt / m^2

Pour une source de lumière isotrope (flux lumineux identique dans toutes les directions) : $I = \frac{\Phi}{4\pi}$ Pour une source de lumière orthotrope (luminance identique dans toutes les directions), la loi des cosinus Lambert s'applique : $I(\theta) = I(0)cos\theta$

Le soleil a une irradiance de 1365 Watt / m^2 au niveau du sol.

Transmission Lumineuse désigne la capacité d'un instrument optique à transmettre un flux lumineux incident.

La transmission d'un miroir, qu'il soit plan, parabolique, sphérique ou hyperbolique peut être améliorée en augmentant le pouvoir réfléchissant de la couche d'aluminure selon le "Coating" appliqué : single coating 96%, protected coating 88%, enhanced coating 98%. Les pertes peuvent être dues à la diffusion ou à l'absorption d'une partie du flux lumineux par le miroir.

La transmission des lunettes composées de lentilles peut être améliorée en appliquant des traitements anti-reflets appliqués sur les surfaces de ses lentilles. Les pertes peuvent être dues aux longueurs d'onde réfléchies ou absorbées par le verre ainsi qu'aux longueurs d'onde dispersées par le verre (chromatisme).

Dans le cas général, une transmission inférieure à 1 correspond à un perte de surface collectrice au global, la surface collectrice réduite vaut $A_{\text{eff}} = A \times T$ donc le diamètre fictif correspondant à cette transmission $D_{\text{eff}} = D\sqrt{T}$ ce qui correspond à une perte de magnitude $\Delta m = 5 \log \sqrt{T}$

En photo, le nombre d'ouverte ou f-stop ou EV = "Exposure Value" ou rapport F/D annoncé ou calculé d'un objectif est réduit également, il s'agit alors du t-stop. Il se calcul en tenant compte de la transmission t-stop = f-stop/$\sqrt{T}$.

La transmission globale d'un instrument est le résultat de la composition de la transmission de ses composants optiques.

Pour une lentille simple (2 surfaces) la transmission totale s'écrit : $T_{\text{lentille}} = T^2$

Pour une lunette à plusieurs lentilles 1, 2, 3 : $T_{\text{lentille}} = T_1^2 \times T_2^2 \times T_3^2$

Pour une lunette achromatique la transmission totale s'écrit : $T_L = T_{\text{crown}}^2 \times T_{\text{flint}}^2 \times T_{\text{renvoi coudé}} \times T_{\text{oculaire}}$

Pour un télescope Newton la transmission totale s'écrit : $T_N = T_{\text{primaire}} \times T_{\text{miroir secondaire}} \times T_{\text{obstruction}} \times T_{\text{oculaire}}$

Pour un télescope Newton la transmission fonction de l'obstruction centrale s'écrit : $T_{\text{obstruction}} = 1 - \text{CO}^2$.

Pour un télescope Newton le diamètre efficace s'écrit : $D_{\text{eff}} = D \times \sqrt{T \times (1 - \text{CO}^2)}$ [413, 429], avec le taux global de transmission des optiques T (exprimé en %).

Note : l'obstruction centrale CO d'un Newton réduit la surface collectrice du miroir primaire de $A_{eff} = A \times (1 - CO^2)$. Pour obtenir ce résultat, il a fallu retrancher la surface du secondaire à la surface du primaire : $A_{sec} = \pi \times [(D \times \text{CO})/2]^2$.

Transmission des éléments optiques

Element	Transmission
Objectif de lunette APO [31]	97%
Objectif de lunette Achromatique [31]	96%
Miroir primaire ou secondaire [534]	96%
Obstruction 20%	96%
Obstruction 25%	94%
Obstruction 33%	89%
Oculaire Tele Vue Nagler	93%
Oculaire Tele Vue Ethos	92%
Oculaire Tele Vue Delos	96%
Oculaire Tele Vue Panoptic	96%
Oculaire Pentax XW	96%
Baader Ortho	95%
Renvoi coudé (prisme)	95%
Renvoi coudé (dielectric)	99%
Souvent mesuré dans le Vert 550 nm pour le verre	

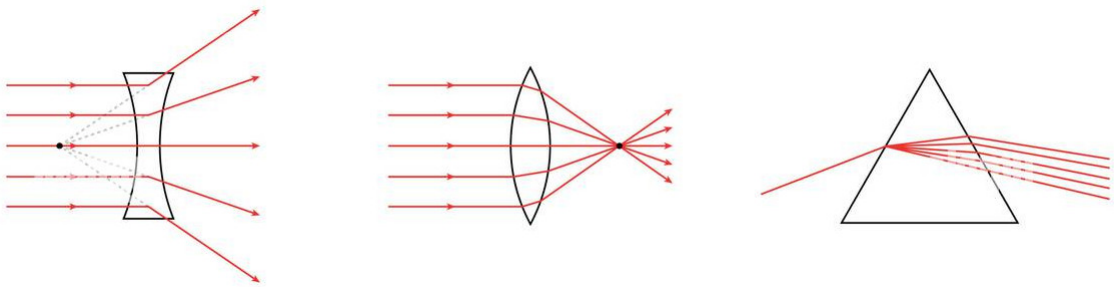
Il est possible de calculer le diamètre équivalent d'une lunette ayant la même transmission qu'un télescope obstrué de type Newton : $D_L = D_N\sqrt{T_N T_L}$ [419] et si on considère une lunette de transmission parfaite 100% alors $D_L = D_N\sqrt{T_\mathrm{N}}$

Transmission typique des instruments [568]

Element	Transmission
Lunette	94%
Télescope Newton	83%
Télescope catadioptrique	75%

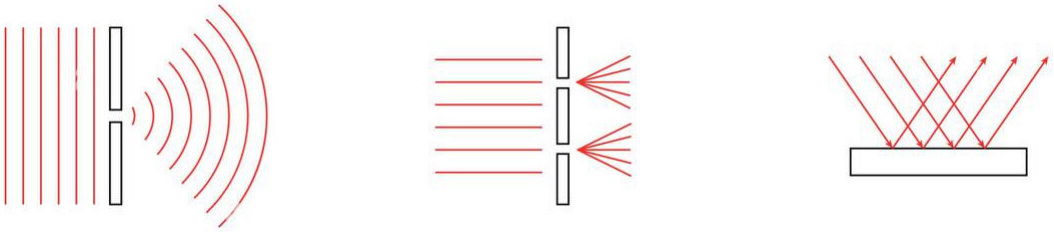
De manière générale, une baisse de transmission de 10% représente une perte de 0.1 magnitude qui est aussi le seuil de détectabilité de l'oeil selon l'AVVSO. La différence de magnitude limite entre 2 instruments s'écrit $m2 - m1 = 5 \times log\left(\frac{D_2}{D_1} \times \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}\right)$ où T1 et T2 les transmissions respectives des instruments.

Réfraction désigne le phénomène où la trajectoire d'une onde lumineuse est déviée au passage dans un autre milieu transparent de propriété réfractive différente du milieu d'origine. La réfraction est une application directe du principe de Fermat : "La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit localement extrémale" donc une durée soit plus courte (en général le cas) soit plus longue. Sachant que la vitesse de la lumière dans différents matériaux transparents peut être différente. L'indice de réfraction détermine la propriété réfractive d'un matériau : $n = c/v$ où v est la vitesse de la lumière dans ce milieu. De ce principe on en déduit la loi de Snell-Descartes : $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. C'est grâce à cette propriété de la lumière qu'il est possible de concevoir des instruments d'optique qu'ils soient afocales pour l'observation visuelle ou focales pour la photo.



Credit : J.G. Gricourt

Diffraction désigne le phénomène où une onde lumineuse interfère avec elle même. L'expérience des frange de Young montre bien ce phénomène où une onde plane passant par un trou assez petit se transforme en une onde circulaire (ou presque) à sa sortie. Ensuite les 2 ondes circulaires qui semblent devenues 2 sources indépendantes interfèrent. L'interférence peut être constructive alors les 2 ondes s'additionnent localement : la lumière se renforce ou destructive localement : la lumière s'éteind. C'est grâce à cette propriété de la lumière qu'il est possible de concevoir les filtres interférentiels utilisés an astrophoto ou en observation du ciel profond ou bien du soleil.



Credit : J.G. Gricourt

5.2 La Résolution et le Contraste

Résolution ou résolution spatiale désigne la capacité d'un instrument optique à distinguer 2 points proches d'égal contraste, par exemple une étoile binaire serrée de composantes de même magnitude.

Critères influençant la résolution négativement :

- Un petit diamètre d'ouverture de l'instrument
- Un Strehl ratio en dessous de 80%, ex : un miroir sphérique
- Un oeil astigmate, ex : éviter d'utiliser des oculaires produisant de grosses pupilles de sortie
- Un barillet et/ou une structure insuffisamment rigide
- Un alignement approximatif des éléments optiques (collimation)

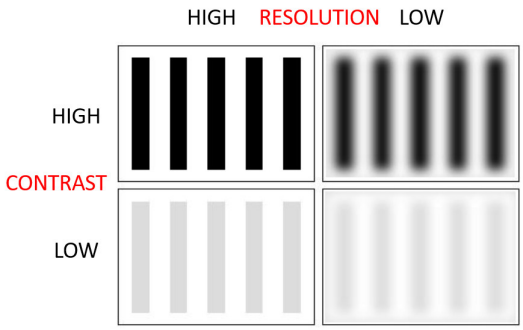
Note : la dimension (étalement des anneaux) de la figure de diffraction (disque de Airy) ainsi que sa forme détermine la résolution.

Contraste désigne la capacité d'un instrument optique à reproduire dans son image des variations d'intensité très tranchées noir / blanc. Le pouvoir séparateur de l'instrument (la résolution) s'applique aux étoiles alors que le contraste s'applique aux objets étendus : nébuleuses, planètes. La MTF est la courbe mesurant le contraste résultat du passage de la lumière en évaluant la capacité de l'instrument à reproduire ces variations d'intensité que l'on classe selon leurs fréquences spatiales.

Critères influençant le contraste négativement :

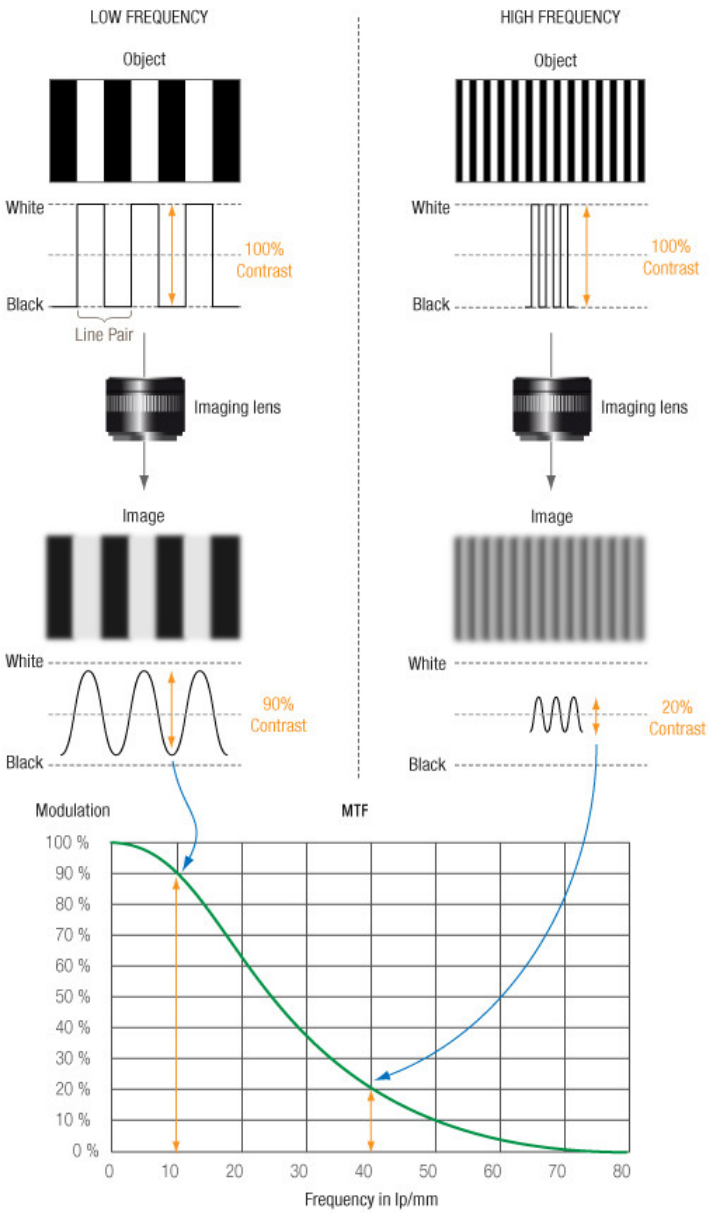
- L'obstruction centrale : miroir secondaire ou araignée ou support
- Un "Coating" défaillant ou absent à la surface des lentilles
- L'aluminure détériorée pour les miroirs
- Le micromamellonage à la surface des miroirs
- Les faibles grossissements sous un ciel pollué

Note : à turbulence égale, les instruments de plus gros diamètres captureront plus de cellules de turbulence dans le ciel que les petits diamètres (perturbed wavefront) et montreront une image plus perturbée que les instruments à petits diamètres.



Lens contrast - Forum Photo.NET

Si l'on relie la perte de contraste à la MTF on obtient :



MTF - DxOMark

Définition du contrast ratio : $\mathrm{CR}(f) = \frac{1+\mathrm{MTF}(f)}{1+\mathrm{MTF}(f)}$, exprimé selon "CR : 1". Lorsque MTF = 1, CR = ∞. La limite de visibilité du contrast pour l'oeil est CR = 1.04 correspondant à MTF = 0.02 [507].

Le pouvoir de résolution de l'oeil dépend en grande partie du contraste de l'objet observé.

Resolving Power at different contrast level

Table 18.2
Resolving Power of the Eye

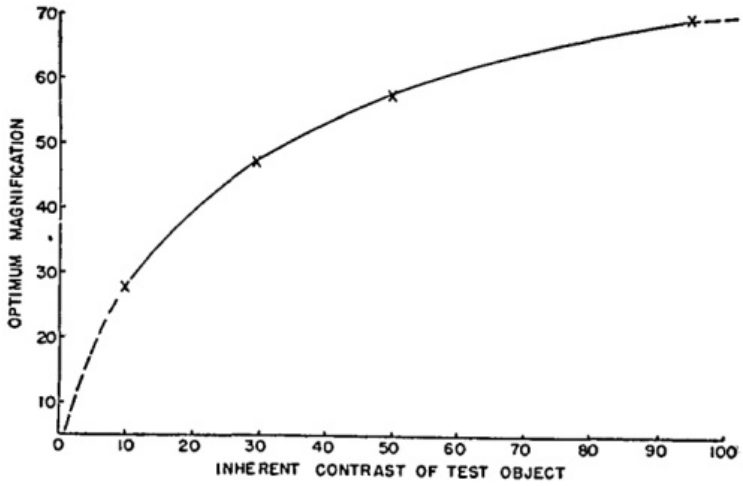
contrast (%)	89	70	49	38	27	16	10	6	2.5
resolving power (arc-sec)	74	76	80	82	84	89	95	105	127

Credit : Telescope Optics by Rutten & Van Venrooij, page 169

Une image montrant un contraste élevé est :

1. Une image mieux résolue, c'est-à-dire montrant des détails
2. Des couleurs plus saturées

Contrast



Credit : Howard S. Coleman

Le transfert du contraste correspondant aux fréquences élevées (portion droite de la MTF) lorsqu'il est optimal fera en sorte qu'une ligne sombre sur un fond lumineux sera vue plus fine et plus noire, de même qu'un détail lumineux sur un fond sombre sera vu plus large et les couleurs seront alors plus saturées (les "Festoons" sur Jupiter) [256]. Dans l'oeil humain, ce sont les cônes au centre qui sont responsables de l'acuité visuelle, mais ils sont moins sensibles aux faibles lumières que les bâtonnets en périphérie. Pour une meilleure perception des détails, il faut une pupille pas trop petite pour ne pas augmenter la taille de la figure de diffraction et acquérir suffisamment de lumière pour exciter des cônes [255].

À même pupille de sortie, l'instrument de plus gros diamètre montrera l'objet plus gros même avec la même luminosité pour l'objet et le fond du ciel et dans ce cas l'objet occupera une plus grande partie de la rétine et les contrastes seront mieux perçus que si l'objet était minuscule.

Pour mieux voir les objets du ciel profond il faut grossir [624] afin de mieux détecter les faibles contrastes, Roger N. Clark parle de 1° apparent minimum. Ce faisant, on assombrit le fond du ciel en diminuant la pupille de sortie. Ainsi, même si contraste ne change pas vraiment (différence entre objet et fond du ciel) on détecte mieux l'objet, c'est le phénomène de "Brightness Induction" [160, 498, 302, 47]

La capacité d'un instrument et plus généralement d'une chaîne optique dans son ensemble à restituer les faibles contraste des objets du ciel profond observés dépend de plusieurs facteurs. Lorsque le constrast est faible la vue des objets faibles manque de netteté et de luminosité = "Mushy Views". On pourra améliorer significativement le contraste en veillant à respecter les points suivants :

— S'éloigner des zone à forte densité de population afin de réduire la pollution lumineuse
— Préférer les soir où la turbulence atmosphérique est plus calme
— Eviter de poser son dobson sur une surface chaude comme une terrasse ayant pris le soleil pendant la journée, préférer uen surface herbeuse à la place pour éviter tout mouvement local d'air turbulent
— Utiliser un cache et une juppe sur un Dobson afin de masquer la lumière extérieure

— Couvrir sa tête avec une serviette sombre afin de masquer la lumière extérieure (même faible !) : Hooded Observing Vest
— Utiliser des oculaires procurant des pupille de sortie plus faibles, inférieure à 4mm afin d'assombrir le fond du ciel
— Utiliser un instrument principal dont l'obstruction centrale est minimale (moins de 25%), les lunettes sont les instruments qui restituent le plus de contraste à diamètre égale
— Utiliser des oculaire FMC = "Fully Multi Coated"
— Utiliser des miroirs dont l'aluminure est propre et dont la surface est exempte de défaut de polissage (micromamellonage)

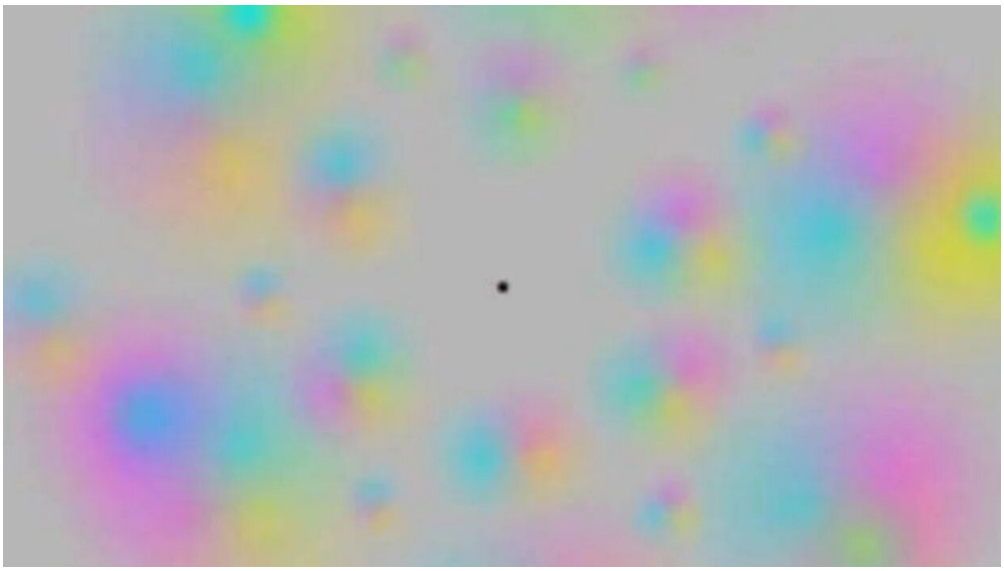
Perception des contrastes



Credit : J.G. Gricourt

Le disque à gauche représente un objet étendu (galaxie) vu au travers de notre atmosphère, elle-même éclairée par la pollution lumineuse. Même assombri disque à gauche est mieux perçu que celui qui est plus clair et noyé dans le fond du ciel lui aussi plus clair, car les 2 teintes s'additionnent.

L'effet Troxler est une illusion d'optique où les éléments extérieurs au centre du champ de vision s'effacent progressivement lorsque l'on fixe le centre du champ de vision. Le cerveau élimine alors tous les éléments périphériques de l'image qui ne changent pas Effet Troxler. C'est ce principe qui est utilisé par de nombreux tours de magie.



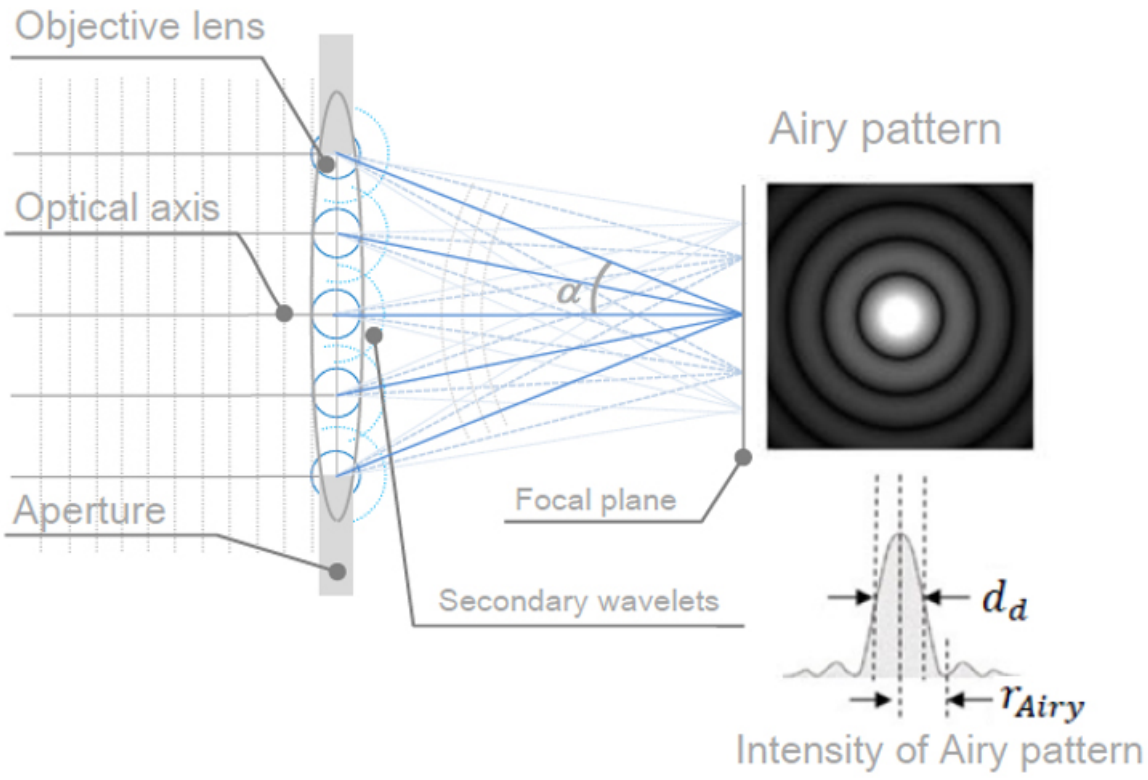
Credit : Mimi Launder

Piqué désigne la capacité d'un dispositif optique à reproduire une image avec précision dans la limite de la densité en pixels du capteur photo utilisé. Le piqué d'une image est déterminé à la fois par son contraste et sa résolution.

Figure de Airy ou “Tache de Airy” ou “Tache de Diffraction” “Disque de Airy” ou “Airy Disc” ou “Spurious disk” ou “Point Spread Function” ou “PSF” désigne l’étalement de l’énergie lumineuse d’une étoile ou d’une source de lumière ponctuelle vue au travers d’un instrument. Selon le principe d’Huygens-Fresnel chaque point d’un front d’onde se comporte comme une source de lumière individuelle qui rayonne en cercle. L’ensemble des sources ponctuelles du front d’onde interfèrent (s’additionnent où s’annulent) pour former le front d’onde qui sera plat si la source de lumière est très éloignée et que celle-ci ne rencontre aucun obstacle. En revanche, lors du passage d’un obstacle tel que l’ouverture d’un télescope, le front d’onde en sortie, résultat d’interférences, ne sera plus exactement plan. Dans le cas où l’on intercale un système optique permettant de faire converger les rayons en un point infiniment petit tel qu’une lentille ou un miroir parabolique, le point de convergence sera la tâche de Airy. On ne pourra donc pas grossir indéfiniment une étoile sans que celle-ci finisse par apparaître comme une petite tache en raison de ce phénomène.

L’atmosphère vient aussi perturber le front d’onde, dont les effets sont les suivants :

- Déplacement rapide la figure de Airy dans le champ = Scintillation
- Défocalisation de l’étoile, aberration de type : Defocus ou déformation Tip / Tilt du front d’onde diminuant l’éclat de la figure de Airy = Scintillation
- Destruction de la planéité du front d’onde poiur les grandes ouverture (voir la paramètre de Fried) et donc la figure de Airy = Speckles



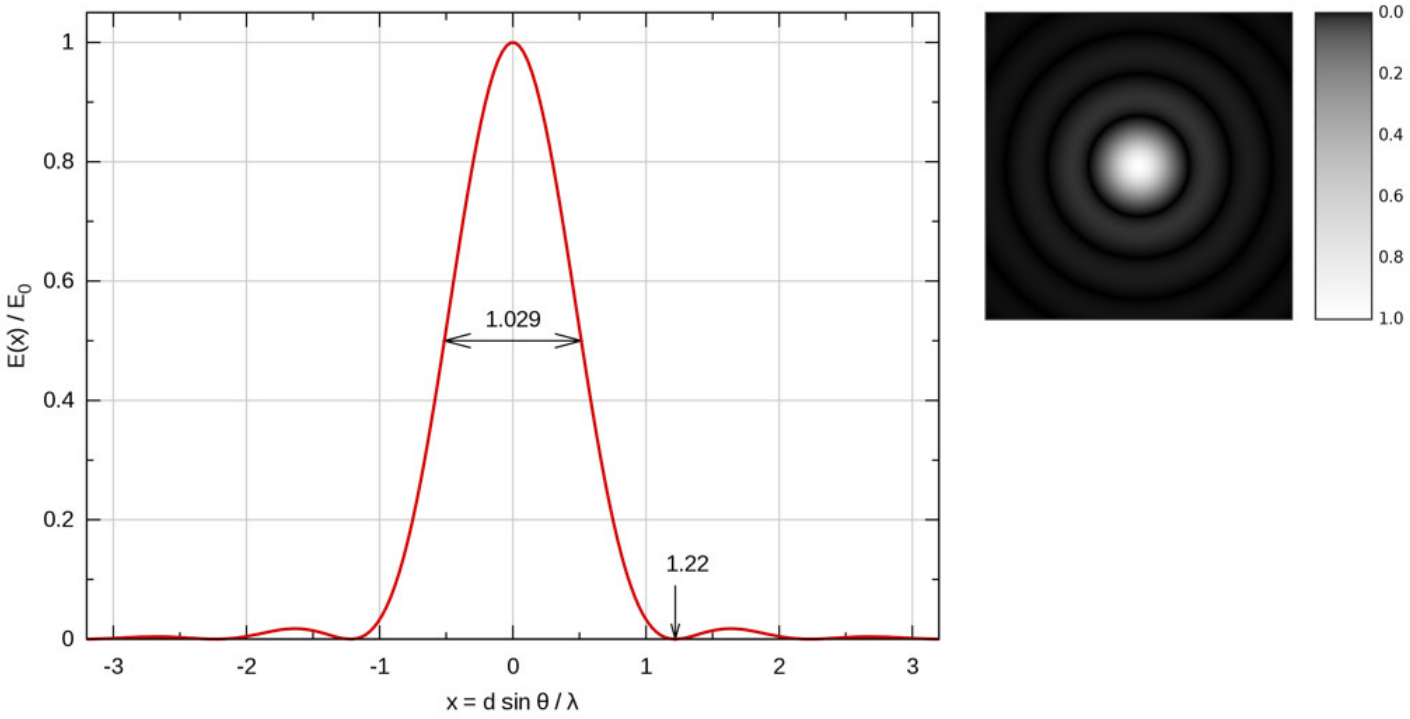
Credit : Jeol - Diffraction aberration, diffraction limit

L’aspect de la figure de Airy permet d’évaluer certaines aberrations optiques (défauts). Les aberrations se manifestent lorsque le front d’onde généré par l’instrument n’est pas exactement sphérique [138]. Les aberrations optiques comme l’obstruction par un miroir secondaire affectent alors la distribution de l’énergie dans la figure de Airy en déplaçant l’énergie du centre vers les anneaux extérieurs, ce qui a pour conséquence de détériorer la netteté des images.

On mesure le rayon angulaire du disque central depuis le centre jusqu’au début du premier anneau, le disque définit ainsi concentre 84% de l’énergie totale. Celle ci possède un diamètre de : $\theta_{\text{rad}} = 2.44 \times \lambda / D$ et en dimension linéaire : $\text{L} = 2.44 \times \lambda \times \frac{F}{D}$.

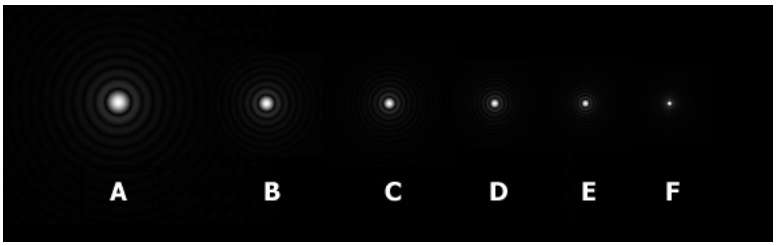
La dimension angulaire de la figure de Airy exprimée en arcsec vaut : $\theta_{\text{arcsec}} = \frac{2.44 \times 206265 \times 550}{D \times 1000000} = 276/D$ pour $\lambda = 550$nm et D en millimètre. Le pouvoir séparateur de l'instrument est directement lié à la dimension de la figure de Airy car plus le diamètre de l'instrument est important, plus petite sera la figure de Airy et meilleur sera le pouvoir séparateur de l'instrument.

Airy disc size



Credit : Wikimedia Commons

Dimension du disque de Airy en fonction du diamètre : A=10 cm B=15 cm C=20 cm D=25 cm E=30 cm F=40 cm



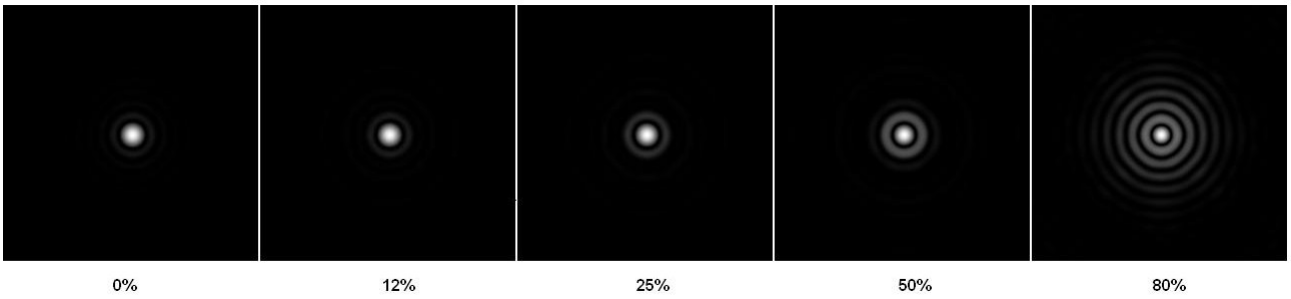
Credit : Damian Peach

La dimension de la figure de Airy est inversement proportionnelle au diamètre D en visuel mais aussi inversement proportionnelle au rapport F/D en astrophoto car on projette son image sur un écran dans ce cas.

Les télescopes suivants : $D = 4$" PtV $= \lambda/4$, $D = 8$" PtV $= \lambda/2$, $D = 16$" PtV $= \lambda$ possèdent le même pouvoir de résolution. La résolution est doublée lorsqu'on passe d'un télescope $D = 4$" PtV $= \lambda/4$ à un télescope $D = 8$" PtV $= \lambda/4$.

Tomdey à dit : *A decent big scope is better than a great little one.* [748]

Dimension du disque de Airy en fonction de l'obstruction



Credit : Aberrator

Les instruments connus pour être sensibles à la turbulence sont :

— Ceux qui ont un gros diamètre, car soumis à l'effet destructeur du seeing (important ici) la figure de Airy n'existe plus, elle est remplacée par une multitude de tavelures qui s'éparpillent dans un cercle et celles-ci sont plus nombreuses si le diamètre de l'instrument est plus grand. Au final, ce cercle plus grand que la figure de Airy définit la résolution de l'instrument pour un seeing donné.
— Ceux qui ont une obstruction car dans ce cas une partie de l'énergie lumineuse se déplace dans le premier anneau et soumis à l'effet destructeur du seeing (modéré ici) la partie centrale et le premier anneau fusionnent en un disque plus grand que la partie centrale de la figure de Airy [733, 263]

Dans tous les cas, le diamètre du cercle contenant les tavelures vaut r_0 (voir Seeing).

PSF ou "Fonction d'Etalement du Point" ou "Point Spread Function" ou "Tache Image" désigne la réponse impulsionnelle d'un instrument du point de vue de la théorie du traitement signal. Une étoile est une source ponctuelle de lumière et peut donc représenter une bonne approximation d'un signal impulsionnel. Donc, la figure de Airy représente la PSF de l'instrument. La théorie dit que l'on peut reconstruire l'image obtenue par l'instrument connaissant le signal d'entrée source et la PSF par l'opération de convolution : $I_{image} = I_{source} \bigotimes \text{PSF}$. De même que connaissant la PSF on peut reconstruire l'image source grâce à l'opération de déconvolution.

Optique Corrigée désigne un instrument quasi exempt de défaut, c'est-à-dire dont la figure de Airy est conforme à la théorie.

PtV ou "PV", ou "P-V" ou "Peak To Valley" désigne la mesure en nanomètre de l'écart le plus important entre le front d'onde sphérique et le front d'onde mesuré, PtV_réel $= \delta_{\text{onde}} = \lambda/n$ et en général, on exprime le PtV comme une fraction de λ soit la valeur $1/n$. Cet écart représente soit une avance de phase ou un retard de phase de l'onde incidente. Plus cet écart est faible, meilleure sera l'optique considérée. Il faut noter que pour un miroir primaire, le rayon lumineux frappant un creux dans la parabole du miroir doit parcourir 2 fois la profondeur de ce creux PtV (verre) avant d'être réfléchi donc : PtV (onde) $= 2 \times$ PtV (verre). Pour un miroir plan incliné à 45° (miroir secondaire du Newton) : PtV (onde) $= \sqrt{2} \times$ PtV (verre) [1]. Le PtV résultant (fraction de λ) d'une formule optique Newton est l'addition des différences de marches des fronts d'ondes du miroir primaire et du miroir secondaire, et cela, dans le pire des cas : PtV (onde) $= 2 \times$ PtV (pri_verre) $+ \sqrt{2} \times$ PtV (sec_verre). Il peut arriver aussi que les différences de marches se soustraient et donc s'annulent. De même, pour une lentille mince, le rayon lumineux traversant une bosse sur la lentille δ_{verre} doit parcourir plus d'épaisseur de verre à une vitesse 1.5 moins rapide si l'on considère que la plupart des verres ont un indice de réfraction de $n = c/v \simeq 1.5$ dans ce cas : PtV (onde) $= 1.5 \times$ PtV (verre). Aussi, un PtV $= \lambda/16$ dans la couleur rouge ne fait plus que PtV $= \lambda/4$ dans la couleur verte.

1. Antares Optics : The advantages of a nearly perfect secondary mirror for a Newtonian telescope

Attention, le PtV sera plus flatteur (plus faible) si :

1. Dans le cas des miroirs, en général on reporte le PtV sur le verre et non sur le front d'onde : PtV onde $= 2 \times$ PtV verre
2. Si l'ont choisi une longueur d'onde plus faible pour mesurer le PtV (par ex dans le rouge) le PtV sera aussi plus faible.

Le PtV mauvais en deçà du critère "Diffraction Limited" soit $\text{PtV}_{\text{min}} = \lambda/4$ peut indiquer un accident isolé sur la surface optique et ne présage donc pas de la qualité globale du front d'onde attendu (sphérique) comme le fera la mesure de RMS ou de Strehl par exemple. De même que le Strehl mesurant la forme générale ne présage pas de l'état de surface au niveau millimétrique. Cependant le seuil "Diffraction Limited" reste encore un critère de comparaison utilisable [157].

De manière générale on calcule l'erreur du front d'onde généré (retard) par un défaut sur le dioptre selon son type :

1. Pour un objectif de lunette : $\epsilon = \delta \times (n - 1)$
2. Pour un miroir de télescope : $\epsilon = 2 \times \delta$

Note : ϵ (= PtV sur l'onde) retard du front d'onde, δ (= PtV sur le verre) hauteur du défaut de courbure, n l'indice de diffraction du verre [500].

Donc en moyenne un objectif de lunette est 4 fois moins sensible à un défaut δ sur le verre qu'un miroir [147], le critère .

On peut estimer le PtV à partir des aberrations classiques de Seidel décrites par exemple dans un rapport AtmosFringe [759].

Les aberrations de Seidel (s) peuvent être convertis en en aberrations de Zernicke (z) :

$$\begin{aligned} \text{Astig}_z &= \text{Astig}_s/2 \\ \text{Coma}_z &= \text{coma}_s/3 \\ \text{Spherical}_z &= \text{Spherical}_s/6 \end{aligned}$$

Note : la valeur de l'aberration sphérique $LSA = \text{Spherical}_s$ dans AtmosFringe est comptée au "Paraxial Focus" et pour avoir cette valeur "Best Focus" on divise cette valeur par 4 [442].

Le PtV peut alors se calculer :

$$\text{PtV} = 2 \times \sqrt{\text{Astig}_z^2 + \text{Coma}_z^2 + \text{Spherical}_z^2}$$

Il est possible de calculer le RMS à partir du PtV dans le cas où la courbe du miroir ne connait que des variations douces / lisses correspondant à uniquement une aberration sphérique :

Selon Vladmiri Sacek si l'on connait l'erreur PtV ne prenant en compte que l'aberration sphérique le RMS se déduit par la formule : $\sigma_{\text{RMS}} = \frac{\text{PtV}}{\sqrt{11.25}} = \frac{\text{PtV}}{3.354}$ [785] donc pour une optique "Diffraction Limited" PtV = 1/4, RMS = 1/14 et Strehl = 0.80.

Selon Mel Bartels on utilisera plutôt : $\sigma_{\text{RMS}} = \frac{\text{PtV}}{3.51}$ [487] mais il ne précise pas le type d'erreur PtV pris en compte ni comment.

Causes locales de détérioration du front d'onde [524]

Cause	Effet sur le PtV de l'instrument
Pinched optics	2λ
Very warm optics	$[\lambda, 2\lambda]$
Moderate boudary layer	$[\lambda/2, \lambda]$
Warm optic	$[\lambda/2, \lambda]$
Bad edge support	$[\lambda/2, \lambda]$
Gross optical errors	$\lambda/2$
Bad strain effects	$\lambda/2$
Poor edge support	$\lambda/2$
Moderate optical errors	$[\lambda/4, \lambda/2]$
Mild strain effects	$[\lambda/4, \lambda/2]$
Small optical errors	$[\lambda/10, \lambda/4]$
Small strain effects	$[\lambda/10, \lambda/4]$
Minor cell issue	$[\lambda/10, \lambda/4]$

RMS ou "Root Mean Square" désigne la moyenne quadratique des valeurs de PtV mesuré sur la surface du front d'onde, $\sigma_{\text{RMS (réel)}} = \lambda/n$ et en général, on exprime le RMS comme une fraction de λ soit la valeur $1/n$. La moyenne quadratique des écarts est appelé écart type statistique = "Standard Deviation" σ des écarts du front d'onde mesuré à la sphère parfaite. Si l'on considère que la distribution des PtV est une distribution de Normale (Gaussienne) alors 95% des PtV mesurés seront dans la plage $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$ où $\bar{x}$ est la moyenne des PtV. Cette mesure est bien plus représentative de la qualité du miroir. Ainsi, elle donne une idée de l'état de surface de l'optique qui a généré le front d'onde [587].

En pratique, cette mesure n'est réalisée que sur un nombre limité de points par un interféromètre. Pour un miroir primaire : $\sigma_{\text{RMS (onde)}} = 2 \times \sigma_{\text{RMS (verre)}}$. Pour un miroir secondaire incliné à 45° : $\sigma_{\text{RMS (onde)}} = \sqrt{2} \times \sigma_{\text{RMS (verre)}}$. Le RMS résultant sur l'onde (fraction de λ) d'une formule optique Newton est l'addition quadratique des différences de marches des fronts d'ondes des miroirs primaire et secondaire, dans le pire des cas donne :

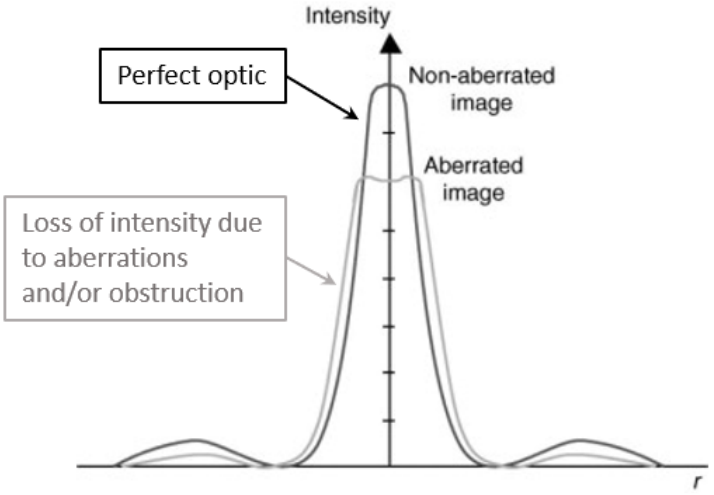
$$\sigma_{\text{RMS (miroirs)}} = \sqrt{\left(2 \times \sigma_{\text{RMS (pri)}}\right)^2 + \left(\sqrt{2} \times \sigma_{\text{RMS (sec)}}\right)^2}$$

En généralisant et en prenant en compte les RMS sur l'onde (WFE = wavefront error) [453] :

- $\sigma_{\textbf{RMS (miroirs)}}$: prenant en compte le RMS calculé plus haut des 2 miroirs
- $\sigma_{\textbf{RMS (pliure)}}$: prenant en compte le primaire sur son barillet
- $\sigma_{\textbf{RMS (collimation)}}$: prenant en compte la qualité des alignments des miroirs
- $\sigma_{\textbf{RMS (turbulence)}}$: prenant en compte les effets aléatoire de la turbulence, ce terme change à chaque instant, mais le paramètre de Fried permet d'évaluer son effet global sur l'optique.

$$\sigma_{\text{RMS (total)}} = \sqrt{\sigma^2_{\text{RMS (miroirs)}} + \sigma^2_{\text{RMS (pliure)}} + \sigma^2_{\text{RMS (collimation)}} + \sigma^2_{\text{RMS (turbulence)}}}$$

Strehl ou “Rapport de Strehl” mesure le rapport du pourcentage I de lumière arrivant sur le pic central de la figure de Airy sur le pourcentage de lumière théorique I_0 arrivant sur le pic central de la figure de Airy attendu pour l'ouverture de l'instrument : Strehl $= I/I_0$ Le Strehl tiens compte de la longueur d'onde (dans le vert en général). Le Strehl est une mesure objective de la qualité générale d'une optique en son centre optique qui peut être affecté par de l'aberration sphérique ou de l'astigmatisme. Cependant, il ne présage pas de sa qualité optique en dehors du centre du champ, car d'autres aberrations comme la coma peuvent déformer et augmenter considérablement la dimension de la figure de Airy en dehors du centre du champ. Une optique théorique parfaite présente toujours un rapport de Strehl de 1 ce qui signifie que sur 100% de l'énergie lumineuse reçu, 84% sera concentrée dans le pic central de la figure de Airy [3]. Pour un instrument parfait non obstrué, sur 100% de l'énergie reçue 16% est diffracté par l'ouverture pour former les anneaux externes.



Credit : H. Ottevaere, H. Thienpont, in Encyclopedia of Modern Optics, 2005

Une optique tout juste “Diffraction Limited” présente un rapport de Strehl de 0.80 ce qui correspond à une aberration sphérique de $\mathrm{PtV}_{\mathrm{min}} = \lambda/4$ [586]. Toutefois, le Strehl ne met pas en évidence le micromamelonnage néfaste pour le contraste des images. En effet autant une obstruction centrale rejettera l'energie lumineuse dans les anneaux proches du pic central autant le micromamelonnage diffusera beaucoup plus loin dans le champ l'energie lumineuse et sera donc plus néfaste pour le contraste des images.

Le Strehl peut être approximativement déduit du σ_{RMS} exprimé en unité λ : Strehl $= 1 - (2\pi\sigma_{\mathrm{RMS}})^2$ cette formule est une approximation (série de Taylor pour le fonction exponentielle) valable pour des valeurs de Strehl élevées, mais qui est plus précise que l'approximation donnée par Mel Bartels [487] dans son simulateur et il semblerait que la formule donnée par Robert Royce dans son document [619] soit correcte, car les valeurs du tableau correspondent bien à la formule donnée ici.

PtV Strehl relationships [619]

Commonly Encountered Wavefront Relationships				
P-V Fraction	P-V Decimal	Marechal RMS*	Strehl Ratio	Comments
1/3	.333	.094	.71	
1/4	.250	.071	.82	Rayleigh Limit
1/5	.200	.057	.88	
1/6	.167	.047	.92	Good
1/7	.143	.041	.94	Very Good
1/8	.125	.036	.95	Excellent
1/9	.111	.032	.960 (.96)	Excellent
1/10	.100	.028	.969 (.97)	Excellent
1/11	.091	.026	.974	
1/12	.083	.024	.978	

Credit : Robert Royce

Le calcul plus exact mais qui reste une approximation (Mahajan) sachant que l'erreur PtV de front d'onde est inférieur à $\lambda/5$ [274] : Strehl $= e^{-(2\pi\sigma)^2}$, où $\sigma =$ RMS la moyenne des écarts au front d'onde exprimé en unité λ.

Un miroir ou un objectif de lunette de Strehl = 80% (Diffraction limited) jusqu'à 90% est considéré comme un bon miroir voire excellent au-delà de 90%. Un instrument testé dans le rouge aura un Strehl plus favorable (élevé) que s'il était testé dans le vert (une longueur d'onde plus petite) qui est en général la longueur d'onde de correction maximale pour un instrument visuel.

Récap. PtV / Strehl (calculé selon la formule donnée plus haut) [581, 539, 619]

PtV	RMS	Strehl
$\lambda/3$	0.094	0.71
$\lambda/4$	0.071	0.82
$\lambda/5$	0.057	0.88
$\lambda/6$	0.047	0.92
$\lambda/7$	0.041	0.94
$\lambda/8$	0.036	0.95
$\lambda/9$	0.032	0.96
$\lambda/10$	0.028	0.969
$\lambda/11$	0.026	0.974
$\lambda/12$	0.024	0.978

On appelera un instrument "Diffraction limited" si son Strehl vaut à minima 82% on lira plus souvent 80% par simplification, ce qui correspond à un $PtV = \lambda/4$ ou meilleur.

Eddgie à dit : *Answering about diffraction limited does not really get you anything. What you are really fighting is the physiology of the human eye.* [269]

Le Strehl d'un instrument tenant compte de l'obstruction Strehl $= (1 - \mathrm{CO}^2) \times \mathrm{Strehl}_0$ où Strehl_0 est le Strehl combiné des

miroirs de la formule optique ou bien le Strehl de l'objectif de lunette seul mesuré sous interféromètre.

Pour un instrument parfait : $\text{Strehl}_0 = 100\%$ et dans ce cas 84% de l'énergie lumineuse est concentrée sur le pic central de la figure de Airy. Pour un Newton ou un Cassegrain le Strehl combiné des 2 miroirs vaut : $\text{Strehl}_0 = \text{Strehl}_{\text{primaire}} \times \text{Strehl}_{\text{secondaire}}$. L'obstruction affecte le contraste des images et très peu la résolution qui exploite les hautes fréquences quasiment non affectées par l'obstruction (voir la MTF).

Il existe pour un instrument un Strehl miminum permettant à celui ci de rester "Diffraction Limited" [581] c'est-à-dire que le Strehl résultant après obstruction vaut 0.80 exactement.

Le Strehl minimum initial pour rester diffraction limited après obstruction sur l'ensemble de la MTF vaut : $\text{Strehl}_{\text{min}} = \frac{0.80}{1-\text{CO}^2}$ [690].

Voir aussi la formule selon Vladimir Sacek pour les fréquences basses à moyennes de la MTF (*) : $\text{Strehl}_{\text{min}} = \frac{0.48}{0.6-\text{CO}^2}$ [690]

Strehl et énergie lumineuse

Cas	Strehl	$\text{Strehl}_{\text{min}}$	$\text{Strehl}_{\text{min}}$ *	Énergie du pic central
Sans l'effet de la diffraction	1.20	-	-	100%
Instrument parfait	1.00	-	-	84%
Instrument diffraction limited	0.80	-	-	67%
Instrument parfait obstrué $\text{Strehl}_0 = 1$	$1 - \text{CO}^2$	-	-	$(1 - \text{CO}^2)^2 \times 84\%$
Instrument parfait obstrué CO = 10%	0.99	0.81	0.81	82%
Instrument parfait obstrué CO = 15%	0.98	0.82	0.83	80%
Instrument parfait obstrué CO = 20%	0.96	0.83	0.86	77%
Instrument parfait obstrué CO = 25%	0.94	0.85	0.89	74%
Instrument parfait obstrué CO = 30%	0.91	0.88	0.94	70%
Instrument parfait obstrué CO = 35%	0.88	0.91	1.00	65%
Instrument parfait obstrué CO = 40%	0.84	0.95	1.09	59%
Instrument parfait obstrué CO = 50%	0.75	1.07	1.37	47%

Note : au delà de 35% d'obstruction l'instrument ne peut plus être "Diffraction Limited" si on suppose que le maximum théorique du Strehl = 1.0 est atteignable ce qui n'est jamais le cas après le polissage donc on peut fixer raisonnablement cette limite à 30% (Strehl minimum = 0.94) !

En généralisant, on peut calculer le Strehl total d'un instrument obstrué [794] :

$$\text{Strehl}_{\text{total}} = \text{Strehl}_{\text{primaire}} \times \text{Strehl}_{\text{secondaire}} \times \text{Strehl}_{\text{obstruction}} \times \text{Strehl}_{\text{renvoi coudé}} \times \text{Strehl}_{\text{lame de fermeture}} \times \text{Strehl}_{\text{oculaire}}$$

On considérera ici que les miroirs paraboliques industriels sont polis au mieux à : $PtV = L/6$ ce qui correspond à un Strehl de 0.91. On considérera un Strehl = 0.90 pour le renvoi coudé (sur les SCT, RC et Mak) [745]. Le Maksutov et le C8 (SCT) possèdent 2 miroirs sphériques et un dioptre alors que les autres formules optiques citées n'ont que 2 miroirs. Les miroirs sphériques sont réputés plus facile à fabriquer et donc possèdent un Strehl plus élevé (environ 0.95) pour un nombre d'heure de travail plus faible que les autres miroirs non sphériques. Les miroirs secondaires plan sont aussi plus facile à fabriquer et donc possèdent un Strehl déjà élevé (environ 0.95 en moyenne). La lame de fermeture des SCT ou la lame correctrice des Mak seront comptées comme ayant un Strehl = 1.0 car ce sont des éléments correcteurs n'introduisant pas d'aberration sphérique vue qu'il sont sensé la corriger donc ils ne peuvent qu'améliorer le Strehl global de l'instrument. Enfin on comptera un Strehl = 0.91 pour le miroir hyperbolique du RC.

Le Strehl des lunettes qui sont pourtant des instruments non obstrués n'atteignent jamais le Strehl théorique de 100% principalement en raison de l'aberration chromatique qui étale le point de focus selon la longueur d'onde, ce qui fait donc grossir la dimension de la figure de Airy même au centre du champ. Les autres instruments ne souffrant pas d'aberration chromatique conservent une figure de Airy au centre dont la dimension est proche de sa dimension théorique et correspondant à l'ouverture de l'instrument éventuellement dégradée par son obstruction.

EER ou "Encircled Energy Ratio" désigne le terme variable dans la définition de l'énergie contenue dans le pic central.

Avec un instrument parfait non obstrué :

- E = P + D = énergie totale contenue dans la figure de Airy
- $P = E \times 84\%$ = énergie dans le pic central de la figure de Airy
- D = énergie en dehors du pic central, correspond au 1er anneau de la figure de Airy

La formule s'écrit : EER = C/P où C est l'énergie dans le pic central sur un instrument imparfait. L'EER mesure le pourcentage de lumière dans le pic central par rapport à la limite théorique.

- Pour un instrument théorique parfait (C = P) : EER = 100%
- Pour un instrument théorique parfait mais obstrué : EER = $(1 - \mathrm{CO}^2)^2$

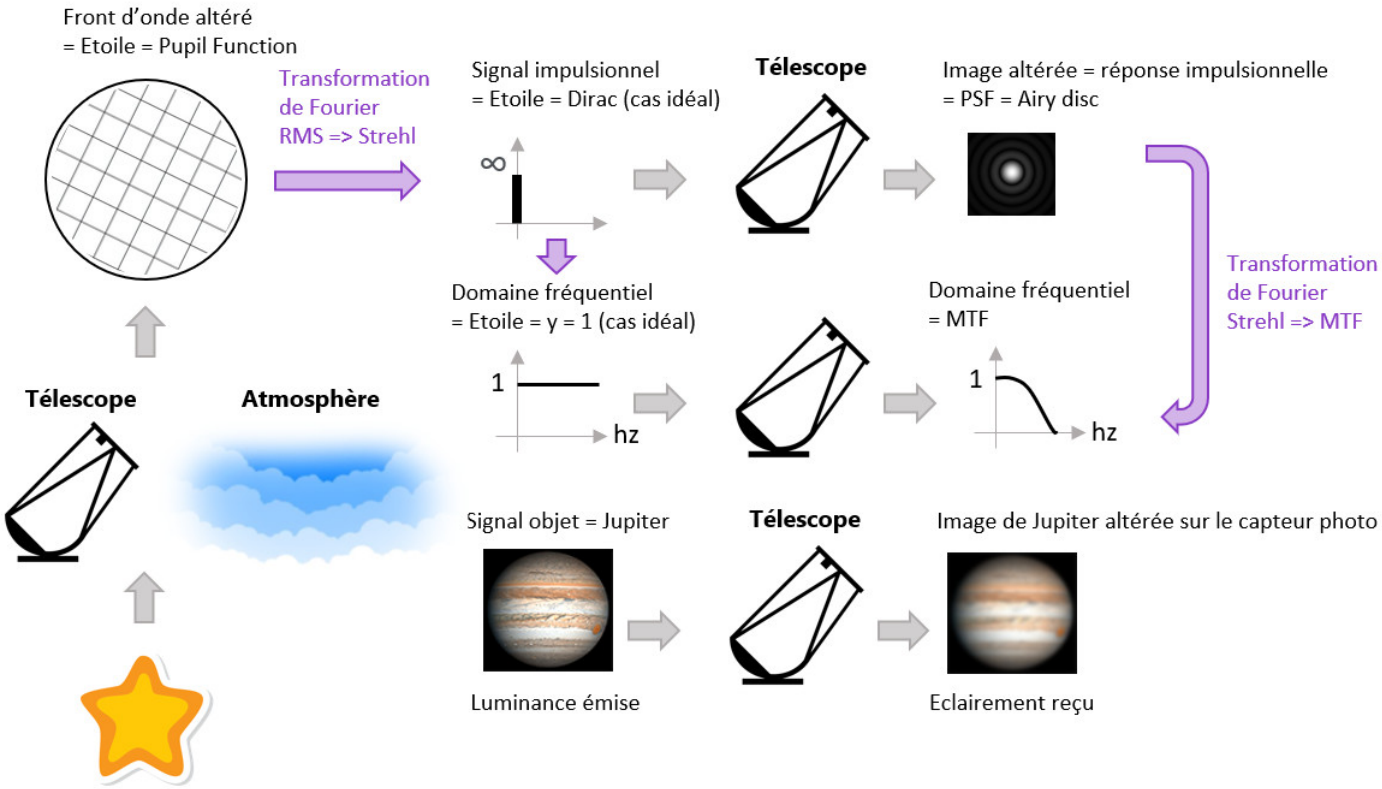
On en déduit aussi toujours pour un instrument parfait mais obstrué l'énergie restante dans le pic central :

$$\begin{aligned} C/P &= \mathrm{EER} \\ C/P &= (1 - \mathrm{CO}^2)^2 \\ C &= P(1 - \mathrm{CO}^2)^2 \\ C &= E \times (1 - \mathrm{CO}^2)^2 \times 84\% \end{aligned}$$

La formule s'écrit aussi : EER = Strehl $\times (1 - \mathrm{CO}^2)^2$ [450] mettant en lumière l'impact de l'obstruction d'un instrument sur la résolution. On considère une dégradation acceptable pour ne pas gréver le potentiel de l'instrument si EER > 80% [392] donc si l'obstruction reste inférieure à 32% [393]. Le Strehl d'un instrument parfait vaudrait 100%.

MTF ou "Modulation Transfer Function" désigne la fonction de transfert de modulation d'un instrument, c'est-à-dire une courbe de réponse de l'instrument à différentes fréquences spatiale. La réponse indique une valeur de contraste allant de 0 à 1 = lorsque la réponse est identique au motif de fréquence considéré. Un signal impulsionnel (un Dirac) contient par définition toutes les fréquences et au passage de l'instrument, on obtient la figure de Airy qui est la réponse impulsionnelle de l'instrument. La MTF est le module de la fonction de transfert optique (OTF) qui est une fonction complexe (au sens des nombres complexes) MTF =| OTF |. La MTF est la transformée de Fourier de la PSF donc elle contient l'ensemble des fréquences de la PSF. La courbe MTF idéale serait une droite horizontale de valeur de contraste maximal 1 cependant un instrument est d'abord une ouverture circulaire éventuellement obstruée, ce qui réduit le contraste à mesure que l'on va vers les hautes fréquences.

Fonction de transfert d'un instrument



Credit : J.G. Gricourt

L'atmosphère joue le rôle d'un filtre ayant une fonction de transfert FTF au sens traitement du signal en transformant l'objet visé en image [341].

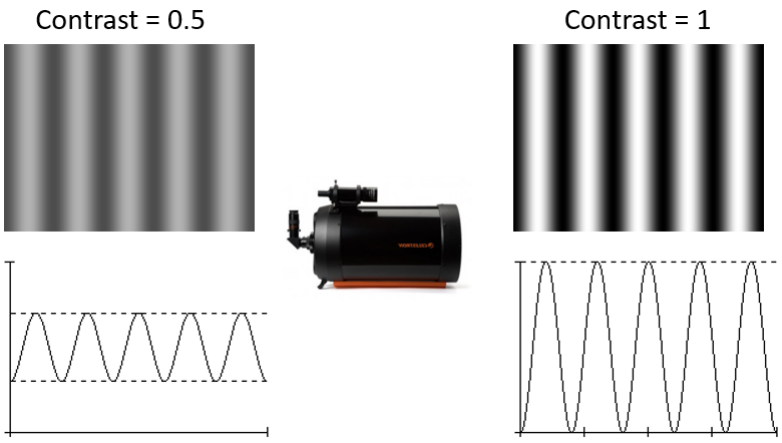
L'instrument joue le rôle d'un filtre ayant une fonction de transfert FTF au sens traitement du signal en transformant l'objet visé filtré par l'atmosphère en image.

Différentes PSF :

- PSF théorique (ouverture circulaire + obstruction)
- PSF pratique (astigmatisme, aberration sphérique)
- PSF dispersée en speckles par la turbulence atmosphérique

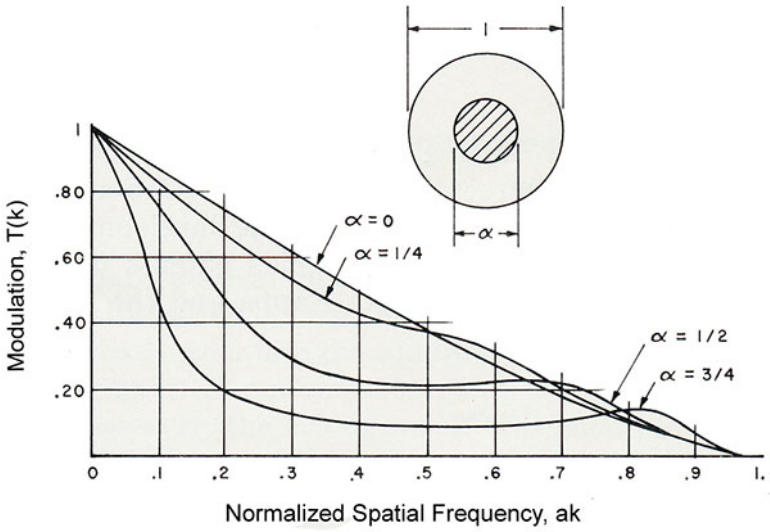
Les fréquences spatiales sont matérialisées par une alternance de plus en plus serrée de bandes blanches et noires en allant vers les fréquences spatiales plus élevées exprimées en cycle/mm. Un instrument optique montre toujours une courbe MTF qui décroît (filtre passe bas) en allant vers les fréquences spatiales plus élevées jusqu'à la limite, la "Cut-Off Frequency" (le pouvoir séparateur selon Rayleigh) : $f_{\max} = \frac{1}{\lambda(F/D)}$ où λ en mm, $f_{\max}$ fréquence en cycle/mm (la valeur 1 sur l'axe des abscisses normé de la courbe MTF) et qui correspond à un contraste de 9% (la valeur 0 sur l'axe des ordonnées normé de la courbe MTF).

Perte de contraste au passage de l'instrument



Credit : J.G. Gricourt

La MTF diminue dans les fréquences intermédiaires lorsque l'instrument est obstrué, par exemple la MTF résultant de l'obstruction d'un Newton :

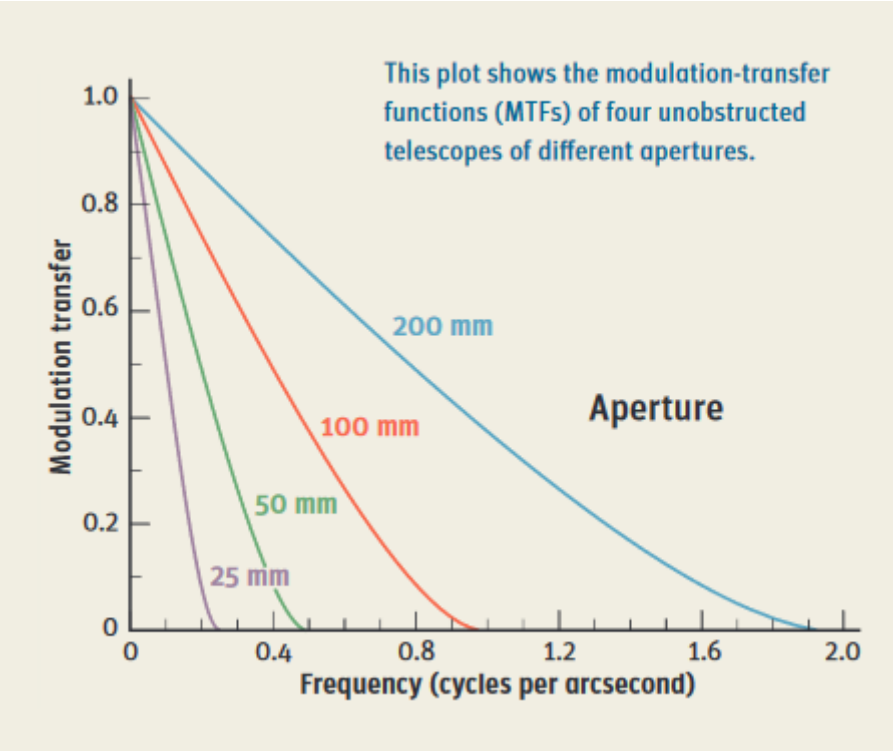


Modulation Transfer Function of Annular Apertures

Credit : Taylor Optics Digest

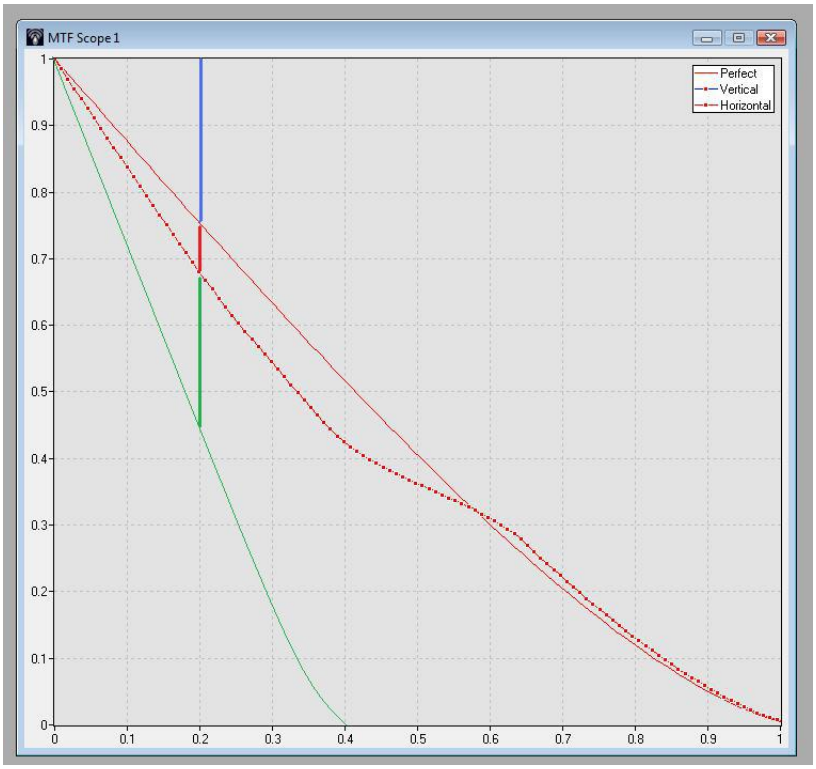
L'obstruction occasionne une perte de résolution sur les faibles contrastes comme la surface de Jupiter ou de Saturne, en revanche la perte de contraste est nulle voire améliorée sur les forts contrastes comme la surface lunaire [265].

La MTF diminue dans les fréquences élevées lorsque le diamètre de l'instrument diminue [150] :



Credit : Daniel Rickey

Cas du Newton : vert = lunette non obstruée de 4 inch (101mm), rouge = Newton non obstrué de 10 inch (254mm), rouge en pointillé = Newton de 10 inch obstrué à 25% (254mm.)



Credit : Edggie

MTF50 désigne la valeur du point de la courbe MTF correspondant à un contraste de 50 (la fréquence en cycle/mm). On utilise cette valeur de référence pour savoir quelle est la résolution d'un objectif depuis le centre vers le bord. En général, la résolution est maximale au centre puis décroit en direction du bord.

OTF ou "Optical Transfer Function" désigne la fonction de transfert optique ou OTF d'un instrument. La fonction de transfert optique est par définition la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle d'un instrument OTF = $\widehat{f}$(PSF). Une impulsion est un signal qui contient toutes les fréquences spatiales du spectre, il s'agit mathématiquement d'une fonction de Dirac. On peut approcher une Dirac par une étoile dans le domaine spatiale. Dans le cas d'une ouverture circulaire, la réponse impulsionnelle est matérialisée par une figure de Airy.

Diffraction Limited désigne une caractéristique souvent mise en avant par les marques d'instruments d'amateur afin d'indiquer que celui-ci est capable d'atteindre sa résolution théorique prévue selon le critère de Rayleigh. Un instrument garanti "Diffraction Limited" aura un Strehl $\geq 80\%$ et un PtV $\leq \lambda/4$ ce qui signifie que ses performances optiques seront difficilement discernables de l'instrument théorique parfait. La résolution théorique de l'instrument ne peut être atteinte que si celui-ci n'est soumis à aucune turbulence atmosphérique ou instrumentale et que l'on utilise un grossissement supérieur ou égale au grossissement résolvant, c'est-à-dire celui qui permet de commencer à distinguer la figure de Airy.

Pouvoir Séparateur ou "Pouvoir de Résolution" désigne la capacité d'un instrument à résoudre 2 sources lumineuses ponctuelles (e-g des étoiles) très proches. Le pouvoir séparateur diminue avec la longueur d'onde et augmente avec le diamètre de l'instrument. Le pouvoir de résolution sera un peu meilleur dans le rouge que dans le bleu. En considérant le critère de Rayleigh à $\lambda = 550$nm le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 138/D$ [118].

Résolution et instruments (Couder)

Instrument	Diamètre	Ps
Lunette	100 mm	1.38"
Celestron C8	203 mm	0.68"
Dobson Orion XT10	250 mm	0.48"
Celestron C14	353 mm	0.34"
Dobson	400 mm	0.35"
Dobson	460 mm	0.30"
Dobson	600 mm	0.23"
Dobson	1 m	0.138"
VLT 1	8.2 m	0.017"
Gran Telescopio Canarias	10.4 m	0.013"
EELT	39 m	0.004"

Généralisation du critère de Rayleigh : Ps (arcmin) $= \frac{\lambda}{4\times D}$

Peu importe l'instrument, le diamètre donnera toujours la résolution théorique de celui-ci [383].

Résolution et objet

Objets	Dimension angulaire	Taille réelle	Instrument
Soleil	29'20" - 34'6"	-	-
M57	1' - 1'24"	-	-
Lune	29'20" - 34'6"	-	-
Jupiter	29.8" - 50.1"	-	-
Etoile double Albireo = Beta Cygni	35.3"	-	-
Mars	3.5" - 25.1"	-	-
Saturne	14.5" - 20.1"	-	-
Etoile double Polaris B	18"	-	-
Etoile double The Pup = Sirius B	11.3"	-	-
Vénus	9.7" - 1'6"	-	-
Mercure	4.5" - 13.0"	-	-
Trapèze Orion C-F	4"	-	-
Etoile double Lyre séparation	2.3"	-	-
Uranus	3.3" - 4.1"	-	-
Neptune	2.2" - 2.4"	-	Lunette 80 mm
Plato craterlets (Lune)	1.4"	2.7km (diamètre)	Lunette 100 mm
Mayal II (dans M31)	1.1"	-	Lunette 130 mm
Etoile double Zeta Cancri	1"	-	-
Rima Hadley (Lune)	0.7"	1.2km (largeur)	Celestron C8
Divisions de Cassini (Saturne)	0.65"	-	-
Vallis Alpes Rills (Lune)	0.5"	1km (largeur)	Dobson Orion XT10
Granulation solaire	0.4"	1000km	-
Cérès	0.33" - 0.84"	-	Dobson 460 mm
Vesta	0.20" - 0.64"	-	Dobson 700 mm
Pluton	0.06" - 0.11"	-	-
R Doradus	0.052" - 0.062"	-	-
Bételgeuse	0.049" - 0.060"	-	-
Divisions de Encke (Saturne)	0.045"	-	-
Eris	0.034" - 0.089"	-	-

Attention la résolution maximale des instruments terrestres calculé par le critère de Rayleigh reste très théorique :

- L'atmosphère limite sévèrement leur pouvoir séparateur, souvent équivalent à un instrument de 100 à 300 mm exploitant sa résolution maximale (voir le paramètre de Fried).
- L'oeil humain séparera mieux des bandes alternées de noir et blanc que 2 disques quasi ponctuels comme définit par le critère de Rayleigh [749]

Note : ce qui explique que l'on peut deviner les divisions de Cassini (0.65") ou de Encke (0.045") à la surface des anneaux de Saturne avec de petits instruments théoriquement limités en résolution

Critère de Abbe désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 0.82 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = \lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550$nm le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 113/D$ où D est en mm. Ce critère est utilisé pour caractériser la résolution des microscopes.

Critère de Buxton désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 1.2 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 1.46\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550$nm le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 202/D$ où D est en mm [96].

Critère de Danjon-Couder désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 0.85 fois [387] le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 0.70\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550$nm le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 120/D$ où D est en mm (attention la valeur exacte est $118/D$). Afin d'observer ce critère, toute l'énergie lumineuse reçue doit rester dans le rayon de la figure de Airy [578]. Dans le but de réaliser une optique parfaite, ce critère n'est pas suffisant. Ainsi, il est aussi respecté dans le cas d'un miroir présentant de l'aberration de sphéricité où l'énergie lumineuse est déplacée de la figure centrale vers les anneaux alors que dans ce cas la contraste est aussi dégradé.

Critère de Dawes désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 0.84 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 1.02\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550nm$ le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 116/D$ où D est en mm. Dans ce cas, l'éclairement entre les 2 pics centraux descends à 5%.

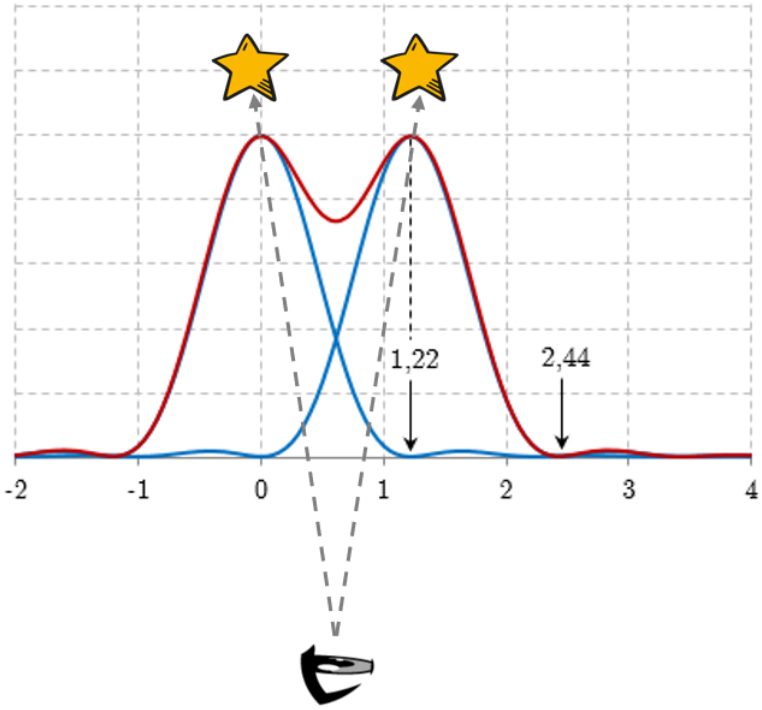
Critère de Françon désigne un niveau de perfection des optiques encore plus exigent que le critère de Rayleigh. Pour observer ce critère, le front d'onde doit vérifier : PtV $\leq \lambda/16$. Le contraste de l'image est alors à son maximum théorique selon Françon [578].

Critère de Houston désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 1.02 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 1.24\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550nm$ le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 141/D$ où D est en mm. Dans ce cas les 2 pics centraux sont distants de la FWHM de la figure de Airy (full width at half-maximum) et pour cela, on considère que le premier pic est une approximation d'une Gaussienne [762].

Critère de Maréchal désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 0.82 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = \lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550nm$ le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 138/D$ où D est en mm. Dans ce cas, le front d'onde doit vérifier : $\sigma_{\text{RMS}} = \lambda/14$ ou Strehl $= 80\%$

Critère de Rayleigh désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 1 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 1.22\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550nm$ le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 138/D$ où D est en mm. Dans ce cas, le maximum de la figure de Airy de l'une chevauche le premier minimum de l'autre. Le maximum du premier pic coïncide alors avec le premier minimum du second pic. Ce critère ramené sur le front d'onde donne PtV $\leq \lambda/4$ et correspond à un Strehl $= 80\%$. L'éclairement entre les 2 pics centraux descendent à 26%. Ce critère est le plus utilisé parmi les astronomes amateurs.

Critère de Rayleigh



Credit : Wikipedia Commons

Calcul du pouvoir séparateur pour une longieur d'onde $\lambda = 550nm$:

$$\theta_{\text{rad}} = 1.22\frac{\lambda}{D}$$
$$\theta_{\text{rad}} = 1.22\frac{550 \times 10^{-9}}{D_{\text{mm}} \times 10^{-3}}$$
$$\theta_{\text{arcsec}} = 1.22\frac{550 \times 10^{-9}}{D_{\text{mm}} \times 10^{-3}} \times 206265$$
$$\theta_{\text{arcsec}} = 1.22\frac{550 \times 10^{-9}}{D_{\text{mm}} \times 10^{-3}} \times 206265$$
$$\theta = \frac{138}{D}$$

Le cas général du crière de Rayleigh : $\theta = \frac{\lambda}{3.97 \times D}$

Critère de Schuster désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 2 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 2.44\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550nm$ le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 276/D$ où D est en mm.

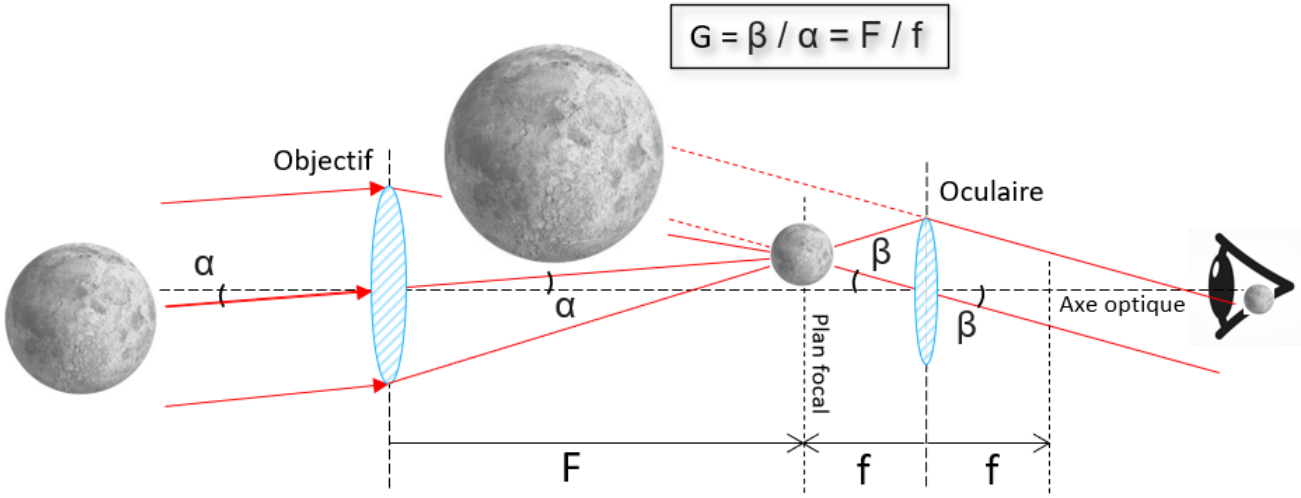
Critère de Sparrow (1916) désigne le pouvoir séparateur d'un instrument capable de séparer 2 étoiles de magnitude identiques et dont les 2 pics centraux sont distants de 0.77 fois le rayon de la figure de Airy soit $\theta_{\text{rad}} = 0.94\lambda/D$. Sous une lumière monochromatique verte $\lambda = 550nm$ le pouvoir séparateur vaut : Ps (arcmin) $= 107/D$ où D est en mm. C'est le cas lorsque la dérivée seconde de l'éclairement entre les 2 pics s'annule. Ce critère est le plus serré de tous car il ne met en

évidence qu'une élongation de la figure de Airy plutôt qu'une véritable séparation. Ce critère ne s'applique que pour des instruments professionnels peu soumis à l'effet de la turbulence.

5.3 Le Grossissement

Grossissement désigne l'effet d'agrandissement apparent des objets observés au travers un instrument. Le grossissement est le rapport de la dimension angulaire de l'objet vu au travers l'instrument et de la dimension angulaire du même objet vu à l'oeil nu. Le grossissement se calcule comme le rapport de la focale de l'instrument et de la focale de l'oculaire $G = F/f$. Durant le jour, la turbulence due à la chaleur de la journée limite le grossissement, on peut l'estimer en moyenne à x100 environ. La nuit et selon les objets observés, les grossissements utilisés peuvent être plus élevés [118].

Le grossissement



Credit : J.Gricourt

Calcul du grossissement où d= la hauteur de l'objet (centre de la Lune) sur le plan focal :

$$\tan\alpha = \frac{d}{F} \quad \text{mais aussi} \quad \tan\beta = \frac{d}{f}$$
$$\frac{\tan\beta}{\tan\alpha} = \frac{F}{f} \quad \text{pour de petits angles} \quad \tan x \approx x$$
$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{F}{f}$$
$$G = \frac{F}{f}$$

Cette formule est donc une approximation grossière car si β est une valeur supérieur à 30° cette formule n'est plus exacte.

Augmenter le grossissement permet de mieux voir car :

- La luminosité des étoiles restent concentrées alors que la luminosité du fond du ciel diminue (le ciel devient plus noir).
- La résolution de l'oeil étant plus faible dans le noir, il faut grossir les objets étendus pour les voir

Attention : si l'ont grossi trop fort ont affaibli l'éclairement de la rétine (brillance de surface) et l'on risque de ne plus détecter les objets. Il ne faut pas non plus grossir trop faiblement car sinon on n'arrivera pas à détacher les objets peu lumineux (galaxies et nébuleuses) de la clarté du fond du ciel.

Selon le Saguaro Astronomy Club :

Grossissement optimal selon le type d'objet observé

Objet	Grossissement
Minimum useful magnification (for better contrast)	$0.13 \times D$ to $0.2 \times D$
Best visual acuity	$0.25 \times D$
Wide views	$0.4 \times D$
Lowest power to see all details	$0.5 \times D$
Planets, Messier objects, general viewing	$0.8 \times D$
Normal high power, double stars	$1.2 \times D$ to $1.6 \times D$
Maximum useful magnification	$2.0 \times D$
Close doubles	$2.35 \times D$
Sometimes useful for double stars	$4.0 \times D$
Limit imposed by atmospheric turbulence	500×

Credit : Saguaro Astronomy Club

Selon Don Pensack :

Grossissement optimal pour les télescopes de 8" to 20"

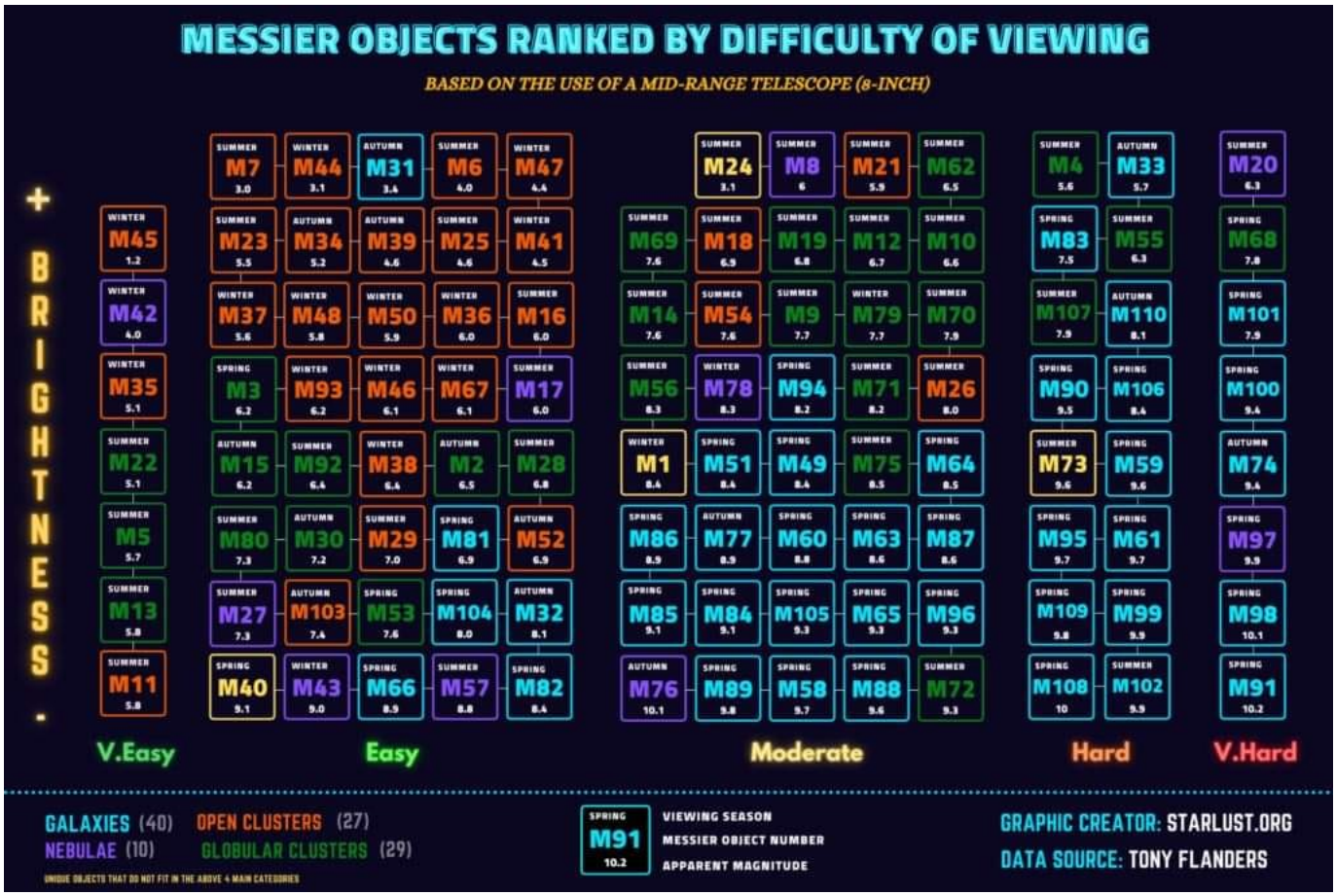
Grossissement	Pupille de sortie	Targets
3.6/inch of aperture - 10x/inch	2.5 - 7mm	Use for large emission nebulae, large star clusters, multi-object fields, telescopic comets, dark nebulae, reflection nebulae, large fields
10/inch of aperture - 20x/inch	1.25 - 2.5mm	Use for galaxies, globular clusters, smaller open clusters, large planetary nebulae, carbon stars, reflection nebulae, Moon, planets (toward upper end), variable stars
20/inch of aperture - 30x/inch	0.84 - 1.5mm	Use for Moon, planets, planetary nebulae, double stars, small globular clusters, small features in galaxies (like H-III regions in M33 or globulars in M31)
30/inch of aperture - 50x/inch	0.84 - 0.5mm	Use for Moon, Uranus, Neptune, planetary nebulae, double stars

Credit : Don Pensack

Pour les petits instruments comme les lunettes de 3" to 5" on utilisera des grossissements plus élevée pour chaque cibles.

Difficulté des objets de Messiers observés avec un télescope de 200mm :

Messiers



Credit : Library Telescope

Du point de vue de l'optique géométrique, l'effet de grossissement n'est possible que grâce à un oculaire. Voir une image dans un instrument, c'est d'abord observer l'objet, image produite par l'objectif de l'instrument (lentille ou miroir) sur son plan focal. L'oeil ne permettant pas d'accommoder indéfiniment en s'approchant de l'objet, il faut un oculaire ou une loupe afin de visualiser l'objet au plus près et surtout sans accommodation, pour cela, il suffit de faire coïncider l'objet image et le plan focal avant de l'oculaire (vue d'objet virtuel à l'infini). Plus la focale de l'oculaire est courte plus, il sera possible de s'approcher de l'objet exactement comme on le ferait avec un loupe classique.

Pour le choix des oculaires lorsqu'on débute, Don Pensack [221] propose la règle "1X, 2X, 3X". On choisit 3 oculaires, bas, moyen et fort grossissement.

— 4" scope, X=35 power
— 8" scope, X=50 power
— 10"scope, X=60 power
— 12"/12.5"scope X=70 power

Les étoiles, pourtant très lumineuses, ne peuvent pas être résolues par nos instruments actuels, car celles-ci se présentent toujours sous forme d'une figure de diffraction, la figure de Airy dont la dimension ne dépend que de l'ouverture de l'instrument utilisé pour l'observer. Lorsqu'on grossit une étoile, aussi grosse soit-elle comme Bételgeuse qui fait déjà 0.05" de diamètre, on ne verra jamais que sa figure de Airy, mieux visible et plus grosse, mais pas l'image de l'étoile elle-même. Le VLT est le seul instrument ayant permis d'imager la surface de Bételgeuse en combinant la puissance de plusieurs télescopes par interférométrie.

Grossissement minimum désigne le grossissement de l'instrument qui produit une pupille de sortie d dimension égale à la dimension maximale de la pupille de sortie de l'oeil : $G_{\min} = D/d$. Si le grossissement devient inférieur à $G_{\min}$ alors la pupille de l'oeil trop petite ne va laisser entrer qu'une partie de la lumière fournie par l'instrument, l'oeil joue alors le rôle d'un diagramme. Donc pour un jeune sujet, on admet que cette pupille peut atteindre jusqu'à 7 mm dans l'obscurité : $G_{\min} = D/7$.

Grossissement maximum désigne le grossissement de l'instrument qui produit une pupille de sortie d permettant d'exploiter à la limite le pouvoir de résolution de nos yeux. Cette pupille de sortie est de 0.4 mm : $G_{\max} = 2.5 \times D$ (63.5 x / inch). Si le grossissement devient supérieur, alors la pupille de sorti devient si petite que le cristallin de l'oeil ne va plus jouer son rôle et va diffracter significativement la lumière au lieu de la focaliser. Ce grossissement n'est réellement utilisable que pour les observations lunaires (vers le terminateur) ou d'étoiles doubles et d'objets à forts contraste.

Une règle empirique indique que $G_{\max} = 50 \times D_{\text{inch}}$ [118] celà peut être minoré si l'oeil de l'observateur souffre le "Floaters" $G_{\max} = 40 \times D_{\text{inch}}$ (Don Pensack)

De jour, lors d'observation terrestre le grossissement utilisable est d'abord limité par les vagues de chaleur venant du sol, le risque est aussi de voir l'ombre du secondaire pour les instruments obstrués pupille instrument > pupille de l'oeil en général, on utilise plutôt des grossissements de 20 à 60x c'est ce qu'utilisent les ornithologues avec leurs longue-vues.

Grossissement résolvant ou "Grossissement Utile" désigne le grossissement de l'instrument qui permet de distinguer 2 étoiles proches à la limite du pouvoir séparateur donc : $G_{\text{resolvant}} = A_{\text{vis}} \times \frac{D}{2.3}$ où A_{vis} = acuité visuelle en arcmin de l'observateur (selon le critère de Rayleigh : 138 arcmin / 60 = 2.3 arcs min) et D le diamètre de l'instrument en mm. Dans la littérature un peu ancienne et en particulier dans le Danjon & Couder on parle du grossissement permettant de distinguer 2 étoiles séparées selon le critère de Rayleigh, et cela, pour une acuité visuelle exceptionnelle de 1 arcmin (vision 10/10) ce qui bien sûr n'est possible qu'en vision diurne alors : $G_{\text{resolvant}} \simeq D/2$. En vision nocturne, l'acuité visuelle se situe plutôt aux alentours de 2 à 5 arcmin (vision 10/10) donc dans le meilleur des cas, on a : $G_{\text{resolvant}} \simeq D$ et la focale de l'oculaire correspondant vaut $f = F/D$. Par conséquent, pour avoir du sens, ce grossissement minimum permettant la résolution de faibles contrastes sur le ciel doit obligatoirement tenir compte de l'acuité visuelle [387] de l'observateur au moment de l'observation.

Statistiquement, la plupart des individus ayant une vision de 10/10 sur un test standard possèdent une résolution de 2 à 4 arcmin en vision diurne, et cela, pour des contrastes allant de 0.90 à 1.00 (mire de test de vision des opticiens). En vision dégradée, une perte de contraste de 0.20 occasionne une perte de résolution de 3 arcmin en moyenne [73].

Contraste des planètes

Planètes	Contraste
Tache solaire	0.90 à 1.0
Terminateur de la lune	0.90 à 1.0
Division de Cassini de Saturne	0.90 à 1.0
Ombres projetées lors des transits des satellites de Jupiter	0.90 à 1.0
Lune	0.20
Mars	0.20
Jupiter	0.10 à 0.20
Saturne	0.05 à 0.15
Venus	0.05 ou moins

Credit : Rodger W. Gordon

Il faudra donc pousser les grossissements sur les faibles contrastes [387].

5.4 L'Optique Géométrique

Loi de Snell Descartes désigne la loi qui décrit le comportement de la lumière traversant la frontière de 2 milieux différents (un dioptre). Cette loi découle directement du principe de Fermat qui dit que pour aller d'un point A vers un point B la lumière emprunte (rétrospectivement) le chemin le plus court en temps de trajet, la lumière ralenti par exemple en traversant un milieu d'indice de réfraction n supérieur à 1 : $n_{\text{eau}} = 1.33,\ n_{\text{verre}} = 1.5$.

Si le dioptre est réfléchissant (miroir) alors $\theta_1 = \theta_2$ ce sont respectivement l'angle du rayon incident et l'angle, du rayon transmis ou réfléchi.

Si le dioptre est transparent (ou semi-transparent) un rayon est la fois réfléchi marginalement = réflexion vitreuse (lumière polarisée, voir angle de "Brewster") et un autre rayon est transmis traversant le dioptre (ou rayon réfracté). L'angle du rayon transmis au travers du dioptre respecte la relation : $n_1 \times sin\theta_1 = n_1 \times sin\theta_2$ où n_1 et n_2 sont les indices de diffraction des milieux du dioptre. Lorsque l'angle du rayon transmis dépasse à 90° alors celui ci est réfléchi et suit uniquement la loi décrite dans le cas du miroir. L'angle incident limite à partir duquel la réflexion est totale est : $\theta_l = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ soit 41° au passage de l'air au verre. Cette dernière propriété est exploitée dans les renvois coudés à prisme pour réfléchir complètement les rayons incidents frappant le dioptre verre/air à 45° [642].

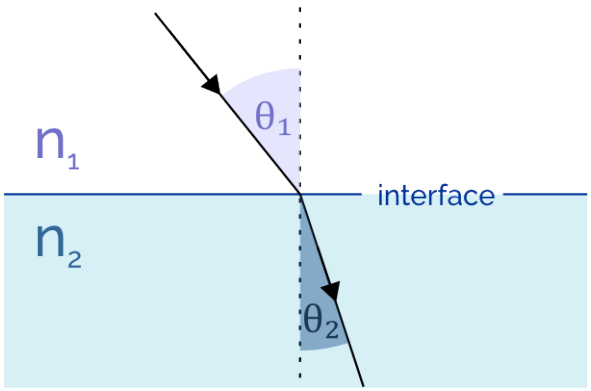
Le taux de réflexion vitreuse sous 90° (effet maxi ici) d'incidence vaut : $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$ (soit 4% pour un dioptre Air/Verre)

Selon les coefficients de Fresnel à un angle d'incidence de $\theta_1 = 0°$ à 45° la réflexion est quasi constante de 4% pour un dioptre air / verre puis augmente rapidement atteindre pour atteindre 100%, c'est l'effet miroir de la surface du lac (effet maximal en vision rasante).

De plus, l'indice de réfraction d'un milieu vaut $n = c/v$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide et v la vitesse de la lumière dans ce milieu (n = 1 dans le vide ou l'air).

L'indice de réfraction d'un milieu diminue avec la longueur d'onde, ainsi le violet est plus dévié que le rouge d'après la loi empirique de Cauchy, voir l'effet du prisme. Les verres spéciaux utilisés dans les lentilles des lunettes ont aussi la propriété d'avoir un indice de réfraction constant sur la plage spectrale visible [2]

La réfraction



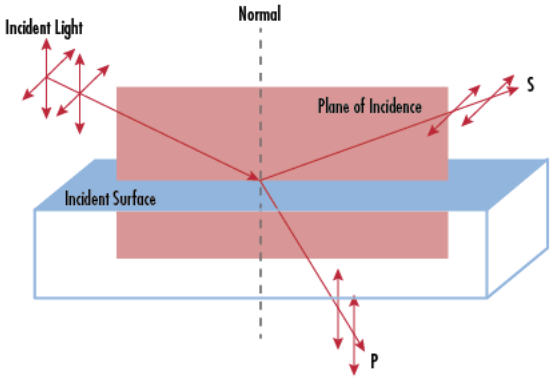
Credit : Bogna Szyk

2. Refractive index database : FPL-53

Il existe 2 types de polarisation contenue dans la lumière :

— ρ polarization = TM = Transverse Magnetic, onde parallèle au plan d'incidence
— s polarization = TM = Transverse Electric, onde perpendiculaire au plan d'incidence

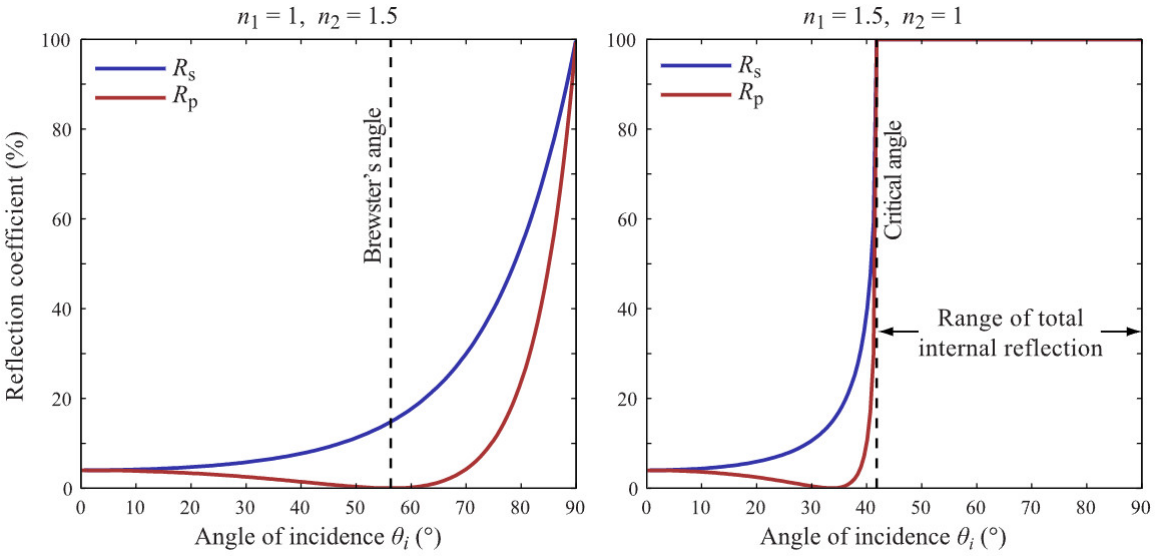
FIGURE 5.1 – La polarization de la lumière



Credit : Edmundoptics

Deux exemples montrant la quantité de lumière réfléchie pour du verre BK7 (n = 1.5) :

FIGURE 5.2 – Effet de l'angle d'incidence sur la réflexion



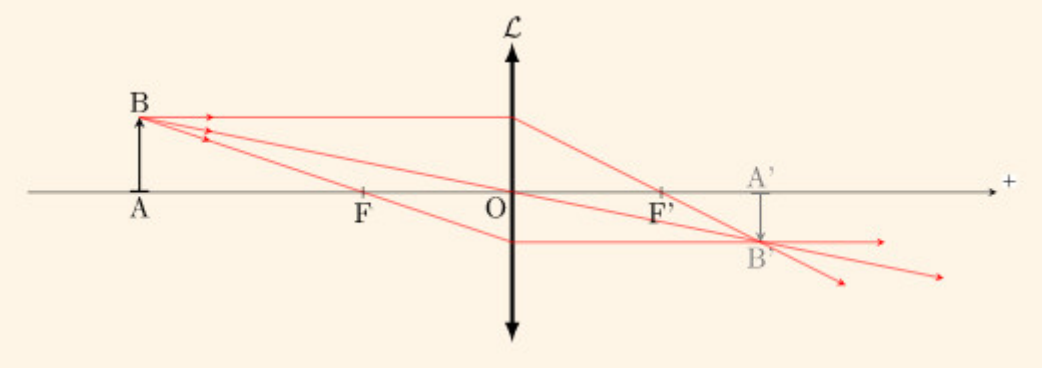
Credit : Wikimedia

Note : l'angle d'incidence de Brewster 56° correspond à l'annulation de la polarisation ρ, les prismes Herschel classiques s'utilisent avec un angle d'incidence de 45° alors la polarisation ρ n'est pas complètement nulle.

Stigmatisme désigne une propriété d'un système optique pour lequel à chaque point de l'objet correspond un point unique dans l'espace image, dans ce cas la focalisation est parfaite en tout point de l'image. En pratique, on observe facilement un stigmatisme presque parfait aux environs du centre du champ pour la plupart des instruments. Lorsqu'on s'écarte du centre, le stigmatisme devient approché, le point image forme une petite tache, car les rayons ne convergent pas tous exactement au même point Il ne faut pas confondre avec la figure de Airy qui est la figure de diffraction produite par les rayons parfaitement focalisés comme au centre du champ.

Relation de conjugaison ou “Relation de Descartes” désigne la relation des distances objet et image dans le cas des lentilles minces. La lentille L produit une image (A’B’) à partir de l’objet (AB). Dans le cas où l’objet (AB) est situé à l’infini, l’image est produite sur le plan focal (celui passant par le foyer F’).

FIGURE 5.3 – Lentilles minces dans l’approximation de Gauss



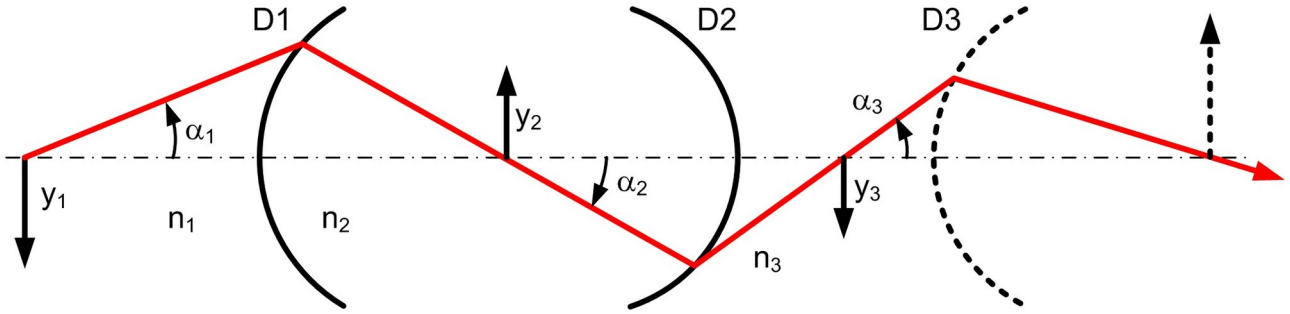
Credit : Femto Physique

Relation de Descartes : $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$ où $\overline{OA'}$ et $\overline{OA}$ désigne une mesure algébrique soit une distance comportant un signe + ou - selon la direction sur l’axe optique (voir notion de vecteurs aussi), ici $\overline{OA}$ est une valeur négative et $\overline{OA'}$ est une valeur positive, $\overline{OF'} = f$ est la focale de la lentille.

Grandissement de l’image au foyer : $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$

Invariant de Lagrange-Helmotz désigne la relation $n_1 y_1 \alpha_1 = n_2 y_2 \alpha_2 = n_3 y_3 \alpha_3$ qui montre que la multiplication de l’indice de réfraction n, la hauteur de l’image (ou objet) y et de l’angle d’incidence des rayons est invariant tout le long du chemin optique constitué de différent dioptres D_i.

FIGURE 5.4 – Invariant de Lagrange



Credit : OPI

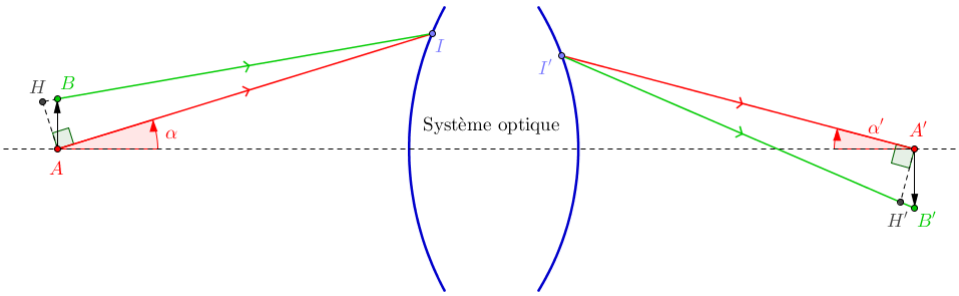
Afocal désigne un type de système optique où des rayons parallèles entrants ressortent tous parallèles entre eux. Cette caractéristique commune aux instruments courants telle que les lunettes de vue, les lunettes astronomiques, les télescopes à miroirs etc ... fait que nos yeux peuvent focaliser ces rayons et former une image sur la rétine. Dans le système afocal de la lunette astronomique, le foyer de l’objectif et de l’oculaire coïncident. La différence d’inclinaison des rayons entrant et sortant s’appelle le grossissement de l’instrument. Le terme “Afocal” peut aussi désigner une technique de photographie qui consiste à disposer un appareil photo ou le capteur photo d’un smartphone juste devant l’oculaire de l’instrument. On appelle ça aussi “Digiscopie”.

Aplanétisme désigne la qualité d'un instrument produisant des images plane confondues avec le plan focal. Un instrument aplanétique sera corrigé à la fois de l'aberration de sphéricité et de la coma [653]. En pratique, certaines lunettes dotées doublets spéciaux et les télescopes de type RC sont presque aplanétiques.

Par ailleurs, ce terme peut aussi désigner une propriété d'un système optique pour lequel l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique sera, elle aussi, perpendiculaire à ce dernier. On parle alors de plan focal parfaitement plat, l'endroit où se forment les images de l'instrument. C'est le cas des objectifs photo dit "Rectilinéaire" c'est-à-dire qui sont parfaitement corrigés pour la distorsion de champ rectilinéaire.

Conditions des sinus d'Abbe de l'aplanétisme : $\frac{sin\alpha'}{sin\alpha} = \frac{n'}{n} \times \gamma$ où $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ est le grandissement transversal soit le rapport des mesures algébriques (donc avec un signe) de la hauteur de l'image sur la hauteur de l'objet, n et n' les indices de réfraction du milieu de l'objet et du milieu de l'image respectivement, enfin α et α' l'angle du rayon incident émis par le point objet et l'angle du rayon réfracté reçu pour former le point l'image.

Conditions des sinus d'Abbe



Credit : FrWiki

Anastigmatique désigne un objectif corrigé pour les aberrations suivantes :

1. Aberration de sphéricité
2. Coma
3. Astigmatisme

Ne pas confondre avec aplanétisme où la correction ne concerne que l'aberration de sphéricité et la coma.

Focale désigne le plan imaginaire où se forment les images des objets lointains produites par l'instrument (télescope ou lunette). Afin d'observer l'image produite sur le plan focal, celle-ci doit être grossie à l'aide d'un oculaire. La méthode de mesure de cette distance focale est appelée focométrie.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la focale d'une lentille mince ou d'un instrument complet :

— Méthode de Bessel
— Méthode de Silbermann
— Autocollimation

Intra-Focale ou "Image Intra-Focale" désigne l'image de la figure de Airy d'une étoile défocalisée. Cette image est obtenue à fort grossissement $G = 2 \times D$ depuis la position de MAP en rentrant le tube du porte-oculaire. De même que l'image extra-focale est obtenue depuis la position de MAP en reculant le tube du porte-oculaire. L'examen de ces images permet d'évaluer

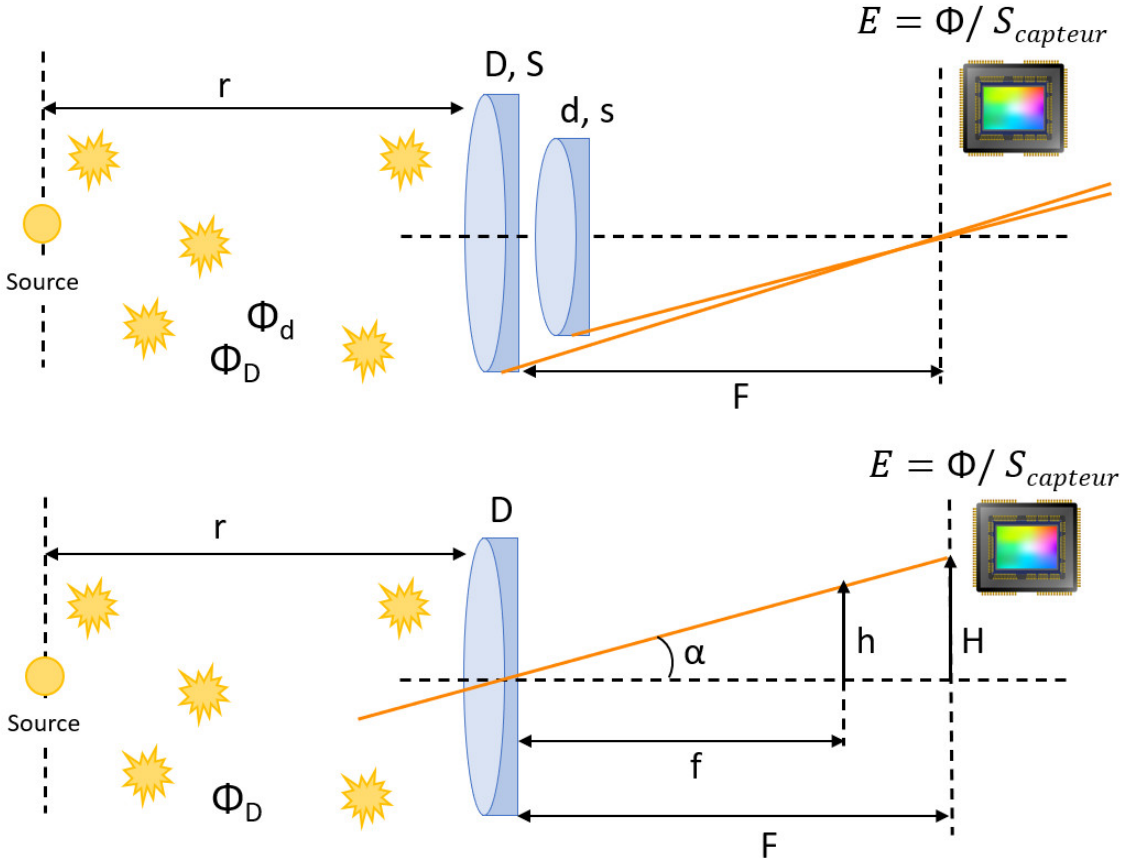
les défauts optiques de l'instrument ou un défaut de collimation. Lorsque l'image intra-focale et l'image extra-focale sont identiques, alors l'instrument peut être considéré comme exempt de défauts. Les défauts de collimation peuvent aussi être évalués de la même manière, mais à grossissement plus faible, alors l'image montrera une série d'anneaux concentriques de luminosité équivalente (différent de la figure de Airy) dont le centre est le point de Poisson ou point d'Arago sont dus à la diffraction provoquée par la présence du miroir secondaire sur le trajet de la lumière. La tache sombre au centre est l'ombre du secondaire qui sera décalée dans le cas d'un Newton court (offset) [567].

EFL ou "Effective Focal Length" désigne la focale résultante d'un instrument ou d'un dispositif optique. Un instrument possède une focale intrinsèque qui peut évoluer par l'ajout de barlow ou de réducteur de focale.

Rapport F/D ou "Nombre d'Ouverture" ou "Focal Ratio" désigne le ratio de la focale de l'instrument divisé par son diamètre. Cette donnée sans unité est particulièrement importante en astrophoto (et en photo tout court !) car elle détermine le temps de pose nécessaire pour acquérir suffisamment de signal afin d'exposer correctement une photo brute. Cette donnée n'a en revanche aucune importance dans l'observation visuelle.

Un pixel du capteur engrangera Q = 4 fois plus de lumière à $N_1 = F/4$ qu'à $N_2 = F/8$, de manière générale : $Q = (N_2/N_1)^2$.

Focal Ratio



Credit : J.G. Gricourt

La surface du capteur est éclairée par la lumière entrant dans l'appareil photo.

Calcul du flux Φ fonction du diamètre de l'ouverture D :

$$
\begin{aligned}
&\Phi = I \times \Omega \\
&\Phi = I \times S/r^2 \quad \text{or} \quad S = \pi(D/2)^2 \\
&\Phi = I \times \pi(D/2)^2/r^2 \quad \text{or} \quad E = \Phi/S_{\text{capteur}} \\
&E = \frac{I \times \pi}{4r^2 S_{\text{capteur}}} \times D^2 \\
&E = k \times D^2
\end{aligned}
$$

Calcul du flux Φ fonction de la focale F :

$$
\begin{aligned}
&E = \Phi/S \quad \text{or} \quad S = \pi H^2 \\
&E = \Phi/(\pi H^2) \quad \text{or} \quad H \approx F\alpha \\
&E = \frac{\Phi}{\pi(F\alpha)^2} \\
&E = \frac{\Phi}{\pi\alpha^2} \times 1/F^2 \\
&E = k \times 1/F^2
\end{aligned}
$$

Donc : $E \propto D^2/F^2$

Si le diamètre D est plus élevé, alors l'image sur le capteur sera plus lumineuse, car plus de lumière sera collectée par l'ouverture de l'instrument. En visuel avec le même oculaire l'image sera plus lumineuse, le grossissement n'aura pas varié. Dans tous les cas, le champ sera le même aussi.

Si la focale F augmente, alors l'image sur le capteur sera moins lumineuse, comme le grandissement (notion de photographie) de l'image étant plus important, la lumière est étalée sur une plus grande surface du capteur. En visuel avec le même oculaire, l'image sera moins lumineuse, le grossissement plus important (avec le même oculaire). Dans tous les cas, le champ capturé sera plus réduit, car le capteur photo ou la rétine sont de dimensions finies.

À focale constante, le rapport de la quantité de lumière reçue par pixel vaut : $R = (\frac{D}{d})^2$.

A diamètre constant, le rapport de la quantité de lumière reçue par pixel vaut : $R = (\frac{F}{f})^2$.

En photo, on joue sur la concentration des photons avec une barlow ou un réducteur de focale.

En visuel, on joue sur la concentration des photons avec un oculaire ou une barlow en faisant varier le grossissement.

Les inconvénients d'un rapport F/D court pour les Newtons :

— La coma est plus importante, car elle est proportionnelle au rapport F/D et s'accentue à mesure que l'oculaire utilisé, la dévoile en bord de champ (grand champ apparent) cependant il existe depuis longtemps des correcteurs de coma performants qui annule la coma efficacement jusqu'à des ratios extrêmes tel que F/3.3.
— Des oculaires qui fonctionnaient très bien à F/D plus long fonctionnent moins bien à F/D court car ils n'ont pas été conçus pour encaisser des rayons aussi inclinés et montrent alors de l'aberration sphérique au centre (on axis), voir de

l'astigmatisme et de l'aberration chromatique [224].

- La plage de tolérance du réglage de la collimation est plus resserrée (la CFF sera réduite) et nécessite des méthodes de collimation plus précise : le cheshire, le laser barlowté ou l'autocollimateur Catseye (réduction de l'erreur FAE)
- Afin de maintenir les alignements compte tenu de la tolérance de collimation, il faut une structure plus rigide (tube ou barres truss) et attention au choix des matériaux
- La plage de tolérance de la MAP est plus resserrée en raison du cône de lumière plus large/obtus et nécessitera un porte-oculaire à démultiplication afin de gagner en finesse de réglage
- Le miroir secondaire devra être plus grand par construction géométrique, et cela, dans le but d'obtenir un backfocus correcte en visuel (sortie du foyer en dehors du tube) ainsi qu'une illumination du champ maximale. Un secondaire plus large augmente mécaniquement l'obstruction, cependant dès 400 mm de diamètre, on restera quand même sous les 25%. À noter qu'en dessous de 30% la perte de contraste est insignifiante en planétaire (les C14 des instruments planétaires par excellence sont obstrués à plus de 30%).
- Le cône de lumière à l'entrée de l'oculaire est plus large / obturation et donc les rayons qui frappent les lentilles de l'oculaire sont très inclinés et mettent à contribution une plus large portion des lentilles de l'oculaire, ce qui accentue l'astigmatisme hors axe et l'aberration de sphéricité qui s'ajoutent à la coma au final en l'aggravant [184]. Il est donc nécessaire d'utiliser des oculaires spécifiquement adaptés comme des Tele Vue Nagler ou des Tele Vue Ethos.
- Il faut faire attention à la construction que le porte-oculaire ne vignette pas le champ, il peut être nécessaire d'utiliser un porte-oculaire en 2.5" ou 3" pour laisser passer tous les rayons entrant dans l'oculaire. En astrophoto le correcteur de coma devra être en 3" si l'on souhaite un champ non vignetté de 30 mm [559].
- Le coût de fabrication est plus élevé pour les F/D court car le polissage d'un miroir doit réaliser une courbure plus profonde dans le verre tout en réalisant une parabole ce qui demande donc plus de travail, c'est la même chose pour les objectifs de lunette où les courbures sont aussi plus prononcées.
- Avec un F/D court sur de petits diamètres, la photo est limitée au grand champ (à moins d'y ajouter du tirage avec un barlow) et en visuel, on ne peut pas obtenir de grossissements importants, car les plus petits oculaires font au minimum 2.5 mm de focale.
- La structure (tube ou barres truss) doit être plus rigides pour maintenir les alignements des miroirs
- Afin de garder un backfocus suffisamment long sans vigneter il faut utiliser un porte-oculaire très bas "Low Profile"
- Il faut utiliser des filtres "Narrow Band" de type "High Speed" (Baader) prévus pour les focales courtes

Les inconvénients d'un rapport F/D court pour les Lunettes :

- Les objectifs des lunettes de F/D court présentent plus de courbure de champ et d'aberration chromatique

Les avantages d'un rapport F/D court pour les Newtons :

- Permet d'observer le ciel les pieds sur terre même avec un grand diamètre : T300 F/5.5, T380 F/4.2, T400 à F/4, T460 F/3.5, T500 F/3.7, T600 F/3.3. Il est possible d'observer assis ou semi-assis tout en relâchant ses muscles et en facilitant le positionnement de l'oeil.
- La rigidité de la structure est accrue pour un instrument court avec moins d'effet de levier et la collimation en bénéficie en étant plus stable. En divisant par 2 la longueur, on multiplie par 4 la rigidité
- Les Dobsons n'ont pas besoin d'avoir des tourillons (rocker du dobson) volumineux pour équilibrer le télescope
- Les Dobsons n'ont pas besoin de contre-poids pour équilibrer la structure
- Les Dobsons de type truss sont moins sensible à la turbulence instrumentale qu'avec un tube complètement fermé

Les avantages d'un rapport F/D court pour les Newtons et les Lunettes :

- A F/D court lorsque la pupille de sortie égale celle de la pupille de l'oeil dans le noir, on peut voir plus d'étoiles dans le champ avec le même oculaire, et les objets étendus (Nébuleuse des Voiles, M31, Les Pléiades) peuvent être vu en entier, on parle même de RFT = "Rich Field Telescope" dans ce cas [357]

— La tube plus court est moins sensible au vent à l'inverse des longues lunettes (voir effet bras de levier)
— Le tube plus court est moins sensible aux déséquilibres liés aux accessoires et aux plus gros oculaires. L'utilisation de contres-poids est alors inutile.
— Le ratio F/D est très favorable pour la photo du ciel profond, soit en longue pose classique sous réserve d'être équipé d'un suivi motorisé ou bien en pose courte comme pour le visuel assisté (VA)

Les avantages d'un rapport F/D court pour les lunettes :

— Les lunettes courtes sont plus faciles à monter sur une monture EQ, car elles présentent plus de stabilité du fait de leur dimension (porte-à-faux)

Deux instruments de focales très différentes, mais de diamètre identique :

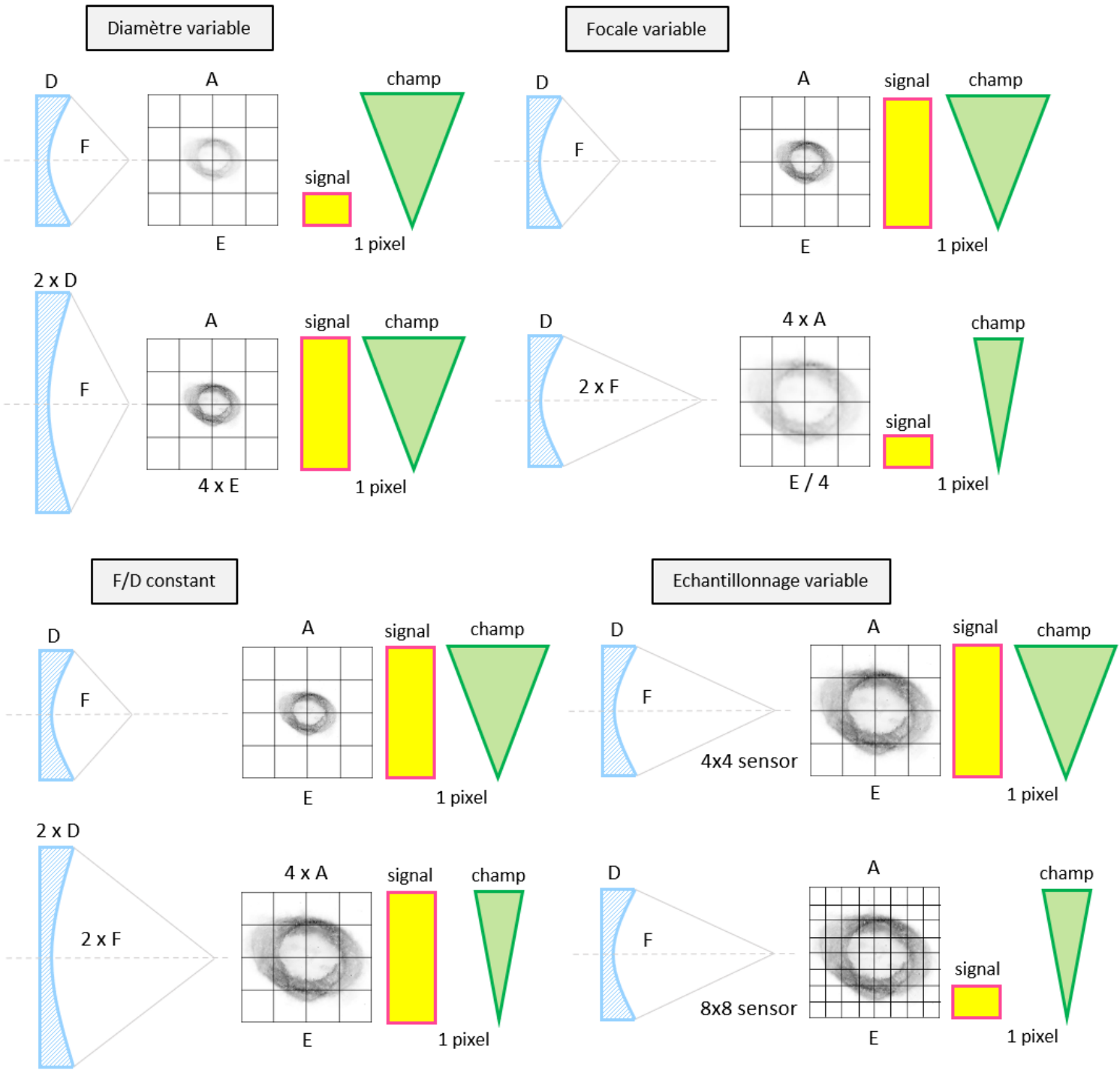
1. L'éclairement du capteur au foyer sera moins intense pour la plus grande focale
2. Le grandissement de l'image sur le capteur sera différent, l'image sera plus étalée sur le capteur dans le cas de la focale la plus longue
3. En visuel, le champ réel observé sera aussi différent sous un même oculaire.
4. En visuel, la pupille de sortie sera la même et procurera la même sensation de luminosité, mais sous des grossissements différents, et ce, pour un même oculaire
5. Il y aura plus de signal sur chaque pixel du capteur dans le cas de l'instrument de courte focale

Deux instruments de diamètre très différents, mais de focale identique :

1. L'éclairement du capteur au foyer sera plus intense pour le grand diamètre
2. Le grandissement de l'image sur le capteur sera le même
3. En visuel, le champ réel observé sera le même sous un même oculaire.
4. En visuel, la pupille de sortie sera plus grosse pour le plus grand diamètre et procurera une sensation de luminosité plus importante, mais sous un même grossissement et donc pour un même oculaire
5. Il y aura plus de signal sur chaque pixel du capteur dans le cas de l'instrument de grand diamètre

Changement dans le signal capturé (par unité de temps) et champ sur le capteur selon le cas de figure :

Projection de l'image sur un capteur

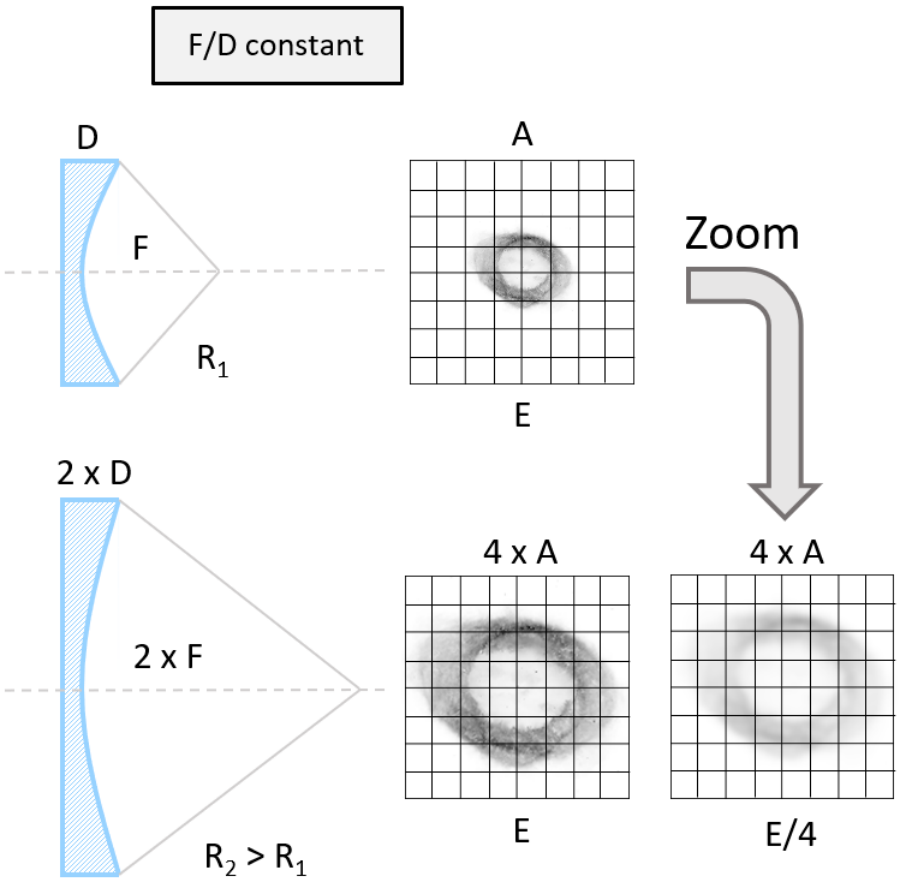


Credit : J.G. Gricourt

Note : E = éclairement de la surface, lorsque le champ sur le capteur baisse, l'échantillonnage devient plus petit, A = la surface de l'objet sur le capteur.

En zoomant l'image sur l'ordinateur ou en utilisant une barlow 2x popur capturer l'image, celle-ci perd à la fois en luminosité (E = éclairement) et en résolution par unité de surface, l'image devient plus floue. Si on considère que l'échantillonage du capteur n'est pas limité, il faudra utiliser un instrument avec 2 fois plus de diamètre et de focale pour conserver la même luminosité et la même résolution R par unité de surface.

Projection de l'image sur un capteur



Credit : J.G. Gricourt

Note : E = éclairement de la surface, lorsque le champ sur le capteur baisse, l'échantillonnage devient plus petit, A = la surface de l'objet sur le capteur, R = la résolution permise par l'instrument (ne dépend que du diamètre de l'instrument).

Le champ en arcmin sur 1 pixel : $e = 206 \times p/F$ où la taille des pixels p est en μm et de la focale f en mm.

À diamètre D constant et temps de pose constant mais à F/D différent, le SNR de l'image ne bouge quasiment pas [680, 133], même si l'image sera plus étendue sur la photo et en apparence moins lumineuse dans le cas de l'instrument à grande focale il suffira de ramener sa taille à la dimension de l'autre image pour se rendre compte que la luminosité est la même. Cependant, l'image est légèrement plus bruitée dans le cas de l'instrument à grande focale. En effet, il y a eu moins de signal engrangé sur chaque pixel et donc en comparaison le niveau du bruit de lecture est très proche (voir aussi la règle des 3 sigmas). C'est cette conclusion qui est donnée dans l'article "f-ratio Myth" de Stan Moore. L'impact du f-ratio n'est donc pas le même en photo classique où l'on joue sur l'ouverture (le diamètre) et en photo astro où l'on joue sur la focale à défaut de pouvoir agrandir l'ouverture.

Les combinaisons suivantes produiront la même luminosité dans l'image :

— Télescope $F/D = 5$ sur capteur de pixel 5μm
— Télescope $F/D = 10$ sur capteur de pixel 10μm

Note : on parle ici d'un temps de pose identique.

Les combinaisons suivantes produiront la même luminosité dans l'image :

— Télescope $F/D = 5$ avec un oculaire de $5mm$
— Télescope $F/D = 10$ avec un oculaire de $10mm$

AFOV signifie "Apparent Field Of View" désigne le champ apparent observé derrière un oculaire. Le champ apparent est une caractéristique de l'oculaire de focale f délimité par l'anneau de diaphragme de champ posé à l'entrée de l'oculaire et de dimension fstop.

Il existe plusieurs méthodes pour le déterminer :

1. $\text{AFOV}(°) = \text{TFOV}(°) \times G$
2. $tan(\text{AFOV}/2) = \text{fstop}/(2f)$ (valeur exact)

Le champ AFOV calculé est une approximation, car du fait des aberrations géométriques, la vraie valeur mesurée peut être au-dessus ou en dessous de la valeur théorique.

Calcul exact de AFOV (voir le calcul du grossissement) où d est le demi diamètre du diaphragme de champ $d = \frac{\text{fstop}}{2}$:

$$\tan(\text{TFOV}/2) = \frac{d}{F} \quad \text{mais aussi} \quad \tan(\text{AFOV}/2) = \frac{d}{f}$$
$$\frac{\tan(\text{AFOV}/2)}{\tan \text{TFOV}/2} = \frac{F}{f} \quad \text{pour de petits angles comme TFOV} \quad \tan x \approx x$$
$$\frac{\tan(\text{AFOV}/2)}{\text{TFOV}/2} = \frac{F}{f}$$
$$\tan \text{AFOV}/2 = \frac{F}{f} \times \text{TFOV}/2$$

TFOV signifie "True Field Of View" désigne le champ réel sur le ciel. Le champ réel est une caractéristique de l'instrument combiné à l'oculaire de focale f délimité par l'anneau de diaphragme de champ posé à l'entrée de l'oculaire et de dimension fstop.

Il existe plusieurs méthodes pour le déterminer [742] :

1. $\text{TFOV} = \text{AFOV}/G$
2. $tan(\text{TFOV}/2) = \text{fstop}/(2F)$ (valeur exact)
3. $\text{TFOV}(°) = 57.3° \times \text{fstop}/F$ (approximation plus précise)

Calcul exact de TFOV (voir le calcul du grossissement) où d est le demi diamètre du diaphragme de champ $d = \frac{\text{fstop}}{2}$:

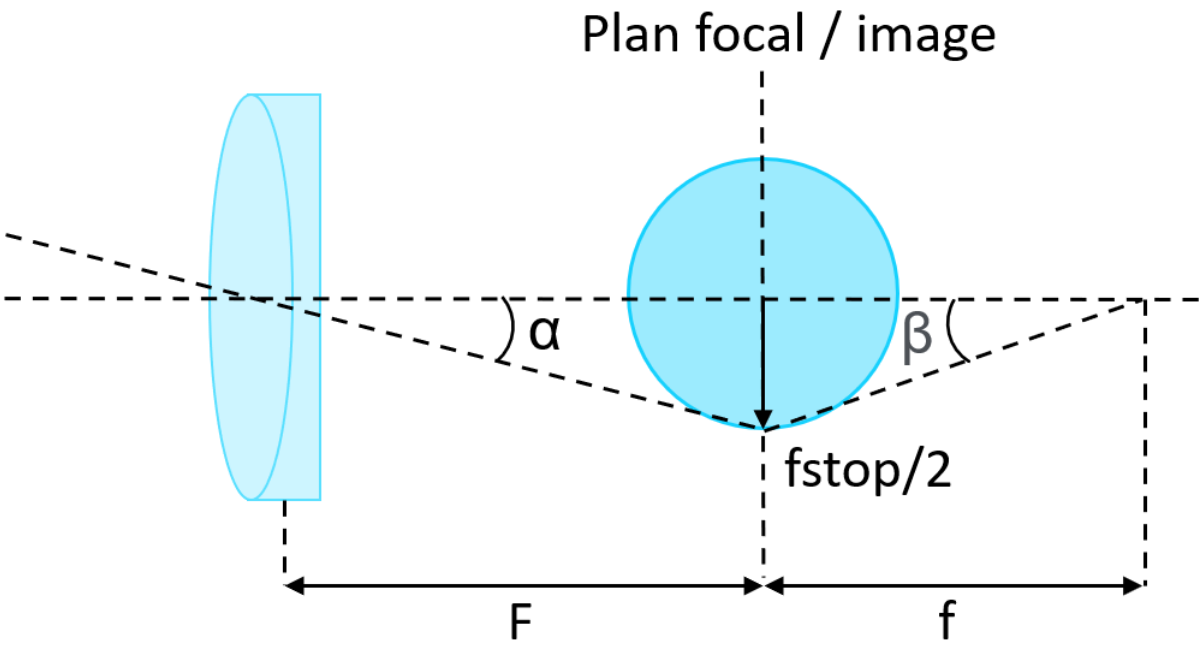
$$\tan(\text{TFOV}/2) = \frac{d}{F} \quad \text{mais aussi} \quad \tan(\text{AFOV}/2) = \frac{d}{f}$$

$$\frac{\tan(\text{AFOV}/2)}{\tan \text{TFOV}/2} = \frac{F}{f} \quad \text{pour de petits angles comme TFOV} \quad \tan x \approx x$$

$$\frac{\tan(\text{AFOV}/2)}{\text{TFOV}/2} = \frac{F}{f}$$

$$\text{TFOV} = \frac{f}{2F} \times \tan(\text{TFOV}/2)$$

TFOV / AFOV



Credit : J.G. Gricourt

Calcul de AFOV indépendamment de TFOV :

$$\tan \frac{\beta}{2} = (d/2)/f \quad \text{lorsque les angles sont petits : } \tan \alpha \approx \alpha$$

$$\tan \frac{\text{AFOV}}{2} = \frac{\text{fstop}}{2f}$$

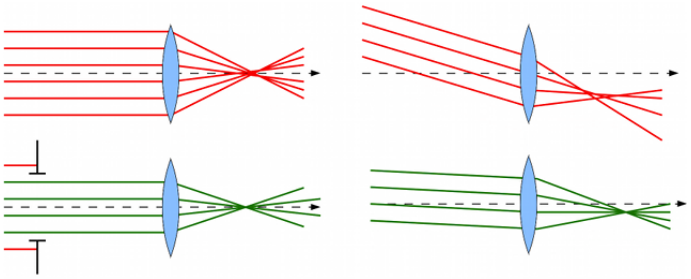
Calcul de TFOV indépendamment de AFOV :

$$\tan\frac{\alpha}{2} = (d/2)/F \quad \text{lorsque les angles sont petits : } \tan\alpha \approx \alpha$$
$$\frac{\alpha}{2} = (d/2)/F$$
$$\alpha = d/F \quad \text{lorsque d = fstop de l'oculaire utilisé, } \alpha \text{ est alors l'angle du champ correspondant}$$
$$\alpha = \text{fstop}/F$$
$$\alpha(°) \times \pi/180 = \text{fstop}/F$$
$$\text{TFOV}(°) = 57.3 \times \text{fstop}/F$$

Conditions de Gauss désigne une propriété d'un système optique qui peut être considéré stigmatique et aplanétique lorsque certaines conditions sont respectées :

1. L'angle d'incidence des rayons par rapport à l'axe optique sont petits (objets à l'infini) donc $\tan\alpha \simeq \alpha$
2. Les rayons incidents restent proches de l'axe optique (on pose un diaphragme si nécessaire).

Les conditions de Gauss



Credit : Observatoire de Paris

De manière générale ce sont ces conditions qui permettent d'obtenir des images de bonne qualité à partir d'instruments courant comme les lunettes ou les télescopes.

Cercle image désigne le CPL projeté sur le capteur (e-g sur le plan focal), c'est à dire la zone illuminée à 100% du champ produit par l'instrument.

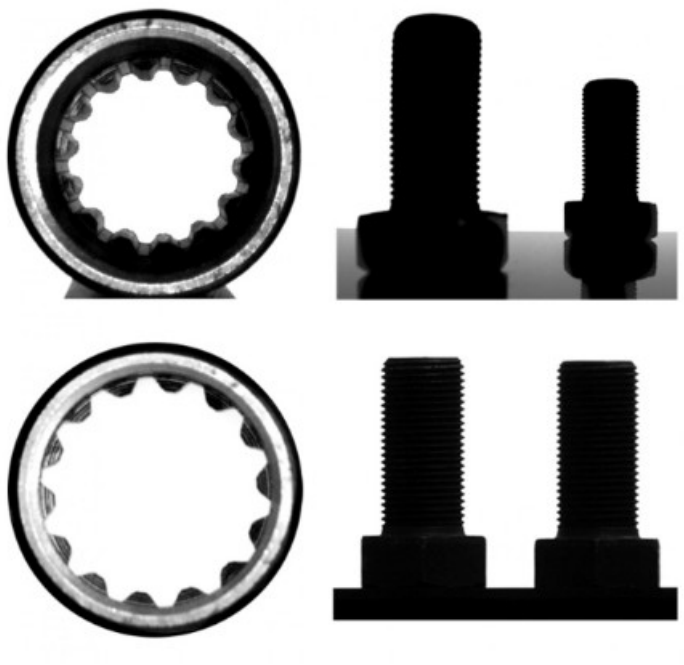
Cône de Lumière ou "Light Cone" désigne le cône de lumière qui touche la lentille arrière de l'oculaire lorsque que la MAP est réalisée. Plus le rapport F/D de l'instrument est court plus l'angle d'incidence des rayons est élevés. Des télescopes courts $F/D \leq 4$ démultiplie l'astigmatisme hors axe de l'oculaire ainsi que l'aberration de sphéricité qui peuvent devenir prépondérant [184] [3] d'où l'importance d'utiliser des oculaires de grande qualité sur des télescopes courts $F/D \leq 4$, tels que : Pentax XW, Tele Vue Ethos, Tele Vue Delos, Tele Vue Nagler. Un angle d'incidence plus élevé rend aussi la mise au point plus sensible (la course du tube du porte-oculaire sera plus courte).

Clarté est une notion controversée et parfois utilisée à mauvais escient par dans les encarts publicitaires. Une définition communément admise est que la clarté vaut : $C = (D/d)^2$ où d représente le diamètre maximale de la pupille de l'oeil (dans l'obscurité) et D le diamètre de l'instrument. La clarté est aussi le terme représenté dans la formule de calcul de la différence magnitude de 2 instruments par exemple : $\Delta m = +2.5 \times log(C)$.

3. Attention l'astigmatisme peut aussi survenir en cas de plan focal incliné, le "Tilt"

Télécentrique désigne un objectif pour lequel l'image d'un objet ne change pas de dimension en fonction de la distance à l'objectif, les perspectives sont alors écrasées. Ce type d'objectif est principalement utilisé dans l'industrie car les images produites permettent de mesurer ou de valider très précisément des pièces en cours de production [682].

Photo avec objectif Télécentrique



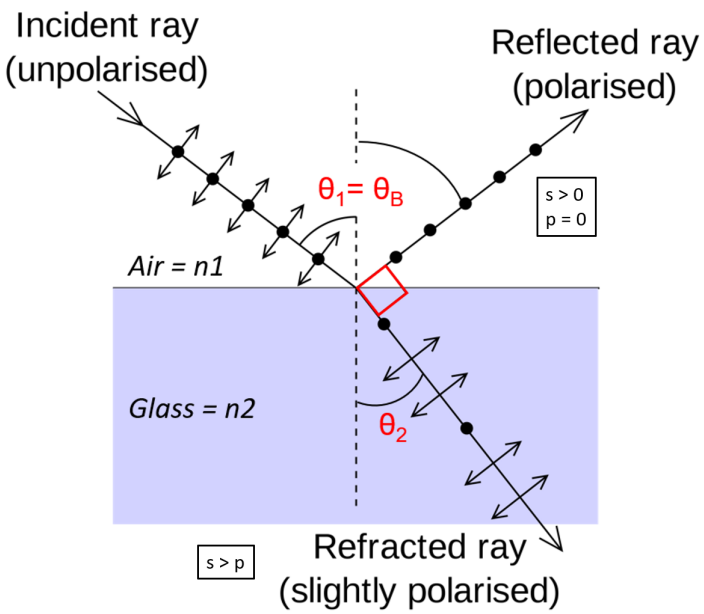
À gauche : une cannelure interne d'un objet cylindrique, vue à travers une lentille normale (en haut) et une lentille télécentrique (en bas).

À droite : deux vis à métaux identiques séparées de 100 mm, vues à travers une lentille normale (en haut) et une lentille télécentrique (en bas).

Credit : Opto Engineering

Brewster's Angle désigne l'angle d'incidence produisant de la lumière non polarisée. La lumière naturelle est composée d'une partie de lumière polarisée T orthogonalement au plan d'incidence et de lumière polarisée // parallèle au plan d'incidence. La lumière frappant un dioptre par exemple la vitre d'une fenêtre sera à la fois diffractée et marginalement réfléchie par le dioptre c'est la réflexion vitreuse. Le faisceau réfléchi est constitué de lumière 100% polarisée s et le faisceau transmis est constitué de lumière partiellement polarisée (de type s et de type ρ). L'effet est maximal lorsque l'angle entre le rayon réfléchi et le rayon diffracté vaut 90° dans ce cas par déduction $\theta_1 + \theta_2 = 90°$ où θ_1 est l'angle du rayon incident et θ_2 l'angle du rayon transmis. La valeur de l'angle de Brewster vaut alors : $\theta_B = \arctan(\frac{n_2}{n_1})$ sachant que $\theta_B = \theta_1$ où n_1 et n_2 sont les indices de diffraction des milieux de part et d'autre du dioptre (voir la loi de Snell Descartes). Lorsque le dioptre est une lentille on obtient $n_1(\text{air}) = 1$ et $n_2(\text{verre BK7}) = 1.52$ alors l'angle de Brewster vaut 56.6°. A l'angle de Brewster il y a précisément annulation de la polarisation ρ du rayon transmis, on dit alors que la lumière est complètement "polarisée". Un filtre polarisant simple placé devant ce flux lumineux réfléchi peut atténuer plus fortement ce flux (selon l'orientation du filtre) que sur un flux partiellement polarisé.

Angle de Brewster



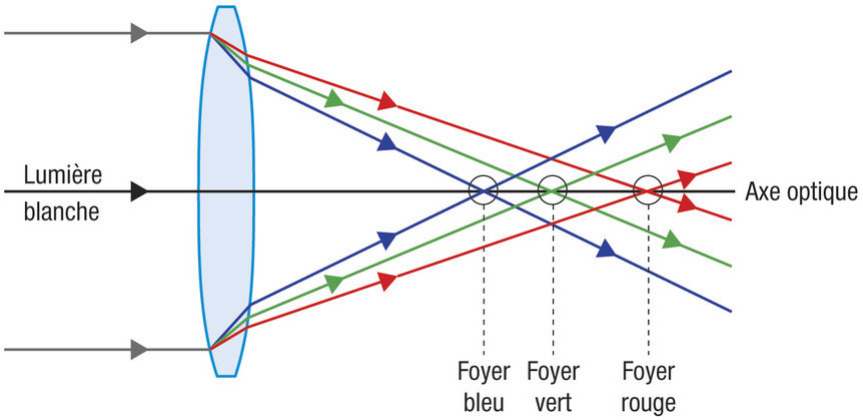
Credit : Wikipedia

5.5 Les Aberrations

Les systèmes optiques à base de miroirs ou de lentilles sont tous sujet aux aberrations car aucun systèmes n'est parfait. On peut lister un certains nombre ici [571, 77] :

- Aberration chromatique (LCA = "Longitudinal Chromatism" et TCA = "Transverse Chromatism")
- Sphérochromatisme
- Aberration de sphéricité (sur-correction et sous-correction)
- Astigmatisme
- Coma (télescope Newton)
- Courbure de champ (lunettes courtes)
- Distorsion de champ (coussinet, barillet)

Aberration Chromatique ou "Chromatisme" ou "Dispersion des Couleurs" "Color Blur" ou "Color Fringing" ou "Chromatic Aberration" ou "CA" désigne un défaut optique produit les formules optiques à base de lentilles : les lunettes, les oculaires, les SCT (lames de fermeture). Attention, on parle bien ici de chromatisme longitudinal (LCA). Le chromatisme apparaît lorsque les points de focalisation de différentes longueurs d'onde ne coïncident pas exactement.



Credit : Gilles Boisclair

Les causes de la formation de cette aberration sont :

1. La dispersion des couleurs au passage d'une lentille de verre, car l'indice de réfraction du verre varie avec la longueur d'onde (voir le "Nombre D'Abbe").
2. La dispersion atmosphérique au voisinage de l'horizon (en dessous de 25°) en raison de l'épaisseur de la couche d'air traversée qui est plus importante (selon l'axe vertical).

Les télescopes exclusivement à base de miroirs ne produisent aucun chromatisme (en dehors de l'oculaire). D'après l'ouvrage "Telescope Optics" de Rutten & Van Venrooij page 59, pour une lunette, le spectre secondaire ou "Secondary Spectrum" vaut : SS = $\Delta F/F$ où ΔF est la différence de focale du rouge et du bleu lorsque la mise au point est réalisée sur le vert.

D'après le livre "Telescope Optics" - Rutten & Van Venrooij page 59.

— Le diamètre de la figure de Airy en arcmin Airy = $280/D_{\text{mm}}$
— Le diamètre de la figure de Airy en mm vaut Airy = $(F/D)/735$.

Note : $Airy_{mm} = \frac{Airy_{arcmin}}{206265} \times F$.

Classement par "Color Blur" [172]

Formule : CB = $\frac{\text{Blur}}{\text{Airy}} = \frac{D \times \text{SS}}{\text{Airy}}$, où D le diamètre en mm.

Autre écriture trouvée dans les forums : CB = $\frac{735 \times D}{N \times \text{LCE}}$ où LCE = Longitudinal Color Error = 1/SS, N = focal ratio = F/D et le diamètre D en mm [417]

On peut trouver les valeurs LCE sur les annotations du graphe de Roland Christen (Nombre d'Abbe vs PF,e) pour différents types de doublets [418, 634]

LCE

Verre Crown / Flint	LCE
Fluorite / H-KF6	12285
FPL-53, FPL-55, FCD-100, OK4 / Lanthanum	11000 (*)
FPL-51, FCD-1 / Lanthanum	6670
BK7 / F4	1867

Note : (*) = estimation.

Définitions APO, ED, Semi-APO et Achromate :

Niveaux de Color Blur

Instrument	CB
Photographique APO - Triplet APO - Doublet Fluorite	Blur $\leq 1.0 \times$ Airy
Visual APO - Doublet ED FPL-53	$1.0 <$ Blur $\leq 2.0 \times$ Airy
Semi APO - Doublet ED FPL-51	$2.0 <$ Blur $< 3.0 \times$ Airy
Achromate classique - Doublet Bak7	Blur $\geq 3.0 \times$ Airy

Ici ce sont des valeurs moyennes de verres appariés et les valeurs de CB peuvent varier jusqu'à 10% selon les combinaisons de verres et encore bien plus lorsqu'on allonge les focales, sinon voir le graphe de Roland Christen pour des valeurs plus précises. De plus, on ne tient pas compte du sphérochromatisme particulièrement important pour les lunettes courtes.

De manière générale : CB $\propto \frac{D^2}{F}$

Classement par le RC index (Conrady) [14]

Formule A : $\mathrm{RC}_{\mathrm{index}} = N/D$ où D est exprimé en pouce (N = F/D).

Formule B : $\mathrm{RC}_{\mathrm{index}} = 25.4 \times N/D$ où D est exprimé en mm (N = F/D).

Il existe différents standards d'exigence de correction chromatique [424] :

1. Sidgwick standard : $\mathrm{RC}_{\mathrm{index}} > 3$, correspond à une erreur sur le front d'onde maximale de $\lambda/2$, soit un CB ≤ 3.2
2. Conrady standard : $\mathrm{RC}_{\mathrm{index}} > 5$, correspond à une erreur sur le front d'onde maximale de $\lambda/4$, soit un CB ≤ 2.0

Equivalent Chromatic Aberration of Achromatic Refractors

			F	O	C	A	L		R	A	T	I	O	
obj/mm	obj/in.	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	18	20
60mm	2.36	1.27	1.69	2.12	2.54	2.966	3.39	3.81	4.24	4.66	5.08	6.36	7.63	8.47
70mm	2.75	1.09	1.45	1.8	2.18	2.54	2.9	3.27	3.63	4	4.36	5.45	6.54	7.27
80mm	3.14	0.96	1.27	1.59	1.91	2.229	2.55	2.87	3.18	3.5	3.82	4.78	5.73	6.37
90mm	3.54	0.85	1.13	1.41	1.69	1.977	2.26	2.54	2.82	3.11	3.39	4.24	5.08	5.65
100mm	3.93	0.76	1.02	1.27	1.53	1.781	2.04	2.29	2.54	2.8	3.05	3.82	4.58	5.09
120mm	4.72	0.64	0.85	1.06	1.27	1.483	1.69	1.91	2.12	2.33	2.54	3.18	3.81	4.24
127mm	5	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	3	3.6	4
152mm	6	0.5	0.67	0.83	1	1.167	1.33	1.5	1.67	1.83	2	2.5	3	3.33

Conrady standard CA ratio>5
Sidgwick standard CA ratio>3
5" f/9 equivalent CA ratio>1.78
6"f/8 equivalent CA ratio>1.25

Visual levels of Chromatic Aberration
Minimal or no CA
Filterable levels of CA
Unacceptable levels of CA
f/ratio divided by objective diameter in inches=CA ratio

Credit : Chris Lord - CN / A. E. Conrady - The Classical Achromat

Lorsqu'on prend le standard de Conrady $\mathrm{RC}_{\mathrm{index}} = 5$ le diamètre optimal d'une lunette achromatique de focal f doit vérifier : $D_{\mathrm{opt}} \leq \sqrt{5 \times f}$ où f la focale et D le diamètre en mm.

Le calcul exact du RC Index [799, 537]

Formule : $\mathrm{RC}_{\mathrm{index}} = 1000 \times \frac{|F|+|C|}{2} / \left(2 \times e \times N^2\right)$ où le point de focus de référence est sur $e = 546.07 \mu$m.

Il faut calculer les distances entre les lignes de Fraunhofer F,e et C sur l'axe optique (pour un calage classique de lentille F-C).

1. $F = |F_x - e_x|$ la distance algébrique entre le meilleur focus de la ligne F et le meilleur focus la ligne e en μm
2. $C = |C_x - e_x|$ la distance algébrique entre le meilleur focus de la ligne C et le meilleur focus la ligne e en μm

Note : le meilleur focus de l'instrument est en général proche de $e = 546.07 \mu m$ donc la valeur e_x vaut une valeur très petite en μm soit en positif, soit en négatif. On peut aussi dériver la formule du RC Index en prenant d'autres calages chromatiques en changeant F et C selon que l'on prend en compte la sensibilité visuelle pour certaines planètes ou bien la sensibilité d'un capteur photographique utilisé en mode "Lucky Imaging" où la turbulence à moins d'effet même si le calage est dans le vert plutôt que le Jaune Orange.

Classement des lunettes par leur RC index :

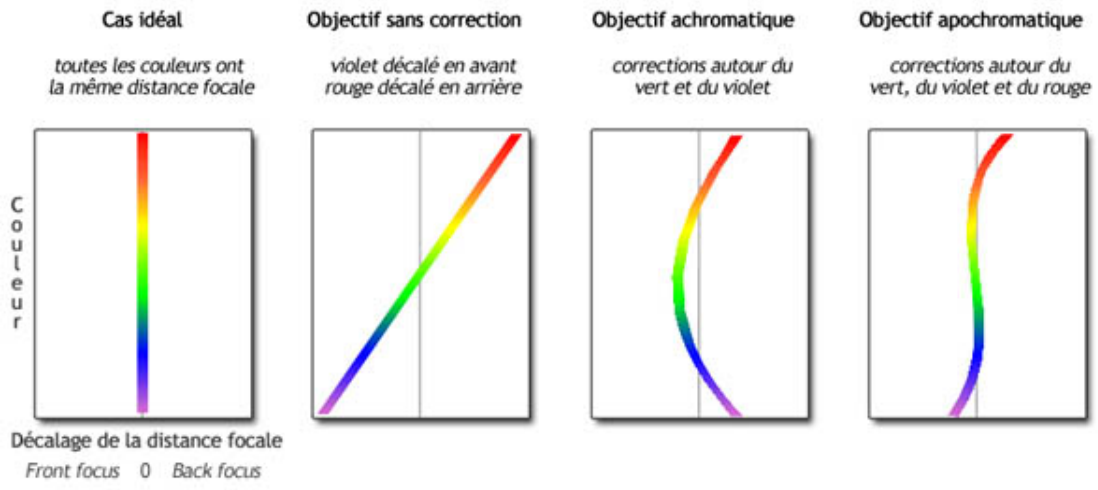
1. Photographic APO = true APO = triplet, $0 < \mathrm{RC}_{\mathrm{index}} \leq 1.0$
2. Semi-APO et ED, $1.0 < \mathrm{RC}_{\mathrm{index}} \leq 2.0$
3. Achromat, $2.0 < \mathrm{RC}_{\mathrm{index}} < 20.0$.

Calcule du RC Index effectif selon Lichtenknecker [346, 798] : $RC_{\mathrm{eff}} = \frac{RC}{AP}$ où AP est l'ouverture (Aperture), $AP(\mathrm{mm}) = D/G$

L'aberration chromatique est d'autant plus visible que :

1. le rapport F/D de la lunette est faible
2. le diamètre de la lunette est important
3. le grossissement utilisé est important

Cette aberration est aussi notoirement rendue plus visible sur les photos en longue pose qu'en visuel.



Credit : La photo en faits

Cas de correction d'un doublet :

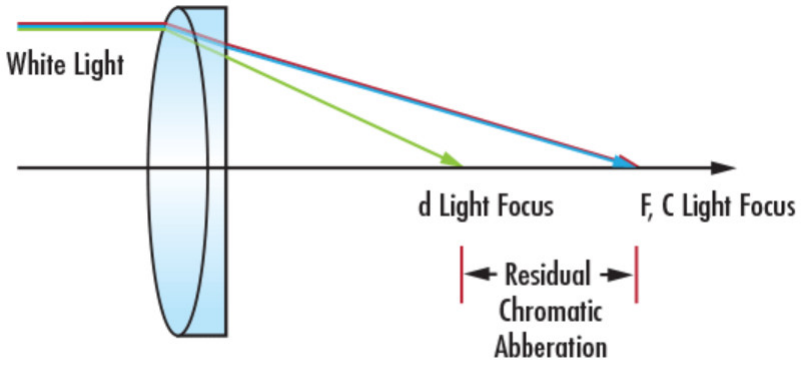


Figure 3: *Achromatic Doublet Lens Correcting for Primary Longitudinal Chromatic Aberration*

Credit : Edmund Optics

Le chromatisme comporte 2 composantes : LCA (vu précédement) et TCA.

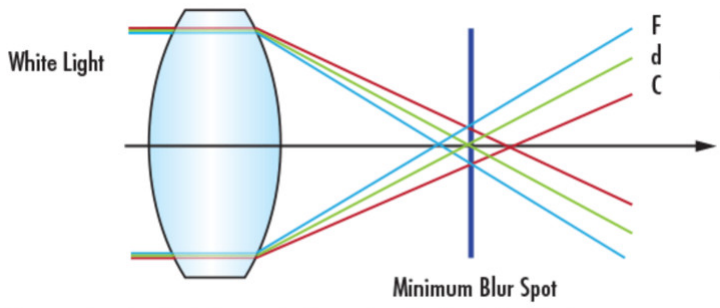


Figure 2: Longitudinal Chromatic Aberration of a Single Positive Lens

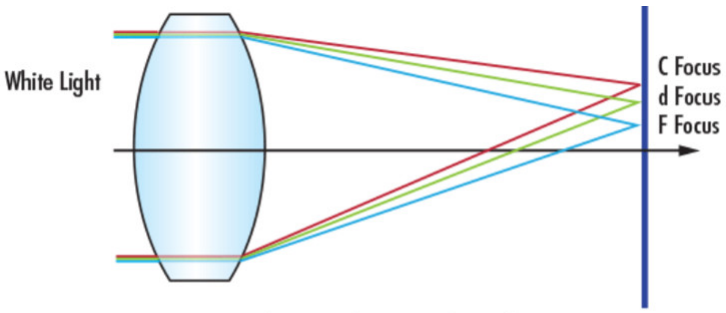
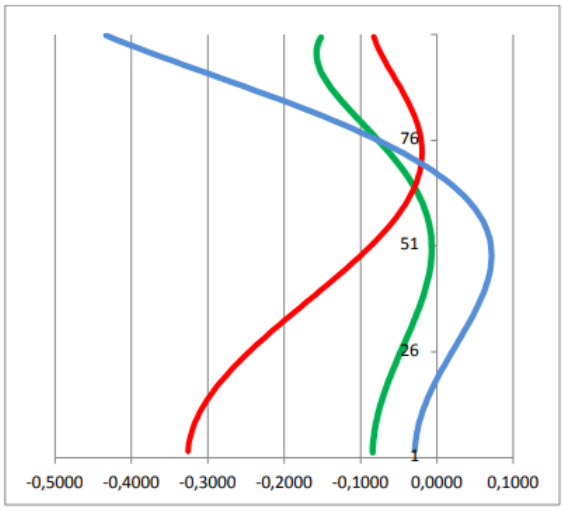


Figure 1: Transverse Chromatic Aberration of a Single Positive Lens

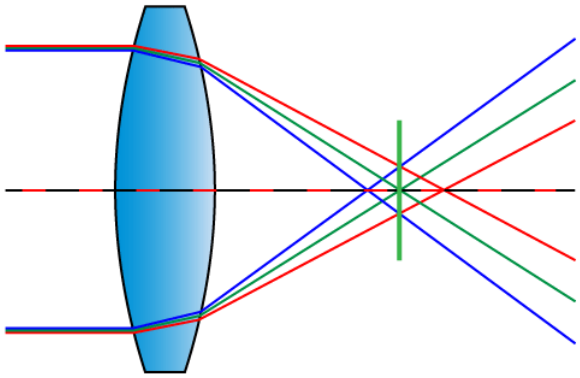
Credit : Edmund Optics

LCA ou “Chromatisme Longitudinal” ou “Longitudinal Chromatic Aberration” est le chromatisme sur l’axe optique. Dans ce cas, le rouge focalise plus loin que le bleu et la différence entre ces points focaux constitue le “Spectre Secondaire”. En pratique, le chromatisme devient visible lorsque de fausses couleurs apparaissent dans l’image sous forme de halos bleus ou verts / jaunes autour des objets lumineux, par exemple les étoiles brillantes, la Lune, les planètes ou bien des objets vus en contre-jour. En photo, on parle souvent du fameux liseré bleu autour des objets. L’autre effet du chromatisme est de réduire considérablement la résolution des images en dispersant l’énergie lumineuse des points image en fonction de la couleur.

Chromatisme longitudinal d’une lunette Skywatcher 150 APO



Credit : Airylab



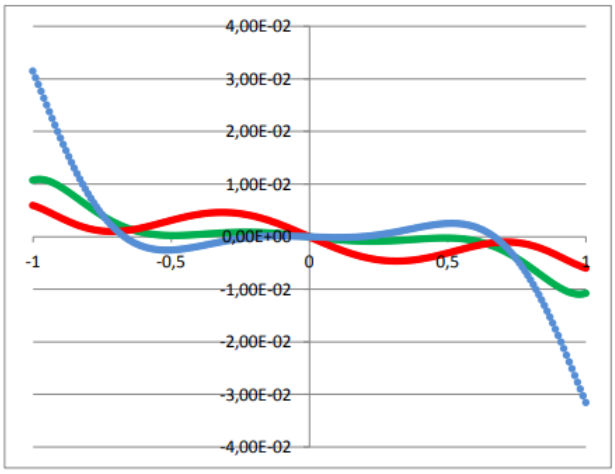
Credit : Nasim Mansurov

Note : la courbe montre pour une couleur donnée l’écart du foyer réel avec le plan focal de référence vertical passant par zéro sur l’axe optique. On fait varier la hauteur h des rayons frappant la lentille (les ordonnées du graphe) et l’on mesure l’écart (les abscisses du graphe) au point focal de référence, intersection du plan focal avec l’axe optique.

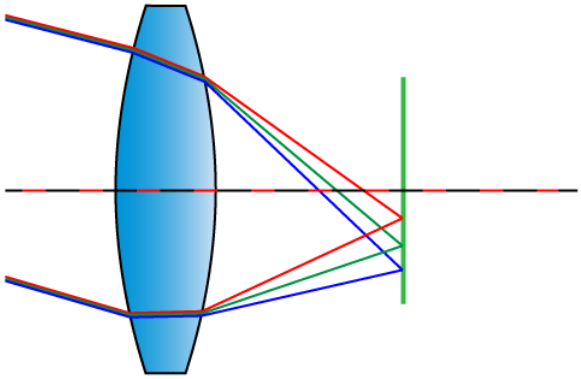
Avec l’ensemble des couleurs représentées, ce graphe montre le sphérochromatisme de la lunette.

TCA ou “Chromatisme Transversal” ou “Chromatisme Latéral” ou “Transverse Chromatic Aberration” est le chromatisme variant selon l’angle d’incidence des rayons lumineux. Le chromatisme augmente à mesure que l’angle d’incidence augmente.

Chromatisme latéral d'une lunette Skywatcher 150 APO



Credit : Airylab



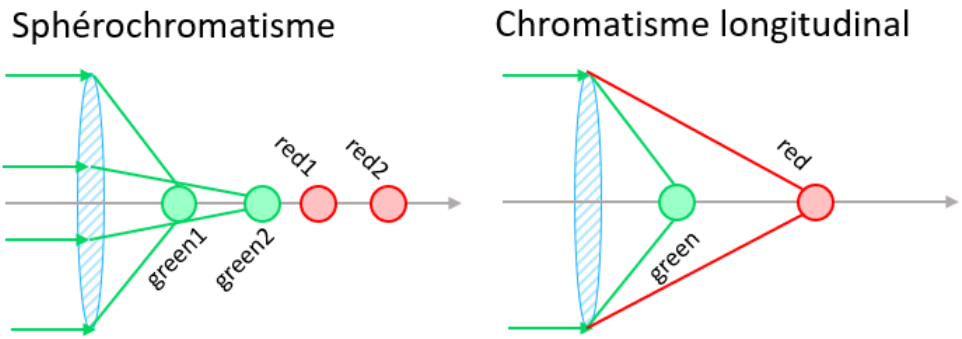
Credit : Nasim Mansurov

Note : la courbe montre pour chaque couleur l'écart du foyer réel avec le point focal théorique sur le plan focal. On fait varier l'angle d'incidence α des rayons frappant la lentille (les ordonnées du graphe) et on mesure l'écart (les abscisses du graphe) au point focal de référence sur le plan focal.

Historiquement il existe des oculaires conçus pour corriger le chromatisme latéral (CVD = Chromatische Vergrosserung Differenz) des lunettes achromatiques comme le Kellner.

Sphérochromatisme désigne une variation de l'aberration de sphéricité selon la longueur d'onde et concerne essentiellement les lentilles, car les miroirs ne présentent pas d'aberration chromatique. Contrairement à l'aberration chromatique longitudinale, il n'est pas possible de trouver un foyer où tous les rayons d'une même source et de même longueur d'onde. Cette aberration nuit directement à la résolution des images en augmentant la dimension du point image (la figure de Airy) au point de focus considéré (arbitraire). Aussi, il est en général impossible d'obtenir une bonne correction pour toutes les longueurs d'onde sauf pour certaines lunettes exceptionnelles. Attention l'absence de sphérochromatisme n'implique pas forcément l'absence de chromatisme. Ainsi dans ce cas, même si chaque point de focus produisent une figure de Airy parfaite, ils ne sont pas nécessairement tous confondus sur le même plan focal.

Sphérochromatisme vs Chromatisme



Credit : J.G. Gricourt

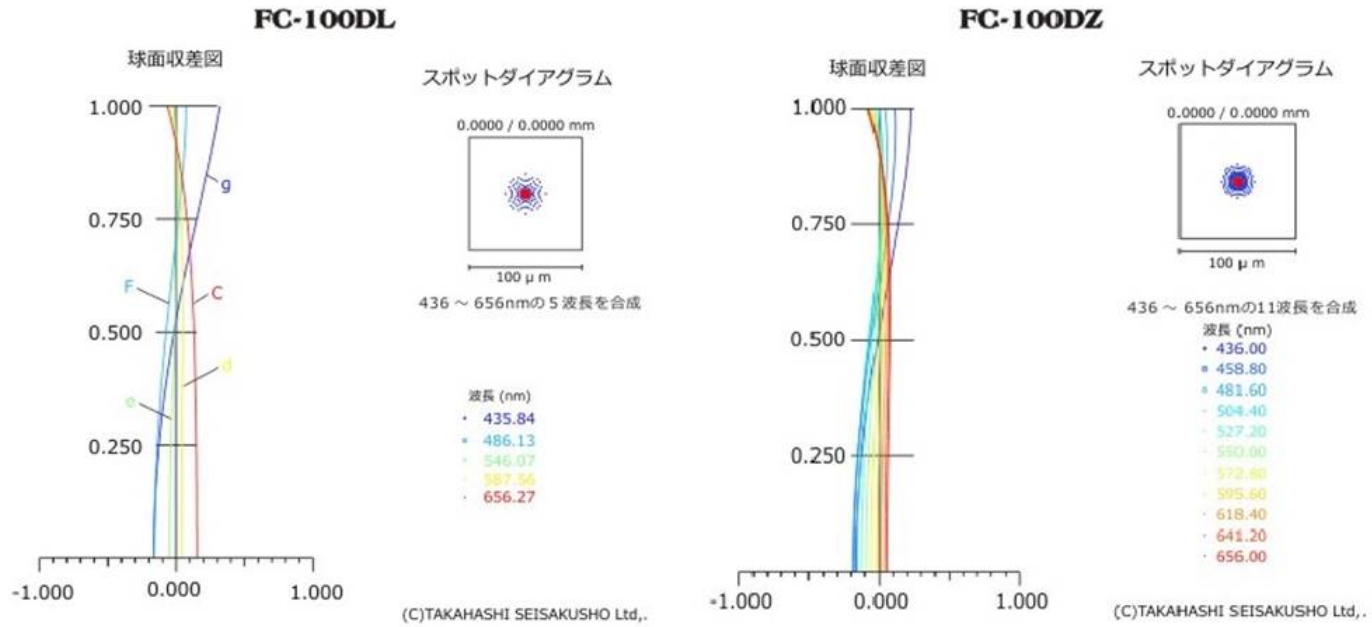
Cette aberration est produite par :

— Les lunettes courtes dont le F/D est inférieur à 7
— L'utilisation de renvoi coudé à prisme en verre avec des lunettes dont le F/D est inférieur à 7-8

Dans le cas des lunettes courtes pour corriger cette aberration, il faut asphériser au moins une lentille du triplet ce qui n'est possible que pour les triplets "Air Spaced" (exclus donc les "Oil Spaced").

En général pour les lunettes ou les SCT (via la lame de Schmidt) la correction est calée sur la longueur d'onde à laquelle l'oeil est le plus sensible, 540 nm (le vert) pour laquelle le point de focus est le plus petit. Certains objectifs de lunettes dédiés au solaire sont conçus pour complètement corriger le sphérochromatisme sur la longueur d'onde $H\alpha$. La courbe de sphérochromatisme montre la position du point de focalisation pour différentes couleurs, et cela, depuis le point 0 (le point focal arbitraire) jusqu'au bord du champ (axe des ordonnées exprimé °). Les objectifs photo très ouverts sont sujets au sphérochromatisme mais celui disparait dès lors que l'on ferme un peu le diaphragme (l'ouverture).

Longitudinal spherical aberration



Credit : Takahashi - FC-100DL et FC-100DZ

Vladmir Sacek à dit à propos de la FC100-DZ : *The polychromatic Strehl (photopic, 430-670m) is 0.975 at its limit. Needles to say, this particular match does qualify as a "true apo".* [786]

Comparaison avec d'autres aberrations similaires à focale constante, Δfocus = écart de mises au point :

— Chromatisme longitudinal : $\Delta\text{focus} \propto \lambda$
— Aberration de sphéricité : $\Delta\text{focus} \propto F/D$
— Sphérochromatisme : $\Delta\text{focus} \propto \lambda$ et F/D

Le sphérochromatisme devient l'altération dominante sur les lunettes courtes $F/D < 7$ que celles ci soient achromatiques ou APO, il s'agit de la courbure ou l'écart à la verticale des couleurs sur le graphique.

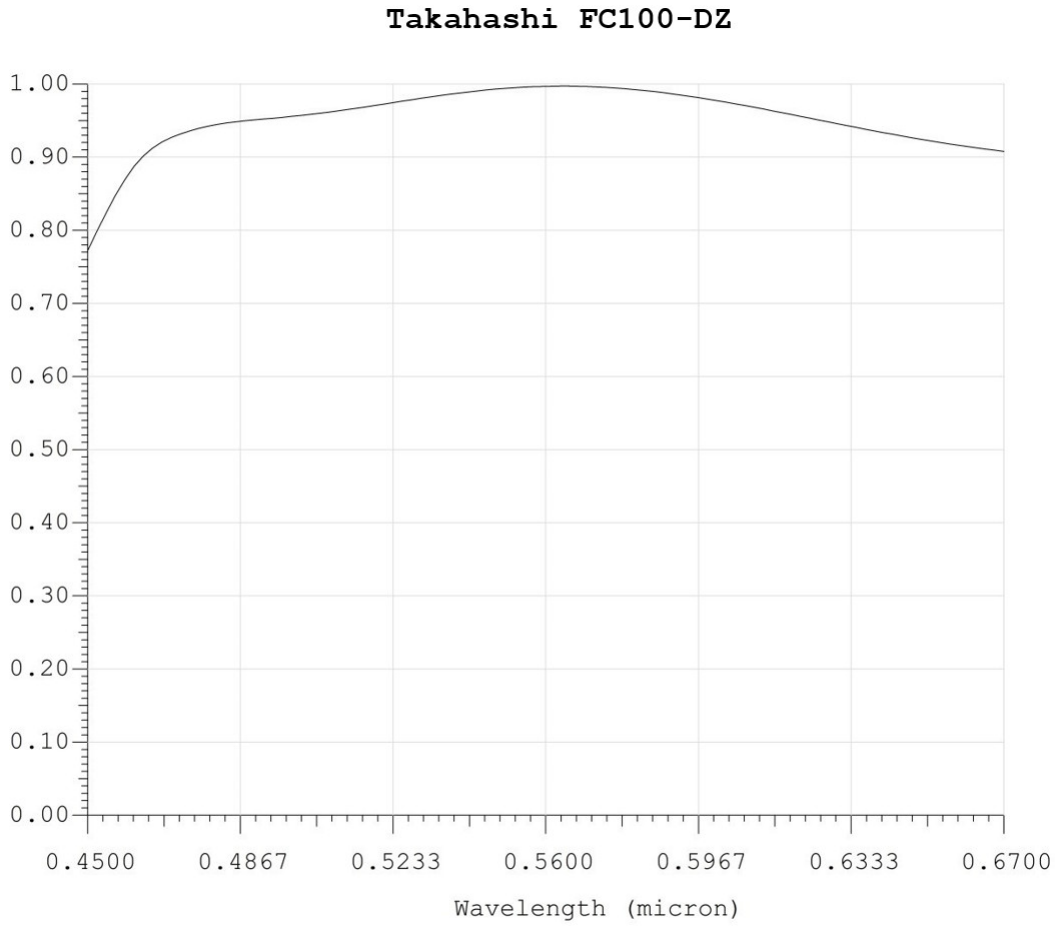
Le sphérochromatisme modifie aussi le Strehl de l'objectif qui dépend aussi de la longueur d'onde considérée.

Il y existe 2 type graphes couramment publiés [475, 321] :

— Le graphe du “Polystrehl” où le point de focus est réalisé sur le vert (en général) ou tout autre couleur pour laquelle le “Best Focus” toutes couleurs confondues sera le meilleur (la couleur pour laquelle le sphérochromatisme sera minimal).
— Le graphe de “Strehl Polychromatique” où le point de focus est bien réalisé sur chaque couleur individuellement.

Une courbe de “Strehl Polychromatique” plate sur une grande plage de longueur d’onde est la caractéristique d’une lunette APO.

Un exemple de graphe “Polystrehl” sur le best focus



Credit : Takahashi

Ce graphe montre pour un point de focus réalisé sur la couleur de référence (le vert = la ligne e ici) comment évolue le Strehl des autres couleurs sans retoucher ce point de focus choisi. Seules les lunettes comportant une lentille en Fluorite sont capables de maintenir un Strehl élevé sur une grande largeur de spectre sans retoucher au focus.

En solaire $H\alpha$ il faut regarder le Strehl au point de focus sur la raie $H\alpha$. Si au point de focus du vert le Strehl de la couleur rouge à 656 nm s’effondre pour certaines lunettes, celui-ci remonte nettement (0.9 et plus) lorsque le point de focus choisi est 656 nm à la place du vert.

En général, les lunettes ont un Strehl meilleur dans le rouge que dans le bleu.

Des exemples de design permettant d’obtenir un très bon “Strehl Polychromatique” (point de focus en dessous de 25 micron) [630] :

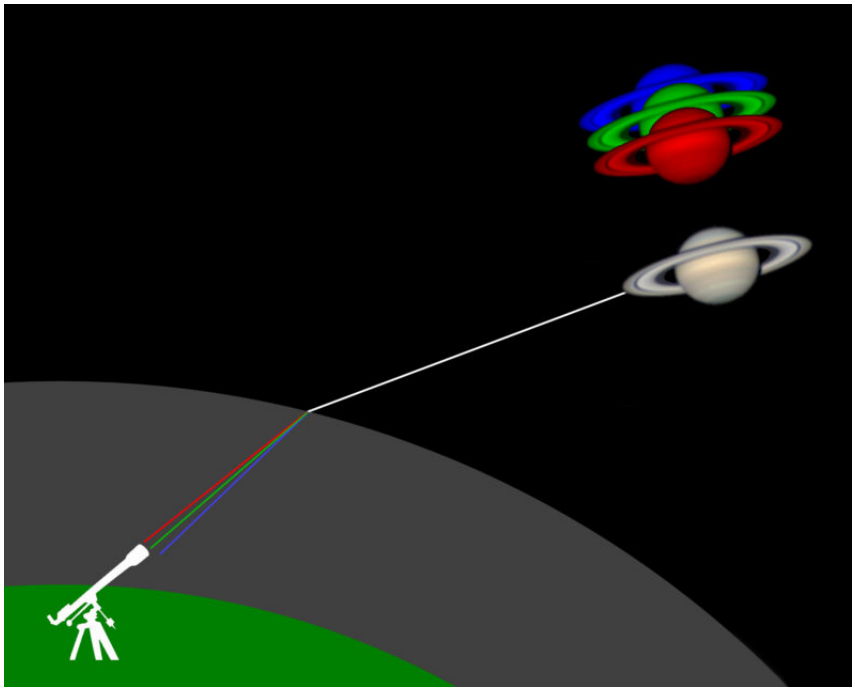
Designs de lunette type

Lunette	Plage d'utilisation
Fast 6"F8 Cde achro	550 - 650 nm
Long 6"F15 CeF achro	480 - 650 nm
Fast 6"F9 ED doublet	450 - 650 nm
Fast 6" fluorite doublet	420 - 1000 nm
Fast 6" FPL52/53 triplet	380 - 1000 nm
Fast 6" fluorite triplet	360 - 1000 nm

Dispersion Chromatique désigne l'effet de décomposition de la lumière produit par une épaisseur de verre au passage d'une lumière blanche. La dispersion est plus apparente visuellement lorsque la lumière traverse plusieurs dioptre comme dans le cas d'un prisme en verre. L'importance de cette dispersion dépend de l'indice de réfraction du verre. La réfraction du verre n'est elle même pas linéaire et dépend de la longueur d'onde de la lumière traversée selon l'équations de Sellmeier. On qualifie cette dispersion par le nombre d'Abbe $\nu_d = \frac{nD-1}{nF-nC.}$. calculé d'après les indice de réfraction du verre selon 3 couleurs : D = sodiumn à 589.3nm, F = hydrogène à 486.1 nm, C = hydrogène à 656.3 nm.

La dispersion Atmosphérique désigne le phénomène de dispersion des couleurs provoquée par l'atmosphère qui se comporte alors comme un prisme géant. Il ne faut pas confondre ce phénomène avec la réfraction atmosphérique qui agit en même temps que la dispersion mais dont l'effet est de dévier les rayons et donc l'image de l'étoile ou de la planète observée. La dispersion est d'autant plus importante que l'étoile ou la planète observée est proche de l'horizon.

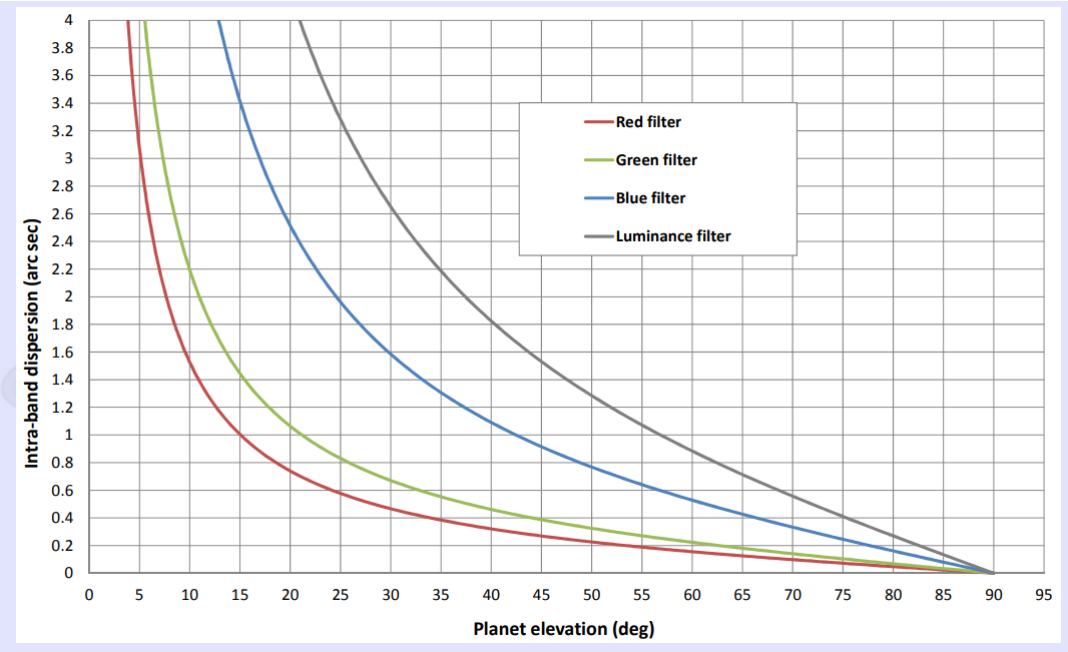
Effet de la dispersion atmosphérique



Credit : Martin R Lewis - Skyinspector

La dispersion dépend donc de la longueur d'onde et induit l'étalement du point image (la PSF).

Mesure du point image dispersé selon la longueur d'onde



Credit : Jean-Pierre Prost

On peut relier la dimension du point image dispersé à la résolution théorique de l'instrument pour en déduire à en dessous de quelle hauteur sur horizon la dispersion atmosphérique commence à affecter la résolution de l'instrument. De manière général l'effet de la dispersion est bien moindre que celui de la turbulence atmosphérique. De plus la dispersion atmosphérique est plus importante dans le bleu que dans le rouge.

Hauteur minimum de la planète non affectée par la dispersion (critère de Dawes = $R = 116/D$)

Instrument diameter	Min elevation Blue	Min elevation Green	Min elevation Red	Min elevation Luminance
100 mm	45°	19°	12°	55°
150 mm	56°	28°	18°	65°
200 mm	63°	35°	23°	71°
250 mm	68°	41°	28°	74°
350 mm	74°	51°	36°	79°
400 mm	76°	54°	40°	80°
500 mm	79°	60°	46°	82°

Credit : Jean-Pierre Prost

Nombre D'Abbe ou "RPD" ou "Relative Partial Dispersion" "Coefficient de Dispersion" ou "Constringence" quantifie la capacité d'un verre à disperser les différentes longueurs d'onde du spectre. Il quantifie l'effet du chromatisme d'un verre.

Nombre d'Abbe : $\nu_d = \frac{nD-1}{nF-nC.}$.

Rappel :

- Indice de réfraction nD, dans la raie D du sodium à 589.3 nm
- Indice de réfraction nF, dans la raie F de l'hydrogène à 486.1 nm
- Indice de réfraction nC, dans la raie C de l'hydrogène à 656.3 nm
- Indice de réfraction ne, dans la raie e du mercure à 546.1 nm

Propriétés optique des verres [505, 692, 270, 349]

Matériau	Fabricant	Nombre d'abbe (ν_d)	Indice refrac. (n_d)
Fluoride (CaF2)	...	95	1.43
FPL-55	Ohara	95	1.44
FPL-53	Ohara	95	1.43
FCD-100	Hoya	95	1.44
OK-4	LZOS	92	1.45
Air	...	89	1.00
Barium fluoride (BaF2)	...	82	1.47
FPL-51	Ohara	82	1.50
FCD-1	Hoya	82	1.50
H-FK61	CDGM	82	1.50
Fused silica	...	68	1.46
BK7	Schott	64	1.52
Soda lime glass	...	64	1.52
ZKN7 (K)	Schott	61	1.51
Crown	Hoya	59	1.52
Water	...	56	1.32
Diamond	...	55	2.42
Lanthanum K	Schott	55	1.70
KZFS2 (K)	Schott	54	1.56
Lanthane (LaF2)	Schott	45	1.74
Flint	Hoya	36	1.63
Lanthanum F	Schott	35	1.75

En vert le groupe des "Extra low Dispersion glass" = ED et en rouge le groupe des "Super low Dispersion glass" = SD.

Note : le verre FPL-53 est désormais remplacé par le FPL-55 ou le FCD-100, car ce premier est cher, difficile à polir parce que trop tendre, en revanche il conviendra mieux placé au centre d'un triplet à huile pour gommer ses défauts de polissage [448].

Un verre pour lequel le nombre d'Abbe inférieur à 50 est considéré comme très dispersif comme le verre Flint. Le nombre d'Abbe est utilisé pour concevoir les doublets achromatiques ou ED ainsi que les triplets apochromatiques.

L'indice de dispersion partielle ou "Relative Partial Dispersion" [9, 783] :

En visuel : PF,e = $\frac{nF-ne}{nF-nC}$

En photo : Pg,F = $\frac{ng-nF}{nF-nC}$

On quantifie le spectre secondaire de 2 lentilles accolées par :

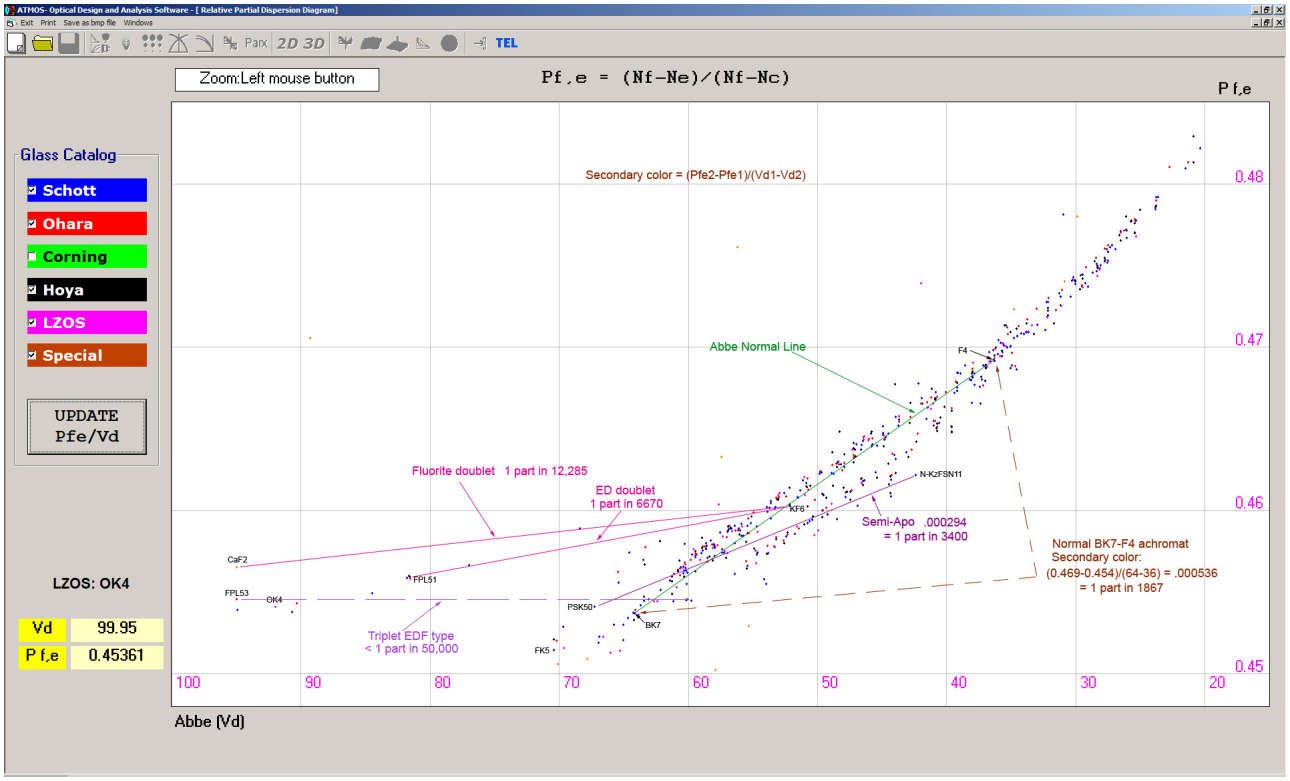
En visuel [634, 697] : SS = $\frac{\Delta \text{PF,e}}{\Delta \nu_d}$ alors $\Delta F = \frac{\Delta \text{PF,e}}{\Delta \nu_d} \times F$

En photo : SS = $\frac{\Delta \text{Pg,F}}{\Delta \nu_d}$ alors $\Delta F = \frac{\Delta \text{Pg,F,e}}{\Delta \nu_d} \times F$

Roland Christen à dit : *If two glasses have the same partial dispersion, then the resultant color error will be zero. However, to make a practical lens that has some realistic focal ratio, the dispersion Vd of the two glasses must be far apart, ideally 2 :1 or more.* [634]

Afin de supprimer le spectre secondaire dans un doublet, le nombre d'Abbe ν_d des verres appariés doivent être éloignés d'au moins d'un facteur 2 de même la différence d'indice de dispersion partielle doit être proche de zéro (verres sur la même droite horizontale).

Relative Partial Dispersion Diagram (RPD)



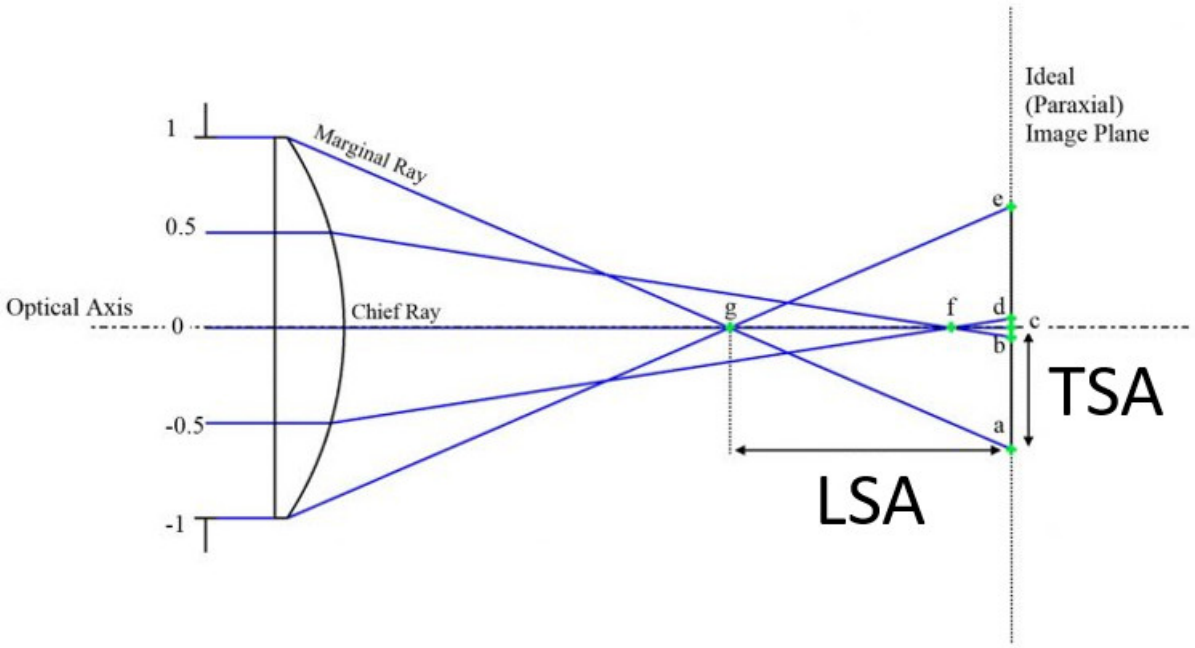
Credit : Roland Christen

Aberration de Sphéricité ou "Spherical Aberration" ou "LSA" ou "Lower Order Spherical Aberration" ou "Aberration Sphérique" ou "SA" désigne une aberration du front d'onde [4] impactant la netteté des points image sur l'axe optique. Il s'agit d'un défaut de focalisation, les rayons parallèles traversant la lentille ou bien réfléchis par le miroir n'arrivent pas tous au même point de focus. Un système optique parfait permet de transformer un front d'onde plan, par exemple celui formé par les rayons provenant d'une étoile située à l'infini parallèle à l'axe optique, en front d'onde sphérique. Tous écarts à la sphère induiront une aberration de sphéricité dans le cas où cet écart est constant sur la surface de révolution du miroir (ou de la lentille), sinon ce sera de l'astigmatisme si cet écart n'est pas constant.

Cette aberration comporte 2 composantes mesurables :

- LSA = "Longitudinal Spherical Aberration" qui mesure la distance entre les 2 points de focus extrêmes sur l'axe optique
- TSA = "Transversal Spherical Aberration" qui mesure la distance entre l'axe optique et le rayon, le point de contact du rayon émergent du point de focus le plus prêt de la lentille.

4. Voir polynômes de Zernike



Credit : Eckhardt Optics

La valeur de TSA dépend de la pupille d'entrée formée par le diaphragme derrière la lentille.

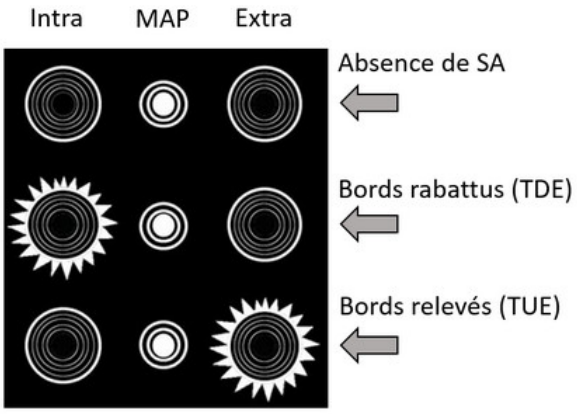
Cas du miroir sphérique [152, 655] :

- La composante longitudinale maximale (le long de l'axe optique) vaut : LSA $= -\frac{D^2}{8f}$
- La composante transversale maximale (le long de la perpendiculaire à l'axe optique) vaut : TSA $= \frac{D^3}{8f^2}$
- La dimension maximale du cercle de moindre confusion vaut : $r = \frac{D^3}{32f^2}$

Lorsqu'un instrument est stigmatique pour une couleur, LSA = TSA = 0.

L'aberration de sphéricité affecte la distribution de l'énergie dans la figure de Airy en déplaçant principalement l'énergie du centre vers les anneaux extérieurs comme e ferait une obstruction centrale de l'instrument, ce qui a pour effet d'augmenter la dimension du point image (la figure de Airy). Les images intra et extra focale d'une étoile visualisée à fort grossissement G = 2 fois le diamètre de l'instrument sont alors très différentes. Par exemple, dans le cas d'un miroir parabolique, tout écart à la parabole uniformément sur la surface de révolution du miroir induira de l'aberration de sphérique.

Star Test et aberration de sphéricité



Credit : Wikipedia

Dans le cas des lunettes ou des instruments ne focalisant naturellement pas toutes les couleurs au même endroit en raison de l'aberration chromatique les images intra et extra focale de l'étoile visualisée à fort grossissement peuvent être différente et ne pas nécessairement présager d'une optique présentant de l'aberration sphérique. C'est la cas des lunettes ED de grande qualité (FC-100DZ) ou des lunettes apochromatiques, où les couleurs focalisent presque au même point et donc interfèrent entre elles d'où une image intra focale différente de l'image extra focale même en l'absence d'aberration sphérique. En revanche une lunette achromatique est moins bien corrigée qu'une APO mais si celle ci ne présente pas d'aberration sphérique elle montrera une image intra focale identique à l'image extra focale car les couleurs étant éloignées celles ci n'interfèrent pas [640, 268].

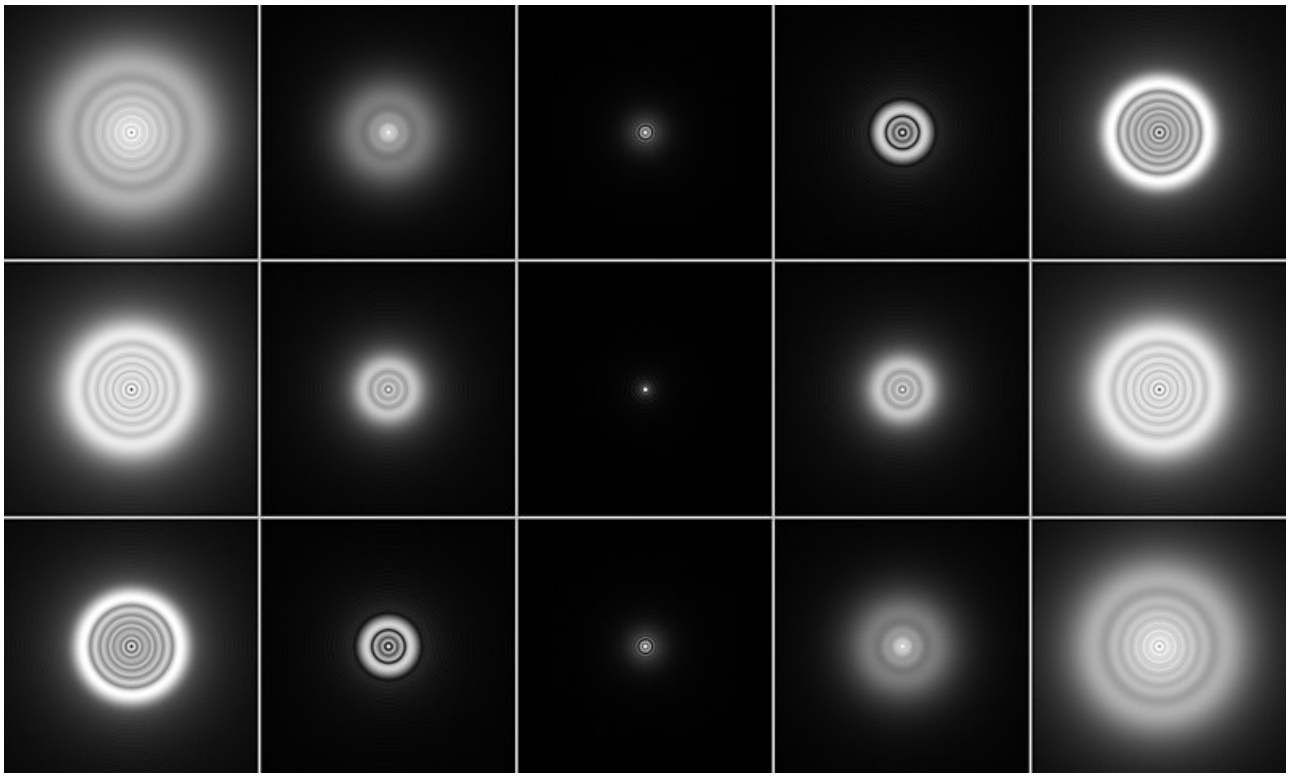
Descriptions des images vues au "Star Test" :

1. Les images intra et extra focales sont identiques et montrent l'absence d'aberration de sphéricité
2. L'image intra focale montre un anneau extérieur plus lumineux et des cercles intérieurs flous, c'est le cas typique le plus courant.
3. L'image extra focale montre un anneau extérieur plus lumineux et des cercles intérieurs flous, c'est le cas des miroirs sphériques

L'aberration de sphéricité se manifeste sur l'axe par un défaut de focalisation où le point focal est en réalité un cercle de moindre diffusion [5] à peine plus large que la figure de Airy [4]. L'observateur sollicite continuellement la molette de mise au point du porte-oculaire, ne trouvant pas de position satisfaisante. Toutefois, les longues focales seront moins affectées par l'aberration de sphéricité, car dans ce cas l'agrandissement du cercle de moindre confusion sera limité. Aussi, lorsque l'on s'écarte des conditions de Gauss (ou stigmatisme approché) et donc lorsque les rayons sont hors axe, cette aberration se transforme en astigmatisme, et cela, pour la plupart des optiques (objectifs ou miroirs). À F/D court, un oculaire inadapté montrera de l'aberration de sphéricité. La "Sur-correction" et la "Sous-correction" sont des formes d'aberration de sphéricité.

5. Ceci est équivalent au cercle de confusion pour qualifier la profondeur de champ en photographie

Simulation aberration de sphéricité



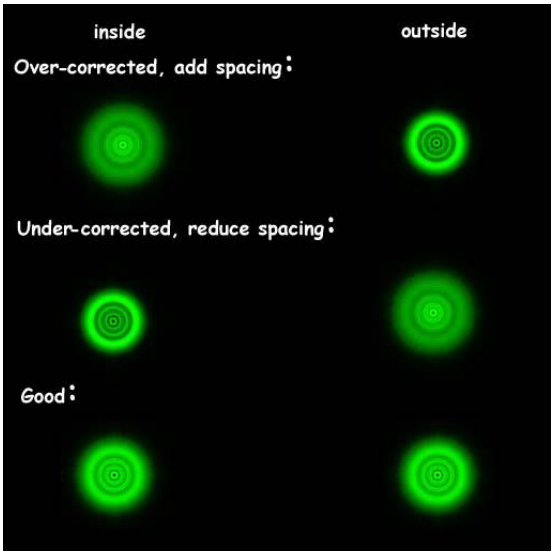
Credit : Wikipedia

Descriptions :

1. La première ligne montre des images défocalisées produites par un objectif sur-corrigé
2. La seconde ligne montre des images défocalisées produites par un objectif sans défaut
3. La troisième ligne montre des images défocalisées produites par un objectif sous-corrigé

Dans le cas des lunettes à base de doublets, l'espacement d'air entre les lentilles influence la correction :

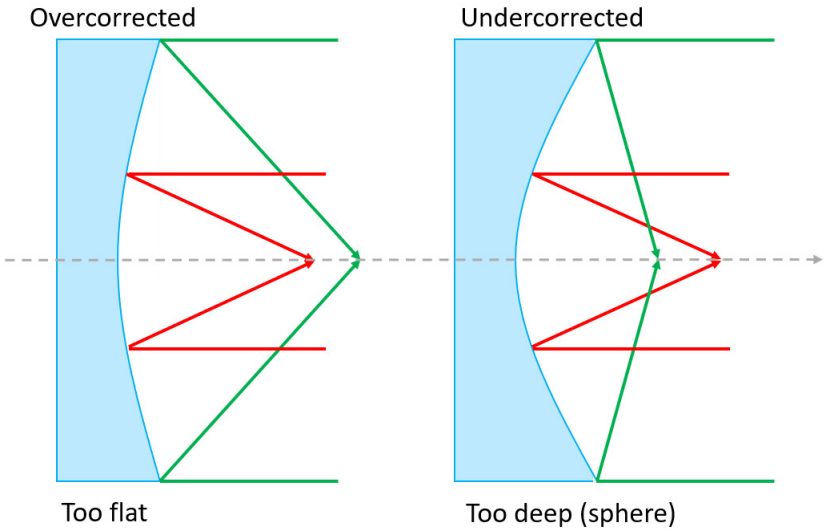
Lunette doublet et spacers



Credit : tubehead999

Sous-Correction ou “Undercorrected” désigne un défaut de focalisation d’un instrument. Il peut s’agir d’un objectif de lunette ou bien d’un miroir de télescope. Lors du processus de parabolisation du miroir sphérique = “Figuring”, le polissage n’a pas été suffisamment loin et la courbe du miroir est encore trop proche de la calotte sphérique initiale. Ce défaut conduit à introduire de l’aberration de sphéricité négative dans l’image où les rayons incidents frappant le bord du miroir convergent en un point plus proche du miroir que ceux frappant le centre du miroir. La sous-correction affecte la distribution de l’énergie dans la figure de Airy, l’image intra-focal montre des anneaux extérieurs plus brillants que les anneaux intérieurs, à l’inverse l’image extra-focal montre des anneaux intérieur plus brillants que les anneaux extérieurs. Ce défaut peut aussi apparaître lorsque le miroir en cours de parabolisation est contrôlé alors qu’il n’est pas encore à température, ceci conduit à produire un miroir sous-corrigé une fois utilisé alors qu’il est à température. Par définition tous les miroirs sphériques sont sous-corrigés ainsi que beaucoup de lunettes modernes de moyenne gamme [626].

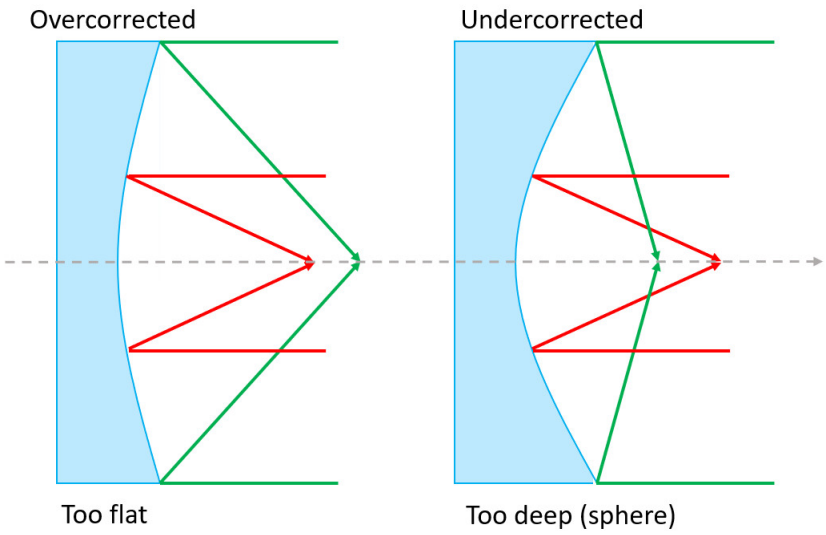
Correction miroir



Credit : J.G. Gricourt

Sur-Correction “Overcorrected” désigne un défaut de focalisation d’un instrument. Il peut s’agir d’un objectif de lunette ou bien d’un miroir de télescope. Lors du processus de parabolisation du miroir sphérique = “Figuring” du miroir sphérique, le polissage a été trop loin et la courbe du miroir est alors trop éloignée de la parabole (plus proche d’une hyperbole). Ce défaut conduit à introduire de l’aberration de sphéricité positive dans l’image où les rayons incidents frappant le bord du miroir convergent en un point plus éloigné du miroir que ceux frappant le centre du miroir. La sur-correction affecte la distribution de l’énergie dans la figure de Airy, l’image intra-focal montre des anneaux intérieurs plus brillants que les anneaux extérieurs, à l’inverse l’image extra-focal montre des anneaux extérieurs plus brillants que les anneaux intérieurs. Ce défaut peut aussi apparaître lorsque le miroir n’est pas encore à température et qu’il est en train de refroidir, car étant plus chaud que l’air ambiant, il est traversé par un gradient de température. Le bord du miroir se refroidit plus rapidement que le centre et le miroir se déforme, provoquant une déformation du front d’onde. Un défaut que l’on appelle aussi “Rolled Off Edge” [512].

Correction miroir



Credit : J.G. Gricourt

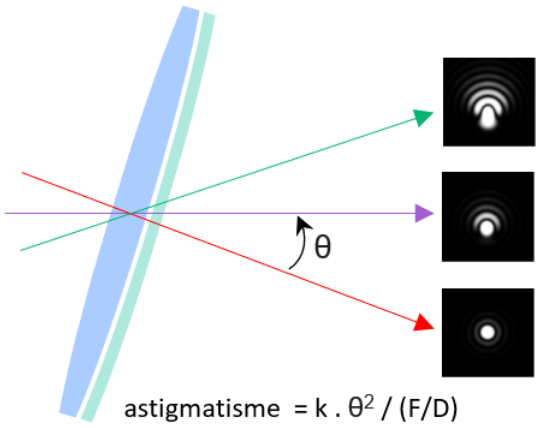
Bords Rabattus ou “Turned Down Edge” ou “Rolled Edge” désigne un défaut de polissage des miroirs paraboliques où la pente à l’extrême bord du miroir est trop faible et donc ne suit pas la pente théorique attendue (plus forte). Le TDE est un défaut de zonage et est une forme de sur-correction, l’image intra-focal montre des anneaux extérieurs flous et l’image extra-focal montre le dernier anneau extérieur brillant. Ce défaut peut être complètement masqué en apposant un diaphragme sur le bord du miroir, améliorant ainsi les performances du miroir de manière sensible au prix d’une perte non significative de diamètre. Ce défaut se voit souvent sur les miroirs réalisés par des amateurs.

Bords Relevé ou “Turned Up Edge” ou “TUP” désigne un défaut de polissage des miroirs paraboliques où la pente à l’extrême bord du miroir est trop importante et donc ne suit pas la pente théorique attendue (plus douce). Le TUE est un défaut de zonage et est une forme de sous-correction, l’image extra-focal montre des anneaux extérieurs flous et l’image intra-focal montre le dernier anneau extérieur brillant. Ce défaut peut être entièrement masqué en apposant un diaphragme sur le bord du miroir, améliorant ainsi les performances du miroir de manière sensible au prix d’une perte non significative de diamètre. Ce défaut se voit fréquemment sur les miroirs industriels produits à la chaîne.

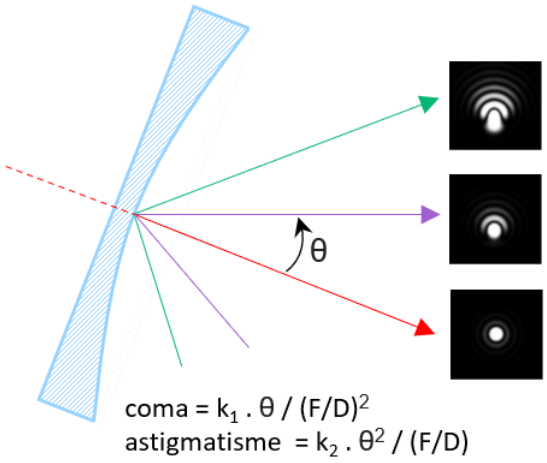
Astigmatisme désigne une aberration du front d’onde[6] impactant la netteté des points image sur l’axe optique. Il s’agit d’un défaut de focalisation, il n’y a pas de zone de netteté et le plan focal moyen n’est ni plan comme il devrait ni uniformément courbe comme dans le cas de la courbure de champ. On distingue 2 composantes dans l’astigmatisme, l’astigmatisme sagittal et l’astigmatisme tangentiel. L’astigmatisme affecte la distribution de l’énergie dans la figure de Airy, les images intra et extra-focale sont différentes et sont au mieux ovalisées ou symétriques en forme de croix, voir très déformées dans le cas d’optiques sous contraintes mécaniques.

Cette aberration est apparente lorsque les rayons frappent la lentille ou le miroir en oblique [649].

6. Voir polynômes de Zernike



Objectif



Miroir parabolique

On voit très bien dans ces schémas le potentiel effet néfaste d'une lentille ou d'un miroir décentré par rapport à l'axe mécanique de l'instrument ici représenté par l'horizontale.

Dans le cas d'un Newton, la coma est linaire et donc augmente moins vite que l'effet de l'astigmatisme à mesure que l'on s'éloigne de l'axe. L'astigmatisme dépasse l'effet de la coma au-delà d'un certain angle, si $k_1 = k_2 = 1$ alors cet angle vaut 1 rad.

Cette aberration est également apparente dans le cas suivant [541] :

1. Une optique présentant un défaut de courbure ou de symétrie
2. Un miroir contraint mécaniquement sur son support générant un astigmatisme de pliure
3. Un miroir trop fin se déformant à mesure qu'il est orienté en dehors de la direction du zénith
4. Un miroir dont le verre est défectueux, car contenant des stress internes et qui provoquent de brusques changements de la forme lors des variations de température
5. Un oculaire inadapté sur un instrument très ouvert, dans ce cas l'astigmatisme montre des étoiles en forme de mouette symétriques (seagulls) proche de la coma
6. Le miroir secondaire convexe des formules de type Cassegrain (SCT, RC, Dall-Kirkham).

Au passage de la lentille ou du miroir, le front d'onde plan ne sera pas sphérique, mais déformé.

Franck Grière à dit : *Les défauts rédhibitoires resteront toujours des défauts de forme, l'état de surface, la qualité du substrat pour la mise en température, le barillet, etc, cela reste assez anecdotique ...* [309].

Coma désigne un type d'aberration optique produite par les miroirs paraboliques [7]. Les étoiles en bord de champ s'étirent et prennent alors l'aspect de petites comètes. A mesure que l'on s'éloigne de l'axe, la coma agrandit de manière significative la figure de Airy ce qui a pour conséquence de détériorer la netteté des images.

La coma tangentielle T vaut : $T = h \times \frac{3}{(4F/D)^2}$ [784] où h est la distance linéaire à l'axe optique. On passe de la distance linéaire à la distance angulaire par la formule suivante : $h = F\alpha$. Donc la coma tangentielle T augmente linéairement avec le champ réel : T $\propto$ TFOV

La coma sera plus prononcé :

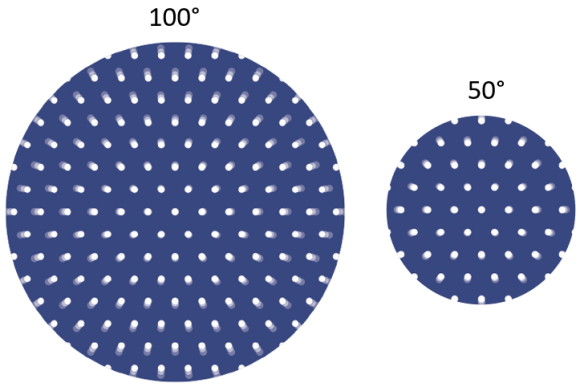
7. Voir polynômes de Zernike

1. Si l'on s'éloigne de l'axe du champ de vision
2. Si le rapport F/D du miroir primaire est petit (grande ouverture) : $F/D \leq 5$
3. Si l'oculaire utilisé montre un champ apparent AFOV important : $\alpha > 80°$.

La coma visible derrière un oculaire augmente avec le champ apparent : Coma $\propto$ AFOV.

Donc 2 oculaires procurant des grossissements différentes (focales différentes) mais ayant le même champ apparent AFOV montreront exactement la même quantité de coma. En divisant le grossissement par 2 on double le champ réel TFOV, on montre alors 2 fois plus de coma. Cependant, celle-ci est divisée par le grossissement [420, 231] donc la quantité de coma ne change pas avec le grossissement.

Coma et champ apparent



Credit : J.G. Gricourt

La coma peut être corrigé efficacement par un correcteur de coma dédié. Tout comme l'utilisation de plusieurs lentilles pour les lunettes, au moins 2 comme sur les doublets permettront une correction plus élevée à la fois dans l'axe et hors axe.

Correcteurs de coma

Barlow	Visuel	Photo	F/D	Gross.	Lentilles	Type
Tele Vue Paracorr II	✓	✓	F/3.3 à F/5	x1.15	4	
GPU Skywatcher (Gyulai Pal)	-	✓	F/4	x1	4	
APM ED Comacorrecting	✓	✓	F/4	x1.5 ou x6.25	4	
Baader MPCC Mark III	✓	✓	F/5 à F/6	x1	2	Ross
Massimo Riccardi 3"	-	✓	F/4	-	3	Wynne
Philipp Keller ASA Newton Coma Corrector	-	✓	F/4 à F/5	x0.73	5	Wynne
Vixen corrector PH	-	✓	F/4	x0.95	3	Wynne

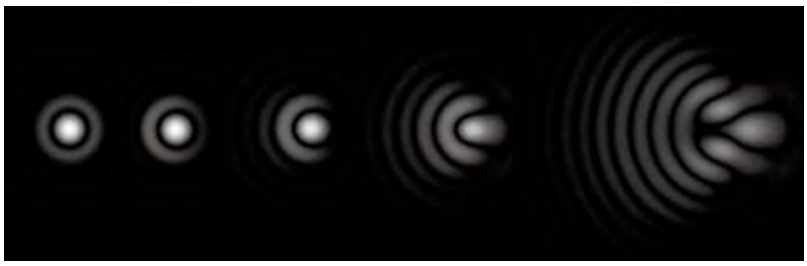
Le correcteur de type MPCC = "Multipurpose Coma Corrector" est très répandu sous différentes marque et il est peu cher en revanche il ne peut pas s'utiliser avec des Newtons trop courts et il introduit un peu d'aberration sphérique au centre du champ.

Les correcteurs de type Ross (2 lentilles) et le correcteur de type Wynne (3 lentilles) sont des correcteurs grand champ photographique pour le ciel profond. Le correcteur de Ross n'est pas recommandé en visuel et en astrophoto planétaire, car il introduit de l'aberration de sphéricité dans l'axe. Cependant, le correcteur de Ross corrigera 10 fois plus de champ si le miroir est hyperbolique [95], pour les miroirs paraboliques le correcteur de Wynne est le meilleur.

À noter que l'astigmatisme hors axe et l'aberration de sphéricité des oculaires inadaptés sera d'autant plus visibles que le F/D de l'instrument est court [184]. Cet effet accentue la figure de la coma d'où cette fausse impression que des oculaires haut de gamme corrige la coma en n'introduisant pas d'aberration supplémentaire. Par ailleurs, l'utilisation d'une barlow avant l'oculaire facilite le travail de l'oculaire en réduisant les aberrations de l'oculaire, d'où cette impression erronée que la barlow corrige un peu la coma [161].

Les correcteurs de coma en 2" ne peuvent pas illuminer correctement un capteur full frame (vignetting) il faut alors passer en 3".

Coma



Credit : S&T

Pinched Optics désigne un miroir soumis à une contrainte mécanique. La contrainte génère de l'astigmatisme sur le miroir. Les causes possibles de la contrainte sont :

1. Un miroir serré par ses brides
2. Un miroir soutenu par un barillet inadapté
3. Un miroir secondaire contraint en raison d'un collage mal réalisé (idéalement 3 points de colle à aquarium)
4. Un miroir dont le verre n'est pas homogène (tensions dans le verre).

5.6 Les Distorsions

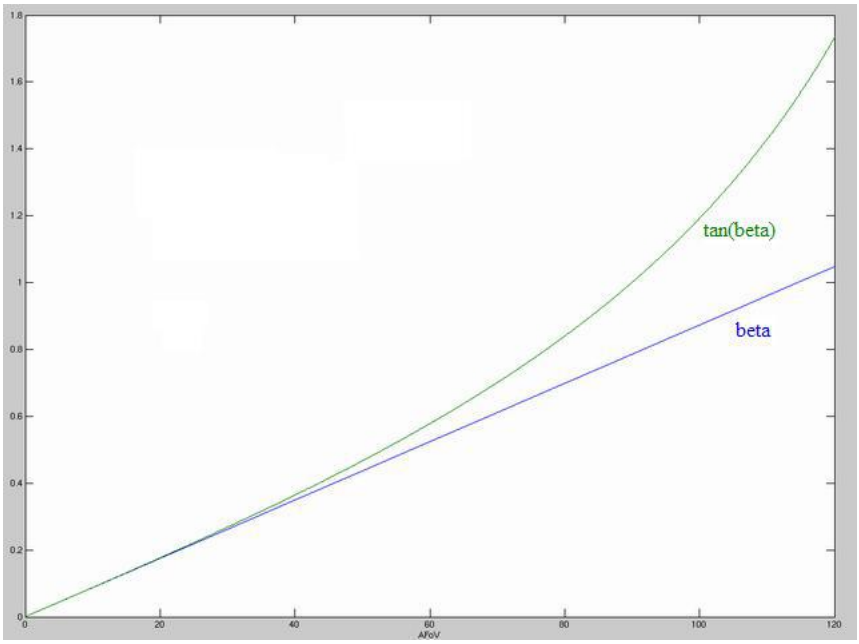
Distorsion de Grossissement Angulaire ou "Angular Magnification Distorsion" ou "AMD" désigne une aberration géométrique que l'on retrouve sur les images et qui se manifeste en bord de champ.

En l'absence de cette distorsion :

1. Le grossissement est constant sur la totalité du champ et vérifie donc $h = F \times \theta$ où h : distance hors axe il s'agit de la projection Equidistante [703].
2. Les planètes restent approximativement rondes vers le bord
3. Le petit disque des planètes reste des disques même vers le bord
4. La distance à petite échelle entre les étoiles est préservée
5. Un petit L reste un L (orthogonalité locale est préservée)
6. Les droites deviennent incurvées vers le bord du champ pour se déformer en forme de coussinet [185].

En astronomie, l'observateur parcours le champ avec son oeil, et cela, sans repointer son instrument, et donc ce qui est vu au centre ne doit pas subir de déformation notable une fois arrivé au bord (si pas de suivi motorisé comme sur les dobsons). Les oculaires dédiés à l'astronomie de type Ethos, Nagler sont justement conçus pour corriger la distorsion de grossissement

angulaire. Pareillement, les objectifs photo de type fisheye et ainsi que les objectifs spécialisés de type f-theta sont également dépourvus de distorsion de grossissement angulaire. Les objectifs photo grands angles (hors fisheye) présentent le plus souvent de la distorsion de grossissement angulaire négative.

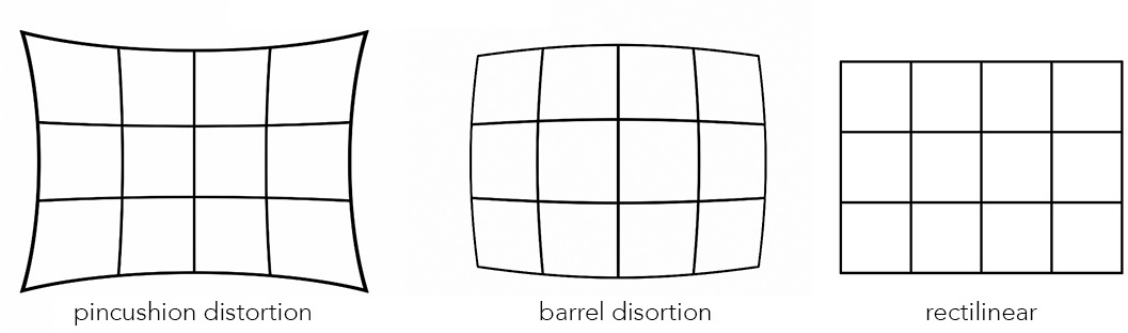


Credit : Mike Hosea

Distorsion Rectilinéaire ou “Rectilinear Distorsion” ou “RD” ou “Curvilinear Distorsion” désigne une aberration géométrique que l’on retrouve sur les images et qui se manifeste en bord de champ.

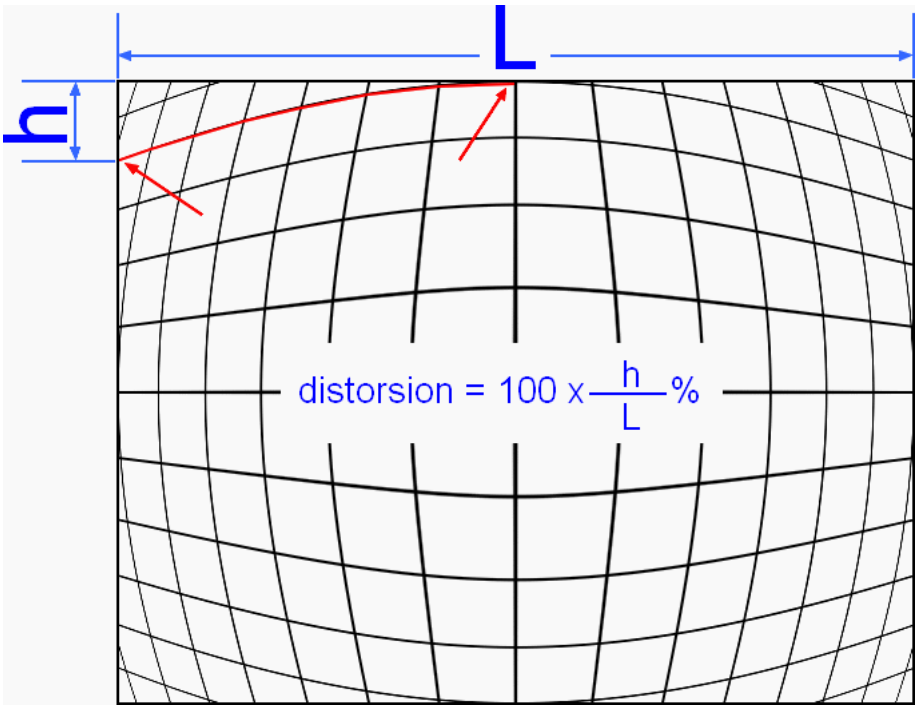
Elle peut être de 2 types :

1. Distorsion en barillet = distorsion rectilinéaire positive (ex : Fisheye / objectifs focale courtes)
2. Distorsion en coussinet = distorsion rectilinéaire négative (ex : télé-objectif / objectif focale longue)



Credit : Beau Mitchell

Calcul du taux de distorsion



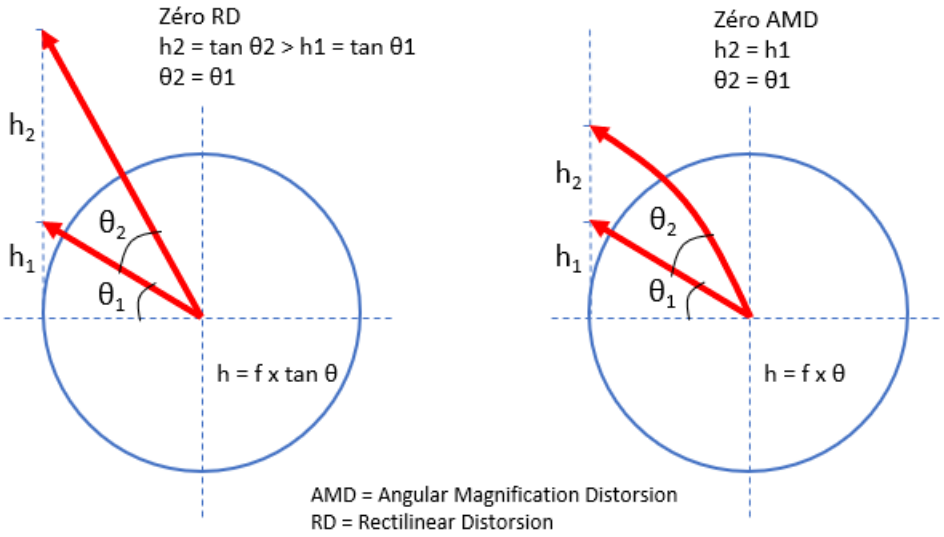
Credit : Distorsion - Wikipedia

En l'absence de cette distorsion :

1. Le grossissement est plus élevé au bord qu'au centre et vérifie donc $h = F \times \tan\theta$ où h : distance hors axe il s'agit de la projection Rectilinéaire [703].
2. Le petit disque des planètes est ovalisé vers le bord (Egg shape)
3. La distance à petite échelle entre les étoiles varie
4. Un petit L est déformé (orthogonalité locale non préservée) d'autant plus en se dirigeant vers le bord du champ
5. Les droites restent des droites même en bord de champ.

En vision diurne, l'observateur parcours le champ avec son instrument en fixant le centre du champ. Ainsi, les déformations aux bords ne sont pas perçues du moment que les droites restent des droites, mais avec cette aberration, les droites deviennent incurvées (barillet ou coussinet) et produisent le fameux "Globe Effect" [185]. Les oculaires dédiés à la vision diurne de type Pentax ou ceux présents dans les jumelles sont justement conçus pour corriger la distorsion rectilinéaire. Les oculaires Panoptic, Nagler ou Ethos de la distorsion rectilinéaire en coussinet. Les objectifs photo de type fisheye présentent de la distorsion rectilinéaire en barillet.

D'après l'ouvrage Telescope Optics by Rutten & Van Venrooij, page 169 : "It is impossible to correct an eyepiece simultaneously for rectilinear and angular magnification distortion". Donc, les 2 types distorsions ne peuvent être complètement éliminés en même temps, cependant pour les oculaires orthoscopiques vus leur champ réduit (moins de 40°) les 2 distorsions sont quasiment corrigées, car alors les 2 courbes $h(\theta)$ coïncident presque lorsque le champ reste limité. Dans un oculaire, les 2 types de distorsion coexistent et corrigent l'une vont nécessairement renforcer l'autre [179, 666].



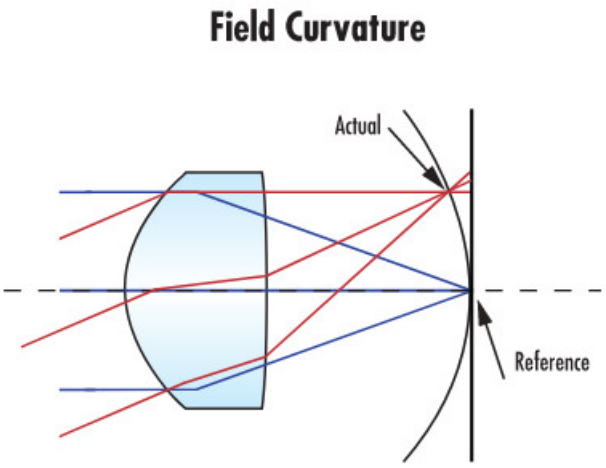
Credit : J.G. Gricourt

Le niveau de distorsion générale d'un oculaire : $\gamma = \frac{tan\beta}{\beta}$ où β est le champ apparent de l'oculaire. Lorsque $\gamma \approx 1$ le niveau de distorsion est très faible en AMD ou RD, c'est le cas des oculaires à champ apparent faible comme les oculaires orthoscopiques, si $\gamma >> 1$ le niveau de distorsion est élevé en RD c'est le cas des Naglers (cependant mieux corrigé en AMD dans une bonne partie du champ).

Distorsion en Barillet ou "Barrel Distorsion" désigne un type de distorsion de grossissement angulaire déformant l'image d'autant que l'on s'éloigne du centre du champ.

Distorsion en Coussinet ou "Pincushion Distorsion" désigne un type de distorsion rectilinéaire déformant l'image d'autant que l'on s'éloigne du centre du champ. Cette aberration est introduite sciemment dans les jumelles afin d'éliminer le "Globe Effect" ou "Rolling Ball Effect" qui se traduit par une boule qui se déplace dans le champ en déplaçant les jumelles de gauche à droite [345].

Courbure de Champ ou "Field Curvature" désigne un défaut de focalisation où les objets paraissent nets au centre et flous de forme oblong en périphérie sur le plan de projection tangent au plan focal. Le point image (PSF) n'est pas alteré sur le plan focal. En pratique, on peut refaire la mise au point pour avoir les bords du champ net, mais alors le centre devient flou. Techniquement, la courbure de champ est la moyenne de l'astigmatisme tangentiel et sagittal [77]. Avec la présence de courbure de champ, le plan focal n'est pas plan, mais une courbe appelée surface de Petzval. La totalité des lunettes (Achromatique, ED, APO) de focale courte et les formules de type Newton ou Cassegrain (SCT, RC, Dall-Kirkham) présentent beaucoup de courbure de champ. La courbure de champ est mise en évidence lorsqu'on refait la mise au point sur une étoile au bord, une étoile au centre du champ n'est plus focalisée. L'effet de la courbure de champ (étoiles floues) est plus importante à mesure que l'on s'éloigne de l'axe FC $= k \times \theta^2$ où θ est la distance à l'axe optique. La courbure de champ est d'autant plus prononcée à mesure que l'on agrandit le champ visible par utilisation d'un oculaire à grand champ apparent par exemple.

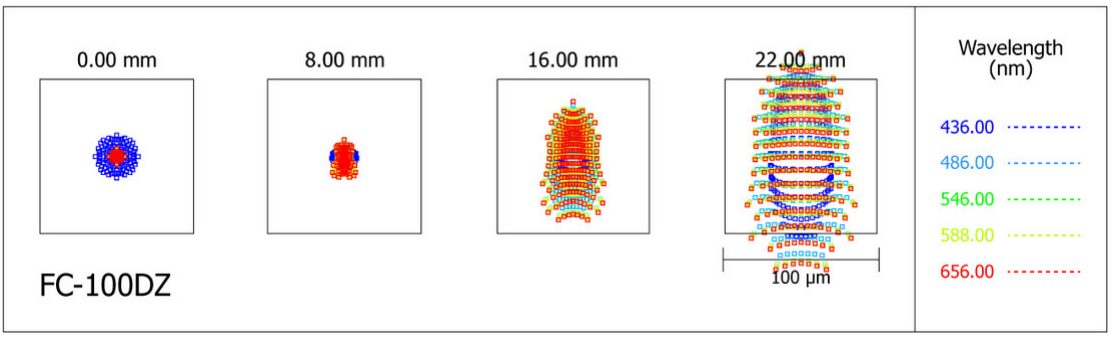


Credit : EdmundOptics

L'astigmatisme qui pourra être naturellement présent renforcera aussi la courbure de champ au-delà de la surface de Petzval. L'oeil compense facilement une courbure du champ pour voir net partout en refocalisant l'image si nécessaire via le mécanisme biologique de l'accommodation. Les lunettes utilisant un quadruplet de type Petzval sont parfaitement corrigées pour la courbure de champ, autrement, il faudra utiliser un correcteur de champ, en particulier en imagerie.

En général il n'est pas nécessaire d'utiliser un correcteur de champ en visuel car la dimension du point image même le plus éloigné du centre du champ restera contenu dans le champ de vision derrière l'oculaire

De plus l'oeil avec sa capacité d'accomodation et donc de refocaliser le point image à l'exterieur du champ la courbure de champ pourra être complètement invisible pour un observateur jeune.



Credit : Takahashi

Les oculaires peuvent aussi avoir une courbure de champ positive (focale longue) ou négative (focale courte) et donc éventuellement annuler la courbure de champ de l'instrument.

Les barlows en allongeant artificiellement les focales diminuent la courbure de champ des instruments. C'est le cas aussi des barlow intégrées (une "Smyth Lens") dans les oculaires de type Tele Vue Nagler, Tele Vue Ethos ou Pentax XW ainsi que dans le correcteur Tele Vue Parracor qui présente aussi un léger effet d'aplanisseur de champ [228] et augmente le dégagement oculaire = "Eye Relief" naturel de ces oculaires par l'effet de barlow.

La courbure de champ R est le cercle de rayon R définissant le plan focal où l'image est nette en tout point.

Courbure de champ FC

Instrument	Sens +/-	Rayon
Newton	-	$R = F$
Cassegrain	+	$1/R = 2 \times (1/R_s - 1/R_p)$ $R \approx F \times$ 10-14% [260]
Lunette doublet achromatique	+	$R \approx F \times$ 35-40%

A noter : F = focale de l'instrument, R_s = rayon miroir secondaire, R_p = rayon miroir primaire

La courbure de champ visible derrière un oculaire diminue avec grossissement FC $\propto 1/G^2$ ou le tirage (en photographie).

La courbure de champ peut s'exprimer aussi en dioptries : $\delta_R = 1000/R$

La distance de la courbe du plan focal effectif à l'axe du plan focal idéal au bord du champ [415] : $\Delta d = \sqrt{R^2 - (\text{fstop}/2)^2} - R$

La dimension du point flouté en bord de champ [415] : blur = $\frac{\Delta d}{F/D}$

Surface De Petzval désigne la surface incurvée sur laquelle se forme l'image. Idéalement l'image se forme sur le plan focal mais en réalité celui-ci est incurvé pour la plupart des instruments. Le rayon [685] de cette surface vaut $R = f/3$ La courbure de champs est plus importante pour les lunettes à focale courte et les télescopes de type RC. Ce défaut est quasi invisible à l'oeil nu, par contre, il est gênant en imagerie et nécessite donc un correcteur de champ.

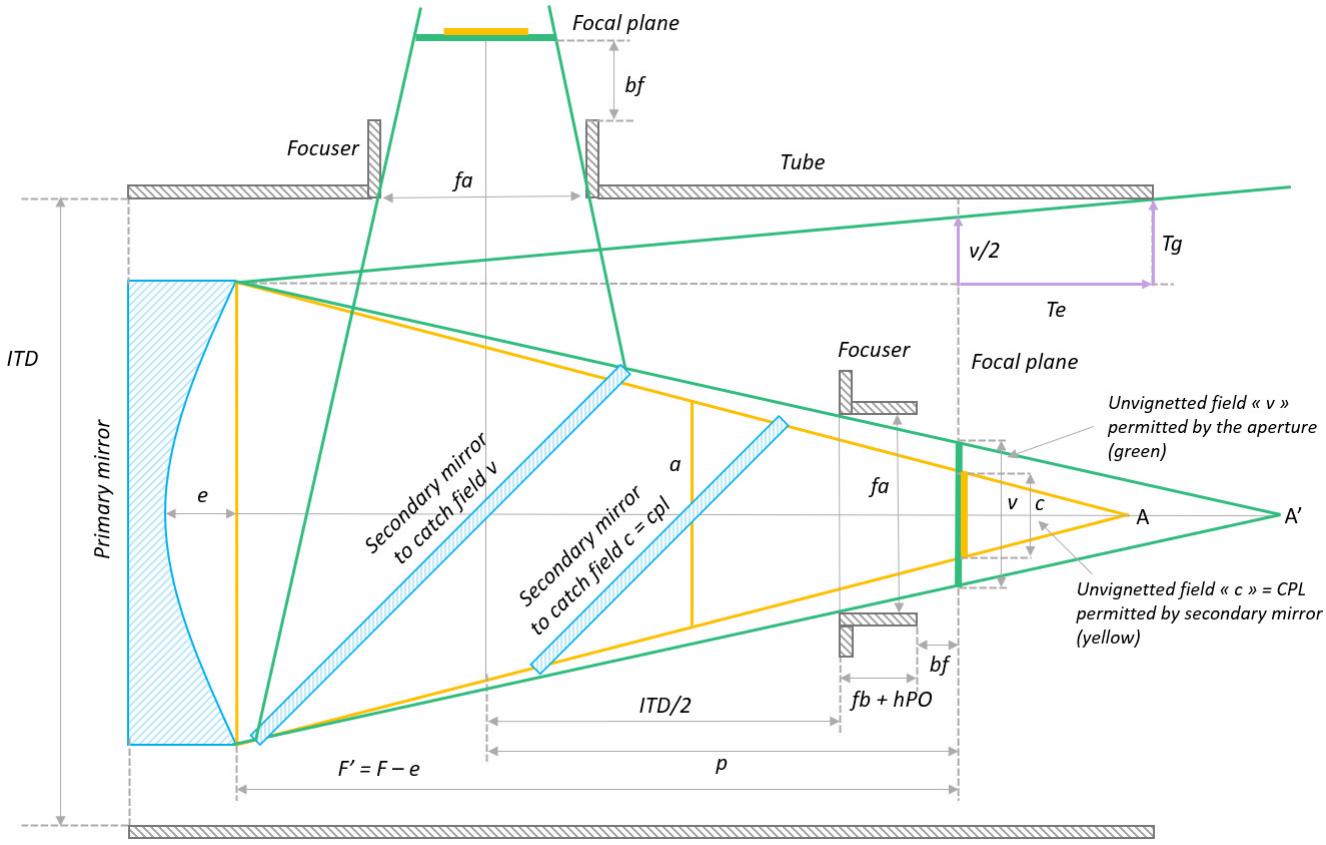
Field Flatness désigne un champ débarrassé de courbure de champ. Certains instruments comme la lunette de Petzval (Tele Vue) corrigent complètement de défaut.

5.7 Le Vignetting

Vignetting désigne l'assombrissement progressif des bords de l'image en raison d'un obstacle qui empêche une partie des rayons lumineux de parvenir jusqu'aux lentilles de l'oculaire. Dans le cas du télescope, le vignetting débute après le disque du champ pleine lumière (cpl) la zone illuminée à 100% pour laquelle toute la lumière provenant du miroir primaire est capturée par le miroir secondaire. De manière générale pour les lunettes et les télescopes il existe d'autres sources de vignetting que le miroir secondaire.

1. L'ouverture du tube du télescope ou l'ouverture de la cage du secondaire si celle-ci est plus étroite encore
2. L'ouverture du porte-oculaire soir 2" ou 1.25", celui-ci peut aussi être trop près de l'axe optique pour les Newton ou trop avancé dans le tube pour les lunettes coupant ainsi encore plus le faisceau
3. L'ouverture de l'oculaire = le diaphragme de champ de l'oculaire ou field stop
4. L'oeil positionné trop en arrière la pupille de sortie diaphragme et vignette le champ

Dimensionnement du Newton



Credit : J.G. Gricourt

De toutes les sources de vignetting c'est le secondaire qui est le plus prépondérant dans le design d'un Newton si les autres éléments sont correctement dimensionnés et positionnés [178]. La cage du secondaire devra avoir une dimension minimum [8] calculée comme [199, 245] : ITD $= D +$ fstop$_{\max}$ où ITD = internal diameter et fstop$_{\max}$ = field stop de l'oculaire procurant le plus grand champ réel sur le ciel c'est aussi en général celui qui produit le plus faible grossissement [178, 203]. Il faut prévoir plus large encore si la collimation "New Model" est mise en pratique vu que le primaire sera beaucoup plus incliné par rapport à l'axe du tube.

Vignetting du tube du télescope dans le cas du télescope Newton tube doit être dimensionné de manière à ne pas vigneter le champ.

L'ouverture minimale du tube pour ne pas vigneter le champ v selon v et T_e : ITD$_{\min} = \frac{v(F'+Te)}{F'} + D$

L'ouverture minimale du tube en dimensionnant au plus juste $T_e = 0$: ITD$_{\min} = D + v$ [199, 245]

Le gap minimum du tube qui en résulte : $Tg_{\min} = \frac{\text{ITD}_{\min} - D}{2} > 0$

Vignetting du miroir secondaire dans le cas du télescope Newton le miroir secondaire capture tous les rayons réfléchis par le miroir primaire dans le champ correspondant au champ pleine lumière c. Donc pour ne pas être vigneté par d'autres sources de vignetting il faut que ce champ non vigneté vérifie : $v > c$

Vignetting du porte-oculaire dans le cas du télescope Newton le porte-oculaire doit être positionné de manière à ne pas vigneter le champ.

8. Si les parois du tube ne dépassent pas après le plan focal

En raison de l'entrée du porte-oculaire il existe un champ maximum non vignetté par le porte-oculaire. L'ouverture du porte-oculaire est fixe 2" ou 1.25" selon le standard il faut donc l'éloigner du miroir secondaire lorsqu'on souhaite élargir le champ non impacté par le vignetting du porte-oculaire, mais dans ce cas le backfocus diminue.

L'ouverture minimale du porte-oculaire pour ne pas vigneter le champ v : $fa_{\min} = (f_b + h_{\text{PO}} + b_f) \times \left(\frac{D-v}{F'}\right) + v$ sachant que $v = \frac{2T_g F'}{F' + T_e}$.

Vignetting de l'oculaire pour ne pas être vignetté par d'autres sources de vignetting il faut que le champ non vignetté soit inférieur field stop de l'oculaire : fstop $> v$.

5.8 Les Miroirs

Flèche du miroir ou "Hauteur Sagittale" il s'agit de la hauteur e du creux d'un miroir parabolique mesuré à partir du point le plus bas, c'est-à-dire au centre. Flèche du miroir parabolique : $e = \frac{D^2}{16f}$

ROC ou "Radius OF Curvature" ou "COC" ou "Centre Of Curvature" désigne le cercle tangent à la surface optique. Le ROC est négatif pour les miroirs paraboliques ou sphériques et positifs pour les lentilles. Dans le cas d'un miroir sphérique ROC $= F$, dans le cas d'un miroir parabolique ROC $= 2 \times F$ où F est la focale de l'instrument.

Etat de Surface désigne la qualité du poli (rugosité) d'un miroir. Un miroir présentant un poli parfait ou superpoli est exempt de mamelonnage et de micromamelonnage millimétrique. Un miroir superpoli ne diffuse pas la lumière des objets lumineux observés tel que les disques planétaires et offre donc un contraste optimal pour ce type d'observation.

Superpoli désigne un miroir dont l'état de surface a été longuement travaillé afin de réduire le micromamelonage millimétrique soit une surface de 0.1 à 3 nm et une hauteur entre $\lambda/6000$ et $\lambda/200$. Le superpoli n'est pas la condition sine qua non pour obtenir un bon miroir conjointement avec un bon PtV. Il s'agit d'une technique que seuls les plus grands artisans du verre maîtrisent dont les pionniers en France que sont Jean-Marc Lecleire (Astrotelescope) et Franck Grière (FR).

Rugosité désigne les défauts de surface résiduels des surfaces optiques produits par un polissage imparfait. En raison de ces défauts, la lumière, au lieu de se concentrer totalement dans la figure de Airy diffusera plus ou moins en dehors, occasionnant une perte lumière autour de l'objet observé selon un angle dépendant de la hauteur de ces défauts. La rugosité des miroirs affecte la détection des objets faibles à proximité des sources brillantes [396] (page 76) ainsi que la saturation des couleurs des surfaces planétaires.

Les types de rugosités [715, 579]

Rugosité	Hauteur	Diamètre	Angle de diffusion	Application
Mamelonnage	$H > \lambda/10$	cm	1 arcmin	Télescope optique
Micro-mamelonnage millimétrique	$H \in [\lambda/6000 - \lambda/200]$	mm	1 arcmin	Télescope optique
Micro-mamelonnage micrométrique	$H < \lambda/6000$	μm	1 degré	Laser

La formule permettant de déduire l'angle de diffusion en degrés $\theta = 57.3 \times 1.22 \frac{\lambda}{\text{Diamètre}}$

Le mamelonnage peut être mis en évidence par le test de Foucault et le micromamelonnage peut être mise en évidence par un test de Lyot = contraste de phase.

À noter que le micromamelonnage reste anecdotique en face de la diffusion de lumière en raison de [338] :

— De la sur-correction (TDE) ou sous-correction (TUE) du miroir ou de l'objectif de la lunette

— De l'obstruction du miroir secondaire et de son araignée
— Du mamelonnage

Diffusion des Miroirs désigne l'effet d'altération du contraste de l'image en raison d'une ou plusieurs aberrations optiques.

La diffusion de lumière sous forme de halos vus autour des planètes ou au centre de l'étoile peut être due à :

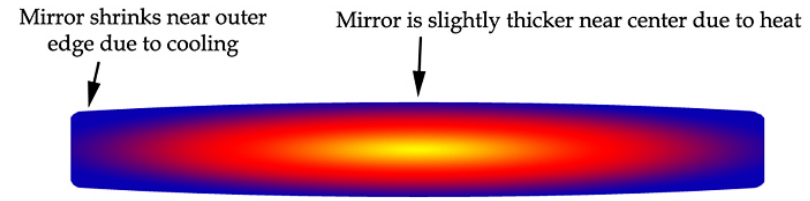
1. Le chanfrein du primaire qui reflète de la lumière
2. Un miroir dont les bords sont rabattus
3. Un miroir contraint
4. La qualité du poli de la surface du primaire.

La diffusion de lumière en raison de l'obstruction de l'ouverture est due à :

1. L'obstruction des branches de l'araignée produisant alors des aigrettes
2. Les aigrettes dédoublées en raison des branches de l'araignée vrillées (vis trop serrée sur le secondaire ?)
3. L'obstruction par des fils électriques, par le tube du porte-oculaire qui dépasse dans le tube.

Zonage désigne un défaut de polissage des miroirs paraboliques présentant une bosse ou un creux sur une zone de la surface de révolution du miroir produisant de l'aberration de sphéricité (ordre supérieur à 1 en général). Ce défaut affecte la figure de Airy ce qui a pour conséquence de détériorer la netteté des images. Le TDE / TUE est un cas particulier de défaut de zonage. La technique de polissage manuelle requiert de ne pas réaliser des mouvements trop réguliers afin d'éviter la formation de zone sur le miroir conduisant à des défauts d'astigmatisme.

Rolled Off Edge "Turned Down Edge"' ou "TDE" désigne un défaut de bords rabattus du miroir parabolique sur une zone plus large au bord du miroir. Il s'agit d'un type d'aberration sphérique qui peut être dû à une mauvaise technique de polissage ou lorsque le miroir n'est pas encore à température, c'est-à-dire que le centre du miroir est plus chaud que les bords et l'air ambiant. L'image intra-focale de la PSF est alors diluée (sans anneaux) alors que l'image extra-focale est nette avec un dernier anneau renforcé [512].



The distortion of the mirror's shape due to non-uniform heat distribution shown here is greatly exaggerated, but has major effects on optical performance and causes temporary overcorrection and edge roll-off. The distorted shape goes away as the temperature within the glass equalizes.

Credit : Mike Lockwood

Coma Free Field ou "Diametre de Champ de Pleine Netteté" ou "Coma Free Sweet Spot" ou "CFF" ou 'DCPN' est la zone circulaire du miroir parabolique autour du centre optique sur le plan focal où la coma est suffisamment faible pour n'occasionner qu'une réduction de Strehl de 0.2. Autrement dit, dans cette zone, la coma n'influe que très peu sur les performances de l'optique. Le diamètre de la CFF augmente avec le cube du rapport F/D : $\text{CFF}_{mm} = 0.0218 \times (F/D)^3$

[194, 151, 589]. Le champ angulaire sur le ciel se calcule comme : $\text{CFF}_{rad} \approx \text{CFF}_{mm}/f$ avec la focale f exprimée en mm, idem exprimé en arcmin : $\text{CFF}_{arcmin} = 75 \times (F/D)^3/f$ [9].

Pour les forts grossissements (observation planétaire) on prendra 1/4 à 1/6 du diamètre du CFF (Nils Orlof Carlin) donc au mieux : $\text{CFF}_{mm} = 0.0055 \times (F/D)^3$, idem exprimé en arcmin : $\text{CFF}_{arcmin} = 19 \times (F/D)^3/f$ [763, 768]. On peut rapprocher la "CFF" du field stop des oculaires pour déterminer la fraction du champ visiblement affectée par la coma.

Après application du grossissement : $\text{CFF(vue)} = \text{CFF} \times G$

Les miroirs fins De plus en plus de polisseurs de verre produisent des miroirs de grands diamètres très fins tels que Mike Lockwood afin de répondre à une demande croissante pour ce type de miroir. Ces miroirs présentent l'avantage de refroidir plus vite le temps que la parabole se stabilise. Cependant, ces miroirs fins présentent de nombreux inconvénients :

— Ils ont tendance à plier sous leur propre poids déformant ainsi la parabole, le barillet doit aussi être particulièrement soigné pour limiter cet effet.
— Ils sont plus difficile à contrôler au moment du polissage en raison de leur tendance à plier et à produire de l'astigmatisme.
— Moins de poids en bas du dobson implique une structure plus difficile à équilibrer, il faut alors surdimensionner les tourillons ou bien utiliser des contrepoids.

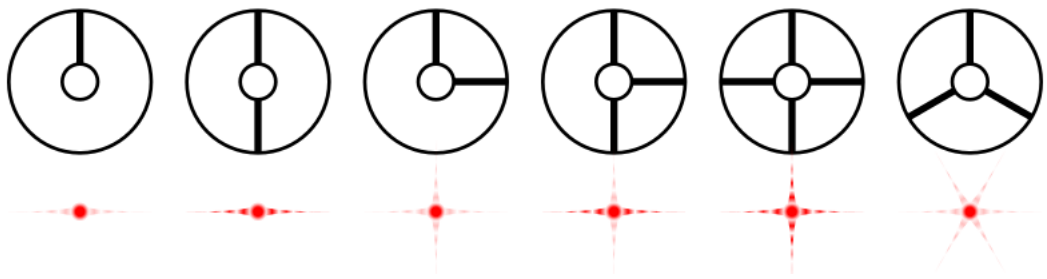
Avec l'arrivée sur le marché de verres quartz, un verre spécial à faible dilatation il est de nouveau possible d'utiliser des miroirs de grand diamètre plus épais (ep = 2" à partir de D = 18") car ceux-ci ne se déforment plus lors du refroidissement même si ce laps de temps est plus long que pour les miroirs minces, il est possible d'observer à fort grossissement très rapidement sans attendre parce que la parabole est déjà stabilisée.

Aigrettes ou "Croix de Diffraction" ou "Diffraction Spike" désigne l'effet provoqué par l'obstruction de l'araignée qui supporte le secondaire des télescopes à miroir. Les aigrettes se manifestent par des croix lumineuses visibles autour des étoiles les plus lumineuses ou bien par des bandes perpendiculaires faiblement lumineuses autour des planètes. Les aigrettes affectent la figure de Airy ainsi que la netteté des images. Les aigrettes apparaissent toujours par paire perpendiculairement aux branches de l'araignée pour former la figure de diffraction finale.

Afin que les aigrettes ne soient pas déformées ou dédoublées il faut :

— Les demies branches doivent être parfaitement parallèles entre elles (pas forcément contigu)
— Les branche ne doivent pas être vrillées
— Le tube du porte-oculaire ne doit pas trop rentrer dans le tube pour ne pas ajouter de la diffraction

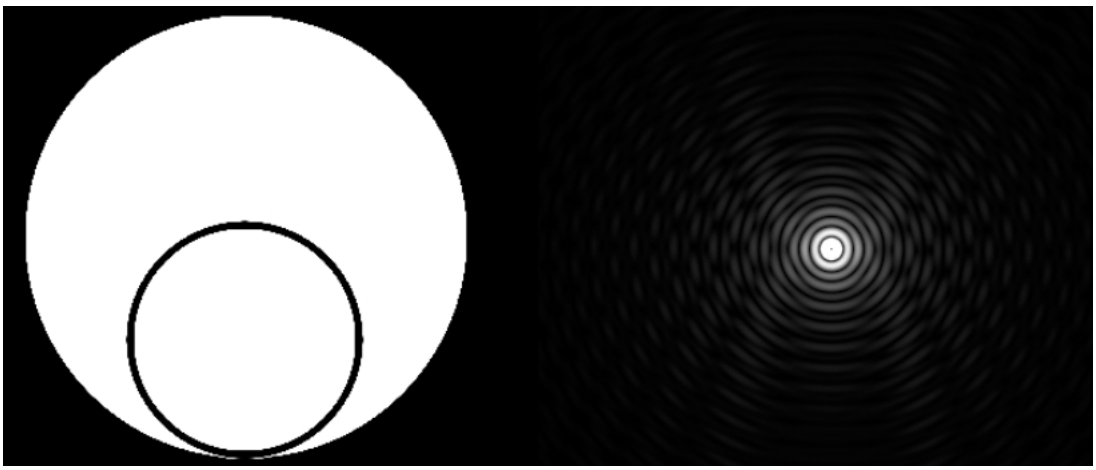
À noter que la perpendicularité des branches n'est obligatoire si l'on veut obtenir une croix de diffraction à 90°. Les pattes de maintien du miroir primaire ne provoquent pas de diffraction, ils masquent une portion négligeable du miroir.



Credit : Wikiwand

9. Conversion pouce en mm = 0.000866 x 25.4, conversion CFF rad en deg = CFF x 57.3, conversion CFF deg en arcmin = CFF x 60

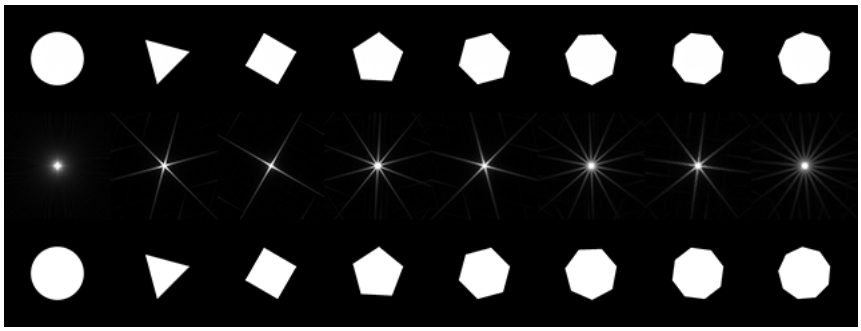
Lorsque la forme des branches est un cercle, les aigrettes deviennent alors quasiment invisibles :



Credit : Christian Viladrich

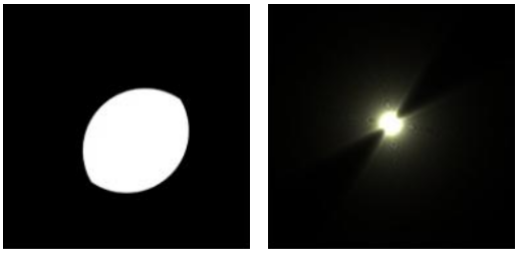
Il existe aussi d'autre forme de branches de l'araignée permettant de diffuser la lumière de l'aigrette, dans tous les cas la lumière perdue par les branches sera reporter dans le centre de l'étoile renforçant son empâtement (surtout visible en photo).

L'ouverture du télescope fait également diffracter la lumière. L'ouverture circulaire classique produit la figure de Airy au lieu d'un point théorique infiniment petit. Plus on réduit cette ouverture plus la figure de Airy s'agrandit, dans le cas d'autres types d'ouverture, on constate que d'autres figures en étoiles sont produites (voir le diaphragme de l'objectif photo) [296, 545].



Credit : Chema Guerra

De même qu'une obstruction non circulaire mais plutôt ovalisée produira un figure de diffraction caractéristique. Le programme Maskulator permet de simuler l'effet d'une obstruction sur la figure de diffraction.

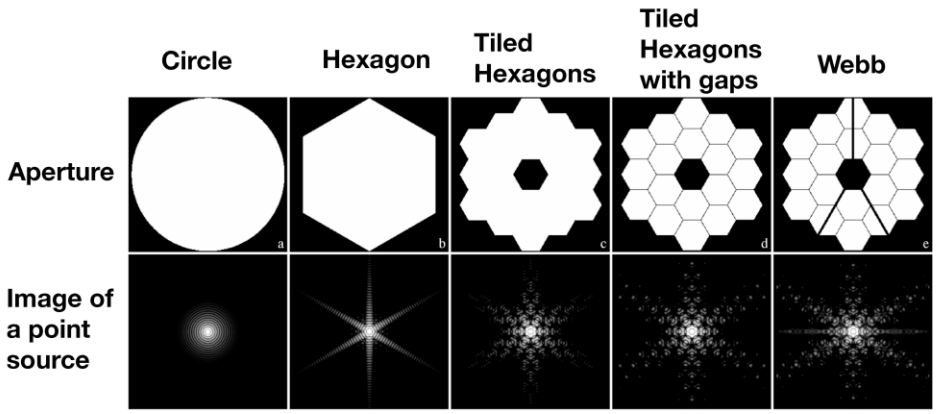


Credit : sharkmelley

Le cas du télescope JWST, la lumière est diffractée en 6 branches en raison de l'ouverture hexagonale puis re-diffractée en raison de l'araignée à 3 branches, la figure de diffraction est encore amplifiée en raison des espaces entre les miroirs, mais

aussi de la présence d'une obstruction centrale :

Where do James Webb's unique "spikes" come from ?



Credit : Ethan Siegel

Obstruction ou "Central Obstruction" ou "CO" désigne le rapport entre la dimension du miroir secondaire d et celle du miroir primaire (exprimé en %) CO $= d/D$. L'obstruction affecte la figure de Airy en déplaçant l'énergie lumineuse du disque central vers les anneaux extérieurs comme le ferait l'aberration de sphéricité, ce qui a pour conséquence d'augmenter la dimension de la figure de Airy et de détériorer la netteté des images [5]. La détection des étoiles doubles serrées est notoirement plus difficile lorsque les anneaux sont plus visibles.

Obstruction typique des instruments

Instrument	Obstruction
Newton	15% - 25%
Maksutov-Cassegrain	22% - 33%
Dall-Kirkham	28% - 32%
Schmidt-Cassegrain	32% - 37%
Cassegrain	32% - 37%
Ritchey-Chrétien	40% - 50%
Rowe-Ackermann	41%
PlaneWave DeltaRho 500	60%

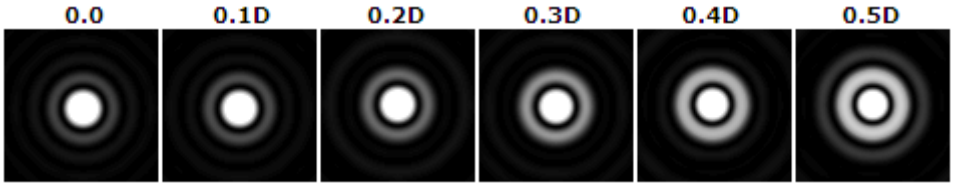
L'effet de l'obstruction peut être quantifié par :

1. Réduction du flux lumineux global entrant par un facteur de $1 - \text{CO}^2$
2. Réduction du pic central de la figure de Airy par un facteur de $(1 - \text{CO}^2)^2$ [691]
3. Augmentation de l'extension de la figure de Airy par un facteur de $1 + \text{CO}^2$ [691]
4. Diminution du RMS de l'aberration sphérique par un facteur de $(1 - \text{CO}^2)^2$ [690]

Calcul du RMS de l'aberration sphérique avec obstruction : $\text{RMS}_{\text{obst}} = \text{RMS} \times (1 - \text{CO}^2)^2$

Le diamètre efficace = "Effective Aperture" d'un instrument obstrué vaut : $D_{\text{eff}} = D \times (1 - \text{CO}^2)^2$ [**?**] (voir aussi d'autres formules de D_{eff})

Note : tout comme l'aberration de sphéricité et l'astigmatisme, l'obstruction réduira le pic central et redistribuera l'énergie vers les côtés de la figure de Airy. Aussi la MTF diminuera plus fortement en allant vers les fréquences spatiales élevées.



Credit : TelescopeOptics

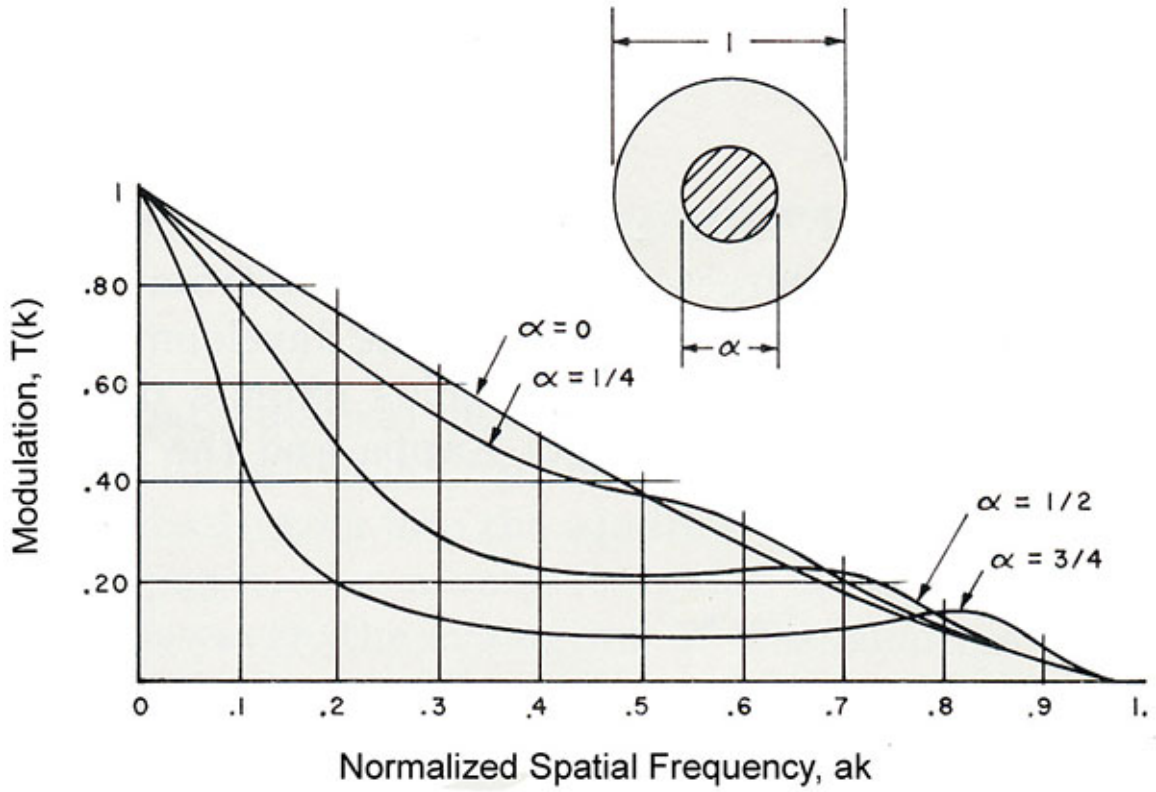
Le premier effet impacte la luminosité des objets visés et les 2 derniers la résolution obtenue [721].

La MTF montre qu'avec l'obstruction la résolution pour les hautes fréquences reste inchangée voire améliorée pour les très hautes fréquences, ce qui sera bénéfique pour les objets contrastés : étoiles doubles, la division de Cassini, l'ombre de satellites de Jupiter ou le terminateur de la lune etc ...

La MTF montre qu'avec l'obstruction la résolution pour les basses fréquences diminue proportionnellement à l'obstruction [317]. La perte de résolution sera plus marquée comme sur les planètes à faibles contrastes comme Jupiter, Saturne, Mars ou Vénus.

L'illumination (et donc le diamètre) joue aussi un rôle majeur dans la vision et permet de faire la différence entre voir et ne pas voir un détail peu contrasté. Jusqu'à 30% l'obstruction aura très peu d'effet sur la netteté des images [721] et une obstruction de 20% n'aura pas d'effet discernable en visuel comparé à une ouverture équivalente sans obstruction [208].

Dans le cas d'un télescope de type Newton, l'obstruction par l'araignée provoquera aussi une diffusion de l'énergie lumineuse de la figure de Airy. En pratique, l'aberration de sphéricité aura plus d'effet destructeur sur le contraste que l'obstruction centrale elle-même.



Modulation Transfer Function of Annular Apertures

Credit : Taylor Optics Digest

Note : pas d'obstruction alors $\alpha = 0$.

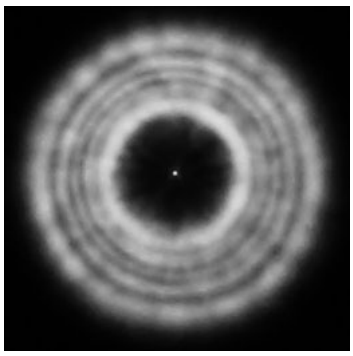
Le secondaire ou plutôt l'ombre du secondaire n'est normalement pas visible à l'oculaire sauf dans les cas suivants :

1. Si en faisant la mise au point, on s'écarte du foyer du miroir primaire (défocalise)
2. Si la pupille de sortie devient plus grande que celle de l'oeil donc lorsqu'on utilise un oculaire de trop grande focale, ce qui sera plus souvent le cas lors de l'observation de la Lune ou lors d'observation diurne car dans ces 2 cas la pupille de l'oeil devient très petite.

L'ombre du secondaire est particulièrement visible sur un fond lumineux comme la lune vue plein cadre [743]

Une obstruction jusqu'à 30% est parfaitement acceptable dans un instrument car ses effets délétères seront très négligeables aux regards d'autres effets plus prépondérants dans la formation de l'image (voir aussi le chapitre sur le miroir secondaire).

Point de Poisson ou "Point de Arago" il s'agit de la tache centrale de la figure de diffraction observée à faible grossissement dans un instrument comportant une obstruction centrale. À ne pas confondre avec la figure de Airy qui elle s'observe à fort grossissement.



Credit : Astrohobby (it)

Tache de Fresnel ou “Point de Poisson” ou “Point d’Arago” désigne la figure de diffraction produite par la présence d’un obstacle de très petite dimension angulaire devant une source lumineuse lointaine. On voit un point lumineux au centre alors que l’on s’attend à voir une ombre au centre, c’est le ‘Point de Poisson” ou “Point d’Arago” ainsi que des anneaux sombres autour. Il s’agit du même phénomène de diffraction qui se produit lors du passage de la lumière travers d’une ouverture (ex : un télescope) pour former la figure de Airy. Ce phénomène peut être observé lorsqu’un astéroïde passe devant une étoile lors d’une occultation ou bien lorsqu’on défocalise une étoile à faible grossissement, il ne faut donc pas le confondre avec la figure de Airy qui elle seule permet de collimater l’instrument et de vérifier les aberrations du miroir primaire ou de l’objectif pour les lunettes.

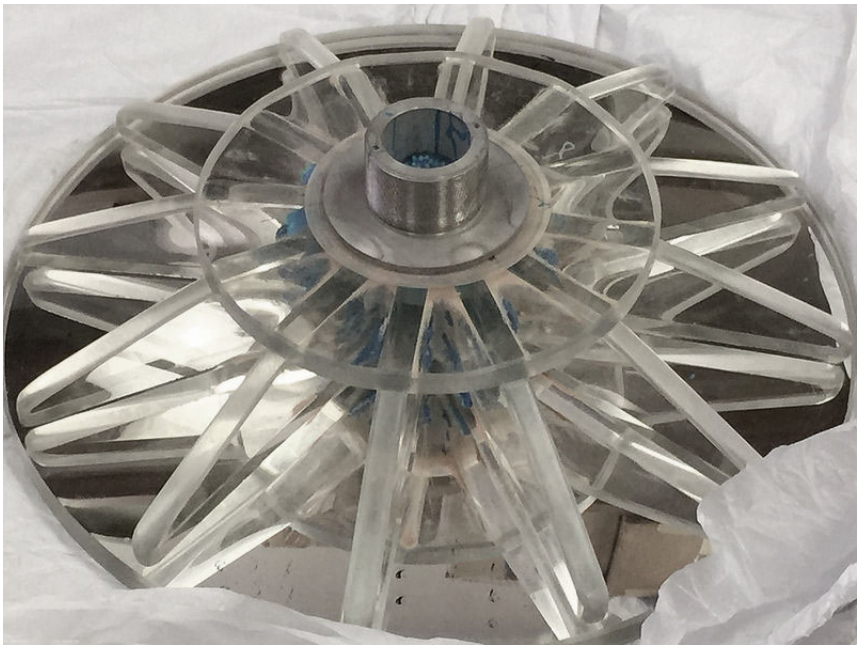
Miroir à dos Conique désigne un type de miroir de forme conique très épais au centre et très fin au bord. Ces miroirs sont en général conçus à partir de plusieurs morceaux de verres fusionnés. On les trouve sur des télescopes comme les Schmidt-Cassegrain de Celestron ou les Dobson Astrolitech et Flextube de Skywatcher.

Caractéristiques :

— Epaisseur / diamètre = 1/7 contre 1/10 pour un miroir parabolique classique
— Poids 1/3 de celui d’un miroir parabolique classique

Avantages :

— Refroidissement plus rapide en raison des bords plus fins et de sa ventilation facilitée
— Support du barillet plus simple, car fixé fermement par le centre



Credit : Skywatcher

Nettoyage Miroir un miroir doit être nettoyé régulièrement afin que son aluminure ne s'abîme trop rapidement. Les miroirs peuvent être soumis à plusieurs types d'agressions :

1. La pluie acide
2. Les vapeurs d'essence ou de produit chimique (dans un garage)
3. Les insectes morts
4. La sève des plantes
5. Les particules de pollen
6. La poussière
7. Les grains de sable
8. Les champignons (qui se développent en milieu humide sans lumière)

Méthode de nettoyage d'un miroir couramment utilisée :

1. Souffler d'abord (avec une poire soufflante) à la surface du miroir pour éliminer les particules solides non adhérentes.
2. Déposer le miroir dans une bassine remplie d'eau tiède du robinet et attendre que les saletés ramollissent et rincer une première fois avec la pression du pommeau de douche
3. Asperger ensuite la surface du miroir de liquide vaisselle type "Paic" (la version jaune classique)
4. Passer le plat de la main à la surface du miroir sans trop appuyer et faire des mouvements circulaires et faire mousser (la main ne touche que la couche de liquide vaisselle)
5. Rincer abondamment le miroir avec le pommeau de douche pour éliminer la couche de liquide vaisselle
6. Éliminer toutes traces de liquide vaisselle (traces bleutées au séchage) en aspergeant le miroir de 1L d'eau déminéralisée (celle pour fer à repasser).
7. Sécher le miroir en position verticale avec un sèche-cheveux (température ambiante)

Attention : un miroir neuf qui vient d'être aluminé ne doit pas être nettoyé avant 6 mois afin de laisser le temps à l'aluminure de se stabiliser (Franck Grière), il faut laisser le miroir à l'air libre pendant ce temps (Zambuto).

Méthode de nettoyage de l'objectif d'une lunette couramment utilisée :

— Un "Lenspen" un tampon à base de nano-particules de carbone très efficace pour retirer des traces de gras à la surface des lentilles
— Le liquide "Purosol" appliqué à l'aide d'un tissu doux et non pelucheux (type "PecPad" ou compresse chirurgicale non tissée)

Étapes du nettoyage :

1. On utilise d'abord une poire soufflante puissante pour virer les particules non adhérentes, j'utilise le Giotto, c'est le seul qui marche vraiment, les autres dans des marques concurrentes ne servent à rien, c'est poubelle
2. On utilise un tissu adapté au nettoyage des optiques du genre PecPad, ou une compresse chirurgicale non tissée
3. On dépose le liquide sur la lingette. Cependant, on n'envoie surtout pas un spray de liquide directement sur l'optique pour éviter le passage du liquide entre les lentilles
4. On ne passe qu'une seule fois (sans appuyer) la lingette à la surface et l'on en prend ensuite une autre

Produits utilisés pour le nettoyage de surfaces optiques [276] :

— L'alcool Isopropyle 99.99% est un produit longtemps utilisé mais il est hautement toxique et laisse encore quelques traces au séchage.
— Le Purosol est un produit non toxique, c'est un produit développé spécifiquement pour nettoyer les optiques utilisées dans les équipements militaires [597]
— Le First Contact Polymer est un produit formant une couche plastique souple au séchage
— Le PECPAD fourni des tissus et du liquide Eclipse un produit à base de méthanol, cette solution bien est connue des photographes qui l'utilisent pour nettoyer les capteurs des APN cependant l'alcool n'est pas recommandé sur les surfaces protégées par un traitement multicouche (coating) comme les objectifs de lunettes ou les oculaires.
— L'acétone de qualité laboratoire est utilisée par les professionnels pour nettoyer tout type de surface optique traitée ou pas, c'est la solution la plus efficace pour dissoudre les particules organiques et les colles.
— Le First Contact Polymer permet nettoyer sans essuyer la surface.

Recommandations de protection des miroirs Cette liste de recommandation provient de la notice fournie par Terry Osathowski lorsqu'il livre ses miroirs.

1. Dry storage is imperative. Mold, mildew and fungus can build and grow on the mirror surface and is the most common reason for needing cleaning or new coatings.
2. All optics, new or used, should be protected in a controlled environment. Original packing for long term and/or seasonal storage, will add years to your investment. Optics in storage should be carefully wrapped or covered with acid free lens tissue or white Kraft tissue.
3. Excessive temperatures can cause packing materials to outgas. Glue used for cardboard, wood and tape can also outgas thus leaving a full, partial or patterned haze on the surface.
4. Keep your optics covered whenever possible. ...protect your optics from dust, smoke and other unfriendly elements.

5.9 Les Tests

Star Test désigne l'évaluation des défauts de l'instrument par l'observation d'une étoile à fort grossissement.

Conditions de mis en oeuvre :

— La focalisation doit être précise et l'instrument collimaté avec un outil comme un cheshire par exemple.
— L'équilibre thermique entre l'intérieur du tube et l'air ambiant doit être réalisé (pas de gradient de température)
— pour mieux voir les anneaux extérieurs, on peut créer une obstruction centrale pour les lunettes ou pour les télescopes (voir le livre "Star Testing Astronomical Telescopes" de Dick (Harold Richard) Suiter)
— Pour augmenter la dimension de la figure de Airy on peut diaphragmer l'objectif (oui le miroir).
— Choisir le moment où le seeing atmosphérique est très stable
— Choisir une étoile cible de magnitude 2 au minimum pour 150 mm d'ouverture

Magnitude recommandée pour le "Star Test" [694] : $M_s = 5 \times logD - 8.9$

La méthode consiste à grossir au moins 25 fois le diamètre du primaire en pouce ou encore d'utiliser un oculaire de focale égale au ratio F/D [315]. Vladimir Sacek recommande 50 fois le diamètre en pouce [694]. Le grossissement minimum pratique est $3 \times D$.

La méthode consiste à évaluer :

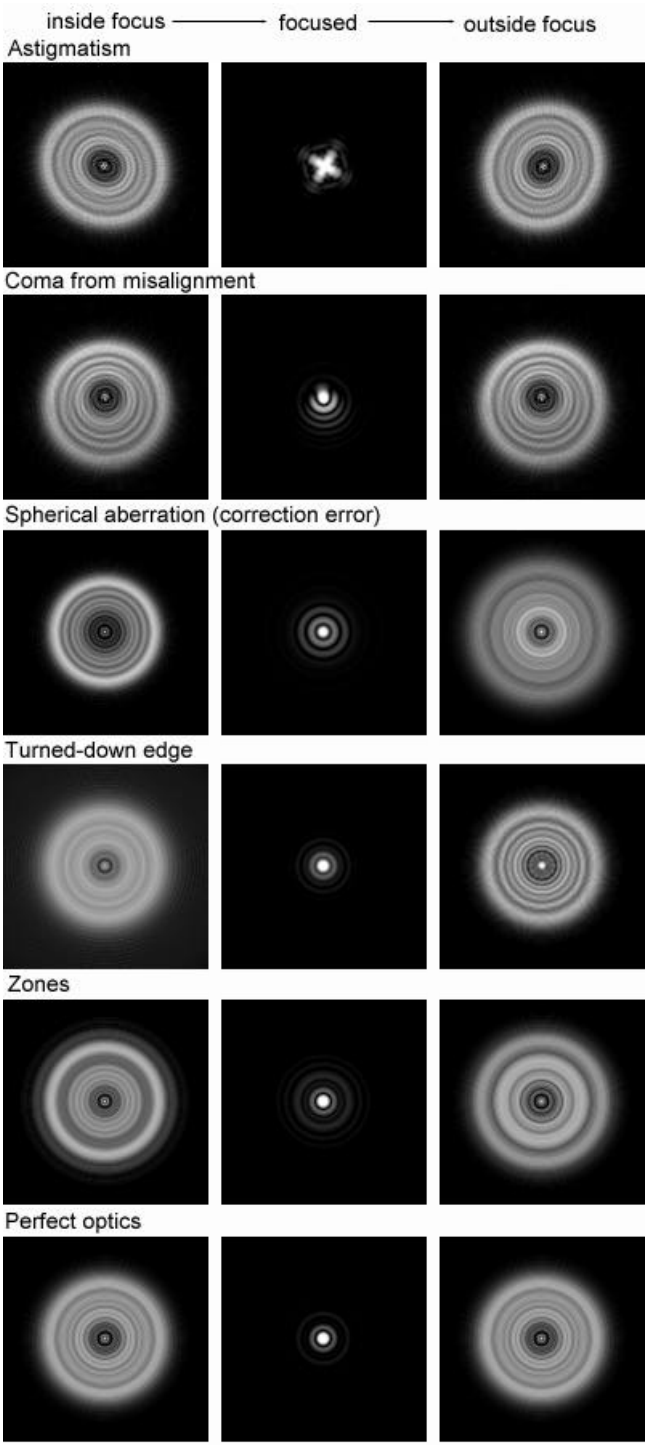
— La figure de Airy au point de focus
— L'image franchement défocalisée dans chaque sens (inside focus et outside focus)

Lorsque les 2 images défocalisées sont différentes la figure de Airy théorique est perturbée par des aberrations optiques [510]. À noter que l'image franchement défocalisée montre l'effet de l'aberration de Zernike sur le front d'onde et non une version agrandie de la figure de Airy [462].

Cause de déformation de la figure de Airy :

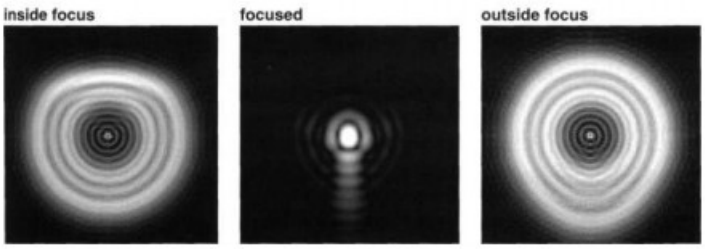
— Astigmatism
— Turned down edge
— Spherical aberration
— Pinched optics
— Tube currents
— Atmospheric seeing

Star Test : aberrations



Credit : Star Testing Astronomical Telescopes - Harold Richard Suiter

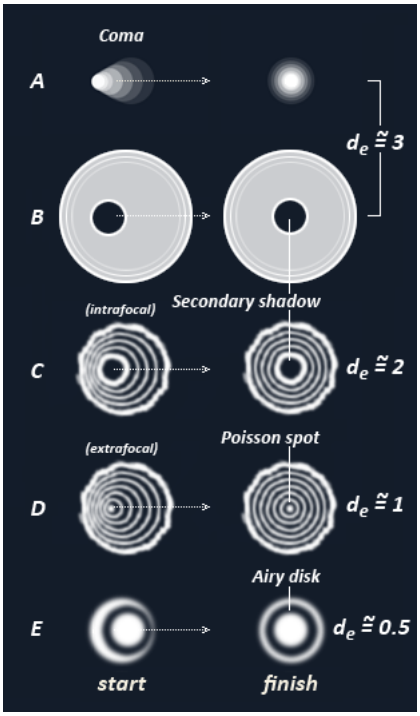
Star Test : tube currents



Credit : Star Testing Astronomical Telescopes - Harold Richard Suiter

Lorsque l'on reste au point de focus, mais que l'on défocalise cette fois-ci très légèrement la figure de Airy afin de renforcer visuellement les anneaux extérieurs, cette méthode permet de collimater un télescope sans utiliser de pastille de collimation, c'est la collimation sur une étoile. À noter, dans le cas du télescope de Newton (ou d'autres formules avec miroir secondaire) si l'on ne grossit pas suffisamment, on verra bien des anneaux en défocalisant franchement qui n'ont rien à voir avec les anneaux de la figure de Airy, ce sont les anneaux de diffraction due à la présence du miroir secondaire qui fait obstacle à la lumière et le point lumineux au centre correspond au point de Poisson.

Star Test



Credit : Collimation - Handprint

Note : $d_e = d =$ *exit pupil diameter* $= D/G$.

On peut aussi utiliser une étoile artificielle il faut alors la placer a minima à la distance dist$(meter) = D(mm) \times 3$ de l'instrument.

Mike Lockwood a décrit une variante du "Star Test" pour les Newton ultra-court soit F/4 ou moins avec un correcteur de coma inséré dans le pore oculaire [512].

De manière générale, cette méthode de collimation dépend largement des conditions de turbulence atmosphérique qui limitera le grossissement utilisable, pour cette raison cette méthode est réservée aux lunettes et télescopes de petits diamètres. Donc si le seeing est mauvais et que l'étoile visée danse littéralement dans le champ, cela signifie qu'il est inutile de vouloir réaliser une collimation précise en faisant un "Star Test", car le seeing limitera fortement la résolution de l'instrument de toutes manières.

Spot Diagramme désigne un diagramme où est représenté l'aspect de la figure de Airy réelle d'un instrument, que ce soit dans l'axe ou hors axe. Ce type de diagramme permet d'évaluer les types d'aberrations dont fait l'objet l'instrument.

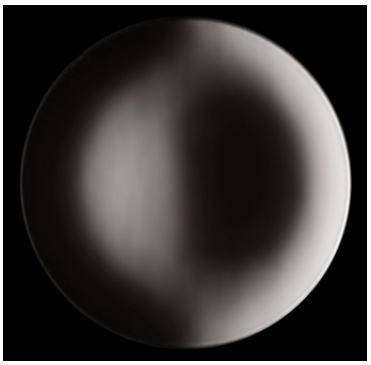
Test de Foucault désigne un test des miroirs et plus rarement des objectifs de lunette permettant de mettre en évidence des défauts de forme et le mamelonnage qui sont des défauts de basse fréquence. Ce test met en oeuvre un couteau et une source de lumière placés au ROC du miroir. Lorsque le couteau coulissant sur l'axe optique coupe la lumière, le miroir sphérique apparait alors à l'observateur divisé en 2 parties, une teinte plate claire et une teinte plate sombre. Lorsque le couteau arrive sur le ROC exactement la teinte devient plate et passé le ROC l'inversion des teintes se produit, c'est l'effet "Blink". Lorsque le miroir présente des défauts de courbure, les teintes ne sont pas plates, mais comportent des zones assombries. Lorsque le miroir est parabolique, même si au ROC la parabole est presque vue comme sphérique, la teinte n'est pas réellement plate lorsque le couteau est sur le ROC, mais montre des zones caractéristiques de la parabole, et ce, de manière d'autant plus apparente que le F/D est faible (courbure prononcée).

La méthode d'analyse Millies-Lacroix permet d'établir un profil de la parabole selon une méridienne choisie et d'en déduire une valeur de PtV. Un masque de Couder permet de qualifier les zones observées, notamment en phase de polissage.

Le test de Foucault est trop imprécis pour déterminer le RMS de la surface optique et en déduire une valeur de Strehl indiquant la qualité de polissage et de forme de l'élément optique. De plus la méthode se basant sur un axe seulement ne permet pas d'évaluer l'astigmatisme.

Un test interférométrique portant sur beaucoup plus de points sur toute la surface du miroir donnera des valeurs de PtV, RMS et Strehl plus conservatrices, mais aussi beaucoup plus réalistes [716, 717].

Miroir 400 mm F/5



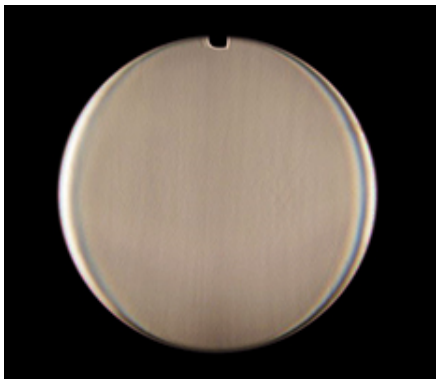
Credit : Luxorion

Test de Hartmann désigne un test des miroirs permettant de mettre en évidence des défauts de forme. Ce test met en oeuvre un masque constitué de trous à placé devant le telescope, on compare ensuites les images intra et extra focale [386].

Test de Lyot ou "Contraste de Phase" ou "Test de Lyot" désigne un test des miroirs permettant d'évaluer l'état de surface d'un miroir en mettant en évidence le micromamelonnage qui sont des défauts de haute fréquence. Ce test met en oeuvre un

couteau et une source de lumière placés au ROC du miroir. Ce test est similaire au test de Foucault et met en oeuvre une lame de phase (lame de verre doté d'une bande noire au centre) et une source de lumière placée au ROC du miroir.

Miroir 400 mm F/5



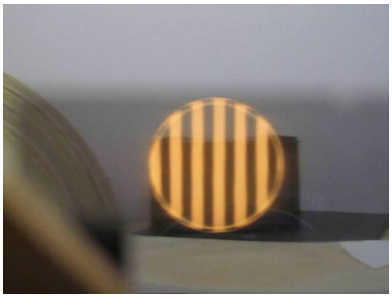
Credit : Luxorion

Test de Rodier désigne un test permettant de mettre en évidence des défauts de forme des objectifs de lunettes ou des miroirs de télescopes. Ce test consiste à analyser par logiciel les images intra et extra focale d'une source de lumière ponctuelle telle une étoile.

Test de Ronchi désigne un test permettant de mettre en évidence des défauts de forme des miroirs de télescopes. Ce test est un test de type "Single Pass" donc moins précis que le = "'Double Pass AutoCollimation" mais il est d'autant plus précis que le rapport F/D est long et que "Ronchi Grating" est dense (lp > 200 lpi) [585].

Ce test met en oeuvre un réseau de diffraction, le "Ronchi Grating" placé au ROC (2 x focale) ou au point focal du miroir. On place la source de lumière au même endroit que le "Ronchi Grating". Lorsque l'on observe derrière un "Ronchi Grating", on visualise des bandes = "Ronchigram" dont la forme indique les écarts à la forme idéale permettant de focaliser les rayons.

Habituellement le Ronchi est plutôt utilisé au ROC (distance 2 x focale) et un miroir parabolique montrera alors des bandes non parallèles qu'il faudra interpréter. Le nombre de bandes augmentent si on s'éloigne du plan focal ou du ROC selon le test choisi, de même qu'il augmente avec la diminution du rapport F/D. Si le nombre de lignes par millimètre du Ronchi est trop élevés il se produira une perte de définition des bandes (effet de la diffraction), celà dépend aussi du F/D, en général on prendra : Lignes $= 12 \times F/D$ [536]. Le test au foyer est moitié moins sensible que le test au ROC [474].



Credit : Mel Bartels

Une variante consiste en un oculaire de Ronchi qui permet de tester un télescope depuis le porte oculaire et donc au foyer, la source de lumière étant à l'infini (une étoile).

Interprétation du test de Ronchi (source à l'infini et oculaire de Ronchi au foyer)

Intra-Focale	Extra-Focale	Interprétation
		Pas de défauts majeurs
		Astigmatisme
		« Pic » central, zone centrale sous-corrigée « Trou » central sur-corrigé si les figures sont inversées*
		Abération de sphéricité, Sur-correction globale, ou sous-correction globale si les figures sont inversées*
		Bords rabattus, Sur-correction des bords, Bords relevés, sous-correction des bords si les figures sont inversées*

Credit : Pierro Astro

Afin de visualiser des bandes il faut placer le Ronchi soit un peu en avant soit un peu en arrière du plan focal.

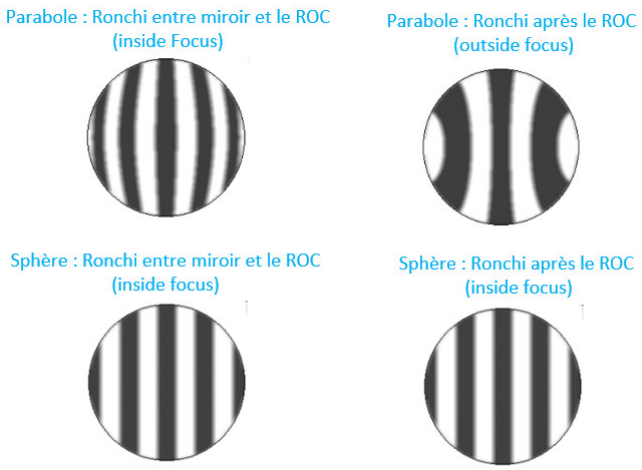
Lorsque le ronchi et la source de lumière sont placés au ROC (2 fois la focale) du miroir, alors le Ronchigramme sera composé [494] :

1. Bandes parallèles si le miroir est sphérique
2. Bandes incurvées positivement ou négativement selon la position du Ronchi par rapport au point de ROC pour un miroir parabolique

Lorsque le ronchi est placé au point focal et la source de lumière à l'infinie, alors le ronchigramme sera composé de [494] :

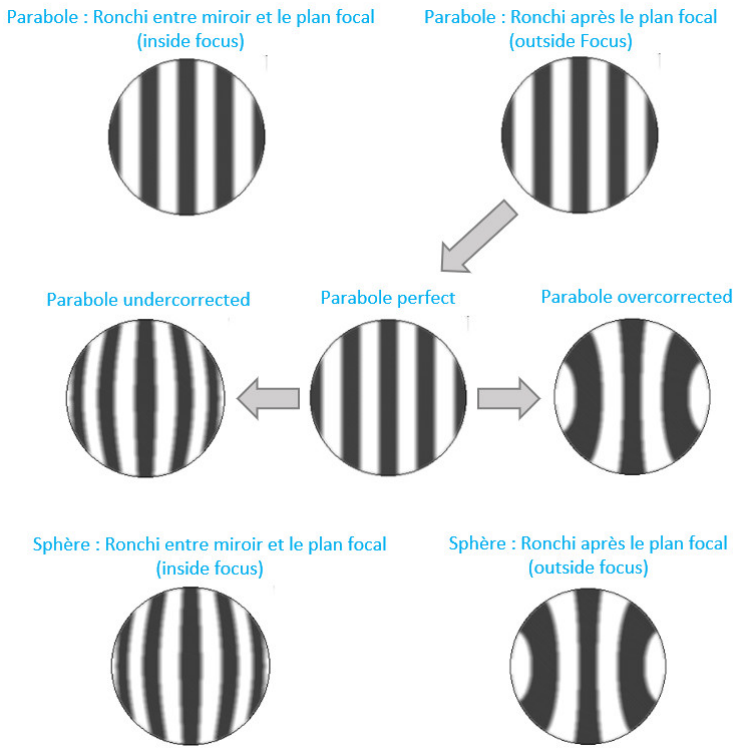
1. Bandes parallèles si le miroir est parabolique
2. Bandes incurvées positivement ou négativement selon la position du Ronchi par rapport au point focale pour un miroir sphérique

Le Ronchi placé au ROC du miroir



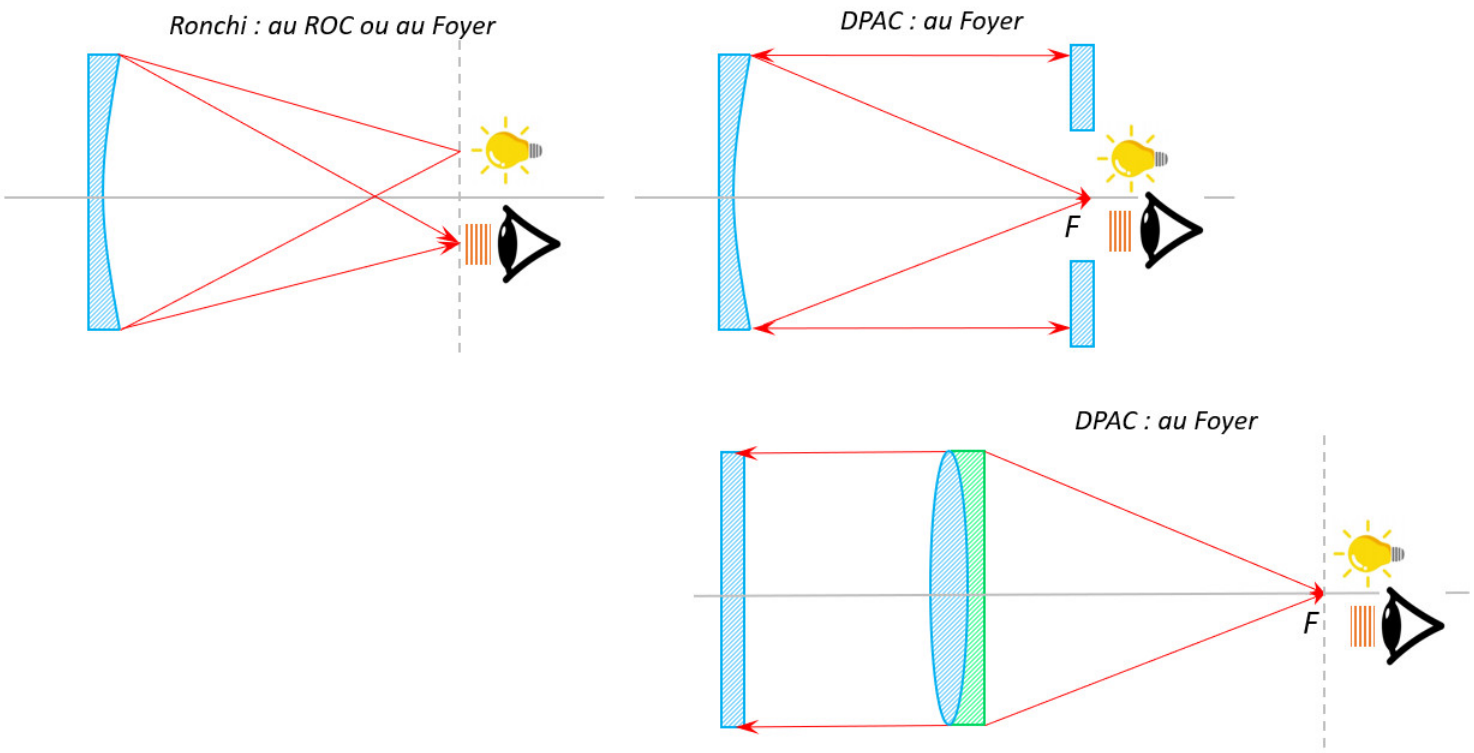
Credit : J.G. Gricourt

Le Ronchi placé au Foyer du miroir



Credit : J.G. Gricourt

Test Double Pass Autocollimation ou “DPAC” ou “Double Pass AutoCollimation” ou “Ronchi Test In Autocollimation” désigne un test permettant de mettre en évidence des défauts de forme des objectifs de lunettes ou des miroirs de télescopes. Ce test est une variante du “Ronchi Test” où l’on va utiliser un miroir plan en plus afin de renvoyer le faisceau qui aura alors effectué 2 fois le trajet avant de revenir au point d’observation. Ce test est donc 2 fois plus sensible que le “Ronchi Test” en faisant mieux apparaitre les erreurs de forme. Ce test consiste à placer devant l’objectif de la lunette ou le miroir primaire du télescope un miroir plan de référence (sans défauts), une lampe et un réseau de diffraction = “Ronchi Grating” sont placés au niveau du point focal de l’instrument [21], les rayons émit passent par le miroir plan avant de revenir vers l’observateur.



Credit : J.G. Gricourt

Ce test est à la portée des amateurs et est complémentaire du “Star Test” en mettant en évidence certains défauts [584] :

— Star Test :
  1. Coma
  2. Astigmatism
  3. Zones
  4. Spherical aberration

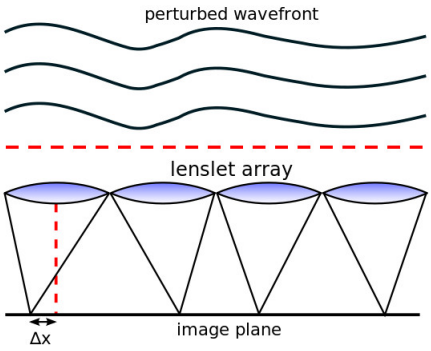
— DPAC :
  1. Spherical aberration
  2. Zones
  3. Surface condition (superpoli)
  4. Focus shift with wavelength (refractors)
  5. Zones

Terry Ostahowski à dit : *That for a very long time, he uses DPAC (Double Pass Autocollimation) that takes no prisoners and helps him to figure his mirrors for smoothness and also to discern ridges or humps in the mirror that would tend to scatter light.* [719].

Test Ross Null Test ou “Null Test” ou “Spherical Null Test” désigne une variante du test de Ronchi permettant de mettre en évidence des défauts de forme des miroirs de télescopes. Lorsque le miroir testé est sphérique comme dans le cas des SCT (miroirs non paraboliques), l’aberration sphérique est nullée par une lentille spéciale. La suite du test se déroule de la même manière qu’avec le test de Ronchi.

Shack-Hartmann désigne le dispositif de mesure permettant d’évaluer un front d’onde sortant d’un instrument d’optique. Le Shack-Hartmann est constitué d’une matrice de micro-lentilles refocalisant individuellement le front d’onde en autant de

points focaux. Les déviations des points focaux sur un écran par rapport à la position idéale (centrale) est interprété pour calculer le Strehl de l'instrument.



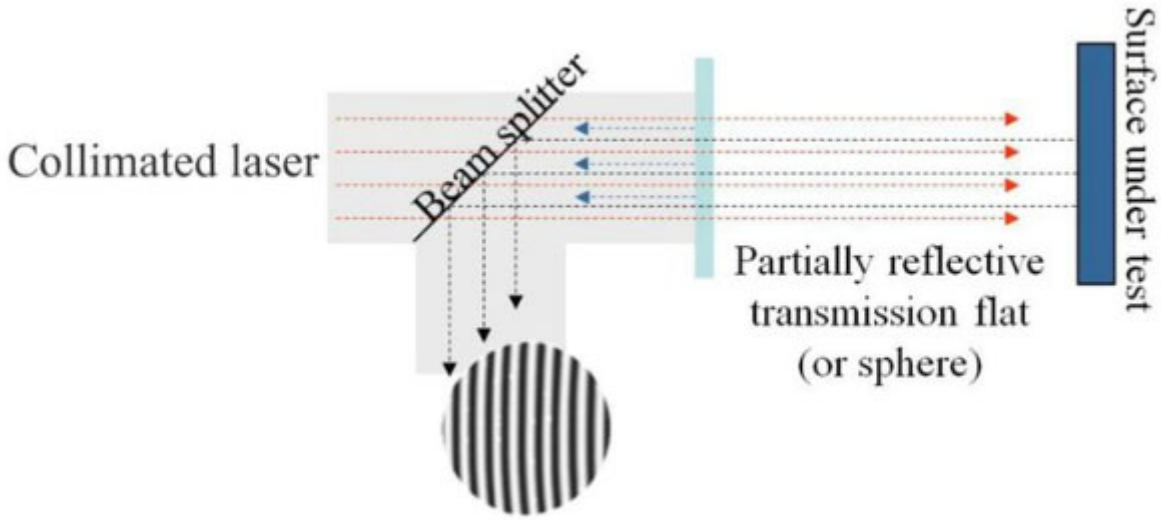
Credit : Wikivisually

Interféromètre désigne le plus souvent dans le monde amateur et pro un dispositif de mesure permettant d'évaluer la qualité optique d'un miroir de télescope ou d'un objectif de lunette. Le principe de l'interféromètre est d'envoyer depuis une même source une lumière monochromatique pour la faire passer par 2 chemins distincts et de longueur différente à l'aide d'un "Beam Splitter" pour certains types d'interféromètre. L'un des chemins doit passer par le miroir ou l'objectif à tester. Les rayons retours sont ensuite réunis afin qu'ils interfèrent pour produire des franges d'interférence. L'analyse de la forme de ces franges permet de déduire les différents paramètres des optiques testées dont le ratio Strehl.

Il en existe plusieurs variantes :

— Interféromètre de Fizeau
— Interféromètre de Michelson (utilisé dans le projet LIGO de détection des onde gravitationnelles)
— Interféromètre de Fabry-Pérot
— Interféromètre de Bath
— Interféromètre de Zygo (utilisés dans la mesure QA des miroirs et des lunettes haut de gamme) [354]
— Interféromètre de Twyman Green (utilisés dans la mesure QA des objectifs)

Zygo Interferometer



Credit : Nikolay Artemiev

Attention un bulletin interférométrique n'est valable que si celui qui l'a produit à bien respecté le protocole autrement le bulletin pourra montrer un réalité différente de la qualité du miroir. Orion Optics un fabricant de miroirs UK a très souvent produit des bulletins interférométriques fantaisistes par manque de rigueur.

Mike Lockwood à dit : *Results from an interferometer are only as honest as the optician/supplier allows them to be.* [523].

A lire aussi "Interferometry - The Myth Buster" de Terry Ostahowski [716].

5.10 Diamètre efficace

Le diamètre efficace où "Effective Aperture" désigne la notion de diamètre efficace fait référence au fait que le diamètre d'un instrument quel qu'il soit est imparfait en raison des aberrations optique mais aussi de l'effet d'une obstruction éventuelle. Le diamètre efficace est le diamètre équivalent d'un instrument parfait qui aura les mêmes performance optiques que l'instrument réel.

Le diamètre efficace du point de vue de la luminosité

La formule générale : $D_{\text{eff}} = D\sqrt{T}$ et la transmission avec obstruction : $T_o = 1 - \text{CO}^2$

	Focal ratio	D pri	D sec	T pri / sec	T lense	CO	T rc	T lame	T Eff	Deff 1	Loss 1
Dobson artisanal 457 mm F/3.6	3.6	475	114	96%	100%	24%	100%	100%	87%	443	-7%
Dobson GSO Deluxe 250 mm F/5	5	250	63	90%	100%	25%	100%	100%	76%	218	-15%
Dobson GSO Deluxe 200 mm F/6	6	200	50	90%	100%	25%	100%	100%	76%	174	-15%
Mak Skywatcher 180 mm F/15	15	180	58	90%	100%	32%	95%	100%	69%	149	-20%
Mak Skywatcher 150 mm F/12	12	150	48	90%	100%	32%	95%	100%	69%	125	-20%
C8 Celestron 203 mm F/10	10	203	69	90%	100%	34%	95%	100%	68%	167	-21%
Ritchey-Chretien Kepler 203 F/8	8	203	85	90%	100%	42%	95%	100%	63%	162	-26%
Newton 0.9 mm (6 inch)	8	152	39	90%	100%	25%	100%	100%	76%	132	-15%
Newton 0.9 mm (8 inch)	6	203	50	90%	100%	25%	100%	100%	76%	177	-15%
Newton 0.9 mm (10 inch)	5	254	63	90%	100%	25%	100%	100%	76%	221	-15%
Newton 0.9 mm (12 inch)	5	305	70	90%	100%	23%	100%	100%	77%	267	-14%
Newton 0.9 mm (16 inch)	4.5	406	79	90%	100%	19%	100%	100%	78%	358	-13%
Newton 0.96 mm (18 inch)	4	457	89	96%	100%	19%	100%	100%	89%	430	-6%
Newton 0.96 mm (20 inch)	3.6	508	114	96%	100%	22%	100%	100%	88%	475	-7%
Newton 0.96 mm (24 inch)	3.3	610	127	96%	100%	21%	100%	100%	88%	573	-7%
Newton 0.96 mm (28 inch)	3.3	711	140	96%	100%	20%	100%	100%	89%	669	-6%
Newton 0.96 mm (36 inch)	3.3	914	190	96%	100%	21%	100%	100%	88%	858	-6%
Newton 0.96 mm (42 inch)	3.3	1067	203	96%	100%	19%	100%	100%	89%	1006	-6%
Lunette 101 mm	7.9	101	0	100%	95%	0%	95%	100%	90%	96	-5%

Credit : J.G. Gricourt

Le diamètre efficace du point de vue de la résolution

La formule générale : $D_{\text{eff1}} = D(1 - \text{CO}^2)^2$, pour une lunette $\text{CO} = 0$

Selon Thierry Legault si on considère les basses fréquences de la MTF : $D_{\text{eff2}} = D - d = D(1 - \text{CO})$ [721, 727] où d est la dimension du secondaire, il admet lui même que cette formule est pessimiste pour les obstructions faibles.

Selon Vladimir Sacek : $D_{\text{eff3}} = D/(1 + \text{CO}^2)$ [691]. Pour obtenir ce résultat il faut calculer l'extension longitudinale de la figure de Airy : $L \propto 1 + \text{CO}^2$ sachant aussi que $D \propto L$.

	Focal ratio	D pri	Strehl Pri	D sec	Strehl sec	CO	Strehl rc	Strehl lame	Strehl Eff	Deff 1	Loss 1	Deff 2	Loss 2	Deff 3	Loss 3
Dobson artisanal 457 mm F/3.6	3.6	457	0.95	114	0.98	25%	1.00	1.00	0.82	402	-14%	343	-33%	430	-6%
Dobson GSO Deluxe 250 mm F/5	5	250	0.91	63	0.95	25%	1.00	1.00	0.76	220	-14%	188	-33%	235	-6%
Dobson GSO Deluxe 200 mm F/6	6	200	0.91	50	0.95	25%	1.00	1.00	0.76	176	-14%	150	-33%	188	-6%
Mak Skywatcher 180 mm F/15	15	180	0.95	58	0.95	32%	0.90	1.00	0.65	145	-25%	122	-48%	163	-10%
Mak Skywatcher 150 mm F/12	12	150	0.95	48	0.95	32%	0.90	1.00	0.65	121	-24%	102	-47%	136	-10%
C8 Celestron 203 mm F/10	10	203	0.95	69	0.95	34%	0.90	1.00	0.64	159	-28%	134	-51%	182	-12%
Ritchey-Chretien Kepler 203 F/8	8	203	0.95	85	0.95	42%	0.90	1.00	0.55	138	-47%	118	-72%	173	-18%
Newton 152 mm (6 inch)	8	152	0.91	39	0.95	25%	1.00	1.00	0.76	133	-14%	114	-34%	143	-6%
Newton 203 mm (8 inch)	6	203	0.91	50	0.95	25%	1.00	1.00	0.76	179	-13%	153	-33%	191	-6%
Newton 254 mm (10 inch)	5	254	0.91	63	0.95	25%	1.00	1.00	0.76	224	-14%	191	-33%	239	-6%
Newton 305 mm (12 inch)	5	305	0.91	70	0.95	23%	1.00	1.00	0.78	274	-11%	235	-30%	290	-5%
Newton 406 mm (16 inch)	4.5	406	0.91	79	0.95	19%	1.00	1.00	0.80	376	-8%	327	-24%	391	-4%
Newton 457 mm (18 inch)	4	457	0.91	89	0.95	19%	1.00	1.00	0.80	423	-8%	368	-24%	440	-4%
Newton 508 mm (20 inch)	3.6	508	0.91	114	0.95	22%	1.00	1.00	0.78	458	-11%	394	-29%	484	-5%
Newton 610 mm (24 inch)	3.3	610	0.91	127	0.95	21%	1.00	1.00	0.79	558	-9%	483	-26%	585	-4%
Newton 711 mm (28 inch)	3.3	711	0.91	140	0.95	20%	1.00	1.00	0.80	657	-8%	571	-25%	684	-4%
Newton 914 mm (36 inch)	3.3	914	0.91	190	0.95	21%	1.00	1.00	0.79	837	-9%	724	-26%	876	-4%
Newton 1067 mm (42 inch)	3.3	1067	0.91	203	0.95	19%	1.00	1.00	0.80	991	-8%	864	-23%	1030	-4%
Lunette 101 mm	800	101	0.98	0	1.00	0%	1.00	1.00	0.98	101	0%	101	0%	101	0%

Credit : J.G. Gricourt

(*) : inclue une réduction du secondaire en raison de l'utilisation de baffles.

Note : le renvoi coudé si il n'est pas haut de gamme il dégradera fortement le Strehl global [745], ce qui explique en partie les mauvais résultat des RC, SCT et des Mak. qui sont déjà handicapés par leur obstruction plus importantes que les Newtons

5.11 Haute résolution planétaire

L'imagerie en haute résolution planétaire demande des techniques avancées d'imagerie mais aussi des conditions de prise de vue et du matériel adaptées [335] :

- Un instrument de diamètre important, en général 300mmm et plus
- Une finesse de polissage des miroirs, RMS et Strehl elevés, par exemple un Strehl > 0.95 pour un miroir primaire
- Une formule optique ne produisant pas d'aberration achromatique ni chromatisme résiduel, exlus donc les lunettes ou dans un certaine mesure les SCT et les Mak connus pour être mauvais dans le bleu
- Un obstruction faible 25% ou moins lorsque c'est possible avec un train d'imagerie installé sur le porte oculaire
- L'utilisation de camera ultra rapides pour battre le seeing
- L'utilisation de camera dont le pic de sensibilité est dans la couleur de la planète voir du filtre utilisé
- L'utilisation d'un correcteur de réfraction atmosphérique selon la hauteur de la planète dans le ciel
- L'utilisation d'un filtre rouge pour atténuer l'effet de la turbulence mais au détriment d'une petite perte de résolution théorique
- Une précision des alignements des miroirs (collimation) plus poussée

Conditions extérieures :

- Une turbulence atmosphérique faible (seeing favorable) et à fréquence lente pour avoir de meilleures brut (photos réalisées à haute vitesse)
- L'absence de turbulence instrumentale, condition respectée si l'instrument est accclimaté

Les instruments à privilégier seront :

— Telescope Cassegrain
— Telescope Newton (même court !)

Des exemples d'images planétaires en haute résolution : Philipe Cambre (Halfie) - Jean-Pierre Brahic (jp-brahic) - Thierry Legault (Legault) - Christopher Go - Damian Peach

5.12 Techniques avancées

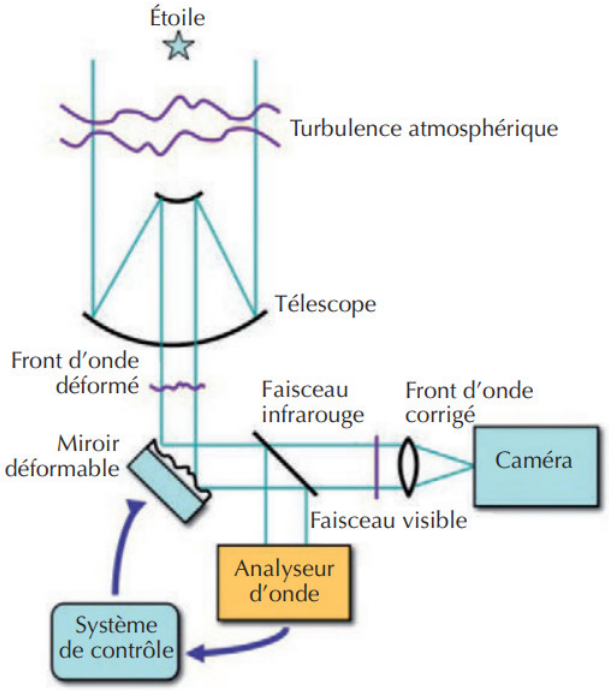
Optique Adaptative ou "AO"désigne un procédé combinant plusieurs éléments formant une boucle de rétroaction

Le procédé fait intervenir différents élements :

— Optique : miroirs, correcteurs
— Mécanique : actionneurs (vérins hydrauliques)
— Électronique : contrôleurs
— Analyseur de front d'onde (WFS)
— Logiciel fonctionnant sur des OS temps réel (algorithmes)

Ce dispositif est destiné à corriger, du moins partiellement en quasi-temps réel, l'effet destructeur de la turbulence atmosphérique sur le front d'onde incident d'une étoile guide de référence dont on enregistre la PSF (modulée par la turbulence). On peut utiliser la technique de déconvolution afin de corriger le champ autour de cette étoile de référence en se basant sur sa PSF. Ce qui ne peut fonctionner que si le front d'onde est perturbé de la même manière pour cette étoile et les autres directions du champ, ce qui est le cas si l'on ne s'écarte pas de l'angle d'isoplanétisme de la turbulence locale. De nos jours, les grands observatoires tels que le VLT qui exploitent ce principe utilisent un laser puissant pour former une étoile guide n'importe où dans le ciel. Le laser excite les atomes de sodium de l'atmosphère qui réémettent de la lumière formant une étoile artificielle. Le front d'onde analysé par l'analyseur de front d'onde, le logiciel envoi des ordres de déformation du miroir via les vérins placés en dessous pour compenser la déformation et annuler ainsi l'effet de la turbulence. L'AO permet d'approcher la résolution théorique des télescopes.

L'écart à un front d'onde sphérique idéal pour les télescopes et les lunettes peut être modélisé par une somme de plusieurs composantes que l'on appelle polynômes de Zernike. Ce polynôme est constitué d'aberrations de différents ordres : piston, tilt, tip, astigmatisme, trefoil, coma, aberration de sphéricité etc ... L'AO professionnelle permet de corriger des ordres de déformations très élevés. Il existe aussi des dispositifs amateurs permettant de corriger le Tip / Tilt, c'est-à-dire le déplacement d'une étoile dans le champ en raison de la turbulence ou de l'erreur de suivi de la monture équatoriale, exemple : Orion SteadyStar Adaptive Optics Guider, Starlight Xpress USB Adaptive Optics. La correction du Tip / Tilt n'influe presque plus sur le gain de Strehl de l'instrument passé 300 mm de diamètre [55].

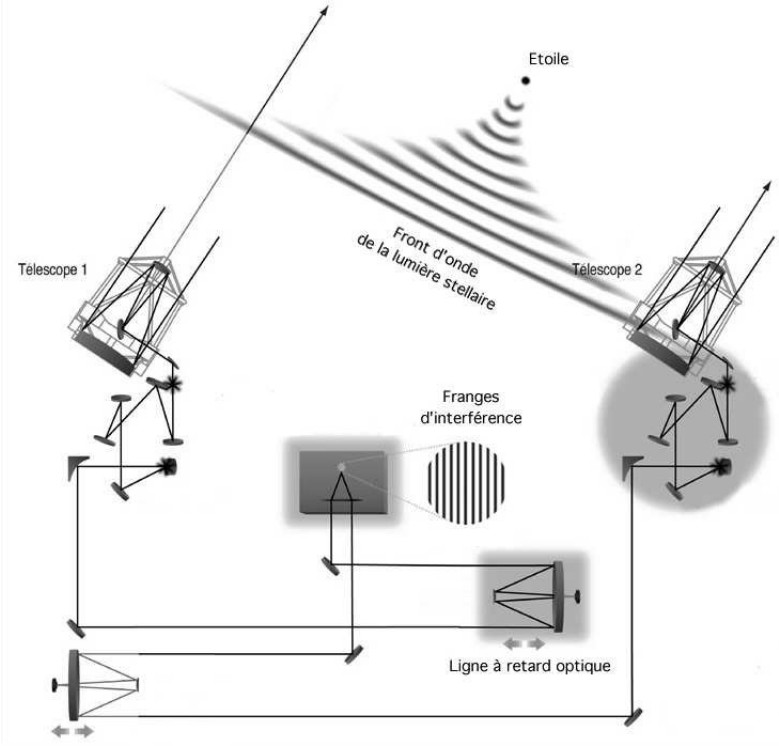


Credit : Reflets de la physique - 2016

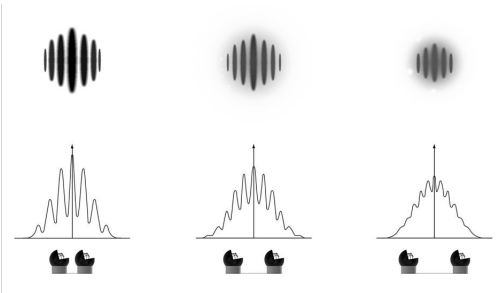


Credit : ESO - VLT

Interférométrie longue base désigne une technique permettant de décupler la résolution des instruments actuels. Le principe consiste à combiner 2 télescopes à miroir comme pour le VLTI afin d'obtenir une résolution d'image équivalente à celle d'un miroir virtuel de diamètre égale à la distance des 2 télescopes. Cette technique est aussi utilisable pour des radiotélescopes comme le VLA. La technique consiste à faire interférer le front d'onde d'une étoile reçu par chacun des 2 télescopes, car chacun des télescopes reçoit le front d'onde avec un retard. On obtient alors une figure de franges d'interférence représentant l'étoile (ou le point image).



Credit : ESO



Credit : ESO

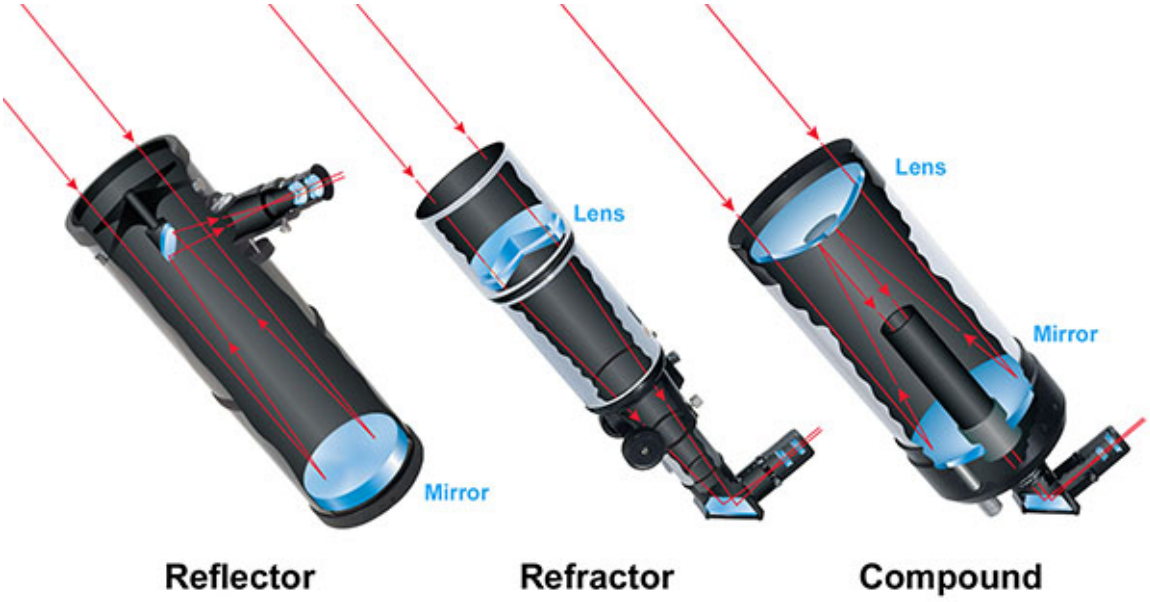
Plus la distance entre les télescopes est grande, plus l'image sera débarrassée des franges et approchera la figure de Airy classique, augmentant significativement la résolution. L'interférométrie longue base a permis d'imager notamment la surface de Bételgeuse ainsi que d'autres étoiles. Le réseau de radio télescopes "Event Horizon Telescope" a pu imager par cette technique le trou noir de la galaxie M87.

Chapitre 6

Les Instruments

6.1 Généralités

Instrument désigne un instrument d'observation astronomique. Il peut être de type réflecteur ou réfracteur. Quel que soit l'instrument, c'est le diamètre qui détermine à la fois sa résolution maximale et son pouvoir collecteur de lumière. Cependant, ce qui limite fortement la résolution des instruments, c'est avant tout la turbulence instrumentale (gestion thermique du tube) qui doit être absolument prise en compte afin de pouvoir exploiter son instrument au maximum de ses capacités.



Credit : Sky & Telescope

Les instruments peuvent être classés en 2 catégorie :

— Les instruments **objectifs** : ceux-ci produisent une image réelle de l'objet que l'on projette en général sur un capteur photo. Ce sont : les objectifs photo graphiques, l'objectif de la lunette, le miroir primaire du télescope, le périscope, microscope, verre correcteurs de lunette. Ceux-ci sont caractérisés par le grandissement de l'image.
— Les instruments **subjectifs** : ceux-ci produisent une image virtuelle de l'objet qu'il est possible de voir avec nos yeux

qui transforment l'image virtuelle en image réelle. On appelle aussi ces instruments "Afocal". Certains sont caractérisés par le grossissement de l'image et d'autres par leur puissance (loupe, microscope).

Facteurs nuisant au potentiel de l'instrument. Inspiré de Don Pensack "4 Cs" rule : correction, collimation, cooling and conditions et du chapitre Telescopes area filters" p35 "The Wobby Stack" du livre "Star Testing Astronomical Telescopes" ou de l'article Astrosurf "Star Test".

1. Objective Correction
   (a) Mirror while cooling (dependant of type of glass and mirror thickness)
   (b) Mirror astigmatism (pinched mirror)
   (c) Mirror coma (on short tube newtonians)
   (d) Mirror or objective spherical aberration
   (e) Central obstruction over 25% (on newtonians and SCTs)
   (f) Objective lense chromatism (on non APO lense)
2. Eyepiece Correction
   (a) Eyepieces off-axis astigmatism (low quality ep used on short tubes)
   (b) Eyepiece spherical aberration (on short tubes)
   (c) Eyepiece chromatism (on low quality ep)
3. Collimation
   (a) Poor mirror alignment
   (b) Poor objective lense alignment (lense cell adjustments)
4. Cooling
   (a) Tube chaotic air currents (on closed tube instrument)
   (b) Boundary Layer currents (mirror surface)
   (c) Heat diffusion from the body and the ground
5. Conditions
   (a) Atmospheric seeing (turbulent air)
   (b) Atmospheric transparency (sky light scatter) [677]
   (c) Light pollution (earth light scatter)
6. Others
   (a) Instrument light scatter (poor baffling)
   (b) Instrument light loss or diffraction from dirty/damaged lenses or mirrors [446]
   (c) Tube flexure (resulting in collimation offseting)

Composants des principaux instruments du commerce :

Instrument	Primaire	Secondaire	Aberration(s)	Correcteur	Modèles
Newton F/D < 8	Parabolique	Plan	C, FC	Correcteur de coma	SW, Orion
Cassegrain	Parabolique	Hyperbolique	C, FC	-	Orion, GSO
Maksutov-Newton	Sphérique	Plan	C	Ménisque	SW, IntesMicro
SCT	Sphérique	Sphérique	S, C, FC, Blue Bloat	Lame	Celestron
SCT EdgeHD	Sphérique	Sphérique	S, C, FC, Blue Bloat	Lame, Lentilles	Celestron
Maksutov-Cass (1)	Sphérique	Sphérique	S	Ménisque	SW
Ruland-Maksutov (2)	Sphérique	Sphérique	S	Lame, Lentilles	SW
Rowe-Akermann	Sphérique	-	S	Lame, Lentilles	Celestron
Riccardi-Honders	Sphérique (mangin)	Sphérique	-	Lame, Lentilles	
Dall-Kirkham	Elliptique	Hyperbolique	A, C	-	Mewlon
CDK	Elliptique	Hyperbolique	A, C	Correcteur dédié	Planewave
Ritchey-Chrétien	Hyperbolique	Hyperbolique	A, FC		
Lunette achro	-	-	FC, CA	Correcteur FC	
Lunette ED, APO	-	-	FC	Correcteur FC	Taka, LZOS
Lunette Petzval	-	-	-	-	Tele Vue

(1) : Variante Gregory (2) : Probablement un Argunov–Cassegrain ou un Klevtsov–Cassegrain à l'origine ...

Note : S = aberration de sphéricité, A = astigmatisme, CO = Coma, FC = field curvature, CA = chromatic aberration.

Matrice des scores sur les principales caractéristiques :

Caractéristiques	Newton <f/5	SCT	Mewlon	MAK	DK	CASS	RCT	Achro f/10	ED f/7	APO <f/7
Coma	4	3	3	0	3	3	0	0	0	0
CA	0	1	0	1	0	0	0	5	2	1
FC	0	2	2	2	2	2	2	5	5	5
Obstruction	3	4	4	2	4	4	5	0	0	0
Contrast	4	3	5	4	3	4	2	2	5	5
Encombrement	4	1	1	1	2	2	2	4	3	3
Poids	5	5	4	4	4	4	4	1	2	5
Turbu. Instru.	3	4	3	4	3	3	3	0	0	0
Tps de mise en temp.	4	5	4	5	4	4	4	2	2	4
Buée	2	5	2	2	2	2	2	0	0	0
Stabilité collimation	3	3	1	5	3	3	3	5	5	5
Sensibilité collimation	3	4	4	0	4	4	4	0	0	0
Facilité équilibrage	3	4	4	4	4	4	4	1	2	3
Usage planétaire	4	3	5	5	2	4	0	0	3	3
Usage DSO	5	2	1	1	1	1	4	3	4	5
Usage astrophoto	5	4	4	3	4	4	4	1	3	5
Usage visuel rich field	5	2	0	0	0	0	0	2	4	4
Overall value	5	3	2	3	2	3	2	3	3	5
Value / price	5	3	1	3	1	3	3	3	5	1

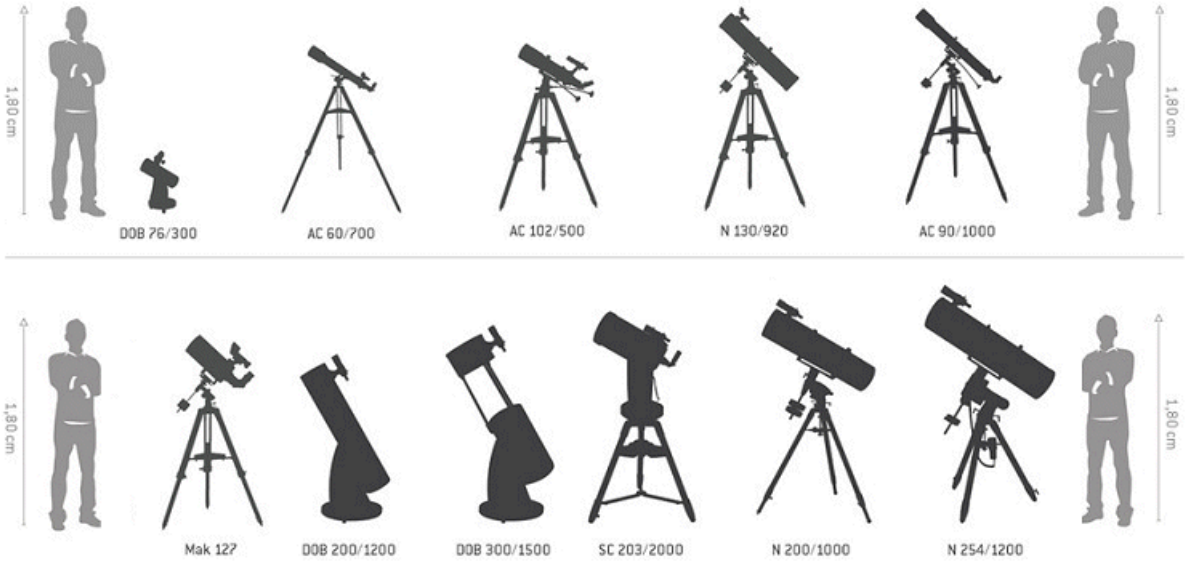
OTA or "Optical Tube Assembly" désigne le tube du télescope sans les optiques.

Telescope désigne un instrument d'observation du ciel ou permettant de faire de l'astrophoto. Chez les américains le terme "Télescope" désigne un instrument dédié à l'astronomie en général alors que pour les Français le télescope n'inclue pas les lunettes astronomiques.

On distingue :

— Les lunettes astronomiques, chez les anglo-saxons un "Telescope" désigne tout type d'instrument astronomique alors qu'en France il s'agit avant tout d'un instrument à miroirs.
— Les télescopes à miroir : Newton, Dobson
— Les télescopes à miroirs et dioptres en verre : Schmidt-Cassegrain, Maksutov ...

Dimension relative des télescopes



Credit : J.G. Gricourt

Usage des instruments

Instrument	Visuel	Photo	Grand champ	Planétaire	DSO	Solaire
Newton	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆	
Cassegrain		⋆⋆⋆		⋆⋆⋆		
SCT	⋆	⋆⋆⋆		⋆⋆⋆	⋆	⋆⋆
Mak	⋆⋆⋆	⋆⋆		⋆⋆⋆		
CDK		⋆⋆⋆	⋆⋆		⋆⋆⋆	
RC		⋆⋆⋆			⋆⋆⋆	
Lunette Achro	⋆⋆⋆			⋆	⋆	⋆⋆⋆
Lunette ED	⋆⋆⋆	⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆
Lunette APO	⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆

La colonne "Photo" mentionne les instruments qui en général sont dédiés exclusivement à la photo, l'observation visuelle est possible, mais pas optimale, car d'autres instruments remplissent mieux ce rôle. Les lunettes ED et APO sont en général très courtes.

Autres caractéristiques des instruments

Instrument	Compacité	Mobilité	Stab. image	Stab. collimation	Sens. à la buée	Tps refroidissement
Newton				⋆	⋆	⋆⋆
Cassegrain	⋆⋆			⋆	⋆	⋆⋆
SCT	⋆⋆⋆		⋆⋆		⋆⋆⋆	⋆⋆
Mak	⋆⋆⋆			⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆
CDK				⋆⋆	⋆	⋆⋆
RC	⋆			⋆⋆	⋆	⋆⋆
Lunette Achro		⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆		
Lunette ED	⋆⋆	⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆		
Lunette APO	⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆		⋆⋆

Nomenclature : Stab. = stabilité, Sens. = sensibilité, Tps = temps

La stabilité de l'image est dictée par la sensibilité de l'instrument à la turbulence atmosphérique (augmentant avec le diamètre) et à la turbulence instrumentale (avantage aux instruments fermés).

Les télescopes comme tout système optique complexe peuvent souffrir de nombreuses aberrations optiques qui rendent l'image moins lisible.

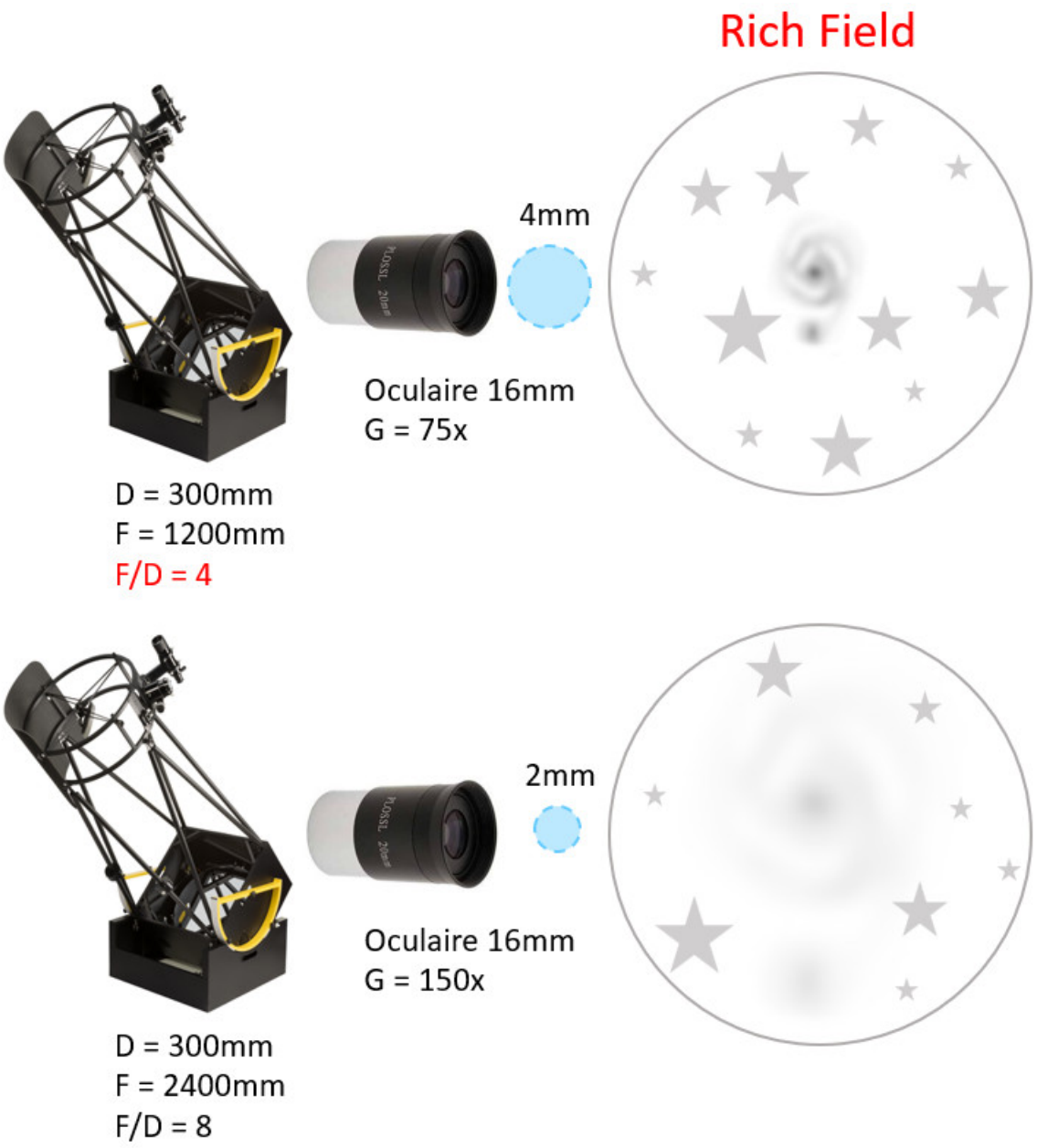
Aberrations des instruments

Instrument	Coma	Sphérique	Astigmatisme	Chromatisme	Sphérochromatisme	Courbure de champ
Newton	⋆⋆⋆	⋆		0		
Cassegrain	⋆		⋆	0		⋆
SCT	⋆⋆	⋆	⋆	⋆	⋆	⋆⋆
Mak			⋆	⋆		⋆
CDK	⋆⋆		⋆	0		⋆
RC			⋆⋆	0		⋆⋆⋆
Lunette Achro				⋆⋆⋆	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆
Lunette ED				⋆	⋆⋆	⋆⋆⋆
Lunette APO		⋆		0	⋆	⋆⋆⋆

L'aberration de sphéricité (AS) peut aussi être présente chez les Newton soit par un TDE / TUE, soit par la déformation du primaire encore trop chaud. Pour le SCT c'est une lame de fermeture correctrice mal appairée qui peut montrer de l'AS. Pour la lunette APO la focale très courte introduit de l'AS également.

Les modèles haut de gamme de ces formules optiques corrigent totalement certaines aberrations optiques grâce à l'usage de correcteurs soient intégrés à l'instrument soit à rajouter soi-même dans le train optique.

RFT signifie "Rich Field Telescope" on peut l'appeler aussi "Light Bucket", désigne un télescope, le plus souvent un Dobson de grand diamètre et de ratio F/D très court inférieur à 7 [490] mais idéalement inférieur à 4 utilisés à faible grossissement, permettant de faire apparaitre le maximum d'étoiles dans un même champ. Un RFT permet de voir le ciel avec le maximum de luminosité, idéalement avec une pupille de sortie égale à celle de l'oeil dilaté dans le noir [618, 357].



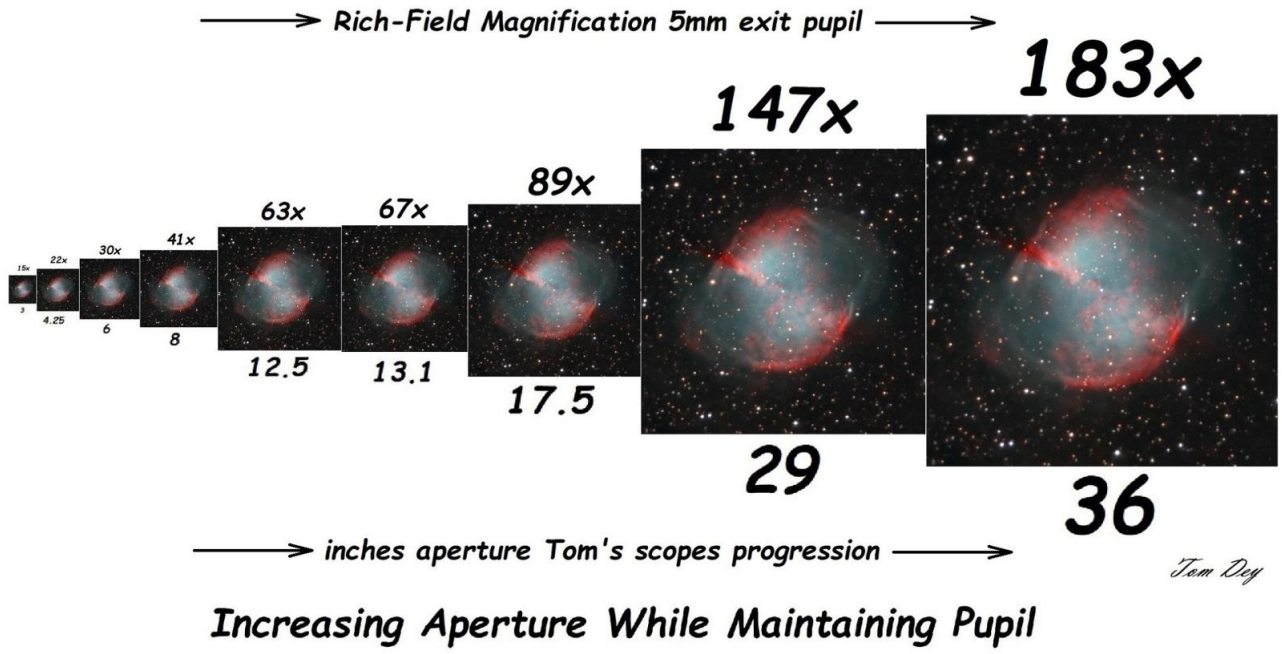
Credit : J.G. Gricourt

Mike Lockwood recommande toutefois de veiller à utiliser un Newton respectant les caractéristiques suivantes [525] :

— Un rapport F/D d'au moins 3 pour que le correcteur de coma Paraccor II puisse complètement corriger le champ
— Une focale dans la plage des [50" - 60"] afin que les forts grossissements soient atteignables sans l'utilisation de la barlow

Don Pensack a dit : *"Bear in mind, doubling the aperture at the same f/ratio means the larger aperture is the same brightness at twice the magnification. Who wouldn't like that for most DSOs ?"* [244]

Rich Field Magnification



Credit : Tom Dey

Réflecteur désigne tout instrument comportant a minima un miroir réfléchissant, par exemple : Newton, SCT, RC ...

Réfracteur désigne tout instrument pourvu de lentilles uniquement, par exemple : lunettes astronomiques, chercheur optique...

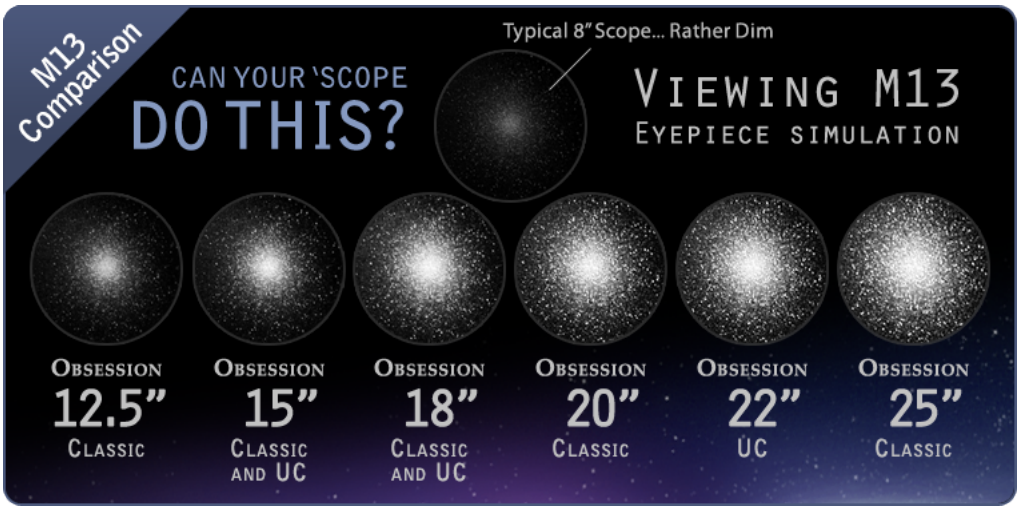
Astrographe désigne de manière générale un télescope dédié à l'imagerie. Les astrographes dédiés au ciel profond ont en général les caractéristiques suivantes :

1. Rapport F/D court pour les longues poses
2. Miroir secondaire large pour maximiser l'éclairement du capteur (CPL = champ pleine lumière)
3. Le plan focal plus en dehors du tube pour faciliter l'empilement d'accessoires

Diamètre désigne le plus souvent le diamètre de l'instrument à savoir le diamètre de l'élément optique principal collecteur de la lumière, lentille (objectif) ou miroir. Plus le diamètre de l'instrument est important, plus les objets vus au travers l'oculaire seront lumineux et résolus. La dimension de la figure de Airy est inversement proportionnelle au diamètre de l'instrument. Exemple de diamètres courants : 6" = 150 mm, 8" = 200 mm, 10" = 250 mm, 12" = 300 mm, 14" = 350 mm, 16" = 400 mm, 18" = 450 mm, 20" = 500 mm, 22" = 550 mm, 24" = 600 mm.



Credit : Webster Telescopes



Credit : Obsession Telescopes

Collimation désigne l'opération d'alignement des éléments optiques d'un instrument d'astronomie. Cet alignement permet de garantir :

— Que l'image ne souffrira pas d'aberrations optiques au-delà du fonctionnement optimal de l'instrument
— Que l'image d'une étoile au centre du champ (une source de lumière à l'infini) produit un point image dotée de cercles concentriques (la figure de Airy).

Voir aussi le chapitre détaillé sur la collimation du Newton [83, 75].

Pastille de collimation ou "Center Spot" ou "Donut" ou "Donut Spot" ou "Center Spot Ring" ou "Center Spot" désigne le cercle autocollant en forme de "Donut" apposé au centre optique du miroir primaire et qui permet de mettre en oeuvre

la collimation à l'aide d'un outil approprié. Le positionnement de la pastille est d'autant plus critique que le ratio F/D est court. La pastille doit reposer exactement sur le centre optique du miroir qui normalement doit aussi coïncider avec le centre géométrique cependant ce n'est pas toujours le cas.

Si Δ_p est l'erreur de centrage de la pastille, alors les erreurs induites dans les alignements axiales sont : FAE $= \Delta_p$ et PAE $= \Delta_p/2$ [370, 770] donc : FAE $= 2 \times$ PAE dans ce cas. L'erreur PAE induite par l'erreur de centrage s'ajoute à l'erreur de collimation constatée au cheshire : $\text{PAE}_{\text{réelle}} = \frac{\Delta_p}{2} + \frac{\text{PAE}_{\text{erreur collim.}}}{2}$ [774].

On considère qu'il faut positionner la pastille avec une erreur max $\Delta_p = \text{CFF}_{\text{mm}}/2 = 0.0109 \times (F/D)^3$ [775]

Cependant, la plupart du temps positionner la pastille à une distance inférieure à +/-0.5 mm du centre est suffisant compte tenu d'une utilisation sous des conditions normale de turbulence et ce même pour des tubes courts [180, 546].

Méthodes pour positionner précisément une pastille de collimation en cherchant le centre géométrique :

— La feuille de papier circulaire à la dimension du miroir dont a on repéré le centre exact par la méthode du pliage
— le template en acétate de cellulose de CatsEye
— Le Telmat

Méthodes pour positionner précisément le miroir secondaire :

— Un Cheshire à croix ou un Telecat chez CatsEye
— Un Concenter = Collimateur Concentrique

Outils de Collimation désigne un outil utilisé pour réaliser l'alignement des optiques de l'instrument. Selon les instruments, lunettes, télescope Catadioptrique, télescope Newton les outils utilisés ne seront pas les mêmes.

La première méthode reposant sur l'observation d'une étoiles lumineuse est utilisable sur tout type d'instrument. Cependant, elle nécessite un fort grossissement, ce qui n'est pas toujours envisageable sur de gros diamètres compte tenu de la turbulence atmosphérique. Afin de jauger de la qualité collimation il est nécessaire que le centre du miroir primaire soit marqué avec une pastille de collimation. La qualité de la collimation dépend d'abord du parfait centrage de la pastille sur le primaire.

Comparatif des méthodes de collimation

Méthode	Passif	Newton	Lunette	SCT (1)	Sens. Insertion	Sens. Pastille	Précision
Oeilleton simple	✓	✓	-	-	-	✓	⋆
Cheshire	✓	✓	-	-	-	✓	⋆⋆
Takahashi Collimation Telescope	✓	✓	-	✓	-	✓	⋆⋆
Concenter VISUS	✓	✓	-	✓	-	✓	⋆⋆
Spheretec Concenter RAY 2	✓	✓	-	✓	-	✓	⋆⋆
Concenter TS Optics / APM	✓	✓	-	✓	-	✓	⋆⋆
Laser simple	-	✓	-	-	✓	✓	⋆⋆
Laser barlowté (Howie Glatter)	-	✓	-	-	-	✓	⋆⋆⋆
Autocolimateur Catseye	✓	✓	-	-	-	✓	⋆⋆⋆
Duncan Mask	✓	-	-	✓	-	-	⋆⋆
OCAL	-	✓	-	✓	-	-	⋆⋆⋆
REEEGO	-	✓	✓	✓	-	-	⋆⋆⋆
ACT laser collimator (Mire Hotech)	-	-	-	✓	-	-	⋆⋆⋆
GMK-Kollimator	-	✓	✓	✓	-	-	⋆⋆⋆
Collimation sur une étoile artificielle	-	✓	✓	✓	-	-	⋆⋆⋆⋆
Collimation sur une étoile	✓	✓	✓	✓	-	-	⋆⋆⋆⋆

(1) : SCT, RC, DK, Cassegrain, Mewlon (2) : Appelé aussi microscope de collimation en raison de l'effet grossissant pour mieux voir la pastille de collimation sur le miroir secondaire.

Le "Concenter" = Collimateur Concentrique est d'abord utilisé pour rendre concentrique l'image du secondaire vue depuis le porte oculaire mais reste trop imprécis pour collimater le miroir primaire [246].

Note : Sens. Insertion = sensible au parallélisme dans le porte-oculaire, Sens. Pastille = sensibilité au centrage de la pastille de collimation du miroir.

Zone d'action des méthodes de collimation pour Newton et précision de lecture [773]

Méthode	Grossissement de l'erreur	Précision de lecture
Oeilleton simple	1 x PAE	⋆
Concenter	1 x PAE	⋆
Cheshire	2 x PAE	⋆⋆
Laser barlowté (Howie Glatter)	2 x PAE	⋆⋆
Autocolimateur Catseye	2 x FAE (1er trou), 4 x PAE si FAE = 0 (2e trou)	⋆⋆⋆

Collimation avec un Laser désigne l'outil de collimation pour les télescopes Newton permettant de régler l'alignement du miroir primaire par rapport au secondaire. Cet outil permet de réaliser la collimation du primaire dans l'obscurité. Il faut veiller à l'absence de jeu lorsque le laser est inséré dans la porte-oculaire. Il faut aussi être attentif à la collimation du laser lui-même pour s'assurer que le faisceau sort en étant parallèle au cylindre qui le génère.

Des lasers précisement usinés et parfaitement collimatés :

— Farpoint 650nm Laser Collimator
— Howie Glatter Single-Beam laser

Pour gagner en précision il faut utiliser une variante utilise le laser “Barlowed Laser”. Le laser peut aussi désigner l’outil de pointage. Son usage est très réglementé, il faut veiller à ce qu’il ne dépasse pas 3mW de puissance afin d’être conforme à la législation.

Mike Lockwood dit à ce propos : “I use the laser alone for secondary collimation, a properly collimated laser is quite sufficient to align the secondary. Takes about a minute.”

Collimation avec un masque Tri-Bathinov désigne la collimation d’un télescope ou d’une lunette astronomique à l’aide d’un masque à placer devant l’instrument. La méthode consiste à évaluer la symétrie d’une étoile vue au travers du masque [545]. Tout comme la masque de Bathinov classique, le Tri-Bathinov permet aussi d’évaluer la mise au point sur une étoile. L’avantage du Tri-Bathinov est qu’il ne nécessite pas d’apposer un oeilleton de collimation au centre du miroir.

Collimation sur une étoile désigne la collimation d’un télescope ou d’une lunette astronomique basée sur l’examen de l’aspect d’une étoile lumineuse observée à fort grossissement. La collimation d’un télescope ou d’une lunette peut être réalisée en théorie sans outil spécial grâce à cette méthode simple en théorie. Cette méthode que l’on appelle aussi “Star Test” consiste à grossir au moins 50 fois le diamètre du primaire en pouce comme le recommandent Damian Peach et Vladimir Sacek [694]. Ou encore d’utiliser un oculaire de focale égale au ratio F/D [315].

Attention il ne faut pas laisser le correcteur de coma lorsqu’on collimate sur une étoile (mais ok avec un laser) car il faut d’abord annuler la coma au centre en collimatant l’instrument avant d’utiliser le correcteur.

Voir les étapes de la méthode de base : Damian Peach

1. Viser une étoile à 45° de hauteur environ
2. Grossir à 150x (ou 1 fois le diamètre de l’instrument)
3. défocaliser l’étoile jusqu’à voir l’ombre du secondaire au milieu de cercles lumineux concentriques
4. À l’aide des vis de collimation centrer l’ombre du secondaire dans le disque lumineux
5. Recentrer l’étoile dans le champ à chaque itération
6. Grossir à 2 fois le diamètre et défocaliser légèrement l’étoile jusqu’à voir des cercles lumineux (figure de Airy défocalisée) et surtout un point lumineux au centre
7. A l’aide des vis de collimation rendre concentrique les cercle lumineux
8. Recentrer l’étoile dans le champ à chaque itération

Autre vérification :

1. Viser un champ étoilé
2. Vérifier que la zone du champ où la coma s’annule est bien le centre du champ

Voir la méthode valable pour tous types d’instrument en s’aidant d’une caméra

Dans le cas des télescopes à miroirs :

— Cette méthode consiste à réduire la coma au centre du champ
— Cette méthode ne dépend pas de la précision du positionnement d’une pastille de collimation au centre géométrique du miroir

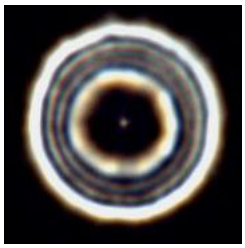
Le “Start Test” présente plusieurs inconvénients :

— La dimension de la figure de Airy est inversement proportionnelle au diamètre de l'instrument et donc pour un instrument 200 mm et plus celle-ci nécessitera des grossissements souvent impraticables pour être examinée avec fiabilité.
— La turbulence empêchera d'atteindre le grossissement requis par ce test et souvent la figure de Airy aura été remplacée par des tavelures qui sont d'une autre nature
— Cette méthode se fait principalement au jugé sans repère, elle n'est donc pas infaillible
— Cette méthode ne permet pas de garantir que l'axe optique (rayon central) soit colinéaire avec l'axe mécanique du porte-oculaire (même problématique que la collimatioin "New Model") même si les deux axes se rejoignent sur le plan focal. Ce sera un pbroblème en imagerie car le CPL sera ovalisé dans ce cas et l'obstruction par le secondaire ne sera pas minimisée.

Jason Khadder a dit : *"Besides, star collimation only helps in bringing the optical axis very close to the eyepiece center but it will not tell you if the eyepiece and the primary mirror axes are coincident with good precision"* [380]

Don Pensack a dit : *"I've collimated many many scopes over the years and I have yet to see a scope where star collimation could improve the image quality that followed the accurate use of collimation tools. That probably indicates that worry about off-center primary center markers is a "red herring""* [242]

Donc la collimation sur une étoile ne permet de collimater l'instrument que pour le centre du champ, car si l'axe du porte-oculaire et l'axe optique ne se croisent pas exactement à 90° "The eyepiece and the primary mirror axes are NOT coincident" et il y aura de la coma plus prononcée d'un côté dès que l'on est plus au centre du champ.



Credit : Turbulence and SCT Collimation

On peut faciliter grandement la collimation sur une étoile par l'utilisation d'un filtre rouge [102] comme le Baader 610 nm utilisé aussi en imagerie solaire "White Light"

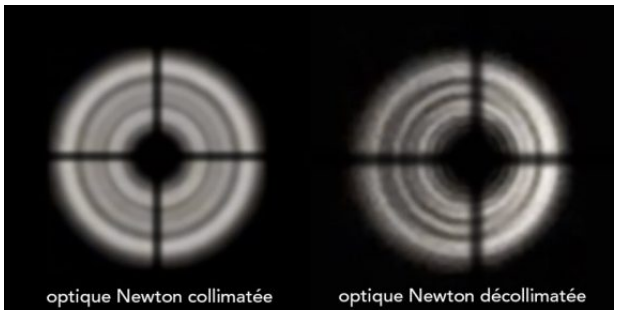
— Le seeing est moins turbulent dans la longueur d'onde rouge
— La figure de Airy est plus grosse dans le rouge, elle est donc mieux perçue
— Le filtre annule de fait la dispersion atmosphérique (mauvaise si l'étoile est basse)
— La figure de Airy est plus propre, car certaines aberrations du télescope sont atténuées

Collimation incrémentale sur une étoile désigne la collimation d'une télescope ou d'une lunette astronomique basée sur l'examen de l'aspect d'une étoile lumineuse observée à faible grossissement. Cette méthode est une généralisation de la collimation sur une étoiles qui consiste à grossir de manière incrémentale en utilisant des grossissements déduit d'une pupille de sortie précise et ce jusqu'à l'obtention de la figure de Airy l'objectif final pour parfaire la collimation. Toutefois selon l'instrument, les conditions d'observation (variables) et l'expérience de l'observateur on pourra s'arrêter à l'une de ces étapes. De manière générale la méthode consiste à toujours obtenir des cercles concentriques quelque soit la figure obtenue selon le grossissement employé.

Dans le cas de la première figure $d = 3$ on observe l'ombre du secondaire au centre de l'image et un disque blanc autour [83]. Le but est de rendre concentrique l'ombre du secondaire avec le reste du pattern en retouchant les vis de collimation

du miroir primaire. On peut artificiellement “grossir” l’ombre du secondaire en masquant les bords du miroir primaire.

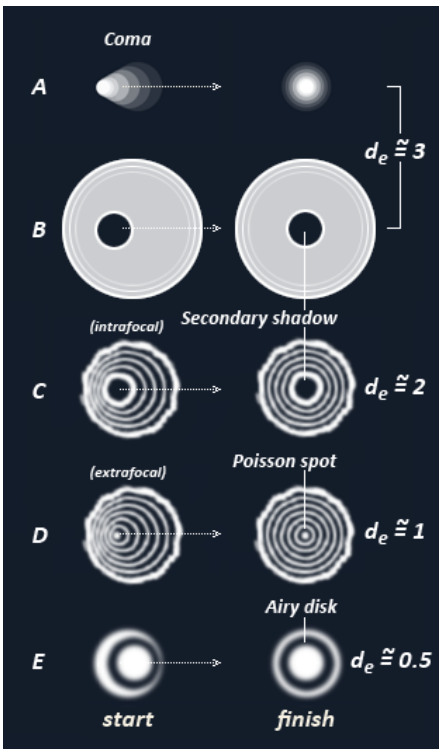
Image de l’étoile défocalisée à $d = 3$



Credit : Stelvision

L’idée est similaire lorsque l’on poursuit à l’étape suivante (on change de grossissement). Pour info le grossissement vaut : $G = D/d$.

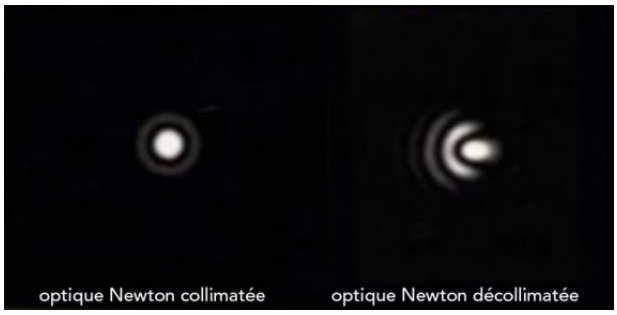
Collimation incrémentale sur une étoile



Credit : Bruce Mc Evoy

Note : $d_e = d =$ *exit pupil diameter* $= D/G$.

Image de l'étoile défocalisée à $d = 0.5$



Credit : Stelvision

6.2 Les Jumelles

Jumelles ou "Paire De Jumelles' désigne un instrument composé de 2 petites lunettes accolées utilisées pour observer avec ses 2 yeux (vision binoculaire). Le grossissement est donné par le champ visible en mètre à une distance de 1000 m ou "Champ Linaire" exprimé en mètres, le champ angulaire réel se calcule alors par : $\sin(\text{Champ}_{\text{réel}}) = \text{Champ}_{\text{linéaire}}/1000$, le champ apparent par : $\text{Champ}_{app} = G \times \text{Champ}_{\text{réel}}$. Contrairement à l'intuition, le gain réel en luminosité sur des objets étendus du ciel profond par rapport à la vision monoculaire à l'aide d'un oculaire classique derrière un télescope n'est pas doublé pour atteindre 100% de gain, en réalité le cerveau perçoit 40% = "The Binocular Summation Factor" [280, 683] d'intensité lumineuse et de contraste supplémentaire, qui est une évaluation empirique, car le traitement de l'information binoculaire par le cerveau est encore largement inconnu [1] [278]. C'est ce que l'on appelle la sommation binoculaire où 1+1 ne vaut pas 2, mais $\sqrt{2} = 1.414$. Pour les étoiles, le gain est plutôt de 20% [279].

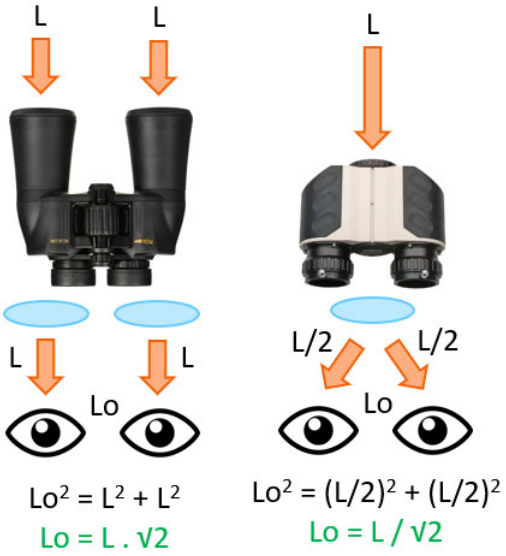
Relations [414] où $d = \text{exit pupil} = D/G$

1. Brightness (avec d constant) $\propto D^2$
2. Sky background $\propto d^2$ et (avec D constant) $\propto 1/G^2$
3. Profondeur de champ DOF $= 4 \times \lambda \times (F/D)^2$ (voir mise au point, $\lambda = 550nm$)

Attention, la profondeur de champ théorique DOF = Deep Of Field n'est fonction que du rapport F/D de l'objectif et indique la plage de distance de mise au point pour laquelle le critère de Rayleigh $\lambda/4$ est respecté, autrement dit "Diffraction Limited". Dans ce cas, la résolution de l'image n'est pas limitée par l'instrument. En revanche, les capacités physiologiques d'accommodation de l'observateur jouent un grand rôle dans la perception de cette profondeur de champ. Sachant que l'accommodation diminue statistiquement avec l'âge.

1. Light Vision Color" de Arne Valberg page 206

Addition binoculaire



Credit : J.G. Gricourt

Si le flux d'entrée de chaque objectif de l'instrument est L et que le flux perçu par les 2 yeux (additionnés) est Lo alors avec des jumelles on a $L_o^2 = L^2 + L^2$ et avec une tête binoculaire $L_o^2 = (L/2)^2 + (L/2)^2$. Les flux d'entrée sont comparables ici si seulement on met devant la tête binoculaire un objectif unique de même diamètre que celui de la demi paire de jumelles.

Selon l'étude de Jacqueline M. Nelson-Quigg [365] la sensibilité binoculaire de la vision $S_g = L_{\text{input}}/L_{\text{output}}$ soit le rapport des luminosités entre l'entrée (stimulus) et la sortie (la perception), vérifie la relation : $S_g = \sqrt{S_L^2 + S_R^2}$ où S_L et S_R sont les sensibilités des yeux pris individuellement. Si les 2 yeux ont la même sensibilité alors : $S_g = \sqrt{2}S$ il s'agit du gain (40%) de la vision binoculaire énoncé plus haut.

Si l'on considère que la luminosité d'une lunette, celle-ci est proportionnelle à la surface de l'objectif : $L = k \propto A_{\text{objectif}}$ alors des jumelles de diamètre D_j aura une luminosité équivalente à un instrument de type lunette ou télescope de diamètre $D_t^2 = \sqrt{2} \times D_j^2$ (on considère ici une pupille de sortie similaire).

Une tête binoculaire classique divise le flux lumineux de l'instrument (télescope ou lunette) en 2, donc un instrument de diamètre D_b doté d'une bino aura une luminosité équivalente à un instrument de type lunette ou télescope de diamètre $D_t^2 = (\sqrt{2}/2) \times D_b^2$ (on considère ici une pupille de sortie semblable).

Attention, une tête binoculaire de type "Linear" ne divise pas le flux lumineux en 2, mais divise le champ en 2 à la place.

Des prismes permettent de renverser les images à l'endroit. Les prismes doivent être correctement dimensionnés (pas trop petits) afin de ne pas vigneter l'ouverture, la "Working Aperture" des prismes ne doit pas être inférieure à celle produite par les objectifs. Pour déterminer le diamètre effectif des jumelles, c'est-à-dire le diamètre du faisceau lumineux non vigneté.

Il existe 2 modèles de jumelles, les jumelles à prismes de Porro et les jumelles à prismes en Toit. Les jumelles à prismes de Porro sont plus simples de conception, mais sont plus volumineuses et plus lourdes. Des fabricants de jumelles à prismes de Porro : Fujinon, APM (KUO chine), Oberwerk.

Les jumelles à prismes en Toit sont plus compactes, mais de conception optique plus complexe pour atteindre les performances des jumelles à prismes de Porro.

Les jumelles à prismes en Toit utilisent le plus souvent des prismes de type “Schmidt–Pechan”. La formule optique des jumelles en toit “Schmidt–Pechan” introduit inévitablement un déphasage du front d’onde, qui se traduit par une différence de marche de l’onde qui produit alors des interférences et qui doit donc être corrigée en appliquant un traitement correcteur de phase = “Phase Coating” sur l’une des surfaces du prisme [395] afin de garantir un contraste optimal. Ce type de jumelles à grand champ présente souvent le défaut de montrer un voile circulaire = “Veiling Glare” autour du champ alors que le soleil même éloigné du champ de vision éclaire vivement l’environnement.

Les jumelles à prismes de type Porro ou “Abbe Köning” ne nécessitent pas de correction de phase et ces derniers ne se trouvent que sur certains modèles très haut de gamme tel que Zeiss.

La couche réfléchissante des “Schmidt–Pechan” peut être un simple traitement SiO^2 dit “Silver” ou une couche de traitement diélectrique pour une meilleure transmission lumineuse et proche de 99%.

Les prismes doivent aussi être dimensionnés afin de garantir que la pupille de sortie soit parfaitement circulaire et sans obstruction. Lorsque les prismes sont sous dimensionnés, il peut se produire des réflexions autour de la pupille de sortie, ces réflexions sont visibles sous forme de “Fingernails”.

La transmission lumineuse des verres est améliorée par le traitement multicouche : MC ou FMC (préférable). Le traitement multicouche des verres de type diélectrique améliore encore la transmission lumineuse.

Les prismes en BK7 (borosilicate crown) sont de moins bonne qualité contrairement aux prismes en BaK-4 (barium crown) :

1. Possèdent une meilleure transmission lumineuse et donc offre une image plus lumineuse
2. Montrent une pupille de sortie parfaitement ronde (indice de réfraction plus important)



The BH Binocular Buying Guide

Les avantages des jumelles :

1. La vision binoculaire procure 40% de contraste supplémentaire
2. Les objets de faible éclat surfacique sont mieux perçu à faible grossissement
3. Champs stellaires visibles plus larges
4. Vision non renversée
5. Utilisation à mains nue possible (si grossissement inférieur à 10x)

Les utilisateurs plus âgés préférerons des jumelles à pupilles de sortie plus petites (5 mm ou moins) car :

1. La pupille max de l’oeil âgé est plus étroite (inférieure à 7 mm)

2. Lorsque la pupille est grande ouverte (la nuit) l'effet de l'astigmatisme de l'oeil âgé est alors maximal

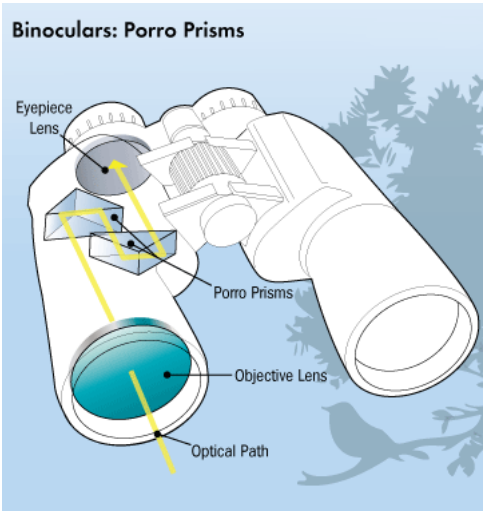
Autrefois les jumelles destinées à un usage diurne (des modèles militaires) étaient normalement exempts de distorsion (les droites restent des droites dans le champ) toutefois pour éviter l'effet désagréable de "Globe Effect" on a introduit de la distorsion en coussinet dans les jumelles modernes (voir August Sonnefeld - Zeiss).

La distance "Eye Relief" est importante pour les porteurs de lunettes (15 mm et plus), de même l'ajustement dioptrique doit permettre de corriger un défaut de correction de la vue de l'observateur (valeurs positives ou négatives). Comme les lunettes, les jumelles bénéficiant de verres ED ne présenteront pas d'aberration chromatique et seront donc plus contrastées.

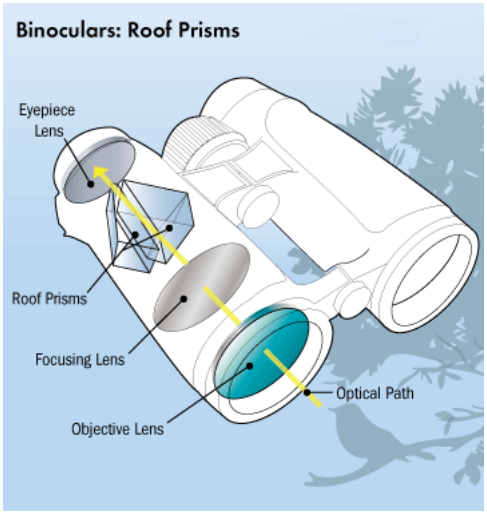
Les verres ED sur des jumelles sont moins utiles en utilisation nocturne ou à faible grossissement. Ainsi, en raison du faible grossissement des jumelles (de x8 à x50) celles ci sont en général dédiées à l'observation du ciel profond où la correction chromatique est moins utile vue la faible luminosité des objets observés.

La focale réelle des jumelles est généralement inconnue, il faut la déduire de la mesure de la distance minimale de mise au point L et de la distance x parcourue par l'oculaire pour passer de cette position à la focalisation à l'infinie, alors la focale s'écrit : $F^2 = (L - F)x$ et comme L est très grand $F = \sqrt{Lx}$ [384].

À diamètre égal, le "Eye Relief" sera diminué lorsque le grossissement augmente.



Best binoculars : Porro prisms



Best binoculars: Roof prisms

Pour mesurer l'ouverture réelle des objectifs, on peut utiliser le "Flash light test" [324] qui consiste à :

1. Régler la mise au point des jumelles à l'infinie
2. Envoyer un faisceau de lumière au travers de l'oculaire une distance minimale de 10 fois la focale de l'oculaire, il suffit alors de mesurer le diamètre de la tache lumineuse circulaire sortant des objectifs

Plus le grossissement G des jumelles est important plus on perd en confort et en qualité d'observation, on peut estimer le terme "Binocular Efficiency" par la formule : $E_{\text{handheld}} = E_{\text{mounted}}/(1 + 0.05 \times G)$ [599]

Certaines jumelles sont construites à partir de 2 tubes optiques de lunettes ED ou APO. Les 2 tubes sont reliés et les oculaires (interchangeables ici) sont utilisés sur un EMS (de Tatsuro Matsumoto) qui est un type de redresseur à miroirs.

La plupart des jumelles sont scellées et remplies d'un gaz inerte (argon ou azote) pour plusieurs raisons :

— L'oxygène de l'air peut oxyder les parties métalliques internes avec le temps
— L'humidité sous forme condensée pourrait faciliter le développement de champignons
— Avec les températures froides, de la condensation (buée) pourrait se déposer sur la face interne des optiques = "Fogging"

Caractéristiques importantes pour les observateurs de la nature = "Birding" :

— Un corps en magnésium pour sa solidité et sa légèreté
— La distance minimale de mise au point qui doit être la plus faible possible (moins de 2 mètres)
— La mise au point centrale pour viser très vite toutes distances possibles
— Le grossissement de 8 afin de ne pas avoir besoin de trépied

Le modèle classique plébiscité par les ornithologues sont les jumelles 8x42 à prisme en toit.

Caractéristiques importantes pour les astro amateurs :

— Une pupille de sortie de 5 à 7 mm
— Une mise au point individuelle sur chaque oculaire, ce réglage change très peu, car on ne vise que des objets à l'infini
— Un champ apparent de 60 à 70° pour un effet immersif

Le modèle classique plébiscité par les astro amateurs sont les jumelles 10x50 à prisme de Porro.

Des comparatifs très complet de jumelles actuelles : The Binocular Sky, Binocular Today, Binomania

Jumelles 16x70 désigne les jumelles et les chiffres indiqués sont respectivement le grossissement et le diamètre des objectifs, ex : G = 16, D = 70 mm.

BT où "Binocular Telescope" désigne des jumelles de grand diamètre, généralement dédiées à l'observation du ciel nocturne. Unexemple utlime de BT, les Jumelles APM SD 150mm sur monture xxx 1, Facebook (Claw Clarasso)

EMS désigne un redresseur à base de 2 miroirs. Ce type de dispositif est utilisé pour construire des jumelles à partir de 2 lunettes : EMS ou Binotechno.

Avantages de l'EMS :

— Il n'y a pas l'inconvénient de la diffraction de la lumière au passage de la ligne de toit d'un prisme
— La fusion des images peut se faire quelque soit le grossissement employé

Bishop Index désigne un indicateur de luminosité de jumelles : $BI = G \times D$ où G est le grossissement et D est le diamètre des objectifs. Cet indicateur exprime la capacité des jumelles à détecter les faibles étoiles.

Binocular Performance Index ou "BPI" [281] désigne un indicateur de luminosité de jumelles plus précis que la pupille de sortie : BPI = AI + contrast (%) + transmission (%) où AI est le "Adler Index". Cette indicateur exprime la capacité des jumelles à détecter les faibles étoiles.

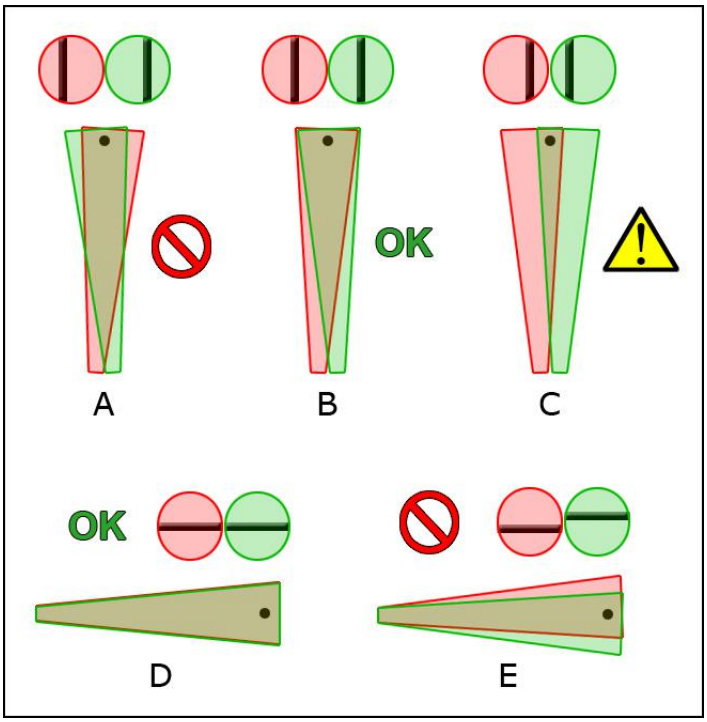
Adler Index désigne un indicateur de luminosité des jumelles plus précis que la pupille de sortie : $AI = G \times \sqrt{D}$ où G est le grossissement et D est les diamètres des objectifs. Cet indicateur exprime la capacité des jumelles à détecter les faibles

étoiles.

Collimation des jumelles désigne l'opération qui consiste à aligner les prismes, les objectifs et les oculaires. Cependant les constructeurs selon les modèles proposent 2 méthodes de collimations :

- La collimation par réglage de l'orientation des prismes via de petites vis à l'arrière (sur les petits modèles de jumelles)
- La collimation par réglage des objectifs à l'avant par vissage des objectifs sont alors montés sur un barillet (bague) excentrique (sur les grands modèles de jumelles) [800] = "'Collimation Through The Eccentric Rings" [402].

Alignement des jumelles



Credit : Mateyhv

A, B et C montre l'alignement horizontal et D et E montre l'alignement vertical.

- A is the worst horizontal scenario, double image would be seen. Its impossible for the eyes to merge both images.
- B represents good alignment as seen in Ortensio's tree pictures.
- C could be a usable configuration if present in minimal proportion as both eyes and brain compensate for the misalignment. But the greater it is, the greater the strain to the eyes.
- D represents a perfect vertical alignment of both tubes. That is a must as the eyes could not cope with vertical misalignment.
- E is a vertical misalignement that needs correction.

Nos yeux tolèrent mieux un (faible) dés-alignement horizontal qu'un dés-alignement vertical, car nous avons la capacité de loucher un peu en horizontal et pas du tout en vertical. En revanche, le grossissement augmentant, les erreurs angulaires d'alignement sont démultipliées (par le grossissement) et alors la fusion devient impossible. De plus, en usage nocturne, les erreurs d'alignement seront encore plus flagrantes.

Limites physiologiques selon le grossissement

Cas de désalignement	Plage de grossissement	Tolérance (avant grossissement)
E - Vertical Alignment	7x à 10x	4 arcmin
E - Vertical Alignment	12x à 15x	3 arcmin
E - Vertical Alignment	15x à 20x	2 arcmin
C - Horizontal Convergence	7x à 10x	10 arcmin
C - Horizontal Convergence	12x à 15x	8 arcmin
C - Horizontal Convergence	15x à 20x	6 arcmin
A - Horizontal Divergence	7x à 10x	6 arcmin
A - Horizontal Divergence	12x à 15x	4 arcmin
A - Horizontal Divergence	15x à 20x	3 arcmin

Credit : Ed Zarenski [284], J. W. Seyfried, “Choosing, Using & Repairing Binoculars”, University Optics, 1995

Calcul de l’écart réel vu par l’observateur : Ecart = Tolérance $\times$ G

Il existe 2 type d’alignements possibles :

— La collimation (fusion des images) n’est réalisée pour un certain écart interpupillaire (IPD) : “Conditional Alignement”
— La collimation (fusion des images) est indépendant de l’écart interpupillaire (IPD) : “Full Alignement” ou “True Collimation”

Méthodes de collimation :

— En observant un étoile brillante et en tentant de fusionner l’étoile dédoublée
— En observant un étoile brillante derrière des masques de Bahtinov sur chaque objectif pour mieux discerner la fusion de l’étoile selon la méthode de Steve Tonkin [673]
— Sur un banc de test en simulant une étoiles artificielle à l’infini à l’aide d’un téléscope Schmidt-Cassegrain selon la méthode de Wolfgang Rohr [800]
— En observant l’image projetée du soleil sur un écran selon la méthode de Rafael Chamón Cobos [605, 441]

Le constructeur prévoit en général des vis de collimation accessibles sans démonter les jumelles afin de réaliser de petits ajustements sur l’orientation des prismes, cependant ces ajustements n’ont plus aucune efficacité si les axes optiques des 2 fûts ne sont plus parallèles entre eux et avec la barre centrale (axe central des jumelles) [440]

Attention, certains utilisateurs peuvent souffrir de “BVD” ou “Binocular Vision Dysfunction”, une déficience visuelle où les 2 yeux ont des difficultés à fonctionner ensemble. Cela produit les mêmes effets qu’une décollimation de type E alors que les jumelles sont parfaitement collimatées.

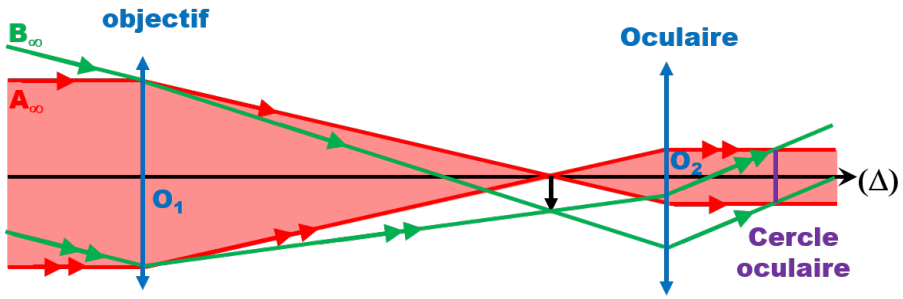
6.3 Les Lunettes

Lunette Achromatique ou “Achromatique” ou “Achro” ou “Refractor” ou “RFT” désigne une lunette en général de longue focale et dotée d’un objectif composé de 2 lentilles accolées (un doublet). Cette combinaison conduit à produire un objectif aplanétique. Originellement, une lentille en verre Crown (BK7), un verre faiblement dispersif, est accolé à une lentille en verre Flint (F2) un verre fortement dispersif afin de corriger partiellement l’aberration chromatique. On parle d’un doublet achromatique pour désigner ce type d’objectif. Le verre Crown est aussi très léger comparé au verre Flint. Il existe aujourd’hui de nouvelles versions de ces lunettes encore plus optimisées pour le chromatisme comme : Starbase 80 (Takahashi

design, Kubota / Daiichi Kōgaku fabrication) [647], Scoptech 80 (Kubota / Daiichi Kōgaku fabrication).

Rappel du principe optique de la lunette : une lunette (ou un télescope) forme une image d'un objet situé à une grande distance (l'infini) au foyer de la lunette. L'image formée est réelle et peut être utilisée pour réalisée une photographie en plaçant le capteur photo exactement sur le foyer de la lunette. Afin de voir (notre oeil) l'image il faut la rendre virtuelle et pour cela il faut ajouter un oculaire (une loupe) dans le chemin optique juste après le foyer côté image. Lorsque le foyer image de la lunette coincide avec le foyer objet de l'oculaire alors tous les rayons issus d'un point objet sortant de l'oculaire sont parallèles et l'oeil perçoit l'objet à l'infini et donc il n'a pas besoin d'accomoder (iris relâché).

La lunette



Credit : Coyote Physique

Les lunettes de ce type sont essentiellement utilisées dans le domaine visuel, le chromatisme serait bien trop visible pour un usage astrophoto cependant on peut faire de l'astrophoto avec des lunettes achromatiques si on restreins les prises de vue à de la lumière monochromatique pour éviter de capturer des clichés où les couleurs ne focalisent pas aux mêmes endroits réduisant ainsi la qualité de l'image :

— Photo de la surface du soleil en $H\alpha$
— Photo du ciel profond en couleur au travers de 3 filtres distincts : SHO (recomposition de 3 clichés ensuite)
— Photo de la lune avec un filtre Baader Semi APO ou Lumicon Minus Violet pour retirer le chromatisme (bleu)

Pour rappel, l'oeil humain ne voit pas bien en dehors de la plage [450 nm - 650 nm].

À l'origine, il existait 2 types de lunettes achromatiques :

— La lunette de Galilée (1609) composée d'une lentille convexe (convergente) et d'une lentille concave (divergente), l'image est à l'endroit, le champ corrigé est très petit, le chromatisme est important.
— La lunette de Kepler (1611) composée d'une lentille convexe (convergente) et d'une lentille convexe (convergente), l'image est renversée, le champ corrigé est plus large, le chromatisme reste prononcé.

La lunette de Kepler est véritablement l'ancêtre des lunettes modernes. Les améliorations apportées depuis sont la correction chromatique avec le doublet achromatique de Chester Moore Hall et John Dollond en 1729 associant une lentille frontale convergente en Crown et une lentille divergente en Flint. Joseph Von Fraunhofer perfectionne le doublet achromatique en 1814. Apparaissent ensuite des doublets dont le verre Crown est de la fluorite, un cristal à faible dispersion, commercialisé par Takahashi dès 1971. La lunette de Takahashi pousse la correction achromatique encore plus loin, permettant de fort grossissements. Ensuite des verres spéciaux sont arrivés sur le marché remplaçant avantageusement la fluorite : FPL-53, FPL-55, FCD-100 ... utilisés pour construire des lunettes ED équivalente aux fluorites de l'époque. Enfin, vers les années 90s arrivent les apochromates constitués de 3 lentilles, un triplet, 2 Crown et un Flint au centre à base de verre à faible dispersion permettant à la combinaison de lentille de produire des images exempt de la moindre aberration chromatique.

Les apochromates modernes ont été développés par Roland Christen de Astrophysics depuis 1981 et Thomas Black de TMB dasn les années 90/2000s.

Les 3 types d'aberrations chromatiques :

— Le chromatisme longitudinal
— Le chromatisme transverse
— Le sphérochromatisme

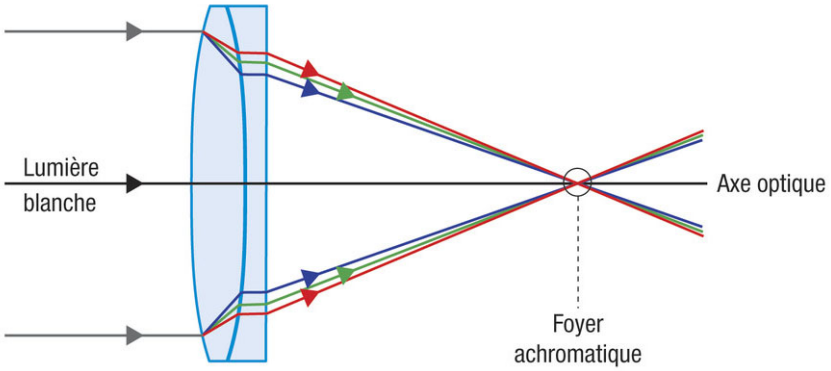
Correction classique d'un achromate (calage classique de lentille F-C) :

— Correction du chromatisme réalisée pour les lignes de Fraunhofer **C** (rouge = 656.3 nm) et **F** (bleu-vert = 486.1 nm). Le rouge et le bleu-vert sont presque confondus.
— Correction du sphérochromatisme réalisée pour la ligne de Fraunhofer **e** (vert-jaune = 546.1 nm) ont dit alors que le calage de la correction centré sur **e**.

Donc ici le point de focus est le même pour les lignes C et F, mais différent du focus de la ligne e.

Le sphérochromatisme sera plus dégradé pour les lunettes (achromatiques, ED, ou APO) à focales courtes.

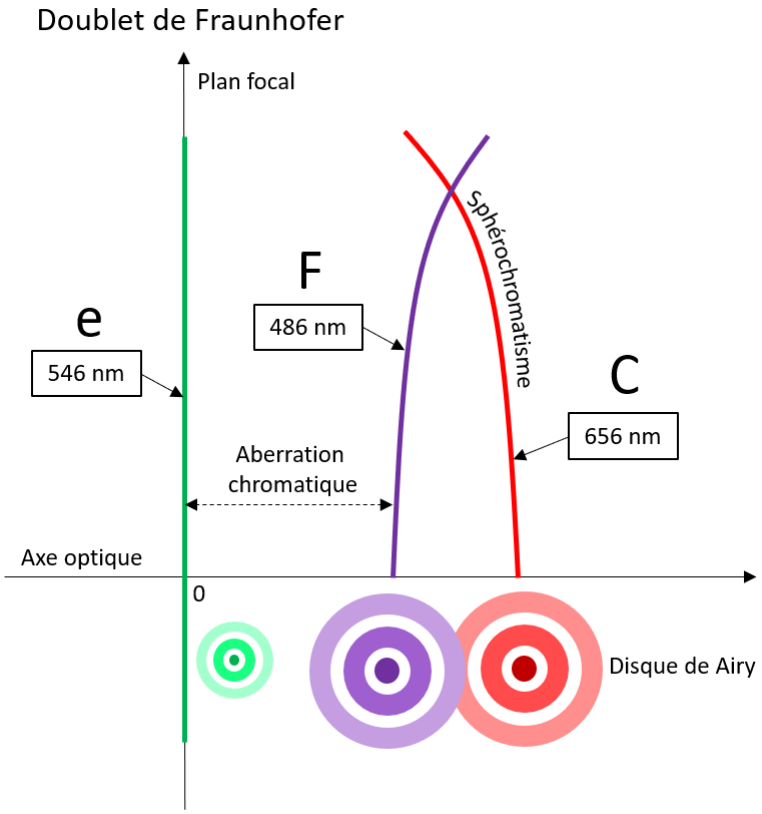
Objectif achromatique



Credit : Verre optique - Wikiwand

Sans sphérochromatisme quelle que soit la longueur d'onde, les courbes de focalisation des différentes couleurs seraient toutes verticales et parallèles les unes par rapport aux autres autour du point 0. Enfin, sans chromatisme longitudinal et sans sphérochromatisme quelle que soit la longueur d'onde, les courbes de focalisation des différentes couleurs seraient toutes confondues avec l'axe vertical passant par le point 0.

Le sphérochromatisme d'un doublet Fraunhofer



Credit : J.G. Gricourt

On peut influer sur l'aberration de sphéricité (sphérochromatisme) en écartant plus ou moins les 2 lentilles [583] :

— Objectif "Overcorrected" on écarte les lentilles
— Objectif "Undercorrected" on rapproche les lentilles

Correction de chromatisme usuelle, soit un point de focus de 25 micromètre d'après Roland Christen [630]

Lunette	Plage
Fast achromat : CDe	550 - 650 nm
Long achromat : CeF	480 - 650 nm
Fast doublet ED	450 - 650 nm
Fast doublet Fluorite	420 - 1000 nm
Triplet FPL-53	380 - 1000 nm
Triplet Fluorite	360 - 1000 nm

Les cameras numériques sont sensibles à la lumière de 380 à 1000 nm alors qu'en visuel notre sensibilité va de 440 nm à 650 nm.

Autres corrections possibles pour un achromate selon Danjon & Couder, le calage chromatique = raie pour laquelle le sphérochromatisme est corrigé :

— Calage sur **546 - 589 nm** (e-D / Vert - Jaune Orange) pour l'observation lunaire

— Calage sur **589 nm** (D / Jaune Orange) pour l'observation planétaire
— Calage sur **486 - 656 nm** (e-C / Vert - Rouge) pour l'observation de jour
— Calage sur **656 nm** (C / Rouge) pour l'observation solaire $H\alpha$

Le solaire en bande étroite étant essentiellement monochromatique, le sphérochromatisme sur la bande étroite $H\alpha$ devra être le plus réduit possible. Les courbes de sphérochromatisme de chaque couleur sont toujours plus prononcées sur les lunettes ED/APO que dans le cas des achromates en raison de la courte focale des APO, c'est pour cela que achromates sont toujours préférables en observation monochromatique [64]

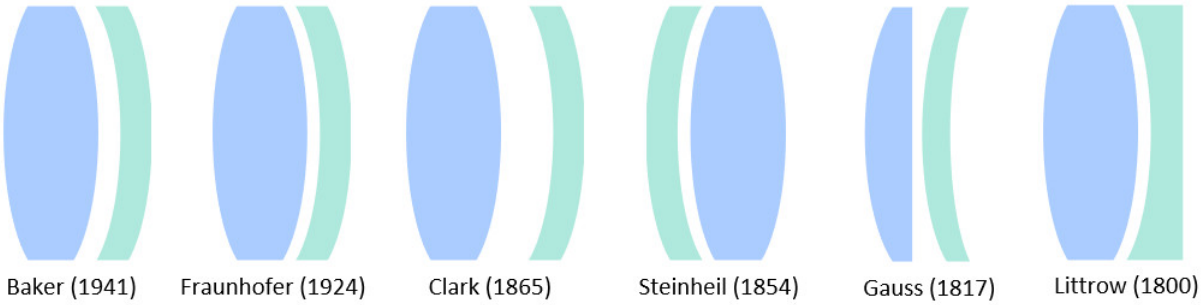
Attention, en basse lumière la perception des couleurs par l'oeil change, c'est l'effet Bezold-Brücke. Les couleurs sont donc translatées en une autre couleur, seule la couleur Jaune = 573 nm (proche de la raie D) est quasi invariante.

Plus la lunette est courte, plus le chromatisme sera présent dès les faibles grossissements. La condition d'achromatisme d'un doublet ou d'un triplet se définit par : $\sum f_i \times \nu_i = 0$ où ν est le nombre d'Abbe ou constringence et f la focale de la lentille pour la raie D (raie du Sodium jaune orangé = 589 nm).

En photo comme en visuel, il est possible d'adjoindre un filtre "Semi APO" ou "Minus Violet" comme le filtre "Baader Contrast Booster" à la lunette afin de couper le halo bleu/violet autour des étoiles. Toutefois, ce type de filtre ne transformera pas une lunette ED en lunette APO car dès que le point image est étalé, il y a perte de résolution, que l'on ajoute un filtre ou pas après. L'exception est l'utilisation d'un filtre $H\alpha$ en observation ou photo solaire où l'on ne garde alors qu'une longueur d'onde précise et dans ce cas le point image reste parfaitement concentré et la résolution est maximale, du moins sur l'axe optique. Avec l'instrument idéal, le sphérochromatisme est complètement corrigé sur une large plage du spectre lumineux.

Types de doublets "Air Spaced" [693]

Doublets



J.G. Gricourt

La lentille frontale est à gauche sur le schéma. Le verre Flint à droite est en général du verre F2 (vert ici) et le verre Crown à gauche est du verre BK7 (bleu). Le Steinheil est un Fraunhofer renversé, cette formule a été utilisée dans les anciennes Takahashi (1980s) cela permettait de protéger la lentille Crown en Fluorite (le cristal CaF2) très fragile sans traitements de surface. Les Takahashi FC100 depuis 2020 reprennent la formule Steinheil.

Lunette de Fraunhofer il s'agit de loin le plus courant des doublets achromatiques [617, 623]

— Excellente correction de la coma
— Excellente correction de l'aberration sphérique pour 3 couleurs
— Peu sensible à la décollimation
— Aucune réflexion parasite (ghosting)

— Il n'y a que 4 courbures différentes et certaines sont très prononcées, cela rend le doublet plus compliqué à réaliser

Afin d'être parfaitement corrigée visuellement pour le chromatisme, la focale d'un doublet de Fraunhofer doit vérifier :

— Le critère de Sigdwick : $f \geq 3 \times D^2$ [72] où D le diamètre en pouce
— Le critère de Conrady : $f \geq 5 \times D^2$ où D le diamètre en pouce

Une autre règle indique que pour être corrigée de manière acceptable la focale doit vérifier : $f > 1.22D$ où D le diamètre en cm [629]

Pour un singlet (1 seule lentille mince convexe) le critère de Sigdwick : $f \geq 100 \times D^2$ où D le diamètre en pouce.

Lunette de Littrow

— Correction de la coma limitée
— Correction l'aberration sphérique convenable
— Fortes réflexions parasites (ghosting)
— Les courbures des lentilles sont simples et donc faciles à réaliser
— Les 2 lentilles sont collées

Lunette de Clark

— Correction de la coma limitée
— Excellente correction de l'aberration sphérique
— Il n'y a que 3 courbures différentes, cela rend le doublet plus facile à réaliser

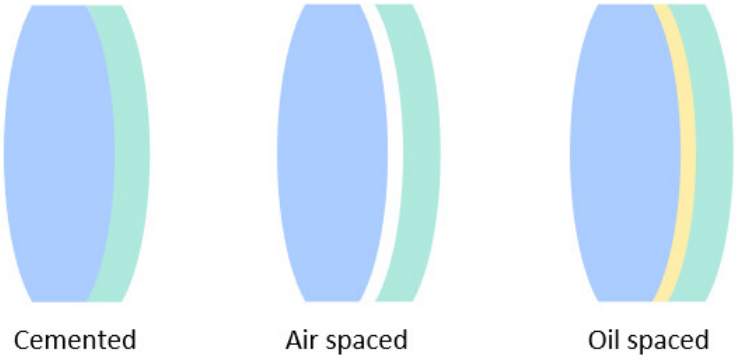
Étant donné que l'aberration chromatique ne dépend que du rapport F/D donc 2 lunettes de même rapport F/D montreront la même quantité de chromatisme alors que pour la lunette de plus grand diamètre la figure de Airy sera plus petite donc offrira une meilleure résolution. Par conséquent, l'effet néfaste de l'aberration chromatique sur la résolution sera d'autant plus significatif que le diamètre sera important à focale constante [630, 631]. En photo, en raison de la sensibilité dans le bleu et de l'effet cumulatif des capteurs photos, les halos bleus seront plus prononcés sur les images qu'en réalité à l'oeil nu.

De manière générale, l'aberration optique la plus préjudiciable des lunettes en dehors de l'aberration chromatique longitudinale est le sphérochromatisme.

Les lentilles d'un doublet ou d'un triplet peuvent être assemblées de différentes manières : cemented [2] (collé = pas d'espace), "Air Spaced", "Oil Spaced". Les objectifs "Air Spaced" par conception permettent l'asphérisation des lentilles et donc autorisent la création de formules repoussant les limites de la correction de l'aberration sphérique.

2. Lentilles généralement collées avec du baume du Canada

Assemblage de lentilles



J.G. Gricourt

Les doublets (ou triplets) “Oil Spaced” présentaient l’avantage de supprimer les réflexions parasites (gommant les défauts de polissage) et d’augmenter la transmission lumineuse. Cependant, ils ont été abandonnés en raison des fuites d’huile et de l’instabilité aux changements de température.

Tout comme les miroirs, les objectifs de lunette ne doivent pas être contraints. La bague de serrage doit empêcher les lentilles de bouger, mais pas de se positionner dans le barillet. Il n’est donc pas anormal que les doublets ou les triplets produisent un petit bruit caractéristique, le “Rattling”.

En général les objectifs collés présentent un peu de coma, car les courbures au niveau de contact des lentilles sont identiques dans ce cas [258]. En raison de la dilatation de verres différents, les objectifs collés ne dépassent pas 80 mm tous les autres sont “Air Spaced” ou “Oil Spaced”.

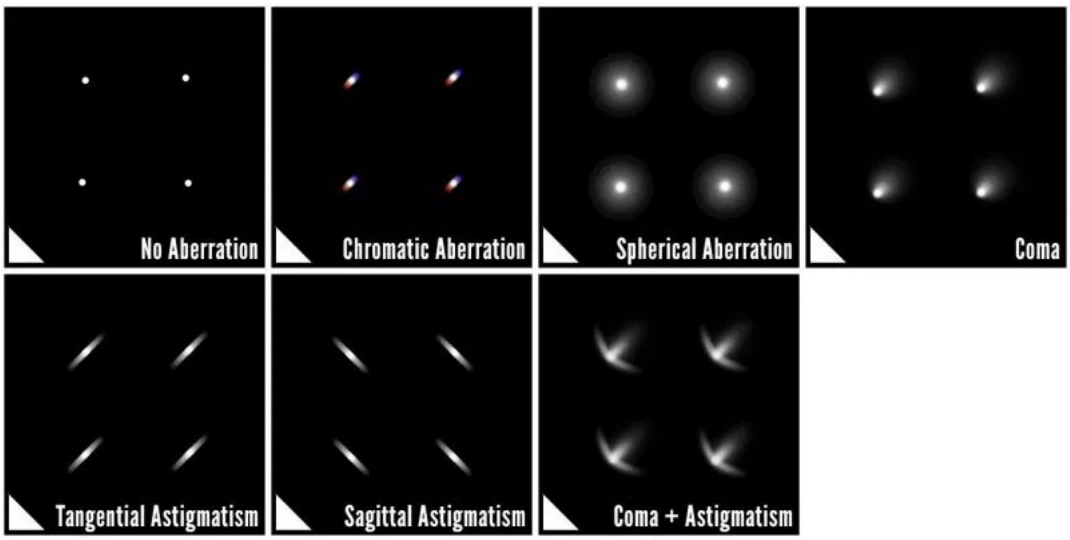
Les objectifs dit “Oil Spaced” ont l’avantage :

— De se mettre à la température ambiante plus rapidement.
— De n’avoir que 2 surfaces où appliquer le traitement anti-reflet

Les objectifs non collés (file d’huile ou “Cemented”) peuvent avoir des courbures différentes (plus facile à fabriquer) et peuvent être parfaitement corrigées pour la coma et sont aussi plus tolérants à la collimation.

Comment identifier les aberrations d’un objectif :

Aberrations optiques des lunettes



A Practical Guide to Lens Aberrations and the Lonely Speck Aberration Test

On peut également diminuer l'aberration chromatique et d'autres aberrations en diaphragmant l'objectif de la lunette. Ce qui a pour effet d'allonger artificiellement son rapport F/D. En revanche, ajouter une barlow pour augmenter aussi artificiellement rapport F/D de l'instrument amplifiera l'aberration chromatique et n'aura aucun effet sur les autres aberrations.

Avantages de la lunette sur les autres instruments :

- La lunette est aisée à sortir, transporter et à installer en raison de son poids peu élevé
- Sa mise en température est rapide (pour les doublets) en raison de la surface de verre à refroidir peu élevé
- L'absence d'obstruction centrale permet à la lunette de fonctionner au maximum de sa résolution théorique plus souvent
- La transmission lumineuse des lunettes est légèrement supérieure à celle des instruments à miroirs (98%contre 92%)
- Il n'y a pas d'entretien ni réglage à effectuer (collimation)

La lunette est moins sensible à la turbulence :

- Le tube fermé isole l'air intérieur de l'air extérieur et évite la turbulence instrumentale dû aux échanges thermiques avec l'exterieur alors que dans le cas du télescope fermé l'air circule par l'entrée de l'instrument (effet cheminée).
- La position haute de l'objectif par rapport au sol permet, d'isoler la lunette de la turbulence provenant de la chaleur du sol ou de l'observateur
- La lumière ne traverse qu'une seule fois la masse d'aire contenue dans le tube alors qu'il la traverse 2 fois pour le télescope
- La lumière au passage dans le tube forme un cône et donc évite de traverser les bords du tube où se trouve les zones les plus turbulentes de la masse d'air alors que dans un télescope fermé la lumière frôle les bords au premier passage

Inconvénients de la lunette :

- Le rapport diamètre/prix est très défavorable.
- Les Lunettes à longue focale sont très encombrantes et génère un porte-à-faux important sur la monture EQ et offre une prise au vent importante.
- Selon la position du porte-oculaire avec l'orientation de la monture EQ, l'observation peut devenir inconfortable

Lunette Longue historiquement les lunettes longues ou dites de longue focale, en général $F/D > 10$ sont des achromatiques car pour respecter les conditions de Gauss les courbures des verres devaient être peu prononcées. Les lunettes longues permettent l'utilisation d'oculaires plus confortable comme les Plössl. En imagerie du ciel profond où il est nécessaire de capturer la totalité du champ restitué par l'instrument, les focales longues nécessitent des caméras à capteur plus large et donc doté de plus gros pixels qui sont devenues obsolètes de nos jours.

Inconvénients des lunettes longues :

- Ces lunettes sont plus difficiles à équilibrer (instabilité) sur une monture équatoriale en raison du bras de levier important que constitue le corps de la lunette
- Ces lunettes possèdent un rapport F/D (trop grand) défavorable pour l'astrophoto du ciel profond
- L'observation est moins confortable car selon la hauteur de la cible dans le ciel on peut observer soit accroupi au sol ou monté sur un marchepied.
- Ces lunettes sont plus difficile à ranger en raison de leur longueur

Lunette Courte sont en général des astrographes dotés de triplets pour les rendre apochormatique. Celles ci sont alors conçues exclusivement pour l'astrophoto car la corrections des couleurs corresponds à la sensibilité des capteurs photos. Celle sont en général fournies avec un correcteur "Field Flattener" permettant de corriger la FC = "Field Curvature" = courbure de champ inhérente aux lunettes courte. L'utilisation en visuel de lunettes courte accompagnée d'un oculaire de longue focale et à grand champ apparent (+70°) montrera de FC dans le champ de vision, et une pupille de sortie avoisinant les 6-7mm exacerbera l'astigmatisme de l'oeil donc ce type d'usage ne conviendra pas à tous le monde même si une lunette ultra courte et facilement transportable est un véritable atout.

Lunette ED ou "Lunette Semi-APO" désigne une lunette de courte focale et dotée d'un objectif composé de 2 lentilles accolées, un doublet dit ED ou "Semi APO". Il s'agit d'une évolution de la lunette achromatique où la lentille de verre Flint est remplacée par une lentille en verre à très faible dispersion et une lentille de mating. Ce sont les lentilles de mating qui réalisent la correction finale des couleurs [633]. En effet pris individuellement, les types de verres ne permettent pas de classer systématiquement les instruments selon leur performance du point de vue des aberrations chromatiques. Cette formule optique corrige de manière optimale l'aberration chromatique qui est alors considérablement meilleure que dans le cas de la lunette achromatique classique. Celles-ci montrent encore un résidu de chromatisme à fort grossissement seulement. Il est établi que les doublets ED basés sur une lentille en FPL-53, FPL-55 ou FCD-100 seront meilleures que les doublets ED basés sur une lentille en FPL-51, H-FK61, FCD-1, et ce, pour un même diamètre et un même ratio F/D [356]. Cette lunette moyenne de gamme est plutôt dédiée au visuel et même au planétaire si sa focale est suffisamment longue. Le chromatisme s'intensifiant avec en raccourcissant la focale, les lunettes ED peuvent être ouvertes dans la plage $7 \leq F/D \leq 9$ donc elles sont plus courtes que des lunettes achromatiques, mais moins que les lunettes APO. En général le chromatisme a été optimisé pour le bleu et le vert au détriment du rouge.

Avantage face à des lunettes triplet APO :

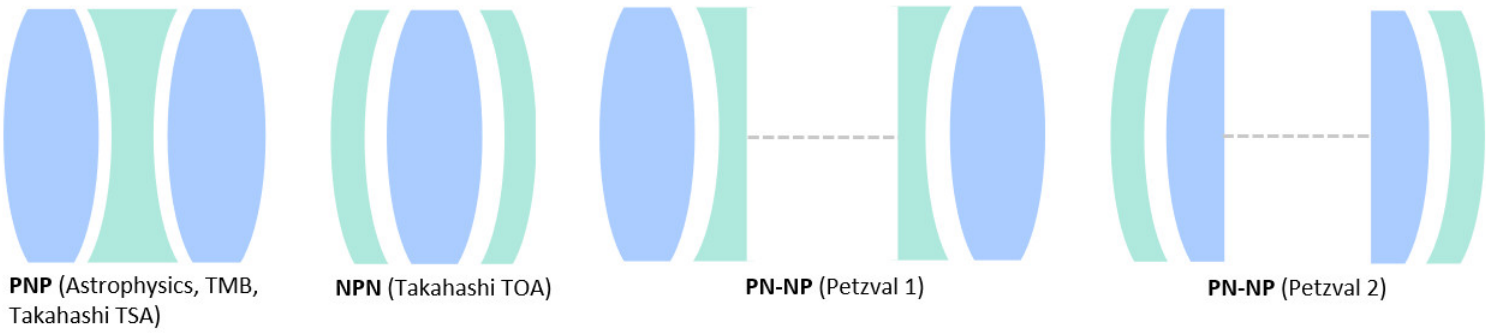
- Plus légère
- Mise en température plus rapide
- Bonne correction achromatique même si inférieure à une vraie APO

Lunette Apochromatique ou "Apochromat' ou "Apochromatique" ou "APO" désigne une lunette de très courte focale en dessous de $F/D = 7$ et dotée d'un objectif composé de 3 lentilles accolées (un triplet). Cette combinaison conduit à produire un objectif anastigmate. Une lentille en verre à très faible dispersion : FPL-53, FPL-55, FCD-100... est prise en sandwich entre 2 autres lentilles en verre crown (ex : BK7, ZKN7), ces dernières sont appelées lentilles de "Mating' ou d'appariement. Ces lunettes exclusivement dédiées à l'astrophotographie sont pour la plupart accompagnée d'un correcteur de champs = "Field Flattener" soit en externe à insérer dans le porte oculaire, soit installé définitivement en interne dans le

tube pour former un quadruplet.

Il existe plusieurs familles de design de triplets, P = Positive (lentille convergente), N = Negative (lentille divergente) [698] :

Triplets t Quadruplets



J.G. Gricourt

Les définitions de l'apochromatisme :

Zeiss c'est la définition historique [633]

- Correction du chromatisme longitudinal réalisée pour 3 lignes de Fraunhofer : **C** (rouge = 656.3 nm), **e** (bleu-vert = 546.1 nm) et **F** (bleu = 486.1 nm)
- Correction du sphérochromatisme et de la coma réalisée pour 2 lignes de Fraunhofer : **F** (bleu-vert = 486.1 nm), **e** (vert = 546.1 nm)

Ernst Abbe à dit : *Correction du chromatisme pour 3 raies bien espacées (au même foyer) et un spectre secondaire : $SS < 1/10000 \times F$ (définition modernisée par Zeiss). De plus, la correction de l'aberration sphérique et de la coma doit être réalisée pour 2 raies bien espacées* [79, 661].

Thomas Back (TMB / APM LZOS) à dit : *Correction du sphérochromatisme pour la raie 555 nm (Strehl > 0.95), diffraction limited sur les lignes C (rouge = 656.3 nm) à F (bleu-vert = 486.1 nm), un PtV < 1/2 sur la ligne g (violet = 422 nm)* [732].

Roland Christen (AP) à dit : *In summary, the definition of Apo is not as simple as 3 color crossings and 2 spherical corrections. In fact, the best possible apo would have no color crossings, but would exhibit a straight line. A very shallow secondary spectrum with only 2 crossings can have better overall color correction than one that wiggles around 3 or more times* [633].

Roland indique cependant qu'il n'y a pas de règle ce qui est important c'est la lentille d'appariement "Mating Element".

Pal Gyulai (CFF) à dit : *Diffraction limited (Strehl > 80%) pour toutes les fréquences entre 486 nm et 656 nm, un Strehl > 96% dans le vert et une erreur PtV d'au plus 1/2 PtV dans le violet (435 nm). La coma doit être complètement corrigé en dehors de l'axe* [574].

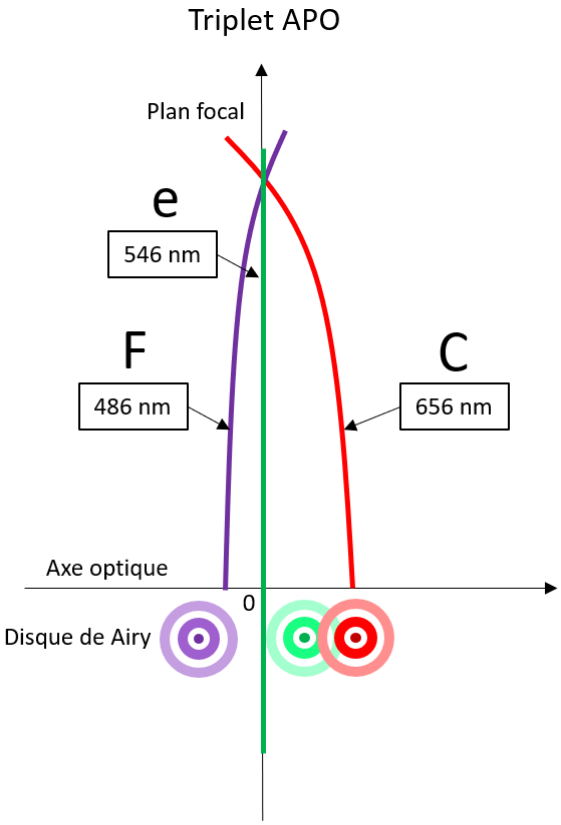
Al Nagler (Tele Vue) à dit : *Absence de franges bleues sur Sirius lorsque la mise au point est optimale à un grossissement de x200* [710].

En général sur les apochromates le chromatisme à été optimisé pour le bleu et le vert au détriment du rouge.

Le point de focus est le même pour les 3 lignes de référence sur une grande portion du plan focal. Aucune fausses couleur ne doit être visible en visuel ou sur une photo prise avec l'instrument. Le niveau de correction du sphérochromatisme dépend à la fois du nombre de lentilles de l'objectif et de l'appariement des verres (verres spéciaux) [693].

Dr. Jürgen Pudenz Ralf (Mündlein - Astro Theke) à dit : *Le Strehl doit être supérieur à 80% dans la plage [480 nm, 644 nm] et la différence de Strehl doit être inférieure à* $T = 2\lambda(F/D)^2$ *dans cette même plage* [606].

Le sphérochromatisme d'un triplet APO



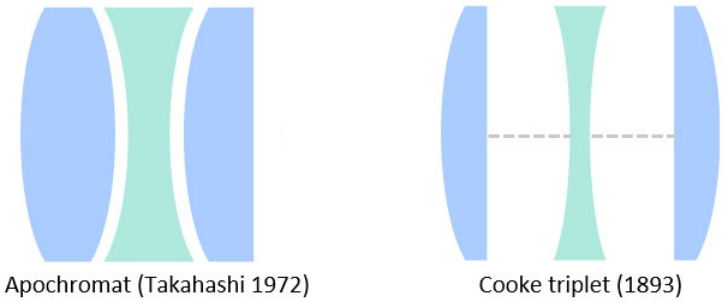
Credit : J.G. Gricourt

En général, à F/D égal, les lunettes achromatiques on une meilleure aberration chromatique transversale alors que les lunettes APO ont une meilleure aberration chromatique longitudinale [476].

Catégorisation des lunettes :

- Lunettes avec objectif à une seule lentille : lunette de Galilée (1 lentille biconvexe + 1 lentille biconcave), lunette de Kepler (2 lentilles biconvexes), la correction est inexistante.
- Lunettes achromatiques avec objectif à 2 lentilles (doublet : crown et flint), 2 couleurs de référence au focus mais aussi 1 couleur corrigée pour l'aberration de sphéricité.
- Lunettes apochromatiques avec objectif à 3 lentilles (triplet), 3 couleurs de référence au focus (C,e,F) mais aussi 2 couleurs corrigées pour l'aberration de sphéricité [732, 633].
- Lunettes super apochromatiques avec objectif à 4 ou cinq lentilles, 4 couleurs de référence au focus mais aussi 3 couleurs corrigées pour l'aberration de sphéricité.

Triplets



J.G. Gricourt

Note : le triplet de Cooke est un objectif photographique donc à courte focale.

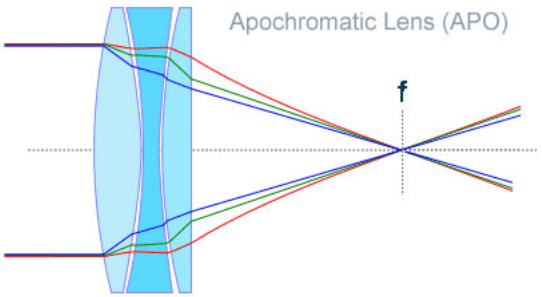
Pour rappel, les formules aplanétiques :

- Fraunhofer
- Steinheil
- Baker
- Gauss

Étant donné qu'il y a une lentille supplémentaire :

1. Le temps de mise en température sera plus long [156]
2. La tolérance de collimation de 3 lentilles accolées est plus resserrée.
3. Le contraste au final sera très légèrement en deçà d'un doublet ED

Cette lunette très haut de gamme est essentiellement dédiée à la photo grand champ moyennant l'utilisation d'un aplanisseur de champ. Le chromatisme s'intensifiant avec la focale de l'objectif, les lunettes apochromatiques peuvent être ouvertes de $F/D = 5$ à 7 seulement contrairement aux lunettes achromatiques.



Best Binocular Reviews

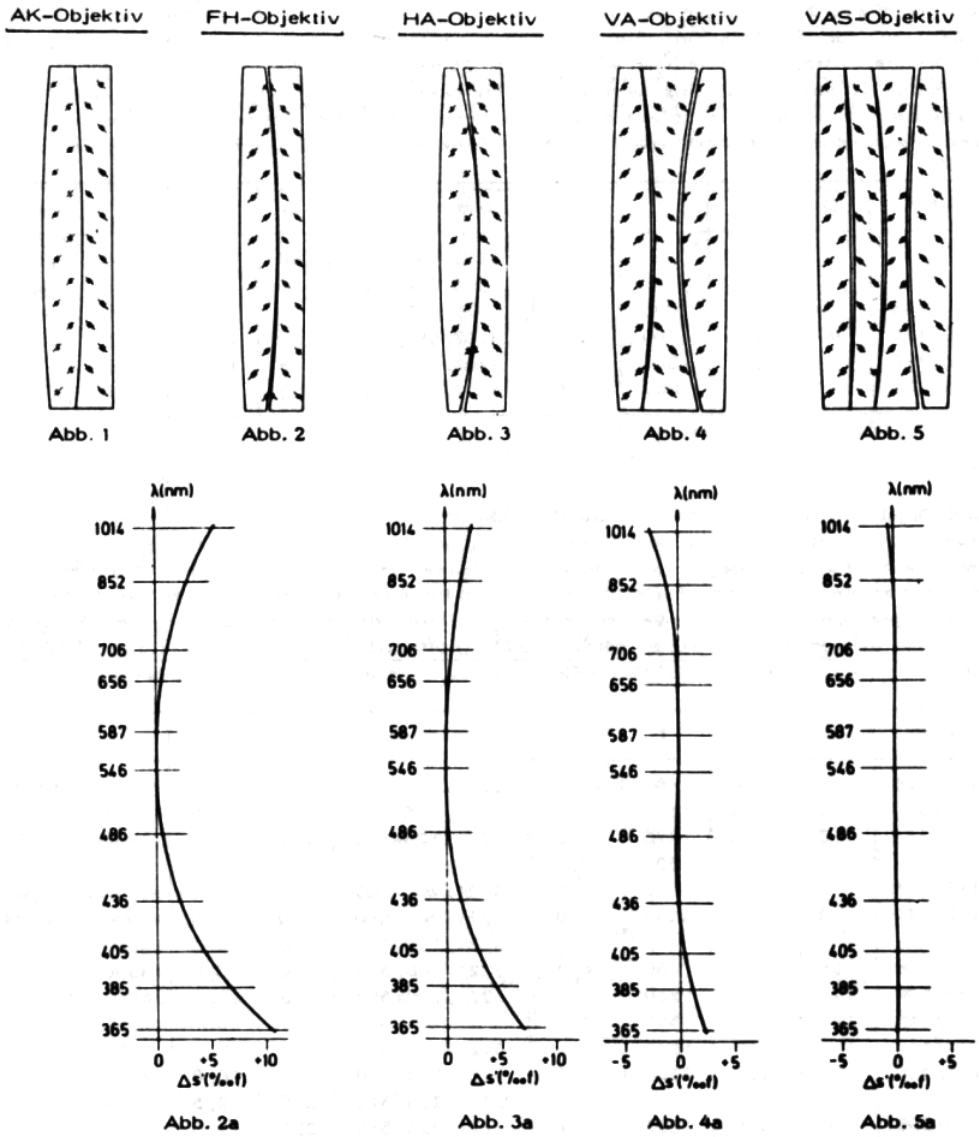


CFF Telescopes

Voir le processus de fabrication des Lunette Stellarvue

Note : Coma Free Field Telescope = CFF, Telescope Engineering Company = TEC, LZOS = Lytkarino Optical Glass Factory, Stellavue = Auburn Precision Optics.

Le quadruplet selon Lichtenknecker



Holger Merlitz

Lunette Dyalite ou “Off Axis Telescope” ou “Folded Refractor” ou lunette catadioptrique, désigne une lunette constituée d’un objectif à une seule lentille (singlet) de grande dimension associée à des miroirs repliant le faisceau lumineux et d’un dispositif correcteur corrigeant l’aberration chromatique.

Il existe plusieurs formules :

— Zerochromat Refractor
— Schupmann Refractor (ou Jones Medial)

Le Zerochromat est constitué d’une lentille frontale convergente en Crown, d’une lentille divergente en Flint à mi-parcours, de 2 miroirs plans utilisés pour replier le faisceau et d’une série de lentilles correctrices pour corriger l’aberration chromatique.

Le Schupmann [120] est un téléescope de type “Brachymedial” constitué d’une lentille frontale convergente, d’un miroir plan utilisé pour replier le faisceau, d’un miroir de mangin (lentille correctrice + miroir réfléchissant) faisant office de correcteur

pour corriger l'aberration chromatique et d'un second miroir plan pour replier à nouveau le faisceau.

Une version de la Dyalite a été aussi construite par Werner Detlef Schmidt (inventeur du porte oculaire FeartherTouch) mais il n'a pas eu besoin de correcteurs car il a utilisé directement un objectif achromatique à F/34.

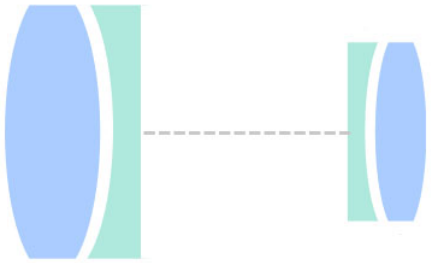
Pour une utilisation solaire un singlet sans correction est suffisant car on observe ou on image dans une seule longueur d'onde.

Les avantages :

— Le chromatisme résiduel est parfaitement corrigé pour se rapprocher du niveau d'une lunette APO
— Il n'y a pas d'obstruction donc la résolution est sensiblement meilleure que celle d'un réflecteur de même diamètre

Lunette de Petzval désigne un type de lunette composée de 4 lentilles et ayant la particularité de parfaitement corriger la courbure de champ caractéristique des lunettes. Un modèle réputé de ce type de lunette : TV NP101,TV NP127 ou Takahashi FSQ. La correction de la courbure de champ est une caractéristique intéressante surtout en photographie, car nos yeux corrigent la courbure de champs en accommodant si nécessaire. Ce type de lunette haut de gamme est essentiellement dédié à la photo grand champ. Un quadruplet Petzval peut descendre à $F/D = 5$ contrairement aux lunettes achromatiques. Les lunettes APO peuvent aussi être très courtes jusqu'à $F/D = 6$ mais moyennant l'utilisation d'un correcteur de champ.

Quadruplet Petzval



J.G. Gricourt

Objectif désigne le jeu de lentilles frontales des lunettes, celui des objectifs photo. Le rôle de l'objectif est de collecter la lumière des objets lointains afin de la concentrer sur le plan focal. Les objectifs de lunettes astronomiques simples sont composées de 2 lentilles, on parle de doublet achromatique et de doublet ED selon la qualité des verres et leur appariement, de 3 lentilles pour le triplet APO et 4 et plus pour les quadruplets dans lesquels un correcteur de courbure de champ Petzval est intégré. Plus le rapport F/D de l'objectif est court, plus la forme idéale ne produisant aucune aberrations est difficile à obtenir.

Comme toute pièce optique, l'objectif peut présenter des défauts, par convention dans la littérature F = Focale / Diamètre :

1. Aberration de sphéricité $\propto 1/F^3$
2. Coma $\propto 1/F^2$
3. Astigmatisme hors axe $\propto 1/F$ et aussi $\propto \theta^2_{\text{axe}}$
4. Défocalisation (l'erreur de mise au point) $\propto 1/F^2$
5. Distorsion géométrique $\propto 1/F$
6. Courbure de champ $\propto 1/F$ et aussi $\propto \theta^2_{\text{axe}}$

7. Chromatisme $\propto 1/F^2$
8. Neutralité des couleurs non respectée
9. Transmission dépend de la qualité du traitement anti-reflet = traitement multicouche

Note : θ_{axe} est la distance angulaire à l'axe optique.

Objectif Télécentrique désigne un type d'objectif photo capable de produire une image débarrassée :

1. Des effets de parallaxe
2. Des déformations géométriques (barillet ou coussinet)

Ce type d'objectif écrase les perspectives alors les objets distants dans la réalité sont vus de mêmes dimensions au travers de l'objectif. L'effet de suppression de parallaxe ne se produit que si les objets se retrouvent dans la plage de distance télécentrique prévue. Ces objectifs sont surtout utilisés dans la métrologique (mesure des dimensions) et dans la microlithography de processeurs sur silicium (projection) [271].

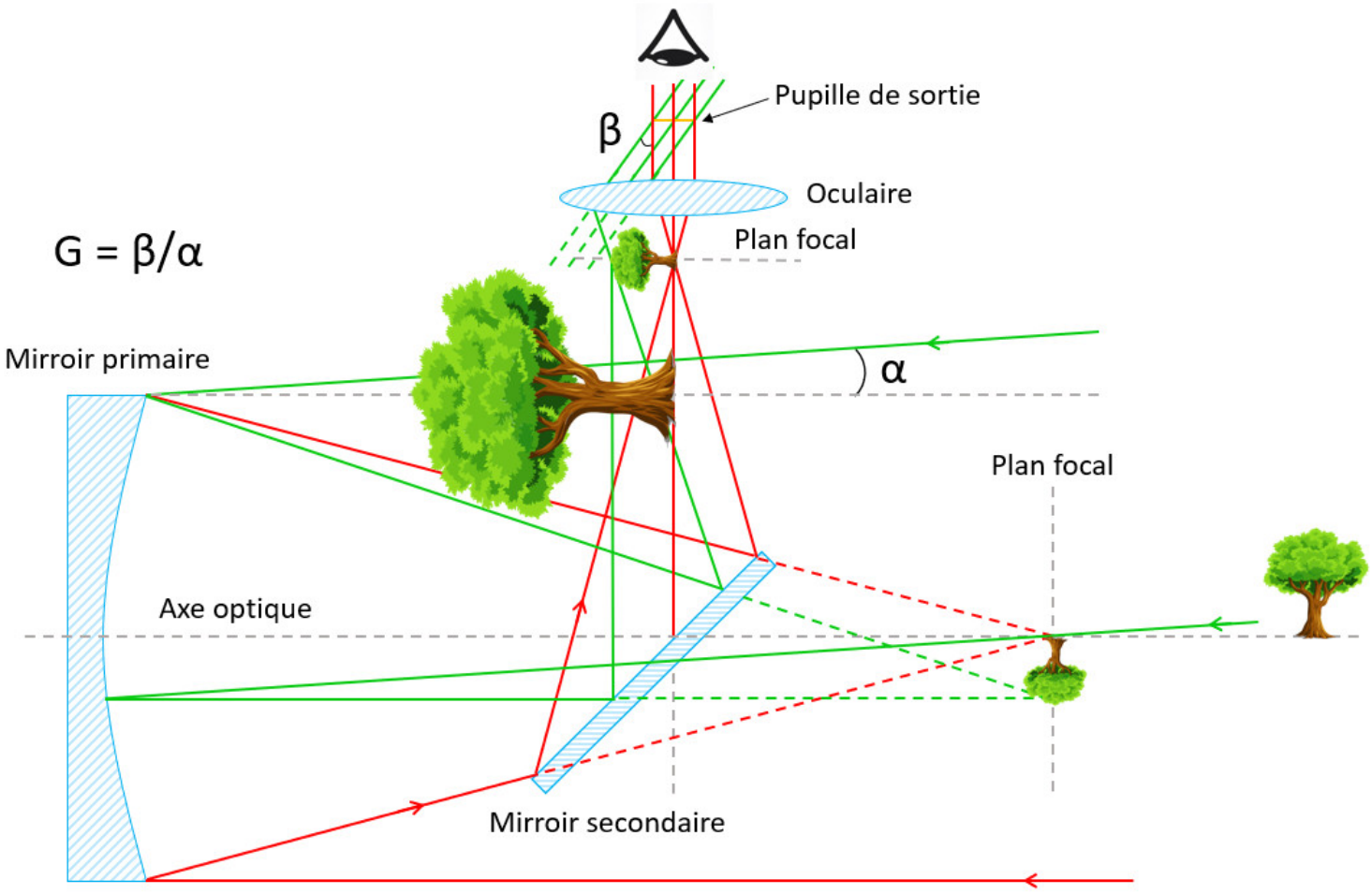
Objectif f-theta désigne un type d'objectif photo dont les points images sont positionnés sur le plan focal proportionnellement à l'angle d'incidence des rayons de l'objet à l'infini. Ainsi les forme des objets est respectée et le point image ne subit pas de déformation sur la surface du plan focal. Un objectif f-theta peut aussi être télécentrique. Ces objectifs sont notamment utilisés pour le scan laser, la gravure ou la découpe de précision.

Anneaux de Newton désigne un phénomène de diffraction de la lumière visible sur le dessus d'une lentille dont la partie convexe est posée sur une autre surface de verre plane. Il se forme alors un point sombre centre et des anneaux sombres concentriques à l'extérieur. On peut aussi constater ce phénomène sur certains doublets d'objectif de lunette. Il est possible de régler le parallélisme de l'objectif de la lunette (collimater) en observant les anneaux de Newton et en s'assurant que ceux-ci sont bien concentriques et centrés sur la lentille. La dimension de la tache centrale augmente lorsque l'on rapproche les lentilles.

6.4 Les Newtons

6.4.1 Généralités

Newton désigne un type d'instrument ou la formule optique composé d'un miroir primaire parabolique et d'un miroir secondaire plan. On retrouve cette formule dans les Dobson ou les astrographes Newton. Le Newton présente les qualités suivantes [542] :



Credit : J.G. Gricourt

1. Il est très polyvalent car peut être destiné au visuel ou la photo et est adapté à la fois au planétaire et au CP
2. Il est exempt d'aberration chromatique
3. Il est plus tolérant à la collimation que la Lunette
4. Il est facile à fabriquer (donc peu chers)
5. Il est plus sensible au stress mécanique que la lunette
6. Il est plus sensible à la turbulence interne = "Boundary Layer"
7. Il présente de la coma hors axe très visible en dessous de $F/D \leq 5$
8. Il présente de l'astigmatisme hors axe qui augmente avec l'écart à l'axe optique.
9. Il est obstrué, ce qui a une incidence (mineure) sur la résolution

L'aberration de coma peut être complètement corrigée à l'aide d'un correcteur de coma que l'on insère dans le porte-oculaire.

L'aberration d'astigmatisme se manifeste en déformant la coma, mais à F/D court reste très en dessous de l'effet déformant de la coma sur la figure de Airy.

Le Newton est la formule optique la plus répandue avec la lunette achromatique.

Un miroir sphérique est très proche d'un miroir parabolique lorsque la focale est suffisamment longue, c'est la raison pour laquelle il y a des télescopes comme les 115/900 qui possèdent des miroirs primaires sphériques. Selon Jean-Texreau dans

“How to make a Telescope” page 19 (formule dû à André Couder) la focale minimum doit vérifier : $F^3 > 34.9 \times D^4$ (F et D exprimés en cm !) afin que le télescope atteigne le standard “Diffraction Limited” où F est la focale en cm et D est le diamètre en cm. Donc pour un Newton de diamètre de 115 mm (le Newton classique 115/900) donnerait une focale minimale de 840 mm soit un rapport $F/D = 7.3$ et un Newton de diamètre 200 mm devra a minima avoir un ratio F/9.

Attention à cette mode des miroirs ultra-fins dont le ratio épaisseur / diamètre sont en dessous de 16 :1. Ces miroirs présenteront très vite de l’astigmatisme dès lors qu’ils seront orientés dans une direction en dessous du zénith, et ce quel que soit le type de support latéral utilisé.

Mike Lockwood à dit : *I’d say my minimum ratio is 16 :1, based on my 20" f/3.0 x 1.25" edge thickness. At 16" I normally do 1.3", at 20" about 1.4-1.5", and at 24" I like 1.5"-1.6" edge thickness.* [530]

Aussi mille raisons de choisir un Newton plutôt qu’une lunette :

The War on Truth: The Triumph of Newtonianism.

Roland Christen à dit : *The most cost-effective means of quality visual observing of planets is a well-set-up 8- or 10-inch Newtonian ...* [426]

XT10 signifie “Orion XT10” désigne un modèle Dobson du fabricant Orion. Ce modèle possède un miroir de 10 inch de diamètre et de rapport $F/D = 4.7$. Les Dobson de cette gamme se déclinent en plusieurs modèles par diamètre croissants : XT6, XT8, XT10, XT12, XX14. La forme et l’état de surface des miroirs Orion est aussi un peu meilleure que celle des autres fabricants [289].

Télescope Bird Jones désigne un type de télescope Newton modifié. alors que le Newton possède un miroir parabolique le "Bird Jones" est doté d’un miroir sphérique pour des raison de coût de fabrication, il est aussi en général de focale courte F/4. En raison de son miroir primaire il produit une aberration sphérique très importante et donc afin d’être utilisable un correcteur optique à base de lentiles et une barlow a été intégré dans le porte oculaire. Ce sont des télescope bas de gamme et peu cher avec beaucoup de pièce en plastiques.

Dobson désigne à l’origine un type de télescope rudimentaire et peu onéreux dédié à l’observation visuelle. John Dobson est le premier à populariser cet instrument en 1960 aux USA voir aussi The Sidewalk Astronomers. Le dobson était fabriqué artisanalement à partir de matériaux de récupération comme le Sonotube de chantier utilisé pour le tube du télescope. John Dobson est souvent une personne adulée dans le milieu de l’astro amateur pour son enthousiasme pour partager sa passion et son inventivité dans la fabrication d’instruments bon marché, cependant il ne fait pas toujours l’unanimité pour ceux qui l’ont vraiment connu [407]. Le dobson est composé d’un tube de formule optique Newton posée sur une monture de type azimutale.

Le dobson a été l’instrument le plus important dans la démocratisation de l’astronomie auprès du grand public. Le dobson est toujours un instrument très populaire, car à diamètre égal, c’est celui qui offre le meilleur rapport qualité / prix de tous les instruments existants du marché à portée des amateurs.

La plupart des dobsons ne bénéficiant pas de suivi automatisé, celui-ci doit être réalisé manuellement. De plus, l’utilisation d’oculaire à grand champ apparent $70° < \alpha$ jusqu’à 110° est recommandé afin d’éviter de recentrer les objets visés dans le champ trop souvent.

À l’origine les dobsons étaient des télescopes de longues focales nécessitant parfois des échelles pour atteindre l’oculaire mais aujourd’hui grâce aux correcteurs de coma popularisé par Tele Vue TV Paracorr I et II) ce type de télescope peut être de très courte focale $3 < F/D \leq 4$ en étant parfaitement corrigé et permettant alors de disposer d’une surface collectrice (le

miroir primaire) très importante tout en autorisant l'observation les pieds sur le sol.

Il est désormais possible d'équiper les dobsons de suivi automatique et de Goto (StellarCAT + Nexus-DSC) mais aussi de faire de la photo planétaire en haute définition ou de l'astrophoto du ciel profond grâce aux progrès des caméras CMOS.

Dobson 22" F/3.3



Credit : Webster Telescopes

Le bois reste le matériau de prédilection pour fabriquer un dobson. Ainsi, il est peu cher, insensible aux vibrations et facile à entretenir, les mouvements sont assurés par une bande posée sur le dessous des haches du rocker reposant sur des patins lisses en général.

- Les matériaux utilisés pour produire les mouvements
- FRP = "Fiber Reinforced Plastic" granuleux sur patins en Téflon
- Ebony Star = stratifié sur patins en Téflon
- Formica = stratifié sur patins en Téflon
- Aluminum sur roulements à billes = "Roller Bearings"

Les réalisations en métal, souvent sur roulement à billes = "Roller Bearings", sont utilisées souvent avec des structures au design plus "high tech" doté de motorisations compme les "DocTelescope" mais celles ci n'offrent pas plus d'avantage que le bois et présentent même quelques inconvénients :

- Le métal est sujet aux vibrations qui sont moins bien amorties que sur une structure en bois
- Le métal est froid au touché (la température chute la nuit)
- La peinture époxy qui protège le métal n'est réparable sans repasser par l'atelier de peinture
- Refabriquer une pièce de métal en vue de la remplacer demande plus d'outillages (machines CNC) et de compétences que de retravailler une pièce en bois
- Les roulements sont mal adaptés à un usage manuel (sans moteurs) car beaucoup trop fluides [344]

Astrojensen : *"The reason your Dob is so low friction, is that it isn't a Dob at all! The Dobsonian uses Teflon bearings,*

while yours use zero friction roller bearings. Replacing one or two of the roller bearings with Teflon should make it much better. " [25]

Le bois utilisé est très souvent un type de contreplaqué à base de multiplis de hêtre ou de bouleau = "Baltic Birch Plywood" reconnu pour sa solidité et sa relative résistance à l'humidité [737]. Le contreplaqué de hêtre (marque Delignit) est cependant préférable à celui de bouleau car ce premier est plus dur, plus rigide et plus stable avec les variations de conditions climatiques [592].

Inconvénient du bois :

— Les structures bois en dehors du multiplis de hêtre est moins résistant aux chocs
— Le bois en général est plus sensible aux variations d'humidité et nécessite un vernissage marin de protection
— Les structures bois sont aussi plus massives et lourdes (effet "armoire normande" sur les gros diamètres 500 et plus)

Il existe sous différentes formes :

— Tube plein (Orion XT par exemple)
— Truss Classic / compact
— Truss UC : ultra-compact
— Truss UL : ultra-light

La cage du secondaire ou UTA peut être double anneau ou un mono anneau, l'araignée peut être pyramidale afin de gagner en longueur de barres Truss, la base peut être un Flex Rocker (inventé par John Sherman [407] en 1998) pour réduire significativement la hauteur du dobson.

Il est possible de le doter des équipements optionnels suivants :

— Une table équatoriale pour le suivi automatique du ciel
— Une motorisation double axe pour le suivi automatique du ciel en azimutal pour la fonction Goto de recherche / pointage d'objets
— Des cercles digitaux = DSC = "Digital Setting Circles" pour la fonction PushTo pour le pointage d'objets manuel avec aide à la recherche / pointage.

Fabricants de kit de motorisation :

— AstroDevice
— ServoCAT - ServoCAT
— Onstep Goto - Instein

Fabricants de boitiers :

— Nexus DSC Pro Wifi, Nexus II Wifi, Nexus - AstroDevice
— Argo Navis - Wildcard Innovation
— Sky Commander - SkyEngineering
— Ez PushTo - Romer Optics LLC

Des boitiers PushTo sans installation d'encodeurs :

— Memstar - Memstar

— Nadirus PushTo System - Nadirus
— PiFinder
— AstroHopper Android
— PolarAligner Pro Android
— SkyEye - Android
— Mobile Declination - Android
— Astrohopper - Android

Des boitiers réalisant du plate solving en visualisant le ciel :

— Starsense Module - Celestron
— Starsense Skywatcher - Celestron
— Starsense Explorer (miroir renvoi image du ciel sur la camera du mobile) - Celestron
— Adaptateur Starsense Explorer - Thingverse
— Conversion sur monture AZ - John In Derby

Les évolutions des capteurs et des équipements photo de ces dernières années fait qu'il est désormais possible de faire de l'astrophoto planétaire haute définition (Jean-Pierre Brahic, Philippe Cambre, Yann Le Gall, Emil Kraaikamp) et du ciel profond (Romain Roch) avec un dobson motorisé. Le principe est de prendre des milliers de clichés en pose courte, par exemple 2 secondes pour le ciel profond, afin d'annuler les effets néfastes du seeing et des erreurs de suivi, c'est base de la technique de "Lucky Imaging". Pour le ciel profond, il faudra utiliser un porte-oculaire doté d'un dérotateur de champ vu que la monture est azimutale. Le traitement logiciel est celui habituel basé sur l'addition des clichés qui permet l'accumulation de signal au détriment du bruit.

L'équilibrage d'un dobson dépend de la charge maximale admissible au niveau du porte-oculaire selon l'utilisation de :

— Oculaires lourds : Tele Vue Nagler 31 mm, Tele Vue Ethos 21 mm, Tele Vue Panoptic 41mm
— Barlow et de capteur photo
— Correcteur de coma avant l'insertion d'oculaire

Il est possible d'équilibrer un dobson en calculant le diamètre de ses tourillons = "Bearings" en éloignant ou en rapprochant l'axe de rotation en altitude du sol pour assurer l'équilibrage.

Grands tourillons Dobson Taurus



Credit : Taurus Telescopes

Lorsque le rapport F/D est long, il faut des haches plus imposantes [594, 18] ce qui n'est pas toujours pratique, d'autres solutions existent cependant :

— Des contrepoids amovibles placés au dos du miroir primaire ou sur la boite du miroir primaire : Explore Scientific
— Des contrepoids magnétiques à placer sur le tube (en acier) : Orion
— Des élastiques ou une corde de "Bungee" [218] retiennent le mouvement de bascule du tube du Dobson : Sumerian
— Des ressorts permettent d'appliquer une tension freinant la rotation du tube du Dobson : Orion Skyquest XT 10
— Un système de relevage du tube du Dobson : GSO ou Taurus

Solutions d'équilibrage des dobsons



Explore Scientific 406/1826
Génération II



Orion Skyquest XT 10



Contrepoids magnétique Orion



Sumerian Alkaid



Taurus T400



Dobson 8" DeLuxe

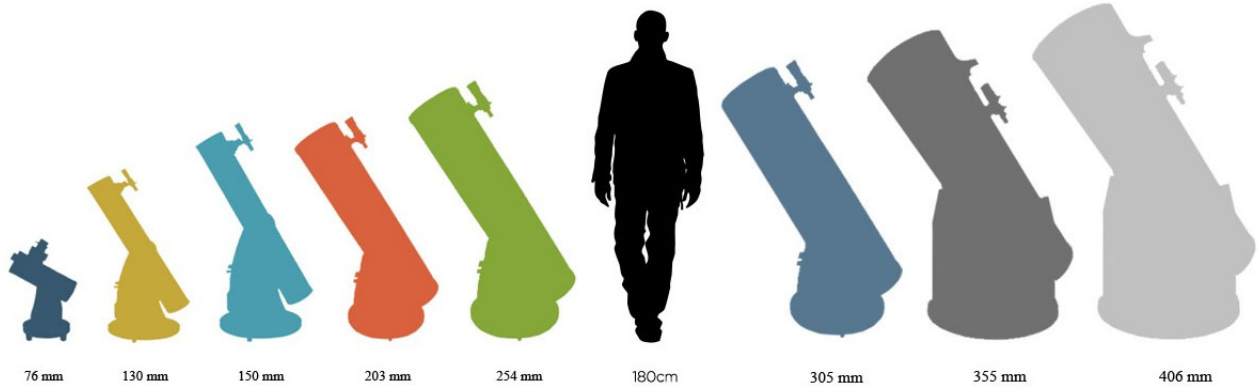
Credit : J.G. Gricourt

6.4.1.0.1 SSE Désigne "Star Sense Explorer" le système de localisation des objets du ciel de la marque Celestron.

Dobson Chinois désigne les dobsons classiques en tube plein, les télescopes les plus vendus pour l'observation visuelle en raison de leur rapport qualité prix imbattable. Ces télescopes démarrent à 150 mm et vont jusqu'à 400 mm. Les modèles les plus populaires sont : Orion Skyquest XT 10, Sky-Watcher 250 , Sky-Watcher 250 Flextube, GSO 250, Omegon ProDob 254, Kepler GSO 250.

Ces télescopes sont des conceptions industrielles, souvent basées sur des copies conformes de modèles précédents avec très peu d'améliorations. Il existe beaucoup de marques et certaines séries sont clairement des clones de modèles basiques.

Comparaison de la taille des dobsons



Credit : J.G. Gricourt

Ces dobsons peu onéreux ne sont toutefois pas exempts de problèmes :

- Tous ces dobson sans exception ne sont pas équilibrés à vide et il y a 2 raisons à cela, la première est que les tourillons de l'axe de rotation de l'altitude sont trop petits pour assurer un frottement suffisant et la seconde raison est que ce même axe est trop éloigné du sol.
- Certains proposent de limiter le mouvement de rotation de l'altitude avec une molette de serrage réalisant ainsi une compression cependant il est très difficile de trouver le bon serrage pour ne pas coller (le retard au démarrage du mouvement) on passe son temps à serrer / desserrer l'axe Les ressorts de tension utilisés sur les Orion Skyquest XT ou les GSO est un meilleur système, car la tension est constante et correctement réglée de base pour l'utilisation d'oculaires et d'accessoires pas trop lourds.
- Les dobsons Sky-watcher nécessite un adaptateur pour utiliser des oculaires en 2". Ainsi le foyer ressort beaucoup trop du porte-oculaire ce qui en plus rajoute du porte-à-faux inutilement au niveau porte-oculaire, les autres dobsons n'ont pas besoin de cet accessoire supplémentaire.
- Certains modèles misent sur des roulements à billes ou des roulements à aiguille pour leurs mouvements en azimut ou altitude, les mouvements du télescope sont trop fluides et n'offrent pas de résistance, une brise de vent suffit à le mouvoir. En général, on préféra des mouvements basés sur du Téflon sur bois pour avoir la résistance requise pour le suivi du ciel en manuel.
- Le Flextube de Sky-Watcher est un dobson particulier car il est rétractable pour le gain de place au moment de le ranger et en contre-partie, c'est un télescope qui ne tient pas bien la collimation, il faut alors la refaire avant chaque sortie de plus, il est 50% plus lourd que les modèles classiques de diamètre équivalent.

Pour résoudre les problèmes d'équilibrages de ces dobsons Orion propose des contrepoids magnétiques très pratiques que l'on peut placer où l'on souhaite sur le tube, cette solution en plus de rééquilibrer correctement le tube n'a pas d'effet négatif sur la fluidité.

Des modèles proposent directement des porte-oculaires de type crayford démultipliés 1 :10, ce sont des porte-oculaire de meilleure qualité en général, toutefois la démultiplication n'est pas une option indispensable pour l'observation visuelle sur dobson.

Dobson Ultra Compact ou "UC" désigne un télescope de type Dobson serrurier très léger. Ce design est inspiré du dobson de 24" construit par Greg Babcock en 1999 [332]. Depuis d'autres dobsons sont directement inspirés de ce design comme le fameux "Strock".

Voir la présentation d'un UL YouTube.

Ce design comporte aussi des défauts :

- Un équilibrage parfois précaire si la cage du secondaire est trop lourde
- Des barres truss trop frêles pour éviter les tremblements à fort grossissement
- L'araignée en dôme triangulaire peut ne pas être suffisamment rigide pour supporter le poids du secondaire

Dobson Flextube désigne une marque de Dobson fabriqué par la société Skywatcher. La particularité de ce Dobson est que la cage secondaire peut coulisser sur les 3 barres truss pour le rangement.

Dobson Strock désigne un Dobson de voyage de type serrurier inventé en 2006 par Pierre Strock un membre du club MAGNITUDE 78. Un Strock [593] est un Dobson de 250 mm $F/D = 5$ avant tout conçu pour être facilement démontable et transportable. Pierre Strock en a diffusé librement les plans de son invention afin qu'elle puisse être fabriquée par des amateurs.

Dobson Low-Rider désigne Dobson pour lequel le porte-oculaire a été orienté vers le bas afin de le rendre accessible sans marchepied lorsque la hauteur du tube est trop importante c'est le cas des télescope de grands diamètre proche des 1m. Ce type de télescope exploite la collimation de type "Partial Offset", il est particulièrement apprécié des astro amateurs allemands. Il a toutefois l'inconvénient de surdimensionner certains élements afin d'éviter le vigneting du champ :

— Un miroir secondaire plus large augmentant ainsi l'obstruction jusqu'à 40% dans certains cas
— Une ouverture devant le telescope (ITD) suffisament large

Dobson Chiefspeigler désigne un Dobson pour lequel un monobra supporte le miroir secondaire [277]. Le miroir secondaire étant positionné complètement en dehors de l'axe = "Off-axis Design", il n'obstrue donc pas le chemin optique du miroir primaire. Cependant il est nécessaire d'introduire des lentilles correctrices afin de corriger la coma et l'astigmatisme important produit par ce design. L'interêt de ce type de dobson est d'offrire un contraste inégalé en planétaire.

Miroir Primaire ou "Primaire" désigne le miroir principal d'un télescope à miroir. Le rôle du miroir primaire est de collecter la lumière des objets lointains afin de la concentrer sur le plan focal. Dans le cas d'un télescope Newton le miroir primaire est de forme parabolique, mais il peut être sphérique dans le cas d'un télescope de type SCT ou hyperbolique dans le cas d'un télescope de type RC. La forme sphérique est plus facile à obtenir que la forme parabolique ou hyperbolique. Plus le rapport F/D du miroir parabolique est court $F/D \leq 4$ plus la forme est difficile à obtenir. Jean Texreau à posé les bases du polisssage de miroirs dans son célèbre livre "Construction du télescope d'amateur" [399], par la suite Mel Bartels à perfectionné la technique pour des miroirs fins et grands diamètres [493].

Les phases de fabrication d'un miroir primaire [603, 396] :

1. Ebauchage : consiste à creuser grossièrement le cylindre de verre pour atteindre la flèche souhaitée qui déterminera plus tard la focale du miroir.
2. Réunissage : consiste à parfaire les bords du miroir
3. Doucissage : consiste à réduire le grain à la surface du verre et à obtenir un segment de sphère parfaite
4. Polissage : consiste à rendre la surface du verre parfaitement lisse (élimination du gris) et transparente si le matériau le permet.
5. Parabolisation : consiste à rendre la surface du verre parabolique par petites retouches sous contrôle du Foucault.

Chaque étape nécessite l'utilisation d'abrasifs de plus en plus fin. L'abrasif peut avoir à la fois une action mécanique sur le verre mais aussi chimique comme avec l'opaline = oxyde de cérium.

Avant la parabolisation la surface du verre devient progressivement sphérique et ce n'est que lors de la phase de parabolisation que le miroir atteindra sa forme finale.

Un très bon miroir est un a minima un miroir présentant une surface douce dite hyperpoli et un bon Strehl ratio de 0.92 et plus, mais mesuré à l'interféromètre AtmosFringe.

La résolution produite par le miroir dépend principalement dans l'ordre :

1. l'alignement des miroirs (collimation)
2. La qualité de la parabole du miroir
3. La déformation du miroir pendant le refroidissement (TDE)
4. La turbulence instrumentale = Boundary Layer
5. Le seeing

Les meilleurs artisans du verre au monde travaillent avec des interféromètres industriels, ils sont donc en capacité de prouver plus précisement les performances réelles de leurs miroirs que le ferait un simple Foucault-gramme : Terry Ostahowski (US), Michel Bonnin de Skyvision (France), Mike Lockwood (US).

D'autres artisans du verre sont aussi parvenus à l'excellente, mais ils travaillent encore à l'ancienne, leur méthodologie de mesures : Foucault, Hartmann nécessitent une grande expertise, mais ils ont néanmoins le savoir-faire pour sortir d'excellents miroirs : Franck Grière (France), Terence Pelletier (France), Carl Zambuto (US).

Il existe sur le marché d'autres types de miroirs :

— Miroirs en forme de ménisque
— Miroir cellulaire (SiC alvéolé)

Les miroirs à ménisque que l'on retrouve dans certaines productions industrielles de 500 mm de diamètre et plus : Dobson Skywatcher Stargate. Ils ont l'avantage de faciliter le support par un barillet simple, cependant étant donné que le dos du miroir n'est pas plat, obtenir une parabole précise est presque impossible. Donc, ce sont des miroirs destinés à l'observation du ciel profond et à la basse résolution.

Les miroirs cellulaires sont fins et donc léger, on les retrouve chez certains fabricants : Hubble Optics, Normand Fullum. Ils ont l'avantage de se mettre à température plus rapidement, cependant ils sont sensibles à la déformation si le barillet n'est pas à la hauteur. Lors du polissage des miroirs cellulaires, il peut apparaitre des zones sur la parabole, c'est le "Quilting". Le barillet ne peut pas être calculé de manière traditionnelle avec "PLOP". Donc, ce sont plutôt des miroirs destinés à l'observation du ciel profond et en basse résolution.

Historiquement, les miroirs étaient épais de 1/6 (ratio épaisseur / diamètre) mais de manière générale, il ne faut pas utiliser de miroir plus fin que 1/10 pour éviter l'astigmatisme de pliure au moment du contrôle pendant le polissage ou une fois installé dans le barillet d'un télescope.

Comme toute pièce optique le miroir parabolique peut présenter des défauts [650], par convention dans la littérature F = Focale / Diamètre :

1. Aberration de sphéricité $\propto 1/F^3$
2. Coma $\propto 1/F^2$
3. Astigmatisme hors axe $\propto 1/F$ et aussi $\propto \theta^2_{\text{axe}}$
4. Défocalisation (l'erreur de mise au point) $\propto 1/F^2$
5. Distorsion géométrique $\propto 1/F$
6. Courbure de champ $\propto 1/F$ et aussi $\propto \theta^2_{\text{axe}}$
7. Transmission dépend de la qualité de l'aluminure
8. Défaut d'abrasion ou les rayures
9. Défaut de zonage (par exemple le TDE ou TUE)
10. Défaut de rugosité comme le mamelonnage ou le micromamelonnage (diffusion de la lumière)
11. Défauts lié aux outils d'abrasion qui ont laissé des traces d'usures sur la surface du miroir [579].

Note : θ_{axe} est la distance angulaire à l'axe optique.

Les rayures si elles sont en nombre limité auront peu de conséquence sur la qualité optique.

Différents types de défauts affectant les miroirs en dehors des défauts purement optiques [741] :

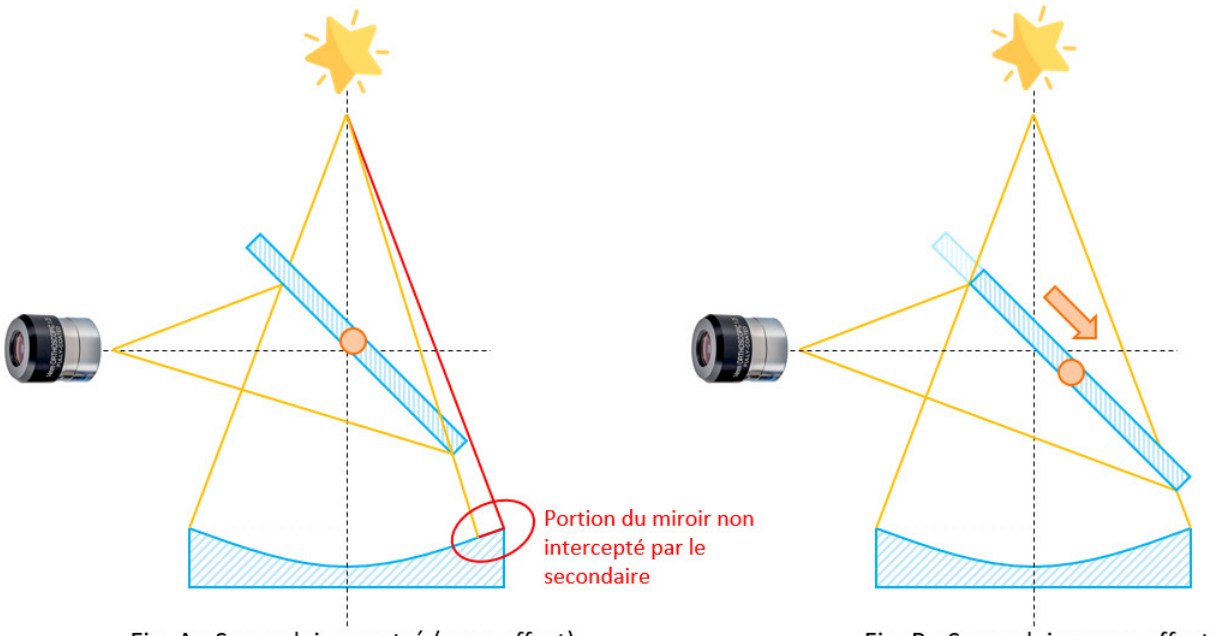
- Internes dans le verres
  - Stries
  - Pierres
  - Occlusions
  - Biréfringence
- Aluminure
  - Éclaboussures
  - Fractures
  - Séparations
- Surface
  - Rayures
  - Zones brillantes
  - Creux
  - Gris
  - Ions
- Contaminations
  - Traces de fumée
  - Tâches
  - Résidus organiques
  - Poussières / grains de sable
  - Guano d'oiseau
  - Buée
  - Toiles d'araignée
  - Champignons
  - Cendres de cigarette

Jon Isaacs a dit : *"You have some much larger "scratches", the spider vanes. This one (scratch on the mirror surface) is tiny by comparison"* [432]

Miroir Secondaire ou "Secondaire" ou "Elliptical Diagonal Mirror" ou "Diagonal" ou "EDM = Elliptical Diagonal Mirror" ou "Optical Flat" désigne le miroir d'un télescope utilisé pour renvoyer la lumière en direction du porte-oculaire. Dans le cas d'un télescope de type Newton, le miroir secondaire est un miroir plan elliptique orienté à 45°. Les Newton a F/D court ont nécessairement des miroirs secondaires de grandes dimensions afin d'éclairer correctement le champ de vision (CPL = champ pleine lumière). L'augmentation du secondaire à aussi pour effet d'augmenter mécaniquement l'obstruction et de diminuer le contraste de l'image. En général en visuel ou en astrophoto planétaire, une obstruction en dessous de 30% est recommandée. Les SCT Celestron sont des instruments planétaires obstrués à 30%. En dessous de 30% il n'y a pas de différences visibles avec un instrument non obstrué (une lunette par exemple).

Un petit miroir secondaire permet de diminuer l'obstruction du télescope ce qui augmentera le contraste des images, en revanche un miroir secondaire trop petit posera des problèmes [514, 519, 640].

Miroir secondaire et offset



Credit : J.G. Gricourt

Mel Bartels à dit : *Could there be a difference in optical quality of the diagonals ? Perhaps the 1.83 diagonal had a slight edge problem. After all, only when a diagonal is absolutely minimally sized will its edge be used to form the image at the center of the field of view. I was forced to conclude that this was the most likely reason.* [496]

Don Pensack à dit : *I do think that people who claim they can see the difference between a 20% secondary and a 25% secondary are, perhaps, trying to justify the use of a too-small-for-low-powers secondary ... I know from personal experience that optical quality matters more, and superb seeing and transparency matter more, as well. I see far more planetary details in a 318mm aperture than I ever saw in a 203mm aperture. Secondary size would be WAAAAY down the list.* [249, 433]

Inconvénient d'un miroir secondaire trop petit :

1. Il y aura une perte partielle de lumière au centre du champ car le secondaire ne voit pas tout le primaire par réflexion [766] en ne capturant pas tous les rayons réfléchis pour le point image.
2. Les bords du secondaire contribueront à former l'image aussi au centre du champ = "On-axis" or les bords présentent souvent des défauts et introduiront des aberrations dans l'axe [519] (astigmatisme du secondaire).

   (a) Les bords du secondaire présentent souvent des défauts de planéité, les bords sont rabattus = "Rolled Off Edge" en raison de la technique de polissage (PtV = Peak to Valley plus faible à cet endroit) mais aussi du coating de type dielectric [640]
   (b) Les bords du secondaire se déforment en bords rabattus = "Rolled Off Edge" pendant le refroidissement si le verre utilisé n'est pas un verre spécial (comme le verre Quartz)
   (c) L'aluminure dans le cas des traitements diélectrique peut stresser le verre au niveau des bords du secondaire
   (d) Le chanfrein = "Bevel" du miroir secondaire peut être aluminé et donc contribuer à l'apparition de reflets fantômes
   (e) Il peut arriver les bulletins interférométriques exclues les bords du secondaire afin de montrer des chiffres plus flatteurs (ex : Orion Optics le fait aussi sur les primaires).

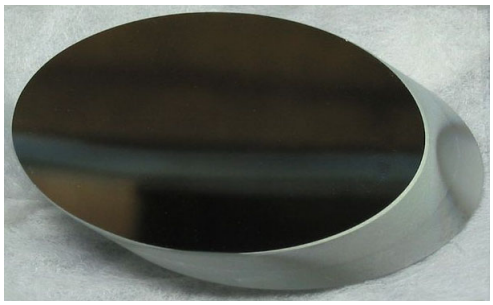
3. Lorsque le secondaire est enchâssé dans un support (donc non collé) une partie des bords est perdue (lip support overlap), diminuant la surface utile du secondaire.
4. Un secondaire nécessitera un placement avec offset très précis (aucune marge d'erreur) pour éviter de diaphragmer une partie du miroir primaire (voir schéma ci-dessous).
5. Lors de la collimation sont placement est plus critiquie avec moins de marge d'erreur avec des bords qui contriburons à l'image pour un champ plus étroit.
6. Il arrive que la dimension du secondaire donnée par le fabricant comprend le chanfrein qui ne peut pas être compté comme de la surface utile
7. Certains supports masquent les bords du miroir et réduisent donc sa surface utile

Cas du support à bordures = "Lip" :

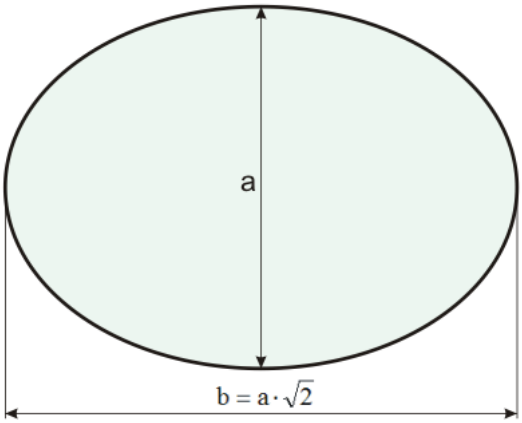
— Il est impératif que la bordure applique une pression uniforme sur le miroir pour éviter de produire de l'astigmatisme [509]
— Ce support à l'inconvénient de réduire la surface utile du secondaire sans réduire l'obstruction
— Ce support à l'avantage de masquer les bords du secondaire qui peuvent présenter des défauts et en contribuant à la formation de l'image au centre induisant une perte de résolution

Un miroir de dimension a produira un champ pleine lumière c (voir calculs) et donc interceptera complètement le flux lumineux correspondant, cependant les bords du miroir contriburons à la formation de l'image dès le champ $\theta = c/F$ (en angle radian).

Lors du choix d'un miroir secondaire par exemple : $a = 114.3mm$ donnant $\theta = 1°$ et $a = 101.6mm$ donnant $\theta = 0.5°$ les bords du secondaire de 101.6mm seront mis à contribution dès 0.5° alors que piour le miroir secondaire de 114.3mm se sera seulement à partir de 1°.



Credit : Antares Optics



Credit : Serge Bertorello

R.F. Royce [620] part de la dimension minimale du secondaire produisant un CPL = 0 et du field stop le plus élevé de sa gamme d'oculaire alors : $a = a_0 + \text{fstop}$ où $a_0 = \frac{pD}{F}$.

Mike Lockwood 1 [514, 520] pour des miroirs moyens de 16" à 28" et doté d'un correcteur de coma Paracorr II, préconise un secondaire de : $a_0 = (\frac{D}{2} + 4")/(F/D)$ où D est en pouce et $p = \frac{D}{2} + 4"$ la distance du secondaire au plan focal. On prendra à la fin la taille de secondaire a immédiatement supérieur à cette valeur a_0 (voir formules plus bas pour compléter).

La valeur 4" est définie pour éviter que le Paracorr II ou le SIPS et l'éventuel porte filtre ne vignettent la champ, sinon

sans correcteur, on prendrait 3.5" à la place. On arrondit à la dimension immédiatement supérieure pour trouver une taille standard chez le fabricant. Mais de manière générale Mike Lockwood préconise de prendre 4.5" pour plus de marge de confort. Mike Lockwood parle aussi d'un champ pleine lumière de 0.25" en visuel [521, 519].

Mike Lockwood 2 [509] pour des miroirs moyens Mike Lockwood préconise un secondaire de : $a = a_0 + a_0/8$ et pour des grands miroirs $a = a_0 + a_0/4$.

Jean Texereau[3] ou Mike Lockwood [514] proposent : $a = p \times \frac{D-\text{CPL}}{F} + \text{CPL}$ où D = diamètre du primaire, p = distance du plan focal à l'axe optique, F = focale de l'instrument. Il s'agit ici de la formule inverse du calcul du CPL où l'on cherche le secondaire procurant un CPL donnée. Jean Texereau prend le diamètre de la Lune pour le CPL : CPL = F * 0.009.

Don Pensack [219, 207] préconise un secondaire calculé de manière que la perte de luminosité reste inférieure à $\Delta I = 70\%$ sur tout le champ d'un oculaire de field stop valant 46 mm. On peut déterminer la perte en magnitude :

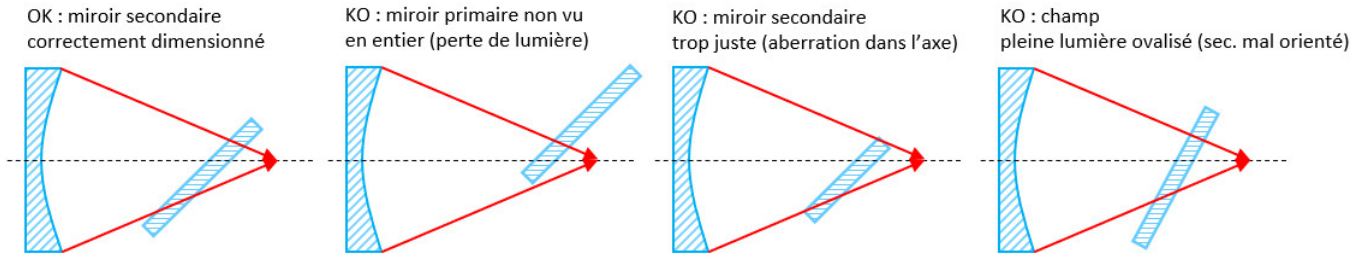
$$\Delta m = -2.5log(I/I_0) \text{ or } \Delta I = \frac{I - I_0}{I_0}$$
$$\Delta m = -2.5log(\Delta I + 1)$$
$$\Delta m = -2.5log(70/100 + 1)$$
$$\Delta m = -0.58 \text{ magnitudes}$$

Note : Mel Bartels attribue ce seuil à -0.4 magnitude.

On peut aussi viser un champ TFOV de 0.5° (la lune) pour un instrument dédié au ciel profond ou bien un champ de 0.25° seulement pour un instrument dédié au planétaire, pour rappel la conversion du champ angulaire en champ linéaire en mm, : fstop = $\frac{\text{TFOV} \times F}{57.3}$

Attention si l'on veut utiliser un binoculaire ou faire de l'astrophoto il faudra plus de backfocus et le miroir secondaire nécessaire sera alors plus grand. En conséquence, il est possible alors que l'ouverture du porte-oculaire en 2" soit insuffisante pour ne pas vigneter le champ il faudra alors passer sur un porte-oculaire de 2.5 ou 3" (voir le calcul de $f_{a\min}$) ce qui sera plus important encore en astrophoto.

Rappel des configurations du secondaire possibles :



Credit : J.G. Gricourt

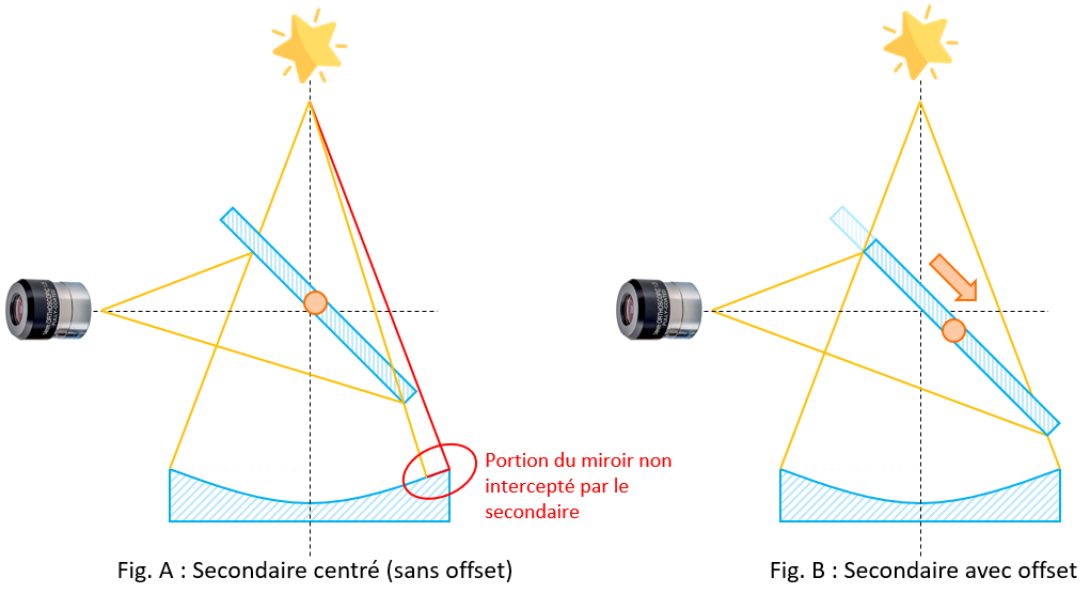
3. Jean Texereau "How to make a telescope" p110, David Krieg "The Dobsonian Telescope" Section 4.5

6.4.2 La Collimation

Collimation du Newton désigne l'opération d'alignement des miroirs du télescope de type Newton. Aligner les miroirs permet d'obtenir des images nettes exploitant de manière optimale le potentiel de l'instrument. Dans la mesure du possible, il faut aussi que le point de croisement des branches de l'araignée soit bien traversé par l'axe optique, et cela, perpendiculairement, ainsi l'offset calculé est utilisé pour positionner le secondaire sur son support permettra de bien centrer le champ pleine lumière. Cependant, des branches pas exactement centrées n'ont pas de conséquence sur la collimation [210].

Attention un offset non pris en compte n'est pas un problème pour la collimation mais peut engendrer du vignetting si le secondaire est dimenstionné trop juste [381]. Et dans le cas où l'on produit l'offset avec la méthode de collimation "Partial Offset" il peut se produire un vignetting si l'ouverture du télescope (ITD) est dimenstionné trop juste [247].

Offset du miroir secondaire



Credit : J.G. Gricourt

Note : ici le cas du miroir secondaire dimensionné au plus juste CPL = 0 ...

Mathew Wedel à dit : *But collimation is like changing diapers - a little finicky and unpleasant the first couple of times, and completely routine the next thousand times* [482].

Oeilleton ou "Peephole" ou "Sight-tube", désigne une boite circulaire dotée d'un minuscule trou en son centre. Il permet de régler l'orientation du miroir secondaire, il est souvent combiné avec un cheshire.

Cheshire désigne un outil de collimation pour les télescopes Newton permettant de régler l'alignement du miroir primaire. Il en existe 2 sortes, avec une croix devant viser = 'Crosshaires " ou un anneau = "Donut" réfléchissant.

Cette méthode présente l'avantage :

1. De ne pas dépendre du bon alignement du cheshire dans le porte-oculaire
2. De grossir 2 fois l'erreur PAE [767]
3. D'être passive (pas de source d'énergie)

Il existe des Cheshires électronique tel que l'OCAL, une caméra embarquée permet de visualiser l'image sur l'écran d'un smartphone qui permet de collimater le miroir primaire tout en restant du côté de la caisse du primaire pour éviter des allez-retour avec le porte oculaire pour vérifier l'effet des réglages.

Collimation "Classique" désigne le modèle dans lequel le secondaire n'est pas centré sur l'axe du tube. Ainsi, il est avancé vers le primaire et éloigné du porte-oculaire, c'est ce que l'on appelle l'offset du secondaire. Le secondaire est exactement à 45° vu du porte-oculaire. Dans ce modèle de collimation les rayons réfléchis par les miroirs sont orthogonaux [598].

Thierry Legault à dit : *L'importance de la collimation est comparable à celle de l'accordage d'un instrument de musique : les images délivrées par un télescope déréglé peuvent être aussi lamentables que le son fourni par un piano désaccordé* [722].

Pour réaliser la collimation du Newton il faut que l'axe du tube du porte-oculaire soit colinéaire et confondu avec l'axe du miroir primaire. Le miroir secondaire ne fait que détourner les rayons issus du primaire dans la direction du porte-oculaire.

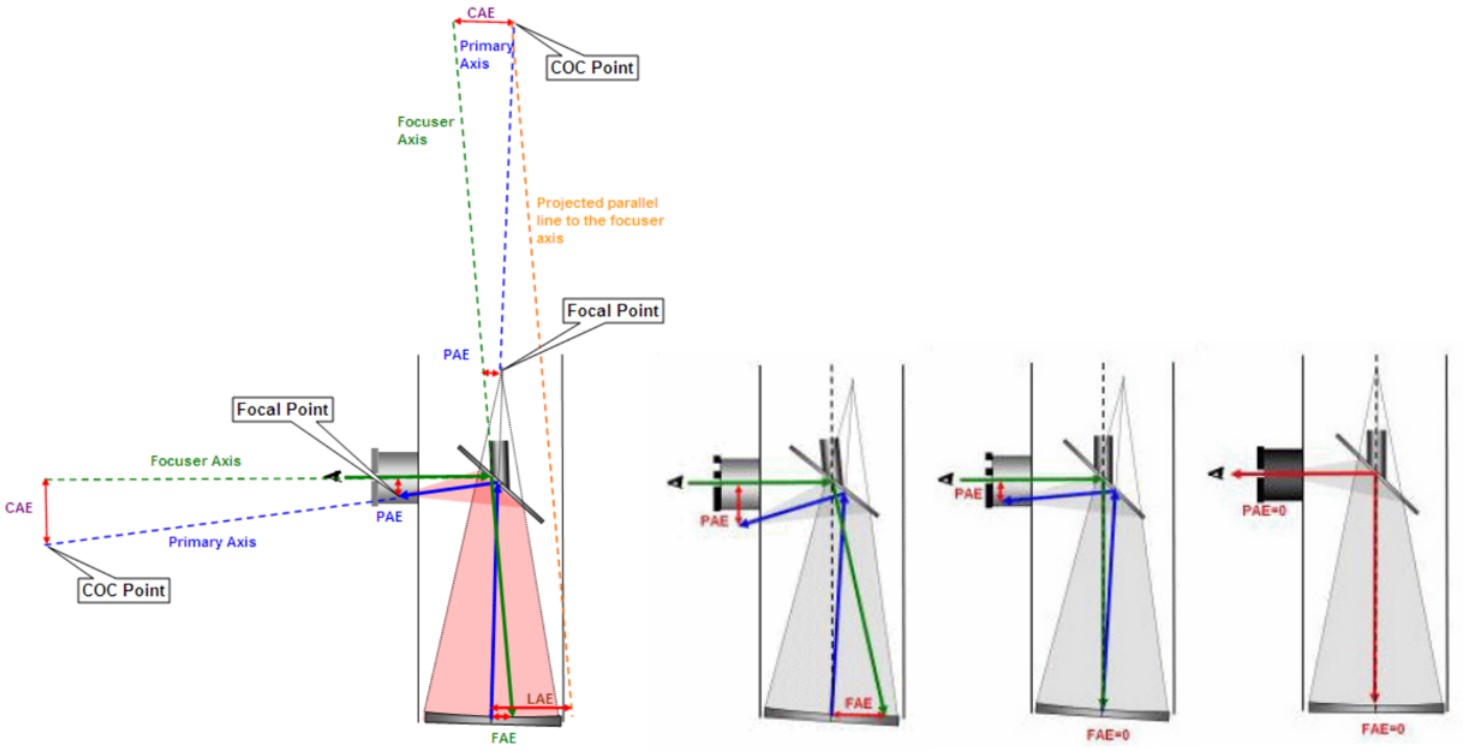
Par conséquent, d'un point de vue géométrique, la collimation des axes consiste à [149, 368, 374] :

1. Orienter grossièrement le miroir secondaire afin d'optimiser l'illumination du champ (FOV) ce point n'est pas critique (sauf en photo)
2. Faire coïncider le plan focal du miroir avec le plan focal de l'oculaire (réduction du tilt du plan focal) pour minimiser la coma autour du centre du champ (FAE = 0) en ajustant l'orientation du secondaire, ce point est critique
3. Faire coïncider le point focal du miroir avec le point focal de l'oculaire (réduction du shift du point focal) pour minimiser la coma au centre du champ (PAE = 0) en ajustant l'orientation du primaire, ce point est très critique

On présume que l'oculaire, le dernier élément de la chaîne optique, est aligné d'office dans le tube du porte-oculaire, si ce n'est pas le cas, l'oculaire générera des aberrations.

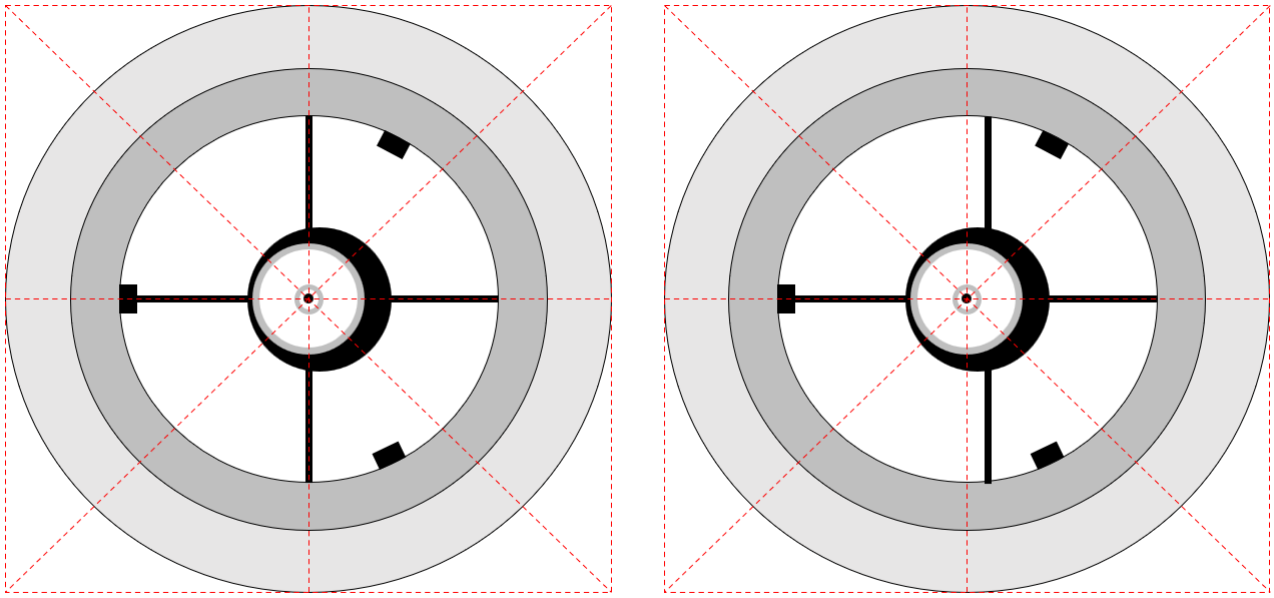
De manière générale, si 2 des erreurs : PAE, FAE, CAE ou LAE sont réduites alors, on sera certain que la collimation sera parfaite et dans ce cas toutes les 4 erreurs sont alors réduites, on prend en général en considération FAE et PAE.

Inversement, si l'une des erreurs n'est pas réduite, la collimation ne sera pas réalisée [367]. On peut montrer qu'il existe plusieurs modèles d'alignements permettant une collimation optiquement parfaite : "classical offset" et "partial offset" [175, 764].



Credit : Jason D

Vue depuis un cheshire



Miroir secondaire centré Miroir secondaire avec Offset

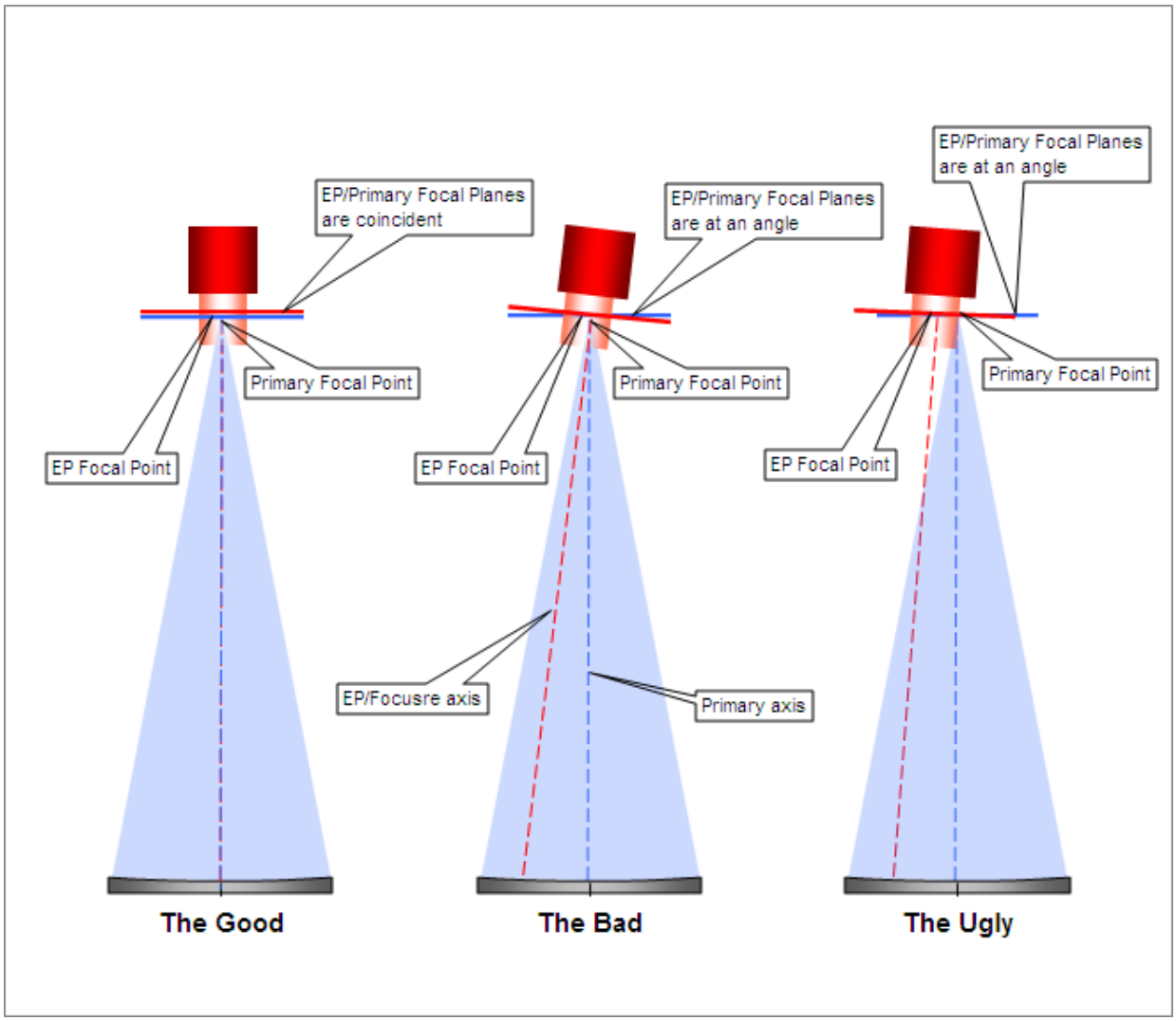
Credit : J.G. Gricourt

Erreur FAE ou “Focuser Axial Error” ou “Secondary Tilt” désigne l’erreur d’alignement des axes du primaire et du porte-oculaire. Il s’agit de la distance (mm) entre l’axe du porte-oculaire et l’axe du primaire mesuré à la surface du primaire. Cette erreur est réduite en réorientant le miroir secondaire. La tolérance de collimation (FAE) se calcule comme : $\text{FAE}_{\text{mm}} = 0.034 \times D$ et avec un TV Paracorr I la coma est réduite de 6 fois donc la tolérance de collimation (FAE) passe à : $\text{FAE}_{\text{mm}} = 0.034/6 \times D = 0.006D$ [763, 778, 547] et pour un TV Paracorr II : $\text{FAE}_{\text{mm}} = 0.034/15 \times D = 0.0023D$ [206, 216]. Il est impératif que l’axe optique passe par le centre du correcteur de coma pour fonctionner de manière optimale, et la

tolérance n'est pas respectée, alors la correction de coma ne se fera pas à partir du centre du champ, mais à côté, alors de la coma sera bien visible au centre du champ alors partiellement corrigé. Cette erreur est responsable du **tilt** du plan focal au niveau du porte-oculaire produisant un problème de focalisation hors axe et se corrige par le réglage fin du secondaire [368]. Cette erreur est réduite par le laser classique ou par l'auto-collimateur (à 1 ou 2 trous) via la procédure CDP de Catseye en jouant sur les vis de collimation du secondaire. Un tube de porte-oculaire qui ne coulisse pas exactement parallèle à l'axe optique provoquera une erreur FAE. Ainsi, il est recommandé de réaliser la collimation avec le tube du PO dans la position proche de celle de la mise au point avec l'oculaire utilisé [769]

Erreur PAE ou "Primary Axial Error" désigne l'erreur d'alignement des axes du primaire et du porte-oculaire mesurée sur le plan focal. Il s'agit de la distance (mm) entre l'axe du porte-oculaire et l'axe du primaire au foyer. Cette erreur est la plus critique, elle est réduite en réorientant le miroir primaire. La tolérance de collimation (PAE) se calcule comme : $\text{PAE}_{\text{mm}} = 0.005 \times (F/D)^3$ [763, 778]. Pour un tube court $F/D \leq 4$ la tolérance est inférieure à 1 mm. Cette erreur est responsable du **shift** du plan focal au niveau du porte-oculaire produisant de la coma dans l'axe et se corrige par le réglage fin du primaire [368]. Cette erreur est réduite par le cheshire (Blackcat de Catseye) ou le laser barlowté en jouant sur les vis de collimation du primaire.

Réduction des alignements



Credit : Jason D.

Erreur CAE ou “COC Axial Error” désigne l’erreur d’alignement des axes du primaire et du porte-oculaire. Il s’agit de la distance (mm) entre l’axe du porte-oculaire et l’axe du primaire à la surface du primaire sur plan du COC = “Centre Of Curvature”. Cette erreur est réduite par le laser et par l’auto-collimateur (à 1 ou 2 trous).

Erreur LAE ou “Parallel Axial Error” désigne l’erreur d’alignement des axes du primaire et du porte-oculaire. Il s’agit de la distance (mm) entre l’axe du porte-oculaire partant du ROC et projeté sur le primaire et l’axe du primaire. Cette erreur est réduite par l’auto-collimateur à 2 trous [779]

La méthode de base de la collimation classique consiste [83] :

1. Utiliser un oeilleton ou un “Sight Tube” ou un “Teletube”
2. Desserrer les 3 vis du support du secondaire
3. Centrer et orienter secondaire à la main afin qu’il soit vu circulaire (*)
4. Resserrer juste un peu les 3 vis du support du secondaire
5. Orienter finement le secondaire en jouant sur les vis du support afin de visualiser le bord du primaire afin qu’il soit concentrique avec le bord du secondaire (**)
6. Insérer un cheshire ou un “BlackCat”
7. Orienter finement le primaire en jouant sur les grosses vis du barillet dans le but de centrer la pastille de collimation du miroir dans le cercle du cheshire vu par réflexion

(*) En regardant au travers d’un oeilleton (ou d’un cheshire) et en bloquant le retour du primaire avec une feuille de couleur uniforme...

(**) Si le primaire n’est pas concentrique avec le secondaire, le CPL ne sera pas circulaire, mais la collimation sera néanmoins bonne.

Pour vérifier la concentricité du primaire, on peut [375] :

— On peut utiliser les pattes du primaire comme repère afin de visualiser les 4 pattes en même temps (cas des dobsons Orions XT).
— On peut utiliser un “Teletube’ et jouer sur l’enfoncement de celui-ci dans le porte-oculaire pour vérifier la concentricité du primaire vu dans le secondaire
— On peut utiliser un “Concenter” = Collimateur Concentrique pour vérifier la concentricité du primaire vu dans le secondaire

La méthode avec laser consiste :

1. Desserrer les vis du support du secondaire
2. Centrer secondaire à la main (*)
3. Orienter secondaire à la main afin qu’il soit vu circulaire (*)
4. Resserrer un peu les vis du support du secondaire
5. Insérer le laser dans le porte-oculaire
6. Orienter finement le secondaire en jouant sur les vis du support afin de placer le point rouge du laser au centre de la pastille de collimation du primaire (l’axe optique du secondaire est parallèle à l’axe mécanique du tube)
7. Orienter finement le primaire en jouant sur les grosses vis du barillet afin que le retour du laser frappe le centre du départ du laser (l’axe optique du primaire est confondu avec l’axe optique du secondaire)

Une fois collimaté les réflexions ne bougent plus lorsque l’on rentre ou ressort le tube du porte-oculaire. En supposant que le primaire soit correctement collimaté, un défaut de centrage du secondaire n’aura d’impact que sur la position du CPL, de

même qu'un défaut d'orientation du secondaire n'aura d'impact que sur la forme du CPL qui sera éventuellement ovalisée.

Placement de l'oeil :

— Pour évaluer l'orientation du secondaire, il faut placer son oeil n'ont pas sur le plan focal, mais en arrière à la pointe du cône de lumière.
— Pour évaluer la collimation du miroir primaire, il faut placer son oeil sur le plan focal.

Attention, on dit souvent que la collimation est plus délicate à F/D court $F/D \leq 4$ c'est faux en réalité, à F/D court la collimation à moins de tolérance, mais n'est pas plus compliqué, par contre, il faut vérifier que :

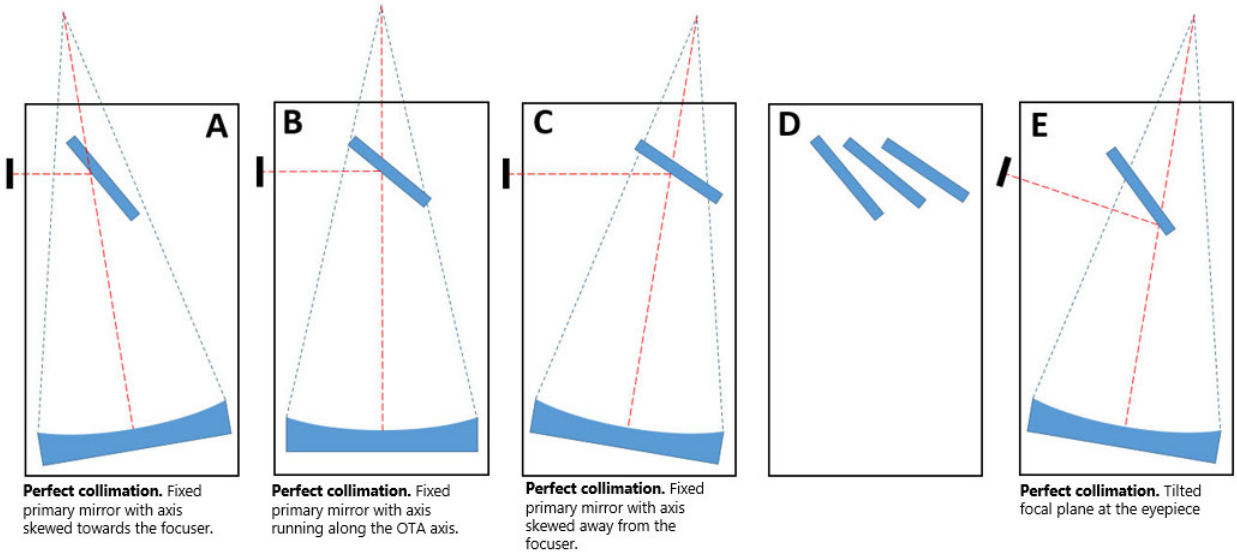
1. Le positionnement de la pastille de collimation devra être plus précise.
2. La structure (tube ou barres truss) doit être plus rigides pour maintenir les alignements des miroirs
3. L'araignée ne devra pas fléchir sous le poids du secondaire
4. Le primaire ne devra pas s'affaisser ou bouger dans son barillet
5. Les vis de collimation (secondaire ou primaire) doivent être facilement accessibles
6. Les vis de collimation (secondaire ou primaire) doivent être dotées de larges boutons manuels
7. Les vis de collimation (secondaire ou primaire) doivent être stables afin de maintenir une position
8. Les outils de collimation utilisés doivent l'être au format 2" et doivent être parfaitement usinés dans le but de rentrer dans le porte-oculaire sans aucun jeu, donc pas d'erreur de centrage = "Misregistration" = "Sagging" '[177]

Le positionnement de la pastille de collimation ne peut pas être aussi précis que l'on veut par rapport à la Parabole. Ainsi, il n'existe pas de méthode infaillible : "I know of no way to verify that the center marker is indeed centered relative to the optical center of the parabola to any real precision." [776]

Conséquences lorsqu'on recule le primaire [664] :

— L'illumination du champ (CPL) est plus large
— Le foyer ressortant moins, certains oculaires ne focaliseront plus et l'usage de la tête binoculaire nécessiteront peut-être une barlow

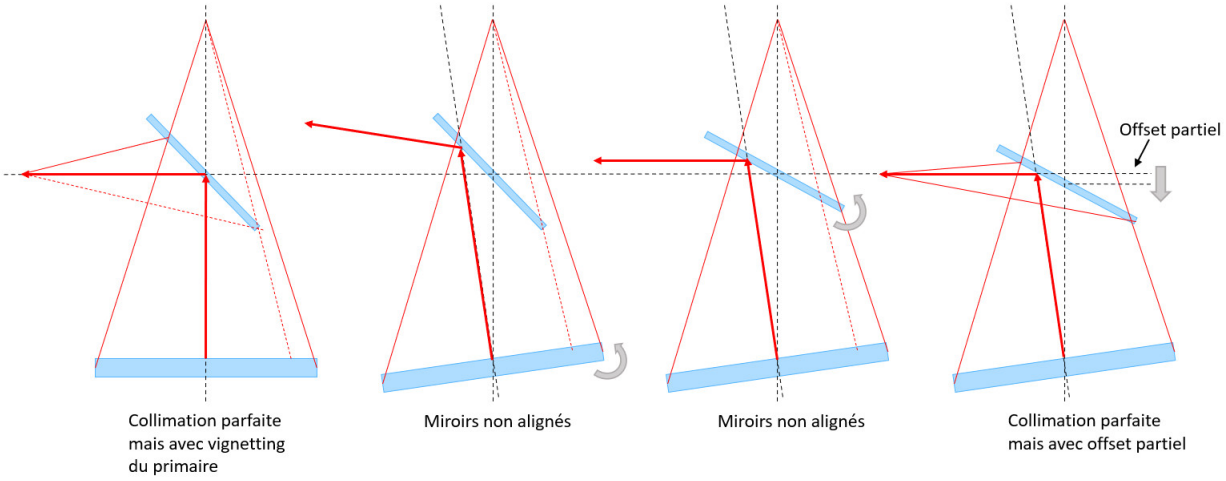
Cependant, il existe une infinité d'alignements possibles qui garantissent une collimation parfaite.



Credit : Jason D

Dans le cas C avec un tube aligné sur l'axe du primaire, on retrouve le principe des dobsons allemands dit "Low 'Rider" où le PO n'est pas orthogonal, mais orienté franchement vers le bas pour des raisons pratiques [609]. Ce type de télescope, en raison de l'inclinaison plus prononcée du secondaire, nécessite un secondaire plus large, augmentant l'obstruction du télescope en conséquence.

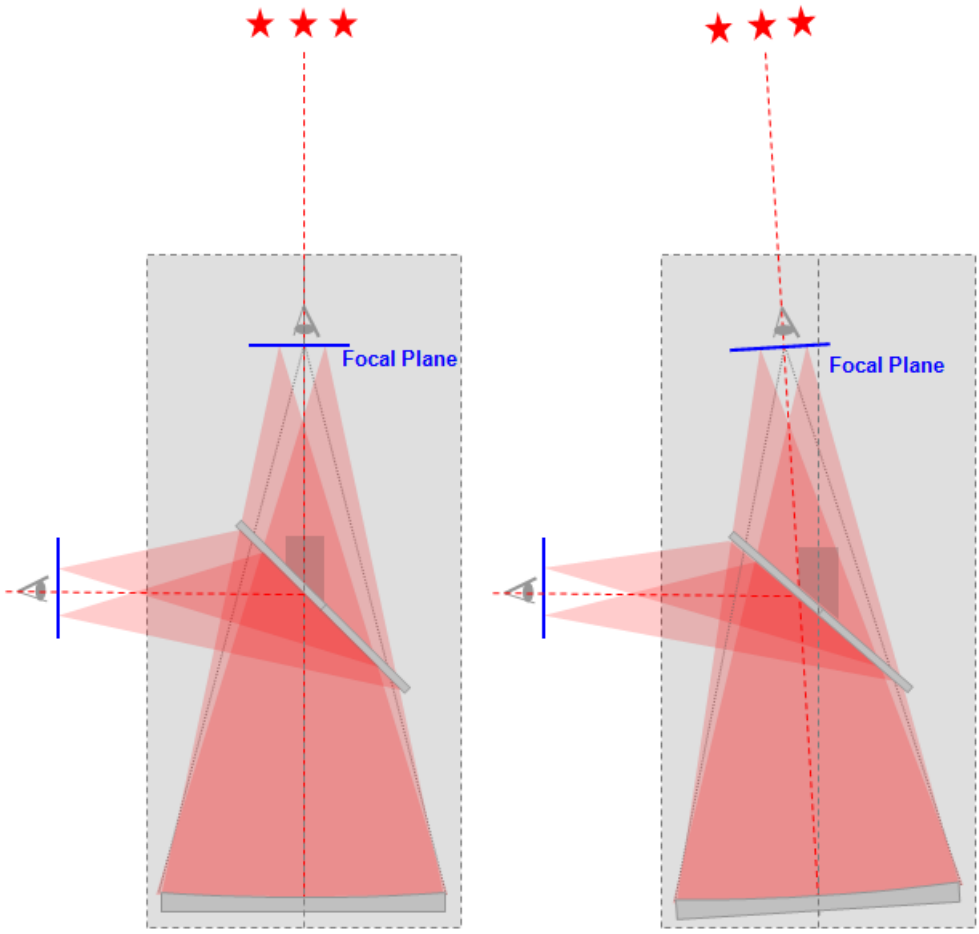
Cas du miroir centré = pas d'offset [379] :



Credit : J.G. Gricourt

Note : on peut éliminer le vignetting de la première figure en respectant l'offset du secondaire = glissement du secondaire vers le primaire.

Collimation avec et sans offset



Credit : Jason D.

Collimation "Partial offset" ou "New Model" désigne un modèle de collimation pour lequel le secondaire est centré sur l'axe du tube et est avancé vers le primaire (partial offset). Le secondaire n'est pas à 45° vu du porte-oculaire. Dans ce modèle de collimation, les rayons réfléchis par les miroirs ne sont pas orthogonaux, mais l'axe du porte-oculaire et l'axe du primaire coïncident (condition de la collimation).

Attention, un télescope colimaté par la méthode "Partial offset" présente quand même plusieurs défauts :

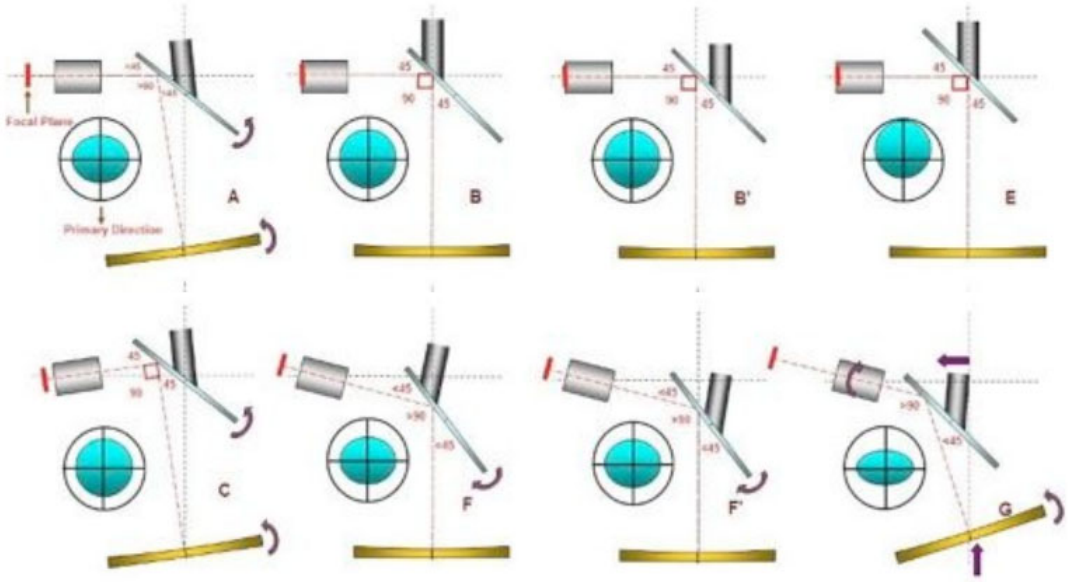
- L'axe optique n'étant plus parallèle au tube donc il faut que l'ouverture du télescope (ITD) ne soit pas dimensionné trop juste [381]
- Le faisceau capturé touche le miroir secondaire de manière décentrée donc il faut que le secondaire ne soit pas dimensionné trop juste
- L'obstruction centrale n'est plus minimale en raison de l'orientation du secondaire qui n'est plus à 45°
- Le CPL est centré mais ovalisé, cela n'aura pas de conséquence en visuel et aura une répercussion en photo dans une moindre mesure, car la perte de lumière due au vignettage en bord de champ est inégale [765, 546], à noter que vu au travers de l'oeilleton le secondaire sera malgré tout parfaitement circulaire.
- Le pointage DSC des fonctions Goto et PushTo n'est plus aussi précis

Quelle que soit la méthode employée, il faut impérativement que l'axe optique du primaire ne coïncide pas avec l'axe optique de l'oculaire. Le cas à éviter et celui du porte-oculaire qui reste orthogonal par rapport au tube de l'instrument alors que

le plan focal obtenu à l'entrée de l'oculaire est incliné "Focal Plane Tilt". Le centre du champ vu à l'oculaire ne correspond alors plus au centre du champ réel et comme pour les lentilles, les rayons obliques frappant les miroirs vont focaliser sous la forme d'une figure de Airy déformée, car entachée d'aberrations :

— Le primaire produira alors de la coma au centre du champ
— L'oculaire produira de l'astigmatisme au centre du champ
— Le positionnement du correcteur de coma ne sera plus du tout optimal

Secondary mirror alignment models



Credit : Vic Menard

A – The New Model. Spider and secondary mirror are centered, and the primary mirror axis is tilted toward the focuser side of the OTA to provide the desired offset.

B – The Classic Offset Model. The spider is centered and the secondary mirror is mounted offset away from the focuser to provide the desired offset.

B'- The Classic Offset Model. Same as B except the spider is offset and the secondary mirror is mounted centered (relative to the spider) to provide the desired offset.

E – The Centered Model. The spider and secondary mirror are centered and there is no offset.

C – A variation on The New Model. The focuser is tilted to provide a 90-degree intercept angle. The primary mirror axis is still tilted toward the focuser side of the OTA to provide the desired offset.

F, F' and G – Variations with the secondary mirror closer to the primary mirror to provide additional out focus with an offset alignment.

La zone en bleue est le champ pleine lumière tel que vu derrière l'oculaire ou sur un capteur. Il existe également des arrangements avec lesquels la collimation est possible lorsque le porte-oculaire n'est pas orthogonal au tube [765].

Barlowed Laser ou "Laser Barlowté" désigne une méthode de collimation du primaire inventée par Nils Olof Carlin et publiée en Janvier 2003 dans Sky&Telescope. Cette méthode consiste à envoyer un faisceau divergent sur le primaire par le biais d'une barlow (de type télénegative et pas télécentrique) posée immédiatement devant le laser (ex : solution de Howie Glatter). Le faisceau divergent va en retour être renvoyé par le primaire pour former un faisceau plat en direction du porte-oculaire, la pastille de collimation va alors former une ombre qu'il suffira de centrer sur un écran.

Cette méthode présente l'avantage :

1. De ne pas nécessiter un très bon alignement du laser (et de la barlow) dans le porte-oculaire
2. De ne pas nécessiter un très bon centrage du laser dans son propre support [181, 548, 421]
3. De ne pas nécessiter une très bonne orientation du secondaire
4. De grossir 2 fois l'erreur PAE

Autocollimateur ou "Cat's Eye" désigne l'outil de collimation des télescopes Newton permettant de collimater un Newton de manière itérative afin de régler l'alignement de l'axe du porte-oculaire en jouant sur les vis du secondaire et donc de minimiser l'erreur FAE (uniquement) et de réduire l'erreur PAE avec un cheshire dans la foulée. Pour rappel, l'objectif de la collimation complète est de rendre parallèle et confondu l'axe du porte-oculaire et l'axe optique du miroir primaire. L'autocollimateur est un oeilleton dont le dos est composé d'un miroir réfléchissant. L'autocollimateur a été perfectionné par Ghassan Jason Khadder (alias Jason D. du forum CloudyNights) en Janvier 2009 suite à une très longue discussion sur le forum Cloudynights, Jason y ajouta un second trou décalé. Ce nouvel autocollimateur a été ensuite rendu accessible aux amateurs par la société Catseye de Jim Fly et Vic Menard. Cet outil dédié à la réduction de l'erreur FAE est un outil passif et très sensible, il permet une précision de réglage inégalée par rapport à toutes les solutions existantes en raison de son extrême sensibilité aux alignements. Avec l'autocollimateur il est possible de détecter des erreurs de centrage de l'ordre de 0.001". Cette méthode exploite les multiples réflexions de la pastille de collimation du primaire pour évaluer la collimation [549].



Credit : Jim Fly

Il existe 2 méthodes de collimation avec le "Cats Eye" :

— La méthode itérative [92, 93, 176, 553]
— La méthode CDP = "Carefully Decollimated Primary" [772]

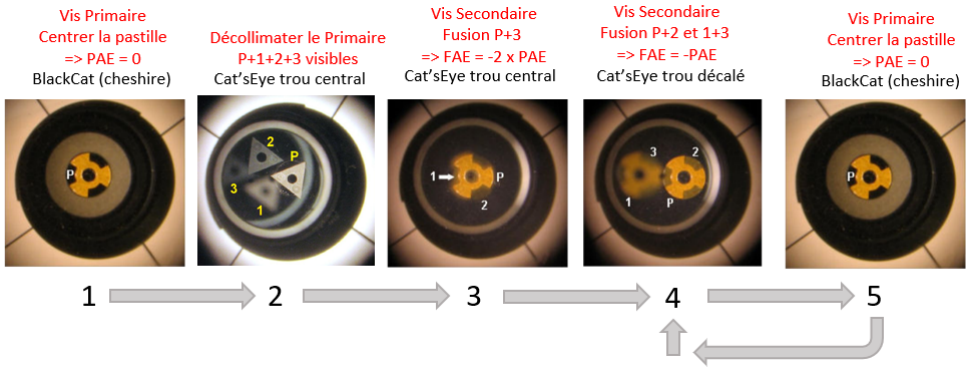
La méthode CDP nécessite de visualiser la seconde réflection 3 très faible qui peut parfois être difficile à voir alors on pourra utiliser la méthode incrémentale à la place :

1. Insérer le Blackcat dans le porte-oculaire
2. Ajuster le centrage de la pastille P de collimation avec les vis de collimation du primaire (il s'agit d'une collimation classique au cheshire).
3. Insérer l'autocollimateur Catseye dans le porte-oculaire et l'amener dans une plage +/-1.25% autour du plan focal afin que les réflexions P et 2 soient de dimension sensiblement égales pour une meilleure lisibilité (faire varier la mise au point du porte-oculaire) [371, 372]

4. Avec l'aide du trou central, vérifier que les 4 réflexions : P (la plus lumineuse), 1, 2, 3 de la pastille sont visibles sinon décollimater légèrement le primaire
5. Ajuster l'orientation du miroir secondaire (ou l'axe du porte-oculaire) pour fusionner les réflexions P+3 de la pastille, ce qui aura pour effet de réduire l'erreur FAE
6. Recollimater le primaire (tourner la vis en sens inverse) afin de fusionner les réflexions 1+2 ce qui aura pour effet de réduire encore l'erreur PAE
7. Réitérer en 1) et 2) dans le but de recentrer la pastille P de collimation ce qui aura pour effet de réduire l'erreur PAE
8. Réitérer en 5) 6) avec l'aide du trou central vérifier que les réflexions : P+3 de la pastille reste fusionnée et qu'il n'y ai pas d'image fantôme de 1 et 2 sinon passer à l'étape suivante
9. Avec l'aide du trou décalé, vérifier que les réflexions sont parfaitement fusionnées 2 à 2 : P+2 et 1+3 sinon ajuster l'orientation du miroir secondaire pour réaliser cette fusion.

En cas d'erreur résiduelle, recommencer tout le processus depuis l'étape 1), les 2 outils Blackcat et Catseye doivent être parfaitement en accord pour affirmer que la collimation est parfaitement réalisée. En réalité, lorsque le télescope ne se décollimate pas facilement (rigidité de la structure, démontage peu fréquent) seule l'étape 8 sera nécessaire ce qui est très rapide.

Voir les 2 méthodes décrites en détail .



Credit : JasonD [552]

Vic Menard [777]

— Aligning P-3 minimizes the focuser axial error (secondary mirror tilt adjustment). The error is magnified 2X.
— Aligning P-Cheshire ring minimizes the primary mirror/optical axial error (primary mirror tilt adjustment). The error is magnified 2X.
— Aligning P-2 makes the two axes parallel. The errors are magnified 4X.
— (A perfect center stack, P-1, indicates the two axes intersect at the radius of curvature.)
— As long as your last correction is P-Cheshire, and assessing (not correcting!) P-2 (or P-3) reveals a "perfect" stack, your axial alignments should be good.

Cette méthode présente l'avantage de ne pas dépendre :

1. Du bon centrage d'un laser dans son propre support [181, 548]
2. De la bonne orientation du secondaire.
3. De grossir 2 fois l'erreur FAE via le premier trou et 4 fois l'erreur FAE via le second trou en raison des aller-retours des réflexions [771].

4. De grossir 4 fois l'erreur PAE via le second trou lorsque FAE = 0 (fusion P+3) [378]

Lorsque les réflexions P+2 et 1+3 sont fusionnées, l'axe du porte-oculaire et l'axe du primaire se coupe au niveau du ROC (2 x focale) et si le cheshire indique que la pastille est centrée alors les 2 axes sont aussi parallèles et donc confondus la collimation est alors parfaite [773].

Les Newtons suite ...

Mersenne désigne un type de télescope composé d'un miroir primaire parabolique, d'un miroir secondaire parabolique convexe à l'entrée, d'un miroir plan intérieur et d'un autre miroir plan extérieur. Le principe de la formule est de capter la lumière tel un Newton classique puis de renvoyer les rayons sur le secondaire convexe afin de re paralléliser les rayons qui ressortiront de l'instrument par le biais des 2 miroirs plans. Il est alors possible d'adjoindre une lunette afin d'observer l'image virtuelle reçue. Le principal avantage de cet instrument peu courant est de pouvoir observer assis via la lunette pointant l'image fournie par un télescope proche du Newton et de plusieurs mètre de focale [712]. Son inconvénient tient à la difficulté d'aligner l'ensemble de ses miroirs. La distance focale effective de l'instrument est plus grande que celle du miroir primaire seul en raison du miroir secondaire convexe réalisant un allongement de la focale. Le miroir secondaire agit alors comme un oculaire = le grossissement du secondaire, contrairement au secondaire d'un Newton qui ne modifie en rien la focale [761].

Schiefspiegler désigne un type de télescope composé d'un miroir primairesphérique et d'un miroir secondaire sphérique convexe à l'entrée. Les miroirs sont décalés l'un par rapport à l'autre, on parle de "Off-Axis Reflecting Telescope". Le principal avantage de cet instrument est qu'il n'est pas obstrué [16]. Une variante de ce design est le "Yolo" où le secondaire est formé pour corriger l'astigmatisme et la coma.

6.5 Les Catadioptriques

Catadioptrique désigne une formule optique de télescope comprenant à la fois un ou plusieurs miroirs et au moins une surface de verre (lame de fermeture ou lentille correctrice).

Cassegrain désigne un type de télescope catadioptrique composé d'un miroir secondaire convexe hyperbolique et d'un miroir primaire concave parabolique. Le Cassegrain présente autant de coma qu'un Newton de même ratio F/D et au minimum de 2 jusqu'à 10x plus d'astigmatisme qu'un Newton de même focale [653].



Credit : Guan Sheng Optical

Les variantes de cette formule [528] :

— Le Cassegrain classique (CFF, Orion CC) : miroirs parabolique + hyperbolique

— Le Schmidt Cassegrain (Celestron) : miroirs sphériques + lame de fermeture fine
— Le Dall-Kirkham (Takahashi Mewlon) : miroirs elliptique + sphérique
— Le Corrected Dall-Kirkham (Planewave) : miroirs elliptique + sphérique + correcteur
— Le Ritchey-Chretien (RCOS) : miroirs hyperboliques
— Le Klevtsov-Cassegrain (Vixen VMC) : miroirs sphériques + correcteur
— Le Maksutov-Cassegrain (Skywatcher Mak) : miroirs sphérique + ménisque épais
— Le Maksutov-Cassegrain-Gregory (Questar) : miroirs sphérique + ménisque épais
— Le Rutten-Maksutov (Alter) : miroir sphérique + asphérique + ménisque épais
— Le Maksutov-Newton : miroir sphérique + plan + ménisque épais

Ces instruments dont le primaire est ouvert entre F/3 et F/4 sont de rapport résultant F/D supérieur à 10 par effet d'amplification du miroir secondaire donc la coma est largement minimisé. Comme tous les instruments à miroir secondaire convexe (SCT, Dall-Kirkham, RC) la courbure de champ augmente avec le coefficient amplificateur du miroir. L'obstruction est très variable de 20% à 40% selon le ratio F/D du primaire. Ce type de télescope sera essentiellement dédié au planétaire. Les modèles les plus populaires de cette formule optique sont : CFF Classic Cassegrain de 350 mm $F/D = 20$ (voir celui de J-P Brahic), VM260L Perl-Vixen (inclut un correcteur devant le secondaire), Orion CC, Stella Lyra Cassegrain. Certains modèles sont dits Newton-Cassegrain car ils permettent d'exploiter soit un foyer Cassegrain avec un miroir hyperbolique ou bien un foyer Newton classique en changeant le miroir hyperbolique par un miroir parabolique, par exemple ceux de chez Skyvision.

Avantages :

— Tube ouvert a contrario des SCT ou des MAK donc l'air circule librement, le miroir primaire refroidi plus rapidement (images rapidement stable)
— Pas de lame correctrice devant a contrario des SCT ou des MAK donc un taux de transmission de 100% et pas de risque de buée
— Le miroir primaire ne bouge pas comme sur les SCT ou les Mewlons (pour faire la mise au point) donc la collimation est plus stable
— Le miroir primaire ne bouge pas comme sur les SCT ou les Mewlons (pour faire la mise au point) il n'est donc pas sujet au "Focus Shift"
— Excellente correction polychromatique des UV jusqu'à l'IR alors que les SCT sont mauvais dans le bleu en raison de la présence de la lame de Schmidt.

Ces instruments possédant de grandes focales sont parfois dotés d'ouverture au porte oculaire (coulant) de 1.25 inch seulement, c'est le cas des Celestrons C6 et C8, donc un réducteurs de focale ne permettra pas d'exploiter tout le champ en visuel ou en photo permis par la réduction (instrument de focale résultante équivalente). Certains Cassegrain peuvent cependant être conçus pour le grand champ tel que le Sharpstar SCA260 ouvert à F/5 et une obstruction de 46% permettant un champ corrigé de 80mm.

Collimation du Cassegrain lorsque l'instrument est un télescope de type Cassegrain avec un miroir secondaire hyperbolique, ce dernier produit un coefficient multiplicateur (x5 en général) à la réflexion des rayons lumineux. Ce qui signifie que lorsque que l'on produit une erreur d'angle, celui est en retour multiplié par 5 après réflexion et l'écart ensuite au plan focal est d'autant plus important. Donc, la collimation d'un Cassegrain est beaucoup plus critique / sensible que sur une lunette ou l'orientation de l'objectif est moins critique.

Schmidt-Cassegrain ou "SCT" ou "SC" désigne un type de télescope catadioptrique composé d'un miroir primaire sphérique, de forme concave, miroir à dos conique et de focale $F/D = 2$, d'un miroir secondaire de forme convexe sphérique et plus rarement convexe hyperbolique et de focale $F/D = 2$ et à l'avant du tube d'une lentille correctrice fine appelée aussi "Lame de Schmidt" ou "Lame de fermeture" ou "Corrector Plate" utilisée pour corriger l'aberration de sphéricité du miroir

primaire. Le miroir secondaire de forme convexe multiplie le f-ratio du primaire par 5. La dimension du primaire est un peu plus grande que la lame de fermeture afin de capturer tout la champ des rayons passant par la pupille d'entrée (la lame de Schmidt). Ce type d'instrument est principalement utilisé en astrophoto planétaire malgré son obstruction importante (+30%). On peut l'utiliser en visuel, mais une monture de type azimutale est recommandée dans ce cas.

Un modèle populaire de cette formule optique est le C8 de Celestron (version "Edge" ici).

Schmidt-Cassegrain



Credit : Celestron

Séries des Celestrons

SCT	Diamètre	Focale	Porte Oculaire	Obstruction = o	o / Surface = o^2	Poids	Dawes
Nexstar 5SE F/10	125 mm	1250 mm	1.25	40%	16%	2.7kg	0.93 arcmin
C6 XLT F/10	150 mm	1500 mm	1.25	37%	14%	4.54kg	0.77 arcmin
C8 Edge F/10	203 mm	2032 mm	1.25	31%	10%	6.35kg	0.57 arcmin
C9.25 Edge F/10	235 mm	2350 mm	1.25	36%	13%	9.53kg	0.49 arcmin
C11 Edge F/10	280 mm	2800 mm	1.25	34%	12%	13kg	0.42 arcmin
C14 Edge F/11	356 mm	3910 mm	2	32%	10%	31kg	0.33 arcmin

Il faut noter aussi que la lame de Schmidt fait très légèrement diverger les rayons la traversant. Le diamètre annoncé par le fabricant est toujours celui de la lame et non celui du miroir primaire qui est donc un peu plus grand. Cette formule optique présente une courbure de champ importante, mais aussi du sphérochromatisme notamment dans le bleu appelé "Blue Bloat" engendré par la lame de fermeture, ce qui est un problème en imagerie planétaire couleur. Donc, le SCT n'est clairement pas performant dans le bleu. En astrophoto du ciel profond, il faudra utiliser un correcteur de champ contrairement au télescope catadioptrique MAK.

La coma est presque aussi importante que chez les Newton court [106]. Un SCT à F/10 présente autant de coma angulaire (visuellement sur le ciel) qu'un Newton à F/4.7 ou encore 5 fois plus de coma linaire (sur l'image astrophoto) qu'un Newton à F/10 [696] mais celle-ci peut être complètement corrigée sur les modèles dédiés à la photo : ACF chez Meade ou EdgeHD chez Celestron. Les ACF corrigent la coma en utilisant un secondaire hyperbolique et les EdgeHD corrigent la coma et la courbure de champ grâce à l'ajout d'un correcteur de champ interne inséré dans le train optique (EHD corrector lense). Les ACF peuvent aussi montrer un champ plat (sans courbure de champ) grâce à l'ajout d'un correcteur de champ dédié dans le train optique. Ce type de télescope de longue focale résultante $F/D = 10$ et d'obstruction modérée CO = 35% est surtout destiné à la photo. La mise au point se fait en avançant ou reculant le miroir primaire, provoquant à la fois un déplacement du point focal, mais aussi un allongement ou un rétrécissement de la focale.

Il existe une distance entre le primaire et le secondaire, soit une position de mise au point précise où l'aberration de sphéricité est complètement corrigée par la lame de fermeture. Cette distance optimale entre les 2 miroirs détermine le "Backfocus" = distance entre le porte-oculaire et point focal sortant [94], celui-ci est réglé pour permettre l'usage d'un renvoi coudé en 1.25". Afin de mieux exploiter cette position, on fixera cette distance en bloquant le mouvement du primaire et en utilisant un porte-oculaire classique (à molette) pour assurer la mise au point visuelle ou photographique.

Calcul de l'éloignement du foyer lorsqu'on agrandit la distance entre le primaire et le secondaire : $\Delta F = \Delta e \times (N/N_p)^2$ où Δe l'accroissement de distance entre les miroirs, N le rapport F/D global de l'instrument, N_p le rapport F/D du primaire (en général 2) [725].

Avantage du porte-oculaire classique :

- La MAP est facilitée, car la tolérance de mise au point passe de celle d'un instrument à F/2 (miroir primaire) à celle d'un instrument à F/10 (couple miroir primaire / miroir secondaire)
- La distance entre les miroirs est figé à la position optimale, on ne modifie pas les performances de l'instrument ni son F/D en faisant la MAP
- Élimine complètement le phénomène de "Focus Shift"
- L'ajout d'une barlow dans le train optique facilite également la MAP, la tolérance de mise au point passe de celle d'un instrument à F/10 x Facteur multiplicateur de la barlow.

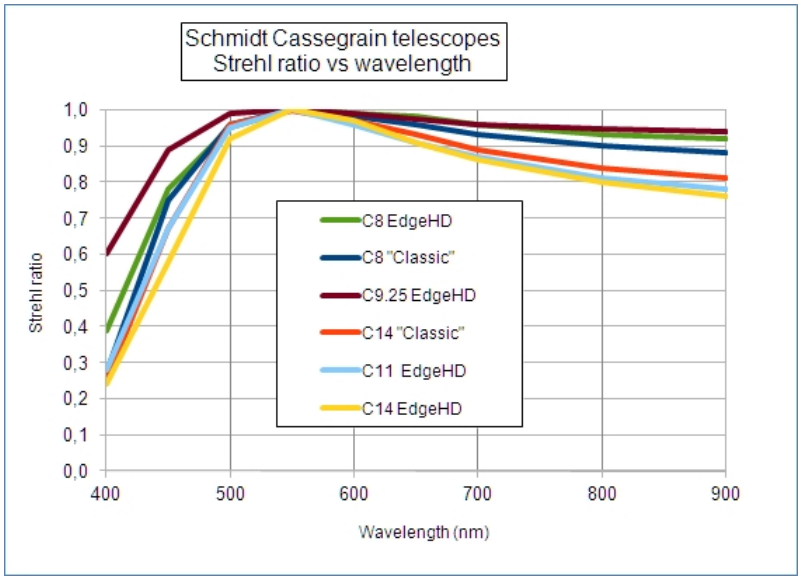
Certains SCT sont sujets à des défauts décalage de l'image :

- "Mirror Flop" : décalage de l'objet visé en photographie
- "Focus Shift" : décalage de l'objet visé lors de la mise au point

Ce type d'instrument est très sensible aux erreurs de collimation [722].

Certains modèles chez Celestron sont plus performants dans le rouge pour une utilisation en solaire $H\alpha$.

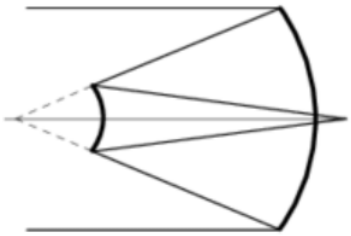
Courbes Polystrehl des SCT Celestron



Credit : Christian Viladrich

La distance focale effective de l'instrument est plus grande que celle du miroir primaire et représente plus de 2 fois la

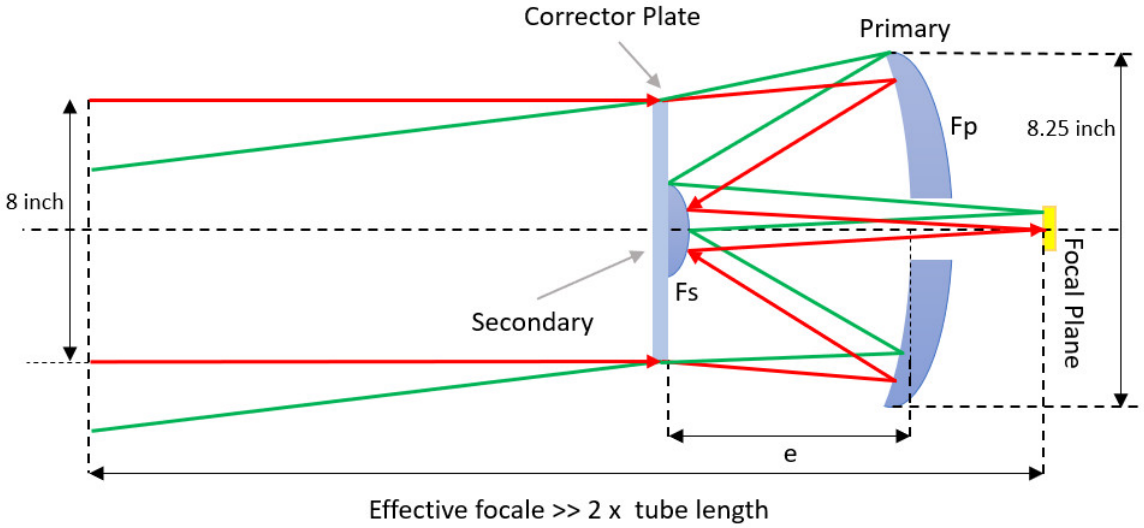
dimension du tube en raison du miroir secondaire convexe réalisant un allongement de la focale.



Credit : J.G. Gricourt

Le miroir secondaire agit alors comme un oculaire = le grossissement du secondaire, contrairement au secondaire d'un Newton qui ne modifie en rien la focale.

Focale du Schmidt-Cassegrain

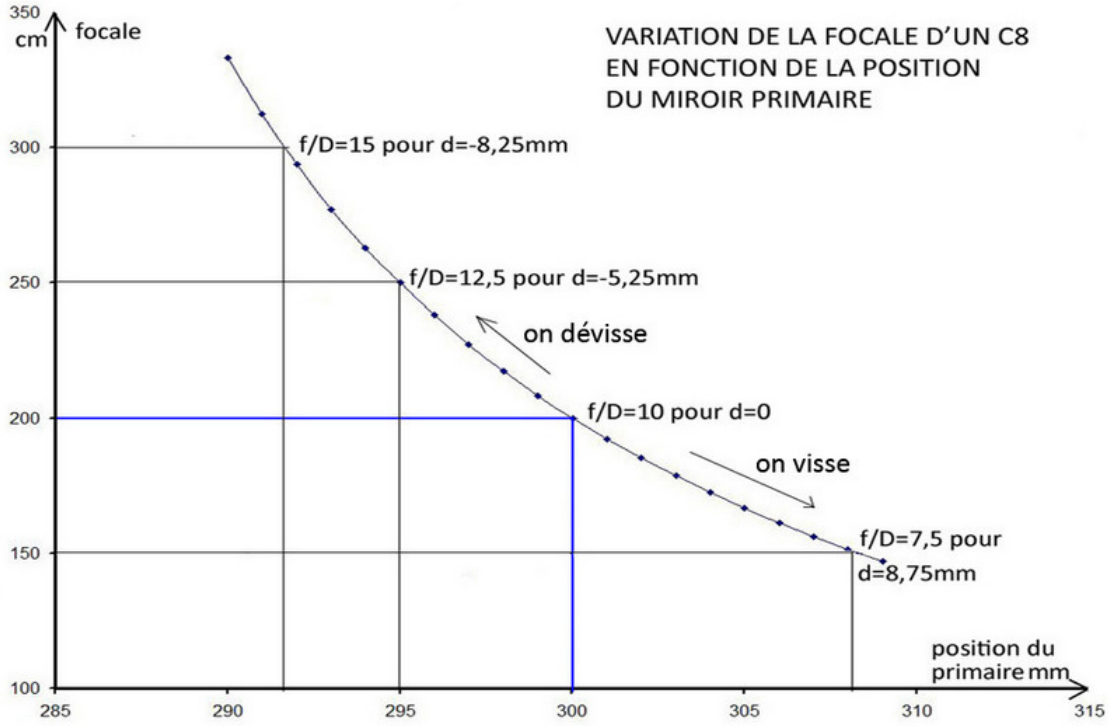


Credit : J.G. Gricourt

Les SCT contrairement aux Newton ont beaucoup de backfocus et permettent d'utiliser directement une caméra ou un binoculaire (sans glasspath ni barlow)

Sans porte-oculaire classique à molette, la mise au point des SCT se fait par allongement ou raccourcissement de la focale et non par le déplacement de l'oculaire le long de l'axe optique pour trouver le foyer. La distance focale du SCT (et donc son F/D) peut donc varier énormément en fonction de la distance entre le miroir primaire et le miroir secondaire du fait des réglages de mise au point. La focale F de l'instrument se calcule par la formule : $1/F = 1/F_p + 1/F_s - e/F_p \times F_s$ où F_p la focale du primaire, F_s la focale du secondaire et e la distance entre le secondaire et le primaire [648]. Le rapport F/D varie de F/7.5 à F/15 au maximum sur un C8 [648] selon la mise au point.

Focale C8 en fonction de $d = \Delta e$



Credit : Michel Vampouille

Raccourcir la distance primaire / secondaire e afin de faire ressortir le foyer est une mauvaise idée [728] :

- Si l'éloignement devient trop important par rapport à la position nominale F/10 sur un C8 alors l'aberration de sphéricité du primaire est moins bien corrigée par la lame de fermeture
- Le faisceau lumineux risque d'être partiellement coupé par le tube baffle central réduisant le diamètre effectif du primaire
- L'obstruction effective augmente mécaniquement

Sur les Celestron Edge en utilisation photo il faut respecter le "Backfocus" recommandé par le fabricant (BF = nominal "Backfocus") afin que l'instrument reste "Diffraction limited" [361] ceci est dû à la présence du correcteur de champ interne.

Equivalence de performances planétaires d'un SCT vs une lunette APO [261] :

SCT	Lunette
C8 Edge	5" APO
C11 Edge	6" APO
C14 Edge	7" APO

Les SCTs sont des instruments de grande focale et pour avoir un champ large sur le ciel pour un oculaire donné on peut être tenté de lui adjoindre un renvoi coudé en 2 pouce ou un correcteur réducteur de focale. Cependant le vignetting produit naturellement par l'ouverture de 1.25" de l'instrument ne disparait pas dans les deux cas et le vignetting sera encore plus visible. De plus l'éloignement de l'oculaire du tube lorsque celui ci est placé derrière un renvoi coudé en 2" fait que pour obtenir la MAP il faut augmenter la distance e entre les miroirs ce qui produit un allongement de la focale réelle de l'instrument et donc pour un même oculaire le champ réel se réduit encore.

C8 signifie “Celestron C8” désigne un modèle Schmidt-Cassegrain du fabricant Celestron. Ce modèle possède un miroir de 8" de diamètre et de rapport $F/D = 10$. Les SC de cette gamme se déclinent en plusieurs modèles par diamètre croissants : C6, C8, C9.25, C11, C14. Les versions “EdgeHD” comportent un correcteur interne rendant le champ parfaitement plat pour la photo. Attention la collimation est encore plus critique avec les “EdgeHD”.

Focus Shift ou “Image Shift” désigne le mouvement de décalage des miroirs de certains SCT et MAK lors de la mise au point provoquant le décalage du point visé. Pour pallier ce problème, il faut ajouter un porte-oculaire afin de ne plus toucher la mise au point par la molette prévue initialement.

Mirror Flop désigne le mouvement inopiné des miroirs des SCT et de certains MAK au cours du passage au méridien en raison du changement d'orientation du tube au cours d'une longue pose photographique provoquant le décalage du point visé. Pour pallier ce problème, certains SCT permettent de verrouiller le miroir dans sa position (lock).

Maksutov-Cassegrain ou “MAK” ou “Maksutov-Cassegrain Telescope” ou “MCT” désigne un type de télescope catadioptrique composé d'un miroir primaire sphérique de focale très courte : F/3, d'un ménisque frontal convexe sphérique [4], d'un miroir secondaire convexe sphérique. Le ménisque est chargé de corriger l'aberration de sphéricité du miroir primaire. Il ne présente pas de sphérochromatisme contrairement au SCT qui en a beaucoup dans le bleu et il ne peut pas être décollimaté, car le secondaire et les primaires sont fixes. Cette formule présente une courbure de champ très faible, mais aussi un champ limité / bridé par son tube interne, par conséquent, on ne peut pas exploiter la totalité du champ permit par un coulant de 2". Ce type de télescope de très longue focale $F/D = 15$ et d'obstruction modérée CO = 30% est destiné à l'observation planétaire.



Credit : Skywatcher Mak 180

Attention, souvent l'obstruction annoncée correspond à celle du secondaire, c'est-à-dire à la pastille collée sur le ménisque, or, il faut compter aussi

— Le petit baffle à l'avant entourant le secondaire
— Le long baffle à l'arrière partant de l'ouverture centrale du primaire

Sur les MAK SW 180 ou MAK Orion 180 on tombe plus sur 34% d'obstruction par exemple.

Maksutov-Cassegrain-Gregory ou “Gregory-Maksutov” ou “Spot-Maksutov” désigne une variante de la formule optique “Maksutov-Cassegrain” de rapport $F/D < 15$. Le secondaire est matérialisé par un miroir Mangin, une pastille aluminée directement sur l'arrière du ménisque, ce qui rend la collimation du miroir secondaire indéréglable. Le primaire et le secondaire sont sphériques dont les courbures en opposition annule l'aberration de sphéricité. La correction hors axe est moins bonne que le Rumak [449] meilleurs qu'un SCT. Un modèle populaire de cette formule optique est le Questar ou le Meade ETX. Maintenant, Skywatcher ou Orion proposent des modèles bon marché jusqu'à 180 mm.

4. Ménisque = lentille sphérique épaisse

Rutten-Maksutov ou “Rutten-Maksutov” ou “RUMAK” désigne une variante de la formule optique “Maksutov-Cassegrain” de rapport $F/D < 15$ où le miroir secondaire est un miroir indépendant placé juste derrière le ménisque. Le secondaire est asphérique et le primaire sphérique, la correction hors axe est meilleure que le Gregory [449] mais l’obstruction est plus importante. Un modèle populaire de cette formule optique est le ALTER M603 ou le MK66 de Intes Micro (modèles Russes anciens).

Klevtsov-Cassegrain désigne un type de télescope catadioptrique composé d’un miroir primaire sphérique de focale très courte et d’un miroir de “Mangin” soutenu par une araignée comme sur le Newton. Le miroir de “Mangin” est constitué d’un miroir secondaire convexe sphérique couplé à 2 lentilles correctrices. La lame correctrice des SCT est remplacée par les 2 lentilles correctrices. Un modèle populaire de cette formule optique est le Vixen VMC 260L ou le TAL-250K.

Maksutov-Newton ou “MNT” désigne une type de télescope catadioptrique très proche de la formule optique du Newton composé d’un miroir primaire sphérique et d’un miroir secondaire plan dont le support est collé à l’arrière du ménisque. Le ménisque est chargé de corriger l’aberration de sphéricité du miroir primaire. Le MN présente 30% moins de coma que le Newton et ne produit pas de croix de diffraction.

Dall-Kirkham ou “Dall-Kirkham Cassegrain” ou “DK” désigne des types de télescope composés d’un miroir primaire elliptique concave et d’un miroir secondaire sphérique convexe. Cette formule optique présente quelques inconvénients :

1. Le Dall-Kirkham présente énormément de coma par rapport à un Cassegrain ou un Newton de même ratio F/D et celle ci augmente considérablement à F/D=20
2. La collimation du Mewlon 210 de Takahashi est très instable, ces instruments ne supportent pas le transport [391]
3. Le Dall-Kirkham est sensible au décentrement des miroirs, générant beaucoup de coma dans le champ
4. L’araignée nécessaire au support du secondaire renforce l’obstruction

Ce type de télescope de longue focale $F/D = 10$ et d’obstruction modérée CO = 30% est destiné à la photo planétaire. Un modèle populaire de cette formule optique est le Mewlon 210 de Takahashi.



Credit : Takahashi - Mewlon 210

Corrected Dall-Kirkham ou “CDK” désigne un télescope de de type catadioptriques composé d’un miroir primaire elliptique et d’un miroir secondaire convexe sphérique. Mais, ici, c’est une variante de la formule optique Dall-Kirkham dans laquelle un correcteur de coma, d’astigmatisme et de courbure de champ a été ajouté devant le secondaire. Le correcteur permet d’augmenter considérablement la surface corrigée ainsi que de réduire le rapport F/D global en dessous de 7 et fait du CDK un instrument dédié à l’astrophoto du ciel profond. L’obstruction est en général importante de l’ordre de 45%. Un modèle populaire de cette formule optique est le CDK de PlaneWave.



Credit : PlaneWave Instruments

Ritchey-Chrétien ou "RC" désigne un type de télescope composé d'un miroir primaire hyperbolique concave et d'un miroir secondaire hyperboliques convexe. Ce type de télescope est aplanétique, car il est conçu pour être exempt de coma et d'aberration de sphéricité. Cependant, il souffre d'astigmatisme et s'il est doté d'une lame de fermeture ou d'un correcteur il peut alors être corrigé aussi pour l'astigmatisme, il est alors anastigmate. Le RC présente aussi une courbure de champ très importante. Ce type de télescope de rapport $F/D \geq 6$ et d'obstruction importante CO $> 40\%$ est destiné la photo du ciel profond. Les plus grands télescopes du monde sont des RC (ex : VLT, Hubble, Keck). Les modèles populaires de cette formule optique sont le RCOS de DeepSky Instruments ou le PW de PlaneWave Instruments.

6.6 Les autres Instruments

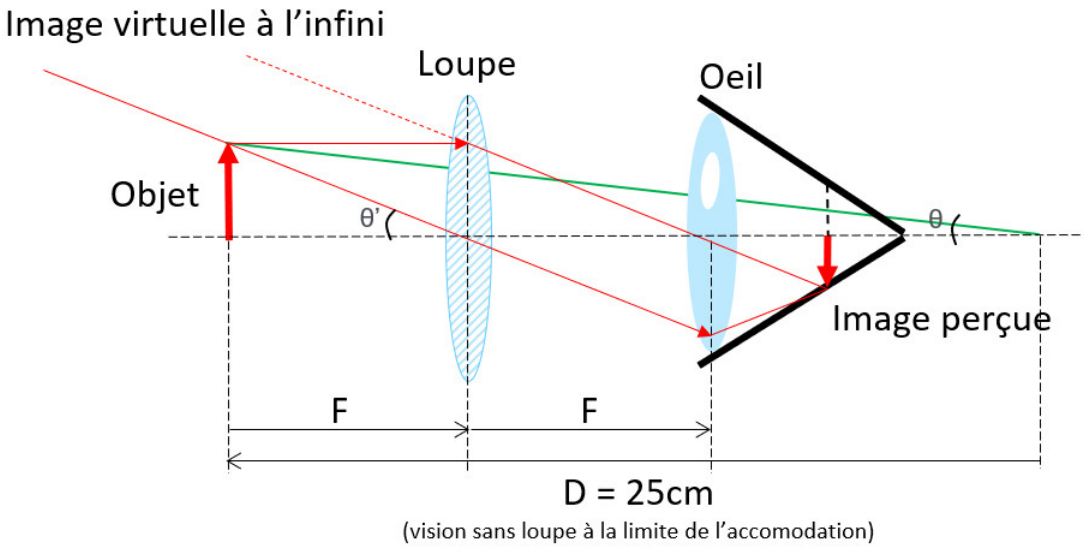
Loupe désigne un dispositif optique permettant de grossir les objets situés à courte distance de l'observateur. Dans sa forme la plus simple, la loupe ne comporte qu'une seule lentille mince convexe. L'objet doit obligatoirement se situer entre le foyer et la lentille pour que l'oeil puisse former une image agrandie (en angle) sur la rétine à partir de l'image virtuelle produite par la loupe. Si l'objet est au foyer de la loupe, alors l'observation se fera sans aucune accommodation, comme lorsque l'on observe un objet situé à l'infini à l'oeil nu ou au travers d'un télescope ...

Si l'objet est situé entre le foyer et la lentille, l'observation se fera nécessairement avec accommodation d'autant plus forte que l'objet sera proche de la lentille, et cela, jusqu'à une limite physiologique. On ne peut donc pas voir l'objet aussi grand que l'on voudrait en approchant l'oeil nu au plus près de la lentille. Donc en approchant l'objet de la lentille, son image s'agrandit, mais l'oeil doit aussi reculer pour le voir, donc le grossissement ne change pas.

Si l'on suppose que l'objet est placé au foyer de la loupe, la vision est nette quelle que soit la position de l'oeil sur l'axe optique, le grossissement ne change pas, cependant le champ de vision est plus grand lorsqu'on s'approche de la loupe.

Le grossissement dit "commercial" gravé sur la loupe et celui qui correspond au rapport de l'angle θ' de l'objet observé avec la loupe et de l'angle θ de l'objet observé à l'oeil nu à une distance de 25cm : $G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{1}{4 \times f}$ où la focale f de la loupe est exprimé en mètre. La distance arbitraire de 25cm correspond à la distance usuelle de lecture, ici il s'agit de la distance minimal de netteté lorsque l'accommodation est maximale "Punctum Proximum" [142] vers 46 ans. En dessous de cet âge, le "Punctum Proximum" est inférieur à 25cm.

La loupe



Credit : J.G. Gricourt

Types de loupes [501] :

- Singlet : 10x
- Coddington : 20x, corrige l'aberration de sphéricité
- Doublet : 20x, corrige l'aberration de sphéricité et le chromatisme
- Hasting Triplet : 20x, la loupe des diamantaires, corrige parfaitement l'aberration de sphéricité et le chromatisme

Microscope désigne un dispositif optique permettant de grossir les objets situés à courte distance de l'observateur. Le microscope est constitué d'un objectif et d'un oculaire. Le microscope offre la même fonction que la loupe, mais à l'avantage de pouvoir faire varier le grossissement en changeant d'oculaire et en ce sens, il fonctionne de manière très similaire à la lunette astronomique. L'objet à observer doit être placé dans la zone [F, 2F] sur l'axe de l'objectif (F = focale objectif) afin qu'une image plus grande soit produite, et ce, d'autant que l'objet s'approche du foyer. L'oculaire lors de la mise au point est positionné pour faire coïncider son foyer avec celui de l'objectif dans le but de former une image à l'infinie afin que l'oeil n'ait pas besoin d'accommoder. La puissance du microscope est définie comme : $G = \gamma_{obj} \times G_{oc}$ est γ_{obj} est le grandissement de l'image par l'objectif (rapport de dimension de l'image sur l'objet) et G_{oc} est le grossissement commercial de l'oculaire (voir la loupe). Enfin, tout comme pour la lunette astronomique, la pupille de sortie est l'endroit où placer l'oeil afin de percevoir tout le champ disponible.

6.7 Les instruments du Solaire

Les instruments dédiés à l'observation ou à la photo de la surface du soleil peuvent être de différente nature mais ils ont tous en commun devoir réduire la flux solaire dangereux à la fois pour les yeux et les capteurs photo :

- Lunette Solaire ou un télescope doté d'une feuille Astrosolar
- Lunette Solaire dotée d'un prisme de Herschel
- Lunette solaire ou un télescope doté d'un filtre ERF + filtre étalon + Blocking filter $H\alpha$
- Un télescope dont le miroir a été dés-aluminé
- Un télescope dont le miroir a été traité avec un traitement dichroïque

Un instrument solaire est le plus souvent un instrument sur lequel on a rajouté les filtres nécessaires permettant l'observation visuelle ou la photo. La chaîne de filtres comporte un premier filtrage permettant de réduire considérablement l'intensité lumineuse captée en entrée de l'instrument : filtre papier Astrosolar, filtre D-ERF ou prisme de Herschel pour rendre l'observation ou l'astrophoto sans danger. Un filtre Etalon permet de couper l'observation ou l'astrophoto en bande étroite $H\alpha$. Enfin pour renforcer le contraste des différentes structures de la surface solaire, on adjoint d'autres filtres comme un Blocking filter dans le cas d'observation en $H\alpha$ ou un filtre polarisant dans le cas d'observation en lumière blanche avec un prisme de Herschel. Le filtre polarisant n'a pas besoin d'être double (2 filtres polarisants) car le prisme de Herschel polarise déjà la lumière donc l'atténuation d'un seul filtre sera déjà efficace. Le filtre Continuum est aussi utilisé en lumière blanche pour renforcer les contrastes.

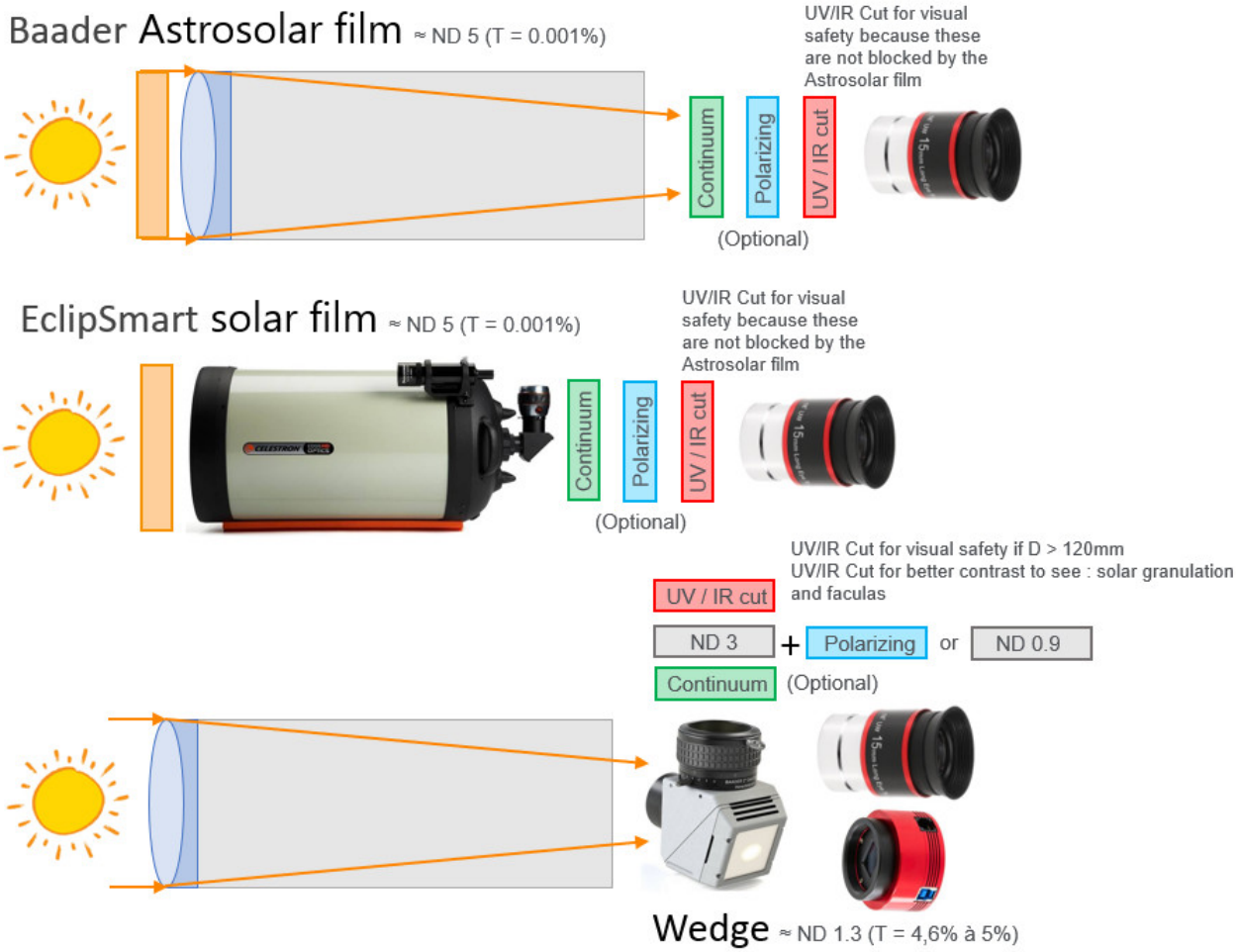
Voir aussi les sections affiliées de ce document pour plus de détails sur les montages [390].

Il est un point important à prendre en compte pour parvenir à atteindre la haute définition en dehors du seeing qui est toujours le facteur dominant dans la perte de résolution des images solaires, il faut s'assurer que la lunette ou le télescope conserve un Strehl élevé dans la longueur d'onde observée. Par exemple en $H\alpha$ il faut que le Strehl soit au moins de 95% aux alentours des 656 nm, or la vaste majorité des lunettes du marché sont d'abord optimisées dans le vert et le jaune en visuel, cependant beaucoup de lunettes chinoises simplement achromatiques et peu chères peuvent exceller en solaire $H\alpha$ ou en lumière blanche avec un filtre Continuum [464].

Des lunettes d'exception comme la Takahashi FC-100DZ ou l'AP 92 mm f/6.65 Stowaway peuvent exceller en solaire lumière blanche (Astrosolar ou prisme de Herschel) en raison d'un Sphérochromatisme exceptionnel sur toute la plage d'observation. À noter qu'un Strehl élevé sur une plage de longueur d'onde signifie que le Sphérochromatisme est minimal et donc la résolution sera optimale pour des longueurs d'onde filtrée dans cette plage précisément.

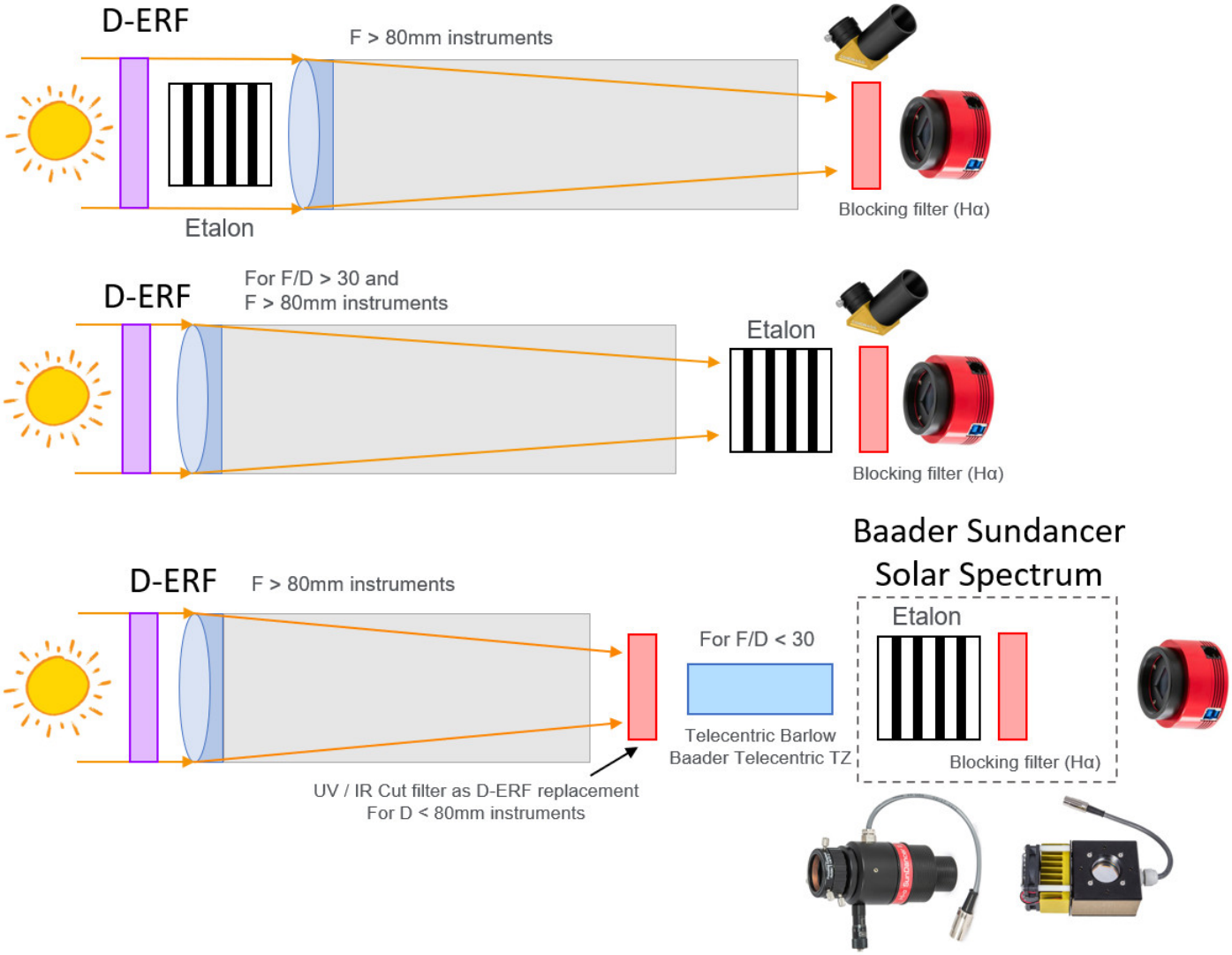
Les lunettes simplement achromatiques sont des instruments de choix en raison de leur prix dérisoire au regard des performances exceptionnelles que celles ci peuvent offrir en lumière mono-chromatisue, c'est le cas du $H\alpha$ ou au travers d'un filtre Continuum.

Des instruments entièrement dédiés au solaire $H\alpha$ sont optimisés pour pousser la filtration dans un bande encore plus étroite et offre des images très contrastées, exemple de marque réputée : Lunt



Credit : J.G. Gricourt

Montages pour le $H\alpha$ à base d'Etalon



Credit : J.G. Gricourt

Attention, en l'absence de filtres adaptés, l'énergie lumineuse concentrée par l'instrument est maximale au foyer et donc tout objet en contact avec le foyer risque d'être détruit. En revanche l'intensité lumineuse décroit au carré de la distance en s'éloignant du foyer de part et d'autre.

Attention avec l'utilisation d'un prisme de Herschel, il n'y a plus de filtre en entrée il faut prendre beaucoup plus de précautions, car il peut y avoir des risques pour la lunette :

- Risque d'éclatement de la lentille frontale si celle ci est trop serrée dans son barillet [577]
- Le taux d'expansion des verres spéciaux : FPL-51, FPL-52, FPL-53, Fluorite est plus important que pour le verre classique (Float Glass)
- Echauffement de l'air à l'intérieur de la lunette chauffe à proximité du foyer et peur endommager des parties plastiques
- Echauffement du métal du barillet car il est un bon conducteur de chaleur
- Echauffement des lentilles des correcteur internes des lunettes astrographes (quadruplet et plus) en raison de leur proximité au foyer
- Echauffement des lentilles internes des lunettes de type Petzval
- Destruction aux UV/IR du cément (colle spéciale) des doublets collés "Cemented"

— Destruction aux UV/IR de l'huile des doublets à film d'huile

Les lunettes achromatiques classiques de type Fraunhofer sont mieux adaptés à l'observation / photo $H\alpha$ car celles-ci sont souvent mieux corrigées à 656 nm que les lunettes ED ou APO corrigées pour du visuel ou de l'astrophoto.

On trouve également des instrument spécifiquement dédiés au solaire :

SCT Baader Tri-band Baader Triband-SCT et le Airylab SCT Hat [469]. Ces SCT spéciaux possèdent une lame traitée ERF pour le solaire et permettent aussi bien l'observation $H\alpha$ que white light par l'intermédiaire d'un prisme de Herschel. La fonction solaire Triband D-ERF peut être rajoutée sur un SCT classique par le biais d'un filtre d'ouverture avec la solution Altair Triband. En revanche ces télescope étant des Schmidt-Cassegrain ceux ci sont notoirement moins bon dans le bleui et notamment la bande UV donc l'observation en CaK ne sera pas adaptée.

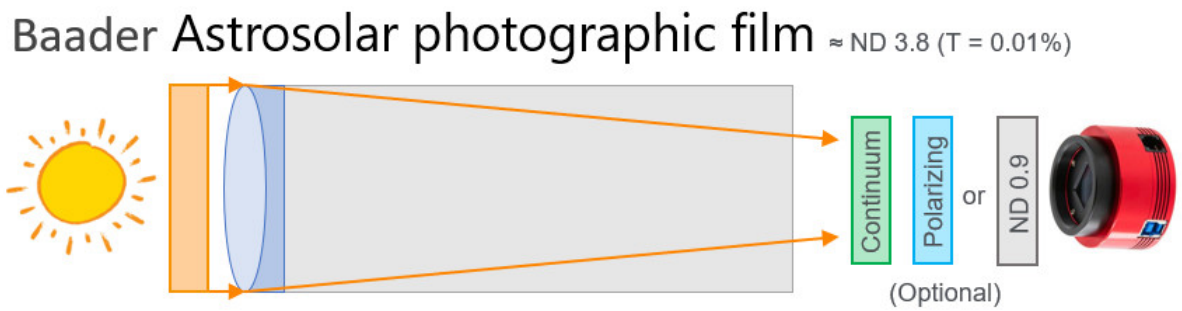
Miroir à traitement dichroïque Le SoleEye [451] est un Newton de 200mm dont le miroir totalement transparent a été traité avec un traitement dichroïque afin de laisser passer la quasi totalité du flux solaire à l'arrière et de ne réflechir qu'une bande large autour de 656 nm pour ensuite imager le soleil en $H\alpha$. Le principe est similaire au miroir désaluminé mais le traitement dichroïque permet de maitriser le la longueur d'onde du flux solaire effectivement réflechi [116].

Les renvois coudés diélectriques sont adaptés pour l'observation solaire en lumière blanche (avec une feuille Astrosolar devant l'objectif !). En effet, ils ont une transmission dans la plage sécurisée de [400 nm, 700 nm], ils agissent donc comme un filtre UV/IR Cut. En revanche les renvois coudés dotés d'une couche d'argent comme les BBHS = "Broad Band Hard Silver" de Baader [797] ont une transmission beaucoup plus large : [390 nm, 2000 nm] ils doivent être utilisés conjointement avec un filtre UV/IR Cut [40].

La lumière blanche en astrophoto Les montages $H\alpha$ sont traditionnellement plus utilisé en astrophoto mais ils sont aussi adaptés en visuel en particulier le modèle de lunette Lunt en double filtration = "Double Stack". Les montages en lumière blanche sont à la fois adaptés à l'astrophoto et au visuel et dans ce dernier cas il faudra que le filtre total en sortie corresponde à une force de filtration entre ND4.3 et ND5 après addition de tous les filtres.

Le montage photo pour la lunette [111] :

Lumière blanche



Credit : J.G. Gricourt

En visuel ou en astrophoto solaire on fera usage de filtres selon les parties du soleil que l'on voudra révéler = rendre plus contrasté :

Filtres Solaires

Objet	Filtre	Onde λ	HBW
Soleil : Photoshère de 0 - 500km			
Taches solaires, facules,	Continuum	540 nm	8 nm
Granulation, flares			
Granulation, filigrees	Méthane CH4 G	430 nm	8 nm
Soleil : Chromosphère de 500 à 2000km			
Protubérances, filaments,	Hydrogène $H\alpha$	656 nm	0.1 nm
Spicules, flares, CME			
Taches solaires, protubérances, flares	Sodium D	590 nm	-
Plages faculaires, protubérances basses	Calcium CaH	396 nm	-
Plages faculaires, protubérances basses	Calcium CaK	394 nm	10 nm

Credit : J.G. Gricourt

Prisme de Herschel ou “Herschel Wedge” ou “Hélioscope de Herschel” désigne un type de renvoi coudé utilisé pour l’observation solaire à l’aide d’une lunette sans aucun filtre solaire large bande devant l’objectif. On observe alors le soleil en lumière blanche (White Light). Les préconisations de sécurité placent la barre de transmission à $\mathbf{T = 0.001\%}$ le MAXIMUM équivalent à un filtre ND4.3 à ne pas franchir pour éviter les dégâts ! [461]. A savoir un prisme de Herschel n’est véritablement intéressant qu’à partir de 100mm pour commencer à exploiter la résolution de ce diamètre, en dessous on préférera la feuille Astrosolar.

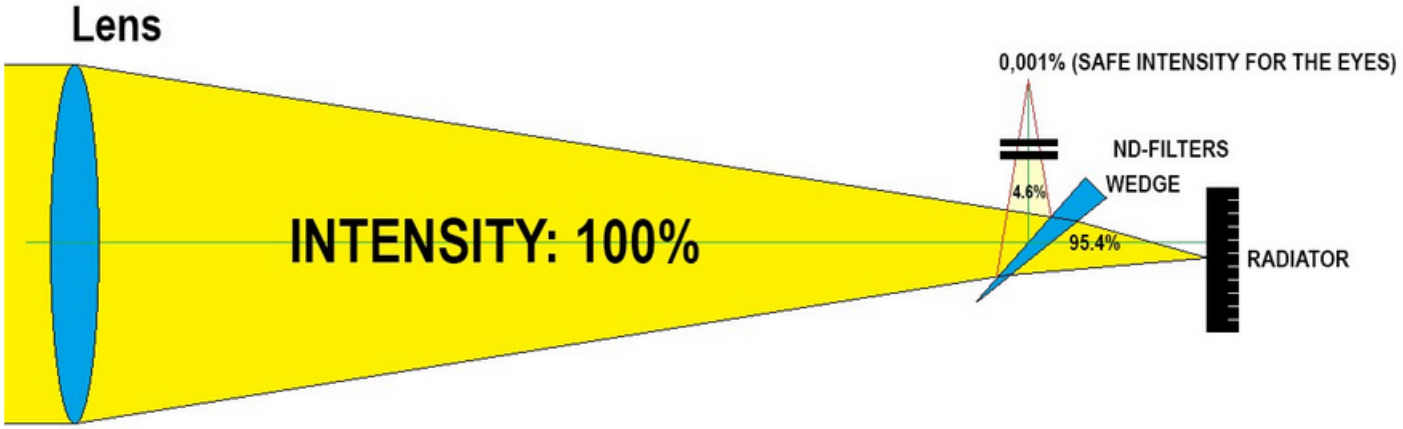


Credit : Baader 2" Cool-Ceramic Safety Herschel Prism Mark II

Son usage est soumis à conditions :

1. Le diamètre de la lunette ne doit pas dépasser 120 mm pour un prisme de Herschel de 1.25" et 200mm pour un prisme de Herschel de 2"
2. Les lentilles de l’objectif doivent être séparées par des lames d’air = “Air Spaced” donc pas de film d’huile ni de cément entre les lentilles
3. Il ne doit pas y avoir de lentilles correctrices à l’intérieur du tube comme dans les lunettes Petzval
4. La lunette ne doit pas intégrer de correcteurs (aplanisseur, lentille de Petzval)
5. Le porte-oculaire ne doit pas comporter de pièces en plastiques

Chemin de la lumière au travers d'un prisme de Herschel

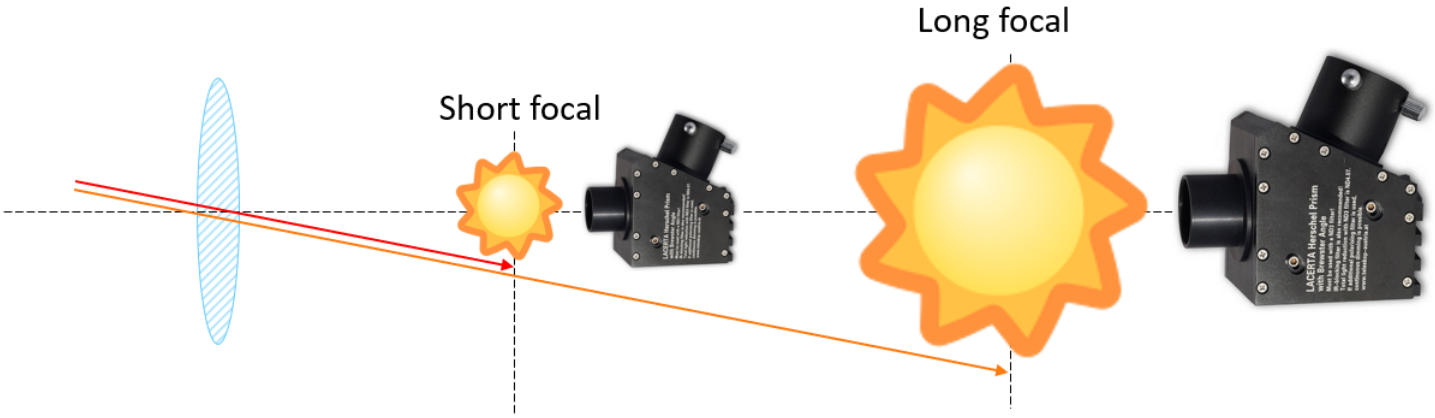


Credit : Star Hunter

Critères de choix entre les versions 1.25" ou 2" :

- Pour $D > 120mm$ on prendra la version 2" car celle ci possède une surface de dissipation de chaleur 2.5 fois plus étendue.
- Pour un usage intensif avec un instrument pointé plusieurs heures sur le soleil la version 2" sera alors peut être préférable [465]
- Le cône image du soleil intercepté sur la surface du prisme sera plus large si la focale de l'instrument est longue et donc la version 2" possédant une surface de prisme plus large sera plus adaptée pour ne pas réduire artificiellement le diamètre de l'instrument [466]
- La version 2" permet de laisser plus de marge en cas de léger dépointage (erreur de suivi)
- Le field stop de l'oculaire doit vérifier : fstop < taille du prisme pour ne pas vigneter le champ, rappel : fsmax = 29 mm pour un oculaire en 1.25", fsmax = 46 mm pour un oculaire en 2" est de 46 mm
- Selon l'utilisation de filtres multiples, ex : Continuum, UV/IR Cut, Polarizing, ND il faudra plus de place dans le porte oculaire et donc un prisme de 2" sera souvent plus adapté
- Les prismes en 2" allongent le chemin de la lumière= "Light Path" et requièrent donc plus de backfocus, beaucoup de lunettes courtes n'auront pas de backfocus suffisant pour utiliser ces prismes en 2".
- Certaines lunette dotées d'un backfocus trop court pourraient ne pas pouvoir faire la mise au point avec un prisme de 2" qui demande plus de inward focus travel
- Un capteur photo plus large nécessitera la version 2" pour ne pas vigneter le champ
- Sachant que la version 1.25" possède un trajet de la lumière plus court permettra d'observer avec la totalité des lunette du marché quelque soient le backfocus
- Certains oculaires en 1.25" risquent de ne pas pouvoir atteindre le focus avec un prisme en version 2" [37]
- L'utilisation d'oculaire en 1.25" sont largement suffisant pour l'observation du disque solaire qui est très petit = 0.5° au regard du champ donc la vision du disque complet aux plus fort grossissements seront possible avec des oculaires en 1.25".

Importance de la focale de l'instrument dans le choix du prisme de Herschel



Credit : J.G. Gricourt

Afin d'observer le disque solaire en entier sur tout le champ il faut déterminer l'oculaire permettant d'approcher la dimension angulaire du soleil = 0.5°, sachant que l'ouverture maximum pour les oculaire en 1.25" est de 27 mm (oculaire TV Panoptic 24mm) alors la focale maximum vaut : $F_{\max} = 57.3 \times \frac{\text{fstop}}{\text{TFOV}} = 57.3 \times \frac{27}{0.5} = 3094mm$. Attention une focale trop longue pourra nécessiter la version 2" comme vu plus haut.

Exemple avec une lunette FC-100DZ, F = 800mm et un oculaire Nagler 5mm 82° de champ apparent, le disque solaire occupera les 82° de champ du Nagler : TFOV = $\frac{\text{AFOV} \times f}{F} = \frac{82 \times 5}{800} = 0.51°$

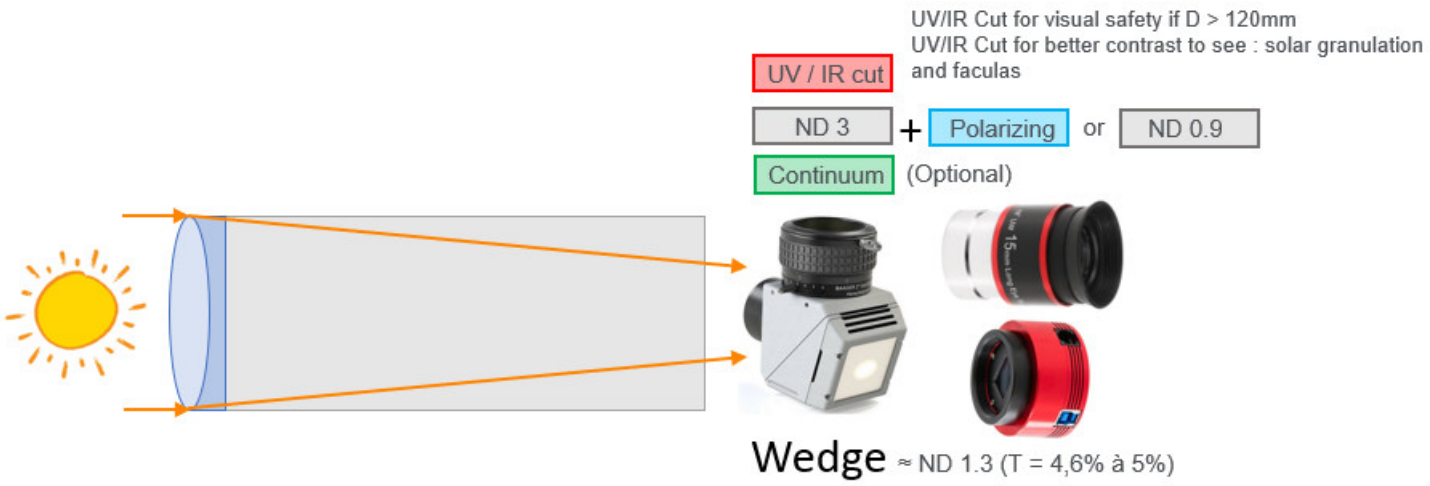
Le prisme de Herschel n'est pas utilisable sur des télescopes à miroirs, car la chaleur intense arrivant sur le miroir secondaire pourrait le détruire. Le prisme de Herschel permet de détourner la majeure partie de la lumière du soleil pour ne renvoyer qu'une petite partie vers l'oculaire, environ 4.6% (pour la version de Baader) mais qui est encore trop importante pour ne pas endommager l'oeil. Il doit donc être utilisé conjointement un filtre ND3 en photo et visuel ou ND4 en visuel pour plus de confort (ND = neutral density) afin de réduire encore l'intensité du flux lumineux renvoyé par le prisme avant de ressortir de l'oculaire.

Il est donc possible de l'utiliser avec le ND3 en visuel en rajoutant un filtre ND0.9 ou bien un filtre polarisant simple dit aussi "linéaire" (et non circulaire = double filtre polarisant) supplémentaire [68]. Le filtre polarisant atténuant encore plus la luminosité de la lumière déjà partiellement polarisée sortant du prisme de Herschel [481]. L'atténuation est encore plus importante à mesure que la pupille de sortie produite par l'ocualire diminue (le grossissement augmente) Ce filtre permet de mieux voir la granularité si la résolution de l'instrument le permet.

Le prisme de Herschel est en général le système qui préserve le mieux la résolution de l'instrument. L'ajout d'un filtre UV/IR Cut en plus permet de couper les IR qui peuvent avoir des effets sur la santé si le diamètre de la lunette dépasse 100mm. Le filtre UV/IR Cut permet aussi d'améliorer encore le contraste (photo et visuel).

On prendra un prisme de Herschel de 1.25" pour une lunette jusqu'à 120 mm maximum afin d'éviter un échauffement trop important mais cela dépend aussi de la construction du prisme de Herschel utilisé par exemple le Lacerta est complètement ouvert et évacue mieux la chaleur accumulée.

Martin Wise à dit : *When seeing is really poor, a red filter is a good choice. When seeing is excellent, a green filter is a good choice.* [481].



Credit : J.G. Gricourt

Combinaisons de filtres possible :

- Prisme de Herschel + ND3 + Polarisant réglable ou ND0.9 + filtre UV/IR Cut + Oculaire
- Prisme de Herschel + ND3 + Polarisant réglable ou ND0.9 + filtre UV/IR Cut + filtre Continuum + Oculaire

Le **ND3 doit toujours être le tout premier filtre** en sortie d'un wedge quelque soit la configuration Visuel ou Photo ! En général ce filtre est scellé dans le wedge comme sur les Lunt.

Le filtre UV/IR-Cut sert à éliminer les IR après 700 nm pour une meilleure protection des yeux cependant les filtres UV/IR Cut classiques souvent adapté pour l'astrophoto ne filtre pas bien les IR après 1200 nm pour celà il fadra utiliser des filtres sur verre KG3 capables d'aborber tous les IR au moins jusqu'à 5000 nm.

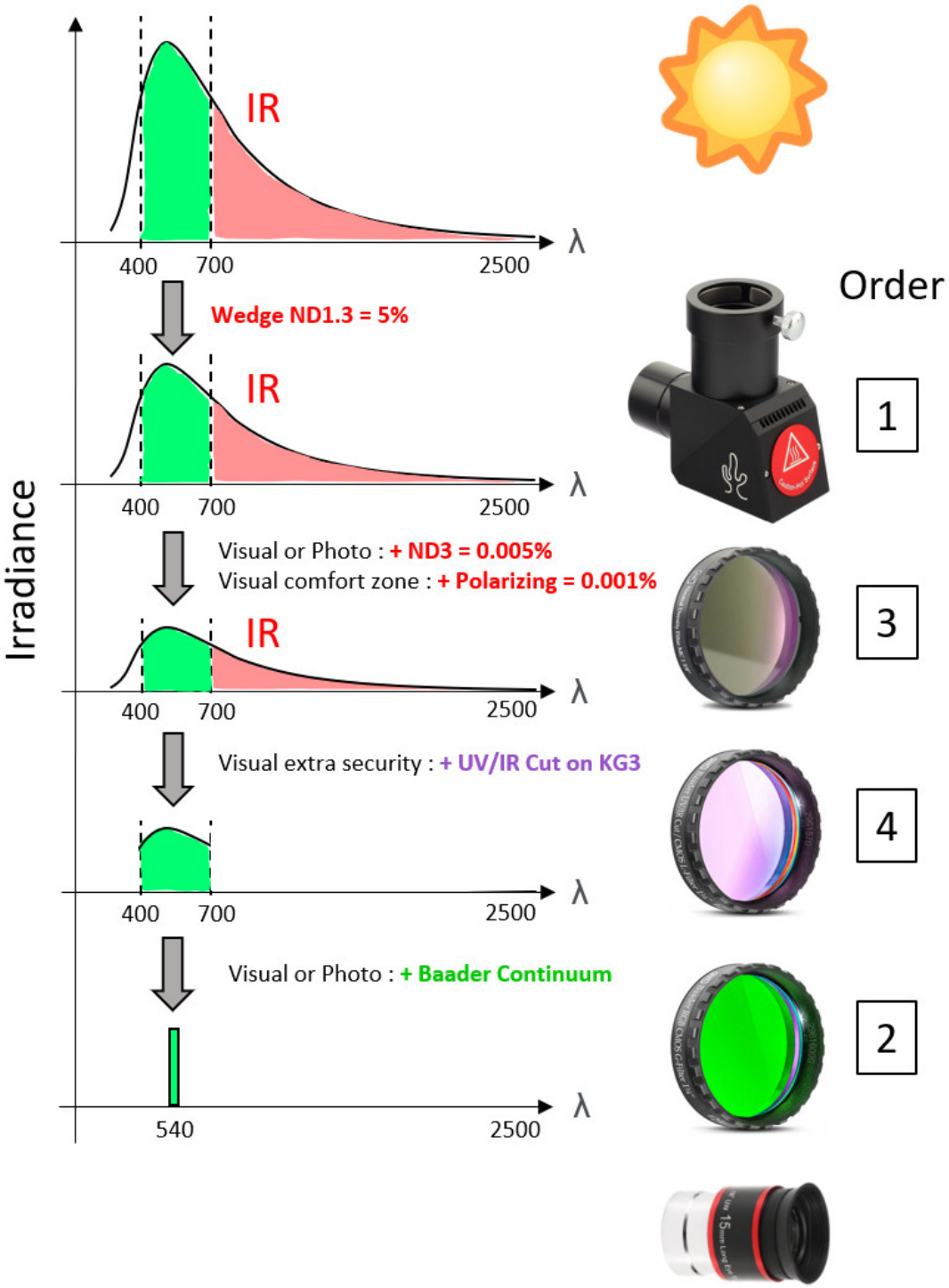
- Beloptik UV IR/Cut on KG3
- Optolong UV IR/Cut on KG3

Le polarisant est parfois constitué de 2 pièces = filtre polarisant circulaire, ce qui n'est pas très utile pour le solaire car la lumière sortant du prisme de Herschel est déjà polarisée une fois. Un filtre polarisant simple peut donc se visser directement sur l'oculaire que l'on fera tourner dans le porte oculaire afin de faire varier l'intensité lumineuse. A noter que la polarisation est maximale à l'angle de Brewster et donc avec des wedges idoines comme le Lacerta.

Le filtrage du prisme de Herschel à nu est équivalent à un filtre ND1.3 associé à un filtre ND3 et donc le filtrage total est le minimum requis pour la sécurité de l'oeil : $\mathrm{ND}_{\mathrm{safe}} = \mathrm{ND1.3} + \mathrm{ND3} = \mathrm{ND4.3}$ soit une transmission de $T = 0.005\%$. Cependant cette filtration de sécurité sera encore trop inconfortable pour certaines personnes et donc un filtre polarisant permettra d'ajuster sa propre zone de confort.

Baader a dit : *So for a 99.9 % majority of people it is not "necessary" from the aspect of safety, to add another ND -filter on top of the necessary ND 3.0 filter. But - a small number of people do inherit raised sensitivity for brightness, leading to eventual phototoxic reactions in the eye during prolonged and repeated exposure to light levels that would be perceived as normal by others.* [43].

Le prisme de Herschel ne transmet pas suffisamment d'énergie dans le $H\alpha$ pour être utilisé dans cette bande, il sera donc essentiellement utilisé avec des filtres utilisables en lumière blanche (sans Etalon donc) comme le filtre Continuum ou CaK.



Credit : J.G. Gricourt

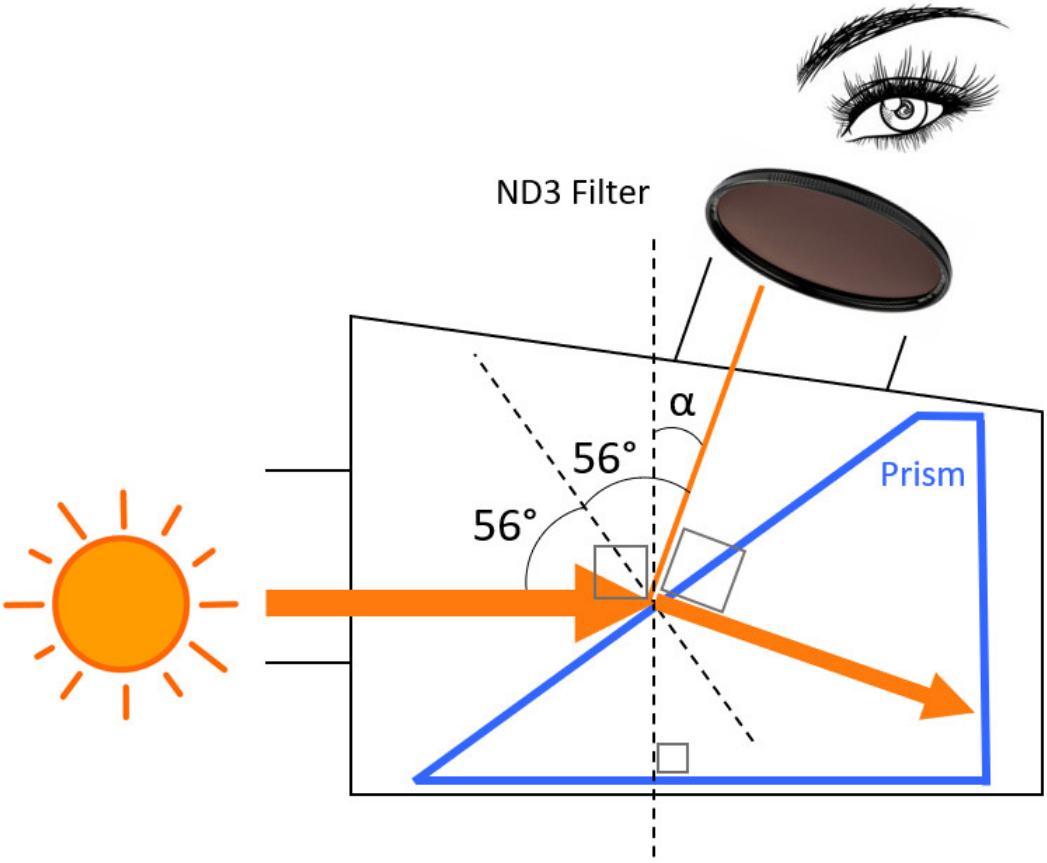
Prisme de Herschel Lacerta désigne un prisme de Herschel différent des autres prismes du même type. Le prisme classique retransmet la lumière à 90° et polarise partiellement la lumière alors que le Lacerta est conçu pour retransmettre la lumière à l'angle de Brewster 56.6° afin de polariser la lumière à 100%. Il est donc théoriquement possible de couper complètement le flux lumineux avec un filtre polarisant en le tournant [582, 404].

— Lacerta + ND3 = ND4.07
— Lacerta + ND3 + filtre polarisant = [ND4.07, ND6.37]

Avec le Lacerta le ND3 agit sur un flux polarisé ce qui renforce son effet atténuateur à ND 4.07 donc le ND3 seul suffit en

visuel, cependant pour voir la granulation il faudra utiliser un filtre polarisant pour encore atténuer un peu plus le flux.

La loi de Snell-Descartes permet de déterminer l'angle de Brewster : $\theta = \arctan \frac{n_{\text{verre}}}{n_{\text{air}}}$ où $n_{\text{verre}} = 1.52$ et $n_{\text{air}} = 1$



Credit : J.G. Gricourt

Calcul de l'angle d'inclinaison du renvoi coudé du Lacerta : $\alpha = 2 \times 56 - 90 = 22°$ donc au total au lieu d'un angle de 90° d'un renvoi coudé classique on obtient $90 + 22 = 112°$ ce qui peut être inconfortable pour observer depuis des lieux géographiques de basses latitudes où le soleil est particulièrement haut ou bien avec les instruments longs (manque de hauteur pour l'accès au porte oculaire).

PST signifie "Personal Solar Telescope" est une petite lunette 40 F/10 permettant d'observer le soleil au travers d'un filtre $H\alpha$. Cette lunette comporte une seule lentille à l'avant (un singlet) et des lentilles correctrices dans le tube ainsi qu'un filtre FP, un filtre UV/IR et un filtre BF. Elle est fabriquée par la société Coronado. Malheureusement la qualité des produits Coronado a décliné ces dernières années.

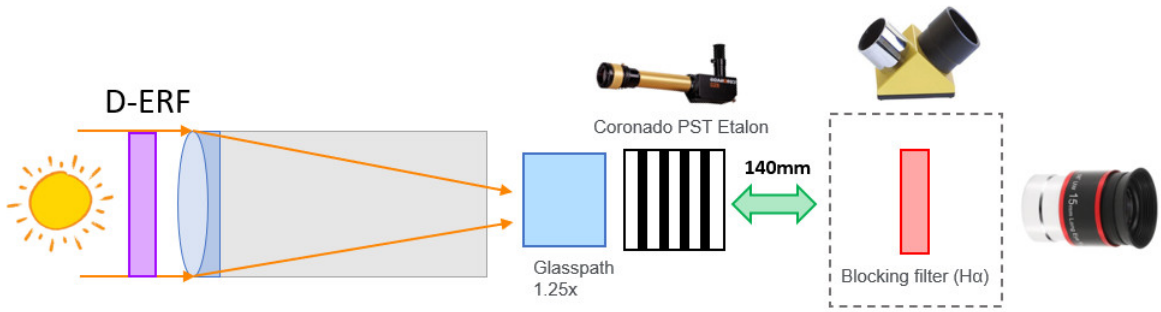
Modification PST désigne un bricolage qui consiste à combiner une lunette de grand diamètre avec le filtre Etalon récupéré d'un Coronado PST. Le Coronado PST est une lunette solaire de petit diamètre (40 mm). Cette modification économique permet d'exploiter la résolution procurée par un gros diamètre. Il est alors possible d'observer les protubérances, cependant le disque solaire présente un fort vignetting en raison du filtre Fabry Pérot trop petit en général pour l'ouverture.

Voir le montage est composé Pedro Re

1. Un filtre D-ERF placé devant l'objectif de la lunette
2. Un Glasspath 1.25x (barlow)

3. Un filtre Etalon extrait du bloc du Coronado PST
4. Un filtre UV/IR-Cut large bande (IR lointain)
5. Un filtre BF15 $H\alpha$

*Note : le filtre Fabry Pérot fonctionne sur des instruments ouverts à F/30, il faut rajouter une barlow / glasspath si nécessaire pour arriver à F/30 ou sinon il faut bien laisser la barlow interne de la PST et alors le seuil passe de F/30 à F/10 [**?**].*

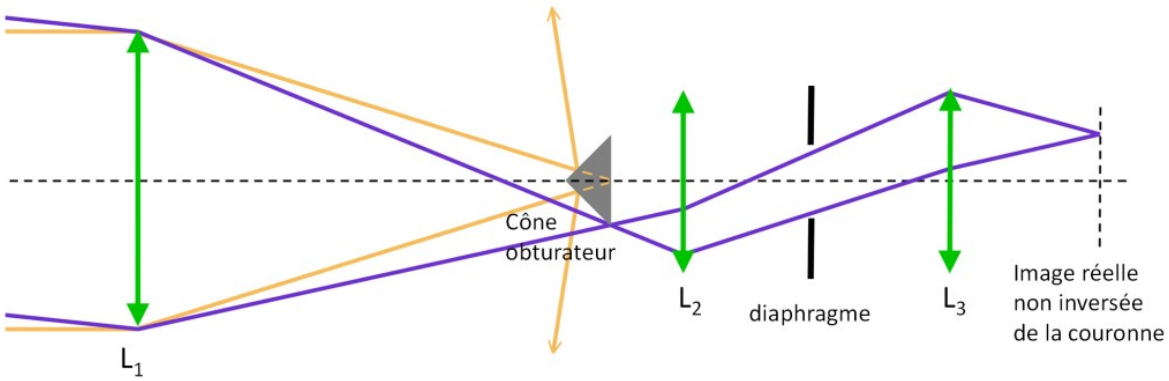


Credit : J.G. Gricourt

Pyramide de Hossefield désigne un dispositif attaché à une lunette dotée d'un oculaire et permettant de projeter l'image du soleil sur un écran en arrière. Le diamètre du disque solaire se calcul selon la formule : $D_{solaire} = \alpha_{solaire} \times (d - f) \times G$ où $\alpha_{solaire}$ est le diamètre angulaire solaire en radian (environ, 0.5°), d la distance entre l'écran l'oculaire, f la focale de l'oculaire, G la grossissement de l'oculaire (voir la relation de conjugaison des lentilles minces).

Coronographe il s'agit d'un instrument permettant d'observer le bord du disque solaire afin de voir les protubérances. Ce système reproduit le phénomène d'éclipse solaire par la Lune. Le principe consiste à cacher le disque solaire à l'aide d'un disque occulteur placé à l'avant au niveau du foyer de l'objectif de l'instrument. Une seconde lentille redirige le faisceau sur un diaphragme de Lyot (à iris) afin d'occulter la contribution des bords des 2 premières lentilles à la formation de l'image dans le but de produire une image plus fine. Les bords des lentilles sont souvent imparfaits, un diaphragme permet de réduire les aberrations optiques des lunettes ou des télescopes. Une 3e lentille permet de rediriger le faisceau vers un filtre H_α puis un oculaire pour l'observation visuelle ou un capteur photo est placé juste derrière. Le disque occulteur, la pièce maitresse du dispositif, est un cône en métal capable de supporter des températures élevées, car étant placé au foyer de l'instrument.

Le coronographe de Lyot



Credit : Gens de la Lune

Lorsque la turbulence est importante on peut exploiter un filtre IR 642nm Band Pass qui ne laissera passer que l'IR afin de juguler la turbulence [53].

Spectro Coronographe il s'agit d'un instrument permettant d'observer le disque solaire afin de détailler sa surface et ses bords dans une longueur d'onde donnée réglable. Lorsqu'il est calé en H_α il permet de capturer les protubérances solaire. Le spectro coronographe est une variantes du SolEx ou du Sunscan car celui ici est plûtot dédié à l'observation du bord du disque solaire (protubérances) dans longueur d'onde H_α.

Le principe consiste à ne montrer qu'une partie du soleil, par exemple le bord du disque solaire où se rouve les protubérances.

Une fente étroite est placée au foyer de l'instrument, précisement là où l'image du soleil se forme [310].

Une lentille collimateur rend les rayons parallèles et redirige le faisceau sur un diaphragme de Lyot (à iris) afin d'occulter la contribution des bords des lentilles à la formation de l'image dans le but de produire une image plus fine car les bords des lentilles sont souvent imparfaits, un diaphragme de Lyot permet de cacher les rayons provenant des bords de la lentille de la lunette afin réduire les aberrations optiques et d'assombrir complètement le ciel immédiatement proche du bord du disque solaire.

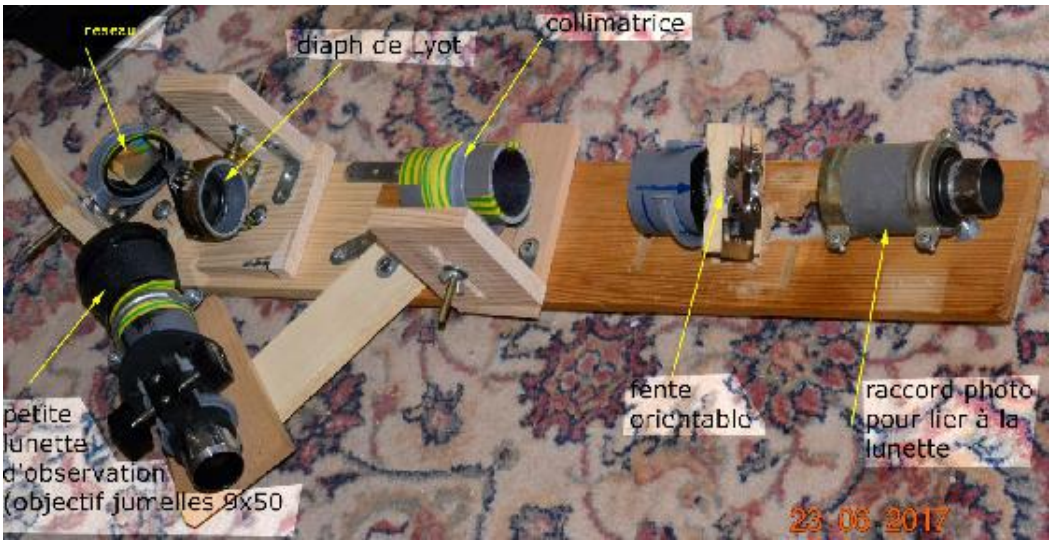
Le faisceau tombe alors sur un réseau de diffraction holographique composé de fentes très serrées (1200 lignes / mm)qui va diffracter la lumière qui se décompose alors en différentes couleurs dont le H_α si le réseau est orienté à 26°.

Une 3e lentille permet de rediriger le faisceau sur un oculaire pour l'observation visuelle ou un capteur photo placé juste derrière. Si on utilise pas de filtre solaire Astrosolar la fente doit supporter des températures élevées car étant placée directement au foyer de l'instrument.

Le pouvoir de dispersion du réseau de diffraction est proportionnel au nombre de traits par mm. Il est possible d'utiliser un réseau classique de type diapo ou de type réseau par réflexion.

Il est possible de voir des décalage de la raie H_α en raison de l'effet Doppler-Fizeau dû à la variation de vitesse des protubérances. Suivant que la matière émettrice de lumière s'approche ou s'éloigne du point d'observation, la raie se décale vers le bleu ou vers le rouge.

Le spectro coronographe de Christophe Imbee

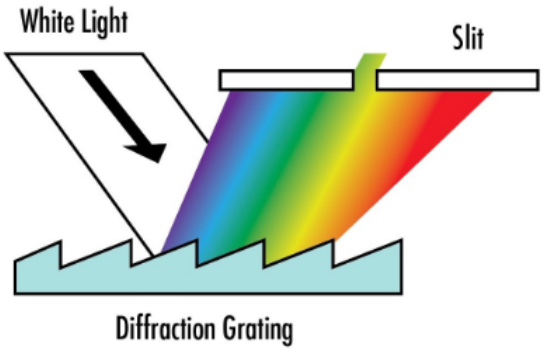


Credit : chrishalpha2017 alias Christophe Imbee

A noter qu'il existe 3 types de réseau de diffraction [736] :

— “Transmission Grating” (classique) : le réseau transmet la lumière incidente qui est diffractée derrière le réseau
— “Holographic Reflective Grating” : le réseau est réflechissant avec une surface constellée de creux et renvoit la lumière incidente qui est diffractée par réflection
— “Blazed (Ruled) Gratings” : le réseau est réflechissant avec une surface en dents de scie et renvoit la lumière incidente qui est diffractée par réflection

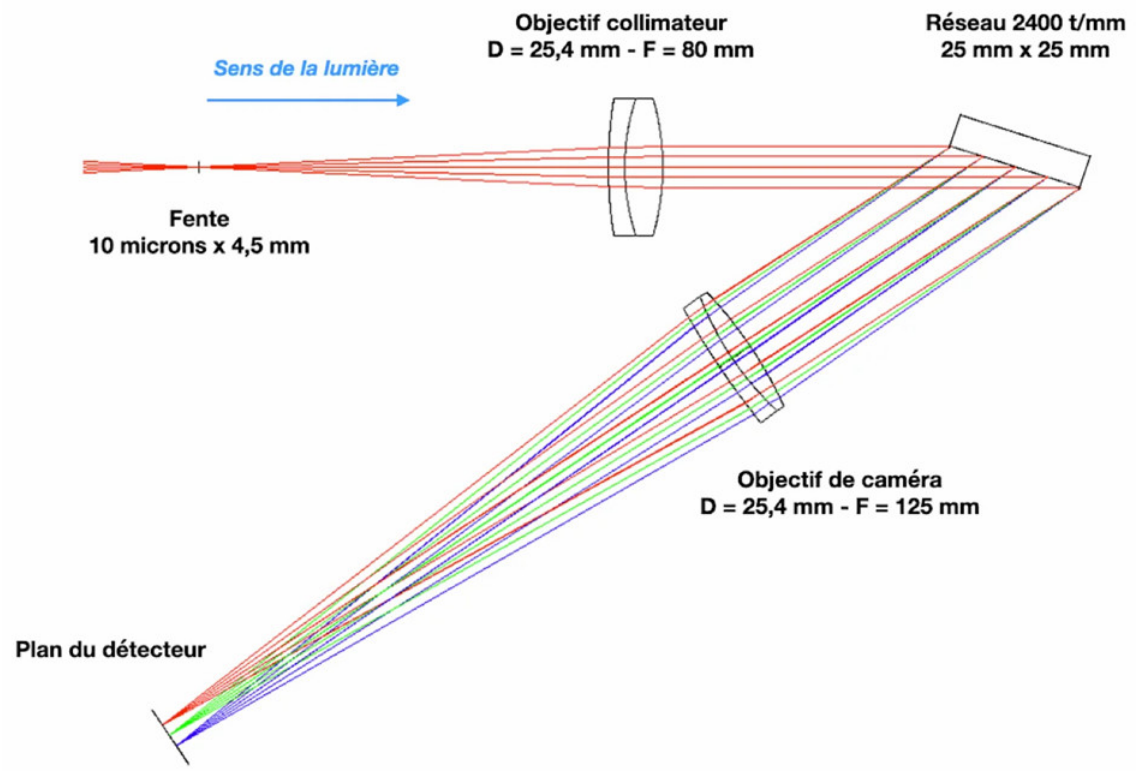
Blazed Gratings



Credit : Edmund Optics

Le SolEx ou “Spectro Heliographe” de Christian Buil en propose une version du Spectro Heliographe à imprimer le “SolEx” [98, 780]. Le “SolEx” permet d’imager toute la surface du soleil en bandes étroite d’image par déplacement du soleil devant la fente. Les images produites seront à assembler par logiciel pour reconstituer l’image complète du disque solaire. Il permet aussi de sélectionner la longueur d’onde d’observation H_α, H_β, CaK, CaH etc ... en changeant l’angle d’incidence du réseau de diffraction holographique. Il en existe une version prémontée grand public le Sunscan.

Le SolEx



Credit : Christian Buil

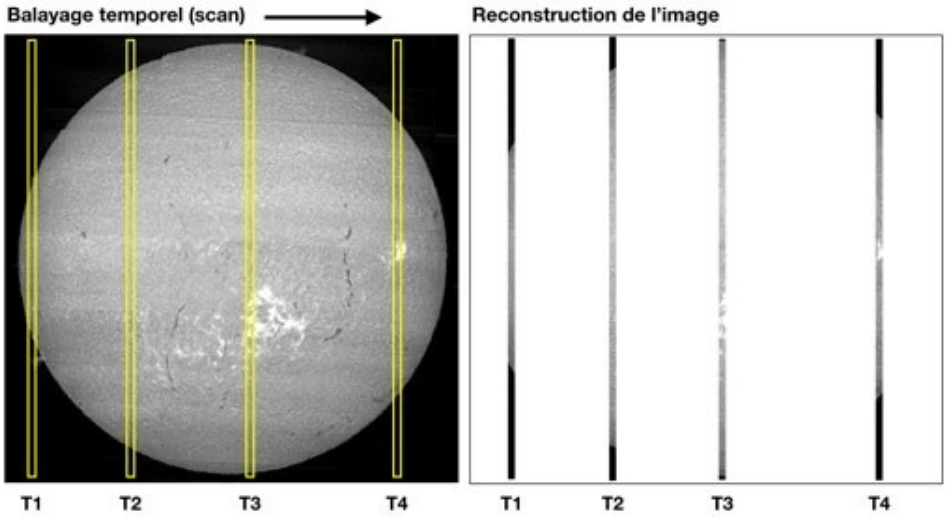
Le principe consiste à ne montrer qu'une partie du soleil à la fois à l'aide d'une fente placée au foyer de l'instrument, précisement là où l'image du soleil se forme. Une lentille collimateur redirige le faisceau sur un réseau de diffraction composé de fentes très serrées (1200 lignes / mm) qui va diffracter la lumière qui se décompose alors en différentes couleurs dont le H_α si le réseau est orienté à 26°. L'image d'une longueur d'onde du spectre produit est alors capturée. Le défilement du soleil ldevant l'instrument permettera de balayer toute sa surface. La reconstitution de l'image du soleil se fait en réassemblant les images capturées.

Le défilement du soleil peu être produit soit :

— Par "Sun Scan" on laisse défiler le soleil a vitesse réelle devant l'objectif de la lunette
— Par défilement à haute vitesse sur l'axe RA de la monture équatoriale

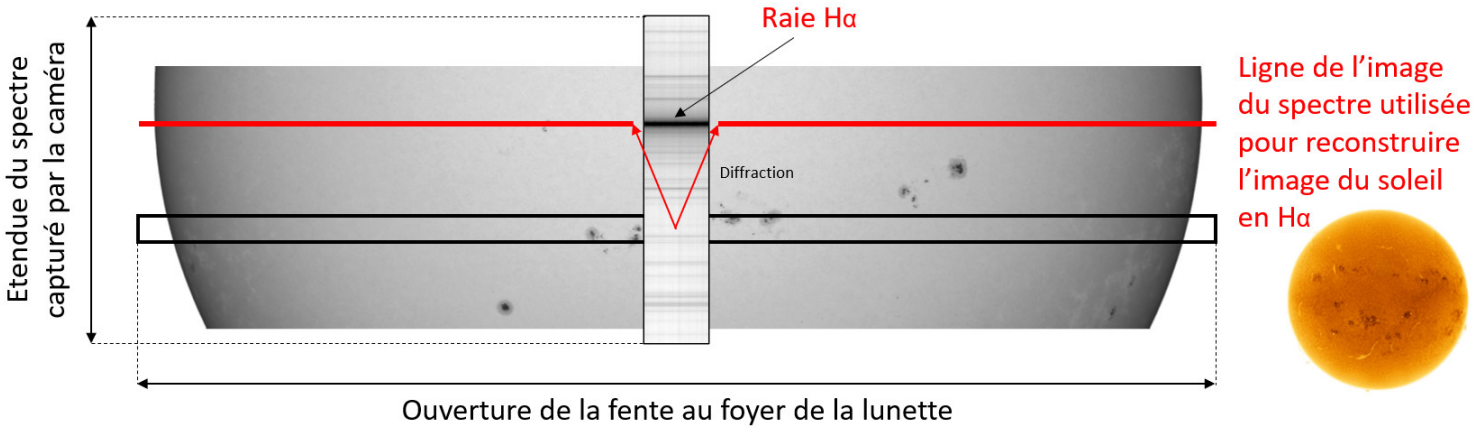
Un scan plus rapide permet de réduire la taille du fichier vidéo de l'acquisition et d'éviter les pertuirbations atmosphérique.

Le SolEx



Credit : Christian Buil

Le spectre généré par le SolEx



Credit : J.G. Gricourt

Les fluctuations de la raie H_α contient l'image du soleilsur toutes la bande capturée par la fente.

Le SolEx nécessite :

- Une lunette (ou un instrument) d'au maximum 420mm de focale pour capturer le disque solaire en entier
- Un filtre de type Baader Astrosolar devant l'objectif ou bien un prisme de Hershel dans le but d'atténuer le flux lumineux
- Une camera rapide

Il y aura des corrections géométriques à apporter par le traitement d'image dans les cas suivants :

- La fréquence d'acquisition des images lors du balayage est trop élevée (effet ballon de rugby) ou bien trop faible (effet oeuf de poule)
- Le sens du balayage n'est pas exactement perpendiculaire à la fente (effet boule étirée selon un axe)

Il est possible qu'après reconstitution on voit apparaitre des lignes verticales sur l'image, il s'agit de poussières présentes sur la fente.

Il existe aussi une version du SoleEx appelé StarEx pour faire de la spectrographie des étoiles ou des nébuleuses, celui ci est doté d'une camera guide pour un suivi équatorial parfait [658] et en version HR (haute résolution) nécessite une barlow apochromatique (ex : APM x2.7) si le rapport F/D de l'instrument est inférieur à F/6.5 [99].

Logiciels :

- JSolEx (Java) - Melix
- INTI (Python) - Valérie Desnoux
- specINTI (Python) - Valérie Desnoux
- SHG (Python) - The Smiths

Les logiciels permettent aussi :

- La reconstitution d'une image en lumière blanche (longueur d'onde du Continuum) similaire à celle obtenue via un prisme de Herschel ou un filtre Astrosolar
- Réaliser une animation du disque solaire montrrant toutes les couches (différents longueur d'ondes)
- La reconstitution d'une image dans la longueurd'onde de l'hélium
- La reconstitution de la couronne solaire
- La reconstitution d'une image en mode éclipse solaire virtuelle
- La reconstitution d'une image montrant un Dopplergramme, les vitesses d'éloignement ou de rapprochement (décalage des raies par effet Doppler)
- La reconstitution d'une image montrant un Magnétogramme, le champ magnétique solaire (raie Fe + effet Zeeman)



Credit : Jérôme Fuss

6.8 Les Accessoires

6.8.1 Le Porte Oculaire

Porte-oculaire ou “PO” ou “Focuser” désigne l’accessoire indispensable sur les lunettes et les télescope qui permet d’insérer un oculaire ou un appareil photo et permet de faire la MAP à l’aide de molettes de réglage. La MAP s’opère en avançant ou reculant le tube du porte-oculaire dans son logement. Il existe des portes oculaires en 2" ou 3" ce dernier étant dédié aux astrographes très haut de gamme à grands champs.

Du point de vue mécanique, il existe différents types de porte-oculaire par ordre de fiabilité ou de capacité à porter des charges lourdes [262] :

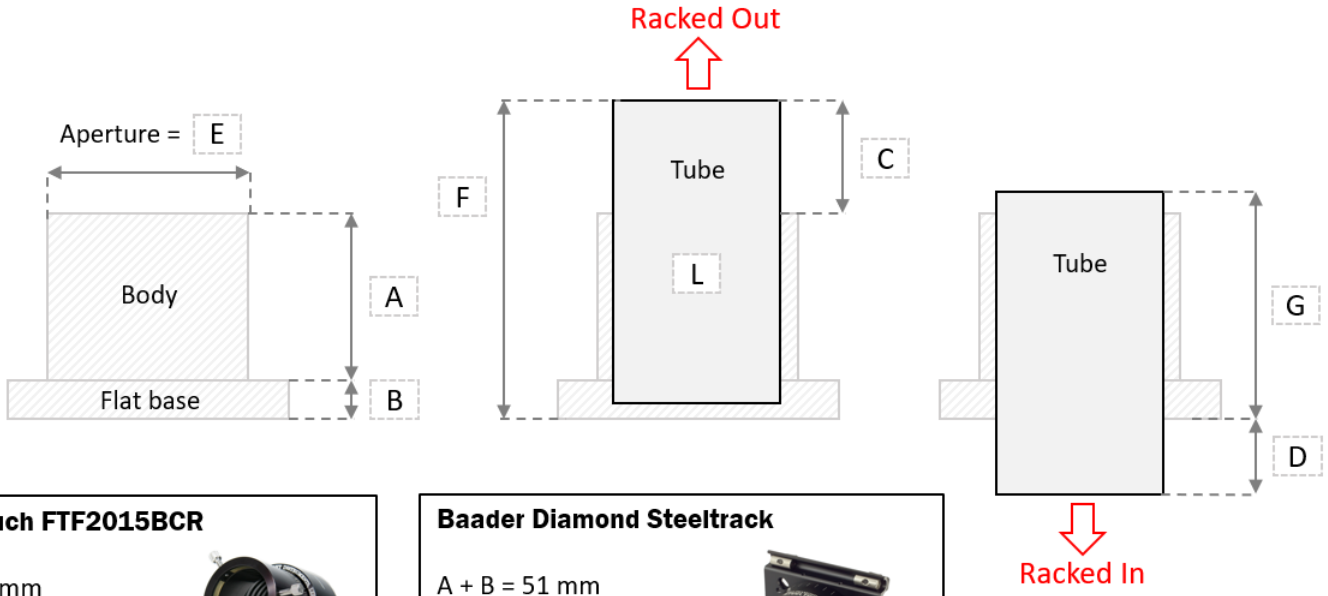
1. Crayford à crémaillère R&P ou “Rack & Pinions” (contact à engrenages), ex : Feathertouch R&P
2. Crayford sur rail où la translation du tube est guidée par 2 rails, ex : Feathertouch BCR [266]
3. Crayford LB “Linear Bearing” où la translation du tube est guidée par une platine guide, ex : GSO
4. Crayford classique où la translation du tube est guidée par les roulements en appuie direct sur le tube, ex : Moonlite (tous)

5. Porte oculaire hélicoïdal où la translation du tube est guidée par 2 roulements (de biais) en appuie direct sur le tube, ex : Kineoptic

Problèmes courants :

1. Les PO à crémaillère R&P peuvent être sujets au phénomène de “Backlash” c’est-à-dire un retard du mouvement au moment où l’on tourne la molette.
2. Les PO à crémaillère R&P peuvent être sujets au phénomène de “Image Shift” c’est-à-dire un déplacement de l’objet visé qui est alors décentré lorsqu’on fait la mise au point.
3. Les PO crayford peuvent être sujet au phénomène de “Slippage” autrement dit le glissement du tube du porte-oculaire soumis à de lourdes charges. Pour cette raison, le porte-oculaire à crémaillère est plus adapté dans à l’imagerie.

Porte-oculaires du marché pour Newton



Feathertouch FTF2015BCR



A = 29.972 mm
B = 5.715 mm (0,225 inch)
C = 40.64 mm (1.6 inch)
D = L – G = 39.313 mm
E = 50.8 mm
F = A + B + C = 76.327 mm
G = A + B = 35.687 mm (1.405 inch)
L = D + G = 75 mm

Mesuré :
B = 5 mm
A + B = 41 mm => A = 36 mm
F = 82 mm => C = 41 mm
D = 33 mm, G = A + B = 42 mm

Baader Diamond Steeltrack

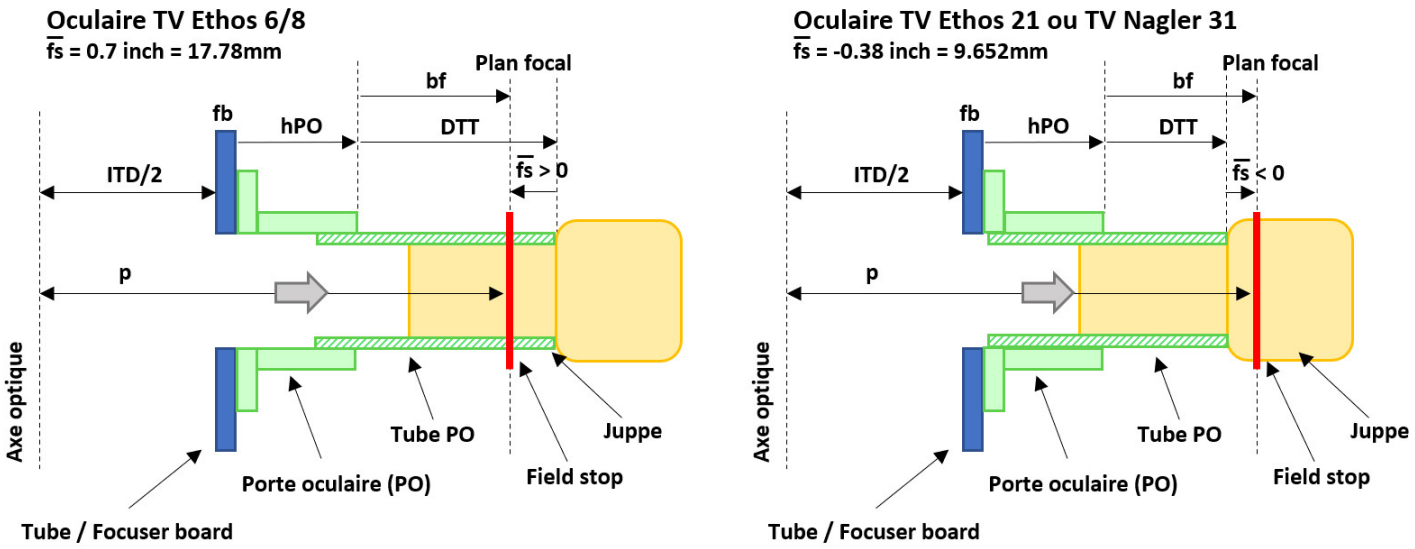


A + B = 51 mm
B = 5 mm
C = 40 mm
D = 31 mm
E = 55.4 mm
F = A + B + C = 102 mm
G = 62 mm
L = D + G = 93 mm

Credit : J.G. Gricourt

Définitions :

— hPO = A + B
— DTT = C



Credit : J.G. Gricourt

DTT = longueur du tube du PO sorti = “Draw Tube Travel”
fs = position du field stop de l’oculaire par rapport à la jupe, négatif s’il est au dessus de la juppe [5]
bf = “Backfocus”

La mise au point nécessite plus ou moins de DTT = “Draw Tube Travel” si l’on prend les oculaires dont la position des field stop est aux extrêmes : Ethos 8 mm (+0.7") et Nagler 31 mm (-0.38"), ceux-ci nécessiteraient : DTT = 0.7+0.38 = 1.068 pouce.

Calcul du DTT : DTT $= b_f + \overline{f_s}$

Calcul du DTT maximal : on prend l’oculaire dont la position du field stop fs est le plus élevé de tous les oculaires utilisés, par exemple un TV Ethos 8 (fs = +0.7") : $\mathrm{DTT}_{\max} = b_f + \overline{f_{s\max}}$, cet oculaire nécessitera l’extension la plus longue du tube du porte-oculaire. Si le tube du porte-oculaire est trop court DTT $< \mathrm{DTT}_{\max}$ alors, il suffit de rajouter une extension dans le tube du porte-oculaire pour atteindre le field stop.

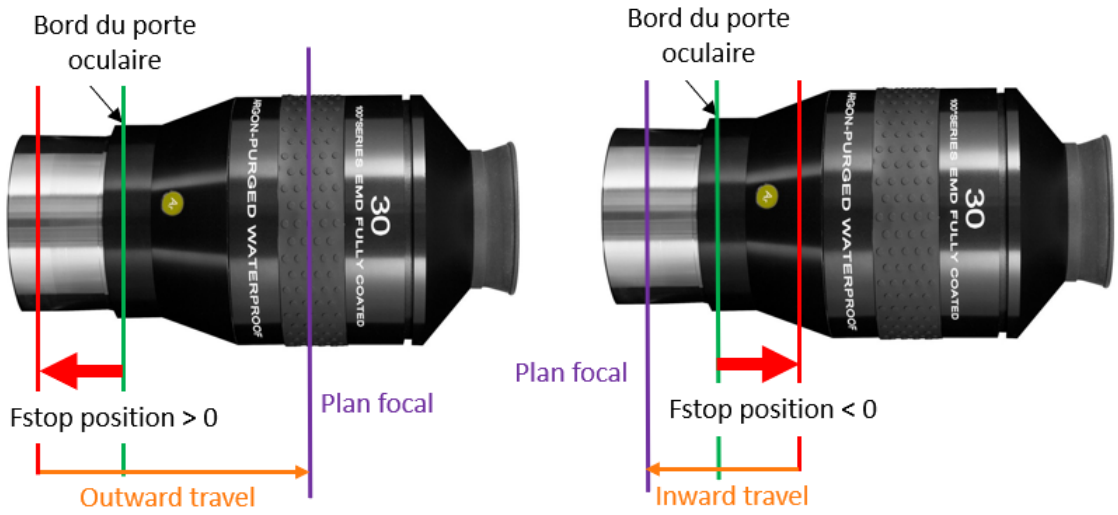
Calcul du DTT minimal : on prend l’oculaire dont la position du field stop fs est le plus petit de tous les oculaires utilisés, par exemple un TV Nagler 31 ou TV Ethos 21 (fs = -0.38") : $\mathrm{DTT}_{\min} = b_f + \overline{f_{s\min}}$, cet oculaire nécessitera l’extension la plus courte du tube du porte-oculaire.

Calcul du “Backfocus” minimum requis : on prend l’oculaire dont la position du field stop fs est le plus faible (négatif) de tous les oculaires utilisés, par exemple un TV Nagler 31 ou TV Ethos 21 (fs = -0.38") : $b_{f\min} = -\overline{f_{s\min}}$ (DTT = 0 dans ce cas).

Tube du Porte Oculaire ou “Draw Tube” désigne le tube coulissant inséré dans le porte-oculaires et dans lequel on insère des oculaires, un APN ou un capteur photo. Lorsque l’on fait la MAP, c’est ce tube qui se déplace.

Drawtube travel ou “DTT” désigne le débattement permis par le tube du porte-oculaire en sortant du porte-oculaire. Le DTT permet aux oculaires d’atteindre le foyer. En général, on positionne le porte-oculaire pour avoir le foyer au milieu du tube du porte-oculaire complètement ressorti afin d’accommoder l’usage de différents oculaires ayant des field stop de positions différentes par rapport à la jupe de l’oculaire.

5. Voir Tele Vue Eyepiece Specifications



Credit : J.G. Gricourt

La valeur du field stop des oculaires Tele Vue est donné dans un tableau sur le site du constructeur dans la colonne F [708], une valeur négative correspond à un field stop au dessus de la jupe de l'oculaire (schéma 2).

Réducteur de coulant Le réducteur de coulant qui sert à réduire le coulant du tube du porte-oculaire de 2" à 1.25" afin de pouvoir utiliser des oculaires au coulant 1.25".

Backfocus Le backfocus désigne la distance entre le bord de la partie non mobile du porte oculaire et le plan focal sortant du porte oculaire. Le backfocus détermine la quantité de "Inward Drawtube Travel" = IDT restant lorsque la mise au point avec un oculaire ou une camera en imagerie est réalisée [430].

Outward Drawtube Travel ou "Outward Focuser Travel" voir "Backfocus" ou "In focus" désigne le mouvement de recul du tube du porte-oculaire vers l'extérieur pour atteindre le foyer plus en arrière (tube sortant). Ce mouvement permet de faire la mise au point d'un oculaire ou de placer l'image sur le capteur.

Dispositifs optiques nécessitant plus de ODT car il y a trop de Backfocus :

— Oculaires ont le field stop est positionné au dessus de la juppe ou "Eyepiece Shoulder" comme les Ethos 6 et 8 mm (field stop positionné à +0.7").

Inward Drawtube Travel ou "Inward Focuser Travel" voir "Backfocus" ou "Out focus" désigne le mouvement d'avancée du tube du porte-oculaire vers le miroir nécessaire pour atteindre le foyer plus en avant (tube rentrant). Ce mouvement permet de faire la mise au point d'un oculaire ou de placer l'image sur le capteur.

Dispositifs optiques nécessitant plus de IDT car il y n'y a pas suffisament de Backfocus :

— Oculaires dont le field stop est positionné en dessous de la jupe ou "Shoulder" comme le Nagler 31 mm et L'Ethos 21 mm (field stop positionné à -0.38").
— Les têtes binoculaires
— Les cameras
— Renvois coudés
— Les oculaires [220] lorsque l'observateur souffre de myopie
— Paracorr II (0.75" inward drawtube travel according to Tele Vue)

Les Newtons sont très souvent les instruments manquant de IDT.

Mise au Point ou "MAP" ou "Focus" désigne l'opération qui consiste à ajuster la netteté de l'image perçue au travers l'oculaire à l'aide de la molette du porte-oculaire. La netteté est obtenue lorsque le plan focal de l'oculaire coïncide avec le plan focal de l'instrument. Le plan focal de l'oculaire est localisé au niveau du field stop de celui-ci. La mise au point est plus sensible sur les télescopes courts pour atteindre précisément le point de focus qui ne laisse que peu de marge d'erreur, il faudra utiliser la molette démultipliée du PO.

La plage de focus optimale ou CFZ = "Critical Focus Zone" [329] se calcule comme $\text{CFZ} = 8 \times \lambda \times \Delta n \times (F/D)^2$ où $n = \text{PtV}$ et pour rester "Diffraction Limited" l'aberration du front d'onde doit vérifier : $\text{PtV} \in [-\lambda/4, +\lambda/4] \Rightarrow \Delta n = 1/4 + 1/4 = 1/2$ alors $\text{CFZ} = 4 \times \lambda \times (F/D)^2$

Pour une onde à 550 nm alors $\text{CFZ}_{\text{mm}} = 0.0022 \times (F/D)^2$ [589, 339, 153, 84].

Bryan Greer utilise la formule de Sidgwick :

$$\text{CFZ} = 4 \times 1.22 \times \lambda \times (F/D)^2$$
$$\text{CFZ} = 4.88 \times \lambda \times (F/D)^2$$

En tenant compte de cette tolérance de mise au point dans le calcule de la distance d_{min} d'un objet non situé à l'infini mais dont l'image se formerait aussi sur le plan focal on peut écrire la relation de conjugaison suivante : $\frac{1}{F-\text{CFZ}} - \frac{1}{F} = \frac{1}{d_{\text{min}}}$ ce qui donne après réduction $d_{\text{min}} = \frac{D^2}{4\lambda}$ où F est la focale de l'instrument et D le diamètre de l'instrument [416], sachant que $D^2 \gg 4\lambda F$.

Certains observateurs reportent que les instruments à F/D plus long sont moins sensibles à la turbulence et nécessiterait de refaire moins souvent la MAP "Chasing The Focus" [635] ce qui pourtant n'est pas confirmé par la théorie [202, 84, 527, 74]. La turbulence à diamètre égale dégrade de la même manière l'image produite par les instruments. Ainsi, le déplacement de la MAP (focus shift) dû à la turbulence est au final plus important sur la focale longue que sur la focale courte [782, 555] cependant il faudra moins de "travel" pour refaire la MAP avec une focale courte qu'avec une focale longue.

Mike Lockwood a dit : *"Defocus due to seeing scales with f/D / magnification / focal length - so the effect of seeing on fast telescopes is scaled down, so less focuser movement is needed to refocus, so seeing-induced defocus is not worse for fast telescopes."* [531]

Lorsque le foyer ne ressort pas suffisamment, il faut raccourcir le tube du télescope, c'est notamment le cas pour :

1. L'utilisation d'oculaire pour lesquels le field stop est très haut
2. L'utilisation d'une binoculaire (l'ajout d'un OCS ou d'une barlow résout aussi le pb).
3. L'utilisation d'une caméra ou d'un boitier photo

Lorsque le foyer ressort trop, il faut rajouter un tube d'extension sur le porte-oculaire ou rallonger le tube du télescope, c'est notamment le cas pour :

1. L'utilisation d'oculaire pour lesquels le field stop est très bas (en dessous de la jupe)
2. L'utilisation d'une caméra ou d'un boitier photo

Lorsque l'oeil présente un défaut de focalisation il fauit réajuster la mise au point de l'oculaire afin de compenser le défaut.

— Un oeil nécessitant une correction diotrique de $\delta < 0$ alors sans verre correcteur l'oeil voit naturellement entre 0 et $-1/\delta$ mètres, c'est la myopie
— Un oeil nécessitant une correction diotrique de $\delta > 0$ alors sans verre correcteur l'oeil voit naturellement entre $1/\delta$ mètres et l'infini, c'est la presbytie

Sur l'ordonnance de l'ophtalmologiste on lira la ligne "Sphere" ou "D" correpondant à δ toujours exprimé en mètre ![6].

Dans le cas de la myopie la distance exprimée en mm la plus lointaine que l'oeil pourra accomoder est $d_{FF} = 1000/\delta$ (FF = "Far Focus"), il faudra donc que l'oculaire forme l'image supposée à l'infini à cette nouvelle distance afin que l'oeil voit nette. Pour celà il faudra avancer l'oculaire dans le porte oculaire (In-Focus) de la distance Δ_F.

Selon Nils Orlof Carlin : la relation de conjugaison des lentilles minces appliqué à l'oculaire de focale f dans ce cas s'exprime par : $\frac{1}{f-\Delta_F} - \frac{1}{d_{FF}} = \frac{1}{f}$ [551] donc $\Delta_F = \frac{f^2}{d_{FF}+f}$. Une simplification en fonction de la correction δ en dioptrie : $\Delta_F = \frac{f^2\delta}{1000}$ avec toutes les distances exprimée en mm et aussi sachant que $1000 \gg f\delta$.

Selon Tomdey : $\Delta_F = \frac{f^2\delta}{1000-f\delta}$, avec δ négatif dans le cas de la myopie [739, 740, 551] avec toutes les distances exprimée en mm.

Il faudra donc plus de "Inward drawtube travel" pour les myopes. Les yeux des myopes travaillant à F/D plus court que pour les hypermétropes, ils sont plus sensibles aux défauts de focalisation liés à leur myopie donc la prise en compte de la correction de mise au point Δ_F sera donc plus critique [755].

Front Focus désigne l'avancée nécessaire du tube du PO (tube rentrant) vers le miroir secondaire pour réaliser la MAP avec un oculaire. Souvent le correcteur de coma + oculaire nécessite plus de front focus que l'oculaire seul.

Crayford désigne un type de porte-oculaire reposant sur le principe de la friction d'un cylindre rotatif en appuie sur une surface plane, ce système rend la MAP très précise et sans glissement. Le crayford a remplacé les porte-oculaires à crémaillère utilisant des pignons.

Rack and Pignon ou "R&P" désigne un porte-oculaire à crémaillère. Ces porte-oculaires sont devenus la norme notamment sur les lunettes de moyenne gamme à haut de gamme en raison de leur robustesse, de l'absence totale "Slippage", ceux-ci sont très supérieurs aux crayford classiques et sont prisés en imagerie pour leur capacité à supporter de lourdes charges.

Microfocuser désigne un type de porte-oculaire doté d'une molette de démultiplication, généralement de rapport 1-10, donc 10 tours de cette molette correspond à un tour de la molette principale. Cette molette permet un réglage fin de la MAP lorsque le cône de lumière est plus ouvert, c'est-à-dire pour les instruments à F/D court (inférieur à 5) pour lesquels la tolérance de MAP est plus faible.

Low Profile désigne un type de porte-oculaire dont la hauteur hors tube coulissant est très basse afin de reprocher les oculaires ou les accessoire du foyer. On utilisera ce type de porte-oculaire pour les Newton à F/D ultra court (F/4 ou moins) où le backfocus sera nécessairement court. En général la hauteur totale tube en position sortie sera au maximum de 80mm. Un modèle emblamatique de PO Low Profile est le Feathertouch FTF 2008BCR ou le FTF 2015BCR.

Avantages :

— Permet de diminuer le backfocus bf sans perdre de champ CPL (sans rallonger la distance foyer / axe optique)

6. δ est négatif si l'oeil est myope

— Permet d'utiliser un accessoire nécessitant un long chemin optique (backfocus) comme un capteur photo, une binoculaire
— Permet d'utiliser un secondaire plus petit afin de minimiser l'obstruction de l'instrument

En général le tube coulissant est aussi plus court ce qui implique aussi un DTT plus faible, il faut donc vérifier :

— Que l'oculaire, le correcteur de coma ou la barlow utilisée ne dépasse pas dans le champ du tube du télescope afin de ne pas diffracter la lumière
— Que l'oculaire utilisé ne nécessite pas le rajout d'une extension sur le tube du porte-oculaire dans le but de faire la mise au point

6.8.2 Les Adaptateurs

Adaptateur désigne les tubes permettant de réduire le backfocus de l'instrument ou d'interconnecter des accessoires, des dispositifs optiques ou des caméras à l'instrument afin de compléter le train optique. Il existe de nombreux standards connus :

— M42 ou T2 (filetage 0.75 mm) : c'est le standard de 42 mm qui permet de connecter une caméra au porte-oculaire de l'instrument. Il permet parfois (ex : Baader Zeiss) de visser un accessoire sur un renvoi coudé de 2".
— M48 (filetage 0.75 mm) : c'est le standard de 48 mm qui permet de connecter un porte-oculaire au télescope ou de visser un filtre de 2"
— M28.5 (filetage 0.6 mm) : c'est le standard de 28.5 mm qui permet de visser un filtre de 1.25"
— 2" : c'est le standard de 50.8 mm qui permet d'insérer un oculaire en 2"
— 1.25" : c'est le standard de 31.75 mm qui permet d'insérer un oculaire en 1.25"
— 0.96" : c'est le standard de 24.5 mm qui permet d'insérer un oculaire japonais en 0.96"

Montage APN (type DSLR) Nikon sur un porte-oculaire de 2" :

1. APN Nikon
2. Bague T2 (mâle) pour Nikon
3. Adaptateur vers T2 (femelle) vers 2" = "Nosepiece"

Dovetail ou "Queue d'Arronde" désigne une pièce permettant de connecter un équipement au tube d'un télescope. Il existe des queues d'aronde femelle à fixer sur le tube du télescope et des queues d'aronde mâle se fixant sur l'équipement et s'emboitant dans une queue d'aronde femelle.

Finder Shoe désigne la queue d'aronde femelle permettant de connecter un chercheur optique ou un chercheur point route au tube du télescope.

Saddle désigne la queue d'aronde femelle permettant de connecter un télescope ou une lunette sur une monture.

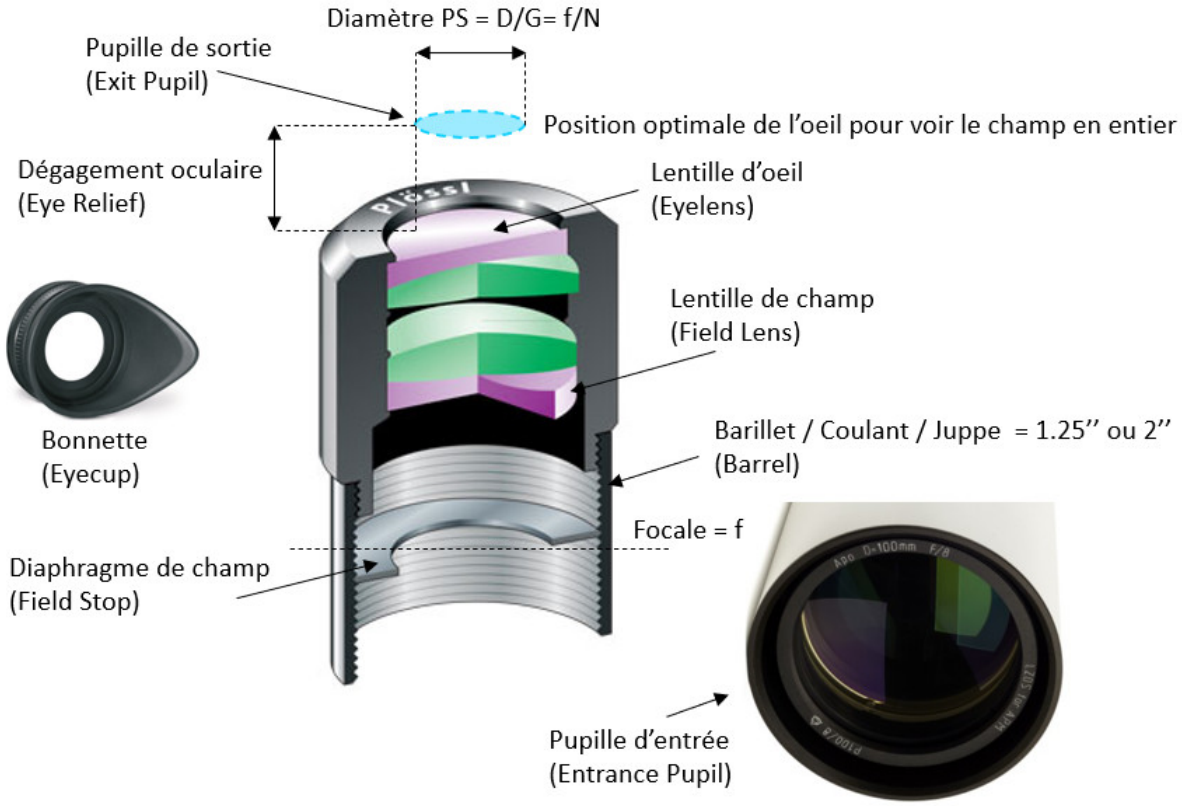
Dovetail Bar ou "Dovetail Mounting Plate" ou "Platine de Montage" désigne la queue d'aronde mâle permettant de connecter un télescope ou une lunette sur une monture.

Il existe 2 standards :

— Format Vixen
— Format Losmandy D

6.8.3 Les Oculaires

Oculaire ou “Eyepiece” désigne la pièce optique interchangeable de l’instrument qui s’insère dans le porte-oculaire et qui permet de grossir l’image formée dans le plan focal par l’objectif principal (ou le miroir) en produisant une image virtuelle. Lorsque la mise au point est réalisée, l’oculaire produit une image nette à l’infini ne nécessitant pas d’accommodation. L’objet projeté sur le plan focal, l’objectif principal est vu sous le même angle, que ce soit avec l’oculaire en place ou bien à l’oeil nu. Comme dans le cas de la loupe, c’est en réduisant la focale de l’oculaire que l’on peut s’approcher toujours plus près de l’image objet produite par l’objectif principal pour mieux la détailler tout en l’observant sans accommodation. À noter qu’il serait aussi possible de remplacer l’oculaire par un “pin-hole” et de déplacer celui-ci pour s’approcher de l’objet image sur le plan focal afin de le voir de plus près sans accommodation (presque, car le “pin-hole” parfait n’existe pas). Un oculaire à l’inverse de l’objectif principal doit transformer un front d’onde sphérique, en front d’onde plan (les rayons provenant d’une image sur le plan focal) et tout écart au plan induit des aberrations. Pour utiliser correctement un oculaire, il faut que la MAP soit réalisée, il faut que le plan focal entrant de l’oculaire coïncide avec le plan focal sortant de l’objectif. La focale effective f_{EFL} de l’oculaire est mesuré à partir du centre optique de l’oculaire, pour une lentille mince simple le centre optique est le centre géométrique ce qui n’est pas le cas d’oculaire composé de multiples lentilles [706]



Credit : Sky & Telescopes

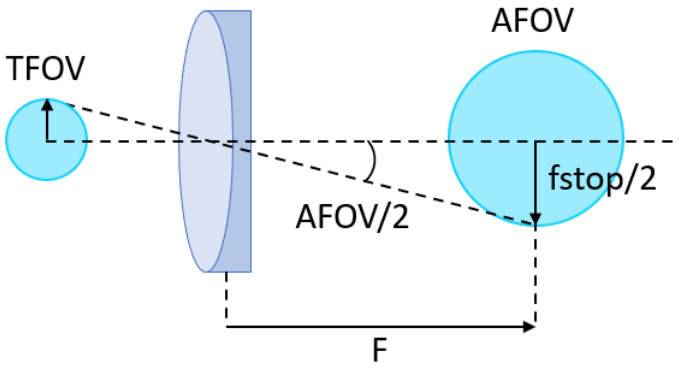
La lentille d’oeil ou “Eyelense” ou lentille frontale est la première lentille visible devant l’oculaire, c’est depuis celle ci que la pupille de sortie ou “Exit Pupil” se forme et détermine la quantité de lumière qui viendra frapper la rétine.

La lentille de champ ou “Field Lense” est la dernière lentille visible derrière l’oculaire celle ci est couverte par l’anneau du diaphragme ou “Field Stop” déterminant le champ réel qui sera visible dans l’oculaire.

L’oculaire est caractérisé par :

1. Sa focale f (mm) qui détermine le grossissement $G = F/f$

2. Son champ apparent AFOV (°) = 57.3 × fstop/f limitant l'étendue du champ de vision apparent
3. Son diaphragme de champ fstop (mm) = TFOV × F/57.3 limitant le champ réel couvert sur le ciel



Credit : J.G. Gricourt

Le diamètre du diaphragme de champ field stop détermine complètement le champ réel produit par l'oculaire [686], on donc peut déduire la formule reliant le fstop et le champ apparent AFOV : $F = \frac{\text{fstop}/2}{\tan \text{TFOV}/2}$

En simplifiant par $\tan \alpha = \alpha$ pour les petits angles, on obtient : fstop = $\frac{\text{TFOV} \times F}{57.3}$ où TFOV exprimé en degré [702]. Cette formule n'est plus exacte lorsque le champ apparent devient très important et donc que l'oculaire comporte beaucoup de distorsion rectilinéaire (coussinet or barillet distorsion) et diverge alors de la valeur mesurée du fstop.

— Distorsion en coussinet : fstop physique < fstop calculé
— Distorsion en barillet : fstop physique > fstop calculé

De plus, avec des oculaires à groupes de lentilles positifs et négatifs, le field stop physique est différent du field stop virtuel [222]. Ce type d'oculaire nécessite également des barillets (2") plus large que nécessaire pour des designs plus simples afin de ne pas vigneter le cône de lumière [222].

Le diamètre du diaphragme de champ est en général plus serré que celui de la lentille de champ pour exclure les bords des lentilles dans le but de minimiser les aberrations optiques, cela a le même effet que de diaphragmer l'objectif d'une lunette (meilleure image).

Les oculaires "Wide Field" de longue focale (supérieur à 20 mm) et offrant un champ apparent très important au-delà de 82° ont par construction des coulants de 2" en raison d'un diaphragme de champ plus large donné : fstop = $F \times tan(\text{TFOV}/2)$.

Dans une même gamme d'oculaire et de même coulant , ex des Plössl en 2", plus la focale est longue plus le champ apparent AFOV sera étroit en raison de la nécessité de mieux "couvrir" les bords extérieur des lentilles avec un diaphragme de champ plus étroit pour éliminer les aberrations plus présente à ces focale extrêmes.

En théorie, le diaphragme de champ fstop max :

— Oculaire 1.25 : 31,75mm
— Oculaire 2 : 50.8mm

En pratique on prendra en compte un fstop un peu large pour des raisons de contraintes de design de l'oculaire.

— Oculaire 1.25 : 29mm

— Oculaire 2 : 47mm

Sachant aussi $\frac{\text{AFOV}}{\text{TFOV}} = \frac{F}{f}$ alors AFOV $\times f = 57.3 \times$ fstop

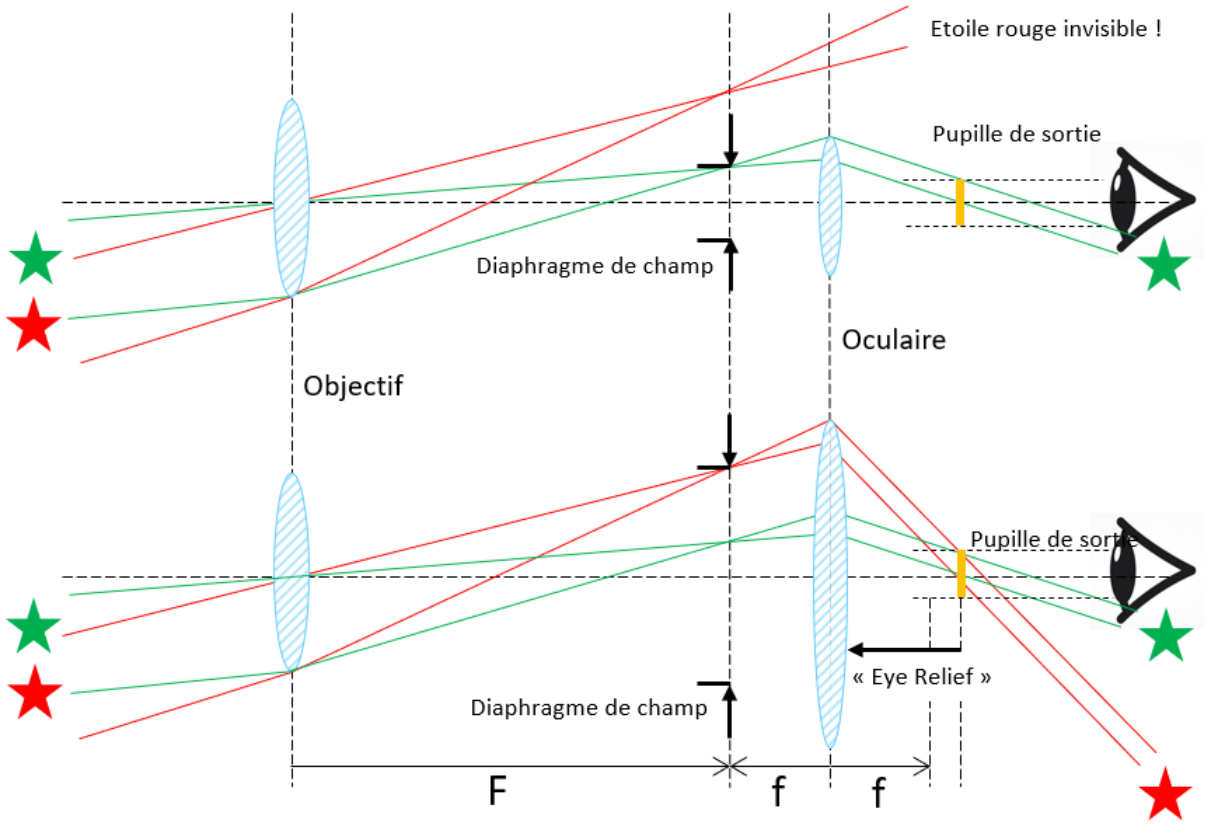
Pour un même instrument de focale F constante le champ réel TFOV est proportionnel à AFOV $\times f$.

Au plus le champ apparent et la focale de l'oculaire combinés ne peuvent dépasser une limite selon le coulant (1.25 ou 2) :

— Limite champ oculaire 1.25 : AFOV $\times f = 1650$, ex : Nagler Plossl $40mm$, fstop $= 27mm$, on obtient 1547
— Limite champ oculaire 2 : AFOV $\times f = 2700$, ex : Nagler Panoptic $41mm$, fstop $= 46mm$, on obtient 2636

Note : ces formules sont approximatives car elles ne tiennent pas compte de la distorsion angulaire éventuelle de l'oculaire (les TV Nagler et les TV Ethos en ont peu).

Chemin optique passant par l'oculaire



Credit : J.G. Gricourt

Les oculaires existent en 2 diamètres de coulant : 1.25" (31.75 mm) et 2" (50.8 mm). La jupe de l'oculaire, là où le serrage se fait une fois inséré dans le porte-oculaire, est soit droit et complètement lisse, soit légèrement réduit de diamètre au centre = "Undercut" afin de minimiser le risque que l'oculaire glisse dans le cas où le serrage effectué est trop faible.

Ce qui est important, c'est que l'oculaire inséré dans le porte-oculaire soit parfaitement aligné sur l'axe optique de l'instrument et l'on peut toutefois tolérer un défaut d'excentricité, soit un léger décalage en translation par rapport l'axe optique. Un système de serrage à 2 vis (pas 3) ou à serrage annulaire garantissent l'alignement sur l'axe optique.

Comme toute pièce optique l'oculaire peut présenter des défauts [197], par convention dans la littérature F = Focale /

Diamètre :

1. Aberration de sphéricité $\propto 1/F^3$
2. Coma $\propto 1/F^2$
3. Astigmatisme hors axe $\propto 1/F$ et aussi $\propto \theta^2_{\text{axe}}$
4. Défocalisation (l'erreur de mise au point) $\propto 1/F^2$
5. Distorsion géométrique (rectilinéaire) $\propto 1/F$
6. Distorsion de grossissement angulaire $\propto \theta_{\text{axe}}$
7. Courbure de champ $\propto 1/F$ et aussi $\propto \theta^2_{\text{axe}}$
8. Chromatisme $\propto 1/F^2$
9. Neutralité des couleurs non respectée (ex : teinte jaune des Naglers)
10. Transmission dépend de la qualité du traitement anti-reflet = traitement multicouche
11. Vignetting du champ, "Blackout Effect" ou "Key Hole Effect"
12. CAEP, "Chromatic Aberration of the Exit Pupil", Anneau de feu = "Ring Of Fire Effect" (ex : Nagler 26mm, 31mm)
13. EOFB, "Edge of Field Brightening Effect"
14. SAEP, "Spherical Aberration of the Exit Pupil", Ombres volantes, "Kidney Bean Effect"

Note : θ_{axe} est la distance angulaire à l'axe optique.

De manière générale, plus le rapport F/D de l'instrument est court, plus ces aberrations seront exacerbées en raison de l'angle d'attaque des rayons plus prononcé, voir aussi la définition du cône de lumière et des conditions de Gauss. Plus le champ apparent de l'oculaire est grand, plus celui-ci montrera les aberrations hors axe.

La courbure de champ introduite par les oculaires modernes est marginale, car ils sont conçus (à champ plat) pour être utilisés dans divers instruments, il n'y a donc en général pas de compensation de courbure de l'instrument pour un type d'instrument.

Selon les familles d'oculaire, l'astigmatisme est plus ou moins prononcé. Les oculaires TV Nagler, TV Ethos sont conçus pour contenir l'astigmatisme avec des instruments plus court que $F/D \leq 5$ (oblicité des rayons forte). Certains oculaires Explore Scientifique grand champ présentent une courbure de champ importante au bord.

La coma est l'aberration la plus faible introduite par les oculaires [12].

Pour rappel 10% de différence de transmission représente une différence de magnitude de 0.1 la limite perceptible par l'oeil humain sans défaut (AAVSO) [189].

Lorsque dans un instrument (lunette ou télescope) on perçoit visuellement de l'aberration chromatique à faible grossissement et quasiment pas à fort grossissement, cela peut être du chromatisme introduit par l'oculaire.

Caractéristique d'un oculaire :

1. La focale
2. Le dégagement oculaire "Eye Relief"
3. Le champ apparent (lié au diamètre du field stop)
4. La transparence (sa capacité à transmettre la lumière sans perte)
5. Le contraste dû au traitement anti-reflet = traitement multicouche

6. La neutralité des couleurs

Catactéristiques d'un oculaire d'usage confortable [238] :

1. Le dégagement oculaire = "Eye Relief" plus long (plus de 20mm) permettant l'observation avec ses lunettes de vue
2. L'absence d'aberration de la pupille de sortie = SAEP permettant un placement de l'oeil plus facile
3. Un bord peremttant de reposer l'arcade de son oeil, voir la série des coulaires : Pentax XW

Raisons pour utiliser des oculaires plus gros (G) et plus lourds (L) [239] :

1. La quantité de lentilles plus élevée pour corriger le champ de toutes aberrations optique (L)
2. La quantité de lentilles plus élevée pour corriger le champ sur un instrument de de rapport F/D court, ex : Dobson à $F/D < 4$ (L)
3. Le diaphragme de champ = "Field Stop" plus ouvert (passage au format 2 inch) pour couvrir plus de champ apparent = "AFOV", ex : oculaires 100° et plus (G) (L)
4. La focale plus longue (L)
5. L'augmentation du dégagement oculaire = "Eye Relief" (L)

Poids des oculaires les plus lourds

Oculaire	Focale	Champ	Poids
Explore Scientific 100° 3" barrel	30 mm	100°	2353 g
Masuyama 80 3" barrel	80 mm	52°	1700 g
Explore Scientific 100° Series 25	25 mm	100°	1177 g
TV Ethos 21	21 mm	100°	1020 g
TV Nagler 31	31 mm	82°	998 g
TV Panoptic 41	41 mm	68°	952 g

Le champ AFOV max (en pratique) pour les oculaires de 1.25 inch [240]

AFOV	Focale
100°	$F < 14mm$
82°	$F < 17mm$
70°	$F < 21mm$
68°	$F < 25mm$
62°	$F < 27mm$
50°	$F < 33mm$

Malgré un nombre de lentilles plus élevées (de 6 à 8) les oculaires grands champs modernes offrent maintenant grâce aux traitements multicouche des taux de transmission très élevés proche de ceux d'oculaire orthoscopique (2 vs 36 lentilles).

Les oculaires dit "négatif" ont leur plan focal d'entrée situé à l'intérieur de l'oculaire, en général au milieu du jeu de lentilles, ils ne peuvent donc pas être aussi utilisé comme loupe (par exemple le Huygens, TV Nagler, TV Ethos, Pentax XW). Les oculaires dit "positif" ont leur plan focal d'entrée situé à l'extérieur de l'oculaire, ils peuvent donc être aussi utilisés comme loupe (par exemple le Ramsden, Kellner, Plossl). Pour rappel, une loupe s'utilise en plaçant l'objet derrière le plan focal d'entré.

Certains oculaires comme les Naglers ont un field stop effectif plus petit que le field stop physique (anneau limitant le champ par construction) [7].

Oculaires courants [290, 700, 751]

Oculaire	Année	Caractéristique	Lentilles	AFOV	Usage
Galiléen	1609	1 simple lentille divergente, aucune correction	1	-	-
Huygens	1660	Aberration de sphéricité, CA, courbure de champ	2	-	F/15
Ramsden	1782	Dégagement oculaire étroit	2	-	F/15
Kellner	1849	Achromatique, piqué dans les coins, réflexion internes importantes sans traitement de surface	3	40-50°	F/15
Plössl	1860	Amélioration de l'orthoscopique, excellente correction sur tout le champ, faible dégagement oculaire	4	52°	F/8, Planétaire et CP
Orthoscopic Abbe	1881	Achromatique, absence d'aberration de sphéricité, champ plat, absence de distorsion	4	40-50°	F/15, Planétaire
Monocentric	1883	Achromatique, absence de réflexion interne	3	25°	F/15, Planétaire
König	1915	Supporte les forts grossissements, fort dégagement oculaire	4	55°	University Optic (UO)
Erfle	1917	Grand champ, astigmatisme à forts grossissements	5,6	60-75°	F/8 à faible grossissement
RKE (Edmund Scientific)	1959	Amélioration du Kellner (Reverse Kellner), achromatique, absence d'aberration de sphéricité, champ plat	3	45°	F/15, Planétaire
TV Nagler	1979	Ultra grand champ	6,7	82°	F/4, CP
TV Panoptic	1992	Grand champ	6	68°	F/4, CP
TV Ethos	2007	Ultra-grand champ	7,9	100°	F/4, CP

Note : CA = chromatic aberration, CP = ciel profond.

Il existent des marques / modèles d'oculaires que l'on peu qualifier de "Hype". Ce sont des oculaires très prisés par les collectionneurs pour leur renommée passée ou simplement leur nom et le réputation sur les réseau sociaux. Leur prix est très sur-côté et dépasse largement celui d'oculaire plus moderne et plus qualitatif [80].

7. Star Ware - Philip S. Harrington

Les orthos et autres oculaires “Hype”

Oculaire	Fabricant	Formule	C	F	ER	U	A	Pays	Site
Speers Waler Serie 4	Antares	Smyth	84°	6-25mm	10-12mm	F/5	2020	US	
Astro-Physics SPL	Astro-Physics	-	42°	4-13mm	4-12mm	F/4	2004	US	
Brandon	Vernonscope	-	42-45°	6-32mm	5-26mm	F/7	1949	US	
BGO Phantom	Baader	Abbe Ortho	40°	5-18mm				Germany	-
UO Volcano Tops	Univ. Optics	Abbe Ortho	45° ?	4-25mm				Japan	-
UO HD	Univ. Optics	Abbe Ortho	45° ?	5-18mm				Japan	-
Clavé	Clavé	Plössl	48°	3-30mm	2-23mm	F/7	1953	France	
Carl Zeiss Mono	Zeiss	Hastings triplet	30°	25mm		F/6	1920	Germany	-
Fujiyama HD-OR	Ohi Kohki	Abbe Ortho	42°	4-25mm	3.4-22.2mm	F/10		Japan	-
Masuyama	Ohi Kohki	MOP	85°	10-32mm	6.5-20mm	F/10		Japan	
Masuyama	Ohi Kohki	MOP	53°	5-30mm	4-19mm	F/10		Japan	
Pentax XO	Pentax	-	44°		3.6mm		2003	Japan	
RKE	Edmund	Reversed Kellner	45°	8-28mm	6.7-21.2mm	F/6		US	-
Stellarvue Planetary	Stellarvue	SPLER	55°					US	-
Takahashi MC TPL	Takahashi	Plössl	48°	6-50mm	4.5-37mm		2023	Japan	-
Takahashi MC TOE	Takahashi	Smyth	52°	2.5-4mm	10 mm	F/8	2017	Japan	-
Takahashi MC LE	Takahashi	-	52°	2.8-50mm			2006	Japan	-
Takahashi HI-LE	Takahashi	-	52°					Japan	-
Takahashi MC Abbe	Takahashi	Abbe Ortho	44°					Japan	-
TMB II Planetary	Thomas Back	SPLER	58°					US	-
TMB Supermono	Thomas Back	Hastings triplet	30°	4-16mm	3.4-13.6mm	F/5	2003	US	
Vixen HR	Vixen	Abbe Ortho	42°	1.6-3.4mm		F/8		Japan	-
ZAO I et II	Baader	* Abbe Ortho	45°				1994	Germany	

*Note : * = Carl Zeiss design*

Autre refs : TMB Supermono

Note : SPLER= Super Plössl Long Eye Relief = Super Planetary, MOP = Masuyama Ortho Plössl, University Optics HD = Baader Genuine Ortho = Fujiyama, TOE = Takahashi Orthoscopic Enhanced, Masuyama (53) = Takahashi LE, Clavé = Kinoptik, BGO = Baader Genuine Ortho, les oculaires UO et Masuyama sont fabriqués à Kokusai Kohki Japon

Certains oculaires sont de moins en moins confortables à mesure que l’on descend en focale [288] :

— Les oculaires de formule Plössl possèdent un ER $\approx 0.75f$
— Les oculaires de type “Orthoscopic” possèdent un ER $\approx 0.80f$

Coulant désigne le diamètre de la jupe de l’oculaire (sa partie inférieure) qui doit correspondre au diamètre du tube du porte-oculaire ou de son réducteur. Il existe communément 2 coulants, 1.25” (31.75 mm) et 2” (50.8 mm).

Bonnette ou “Eyepiece Rubber”, désigne une pièce de caoutchouc souple que l’on fixe à l’avant de l’oculaire afin d’améliorer le confort de vision en bloquant les lumières parasites extérieures.

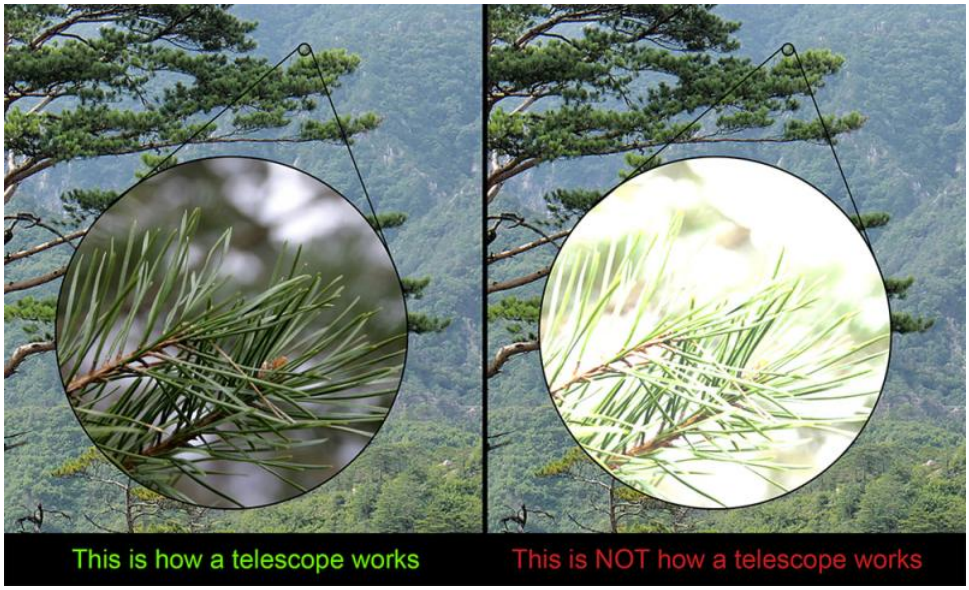
Pupille de sortie ou “Cercle oculaire” ou “Disque de Ramsden” ou “Exit Pupil” désigne l’ouverture virtuelle par laquelle tout le flux lumineux entrant dans l’instrument par le diaphragme d’ouverture ressort de l’instrument après avoir traversé

l'oculaire. La pupille de sortie est matérialisée par un petit disque lumineux au centre de la lentille frontale de l'oculaire et qui est en réalité l'image du diagramme d'ouverture de l'instrument. La pupille de sortie est située un peu en avant du plan focal en sortie de l'oculaire. La dimension de la pupille de sortie s'écrit : $p = D/G = f/N$ où $N = F/D$ où f est la focale de l'oculaire. Plus la pupille de sortie est large, plus l'image vue au travers l'oculaire sera lumineuse (illuminance sur la rétine). En photographie, la pupille de sortie est modulée par le diaphragme [753]. Aussi, si l'on considère 2 instruments de diamètres différents offrant la même pupille de sortie montreront un objet étendu avec une luminosité identique, cependant l'instrument de plus gros diamètre montrera l'objet sous un grossissement plus important.

D'après les conditions d'Arnulf [589, 576] la pupille de sortie offrant le maximum de résolution pour l'oeil se situe entre 0.5mm et 0.7mm.

Aussi voir la lune au travers d'un instrument n'est pas plus dangereux que de regarder la lune à l'oeil nu. Ainsi, dans les 2 cas, la luminosité est la même si les pupilles de sorties sont identiques. En revanche, la pupille de l'oeil se rétracte lorsqu'on regarde la lune dans un instrument. L'éblouissement lorsqu'on regarde la lune et qui provoque un rétrécissement réflexe de l'iris provient du fait que l'oeil s'est adapté à l'obscurité juste avant.

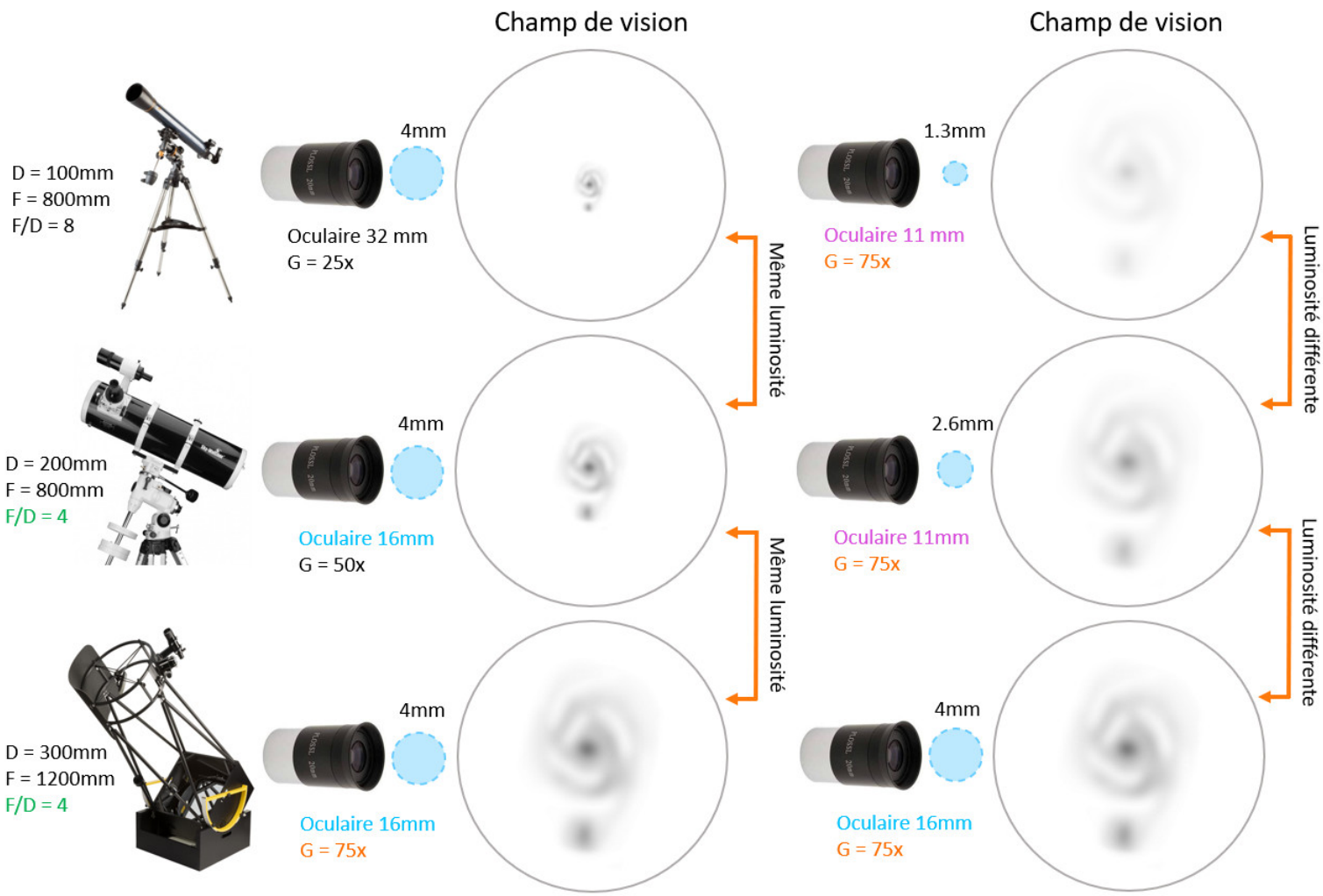
L'image d'un objet étendu derrière un instrument quelque soit la diamètre de son miroir ou objectif, n'est pas plus lumineuse si la pupille de notre oeil ne change pas.



Credit : CrazyPanda

Il faut considérer aussi les limites physiques de l'oeil :

— La pupille de l'oeil ne doit pas diaphragmer la pupille de sortie de l'oculaire sous peine de perdre la lumière et d'augmenter l'obstruction de l'instrument (s'il y a bien obstruction par un miroir secondaire).
— Le faisceau (Ps de l'instrument) ne doit pas être trop fin sous peine de faire apparaitre des corps flottants (défauts de l'humeur interne)



Credit : J.G. Gricourt

Soit 2 instruments :

- Instrument A : D et $p_D = D/G_A$
- Instrument B : D et $p_D = d/G_B$

Calcule de la clarté des étoiles : $C = (D/d)^2$

Calcule de la clarté des nébuleuses : $C = (p_D/p_d)^2$

Pour rappel la magnitude : $m_d = m_D + 2.5 \times logC$.

Exemple [428] :

- Instrument 1 : D = 200mm, F/5
- Instrument 2 : d = 100mm, F/10

- A grossissement égale : $p_D = 2 \times p_d$ alors C = 4 donc à la fois les étoiles et le fond du ciel sont 4 fois plus lumineux dans l'instrument de diamètre D par conséquent le contraste est inchangé.
- A pupille de sortie égale : $p_D = p_d$ donc $G_D = 200\times$ et $G_d = 100\times$ alors C = 1 donc les étoiles sont 4 fois plus lumineuses dans l'instrument de diamètre D, le fond du ciel est inchangé par conséquent le contraste est meilleur dans

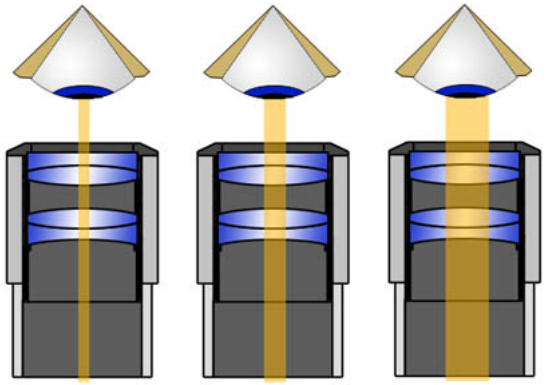
l'instrument de diamètre D.

Prenons le cas $D = d$ et $G_D > G_d$ alors $C = (G_d/G_D)^2$ donc une nébuleuse de luminosité 100 à grossissement G_D aura une luminosité de seulement 25 à G_d alors que les étoiles ne seront pas plus lumineuses mais le contraste des étoiles sera meilleurs.

Don Pensack à dit : *Increasing magnification definitely reveals fainter stars in a given scope. I see one star in M11 at 30x in my 4" in bright LA skies. By 150x, the sky in the eyepiece is dark and I see hundreds of stars. The stars didn't dim, but the background, being an extended object, did.* [235].

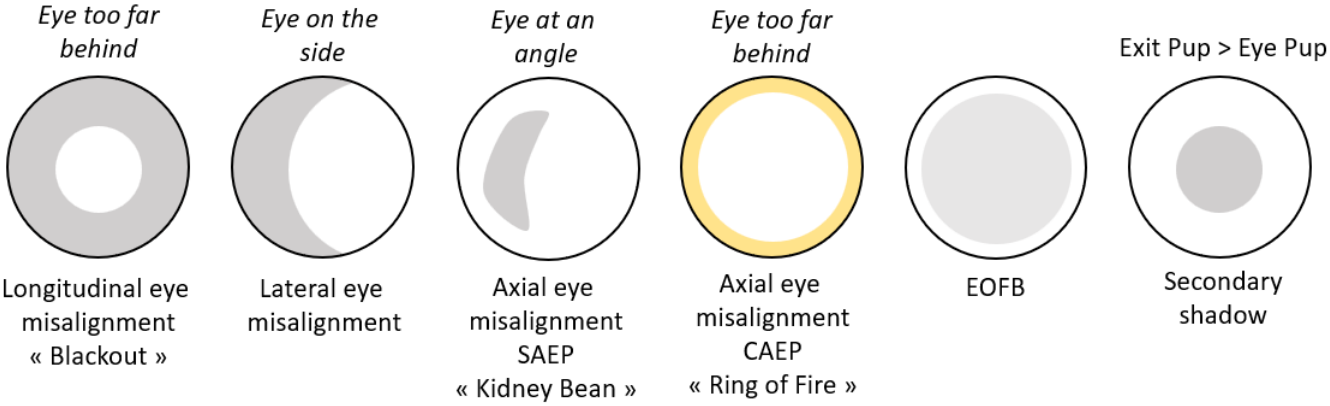
Lorsque la pupille de sortie p_t de l'instrument est coupée par la pupille de l'oeil p_o trop petite (cas de l'observation de la Lune) :

1. Seule la partie centrale est exploitée ce qui revient à réduire son diamètre effectif : $D_{\text{effectif}} = D \times p_t/p_o$
2. L'obstruction par le secondaire augmente mécaniquement : $\text{CO}_{\text{effectif}} = \text{CO} \times p_t/p_o$
3. La résolution diminue (l'obstruction augmente) se manifestant par une perte de contraste visible
4. L'ombre du secondaire va devenir plus visible et occasionner du vignetting au centre de l'image



Credit : Starizona Observing Theory

Défauts du champ de vision de l'oculaire [78]



Credit : J.G. Gricourt

SAEP ou "Aberration sphérique de la pupille de sortie" ou "Spherical Aberration Of The Exit Pupil" ou "Kidney Bean effect" désigne une aberration géométrique rendant le placement de l'oeil plus difficile car l'oeil doit être précisement dans

l'axe sans marge d'erreur. La pupille de sortie de l'oculaire est le plan virtuel vertical à l'axe optique où se croisent les rayons lumineux provenant d'une même source et sortant de l'oculaire. Normalement, quelle que soit la source, tous ces plans sont confondus. Dans le cas de cette aberration, la pupille de sortie (le plan) est multiple selon la source et donc de l'angle de provenance des rayons dans le champ, ce qui au final produit une courbe sphérique [699]. Pour cette raison, l'oculaire devient globalement "Overcorrected" [78]. Le cristallin de l'oeil doit alors se positionner précisément pour profiter de tout le champ sans perte de champ. Certains oculaires sont plus sensibles que d'autres à cette aberration, elle concerne plus souvent des oculaires de 60°, les Naglers de type I ou les Pentax XW de grande focale 14 mm et plus ont ce défaut en particulier.

Lorsque cette aberration se produit, une tache noire en forme de haricot apparaît alors dans le champ de vision [77]. A ne pas confondre avec le "Blackout Effect".

L'effet est maximal dans les conditions suivantes :

— Lorsque la pupille de sortie de l'instrument $p = D/G$ est petite par rapport à celle de notre oeil [292]
— Lorsqu'on observe de jour ou la lune de nuit.

Conséquences d'un mauvais placement de l'oeil :

1. L'oeil est placé en arrière de la pupille de sortie alors le champ est amputé d'une partie "Key Hole effect", cela arrive notamment avec les oculaires ayant un relief de l'oeil "Eye Relief" trop court (moins de 15 mm) qui oblige l'observateur à s'approcher au plus prêt de la lentille d'oeil. Les porteurs de lunette ont besoin d'un relief d'oeil plus long (20 mm et plus) pour ne pas se retrouver trop en arrière de la pupille de sortie.
2. L'axe de l'oeil fait un angle avec l'axe optique de l'oculaire, des ombres volantes apparaissent "Kidney Bean effect".
3. L'axe de l'oeil est parallèle avec l'axe optique de l'oculaire, mais son axe n'est pas confondu (décalé) alors le champ est amputé d'une partie sur un côté (zone sombre en demi lune).

Pour éviter les cas 2 et 3 il est nécessaire que l'axe de l'oeil soit confondu avec l'axe optique de l'oculaire, pour éviter cet effet indésirable, les oculaires dotés de "Eye Guard" ajustables comme sur les Pentax XW permettent de bien positionner son oeil dans l'axe.

CAEP ou "Ring Of Fire" ou "Chromatic Aberration of the Exit Pupil" [215] désigne l'effet produit par certains oculaires produisant de l'aberration chromatique de la pupille de sortie. Cet effet est produit lors de l'observation diurne ou lors de l'observation de la lune lorsque l'oeil est placé trop loin de la pupille de sortie. Le pourtour de la lune semble alors entouré d'un anneau marron orange d'au moins 5°. Il s'agit en fait du vignetting du champ de vision qui normalement devrait être une coupure nette du champ plutôt qu'une coloration. Cet effet parait être une variation du "Blackout Effect".

Kidney Bean Effect ou "Flying Shadows" désigne l'effet produit par certains oculaires lorsque la pupille de l'oeil n'est pas exactement positionné dans l'axe en raison de l'aberration de sphéricité de la pupille de sortie.

Champ de Vision on distingue le champ apparent AFOV du champ réel TFOV. Le champ réel est la portion du ciel vue au travers l'oculaire, il varie en fonction du grossissement. Le champ apparent est la largeur de l'angle de vision vu au travers l'oculaire, c'est une caractéristique de l'oculaire qui elle ne varie pas. Plus le grossissement est important, plus le champ réel vu au travers l'oculaire est petit et moins l'image est lumineuse.

Le champ réel TFOV dépend du field stop et de la focale de l'instrument : $\tan \frac{\text{TFOV}}{2} = \frac{\text{fstop}/2}{F}$

Il existe plusieurs méthodes pour le déterminer :

1. TFOV(°) = AFOV(°)/G
2. TFOV(°) = 57.3° × fstop/F [702] où $57.3 = 180/\pi$
3. TFOV (arcmin) = $15.04 \times \cos\delta \times \Delta t$ où δ est la déclinaison de l'étoile guide et Δt le temps de passage dans le champ de l'oculaire = "Field Drift".

Les champs apparents AFOV de différents oculaire : Orthoscopique = 40°, Plossl = 50°, Pentax XW = 70°, Delos = 72°, Nagler = 82°, Ethos = 100° ... Le field stop maximum pour un oculaire au format 2" est de 46 mm donc le champ max : $\text{TFOV}_{\text{max}} = 2636/F$. Le field stop maximum pour un oculaire au format 1.25" est de 29 mm donc le champ max : $\text{TFOV}_{\text{max}} = 1662/F$

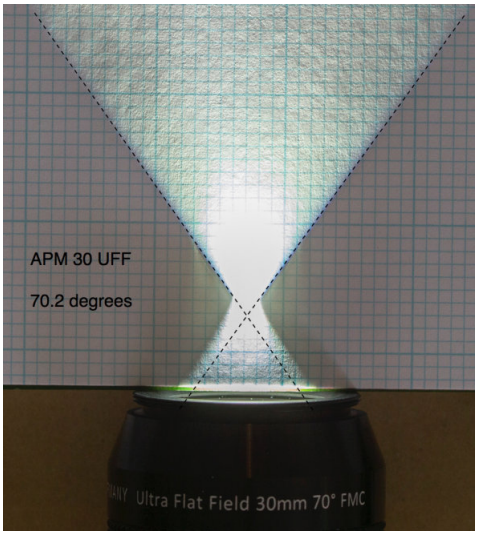
Les oculaires peuvent avoir de la distorsion de grossissement angulaire = "Angular Magnification Distorsion", c'est à dire que le grossissement n'est pas constant sur tout le champ et en particulier vers les bords donc la formule TFOV(°) = AFOV(°)/G est une estimation. Si c'est le cas alors le champ (TFOV) est plus grand en réalité que celui calculé.

Oculaires à grand champ (Tele Vue)

Oculaire	Focale	Champ	Field Stop
Plössl 55	55 mm	55°	46 mm
Panoptic 41	41 mm	68°	46 mm
Nagler 31	31 mm	82°	42 mm
Ethos 21	21 mm	100°	36 mm

Afin de déterminer précisément le champ sur le ciel TFOV il faut le mesurer par la méthode du "Field Drift" ou par la méthode de la projection avec une lampe torche [423].

Field Stop - Flash Light Test

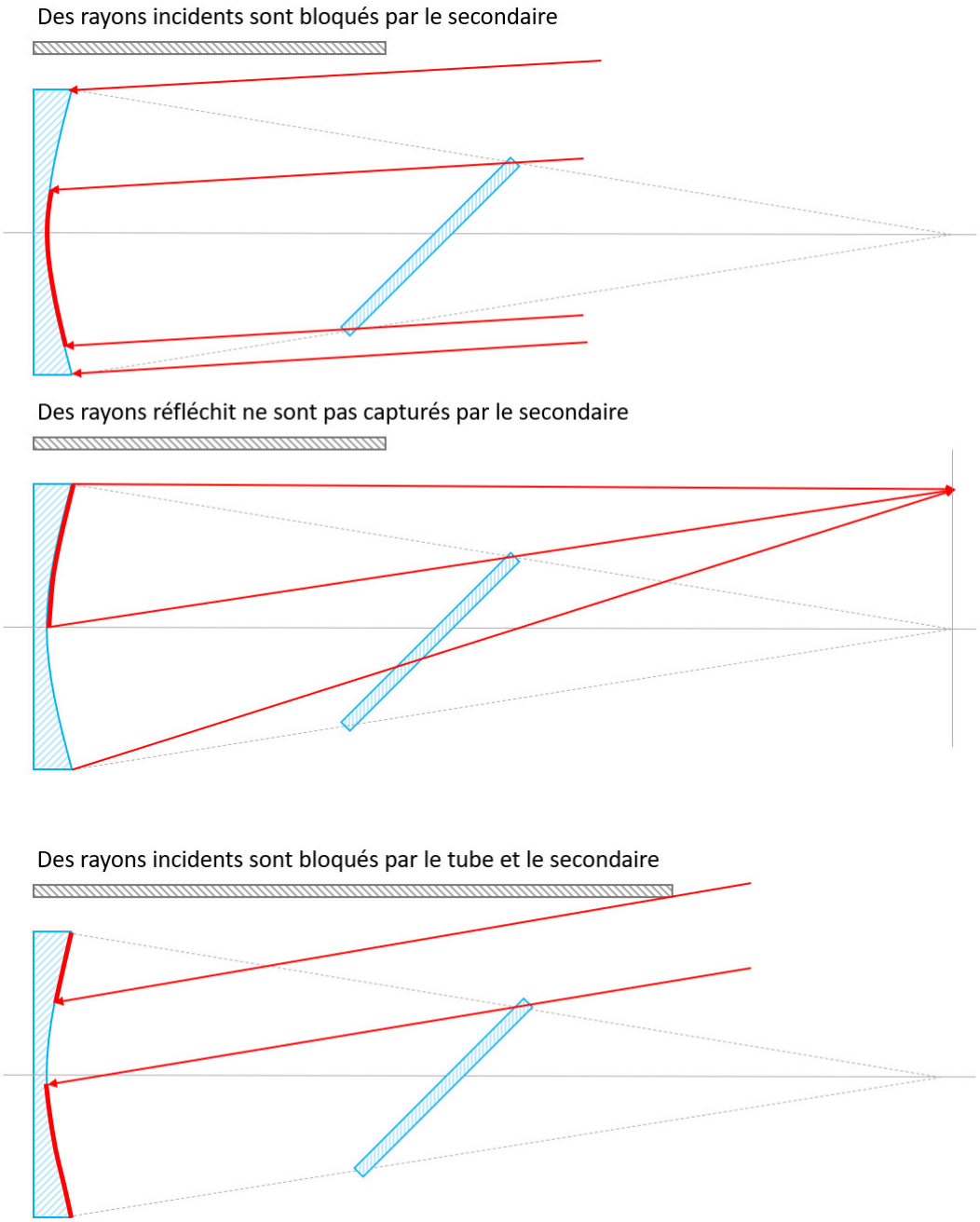


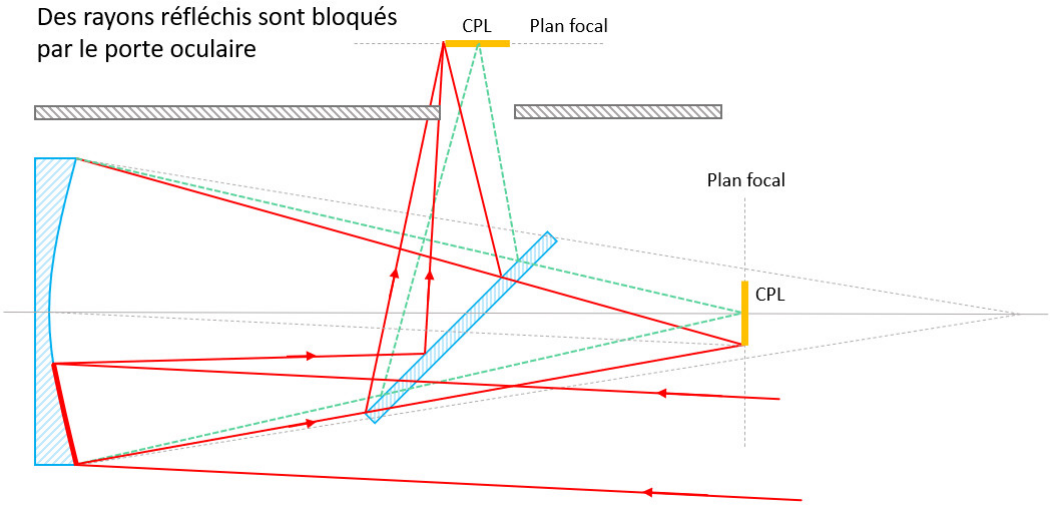
Credit : Tamiji Homma

Le vignetting est causé par un obstacle au passage des rayons lumineux, cependant cette obstruction n'est pas toujours totale pour un même point image formé par l'instrument, ce qui se traduit par une baisse de luminosité localement en périphérie du champ.

Le champ TFOV est toujours vigneté soit par :

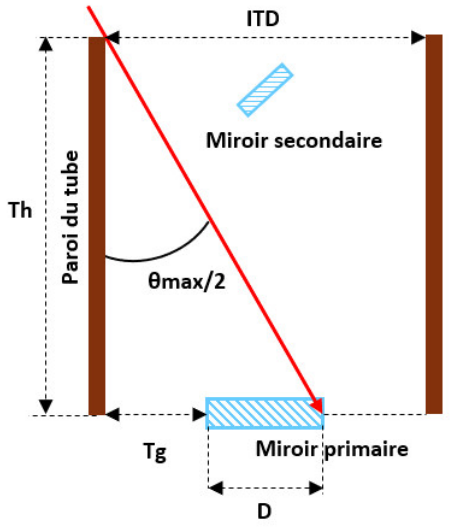
— Le tube de l'instrument (cas Newton / Dobson) : $\tan\theta_{\max}/2 = \frac{\text{ITD} + \text{D}}{2 \times Th}$
— Le tube de l'instrument (cas lunette) : $\tan\theta_{\max}/2 = D_{\text{tube instrument}}/2F$
— Le miroir secondaire qui ne peut pas capturer tous les rayons incidents (notion de champ pleine lumière)
— Le porte-oculaire (cas Newton / Dobson et Lunette) : $\tan\theta_{\max}/2 = (1.25\text{" ou } 2\text{"})/(fb + fh + \text{DTT})$
— L'oculaire : $\theta_{\max} = 57.3°\text{fstop}/F$





Credit : J.G. Gricourt

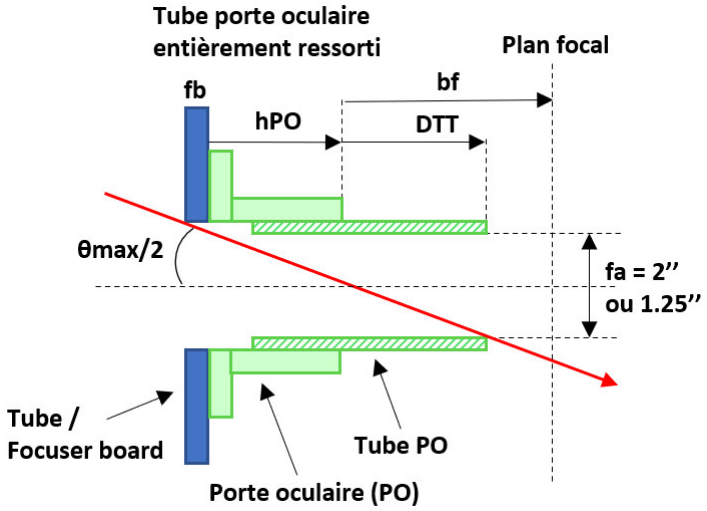
Champ limité par le tube du Dobson



Credit : J.G. Gricourt

6

Champ limité par le tube du PO complètement sorti



Credit : J.G. Gricourt

Note : sur un dobson en général $Th \approx f - p$ *où* p = *distance du secondaire foyer (axe optique).*

Toutefois, il faut affiner ces calculs grossiers pour savoir quel est le backfocus maximal que l'on s'autorise afin de ne pas vigneter un champ v donné en mm, mais aussi le diamètre du tube du télescope minimal pour ne pas vigneter le champ v donné en mm à l'entrée du télescope (voir chapitre sur la conception des télescopes).

Diaphragme de champ ou "Field Stop" désigne en général la pièce ressemblant à une rondelle opaque placée à l'entrée de l'oculaire, le plus souvent exactement au niveau de son plan focal d'entrée et dont le diamètre détermine le champ réel TFOV produit par l'oculaire. Le diaphgramme de champ permet de réduire la surface de la lentilles externe exposée à la lumière sont rôle est de masquer les bords de la lentille en général moins qualitatifs du point de vue de la forme que le verre au centre. Lorsque le diaphragme de champ est placé sur le plan focal d'entrée de l'oculaire alors le bord du champ est net (pas de vignetting). Si le diaphragme de champ était plutôt positionné plus à l'intérieur de l'oculaire ou à l'extérieur de l'oculaire, alors le bord du champ serait perçu plus flou et donc avec un vignetting avant extinction totale.

Certains oculaires comportant une barlow intégrée ou “Smyth Lense” (ex : TV Nagler, TV Ethos, Pentax XW) possèdent un field stop qui n’est plus devant les premières lentilles de l’oculaire (au niveau de la jupe) mais quelque part l’intérieur de l’oculaire au milieu du jeu de lentilles [192]. Pour rappel, c’est en faisant coïncider le plan focal d’entrée de l’oculaire avec le plan focal de sortie de l’instrument que l’on réalise la mise au point.



Credit : Firstlightoptics

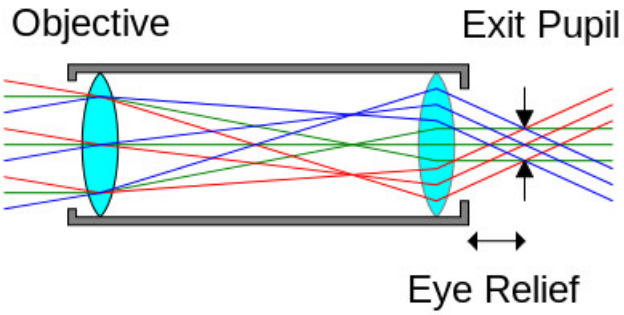
Le constructeur Tele Vue donne la dimension (colonne field stop) et la position (colonne F) du field stop de ses oculaires sur son site [708].

Clear Aperture désigne le champ maximal permit par un instrument avant l’utilisation d’un oculaire qui limitera à nouveau le champ du fait de son diaphragme de champ. Les portes oculaires au coulant 2" laissent passer 50.8 mm maximum de “Clear Aperture” si l’instrument en permet plus, il faut alors utiliser un porte-oculaire en 3" mais dans ce cas, il n’existera pas forcément des oculaires capables d’exploiter autant de champ.

Le passage au 2" permet :

— D’utiliser des oculaires UWA (Ultra Wide Field) de 82° à 100° de champ
— D’éviter le vignettage des images avec l’utilisation de caméra à capteur large

Dégagement Oculaire ou “Eye Relief” ou “Tirage d’anneau” ou “Soulagement des yeux” désigne la distance optimale entre la surface du cristallin de l’oeil et la surface de la dernière lentille de l’oculaire. Cette distance correspond exactement à la distance de la pupille de sortie, là où tous les rayons lumineux sortant de l’oculaire se croisent et où le champ perçu est alors maximal. Si la pupille de l’oeil est placé trop en avant ou trop en arrière de cette position, le champ sera diminué, voir “Blackout effect” et “Kidney Bean effect”. En général, la position idéale de l’oeil est plus difficile à tenir avec des oculaires à long dégagement oculaire, à moins qu’une bonnette réglable soit prévue pour reposer l’oeil (ex : Pentax XW). Aussi, les porteurs de lunettes ne pourront pas se rapprocher suffisamment de la position idéale avec des oculaires à court dégagement oculaire. Soit, ils devront les retirer pour observer ou si cela n’est pas possible (les astigmates) ils devront utiliser des oculaires procurant des dégagements oculaires d’au moins 16 mm. L’introduction d’une barlow (non télécentrique) dans le train optique induira un rallongement du dégagement oculaire.



Credit : Wikipedia

Par construction, la lentille de champ = Eye Field Lense = D_e minimum dépend du dégagement oculaire ER et du champ apparent de l'oculaire AFOV [193], au delà de cette valeur minimum le champ apparent sera vignetté :

$\mathrm{De}_{\min} = 2 \times \tan(\mathrm{AFOV}/2) \times \mathrm{ER}$

Il faut aussi prendre en compte le fait que la lentille de champ est concave ou convexe dans ce calcul [193] (concave on retranche la différence du calcul et convexe c'est l'inverse) [193]. Dans l'autre sens cette forumule donne aussi le ER maximum avant que le champ apparent ne soit vignetté.

Le dégagement oculaire total FER permettant à l'utilisateur de voir tout le champ apparent fourni par l'oculaire dépend de la pupille de sortie résultante de l'instrument $p_t = D/G$, de l'ouverture de la pupille de l'oeil p_o, du champ apparent AFOV de l'oculaire et du dégagement oculaire spécifié par le constructeur ER :

$\mathrm{FER} = \mathrm{ER} + \frac{p_o - p_t}{2 \times \tan(\mathrm{AFOV}/2)}$ [8]

De manière générale, plus la focale de l'oculaire est courte et le champ apparent est élevé, plus le dégagement oculaire sera court.

Dégagement oculaire court ER < 15mm

Oculaire	Focale
Plössl	< 20 mm
TV Nagler	< 16 mm
Kokusaï Kohki Fujiyama HD Ortho	< 12.5 mm
Orion EF (Kellner)	< 8 mm

Credit : J.G. Gricourt

Pour éviter une perte de dégagement oculaire et de champ apparent lorsque la focale de l'oculaire est courte les designers rajoutent un groupe de lentille de type barlow = "Smyth Lense" pour conserver le dégagement oculaire et le champ apparent (et le confort d'utilisation) [225]. La présence de cette "Smyth Lense" réduit légèrement le champ apparent, on parlera de "Effective Field Stop" pour calculer le champ apparent avec ce type d'oculaire [425].

Parfocal désigne une série d'oculaires pour lesquels la mise au point ne change pas lorsqu'on change un oculaire par un autre de la même série. C'est le cas des oculaires Tele Vue : Plössl, Delos, Delite et Nagler. Pour rendre parfocal des oculaires entre eux, on peut aussi ajouter des anneaux judicieusement positionnés sur leur juppe.

8. D.D. Maksutov : Astronomical Optics - Chapter 25 - 1946

Ombre du secondaire ou “Secondary Shadow” désigne la tache centrale sombre visible lorsqu'on utilise des oculaires présentant une pupille de sortie supérieure à la pupille de l'oeil. Cette tache représentant le miroir secondaire. La pupille de l'oeil trop petite diaphragme le primaire et donc l'obstruction relative par le secondaire augmente mécaniquement, parfois à plus de 50% et alors le secondaire (son ombre) devient perceptible dans le champ.

Edge Of Field Brightening ou “EOFB” désigne un défaut présent dans certains oculaires caractérisés par une augmentation de la luminosité du fond du ciel au bord du champ (le centre est noir et le bord grisâtre). Ce défaut consiste en une réduction contraste de l'image donnée par l'oculaire, ce qui est préjudiciable pour l'observation du ciel profond. Cet effet est différent de l'effet “Ring of fire”. On peut le voir comme l'effet inverse du vignetting. Un oculaire connu pour avoir cet effet sont les Luminos ou le Baader Morpheus 4.5 mm. Cet effet est toutefois plus gênant dans l'observation du ciel profond.

Il peut y avoir plusieurs causes [214, 217] :

— De la diffusion “Light Scatter” provoquée par l'absence de noircissement des bords des lentilles et du barillet intérieur de l'oculaire
— De la diffusion “Light Scatter” provoquée par le manque de bafflage à l'intérieur de l'oculaire qui empêcherait l'entrée de lumière parasite
— En raison de la distorsion de grossissement angulaire ou AMD (distorsion en coussinet), le bord du champ étant compressé (moindre grossissement) il concentre plus la lumière du fond du ciel.

De plus, l'EOFB s'étend plus dans le champ à mesure que le rapport F/D de l'instrument diminue.

Rolling Ball Effect ou “Rolling Eye Effect” ou “Fish Bowl Effect” ou “Globe Effect” désigne l'effet produit sur l'image lorsque l'on utilise un oculaire ayant de la distorsion rectilinéaire et que l'on scanne le champ avec l'instrument. Les objets passant du centre vers le bord semblent se compresser en raison du grossissement plus faible au bord qu'au centre. La distorsion est bien réelle, mais l'effet Globe lui est fabriquée par le cerveau regardant au travers une ouverture circulaire. Pour atténuer cet effet il suffit d'utiliser des oculaires rajoutant de la distorsion en coussinet (Pincushion distortion) [345].

Instrument / Oculaire / Blackout Effect ou “Vignetting Effect” désigne l'effet produit lorsque l'oeil n'est pas positionné à la bonne distance de la lentille frontale de l'oculaire (distance de “Eye Relief”) alors l'oeil ne perçoit qu'une partie du champ produit par l'oculaire [191]. Si l'oeil est trop en avant alors les bords du champ deviennent progressivement noirs (le champ est vigneté) et si l'oeil est trop en arrière le champ est coupé net et devient noir en raison de la présence du field stop.

L'effet est maximal dans les conditions suivantes :

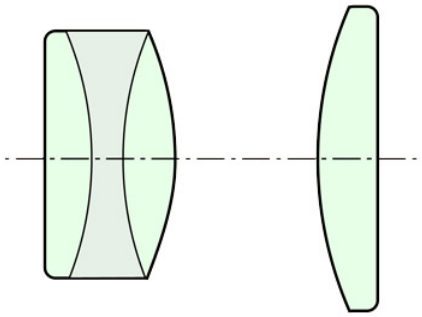
— Sur les oculaire à courte focale et long dégagement oculaire comme les TV Radians et Pentax XW
— Lorsque la pupille de sortie de l'instrument $p_t = D/G$ est grande par rapport à celle de notre oeil (vision de jour)

Pour ces oculaires il est plus difficile de maintenir l'oeil exactement dans la position idéale.

Globe Effect désigne l'effet produit sur l'image lorsque l'on utilise un oculaire exempt de distorsion rectilinéaire (distorsion en barillet) et que l'on scanne le champ avec l'instrument. Les objets semblent passer par-dessus une surface convexe (une sphère).

Flash light test désigne un test permettant de déterminer avec précision le champ apparent d'un oculaire. Ce test consiste à envoyer une lumière forte (lampe torche) sur l'objectif de l'instrument afin de mesure l'angle du faisceau ressortant par l'oculaire et projeté sur un écran [63].

Orthoscopique désigne un type d'oculaire inventé par Ernst Abbe, c'est le premier à proposer une excellente correction des aberrations optiques. Il est aujourd'hui dédié à l'observation des planètes. Dans un oculaire orthoscopique les ligne droites sont vues droites. Les oculaires orthoscopiques sont nécessairement des oculaires à champ réduits de 30 à 50° maximum pour garder leur caractéristique car à mesure que le champ d'un oculaire augmente il perd de ses caractéristiques orthoscopiques et alors apparait de la distorsion rectilinéaire car $\tan \alpha \approx \alpha$ seulement pour de petits angles.



Credit : Hyperphysics

Ce type d'oculaire est constitué de 4 lentilles, montre 45° de champ et possède les propriétés suivantes :

1. Champ apparent réduit (max 40°)
2. Corrigé pour la distorsion rectilinéaire et angulaire
3. Dégagement oculaire réduit (inférieur à 5 mm)
4. Insensible aux réflexions parasites (ghosting)
5. Absence de chromatisme.
6. Absence d'aberrations

Monocentric désigne un type d'oculaire : TMB Super Monocentric, ZAO, Pentax XO, composé d'un triplet ne comportant aucune transition surface/verre et dont la transmission lumineuse est proche de 100%. Ce type d'oculaire à la particularité de montrer des images très contrastées. Le monocentric comporte un champ apparent ne dépassant pas les 30° et un dégagement oculaire très court. Ce type d'oculaire doit être utilisé avec des instruments de rapport $F/D > 6$ pour que le champ vu net soit exploitable.

6.8.4 Les Barlows

Barlow désigne une pièce optique composée d'une lentille divergente capable d'allonger virtuellement la focale d'un instrument et donc de décupler le grossissement d'un oculaire. La barlow est caractérisée par son coefficient multiplicateur nominal, ex : x2, x2.5, x3, x5. Si un oculaire de 10 mm produit un grossissement de 100x pour un instrument de 1000 mm de focale, alors une fois inséré dans une barlow x2 celui-ci produira un grossissement de 200x. Cependant si on n'insère pas complètement l'oculaire dans la barlow ce coefficient sera plus fort car on vient de changer le tirage de la barlow dans ce cas.

Il existe aussi des barlows spécialisées dédiées à certains usages ou instruments :

— Barlow correcteur de coma pour Newton de ratio F/4 : APM Comacorr x1.5 et x2.7 (avec rallonge)
— Barlow correcteur de courbure de champ pour Lunette : Barlow Adriano Lolli x1.5, Baader Vip Barlow, APM Comacorr x1.5 et x2.7 (avec rallonge)
— Barlow conservant le parallélisme des rayons sortants pour les filtres interférentiels ce sont les barlows télécentriques = "Tele-Extender", ex : TV Powermate

Note : la barlow APM Comacorr n'a pas de "Tunable Top" comme pour le TV Paracorr II afin de régler précisément le backfocus selon l'oculaire utilisé.

Le tirage T est la distance entre la barlow et le nouveau plan focal projeté en général sur un capteur photo en imagerie .

Le facteur multiplicateur réel est légèrement différent du facteur multiplicateur nominal de la barlow :

— Selon l'oculaire utilisé
— Lorsqu'on insère la barlow avant le renvoi coudé de la lunette

Note : dans les 2 cas la distance entre la barlow et le plan focal de l'instrument change légèrement et donc le tirage aussi.

En imagerie le grandissement de la barlow se calcul par : $\gamma = \frac{F_b}{F_b - s}$ où F_b est la focale de la barlow et s est la distance de la lentille frontale de la barlow au plan focal de l'instrument (situé après la barlow) à ne pas confondre avec le tirage T qui est plus long.

La dimension de la projection de l'image sur le capteur augmente donc avec la distance entre la barlow et le capteur.

En visuel le grossissement de l'image augmente avec la distance de l'oculaire à la barlow, cependant lorsque l'oculaire est inséré dans la barlow cette distance est fixe par construction et produit théoriquement le facteur multiplicateur indiqué par le constructeur.

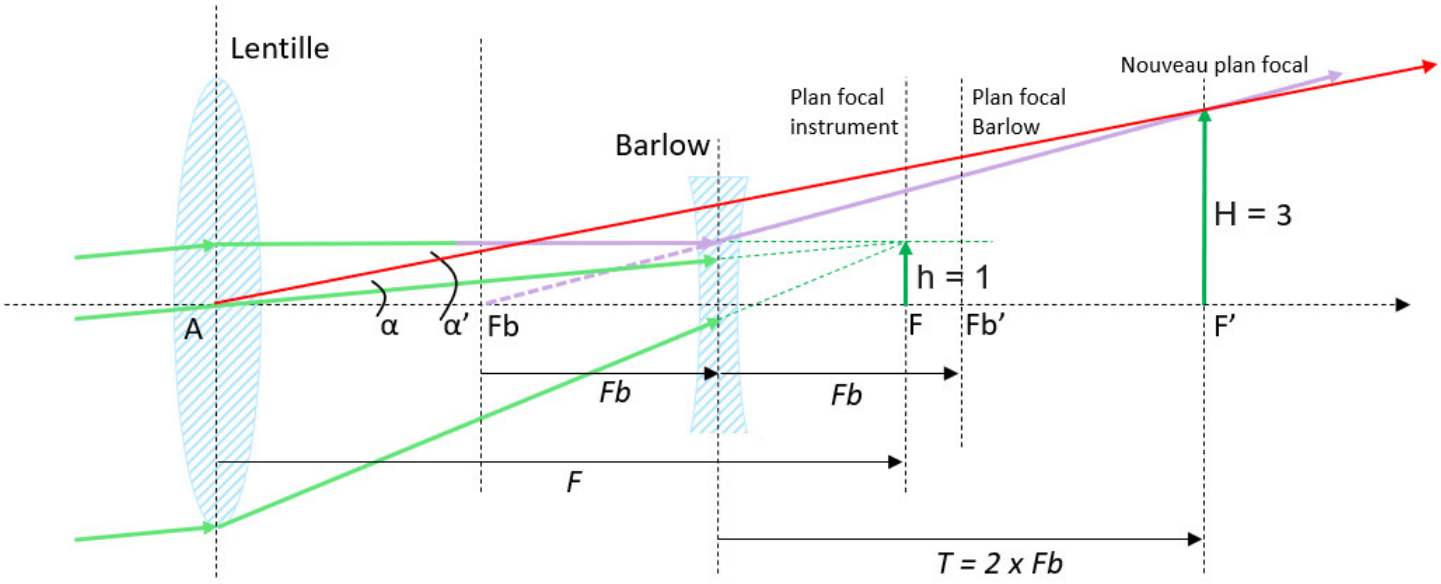
Dans tous les cas il suffit donc d'ajouter une bague de tirage pour augmenter le facteur multiplicateur inscrit sur la barlow. L'agrandissement de l'image sur le (nouveau) plan focal se calcul comme suit : $\gamma = \frac{F_b + T}{F_b}$ où T est le tirage de la barlow, c'est à dire la distance entre la lentille de la barlow et le nouveau plan focal projeté en arrière.

Cas de figure :

— Si $T = 1$ alors l'amplification γ sera de 1
— Si $T = F_b$ alors l'amplification γ sera de 2
— Si $T = 2F_b$ alors l'amplification γ sera de 3

Le "Backfocus" = T de l'instrument est augmenté d'autant avec la barlow : $T = F_b \times (\gamma - 1)$.

Barlow classique de coefficient multiplicateur de x3

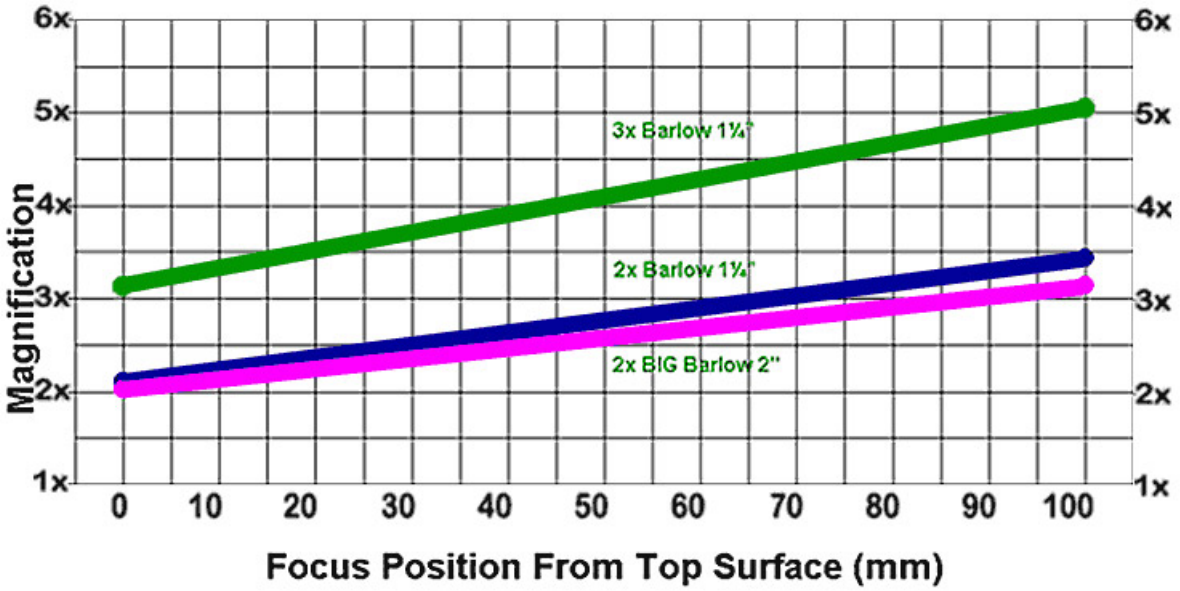


Credit : J.G. Gricourt

Note : pour de très petits angles on a $\gamma = \alpha'/\alpha = H/h$

La barlow classique contrairement aux barlows de type Focal Extender ou Powermate, permet par le tirage de faire varier le grandissement, une propriété très utile en astrophoto pour faire varier l'échantillonnage afin d'adapter l'instrument au capteur photo.

Tirage de la Barlow Tele Vue



Credit : Tele Vue

Les aberrations qui ne sont pas corrigées par la barlow :

— La coma des Newton [182] (excepté la barlow APM Comacorrecting x2.7 ou x6.5 qui est aussi un correcteur de Coma)

— L'aberration de sphéricité [182]
— L'astigmatisme
— La courbure de champ caractéristique des lunettes courtes
— L'aberration chromatique ne transforme donc pas une lunette courte en lunette de longue focale

Inconvénients de la barlow :

— Produit l'allongement du "Eye Relief" ce qui peut rendre le positionnement de l'oeil plus difficile pour ceux qui ne porte pas de lunette
— Amplifie les aberrations hors axe
— Amplifie l'aberration sphérique de la pupille de sortie des oculaires de longues focales
— Amplifie l'aberration chromatique de l'instrument [190]
— Les barlows à fort coefficient multiplicateur peut produire du vignetting avec des oculaires donc la lentille de champ = Field Lense n'est pas suffisamment large pour capturer le faisceau

Ces effets seront d'autant plus importants si le facteur multiplicateur de la barlow est élevé et que la barlow est non télécentrique :

L'allongement du ER peut se calculer de manière empirique par la formule suivante [60] : $\frac{\Delta \text{ER}}{\text{ER}} = 5 \times \frac{\gamma}{F_b}$ où γ est le facteur multiplicateur nominal de la barlow et F_b est la focale de la barlow.

Autres effets :

— La barlow augmentant le "Eye Relief" de l'oculaire utilisé ce qui peut être bénéfique pour certains oculaires dont le ER est trop court (porteurs de lunettes)
— En diminuant l'angle du cône de lumière (et l'angle d'incidence des rayons lumineux) la barlow atténue les aberrations produites par les oculaires simples (Plössl) dans le cas des instruments à focale très courte [385, 291]
— La barlow de courte focale de type "Shorty" allonge le "Eye Relief", introduit une aberration de sphéricité sur l'instrument (sur-correction) et provoque une perte de champ (vignetting) qui n'existe pas avec une barlow télécentrique [695, 656]

Il faut plutôt voir l'effet de la barlow comme une réduction de la focale de l'oculaire et non comme un allongement de la focale de l'instrument.

Roland Christen à dit : *Because of the nature of Barlows and where they reside in the optical train, they neither add nor subtract chromatic aberration in any meaningful way. They only amplify whatever color error is already present in the image, an error that is fully caused by the telescope objective lens itself. If the objective is a mirror, then no color is added, whether it is a 2 element normal Barlow or 3 element "apo" Barlow.* [427].

Cependant, la barlow affectant le grossissement, la pupille de sortie sera aussi réduite. Lorsqu'on utilise un Paracorr il faut toujours mettre la barlow 2" en premier dans le porte-oculaire et ensuite le Paracorr et faire exactement l'inverse avec une barlow 1.25" [183].

Réducteur où "Réducteur de focale" désigne la barlow permettant de réduire la focale d'un instrument afin de diminuer son rapport F/D dans le but de diminuer les temps de pose en imagerie. Les instruments de longue focale peuvent bénéficier d'un réducteur de focale, mais aussi l'imager en visuel assisté (VA) où la réduction du temps de pose est primordiale. Le tirage est la distance entre le réducteur et le plan focal (ou le capteur). En visuel c'est comme la barlow le réducteur agit sur l'oculaire mais à l'inverse de la barlow en multipliant la focale de l'oculaire par le facteur de réduction du réducteur. En imagerie, la projection de l'image sur le capteur diminue avec la distance entre le réducteur et le capteur, de même qu'en

visuel le grossissement de l'image diminue avec la distance entre le réducteur et l'oculaire. Il suffit donc d'ajouter une bague de tirage pour diminuer le facteur multiplicateur inscrit sur le réducteur. La réduction se calcul comme suit : $\gamma = 1 - \frac{T}{f_r}$ où T est le tirage et f_r la focale du réducteur. Le "Backfocus" est diminué d'autant avec le réducteur : bf $= F \times (1 - \gamma)$. La longueur du tube étant fixe, la réduction de focale se fait sur la section sortant du tube.

Focal Extender désigne une barlow de type télécentrique de la marque Explore Scientific tout comme "Powermate" désigne une barlow de type telecentric de la marque Tele Vue.

Barlow Télécentrique ou "Amplificateurs Télécentrique" ou ou"Tele-Extender" désigne un type de barlow nommée Powermate par Tele Vue ou Focal Extender par Explore Scientific ou Telextender par Meade. Avec la barlow classique les rayons lumineux sortant divergent alors qu'avec la barlow télécentrique les rayons lumineux ressortent à angle d'incidence faibles (presques parallèles entre eux). Les barlow classique modernes ne dégradent plus les images et sont aussi performantes que les barlows télécentriques (ex : Tele Vue Powermate).

Une barlow télécentrique possède les propriétés suivantes comparées à une barlow classique :

1. L'amplification (ou le grandissement résultant en imagerie) n'augmente pas avec le tirage, c'est-à-dire avec une variation de la distance du capteur à la barlow
2. Le grandissement résultant sur le capteur photo n'augmente pas avec l'augmentation du tirage, c'est-à-dire avec une variation de la distance du capteur à la barlow
3. Le grossissement résultant en visuel n'augmente pas avec l'augmentation du tirage, c'est-à-dire avec une variation de la distance de l'oeil à la barlow
4. Le vignetting, les aberrations hors axe et l'aberration sphérique de la pupille de sortie des oculaires de longues focale ne sont pas amplifiés [385, 291]
5. N'allonge pas le dégagement oculaire des oculaires ("Eye Relief")
6. Fait aussi office d'aplanisseur de champ (réduction de la courbure de champ)
7. En raison de l'angle d'incidence plus faible des rayons sortant de ce type de barlow celle-ci fonctionne mieux avec des oculaires plus simples ainsi que les filtres Etalon en imagerie solaire $H\alpha$ [385]
8. Même à fort coefficient multiplicateur le risque de vignetting par la lentille de champ = Field Lense de l'oculaire est évité.
9. Parfocale avec la plupart des oculaires

Note : d'après la formule le tirage de la barlow désigne réellement la distance de la lentille de la barlow par rapport au nouveau plan focal cependant certains utilisateurs parleront de tirage pour la distance entre la lentille de la barlow et le plan focal de l'instrument

Lorsqu'on utilise un Paracorr il faut toujours mettre la Powermate 2" en premier dans le porte-oculaire et ensuite le Paracorr et faire exactement l'inverse avec une Powermate 1.25" [183, 704].

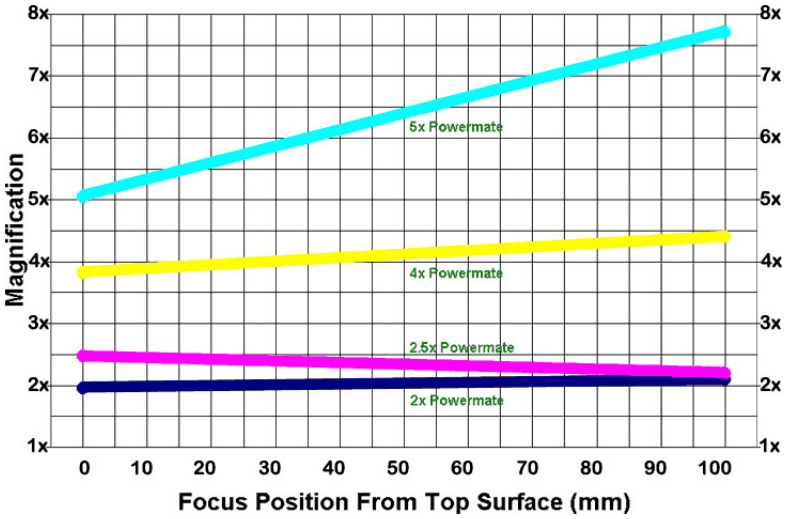
En général ce type de barlow est de très grande qualité optique car elle transmet le flux lumineux sans perte (ex : les Powermates de Tele Vue).

Attention, en photographie classique, un "Telextender" ou "Teleconverter" est un dispositif optique qui se place entre le boîtier et l'objectif dont le rôle est de multiplier la focale de l'objectif.

Powermate ou "Telecentric Barlow" désigne une barlow de type télécentrique fabriqué par la société Tele Vue. Voir "Barlow Télécentrique".



Credit : Optique Unterlinden



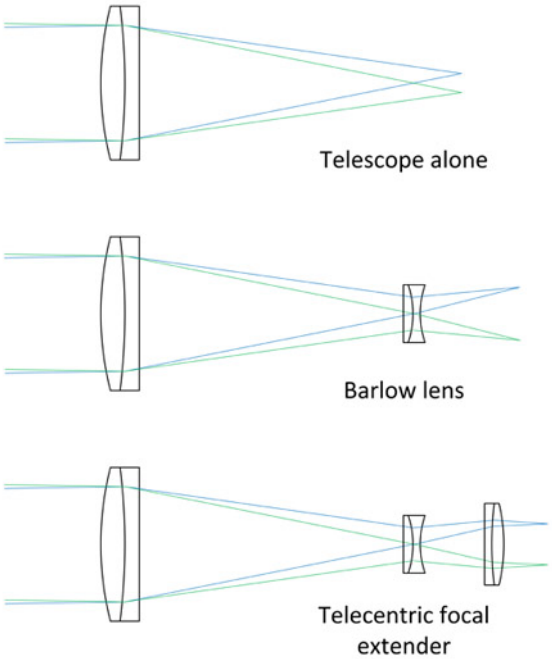
Credit : Tele Vue

Note : seule la TV Powermate x2 est une pure télécentrique car son amplification ne varie pas avec le tirage (droite horizontale).

Contrairement à une barlow une Powermate (barlow télécentrique) [44]

- Ne modifie pas le dégagement oculaire “Eye Relief” de l’oculaire (sauf la Powermate x5)
- Ne change pas le grandissement lors de l’augmentation du tirage (sauf la Powermate x5)
- N’amplifie pas le vignetting ni les aberrations de l’oculaire.
- Tout comme la barlow la Powermate ne corrige pas les aberrations chromatiques

Barlow versus Powermate



Credit : Michael A. Covington

6.8.5 Les Correcteurs

Correcteur de champ ou “Aplanisseur” ou “Field Flattener” désigne un correcteur optique utilisé pour annuler la courbure de champ affectant principalement les lunettes courtes. Ce correcteur est d’abord utilisé en imagerie où cette aberration est la plus visible. Ce correcteur est très souvent associé à un réducteur de focale. En visuel l’oeil corrige de lui-même les défauts de focalisation s’ils ne sont pas trop prononcés grâce à l’accommodation donc un correcteur n’est pas utile.

Pour utiliser un aplanisseur il faut respecter la distance entre la lentille de sortie de l’aplanisseur et le capteur photo ‘Correct Distance to Chip‘” préconisé par le fabricant.

Caractéristiques :

— Distance correcteur / capteur = distance derrière le plan focal
— Plage de rapport F/D préconisé pour l’instrument

Paracorr désigne le nom d’un correcteur de coma de la marque Tele Vue. Le Paracorr annule la coma sur la totalité du champ en augmentant la CFF, et cela, jusqu’à F/3.5. Il est particulièrement optimisé pour les Newton de rapport F/D court ($F/D \leq 5$) car plus le rapport F/D est court, plus la coma produite par le miroir primaire sera importante. À noter qu’une barlow en réduisant le rapport F/D n’aura aucun effet sur la coma qui est propre au miroir, il faut plutôt voir la barlow comme un réducteur de focale de l’oculaire dans ce cas. Il existe plusieurs versions du correcteur : Paracorr type 1, Paracorr type 2, Paracorr SIPS, Big Paracorr type 2. Le Paracorr II corrige complètement la coma à F/3.5 sur 40 mm minimum de champ soit en angle (radian) : Champ corrigé $\approx 40/f$ [9] soit Champ corrigé (°) $= 2292/f$. De plus le Paracorr II multiplie la focale par 1.15 et nécessite 3/4" de “Inward drawtube travel” par rapport à la position de mise au point de l’oculaire sans le correcteur. Aucun oculaire de Tele Vue ne corrigent vraiment la coma en pratique même si certains oculaires TV Nagler corrigent marginalement un peu de coma, c’est surtout l’astigmatisme hors axe qui est la correction principale donc c’est un mythe très courant qui perdure, car seul le TV Paracorr annule la coma [29].

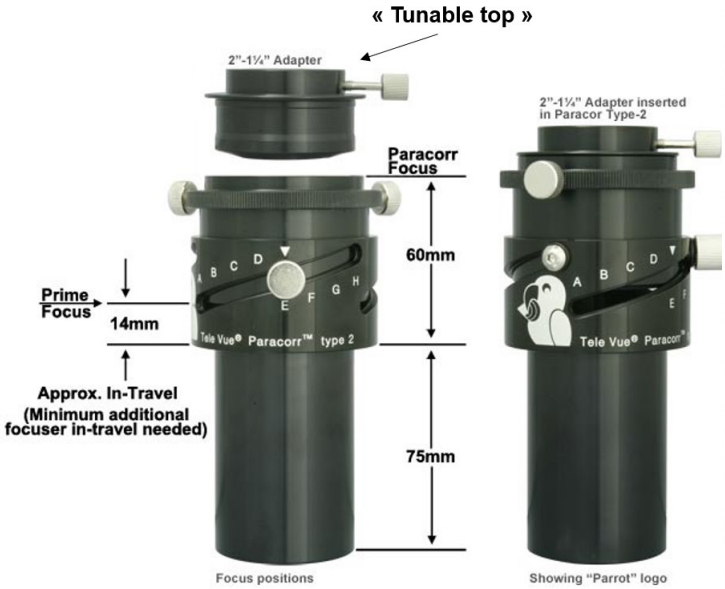
Compte tenu des différentes épaisseurs au-dessus de la lentille de champ, le plan focal doit se trouver à une certaine distance au-dessus du bord du PO pour le correcteur Paracorr II :

1. Recommandé par Tele Vue 0.75 inch = 19 mm [701]
2. Recommandé par Don Pensack et Sixela 1" = 25.4 mm [176, 186, 662]

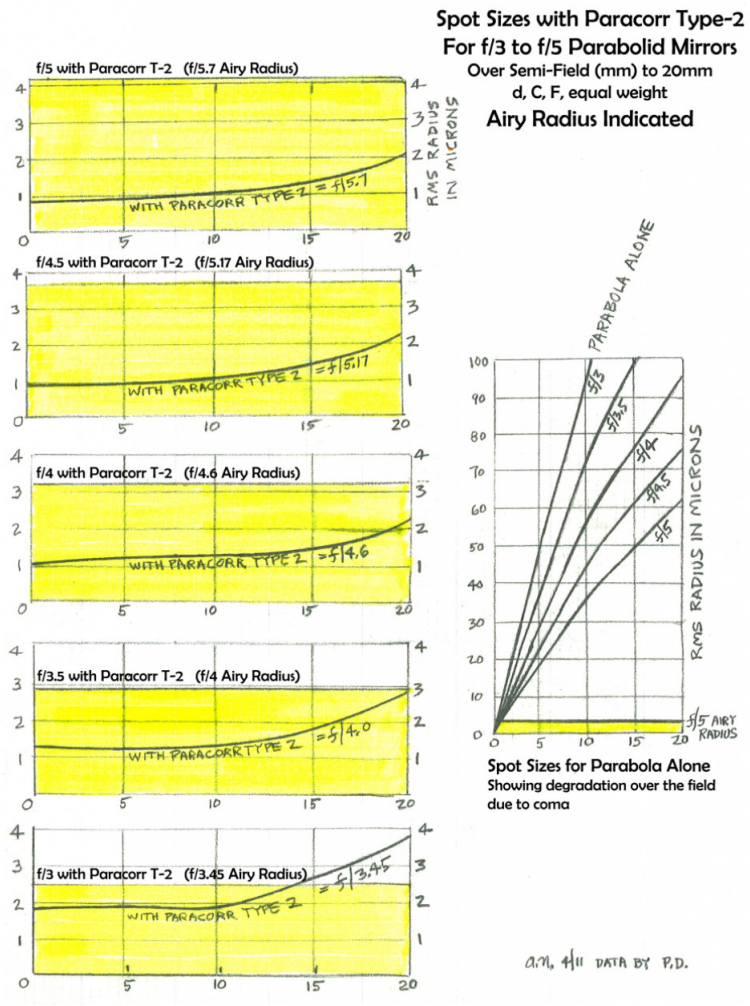
Donc un “Backfocus” de 1" pour :

— Prendre en compte les 3/4" = 19mm minimum de “Backfocus” recommandé par Tele Vue (14mm sur les schémas)
— Permettre aussi un usage sans le correcteur
— Prendre en compte les oculaires dont la position des field stop est aux extrêmes : Ethos 8 mm (+0.7") et Nagler 31 mm (-0.38")
— Pour prendre en compte les utilisateurs myopes

9. tan a = a si a petit



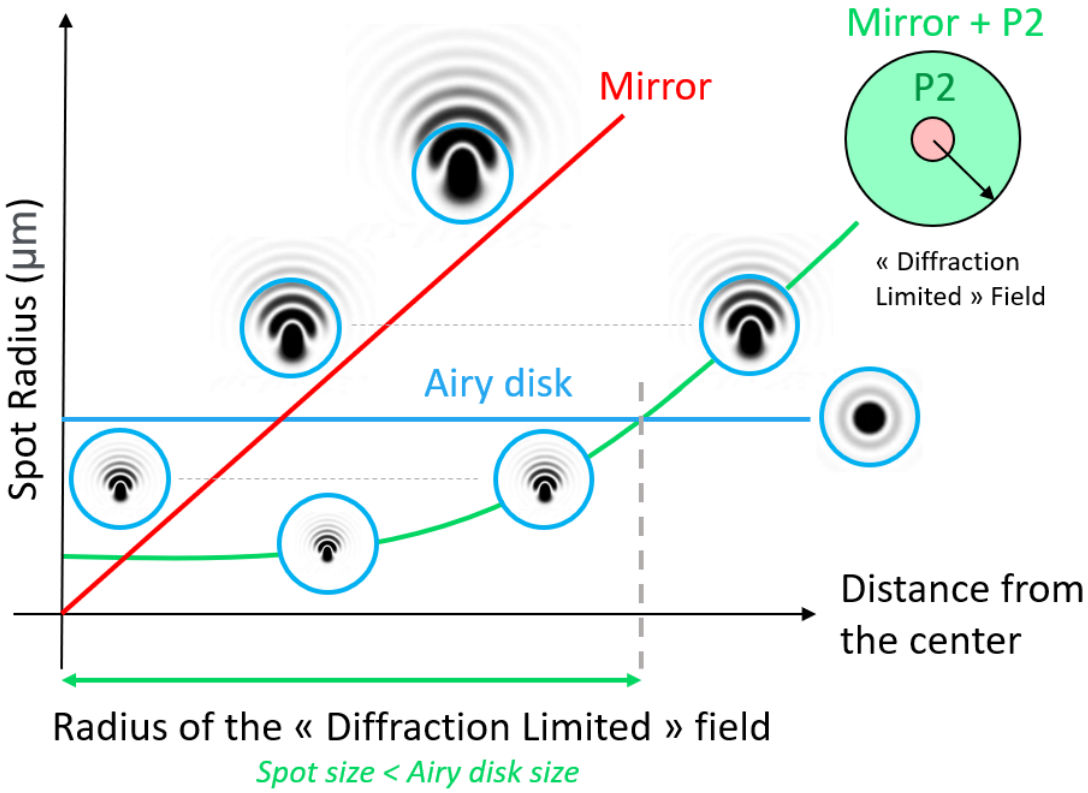
Credit : The Widescreen Center



Credit : Tele Vue

Note : le facteur mulitplicateur du TV Paracorr II est de $\times 1.15$.

Effet du correcteur P2



Credit : J.G. Gricourt [711]

Tele Vue indique qu'un télescope F/3 doté du Paracorr II montrera autant de coma qu'un télescope F/12 et dans le même temps l'effet barlow fait passer le rapport F/D à F/3.45 (×1.15).

Le principe est que le bloc correcteur de coma du Paracorr classique ou de la version SIPS doit se situer à une distance précise et fixe du plan focal. En insérant l'oculaire, il faut alors régler la mise au point soit avec le "Tunable Top" avec la version classique soit avec la molette du porte-oculaire avec la version SIPS. La version SIPS = "Starlight Integrated Paracorr System" est donc un Paracorr II dépourvu du "Tunable top" car non nécessaire la correction d'adapte automatiquement aux oculaires insérés [445].

Pour régler la mise au point du porte oculaire :

1. Insérer le Paracorr et insérer un oculaire Tele Vue dans le Paraccor
2. Positionner le "Tunable Top" selon la valeur de graduation indiquée Tele Vue : Paracorr Type-2
3. Ajuster la mise au point

Lorsqu'on utilise un oculaire dont la marque ne fournie pas cette information, il suffit de [707] :

1. Réaliser le réglage précédent (mise au point ud porte oculaire)
2. Insérer un nouvel oculaire
3. Retoucher la mise au point uniquement en bougeant le "Tunable Top"

Donc une fois le Paracorr en place et le porte oculaire réglé il ne faut toucher que le "Tunable Top" pour réaliser la mise au

point. Le Paracorr II a pour effet de déplacer le plan focal natif de 47mm [705] plus loin en arrière (effet Barlow) précisément là, on se trouve le “Tunable Top” utilisé pour faire la mise au point des oculaires. Le nouveau plan focal est à 55-60 mm au-dessus de la juppe du correcteur. Le plan focal natif doit être à 0.75" au-dessus de la juppe du correcteur

Position du Paracorr II selon la position du field stop par rapport au bord de l’oculaire

-	A	B	C	D	E	F	G	H
Step	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
Fstop Pos. (inch)	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3

Credit : J.G. Gricourt

Relation : step $= \frac{\text{Fstop Pos.}}{2.54}$, lorsque Fstop Pos. > 0 le Fstop est en dessous du bord du porte oculaire et au dessus si Fstop Pos. < 0 [708, 714]

Le correcteur TV Paracorr II vignette le champ et produit un champ pleinement illuminé FIF (CPL) selon le ratio F/D [517] :

Parracorr II vignetting pour une focale de 60" = 1524mm

Aperture	Fully Illuminated Field
F/5.0	31.6 mm
F/4.5	29.8 mm
F/4.0	27.9 mm
F/3.5	26.0 mm
F/3.0	22.4 mm
F/2.5	14.0 mm

Credit : Tele Vue : 2" Paracorr Type-2 light Fall Off in your ultra-fast Dob?

Contrairement au Paracorr II le Paracorr SIPS ne nécessite de faire qu’une mise au point classique [665]. Le plan focal doit être placé à exactement 88 mm au-dessus de la lentille d’entrée du SIPS [679]. Le principe du SIPS ou du Paracorr II est de faire varier la distance entre l’oculaire inséré et la lentille correctrice qui reste fixe. Pour le Paracorr II, c’est le “Tunable Top” qui permet de faire varier cette distance et dans le cas du SIPS c’est le porte-oculaire lui-même.

Inconvénients du correcteur SIPS [205, 526] :

- Le SIPS dépasse un peu dans le champ du télescope et donc produit un peu de diffraction en obstruant la vue
- Le SIPS est limité en inward focus travel donc inadapté pour certains accessoires et les utilisateurs avec une forte myopie
- Le SIPS n’a pas de possibilité de visser des filtres
- Le SIPS ne parafocalise pas les oculaires
- Le SIPS ne peut pas être utilisé sur un autre dobson si le backfocus du téléscope n’a pas été optimisé dès la conception pour intégrer ce correcteur
- Le SIPS nécessite de retirer le bloc de lentilles = “Lense Group Part” pour collimater l’instrument avec un laser (sauf le laser barlowté où on le laisse en place)
- Le SIPS est proéminent vers l’exterieur également ce qui le rend plus exposé au choc lors du rangement du télescope
- Le SIPS ne permet pas l’utilisation d’une bino selon Tele Vue car il risquerait de frapper le bloc de lentilles
- Le SIPS utilisé avec un utilisateur souffrant de myopie ne produira pas une correction optimale (de la coma), il faudra

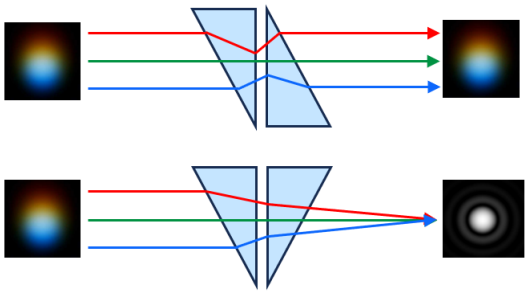
donc garder ses lunettes correctrices

Attention il serait possible d'utiliser le SIPS avec les binos de type "Linear" car ces dernières requièrent moins de "Inward focuser travel" (focus rentrant).

Le Paracorr II à l'énorme avantage de pouvoir être facilement prêté car il s'insérera dans n'importe quel instrument doté d'un porte oculaire et d'un backfocus standard.

ADC signifie "Atmospheric Dispersion Corrector" désigne un correcteur de dispersion atmosphérique. Ce correcteur permet de corriger la dispersion atmosphérique observée sur les planètes localisées relativement bas sur l'horizon, en général en dessous de 25° [400]. L'effet de dispersion atmosphérique est différent de la dispersion propre aux éléments optiques de l'instrument (objectif ou oculaire) car dans le premier cas, on perçoit un liseré rouge sur le limbe lunaire supérieur et un liseré bleu sur le limbe lunaire inférieur (donc selon l'axe vertical), alors que dans le second cas selon la focalisation un liseré coloré souvent vert ou jaune peut apparaitre sur tout le pourtour du limbe lunaire.

Effet de l'ADC



Credit : J.G. Gricourt

Ce correcteur permet un gain de résolution notable en observation visuelle et en imagerie planétaire. Pour ne pas introduire de l'astigmatisme, l'ADC doit fonctionner à F/15 minimum, donc il faudra rajouter une barlow avant sur les instruments à F/D court. L'utilisation d'une Powermate à la place d'une barlow rendra exactement les rayons parallèles à l'entrée de l'ADC qui alors fonctionnera mieux et l'utilisation de la Powermate sera d'autant plus intéressante que le F/D de l'instrument est court (rayons incidents très obliques).

Il existe plusieurs variantes de l'ADC selon la formule optique mais la plus efficace est celle composées de prismes de Risley. Ce type d'ADC est composé de 2 prisme dont l'un est orientable. Selon l'orientation du prisme l'ADC est capable de refocaliser les couleurs au même point focal.

De manière général l'effet de la dispersion est bien moindre que celui de la turbulence atmosphérique, donc l'ADC sera plus utile lorsque la turbulence atmosphérique sera faible afin de gagner encore des points de résolution lorsque les planètes sont basses par exemple.

6.8.6 Les Renvois Coudés

Renvoi coudé "Right Angle Diagonal" ou "Diagonal Mirror" ou "Prism Diagonal" ou "Star Diagonal" ou "Erecting Lense" désigne un élément optique permettant de renvoyer le faisceau lumineux produit par un instrument à 90° de sa direction initiale. On utilise le renvoi coudé le plus souvent sur les lunettes ou les SCT [796, 275]. Comme les oculaire les RC existent dans les 2 formats : 2 inch et 1.25 inch.

— Les RC au format 2 inch sont plus tolérant à la décollimation que ceux au format 1.25 inch.

— Les RC au format 1.25 inch possède un chemin optique plus court et seront adapté aux lunettes dont le back focus est insuffisant ou pour certaines configuration optique.

Le renvoi coudé peut être composé soit :

1. D'un prisme en verre
   (a) Prisme à 90° (image renversée)
   (b) Pentaprisme à 45° ou 90° (image droite)
   (c) Amici à 45° ou 90° (image droite)
2. D'un miroir réfléchissant
   (a) Renvoi coudé diélectrique "dielectric mirror", il est très résistant à l'oxydation
   (b) Renvoi coudé à couche d'argent, il est le plus réfléchissant, mais s'oxyde aussi plus vite

Renvoi coudé miroir diélectrique



Credit : Orion Telescopes

Combinaison de renvoi coudés avec divers instruments



- Œil nu
- Lunette, Newton, SCT + RC Amici
- Lunette, Newton, SCT + RC Pentaprisme
- Chercheur coudé redressé (RACI finder)



- Lunette, Newton, SCT
- Chercheur droit (Straight through finder)



- Lunette, Newton, SCT + RC dielectric
- Lunette, Newton, SCT + RC prisme
- Chercheur coudé simple (RAEI finder)

Credit : J.G. Gricourt

Note : RC = renvoi coudé.

L'ajout un renvoi coudé dans le train optique d'un instrument quel qu'il soit nécessite un backfocus supplémentaire car la lumière traversant le RC ressortira et parcourra un distance moins longue jusqu'au plan focal même si la distance totale depuis l'objectif reste la même dans le cas des lunettes ou des Newton. En général (sauf le RC Baader BBHS à miroir) le

backfocus requis sera plus court dans le cas des RC à prisme que des RC à miroir. Un RC à miroir nécessitera donc de raccourcir le tube avec la molette du porte oculaire par rapport à un RC à prisme afin de réaliser la mise au point. De même qu'un RC 1.25" demandera moins de backfocus qu'un RC 2".

Sur le principe de fonctionnement, l'oculaire étant à fixe distance du renvoi coudé il faut ajuster la sortie du plan focal en sortant ou en rentrant le tube de la lunette ce qui a pour effet de déplacer le RC tout entier. L'objectif est de faire coïncider le "Field Stop" de l'oculaire avec le plan focal pour obtenir une mise au point parfaite. Cette mise au point peut varier d'un observateur à l'autre dans le cas où ceux ci souffrent de myopie (vision à l'infini imparfaite).

Les oculaires de courte focale possèdent un "Field Stop" localisé très haut dans l'oculaire et donc de valeur très positive (valeur F sur la tableau de Tele Vue) [708]. Dans ce cas il faut avancer le tube de la lunette pour faire ressortir le plan focal plus loin et atteindre le "Field Stop" ce qui a pour conséquence que les rayons issus du centre du champ frappent une surface plus grande du prisme ou du miroir. Donc les forts grossissements nécessitent des surfaces de réflexion sans défaut plus large à l'intérieur des RC.

Dans le cas des télescopes de type SCT ou Mak, c'est le primaire qui est déplacé et non le renvoi coudé créant ainsi le backfocus nécessaire au RC.

Renvoi coudé à prisme Le principal inconvénient du prisme est qu'il ne peut être utilisé que pour des instruments à $F/D > 7$ [796] ou $F/D > 8$ [212]. Autrement on constatera une dégradation du front d'onde le traversant en ajoutant de :

— Aberration sphérique induisant une sur-correction sur la lunette
— Chromatisme induisant un décalage de correction du bleu vers le rouge [121]

Ces aberrations sont amplifiées d'autant que la lunette possède un rapport F/D court. La raison de ces dégradations est que les rayons à F/D court sont plus obtus (cône de lumière) et produisent des angles d'incidence élevés tout comme avec certains oculaires non prévu pour les F/D court le rendu de l'image sera alors dégradé avec un prisme.

Historiquement et dans certains cas d'usage, la dispersion des couleurs et / ou l'aberration sphérique des renvois coudés pouvait être mis à profit afin d'annuler les aberrations des lunettes conçues alors pour fonctionner avec ces prismes [168, 121].

Caractéristiques :

— Les prismes possèdent un chemin optique plus court il sont donc moins gourmand en backfocus
— Les prismes ont un meilleur contraste que les renvois coudés à miroir en raison de l'absence totale de diffusion
— Les prisme sont plus lumineux que les RC à miroir
— Les prismes dégrade le strehl polychromatique (sphérochromatisme) des lunettes courtes dans le rouge et le bleu
— Les prismes ne se dégradent pas avec le temps, car la plupart ne comportent pas de couche réfléchissante sensible à l'oxydation
— Les prismes à traitement de surface multicouche peuvent approcher la transmission des renvois coudés à miroir diélectrique

Le surface externe de "Hypotenuse" où la réflexion interne = TIR = "Total Intern Reflexion" se produit doit être parfaitement propre pour garantir l'absence de perte de lumière ou de cohérence de phase. Les prismes fonctionnant tous en réflexion total n'ont à priori pas besoin de couche aluminée cependant en rajoutant une couche réfléchissante sur la surface extérieure = on améliore encore la transmission du prisme [230] pour approcher les 100% car aucune traces / tâche ne peut s'intercaler entre la couche réfléchissante et le verre.

Les performances du prisme sont dégradées dès lors que la surface du plan Hypotenus n'est pas parfaitement plane et propre

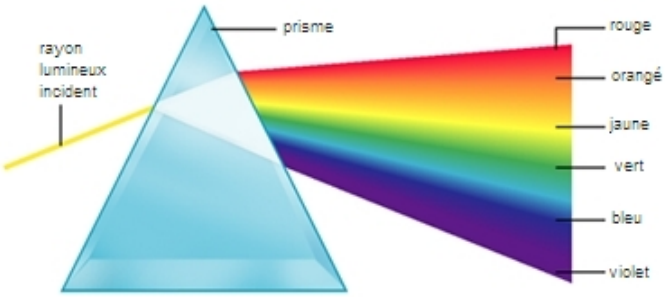
(absence de tâches) ou si l'angle d'incidence des rayons n'est plus exactement 45°.

Roland Christen à dit : *For critical planetary viewing it is important to have the eyepiece and diagonal surfaces as clean as possible. You will find that even after one observing session the diagonal surface will accumulate crud. The inherently high contrast and cleanability of the Maxbright insures that it is never a limiting factor when viewing subtle planetary detail.* [34]

Le PtV après passage du renvoi coudé à prisme vaut : $\mathrm{PtV}_1 = \mathrm{PtV} \times \sqrt{2}$ [223]

Le renvoi coudé à prisme de verre peut améliorer les performances d'une lunette ED ou APO :

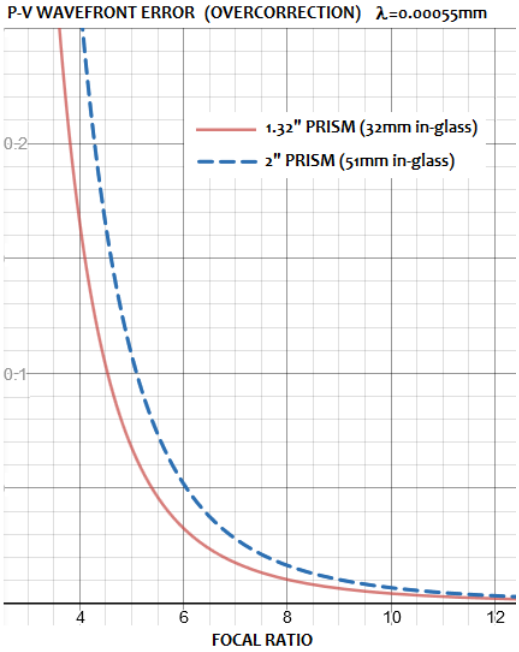
— Certains fabricants conçoivent les lunettes en minimisant le chromatisme dans le bleu / violet = "Secondary Spectrum Reduction" au détriment de la correction dans le rouge. Les prismes en verre diffractent un peu la lumière et peuvent donc corriger des lunettes ED ou APO de $F/D \geq 7$ dans le rouge avec une baisse minime de la correction dans le bleu [121].
— Les prismes en verre présentent également une sur-correction (un type d'aberration de sphéricité) qui peut annuler partiellement la sous-correction habituelle des lunettes [121].



Credit : Larousse

Avec des instruments courts comme les lunettes ED ou APO courtes par exemple (F/D inférieur à 7 [40]) il faut de préférence utiliser des renvois coudés à miroir et non en verre afin de ne pas rajouter d'aberration chromatique et de l'aberration sphérique générée par le prisme en raison de l'inclinaison trop élevée des rayons frappant le prisme.

F/D and prism wavefront error



Credit : Eddgie

Renvoi coudé à miroir caractéristiques :

- Les modèles à couche d'argent (non diélectrique) peuvent s'oxyder avec le temps
- Les modèles à couche d'argent (non diélectrique) ne diffuse pas lumière
- Les modèles à couche d'argent (non diélectrique) dégradent moins les performances de l'instrument car ils possèdent beaucoup moins de couches que les dielectric.
- Les modèles diélectriques (SiO2) diffusent la lumière
- Les modèles diélectriques (SiO2) dégrade la surface (PtV = Peak to Valley plus faible à cet endroit) vers les bords du miroir réduisant sa surface utile [641]
- Les modèles diélectriques (SiO2) sont résistants à l'usure et selon le nombre de couches, sont très réfléchissants 99% au minimum.
- Les renvois coudés à miroir allongent légèrement la focale de l'instrument (effet barlow) [267]
- Certains renvois coudés à miroir peuvent introduire de l'astigmatisme
- Certains renvois coudés à miroir peuvent introduire de la diffusion provoquant une perte de contraste, les prismes sont reconnus pour produire des images plus contrastées

Note : le BBHS de Baader est un renvoi coudé à miroir à couche d'argent protégé qui ne s'oxyde pas avec le temps, sa réflectance exceptionnelle est comprise dans [390nm, 2000nm] [797].

Le PtV après passage du renvoi coudé à miroir vaut : $\mathrm{PtV}_{\mathrm{total}} = \mathrm{PtV} \times \sqrt{2} + 2$ [223]

À chemin optique = "Light Path" de même longueur, les renvois coudés à prisme sont beaucoup plus volumineux que ceux à miroirs (+50% en largeur) [282]. Le chemin optique des renvois coudés à prisme sont en général plus court que ceux des renvois coudés à miroir.

Les renvois coudés à miroir doivent être parfaitement collimaté sous peine de nuire à la qualité optique des images produites par l'instrument en réduisant significativement la valeur du PtV de l'instrument en dessous du critère de Rayleigh $\mathrm{PtV} \leq \lambda/4$.

Dans le cas du renvoi coudé à miroir, il est recommandé de le prendre en 2" même pour des lunettes de petit diamètre et même si l'on ne compte pas exploiter l'ouverture d'oculaires à grand champ en 2". Ainsi, comme pour les miroirs secondaires des télescopes, il vaut mieux les prendre un peu plus grand pour éviter de réfléchir la lumière sur les bords du miroir là où le polissage est potentiellement imparfait (introduction d'astigmatisme sinon) [211].

En règle générale, on prendra un renvoi coudé à miroir pour des instruments court $F/D < 7$ et un renvoi coudé à prisme pour des instruments longs $F/D \geq 7$ [314].

L'introdution d'un renvoi coudé dans le chemin optique produira une baisse du Strehl globale [745] tout comme un miroir secondaire affecte le Strehl de l'instrument en raison de sa qualité optique propre et de l'effet de son obstruction.

Tube d'extension / adaptation les tubes d'extension permettent aux oculaires d'atteindre le foyer de l'instrument comme avec des lunettes spécialisées astrophoto ou des télescopes Cassegrains. Les instruments dédiés à l'astrophoto ont souvent un plan focal très éloigné de la sortie du porte-oculaire et un tube d'extension peut alors être nécessaire lorsqu'on n'utilise pas un oculaire afin que celui-ci puisse atteindre le plan focal. Les tubes tout comme les sorties des portes-oculaire peuvent être à serrage annulaire = "Compression Ring" = "Brass Clamp Rings" plutôt qu'à serrage à vis classique = "Thumb Screw".

Avantages du serrage annulaire :

— Il permet un centrage parfait du train optique, qu'il soit visuel avec un oculaire ou astrophoto. Il évite la formation d'aberrations lorsqu'un oculaire est décentré.
— Il évite de rayer ou d'abîmer les jupes des oculaires.

6.8.7 Les Chercheurs

Redresseur terrestre ou "Correct Image Diagonal" ou "Erecting Prism" désigne un type de renvoi coudé utilisant un prisme de type "Amici Roof Prism" (45° ou 90°) ou "Pentaprisme" (45° ou 90°) afin de redresser complètement les images et rendre l'instrument compatible avec un usage terrestre et diurne. La transmission du prisme dépend de la qualité du traitement multicouche et de sa dimension. Les redresseurs à base de Pentaprisme étaient beaucoup utilisés dans les visées des appareils photo Reflex [275].

Les redresseurs à base de prisme Amici sont utilisés sur les lunettes terrestres. Avec un prisme Amici les points de l'image haut et bas ne suivent pas le même trajet optique, le prisme recompose image globale à la sortie du prisme, ce qui signifie qu'il existe une ligne de jonction horizontale au centre qui produira une fine raie lumineuse sur les étoiles brillantes au moment de la traverser = "Roof Spike". Il s'agit d'un artefact dû à la diffraction de la lumière arrivant sur la ligne de toit du prisme (roof edge / roof line spike) [201]. De plus, comme pour les jumelles à prismes en toit il faudra que les prismes soient dotés d'un traitement de correction de phase sur les verres afin de ne pas perdre en contraste.

Les redresseurs à base de prisme Pentaprisme ont l'avantage par rapport aux prismes Aminci de ne pas montrer de raie centrale lumineuse dans le champ.

La plupart de ces renvois coudés seront cantonnés aux faibles grossissements (x50 max) donc pour une utilisation terrestre principalement.

Renvoi coudé prisme Amici 45 °



Credit : William Optics

Chercheur ou “Finder” ou “Red Dot Finder” ou “RDF” désigne un outil d’aide au pointage de la lunette ou du télescope. Étant donné les grossissements importants des instruments, le chercheur est un outil indispensable en visuel pour localiser les objets visés.

Parmi les chercheurs usuels, on trouve :

1. Telrad
2. Rigel Quickfinder
3. Baader Skysurfer V
4. Le viseur point rouge classique ou l’accessoire de chasse
5. Le chercheur optique

L’aide au pointage peut aussi être entièrement électronique comme sur les montures de type PushTo et Goto ou même complètement automatisé comme sur le Goto.

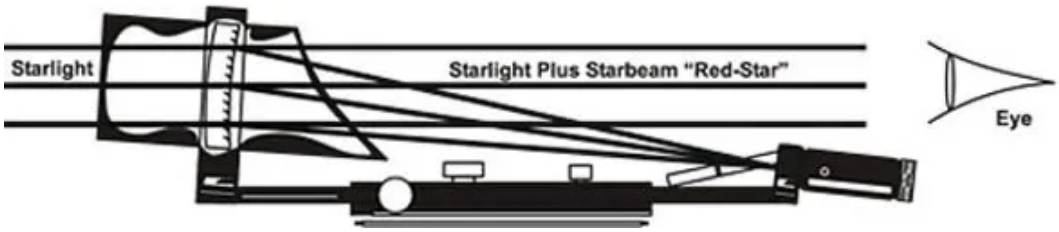


Credit : Pierro Astro

Chercheur point rouge ou “Red Dot Finder” ou “RDF” désigne un chercheur de type Telrad ou Rigel montrant un cercle à l’infini superposé à l’image du ciel. Le RDF montre le ciel comme à l’oeil nu c’est à dire sans grossissement. Les chercheurs points rouge sont des chercheur issus des systèmes de visée pour arme à feu.

Il en existe de 2 types :

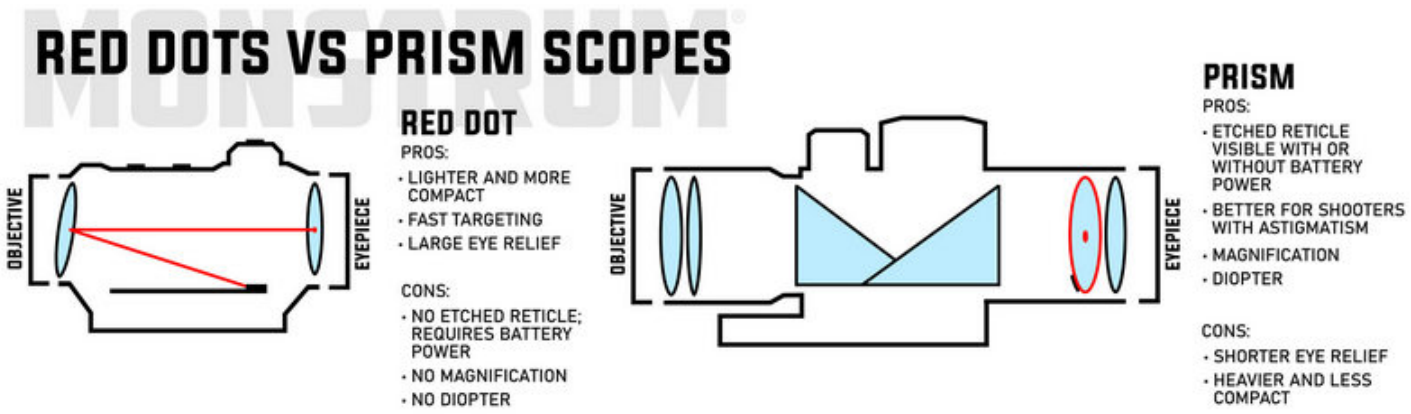
— Red Dot : Eazy Finder, Telrad, Rigel, Baader SkySurfer V, Vixen XY II (une copie de modèles chinois très répandus)
— Prism Scopes



Credit : Tele Vue

Certains se montent sur des rails picatinny standards issus du domaine sur les armes à feu.

L'inconvénient du "Red Dot" classique est qu'il suppose que l'observateur a une vision parfaite, c'est à dire qu'il voit net à l'infini ou qu'il ne souffre pas d'astigmatisme, autrement le point rouge peut être vu exagérement grossi et/ou déformé. Pour pallier à ce problème on peut utiliser ses lunettes de vue pour l'utiliser ou alors on peut remplacer le "Red Dot" par un "Prism Scope" qui possède un jeu de lentilles et des prismes afin de redresser l'image comme pour une paire de jumelles à prismes en toit. Souvent les "Prism Scope" possède un réglage dioptrique = "Diopter Adjustment" afin de s'adapter à la vue de l'observateur en corrigeant une myopie (effet de la mise au point) mais pas l'astigmatisme en revanche.



Credit : Monstrum

Chercheur optique ou "Optical Finder" une petite lunette droite ou à renvoi coudé et de faible grossissement attaché au tube du télescope et qui sert à pointer les objets recherchés ou permettre l'auto-guidage d'une monture en imagerie. Les chercheurs destinés au repérage visuel sont soit des chercheurs 6x30 soit 9x50.

Le chercheur peut être :

— Droit ou "Straight Through"
— Coudé ou "Right Angle".

Selon le renvoi coudé utilisé l'image peut aussi être :

— RAEI montrant une image redressée Haut/Bas, mais Gauche/Droite inversée
— RACI montrant une image redressée comme à l'oeil nu.

Chercheur de type RACI ou "Right Angle Correct Image" ou "Correct" désigne un type de chercheur optique montrant les images comme à l'oeil nu.

Chercheur de type RAEI ou “Right Angle Erect Image” ou “Erect” désigne un type de chercheur optique montrant les images dont la gauche et la droite sont inversés comme sur un miroir.

Chercheur de type point rouge ou “Red Dot Finder” ou “RDF” désigne un chercheur de type Telrad ou Rigel montrant un cercle à l’infini superposé à l’image du ciel. Le RDF montre le ciel comme à l’oeil nu (sans grossissement.

6.8.8 Les Binoculaires

Binoculaire où “Tête Binoculaire” “Binoviewer” où “Bino” désigne un dispositif optique à 2 oculaires s’insérant dans le porte-oculaire et permettant la vision binoculaire sur une lunette ou un télescope. La vision binoculaire améliore à la fois le confort de l’observation et surtout améliore de manière spectaculaire la détection des détails dans l’image par rapport à la vision monoculaire. Le design de la tête binoculaire est inspirée directement du microscope. La binoculaire contient plusieurs prismes dont un prisme “Beam Splitter” chargé de diviser le flux lumineux en 2. La binoculaire permet d’utiliser 2 oculaires classiques remplaçables afin de sélectionner le grossissement.

Le paramètre important est la “Clear Aperture” ou diaphragme de champ qui limite la sortie de la lumière dans chaque fût de la bino. Cette valeur doit être supérieure au diaphragme de champ (ou field stop) de l’oculaire utilisé afin de ne pas rajouter du vignetting à l’image. Donc, certaines bino sont plus ou moins adaptées aux Newton très court F/4 ou moins dont le champ couvert sans vignetting sera plus large.

Pour utiliser une binoculaire classique, il faudra pour beaucoup d’instrument allonger artificiellement la focale avec une barlow ou idéalement une barlow Télécentrique :

— Pour créer le backfocus nécessaire pour pouvoir faire la mise au point
— Pour limiter les aberrations de sphéricité et chromatiques lorsqu’on utilise des instruments court $F/D < 4$

Les bino sont souvent fournie avec correcteur optique de type “Glasspath” appelé aussi : OCA (Siebert Optics), OCS (Denk), Powerswitch (Denk) ou GPC (Baader Glasspath Corrector) ou Earthwin (Power Switch Corrector), dont l’un des rôles est celui de la barlow.

Le correcteur “Glasspath” est plus optimal que la barlow :

— Permet un coefficient multiplicateur plus faible (x1.3)
— La réduction de champ est plus faible qu’avec une barlow
— Corrige l’aberration de sphéricité et l’aberration chromatique introduites par les prismes du beam-splitter soumis au faisceau large produit par un F/D court [6]

Sans le correcteur, les aberrations sont d’autant plus prononcées que l’instrument est à F/D court (angle d’incidence large).

Pour les oculaires, on se contentera des focales entre 15 et 25 mm pour un meilleur rendement [23].

— Ciel profond : bino seule
— Planétaire F/D long : correcteur + bino
— Planétaire F/D court : barlow + correcteur + bino

La bino classique divise le flux optique en 2 avec un “Beam Splitter” et la luminosité du champ reçu par un seul oeil est la moitié de la luminosité totale entrante alors que la bino compensée divise le flux optique en 2 avec un “Pupil Splitter” afin de diviser le champ en 2 parties et la luminosité du champ reçu (demi-lune) par un seul oeil est égale à la luminosité totale entrante.

Le calcul du CPL du Newton, à partir de la clear aperture en entrée a, la distance totale parcourue par le faisceau depuis l'entrée (centre du miroir secondaire de renvoi) jusqu'au point focal : CPL = $\frac{aF-pD}{F-p}$ [790].

La clear aperture en entrée a est soit l'ouverture du renvoi coudé dans le cas des lunettes, soit la dimension du miroir secondaire dans le cas du télescope, dans tous les cas on prend la valeur la plus petite. De plus, si la binoculaire a subi une modification "Supercharged" alors il faudra la nouvelle valeur dans le calcul (si celle-ci reste plus petite que celle du renvoi coudé ou du miroir secondaire).

Les inconvénients de la binoculaire sont :

— Champ réduit dans le cas de l'utilisation d'une barlow
— Poids en porte-à-faux important imposé au bout du porte-oculaire
— L'accès au foyer difficile sur les instrument dont le backfocus est trop court, ex : Dobson
— Beaucoup d'utilisateurs auront des difficultés à bien fusionner les images en planétaire
— N'est pas idéale en ciel profond en raison de l'assombrissement de l'image [241]

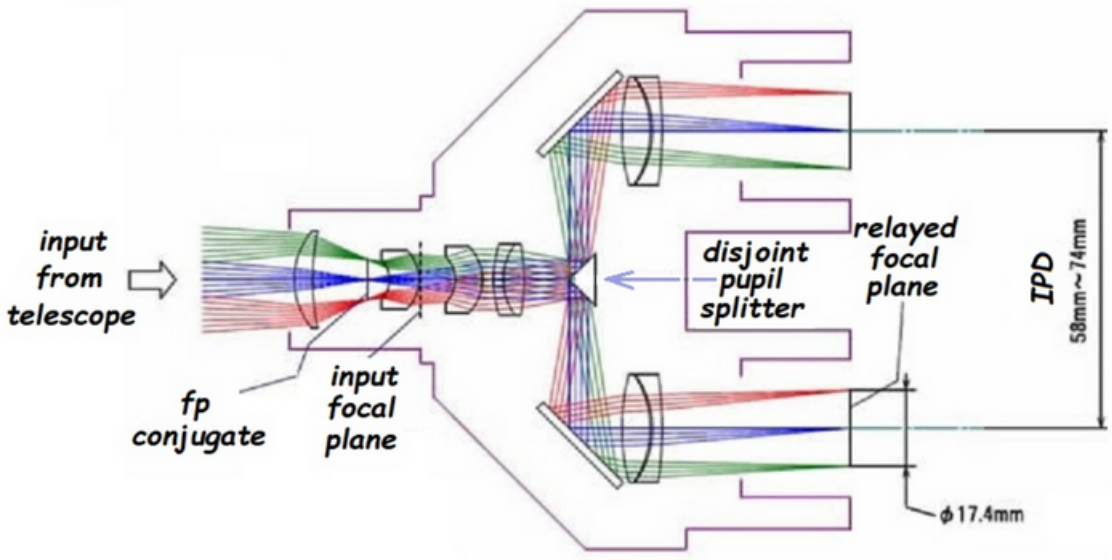
Pour les Dobsons particulièrement courts F/4 ou moins on pourra utiliser :

— Un Glasspathcorrector 1.70x de Baader sur la bino Maxbright II qui fait aussi office de correcteur de coma
— Une binoculaire compensée nécessitant un backfocus plus court que la bino classique

Des fabricants de binoculaire : Denkmeier, Baader Planetarium Mark V, Tele Vue Bino Vue.

Binoculaires compensées où "Linear Binoviewer" désigne un nouveau type de bino ne nécessitant pas autant de backfocus que les bino classique. La bino 1.25" "Orion Premium Linear BinoViewer" ou "Technosky Horizons" ou "Bresser Delux" est basée sur ce design. Cette bino est une bino dite aussi "Compensée", car elle n'a pas besoin de "Glasspath" afin d'allonger le backfocus de l'instrument, elle peut donc être utilisée directement sur des dobsons pour lesquels le backfocus est plutôt court (en général).

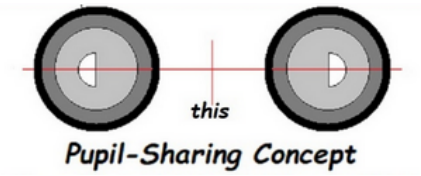
Orion Linear Binoviewer



Credit : Orion

Le schéma optique montre que cette bino est basé sur des miroirs produisant une moitié du champ et donc en demi-lunes,

une pour chaque oeil. La bino de type Linear n'introduit pas de grossissement supplémentaire. La "Clear Aperture" est aussi plus réduite que les autres binos : 22 mm en général. L'image sera à l'endroit si on l'utilise sans renvoi coudé sur une lunette ou sur un SCT. Les oculaires utilisés devront avoir au maximum un diaphragme de champ de 22 mm pour ne pas vigneter le champ. Pour éviter le vignetting avec un bino compensée on peut aussi utiliser la règle empirique suivante : $f \times \text{AFOV} < 1000$ [438] où f la focale de l'oculaire utilisé.



Credit : Tomdey

Caractéristique différenciantes des bino classiques [293] :

- Une clear aperture plus réduite à 17mm contre 22mm et plus avec une bino classique donc le vignetting, arrive plus vite avec les oculaires à grand champ
- N'est pas adaptée aux observations planétaires (forts grossissements au delà de x50) car la pupille reconstituée (les 2 moitiés) n'est pas circulaire mais ovale ce qui implique une figure de Airy ovalisée et une résolution verticale diminuée
- Les étoiles très lumineuses présente une figure de diffraction horizontale similaire à celle produite par les redresseurs terrestres de type Amici.
- La bino génère des reflets parasite sur les surfaces planétaire (objets très lumineux)
- La bino redresse naturellement les images elle est donc adaptée l'observation terrestre sans renvoi coudé

Supercharge désigne une optimisation des têtes binoculaires popularisée par Denis Levatic et qui consiste à :

1. Agrandir l'ouverture ou "Clear Aperture" en sortie et en entrée afin de pouvoir utiliser des oculaires UWA sans produire de vignetting
2. Matifier certaines parties internes réfléchissantes dans le but d'augmenter le contraste des images
3. Renforcer le maintien des prismes pour fiabiliser la collimation

La clear aperture de la bino est matérialisée par un diaphragme sous forme d'un anneau posé à l'entrée de la bino. Il est possible d'augmenter la clear aperture en réduisant le diaphragme et en prenant soin de noircir l'intérieur de la bino pour éliminer les réflexions parasites.

Il y aura du vignetting dans le champ si l'ouverture de la bino devant l'oculaire est plus étroite que le diaphragme de champ de l'oculaire.

Glasspath désigne un correcteur utilisé conjointement avec une tête binoculaire. Le "Glasspath" en plus d'inclure une barlow afin d'allonger le chemin optique et de permettre son utilisation sur des instruments dont le foyer ne ressort pas suffisamment = "Backfocus", inclue un correcteur qui corrige l'aberration de sphéricité et l'aberration chromatique introduite par le "Beam Splitter" de la tête binoculaire dans le cas où l'angle d'incidence des rayons est large (F/D court). [632].

6.8.9 La NVA

NVA ou "Night Vision Astronomy" désigne une nouvelle pratique de l'astronomie visuelle où l'on a recours à des accessoires ou des instruments permettant de construire une image électronique en quasi-temps réel. Il ne s'agit donc pas d'astrophoto bien que parfois certaines techniques s'en approchent, le but ici est de fournir à l'observateur une image électronique quasi instantanée du ciel. L'intérêt de cette technique est d'améliorer la visibilité des nébuleuses, soit :

— Le VA : en réalisant de l'astrophoto par empilement rapide d'images en quasi-temps réel ou "Live Stacking"
— Le NVD : En amplifiant la lumière des nébuleuses via un oculaire spéciale amplificateur de lumière

NVD ou "Oculaire à intensificateur de lumière" ou "Night Vision Device" ou "NV" ou "Light Intensifier" désigne un accessoire intensificateur de lumière dont le composant principale est son tube intensificateur. Le plus souvent sous forme d'un monoculaire électronique délivrant une image numérique issue de la multiplication artificielle des photons en entrée. Ces appareils sont d'abord utilisés pour un usage militaire afin de mieux voir la nuit sur le champ de bataille à la fois pour les fantassins ou pour les pilotes d'hélicoptère. Dans certains pays comme les US il existe une législation limitant l'exportation de NVD en dehors du territoire. Ces accessoires peuvent aussi être utilisés en astronomie car il permettent d'accroitre la vision nocturne dans le but de compenser la faiblesse d'un instrument de petit diamètre ou de mieux voir sous un ciel affectée par de la pollution lumineuse [319, 518]. Ce type d'oculaire permet en moyenne un gain de 4 magnitudes par rapport à un oculaire seul. Il peut s'utilisir directement au foyer ou en mode afocal derrière un oculaire.

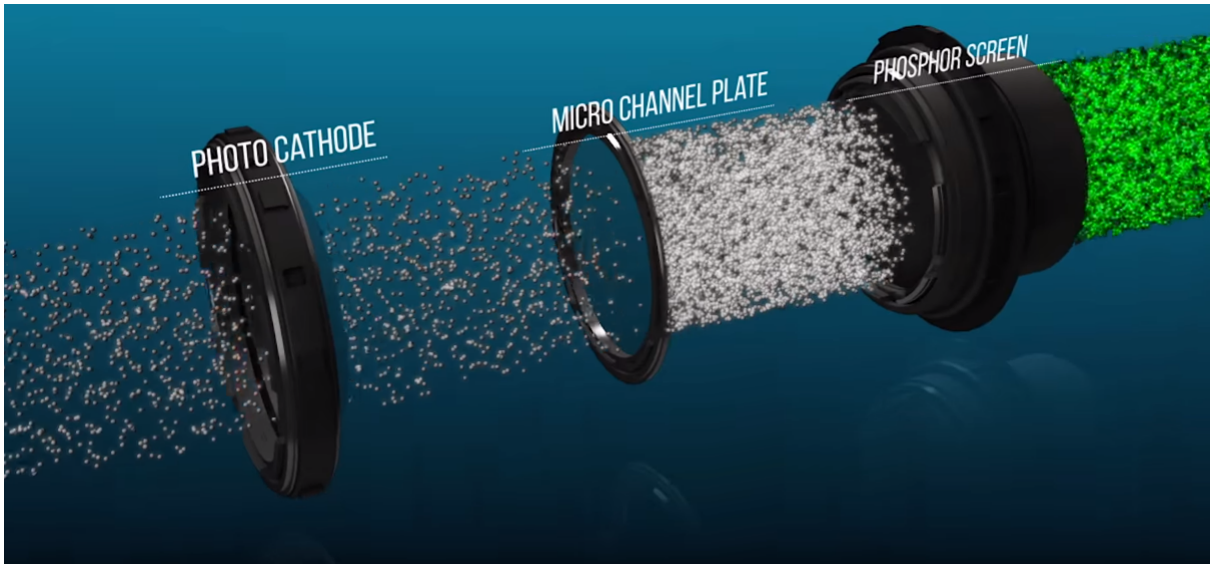
De manière général les NVD US ne sont pas tous équivalents car même si ils possèdent une même dénomination PVS14 ou OVNI-M, ils peuvent contenir des tubes intensificateur ayant des performances très disparates, de plus, il existe une certaine confusion entre tous ces produits utilisant les mêmes coques externes et portant les mêmes noms.

Pour un usage en astronomie il faudra utiliser le NVD suffisamment sensibles et avec un filtre étroit comme un $H\alpha$ ou dual-band OIII / $H\alpha$ (UHC) pour mieux faire ressortir les nébuleuses. Tele Vue propose depuis longtemps un produit unique le TNVC permettant d'utiliser un NVD derrière un oculaire en afocal. Enfin un seul modèle dédié à l'astronomie est commercialisé en Europe il s'agit de l'OVNI-M/B.

Principe de fonctionnement :

— Les photons incidents sont transformés par une photocathode en électrons
— La MCP ou "Microchannel Plate" multiplie les électrons (1 pour 70 0000) sans changer la direction du flux lumineux
— L'écran de phosphore similaire à un écran de tube cathodique de télévision d'époque transforme les impacts des électrons générés en photons

Schéma de fonctionnement du tube intensificateur



Credit : NODS

Caractéristiques des NVD :

— Le champ de vision couvre de 30 à 50°
— Les teinte de phosphore peuvent aller du vert (P22) au blanc bleuté (P45)
— Le SNR obtenu est de 10 à 25db
— La résolution obtenue est de 50 à 80 ligne/mm

Précaution d'usage : l'écran de phosphore peut être détruit par une exposition prolongée à une lumière intense, il ne faut donc surtout pas l'utiliser de jour.

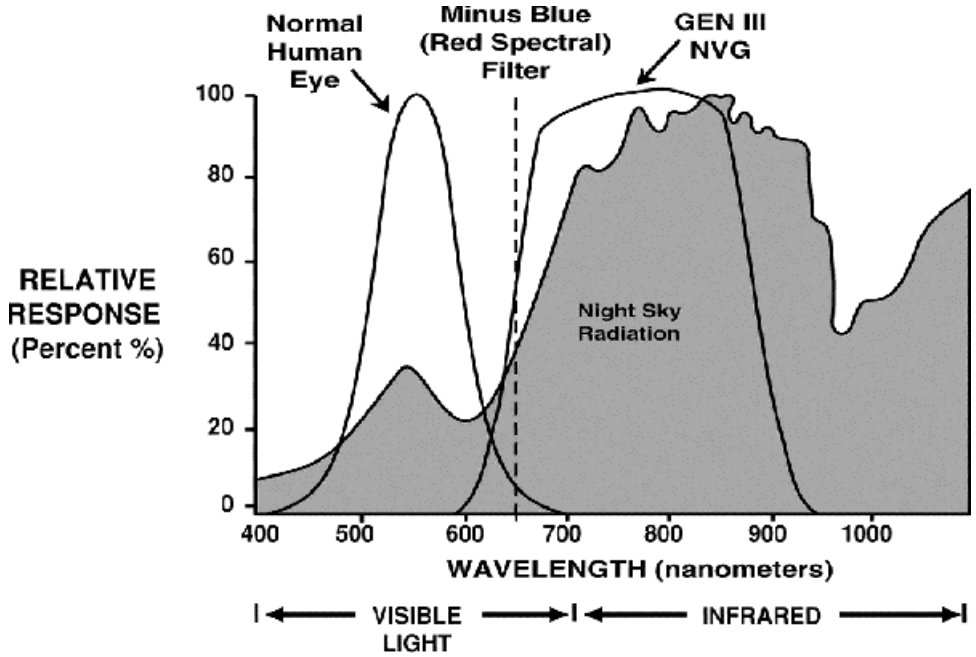
Classements des performances des NVD

— On peut les classer par générations [558], chacune possèdent leur propre caractéristiques : Gen I, Gen II, Gen III, Gen IV
— On peut les classer par FOM = "Figure Of Merit" un indicateur de performance : FOM 2200 à FOM 3600
— On peut les classer par classification OMNI [720] édité par le département de défense américaine (caractéristiques contractuelles) : OMNI I, OMNI II ...OMNI VIII

La sensibilité maximale est dans le Near IR et permet donc :

— L'utilisation de filtres bande étroite $H\alpha$ pour mieux voir les nébuleuses [319].
— L'utilisation de filtre à bande large NIR [600nm, 700nm] afin d'écarter complètement la pollution lumineuse

Physics Based Simulation of Night Vision Goggles



Credit : E. Martin

Les générations Gen III de NVD permettent de multiplier la lumière ambiante par 30 000 ou 50 000 [347] et ces caractéristiques évoluent de génération en générations.

Mode d'utilisation :

— Directement au foyer comme un oculaire de focale indiquée par le fabricant
— En afocal derrière un oculaire classique

Le NVD sur le ciel



Credit : Gavin Gavester

La solution de Tele Vue permet de changer d'oculaire directement sur le TNVC, l'utilisation en afocal fait baisser le ratio F/D résultant et donc renforce l'impact de l'image construite par le NVD.

De manière générale les NVD tel que les OVNI-M ne font pas de miracle on est loin du contraste et de la définition offerte par des instruments à capteurs photo ou la vision directe sans artifice.

Marsyas à dit : *J'ai essayé l'OVNI en bino au causse noir cette année et j ai trouvé ça très décevant. Même à la moitié du prix je n'achèterai pas ça. La finesse des pixels des deux écrans devant les yeux est moyenne je trouve et même avec des tubes phosphore avec peu de defaults on ressent beaucoup la "neige" dès que l'on augmente un peu le gain ce qui réduit la vison des détails. Une fois la surprise passée de voir ressortir beaucoup de nébuleuses en balayant le ciel j'ai été vite déçu par le manque de définition et de contraste des différentes densités de sombres et noirs ce qui est primordial pour apprécier les nébuleuses. Cela n'arrive pas à la cheville de la vision en direct avec le photon le vrai qui tape ta rétine directement. Autant faire du visuel assisté avec des poses photos c'est beaucoup plus beau je trouve. Je n'ai pas essayé avec le filtre double bande pour nébuleuses j'avoue mais le problème reste le même. Les deux écrans de définitions infiniment plus faible que nos yeux. De plus si je peux me permettre ce n'est pas le sujet que j'ai abordé initialement.* [478]

Ce type d'appareil ne fait pas encore l'unanimité parmi les observateurs visuels du ciel profond, cette technologie est cer-

tainement appelée à s'améliorer car pour le moment elle est principalement conçue pour des usages militaires qui sont les principaux fournisseurs des budgets permettant son développement.

Il existe actuellement de nouveau capteurs reprenant le principe théorique d'intensificateur de lumière mais à l'échelle du photosite (pixel) ce sont les capteur à base de diodes SPAD = "Single-Photon Avalanche Diode" [360]. Leur sensibilité est accrue, un seul photon peut déclencher une detection, il est même possible d'en déterminer précisement sa longueur d'onde (voir usages pour la spectrographie). Les SiPM = "Silicon Photomultipliers" sont les puces en silicium intégrant plusieurs diodes SPAD pour former un capteur 2D complet.

Cette diode est directement inspirée du principe du tube photomultiplier (PMT) développé dans les années 50s qui lui est plus fragile car il nécessite un "Vacuum-tube" en verre et n'est donc pas miniaturisable.

IIT ou "Image Intensifier Tube" ou "I2T" désigne la partie qui réalise la conversion photoélectrique et la multiplication des électrons.

Fabricants de tubes identificateurs :

- Siemens (Allemagne)
- General Electric (USA)
- Photonis (France)
- Harder Digital (Allemagne / Serbie)

EBI ou "Equivalent Background Illumination" désigne le signal thermique émit par l'appareil lui-même [91]. Ce signal entaché de bruit augmente exponentiellement avec la Température et doit être le plus faible possible pour une meilleure qualité d'image. Un NVD dont : EBI <= 2.5 microlux est en général adapté pour un usage astronomique [264].

FOM ou "Figure Of Merit" désigne un indicateur de qualité du NVD qui est utilisé par les autorités américaines pour déterminer si un NVD peut être exporté hors du territoire US. Le FOM mesure la qualité d'image d'un NVD. Lorsque le SNR augmente, l'EBI augmente également, les meilleurs NVD ont un EBI contenu tout en ayant SNR élevé. Pour un usage astronomique les valeurs de FOM vont de 2200 à 2700 mais ce n'est pas un indication de qualité, les meilleurs tubes pour un usage astro amateur sont ceux dont le SNR est supérieur à 40 et ce indépendamment de la résolution.

En théorie : FOM = SNR × LPM où LPM est le nombre de ligne par millmètre (la résolution du NVD).

Le SNR indique le nombre de pixels corrects pour 1 pixels affiché incorrectement (bruit).

Alternatives NVD

- Astrowlbox

6.8.10 L'Apodization

désigne un masque noir (non réfléchissant) à placer juste devant le miroir à quelques millimètre de sa surface. L'objectif de l'apodization est de masquer partiellement le miroir, en général son bord externe afin de manipuler la concentration de la figure de Airy produit par le miroir [403].

L'effet produit peut être [173] :

- Supprimer un bord rabattu en masquant le bord du miroir ce qui permettra d'obtenir un figure de Airy plus concentrée et sans diffusion de lumière

— Réduire artificiellement l'effet néfaste de la turbulence en réduisant la dimension du miroir car un petit miroir produira un figure de Airy plus grosse et donc moins sensible à l'effet destructif de la turbulence mais au prix d'une perte de résolution à fort grossissement.

6.8.11 Les Autres Accessoires

Cache de protection ou "Dew Shield", "Lense Shade", "Lense Cap", "Dust Cap" désigne l'élément permettant de protéger la lentille frontale de la lunette astronomique des rayons lumineux environnant. Il peut être retirer ou être rétractable.

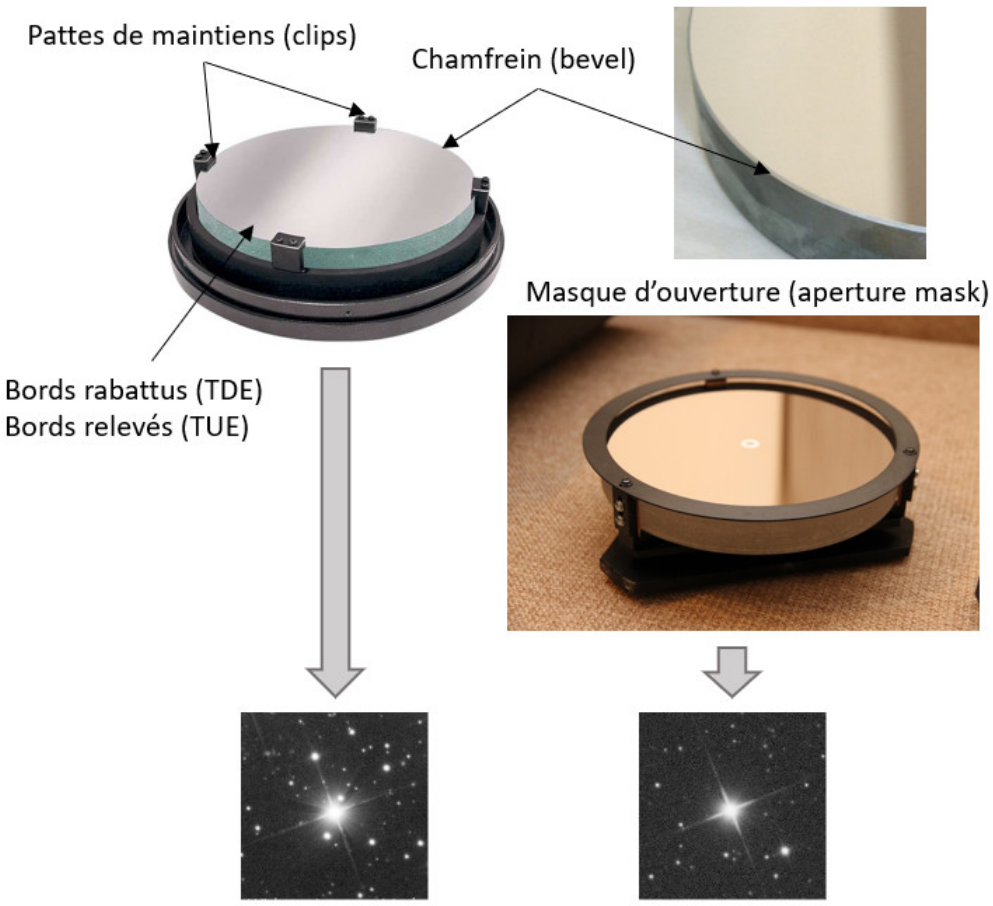
Collier ou "Tube Ring" désigne le dispositif circulaire, le plus souvent fonctionnant par paire et qui enserre le tube (plein) du télescope afin de la relier à sa monture. Les colliers sont reliés 2 à 2 par la queue d'aronde.

Masque d'ouverture ou "Aperture Mask" désigne un dispositif à poser juste au-dessus du miroir primaire dans le but de réduire les effets néfaste de la diffraction et d'améliorer le contraste global des images en réduisant la surface collectrice. Cette technique surtout utile en photo permet d'obtenir des images très propres des étoiles brillantes où seule la croix de diffraction due à l'araignée reste bien visible. La dégradation de l'apparence des étoiles est causée soit par un objet intercalé entre le ciel est le miroir primaire (diffraction) soit par un défaut de zonage du miroir lui-même (défaut de polissage).

Les causes de dégradation des images dû à l'instrument :

— Diffusion de la lumière par le chanfrein "Bevel" du miroir
— Diffraction de la lumière par les branches de l'araignée ou tout objet (caméra, fils électriques, porte-oculaire) dans le chemin optique
— Diffraction de la lumière par le tube du porte-oculaire trop rentré qui coupe le chemin optique
— Défaut de zonage du bord du miroir de type TDE ou TUE.

En masquant le bord du miroir, on masque à la fois un défaut de zonage TDE ou TUE ainsi que la diffusion de la lumière par le chanfrein, ainsi, on améliore le contraste des images [588] en particulier sur des miroirs industriels.



Credit : J.G. Gricourt

À noter que les pattes de maintiens étant posées sur le miroir, celles-ci ne diffractent pas la lumière, en revanche, elles modifient la figure de diffraction en causant des ruptures dans la diffusion de la lumière par le chanfrein, ce qui est constaté sur les photos des étoiles. Il faut aussi noter que les pattes de maintiens devraient toujours être complètement desserrées afin de ne pas faire pression sur le miroir pour ne pas produire d'astigmatisme.

Mauro da Lio baffle désigne un cache circulaire positionné à l'avant du miroir primaire dans le but de rabattre l'air provenant du dos du miroir sur le devant casser la "Boudary Layer". Pour que cela fonctionne, il faut aussi baffler entièrement le dos du miroir avant de décupler l'effet d'un extracteur d'air du ventilateur installé au dos du miroir et soufflant sur celui-ci [483].

Starbound Chair ou "Chaise d'Observation" désigne une chaise dédiée à l'observation astronomique et dont la hauteur est réglable.

6.9 Les Filtres

Filtre ou filtre interférentiel ou filtre dichroïque désigne une pièce optique composée de lames de verre très minces et parallèles utilisée devant soit l'oculaire, soit le capteur photo afin d'augmenter le contraste des objets observés en isolant spécifiquement les bandes du spectre dans lesquelles ces objets émettent de la lumière. Ce filtre est constitué d'une lame de verre doté d'un traitement diélectrique ne laissant passer que certaines longueurs d'onde. Le principe du filtre interférentiel repose sur l'annulation des fréquences hors bande passante des rayons incidents et reflétés par de multiples couches et qui interfèrent entre eux (opposition de phase) [115].

Dans le cas des filtres pour nébuleuses on récupère le flux lumineux transmis et dans le cas de miroirs dichroïques = ERM = “Energy Rejection Mirror” pour le solaire on récupère le flux réflechi (une toute petite partie du flux incident). Dans les deux cas le flux luimineux n’est pas abosorbé par le verre contrairement à des filtres spécialisés comme le KG3.

Conditions d’utilisation d’un filtre pour nébuleuse :

- En visuel contrairement à une légende urbaine, il ne faut pas privilégier des instruments de grands diamètres, un filtre ne fait que laisser une partie des fréquences de la lumière sans l’atténuer, on peut donc l’utiliser avec des instruments à partir de 50mm.
- Idéalement le filtre doit avoir une transmission proche de 100% sur la ou les bandes passantes (On-Band) : OIII, Ha, Hb etc ....
- Il faut que la focale de l’instrument ne soit pas trop courte, F/6 minimum, pour que la transmission du filtre ne chute brutalement par décalage des fréquences = “Blue Shift” lorsque celuii ci est soumis à des angles d’incidence extrêmes
- En astrophoto on pourra augmenter le temps de pose global pour mieux faire ressortir les nébuleuses sur fond noir

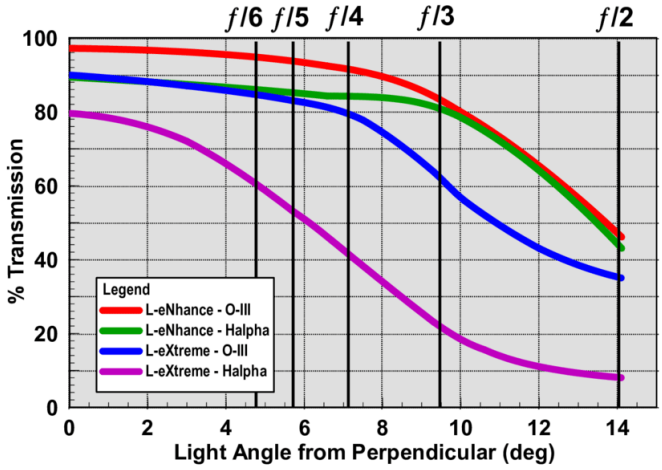
Les détails de la nébuleuse ne sont pas plus lumineux avec un filtre, mais c’est en éteingnant les autres longueurs d’ondes que l’on renforce le contraste de la nébuleuse. Pour voir plus de détail sans affaiblir le signal de la nébuleuse il faut augmenter le grosissement et / ou le diamètre tout en utilisant un oculaire garantissant une pupille de sortie : $Ps = D/G \approx 5mm$ [164].

L’utilisation de filtre à bande étroite avec des instruments à très courtes focale posent des problèmes :

- La courbe de bande passante est décalée vers la gauche = “Blue Shift”
- La transmission est diminuée

Le “Blue Shift” sera plus préjudiciable si la bande de transmission est plus étroite car éventuellement le filtre ne laissera plus passer aucune lumière dans cette bande (ex : bande OIII). Il existe une catégorie de filtre prenant en compte ce décalage avec avec des instruments courts : les filtres Baader “Highspeed”.

Impact Of Angle On Filter Performance

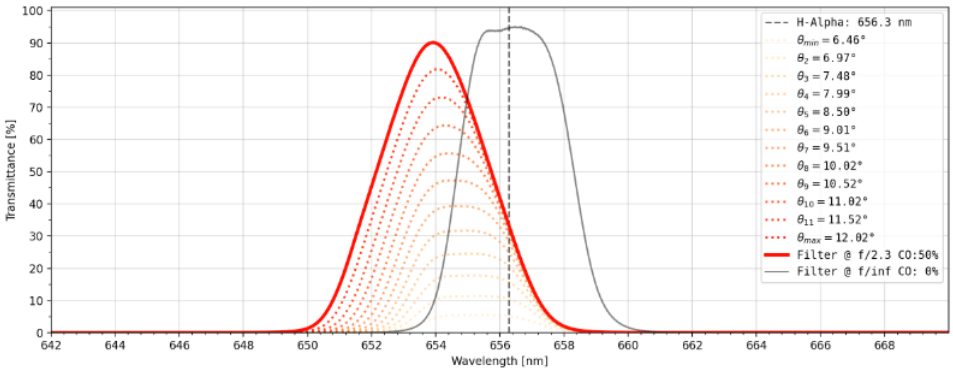


Credit : James Thompson

Formule du shift de longueur d’onde : $\lambda_\phi/\lambda_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \times \sin\theta}{n_{\text{eff}}}\right)^2}$, où n_0 est l’indice de réfraction de l’air, θ est l’angle d’incidence de la lumière frappant le filtre, n_{eff} est l’indice de réfraction effectif du filtre lui même.

Il existe des filtres dit “Pre-Shifted” ou “Highspeed” (à droite) spécialement conçu pour des instruments courts.

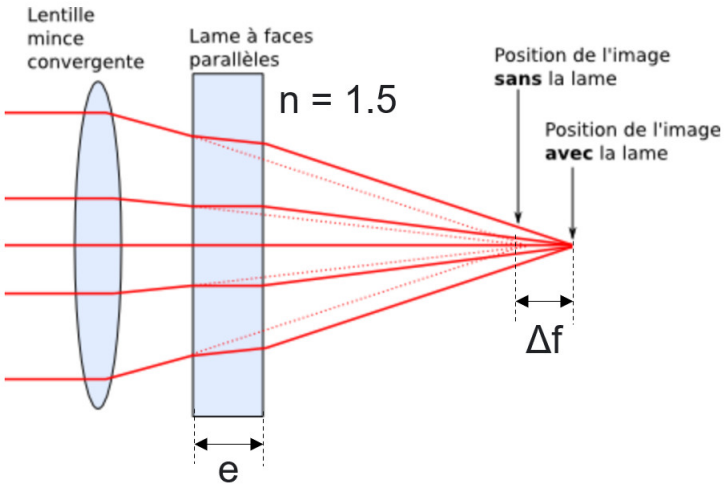
Blue Shift



(b) Effective bandpass of an $H\alpha$ centred H-Alpha 3.5nm Ultra-Narrowband filter in the parallel beam path (f/inf) as well as at a focal ratio of $f/2.3$ with a central obstruction of 50% (of the diameter). The central obstruction leads to a stronger blue shift with a narrower half-value width. Due to the blue shift, the maximum transmission at $H\alpha$ would only be approx. 30%.

Credit : Baader

L’utilisation de filtres permet de capturer une certaine plage de longueur d’onde des nébuleuses, mais aussi de rejeter des longueurs d’onde produite par la pollution lumineuse (filtres LPR). L’ajout d’un filtre qui est une lame de verre mince capable de réfracter la lumière. Ainsi, celle-ci déplacera le point focal de l’instrument un peu en arrière, de 1 mm en général : $\Delta F = e \times \frac{n-1}{n} \simeq e/3$, où e est l’épaisseur du filtre, n l’indice de réfraction du filtre (n = 1.5 pour le verre) [405] et aussi introduira des aberrations hors axe qui seront toutefois marginales sur la surface d’un capteur photo (coïncident avec le plan focal).



Credit : Déplacement du foyer par une lame mince

La production d’une image couleur d’un objet du ciel profond est réalisée en combinant les photos prises avec différents filtres pour lesquels on a associé une couleur (parfois arbitraire). Les filtres sont aussi utilisés en imagerie planétaire, notamment les filtres IR sur la lune pour réduire l’effet de la turbulence [323]. La qualité des filtres se juge essentiellement sur la largeur de bande des fréquences que le filtre est censé laisser passer sans atténuation. Les filtres à bande étroite montrent une bande de transmission proche d’une longueur d’onde unique, le profil de transmission est une courbe de type Lorentzian. On appelle les fréquences “Off-Band” celles où la transmission est proche de 100% et les fréquences “On-Band” celles où la transmission est proche de 0%.

Les filtres sont conçus pour être utilisé :

- Avec des rayons lumineux ayant un angle d'incidence faible (cône de lumière aigü) et donc plutôt avec des instruments à F/D long ou bien utiliser une barlow dans le cas des F/D court.
- Avec de grandes pupilles de sortie et donc plutôt avec des oculaires de longue focale (besoin de luminosité)

Problèmes courant avec les filtres :

- Apparition de halo autour des étoiles sur les photos
- Changement de la position de la mise au point après avoir installé le filtre, le "Focus Shift" : $\delta = \epsilon \times \frac{n-1}{n}$ où ϵ l'épaisseur du filtre et n son indice de réfraction [726].
- Vignetting du champ si le filtre est trop éloigné du capteur, c'est le cas des instruments à F/D court (cône de lumière obtus)

Filtres Astronomiques [163]

Objet	Filtre	Onde λ	HBW
Planètes			
Moon (cut the glare)	ND 1 = 13%	-	-
Venus [104]	UV	350 nm	60 nm
Planètes gazeuses (Jupiter, Saturne)	Méthane CH4	889 nm	8 nm
Planètes	IR-Pass	685 nm	-
Planètes	$H\alpha$	656 nm	35 nm
Ciel profond			
Nébuleuse planétaires	Oxygène OIII	496 et 501 nm	10 nm
Nébuleuse diffuses	Hydrogène $H\alpha$	656 nm	7 nm
Nébuleuse diffuses	Hydrogène $H\beta$	486 nm	7 nm
Nébuleuse diffuses	Sulfur SII	672 nm	7 nm
Nébuleuses	UHC $= H\alpha + H\beta +$ OIII + SII	-	-
Nébuleuses	Optolong L-Extreme $= H\alpha + H\beta +$ OIII	-	-
Nébuleuses	LPR = anti-pollution $= H\alpha + H\beta +$ OIII + Autres	-	-

Credit : J.G. Gricourt

Note : HBW = "Half Band Width" = bande de transmission du filtre.

Les filtres selon les types de nébuleuses (la plupars sont à la fois visuel et astrophoto) :

- Nébuleuses par réflection émettant dans le bleu : filtre LPR
- Nébuleuses par émission émettant dans le rouge : filtre UHC (visuel) ou $H\alpha$ (astrophoto) ou $H\beta$
- Nébuleuses planétaires émettant dans le vert : filtre OIII

Selon le fabricant Lumicon chaque type de filtre fonctionnera de manière optimale pour une pupille de sortie $d = G/D$ donnée :

Exit Pupil Specifications

Filter Type	Deep Sky	UHC	O-III	H-Beta
Bandpass	90 nm	22-26 nm	10-12 nm	8-10 nm
Optimum Exit Pupil (Light-Polluted Sky)	0.5-2 mm	1-4 mm	2-5 mm	3-7 mm
Optimum Exit Pupil (Dark Sky)	1-4 mm	2-6 mm	3-7 mm	4-7 mm

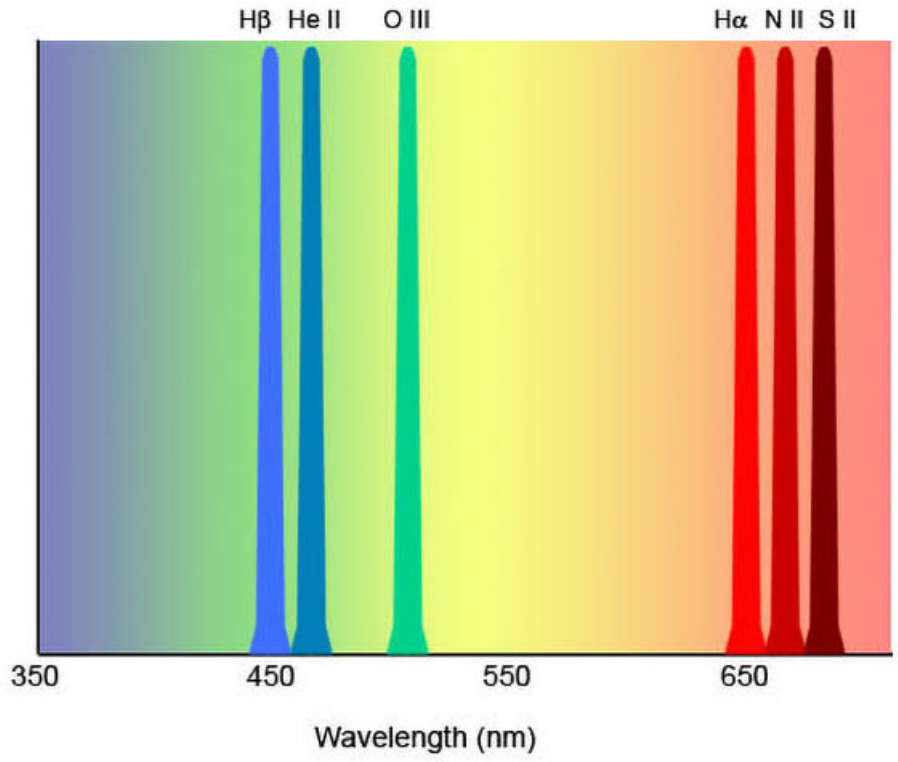
Credit : Lumicon

Donald E. Pensack à dit : *In general the only filter that really helps most Deepsky objects is the gasoline filter !* [233]

Les filtres révèlent les nébuleuses de manière optimals pour des grossisements vérifiant : $G \leq 10 \times D_{\text{inch}}$ [236] En effet le filtre éteind la luminosité du fond du ciel tout en retenant la luminosité de la nébuleuse dans la longueur d'onde du filtre. Alors que si on grossie la nébuleuse de manière trop importante le fond du ciel sera naturellement plus noir mais la luminosité de la nébuleuse sera aussi beaucoup plus faible et le filtre sera moins inutile.

Les filtres dont la larger de bande = HBW est étroite rendra l'image plus somble à l'oculaire.

Longueur d'onde des filtres et le spectre visible



Credit : AstroBackyard

La dimension de la figure de Airy diminue mathématiquement lorsque la longueur d'onde diminue donc la résolution est meilleur en utilisant un filtre bleu comme le filtre bande G méthane pour le solaire. De plus la résolution d'étoile double serrées sera meilleure dans le bleu si la turbulence est quasi nulle et que l'instrument conserve un Strehl élevé dans le bleu.

La dimension de la figure de Airy augmente mathématiquement lorsque la longueur d'onde augmente donc la résolution de l'instrument est moins bonne en utilisant un filtre rouge comme le filtre IR-Pass pour le planétaire.

L'effet de la turbulence décroit avec l'augmentation de la longueur d'onde observée, donc en allant vers le rouge [105].

Filter	Airy disc	Turbulence effect	Resolution
bande G	↘	↗	Even or better if turbulence is low
IR-Pass, $H\alpha$ large band (35nm)	↗	↘	Better for bigger instruments

6.9.1 Les Filtres pour le ciel profond

Filtre Anti Pollution ou "Filtre LPR" désigne un filtre supprimant les bandes produites par les lampes au mercure et à vapeur de sodium caractérisant une grande part de la pollution lumineuse. Ce filtre est surtout utilisé en visuel. Selon les marques : "Deep-Sky Filter" (Lumicon), "Skyglow Filter" (Orion), "CLS Filter" (Astronomik), "DGM GCE" (DGM Optics), "IDAS LPS-D3 IDAS LPS-P3 (IDAS)".

Filtre Chromacorr désigne un filtre corrigeant l'aberration chromatique d'un instrument. La correction consiste à diminuer le halo bleu autour des étoiles et des planètes. Cependant, le filtre n'engendre pas un gain de résolution comme le ferait une vraie correction optique.

Filtre Luminance désigne un filtre qui ne laisse passer que la lumière visible en coupant le spectre aux extrêmes UV et IR. Ce filtre est utilisé pour produire une image noir et blanc exploitant la pleine résolution du capteur. Pour coloriser cette image monochrome, il est possible de la combiner avec les images RGB acquise à l'aide de filtres RGB (parfois capturées en binning pour aller plus vite). Il est aussi possible de ne combiner que les images RGB cependant, l'image qui en résulterait ne pourrait atteindre le même niveau de SNR que l'image acquise par le seul filtre de luminance.

Filtre OIII et $H\alpha$ désigne un filtre photographique à bandes étroites : $H\alpha$ et OIII. Ce filtre de dernière génération permet d'obtenir des résultats spectaculaires sur les nébuleuses directement avec des caméras couleurs car il élimine la pollution lumineuse. Il peut s'utiliser aussi avec des NVA.

— IDAS NBZ Nebula Booster
— Optolong L-Ultimate

Filtre Optolong L-Extreme ou "Optolong L-eNhance" est un filtre photographique à bandes étroites : $H\alpha$, OIII et $H\beta$. Ce filtre de dernière génération permet d'obtenir des résultats spectaculaires sur les nébuleuses directement avec des caméras couleurs car il élimine la pollution lumineuse. Il peut s'utiliser aussi avec des NVA.

Exemple de mapping des couleurs en post traitement :

— $H\alpha$ = Rouge
— OIII = Vert
— $H\beta$ = Bleu

Filtre OIII ou "Filtre Oxygène" désigne un filtre large bande isolant les bandes 496 nm et 501 nm du spectre lumineux. Il est utilisé pour révéler les nébuleuses planétaires comme la "Nébuleuse de la Lyre" (M57) et les restes de supernova comme la "Nébuleuse du Crabe" (M1) ou les "Dentelles du Cygne" (NGC6960/6992). Ce filtre est utilisé aussi bien en visuel qu'en imagerie. Le filtre OIII de référence est le Lumicon OIII Gen3. Ce type de filtre assombrit beaucoup les étoiles et les nébuleuses, il s'utilise en visuel à partir de 200 mm.

Filtre $H\alpha$ ou "Filtre Hydrogène $H\alpha$" désigne un filtre isolant la bande autour des 656 nm du spectre lumineux. Il est utilisé pour révéler les nébuleuses diffuses à émission. Ce filtre est uniquement utilisé en imagerie : astrophoto ou visuel assisté.

Filtre $H\beta$ ou "Filtre Hydrogène $H\beta$" désigne un filtre isolant la bande 486 nm. Il est utilisé pour révéler les nébuleuses diffuses à émission, ex : "Nébuleuse à Tête de Cheval" (IC434/B33). Ce filtre est surtout utilisé en imagerie.

Filtre SHO désigne la technique d'imagerie couleur à large bande : $H\alpha$ et OIII. Le SHO est souvent représenté dans la palette "Hubble" :

— SII pour la couche rouge (SII = rouge)
— $H\alpha$ pour la couche verte ($H\alpha$ = rouge)
— OIII pour la couche bleue (OIII = bleu-vert)

Filtre HOO désigne la technique d'imagerie couleur à large bande : $H\alpha$ et OIII. Le filtre HOO produit des photos essentiellement bicolores bleu-rouge.

— SII pour la couche rouge (SII = rouge)
— OIII pour la couche verte (OIII = bleu-vert)
— OIII pour la couche bleue (OIII = bleu-vert)

Filtre SII désigne un filtre utilisé en imagerie et isolant la bande 672 nm. Il est utilisé pour révéler les nébuleuses diffuses à émission.

Filtre UHC ou "Nebula Filter" désigne un filtre large bande isolant les bandes $H\alpha$, Hbeta, SII et OIII. Ce filtre est surtout utilisé en visuel. Selon les marques : "NPB Filter" (DGM Optics), "Ultrablock Filter" (Orion).

6.9.2 Les Filtres Solaires

Désigne des filtres solaires qui permettent de réduire fortement l'énergie incidente dans tout le spectre. Ce type filtre est souvent installé devant l'objectif principal. En visuel il faut utiliser un filtrage global (instruments + filtres) de ND5 au minimum.

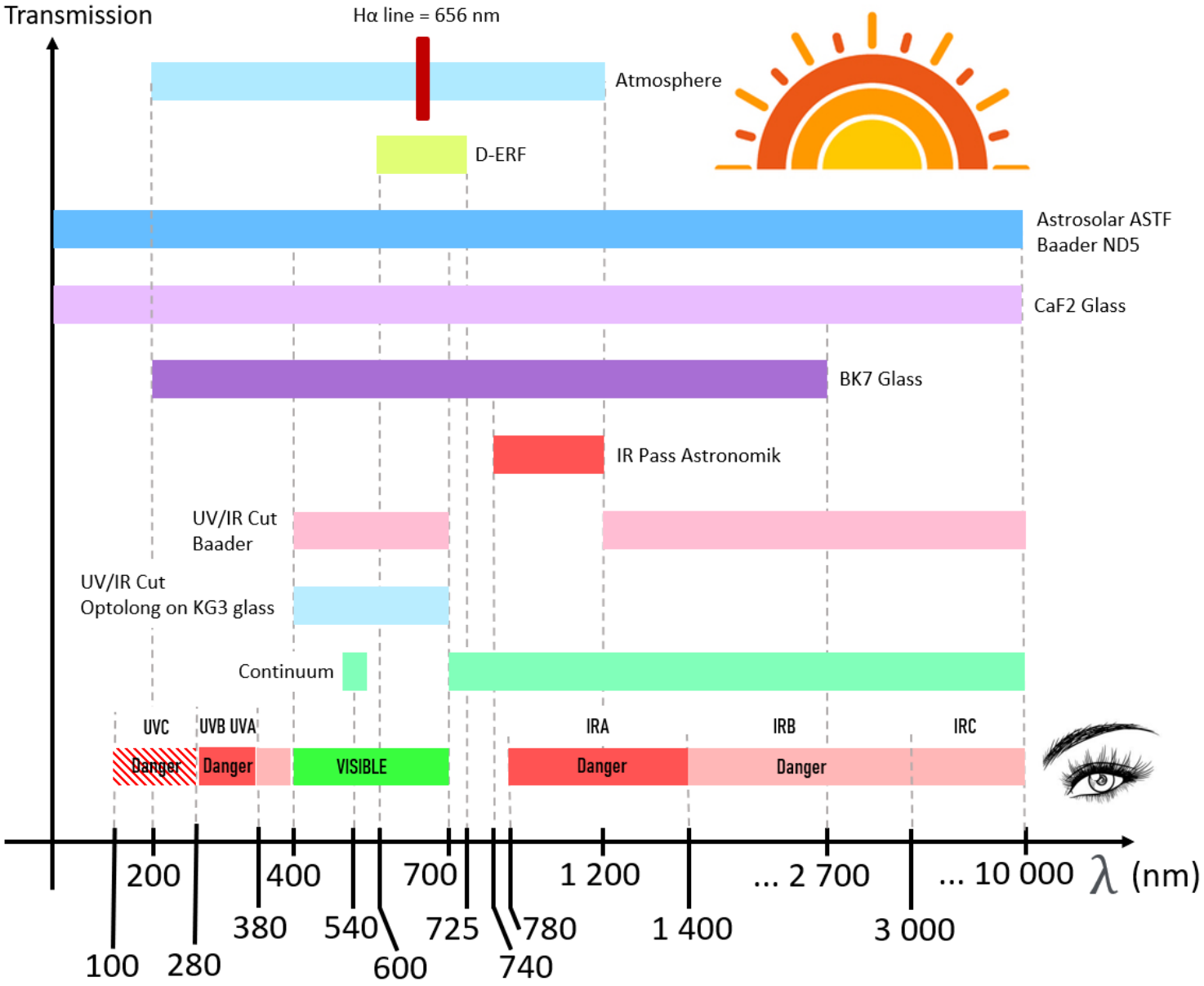
Filtres de protection

Filtre	Plage Visible	Bandwidth	Transmittance
D-ERF	[400 nm, 700 nm]	Visible	95% dans le visible
UV/IR Cut KG3	[400 nm, 700 nm]	Visible	95% dans le visible
Blocking filter $H\alpha$	[656 nm]	$H\alpha$ (1 nm)	0%
Double Stack	[610 nm, 690 nm]	$H\alpha$	0%
Baader Astrosolar ASTF	-	Large	0.001% (ND5)
Eclipsmart (Celestron)	-	Large	0.001% (ND5)
Filtre en verre	-	Large	0.001% (ND5)
Prisme de Herschel (Wedge)	-	Large	5% (ND1.3)

Credit : J.G. Gricourt

Note : une lunette de type "Double Stack" comprend un double filtre Etalon.

Transmission lumineuse [115]



Credit : J.G. Gricourt

Sources : Solar Spectrum, Astrosolar, CaF2, BK7, UV/IR Cut Baader, UV/IR Cut Beloptik, Continuum Baader, Absorption oeil humain

Les UVC les plus dangereux sont “normalement” totalement arrêtés par la couche d’ozone qui coupe le flux à 300 nm [336]. La couche d’ozone filtre la totalité des UVC et une partie des UVA et UVB. Il reste 95% d’UVA et 5% d’UVB arrivant au niveau de la mer. Les IR à partir de 1400nm sont en grande partie absorbés par l’eau et le CO2 de l’atmosphère [336]. Les verres des lunettes astronomiques ED ou APO filtre les UV passés 300 nm mais pas les télescopes à miroir ni les lunettes à base de verre Fluorites Takahashi FC-100.

Transmittances typiques des verres [112, 100] :

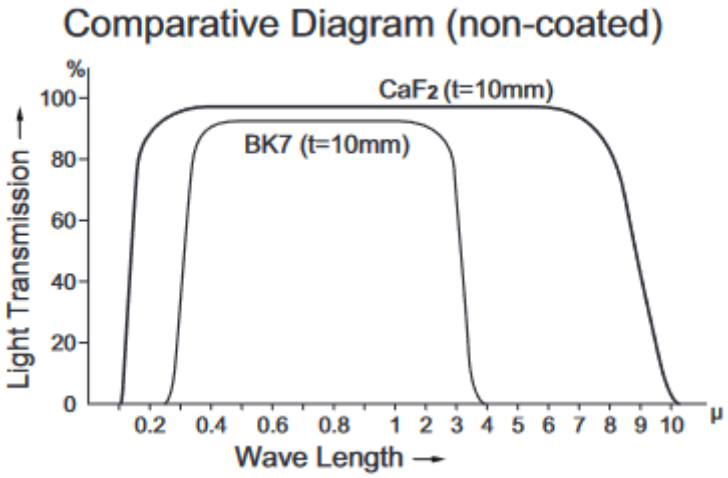
— BAK7 : [400 nm, 3 000 nm] [689]
— S-FPL53 : [330 nm, 2 400 nm] [563]

— BBHS Baader diagonal : [390 nm, 2 000 nm] [42]
— CaF2 : [200 nm, 7 000 nm] [689]
— Dielectric Coating des miroirs : [400 nm, 750nm] [1]
— Lunettes Solaire : [600 nm, 2 400 nm] [554]

Les miroirs aluminés et les objectifs de lunettes sans traitement multicouche transmettent très bien les UVA et les UVB. Les miroirs aluminés avec une couche en argent ou avec un couche diélectrique ne transmettent pas les IR, alors que les miroirs aluminés avec une couche d'or transmettent très bien les IR (voir télescope James Webb).

Baader met en avant que ses renvois coudés filtrent déjà les UV e les IR [41].

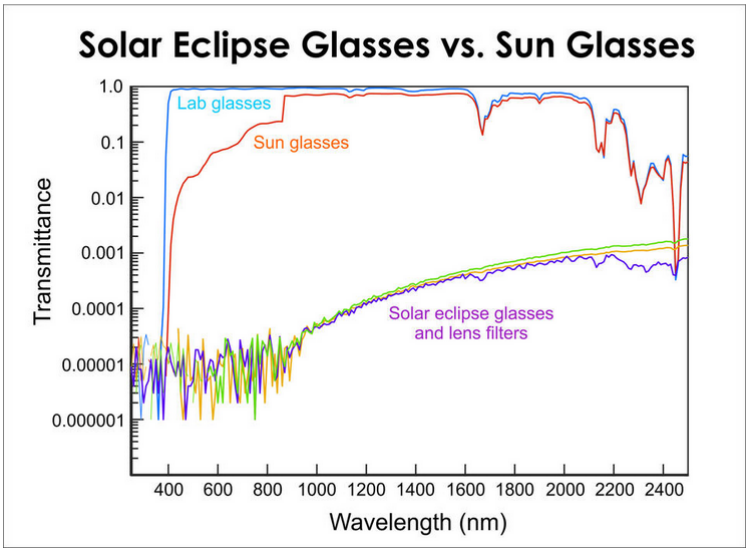
Transmission lumineuse du verre BAK7 et CAF2 (FC-100 DZ)



Credit :Takahashi

Pour comparaison le niveau de transmission de lunette de protection solaire :

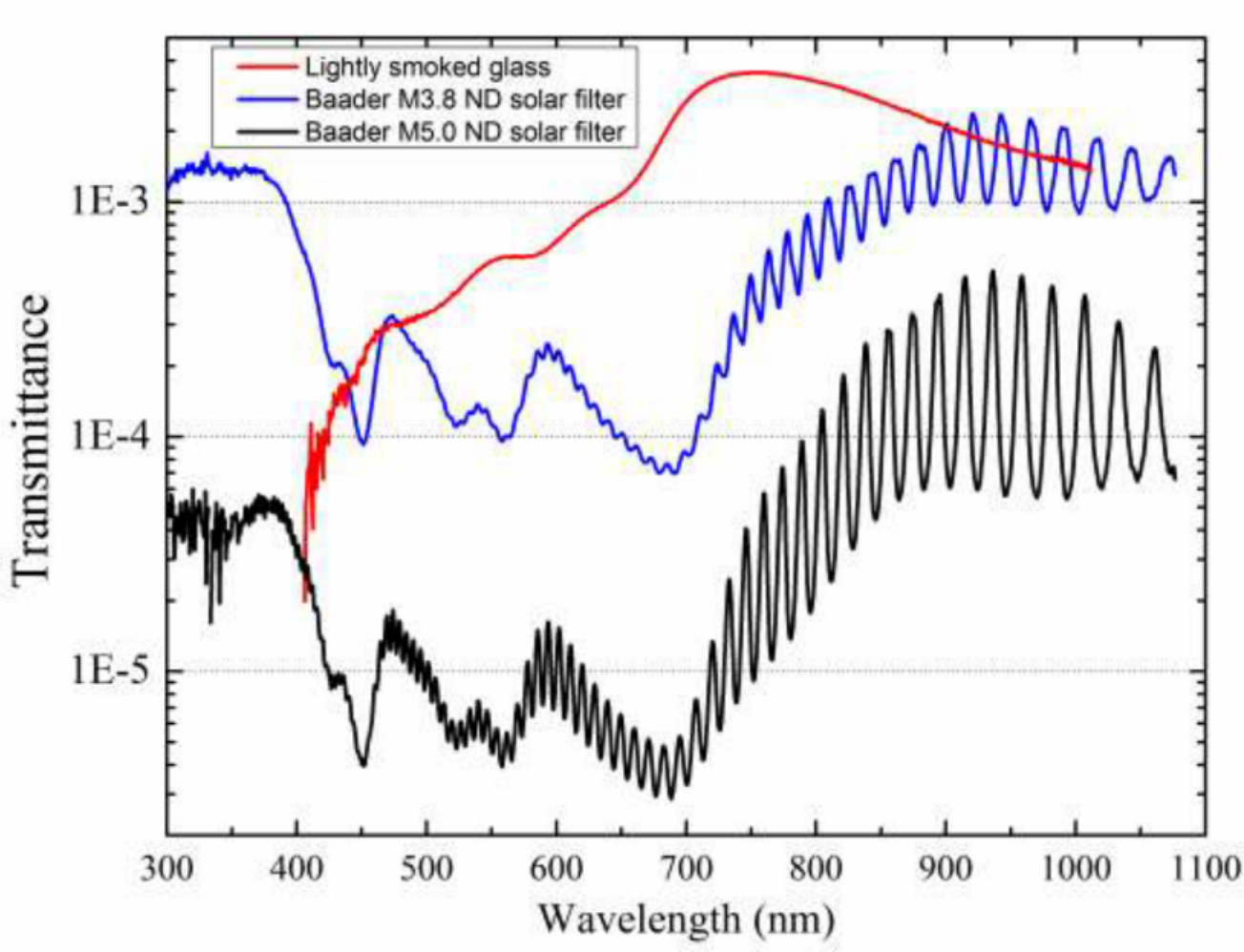
Transmittance of glasses comparison



Credit : NIST

En général en visuel dans le spectre visible, on prendra pour référence la valeur de T = 0.001% = ND5. Même avec un filtre Baader Astrosolar il restera des IR dans la plage de 900 nm à 1000 nm de transmittance proche du seuil des IR admissible 0.5% [608, 607], un filtre UV/IR Cut on KG3 permettra de couper définitivement ces IR grâce à la lame de verre KG3 qui absorbent les IR même lointains [467].

Astrosolar ASTF ND5 / BDSF ND3.8



Credit : Igor Nesterenko

L'Astrosolar ND3.8 est réservé exclusivement à un usage photo [110]. L'image du soleil est beaucoup plus lumineuse que celle vue au travers d'un Astrosolar ND5 cependant ce filtre dédié astrophoto solaire nécessite quand même un filtre ND0.9 supplémentaire afin de permettre de réaliser des poses ultra-courtes à 100 ISO et cela afin de battre le seeing [111].

Les filtres Double Stack, blocking filter et D-ERF ne s'utilisent que pour l'observation en $H\alpha$.

On peut aussi éviter l'utilisation de ces filtres en utilisant un prisme de Herschel.

Les anciens film solaire souple que l'on appelait à tord "Mylar" [10] tout comme les filtres en verre sont très mauvais en visuel et offrent une protection relative, le verre peut éclater sous l'effet de la chaleur, de plus ces filtres n'atteignent pas la qualité d'image observée derrière un filtre Astrosolar (ASTF Baader), ils ne devraient donc plus être utilisés.

Combinaison de filtres en lumière blanche :

10. Le Mylar est le film plastique transparent utilisé pour protéger les livres scolaires

— Prisme de Herschel ND1.3 + filtre ND3 + filtre ND0.9 (ou polarisant) + Oculaire
— Filtre Astrosolar ND5 + Oculaire

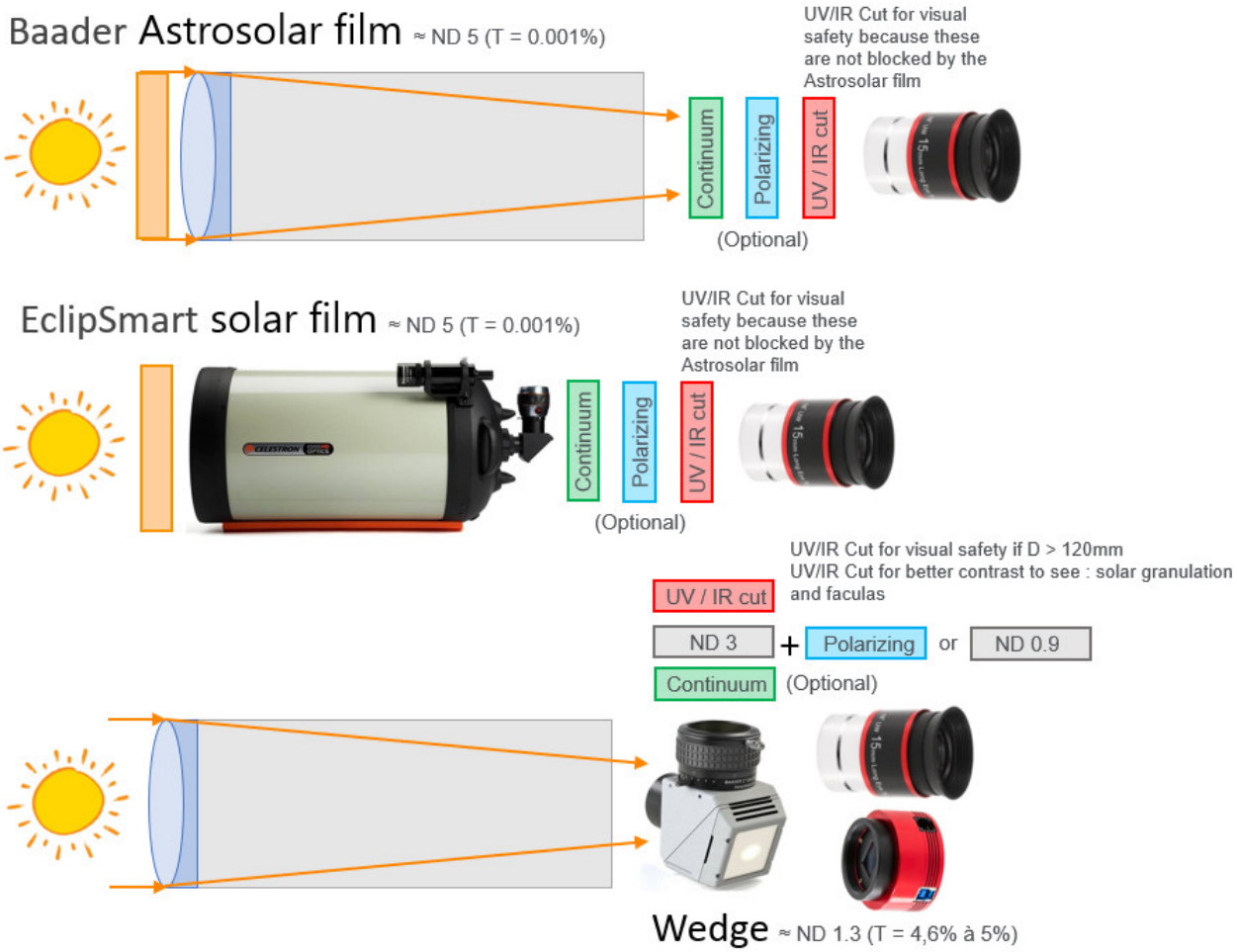
Attention, le film Astrosolar laisse passer les UV proches et les lointains encore nocifs. Si le diamètre fait plus de 120 mm il faudra compléter le train optique avec un filtre UV/IR Cut.

Les filtres UV / IR sont de 2 types [109] :

— Filtre UV / IR par absorption : coupent les IR jusqu'à 2500 nm (UV/IR Cut on KG3)
— Filtre UV / IR interférentiel : coupent les IR jusqu'à 1200 nm (Baader UV/IR Cut photo)

Filtres Solaires lumière blanche désigne des filtres solaires ou des dispositifs permettant l'observation du Soleil sur la quasi totalité du spectre lumineux. Le filtre Astrosolar ou le prisme de Herschel permettent cela [503].

Lumière blanche



Credit : J.G. Gricourt

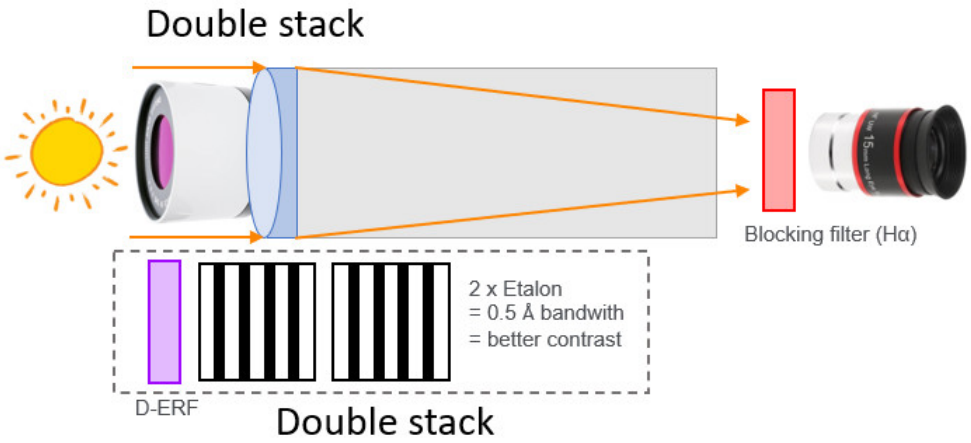
Filtres Solaires à bande étroite le soleil peut être observé au travers de différents filtres à bande étroite :

1. Filtre Continuum : taches solaires, facules, granulation, filigrees, flares
2. Filtre Méthane G : granulation, filigree
3. Filtre $H\alpha$ (blocking filter) : protubérances (et filaments), spicules, flares, CME = Coronal Mass Ejection

4. Filtre Sodium D (SoD) : taches solaires, protubérances et flares
5. Filtre Calcium II ligne H (CaH) : plages faculaires et protubérances basses
6. Filtre Calcium II ligne K (CaK) : plages faculaires et protubérances basses

Note : attention ces filtres ne peuvent être utilisés seul, il faut en général prévoir a minima un filtre D-ERF à l'avant de l'instrument pour protéger l'observateur ou la camera.

$H\alpha$



Credit : J.G. Gricourt

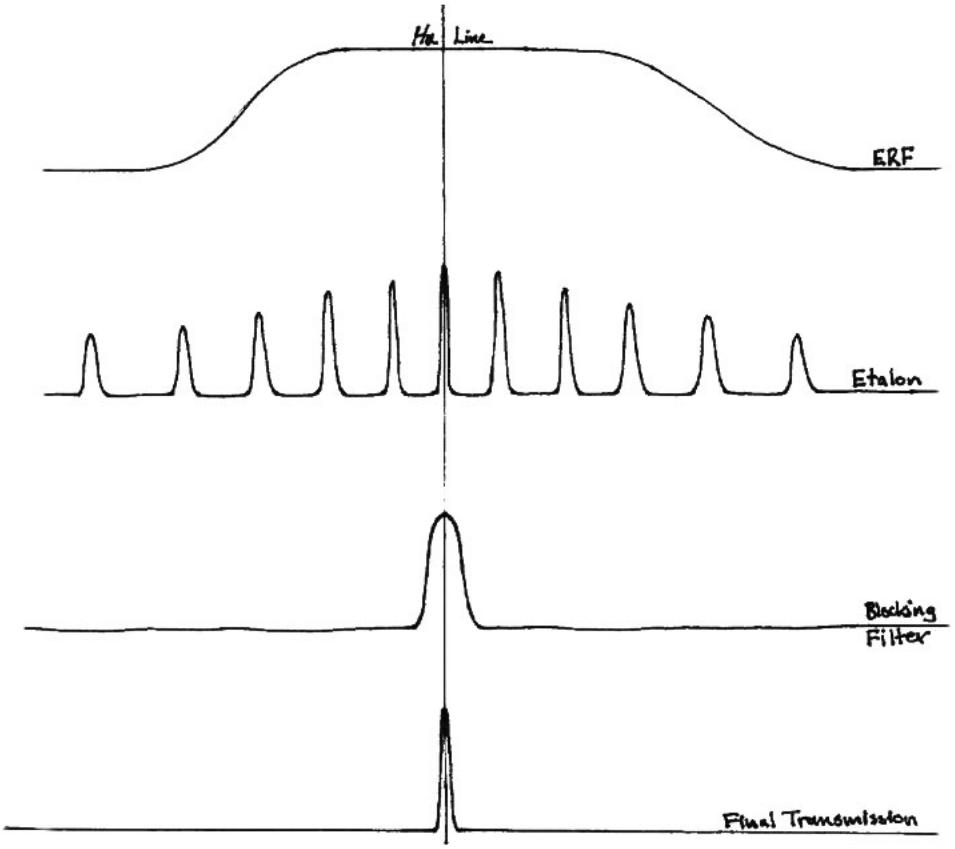


Credit : Visible light - $H\alpha$ - CaK

Combinaison de filtres en $H\alpha$:

— D-ERF + Etalon (FP) + blocking filter + oculaire
— Filtre Double Stack + blocking filter + oculaire
— Filtre D-ERF + Daystar Quark + oculaire

Filtrage $H\alpha$



Credit : BYoesle - CloudyNights

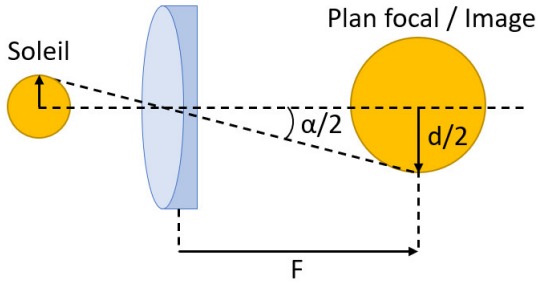
L'Astrosolar ne transmet pas suffisamment d'énergie dans le $H\alpha$ pour être utilisé dans cette bande.

Filtre BF ou "Blocking Filter" désigne un filtre solaire à bande étroite 1 nm utilisé en lumière $H\alpha$ et installé à l'entrée du porte-oculaire juste devant un filtre Etalon (FP). Le filtre permet d'isoler l'étroite bande $H\alpha$ à 656 nm générée par le filtre Etalon (rouge). Certains renvois coudés dédiés au solaire comportent un blocking filter intégré, les modèles varient selon la focale de l'instrument ciblé.

Renvois coudés avec filtre BF (Lunt Solar Systems, Coronado)

Brand	Filtre	Focal max visual use (*)	Focal max astrophoto use
Lunt	B600	600 mm	400 mm
Lunt	B1200	1200 mm	600 mm
Lunt	B1800	1800 mm	1200 mm
Lunt	B3400	3400 mm	1800 mm
Coronado	BF5	500 mm	-
Coronado	BF10	1000 mm	-
Coronado	BF15	1500 mm	-
Coronado	BF30	3000 mm	-

(*) : la focale maximale afin d'obtenir une image du disque solaire non vignettée en visuel ou astrophoto (image sur le plan focal). En astrophoto ou le vignetting est plus visible, il est préférable de prendre un BF plus large que celui préconisé en visuel.



Credit : J.G. Gricourt

Si le diamètre du soleil sur le plan focal est d, alors $d = F \times \alpha$ où α est le diamètre angulaire du soleil soit 0.53° ou 1/108 radian donc $d = F/108$. Il faut que le BF soit suffisamment large pour ne pas vigneter le cercle image de diamètre d.

Attention, le BF a tendance à s'oxyder avec le temps sous l'influence de l'humidité et doit donc être nettoyé régulièrement et éventuellement remplacé au bout de 10 ans [11].

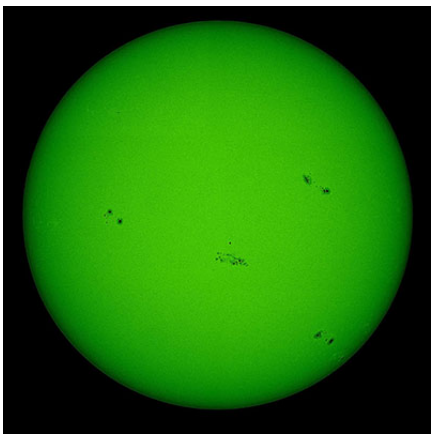
Filtre Continuum ou "Solar Continuum Filter" désigne un filtre de type "Contrast Booster" à bande étroite de 10 nm isolant la bande 540 nm (le vert) dans le spectre solaire la zone du spectre où en général les lunettes ont leur meilleur Strehl. Il est donc destiné à accroitre les contrastes des observations dites en lumière blanche. Il est recommandé de mettre ce filtre en premier devant le faisceau entrant (mais pas toujours possible).

Avantages :

- Le vert est la longueur d'onde pour laquelle l'oeil et le plus sensible et fonctionne-le mieux
- En rejetant le bleu, ce filtre permet de réduire l'effet de la turbulence atmosphérique sur l'observation de la surface du soleil (la turbulence est moindre à longueur d'onde plus élevée)
- Ce filtre élimine d'office les IR et dispense donc l'utilisation d'un filtre IR Cut pour une meilleure protection des yeux
- Ce filtre permet d'obtenir la résolution maximale d'une lunette achromatique même courte (f/6) car il élimine complètement l'effet du chromatisme longitudinal en éliminant le rouge et le bleu pour ne garder que le point focal dans le vert
- Ce filtre permet d'exploiter la résolution optimale des lunettes ED et APO dans le vert correspondant au "Best Focus" de la lunette, là ou le chromatisme longitudinal et le sphérochromatisme sont minimums.

Ce filtre produisant naturellement une teinte verte et n'atténuant pas la puissance du fasceau, il doit aussi être utilisé conjointement avec un filtre solaire large bande (dit lumière blanche) à l'entrée de l'instrument.

11. À stocker à l'abri de l'humidité avec du silicagel



Credit : BYoesle - CN

On peut aussi remplacer le filtre Continuum 540 nm soit par un filtre Yellow LongPass 495 nm afin d'obtenir une image jaune du soleil plutôt que verte ou bien un filtre OIII 500 nm pour le ciel profond. Une lunette ED ou APO de grande qualité conservant un Strehl élevé même au delà du vert sera plus adaptée pour utiliser un filtre LongPass car ce filtre laisse passer toutes les fréquences à partir 495 nm.

Filtre Baader SunDancer désigne un dispositif spécial pour lunette similaire à une barlow en 2" conçu pour observer le soleil en $H\alpha$ à l'aide d'un oculaire. Celui-ci fonctionne de manière optimale à F/30 en raison de la présence du filtre étalon. Il sera donc nécessaire de parvenir à F/30 en rajoutant une barlow télécentrique devant le SunDancer. La particularité de ce modèle est que l'Etalon est plongé dans un bain d'huile afin d'éviter son usure avec le temps. Baader propose un autre filtre plus haut de gamme le Solar Spectrum qui fonctionne avec une FWHM = 0.3 à 0.8 Å alors que le SunDancer fonctionne avec une FWHM de 0.6 Å.

Le SunDancer s'intègre donc dans la chaîne suivante :

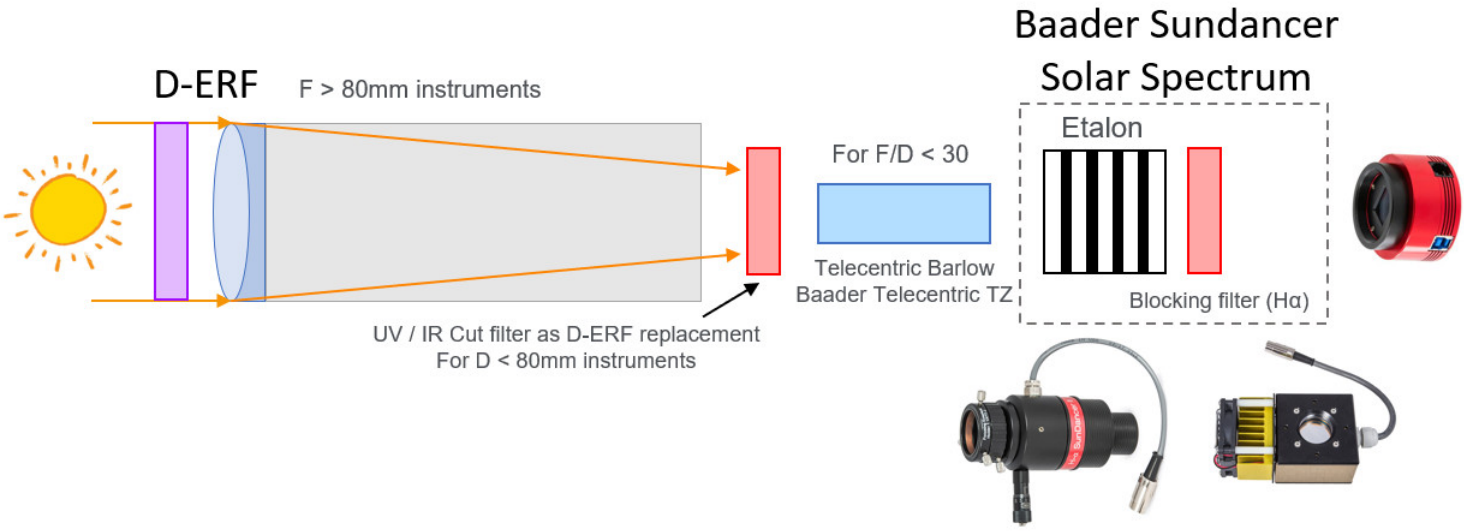
- 1 renvoi coudé à miroir diélectrique
- 1 barlow télécentrique
- 1 filtre Etalon intégré dans le SunDancer
- 1 blocking filter pour isoler la raie $H\alpha$ [108] et intégré dans le SunDancer

En pratique :

- Au delà de 80 mm de diamètre un filtre D-ERF [12] est à placer obligatoirement devant l'objectif
- En dessous de 80 mm un filtre UV/IR Cut (à la place d'un D-ERF) peut suffir à l'entrée du renvoi coudé là où le faisceau est encore assez large (unfocused) pour ne pas chauffer le filtre [463]

Le SunDancer doit être alimenté en courant électrique dans le but de le chauffer pour que l'étalon fonctionne de manière optimale "On Band"en ne laissant passer que l'étroite bande $H\alpha$. SunDancer dépasse de très loin les capacités du Coronado pour peu que sa température soit correctement réglée à chaque utilisation selon les conditions d'observation extérieures [24].

12. Car le SunDancer ne rejette pas la chaleur comme le feraient un prisme de Herschel



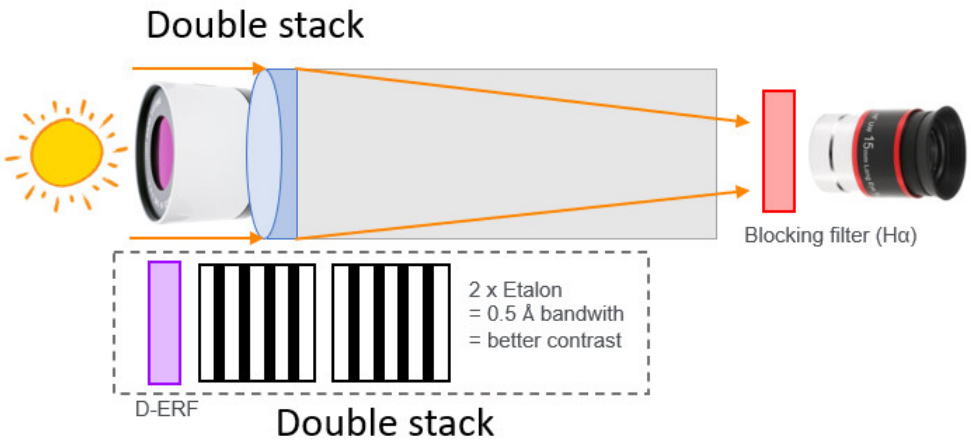
Credit : J.G. Gricourt

Filtre DayStar Quark désigne un dispositif spécial pour lunette similaire à une barlow en 2" conçu pour observer le soleil en $H\alpha$ à l'aide d'un oculaire. Celui-ci fonctionne de manière optimale de F/7 à F/10. Le DayStar Quark est fonctionne comme un SunDancer mais intègre une barlow en plus.

Attention : DayStar est malheureusement connu pour avoir un contrôle qualité laissant à désirer et de nombreux exemplaires du DayStar Quark sont défectueux. Les mêmes problèmes de qualité sont constatés sur d'autres produits de la marque Daystar Filters' SR-127 'QT' Dedicated Hydrogen Alpha Solar Telescope (Chromosphere Model), Achaim. D'autres marques tel que Baader (Solar Spectrum) et Lunt proposent des dispositifs $H\alpha$ plus fiables.

Filtre Double Stack désigne un filtre solaire à placer devant l'objectif de la lunette. Ce filtre est composé d'un filtre D-ERF, d'un double filtre Etalon (FP) et d'un filtre ITF (IR-Cut) placé devant. Le double filtrage permet de réduire la largeur de bande autour de la longueur d'onde $H\alpha$ de 0.7 angströms (Simple Stack) à 0.5 Å $B = (B_1 + B_2) * 64/100$ [389] ce qui apportera un contraste et une résolution encore plus élevée. Le principe du double stack repose sur la superposition de 2 filtres Etalons ayant le même pic central (CWL) alors la transmission résultante est plus faible : $T = T_1 \times T_2$ et le pic de transmission résultant est plus étroit. Ce filtre permet aussi de convertir rapidement une lunette classique en lunette solaire. Il faut cependant rajouter un blocking filter sur le renvoi coudé également.

Un exemple, le filtre double stack : Coronado Solarmax 90 (SM90) ou le Solarscope DSF-100.



Credit : J.G. Gricourt

Filtre ERF ou “D-ERF” ou “Dielectric Energy Reflection Filter” désigne un filtre solaire à large bande de 610 à 690 nm permettant donc centré sur le $H\alpha$. Il permet de réduire la largeur du spectre lumineux en bloquant les IR dangereux jusqu'à 1500 nm (IR lointains) ainsi que les rayons à hautes énergies tels que les UV (ultraviolet). Le filtre “D-ERF” permet ainsi de protéger les filtres à bande étroite installés au niveau du porte-oculaire. Le filtre “D-ERF” est un filtre interférentiel (un diélectrique) réfléchissant l'énergie incidente, il est donc froid au touché contrairement à certains filtres qui travaillent en absorption et qui peuvent exploser sous l'effet de la chaleur pour certains. Attention aussi au filtre “C-ERF” qui ne filtre pas les IR lointains pourtant très dangereux. Dans son principe le filtre D-ERF ne laisse passer que 19% de l'énergie solaire total incidente [105] et réfléchi ensuite le reste du flux sous forme d'un faisceau convergent dans l'autre sens. Contrairement à un filtre en lumière blanche Astrosolar, la bande des 600-720 nm extraite n'est pas atténuée afin de conserver la luminosité nominale de la bande $H\alpha$ à 656 nm ou la bande CaK du spectre en vue d'une utilisation avec un filtre étalon. Ce filtre peut être installé devant l'objectif principal.

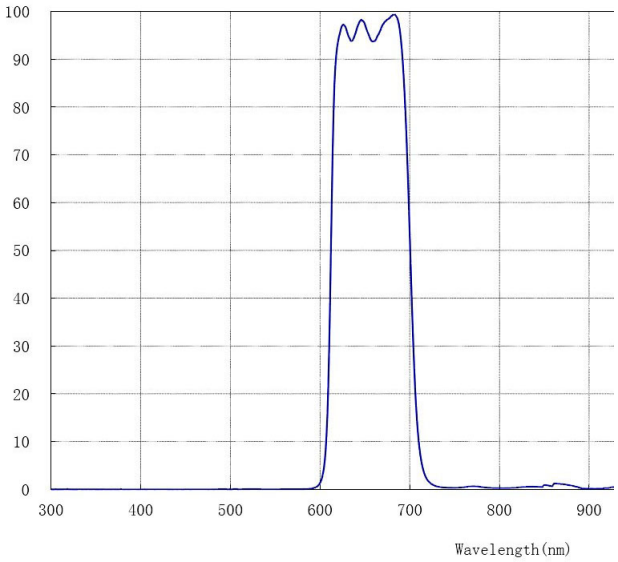
Cependant, pour réduire les coûts, on peut le placer sur le chemin optique à l'intérieur du tube, il pourra alors être plus petit, cependant cette dernière méthode n'est pas sans inconvénients :

- Le flux retour réfléchi pourrait chauffer l'air interne de la lunette qui resterai alors confiné dans les instruments rendant les images turbulentes
- Le flux retour étant convergent il doit normalement repasser au travers de l'objectif cependant en raison d'un tilt du filtre, le flux pourrait atteindre dangereusement des parties autour de l'objectif [46]

On utilisera un D-ERF interne plutôt pour des instruments complètement ouverts afin d'évacuer la chaleur générée par le flux retour.

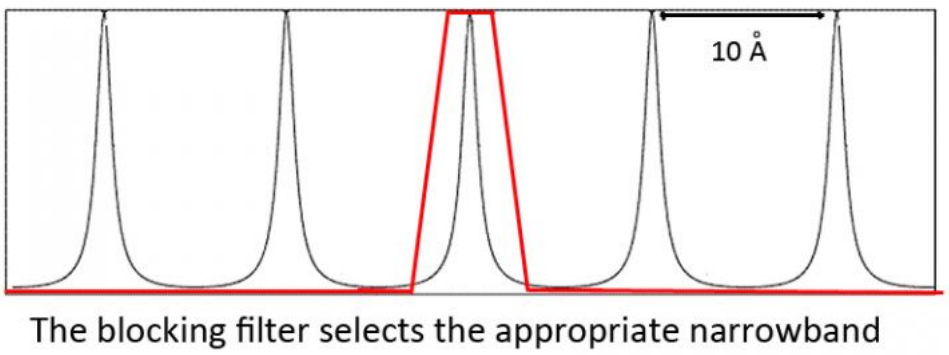


Credit : Rolf Geissinger



Credit : Baader

Filtre Etalon ou “Filtre FP” ou “Filtre Interférentiel de Fabry Pérot” est un filtre hachant le spectre en de multiples pics (spectre en peigne) d’intensité moindre réduisant ainsi l’intensité du spectre du Continuum photosphérique pour ne laisser passer que quelques pics dont celui correspondant au creux $H\alpha$. L’un des pics (CWL) du FP est la raie $H\alpha$ qui peut être isolée si l’on utilise conjointement avec un blocking filter ou “BF” [108]. Le pic prend la forme d’une distribution de Cauchy. Le FP est idéalement placé à l’avant de l’instrument où les rayons sont parallèles pour une utilisation optimale. Les FP placé devant l’objectif offrent plus de contraste que ceux qui sont placés derrière l’objectif (ex : Daystar Quark). Le FP accepte des rayons incidents jusqu’à un angle de 0.5° ce qui convient avec le soleil où au max les rayons du bord arrivent avec un angle de 0.25° [65]. Le FP peut être placé à l’arrière de l’instrument, mais il faut que l’instrument soit ouvert à F/30 au moins (rayons quasi parallèles) ou sinon il faudra placer une barlow de type télécentrique juste avant le FP afin que les rayons incidents soient presque tous parallèles. Le FP est un filtre difficile à fabriquer, et ce, d’autant que la FWHM est étroite en général soit 1 Å ou 0.5 Å. Ce filtre est utilisé dans la lunette Coronado PST ou le dispositif Coronado Solarmax 90. Un exemple de filtre Etalon : Baader Solar Spectrum.

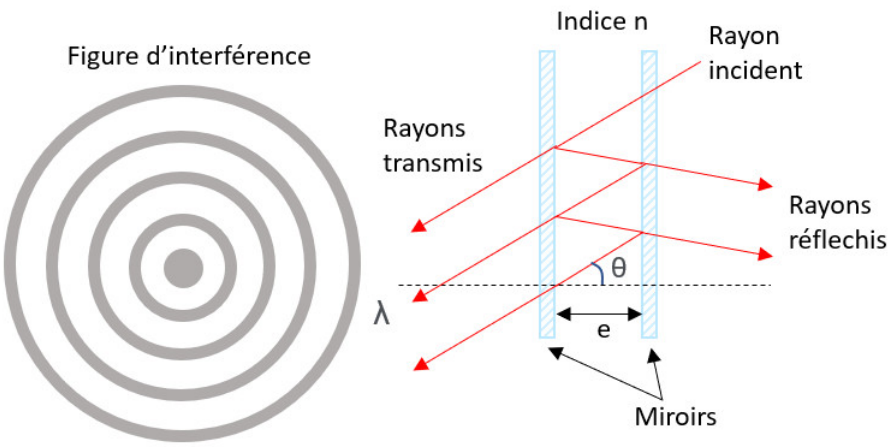


Credit : Ian Morison

Note : la longueur d’onde du pic central du filtre FP appelé CWL (Center Wave Length) dépend de l’angle d’incidence des rayons. Pour une incidence normale (90°) la CWL = 656 nm correspondant au $H\alpha$..

L’équation de l’Etalon [299] :

Fabry Pérot



Credit : J.G. Gricourt

Le déphasage : $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$

La différence de marche : $\delta = 2ne\cos\theta$

Par déduction, on trouve la longueur d'onde transmise : $\lambda = (\frac{2\pi}{\Delta\Phi})2ne\cos\theta$ [66]

- λ : longueur d'onde de l'Etalon
- n : indice de réfraction de l'espacement
- e : = épaisseur de l'espacement
- θ : angle d'incidence des rayons parallèles
- δ : différence de marche (distance) entre 2 rayons transmis
- $\Delta\Phi$: déphasage entre 2 rayons transmis

Méthode de réglage de la raie ou "Doppler Shifting" d'un Etalon [65] :

- Pression mécanique sur l'Etalon pour faire varier la distance entre les 2 miroirs
- Inclinaison du filtre "Tilt Tuning"
- Changement de la température du filtre (Baader Solar Spectrum ou SunDancer)
- Changement de la pression de l'air "Pressure Tuning" entre les 2 miroirs (variation de l'indice de réfraction).

Filtre $H\alpha$ désigne un filtre solaire = "Blocking Filter" isolant le pic de 656 nm. Ce filtre se trouve dans les lunettes dédiées à l'observation solaire ex : dans la lunette LUNT ou Coronado. Ce filtre sert à isoler la bande $H\alpha$ derrière un filtre Etalon (FP) (pour isoler l'un des pics du peigne de l'Etalon). Le filtre $H\alpha$ dédié au solaire possède une bande de transmission de 1 nm donc beaucoup plus étroite que celle du filtre $H\alpha$ dédié à la photo des nébuleuses qui lui possède une bande de transmission de 7 nm.

Des dispositifs complets permettant d'isoler cette longueur d'onde en solaire :

- L'oculaire filtrant "SunDancer" de Baader
- Le filtre à longueur d'onde modulable "Solar Spectrum" de Baader

Filtre Méthane désigne un filtre isolant la bande 889 nm du spectre lumineux produite par les molécules de méthane CH4 des planètes gazeuse : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Filtre Méthane bande G désigne un filtre isolant la bande 430 nm du spectre lumineux afin de mieux voir la granulation et les filigrees de la photosphère du soleil [107], ces derniers sont appelés dans la littérature "G-band bright points" [13].

Filtre IR-Cut désigne un filtre infrarouge isolant la bande 400 à 700 nm du spectre lumineux. Il est utilisé en solaire pour protéger les filtres à bande étroite et l'oeil de la chaleur des IR, mais aussi renforcer les contrastes des planètes capturées par un capteur couleur. Attention au choix de ce filtre, celui-ci ne doit jamais transmettre les IR même après 1000 nm.

Filtre IR Band Pass désigne un filtre infrarouge laissant passer uniquement les IR de 642 nm à 840 nm. Il est utilisé en planétaire et solaire afin de juguler la turbulence [53].

Filtre ITF ou "Induced Transmission Filter" désigne un filtre de protection qui coupe les UV et les IR transmis par Le filtre ERF en entrée puis par l'Etalon et qui seraient autrement fuités par le blocking filter. Sa bande passante de 100 nm est centrée sur la longueur d'onde $H\alpha$. Ce filtre est donc placé entre le filtre Etalon et le blocking filter dans les lunettes Lunt. Les filtres D-ERF de qualité coupent les UV et les IR. Le ITF s'oxyde avec le temps et doit donc être remplacé au bout de quelques années [14].

6.9.3 Les Filtres Planétaires

Filtre UV désigne un filtre à bande étroite isolant une bande comprise entre 350 nm et 395 nm du spectre lumineux. Il est utilisé pour rendre plus fidèles les couleurs des planètes capturées par un capteur couleur. Permet en particulier de faire ressortir la couche nuageuse sur Vénus. Ce même filtre, s'il isole la bande 395 nm peut aussi servir pour la bande CaK, CaH du soleil. L'atmosphère de Vénus réagit aussi très bien au filtre IR.

Filtre UV/IR Cut désigne un filtre à large bande de 400 à 700 nm permettant de réduire le spectre lumineux au spectre visible en bloquant les IR (infrarouges) et les UV (ultraviolet). En solaire, ces filtres protègent les yeux et les filtres à bande étroite installés au niveau du porte-oculaire. En solaire, le filtre UV/IR Cut a la même fonction que le filtre ITF (filtre à absorption). Attention au choix de ce filtre en solaire, celui-ci ne doit jamais transmettre les IR même après 1000 nm si le diamètre de l'instrument est plus important. Ce filtre permet aussi de renforcer les contrastes en imagerie planétaire, car certains capteurs couleur sont sensibles aux IR alors nuisibles aux images. Les lunettes APO peuvent bénéficier aussi de ces filtres en astrophoto du ciel profond parce que les IR ne sont pas focalisés au même endroit que les autres couleurs en raison du chromatisme et peuvent générer des halos autours des étoiles sur les photos.

Filtre IR désigne un filtre ne laissant passer que les IR à partir de 700 nm permettant de réduire l'effet destructeur de la turbulence sur les images planétaire

Filtre IR-Pass désigne un filtre ne laissant passer que les IR à partir de 685 nm. Il est utilisé en planétaire notamment sur la Lune afin de contrer l'effet de la turbulence qui est plus faible sur les IR justement rendant les images plus nettes mais au prix d'une perte de résolution effective car la dimension figure de Airy dépend de la longueur d'onde. Ce filtre permet de gagner en résolution en imagerie avec des instruments de gros diamètre en rendant la turbulence moins visible et en permettant en imagerie d'empiler des images brut de meilleures qualité. Les grosses lunettes achromatique de 150mm peuvent aussi gagner en résolution avec ce filtre [401] car il a 2 effets :

— En filtrant dans le rouge on stabilise la turbulence [468]
— En filtrant sur une plage de longueur d'onde étroite on supprime les aberrations chromatiques

13. Sacramento Peak Summer workshop - 2001 : What are G-band Bright Points Bright ?
14. À stocker à l'abri de l'humidité avec du silicagel

Filtre $H\alpha$ large bande désigne un filtre $H\alpha$ large bande centré sur la longueur d'onde 656nm utilisé en planétaire notamment sur la Lune afin de contrer l'effet de la turbulence qui est plus faible sur les IR justement rendant les images plus nettes mais au prix d'une perte de résolution effective car la dimension figure de Airy dépend de la longueur d'onde. Ce filtre permet de gagner en résolution en imagerie planétaire avec des instruments de gros diamètre en rendant la turbulence moins visible et en permettant en imagerie d'empiler des images brut de meilleures qualité. Les grosses lunettes achromatique de 150mm peuvent aussi gagner en résolution avec ce filtre [401] car il a 2 effets :

— En filtrant dans le rouge on stabilise la turbulence [468]
— En filtrant sur une plage de longueur d'onde étroite on supprime les aberrations chromatiques

6.9.4 Les Filtres Neutres

Filtre Polarisant désigne un filtre gris ayant la particularité de polariser la lumière dans un sens. Lorsque ce filtre est un double polarisant alors le premier filtre polarise la lumière non polarisée et le second polarise la lumière dans l'autre sens ce qui a pour effet d'atténuer la lumière selon l'angle de rotation du second filtre. Le simple polarisant s'utilise sur une lumière déjà polarisée afin de l'atténuer.

— Le double polarisant est utile pour atténuer l'éclat de la Lune
— Le simple polarisant est utile pour atténuer l'éclat du soleil dans un prisme de Herschel doté d'un filtre ND3.

Filtre ND ou "Density Filter" désigne un filtre gris et donc neutre n'altérant pas les couleurs permettant d'atténuer la lumière de la scène de 1 à plusieurs EV (stops).

Utilisations :

— Forcer l'allongement du temps de pose sans avoir à fermer l'ouverture en évitant l'effet de la diffraction à F/11 ou plus (effet de filé de cascade d'eau)
— Forcer l'augmentation de l'ouverture afin de diminuer la profondeur de champ (effet Bokeh en condition de lumière forte) lorsque le temps de pose est déjà au minimum

En imagerie ou en observation solaire, ces filtres diminuent l'intensité lumineuse dans le but de rendre l'observation plus confortable en évitant l'éblouissement. Attention, le filtre ND ne remplace pas un filtre D-ERF ou un prisme de Herschel pour rejeter la plus grande partie de l'énergie lumineuse. Le filtre ND filtre les UV (400 nm et moins) mais ne filtre pas les IR lointains (après 1300 nm) qui restent dangereux. Par définition, un filtre ND = 0.3 exprimé en densité optique diminue l'intensité de 1 stop (1 cran de fermeture du diaphragme en photo diurne).

Définitions :

— Type A coefficient de temps de pose : $\mathrm{ND}_A = 2^{\mathrm{EV}}$
— Type B densité optique : $\mathrm{ND}_B = 0.3 \times \mathrm{EV}$

Note : EV est la réduction d'exposition procurée par le filtre compté en nombre de stop d'exposition (on passe de 1 à 2 EV en multipliant la quantité de lumière par 2).

T est la transmittance c'est-à-dire la fraction du flux incident transmise après le filtre : $T = 1/\mathrm{ND}_A = 2^{-\mathrm{ND}_B/0.3}$

Par approximation on a aussi : $T = 10^{-\mathrm{ND}_B}$

Le temps de pose résultant de l'emploi du filtre vaut : $tp = \mathrm{ND}_A \times tp0$

Le filtre résultant de l'ajout de 2 filtres est l'addition des valeurs filtres exprimés en ND type B : $ND_B = ND1_B + ND2_B$

Les filtres neutres [738]

Type A	Type B (Optical Density)	Transmittance (%)	Light Reduction
ND 1	ND 0.0	100	0
ND 2	ND 0.3	50	-1 EV
ND 4	ND 0.6	25	-2 EV
ND 8	ND 0.9	12.5	-3 EV
ND 16	ND 1.2	6.25	-4 EV
ND 20 *	ND 1.3	5.00	-4.33 EV
ND 32	ND 1.5	3.125	-5 EV
ND 64	ND 1.8	1.563	-6 EV
ND 100 *	ND 2.0	1	-(6 + 2/3) EV
ND 128	ND 2.1	0.781	-7 EV
ND 256	ND 2.4	0.391	-8 EV
ND 400 *	ND 2.6	0.25	-(8 + 2/3) EV
ND 512	ND 2.7	0.195	-9 EV
ND 1000 *	ND 3.0	0.1	-10 EV
ND 2048	ND 3.3	0.049	-11 EV
ND 4096	ND 3.6	0.024	-12 EV
ND 6310	ND 3.8	0.016	-(12 + 2/3) EV
ND 8192	ND 3.9	0.012	-13 EV
ND 10 000 *	ND 4.0	0.01	-(13 + 1/3) EV
ND 100 000 *	ND 5.0	0.001	-(16 + 2/3) EV

Credit (partial) : Wikipedia

*Note : * = arrondi par rapport à la valeur de puissance de 2 ...*

6.10 Les Accessoires pour Dobson

Jupe désigne la pièce de tissu permettant de protéger le Dobson de type serrurier des sources de lumière parasites. On parle aussi de jupe pour la partie métallique de l'oculaire insérée dans le PO.

Table Equatoriale ou "Equatorial Plateform" désigne un plateau animé par un moteur pas à pas compensant la rotation terrestre et sur lequel peut être posé un instrument. La table peut reposer soit sur 1 secteur au Nord et un axe au Sud (perpendiculaire à l'axe du pôle Nord) ou soit sur 2 secteurs, l'un au Nord et l'autre au Sud de forme circulaire. Le secteur Nord peut-être soit circulaire alors les galets d'entrainement sont inclinés vers le pôle Nord, soit de forme conique dite "VNS" (Vertical Nord Sector) alors les galets d'entrainement sont à l'horizontal (plateforme plus compacte aussi). La table tourne alors autour de l'axe du pôle Nord [610]. La table peut être dotée d'une motorisation simple (suivi RA) ou double axe (suivi RA + correction en DEC). Le suivi de la table équatoriale n'est pas aussi précis que celui d'une monture équatoriale classique mais permet un suivi acceptable en visuel. La table procure un confort indéniable pour l'observation visuelle et la photo courte pose devient possible. Ce type de table ne provoque pas de rotation de champ en photo contrairement à une motorisation de type AltAz mais à l'inconvénient de rehausser le télescope de plusieurs centimètres au-dessus du sol.

Une table équatoriale est conçue dès le départ pour :

1. Une latitude donnée que l'on ne pourra pas changer après si l'on change radicalement de lieu d'observation sauf si celle-ci est doté d'un réglage en latitude
2. Un instrument donné, car l'axe polaire (ou axe de rotation) doit passer par son centre le gravité

En l'absence de réglage de hauteur on peut encore adapter la latitude du lieu à + ou -10° en rehaussant un peu la plateforme et en s'aidant d'un inclinomètre.

Si l'on a une table conçue pour une latitude L_{nominal} et que la latitude du lieu d'observation est L alors :

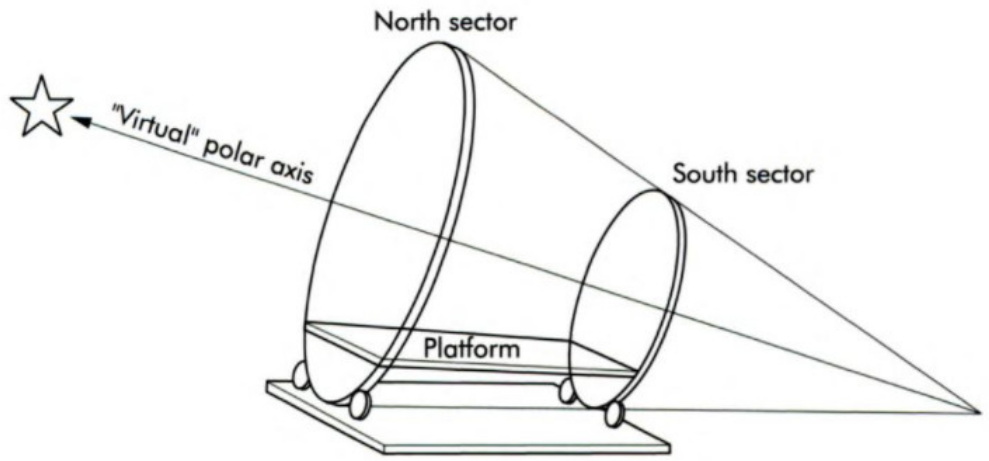
— Si $L > L_{\text{nominal}}$ alors incliner le côté Nord de $i = L - L_{\text{nominal}}$
— Si $L < L_{\text{nominal}}$ alors incliner le côté Sud de $i = L_{\text{nominal}} - L$

L'axe de rotation, même s'il ne change pas de direction, peut être mis plus ou moins haut en fonction du rayon des secteurs, ce qui permettra de le faire passer par le centre de gravité de l'instrument pour un meilleur équilibre des poids autour de l'axe de rotation. Le centre de gravité d'un dobson prend en compte la masse du tube sur l'axe de rotation du dobson (on suppose le tube équilibré) et la masse de son socle, donc le centre de gravité global est un peu en dessous de l'axe de rotation du dobson.

Comme pour la monture équatoriale classique, une mise en station est nécessaire avant de l'utiliser, en général une mise à niveau (horizontalité) avec un niveau à bulle et une orientation vers la Polaire suffit. On peut peaufiner la mise en station avec une méthode inspirée de Bigourdan est présenté par Pierre Desvaux [591, 750].

C'est en allant vers l'équateur (latitude diminue) que la course de la table sera plus longue.

Géométrie de la table équatoriale



Credit : Stephen Tonkin - Amateur Telescope Making p 130

Il existe aussi plusieurs variantes selon le positionnement des galets du secteur Nord : Poncet (secteur Nord circulaire), Gee (secteur Nord circulaire), Autume (secteur Nord conique = VNS). La variante Autume est la plus optimisée pour nos latitudes (45°) car les galets ne sont pas inclinés (travaillent mieux mécaniquement) de plus la plateforme est plus compacte.

En principe il faut à la fois des secteurs Nord mais aussi des secteur Sud cependant à partir de 40 °de latitude et plus on

peut remplacer le secteur sud par un point fixe.

Motorisation Altazimutale désigne un kit à installer sur dobson afin de motoriser celui-ci. Les moteurs permettent de bouger le tube en altitude et en azimut. Ce kit permet aussi le Goto en général, car la motorisation permet à la fois d'orienter le dobson vers l'objet choisi et de suivre cet objet en compensant pour la rotation terrestre.

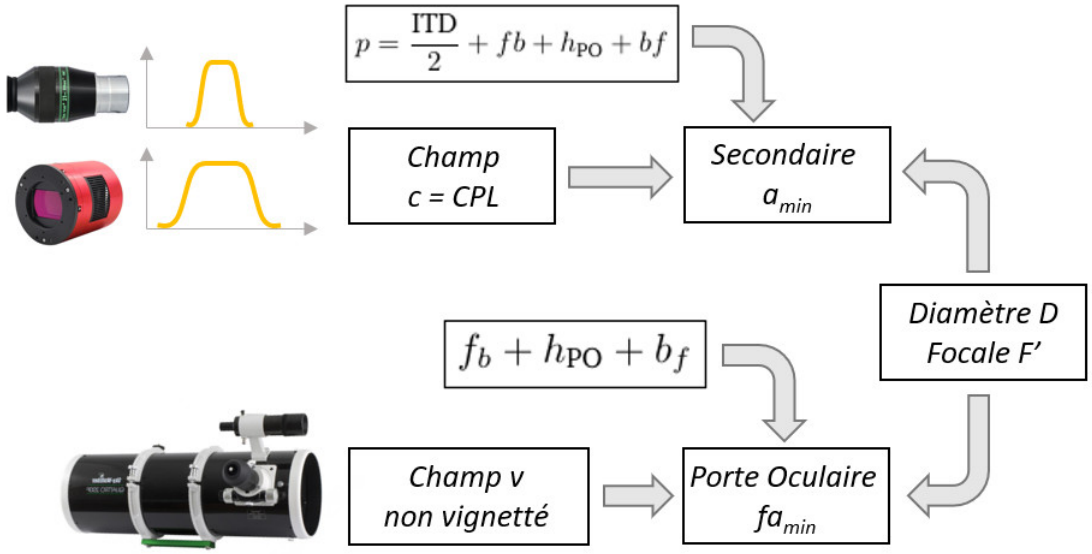
Des exemples de kits de motorisation :

- ArgoNavis, ne propose que la raquette contrôleur
- StellarCat
- OnStep

6.11 La Conception

Le Télescope d'après les calculs de vignetting il est possible de déterminer toutes les dimensions du télescope à partir d'un champ non vigneté choisi au départ, par exemple le champ couvert par un oculaire particulier ou de la surface d'un capteur photo.

Dimensionnement du Newton



Credit : J.G. Gricourt

Voir la signification des termes dans le schéma du trajet optique présenté plus bas.

Lorsque la structure est bien dimensionnée, on vérifie :

- Le champ permis par l'ouverture du télescope $v > c$
- Dimension du secondaire choisi $a > a_{\min}$
- Dimension du porte-oculaire $fa > fa_{\min}$

Parallélement aux calculs des trajets optiques il y a les calculs mécanique tout aussi important et qui permettent [594, 18] :

- De s'assurer de la rigidité de la structure du dobson permettant la reproductibilité et la stabilité de la collimation
- De s'assurer que le barillet n'impose pas de contraintes sur le miroir primaire qu'il soutien

— De dimensionner correctement les haches du dobson afin d'assurer un équilibrage tolérant au changement d'oculaire

UTA signifie "Upper Tube Assembly", la cage du télescope contenant le miroir secondaire.

Araignée ou "Spider Vanes" ou "Support Vanes" désigne le support du miroir secondaire dans un télescope de type Newton le plus souvent.

Truss désigne les barres en aluminium ou en carbone supportant la cage du secondaire dans les tubes de type serrurier. Lorsque les barres sont en aluminum on peut estimer le diamètre utile en fonction de la focale de l'instrument : $D_{\text{truss}} = F/80$ ou D est la focale de l'instrument [2, 747].

Tube désigne un instrument sans sa monture, par exemple la lunette seule, le tube du Dobson seul etc ...

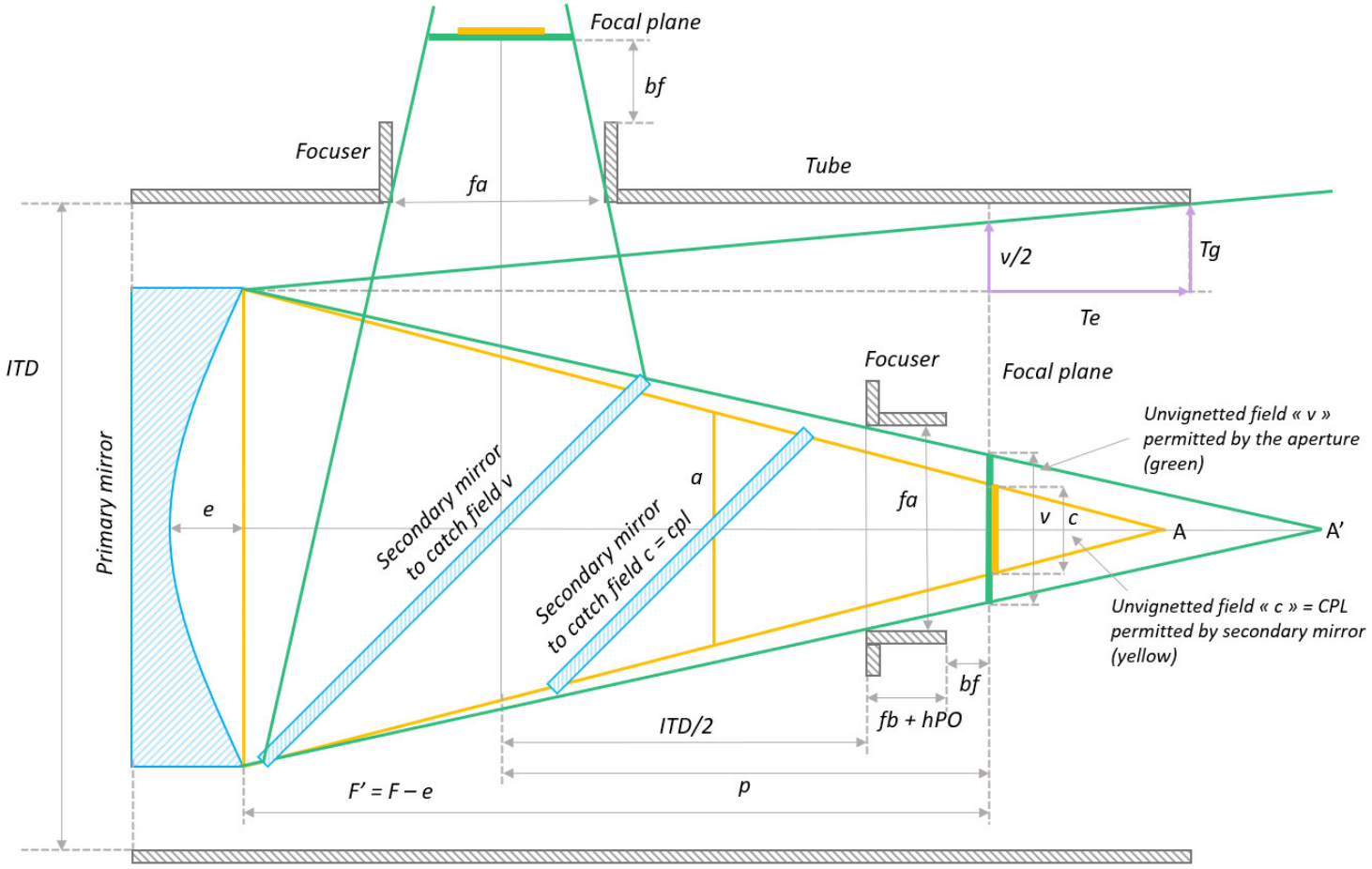
Tube Plein Le tube plein désigne un télescope réalisé à partir d'un cylindre fermé en acier ou en aluminium. Le tube plein est généralement bon marché, mais il présente des inconvénients :

1. Il est plus lourd et plus encombrant
2. L'air circule mal (chaotique) à l'intérieur et donc le primaire refroidi moins vite (tube currents)
3. Les tubes en métal et en particulier en aluminium se déforment beaucoup sous l'effet des changements de température (aluminium $= 23 \times 10^{-}6K^{-1}$, acier $= 12 \times 10^{-}6K^{-1}$).

Champ désigne le champ non vigneté que l'instrument peut restituer.

Dans le cas du Newton il faut prendre en compte toutes les sources de vignetting :

Dimensionnement du Newton



Credit : J.G. Gricourt

D = diamètre du miroir primaire

a = dimension du miroir secondaire

F = Focale de l'instrument

v : champ (en mm) permis par l'ouverture du tube

cpl : champ (en mm) pleine lumière 100% permis par la dimension (a) et le positionnement du secondaire (p)

fb : l'épaisseur du tube du dobson

fp : la hauteur de la platine du porte-oculaire

fh : la hauteur du porte-oculaire = "Focuser Height" depuis la platine (fp)

hPO : la hauteur totale du corps du porte oculaire (base de montage comprise) = fp + fh

fa : l'ouverture du porte-oculaire soit 2" = 50.8 mm = "Focuser Aperture"

bf : le backfocus au-dessus du porte-oculaire

ITD : l'ouverture du tube du télescope = "Internal Tube Diameter"

Tg : l'espace entre le tube du télescope est le miroir primaire

Te : la longueur du tube du télescope dépassant le plan focal

En raison de l'entrée du tube du télescope il existe un diamètre minimal avant que le champ v ne soit pas vignetté par l'entrée du tube. Le backfocus dépend aussi du diamètre du tube ITD, car le porte-oculaire sera positionné collé sur le tube plus au moins haut par rapport au miroir secondaire.

$$\mathrm{ITD}_{\min} = \frac{v(F' + Te)}{F'} + D$$

On remarquera que si l'on dimensionne au plus juste la longueur du tube $T_e = 0$ alors $T_g = v/2$ donc dans ce cas :

$$\mathrm{ITD}_{\min} = D + v$$

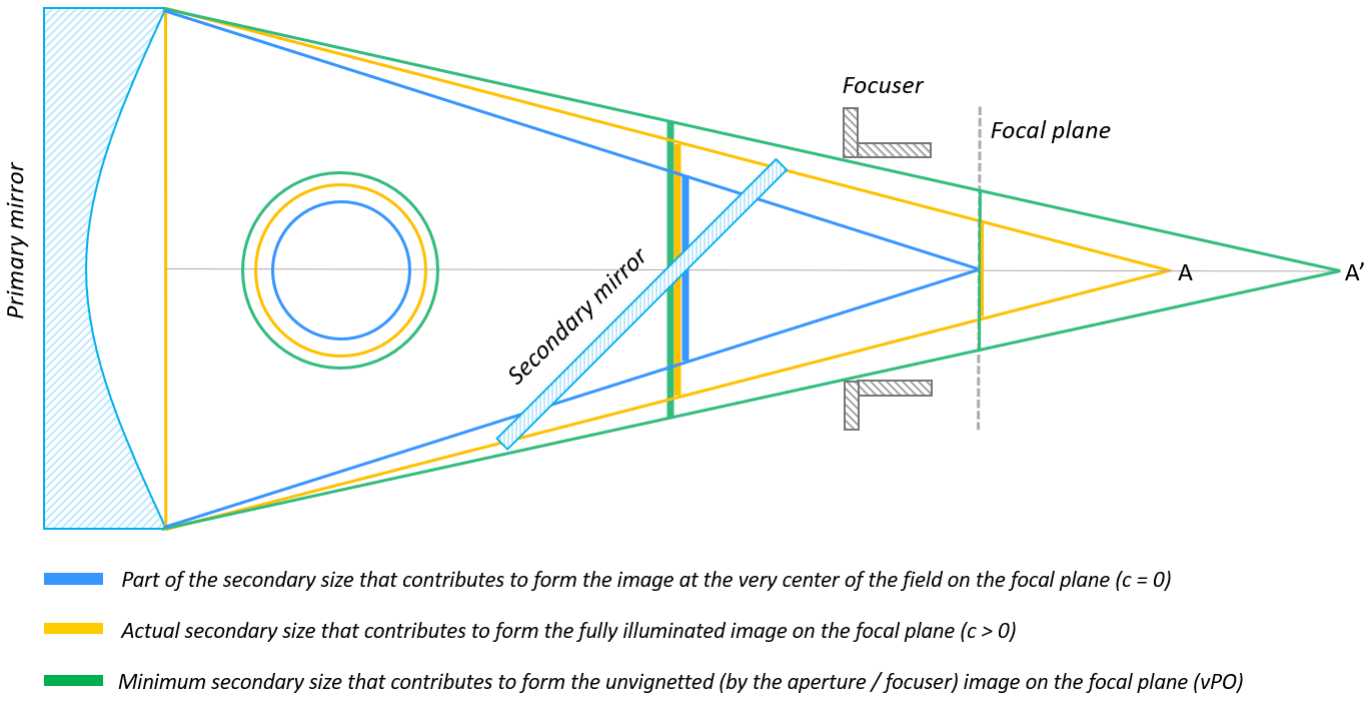
On ajoute le champ max v souhaité au diamètre D du miroir et on obtient la largeur du tube et pour calculer la distance p entre le secondaire et le plan focal, il faut rajouter le backfocus f souhaité.

$$p = \frac{D + v}{2} + fb + h_{\mathrm{PO}} + \mathrm{bf}$$

Si on prend $v = 36mm$ le field stop du Tele Vue Ethos 21 mm, $f_b = 8mm$ l'épaisseur du tube (plaque de fixation du porte-oculaire sur un dobson), hPO $= 41mm$ la hauteur d'un porte-oculaire Feathertouch 2015BCR et un backfocus de 1" $\approx 25mm$:

$$p = \frac{D + 36}{2} + 74$$

Les différents champs dimensionnants



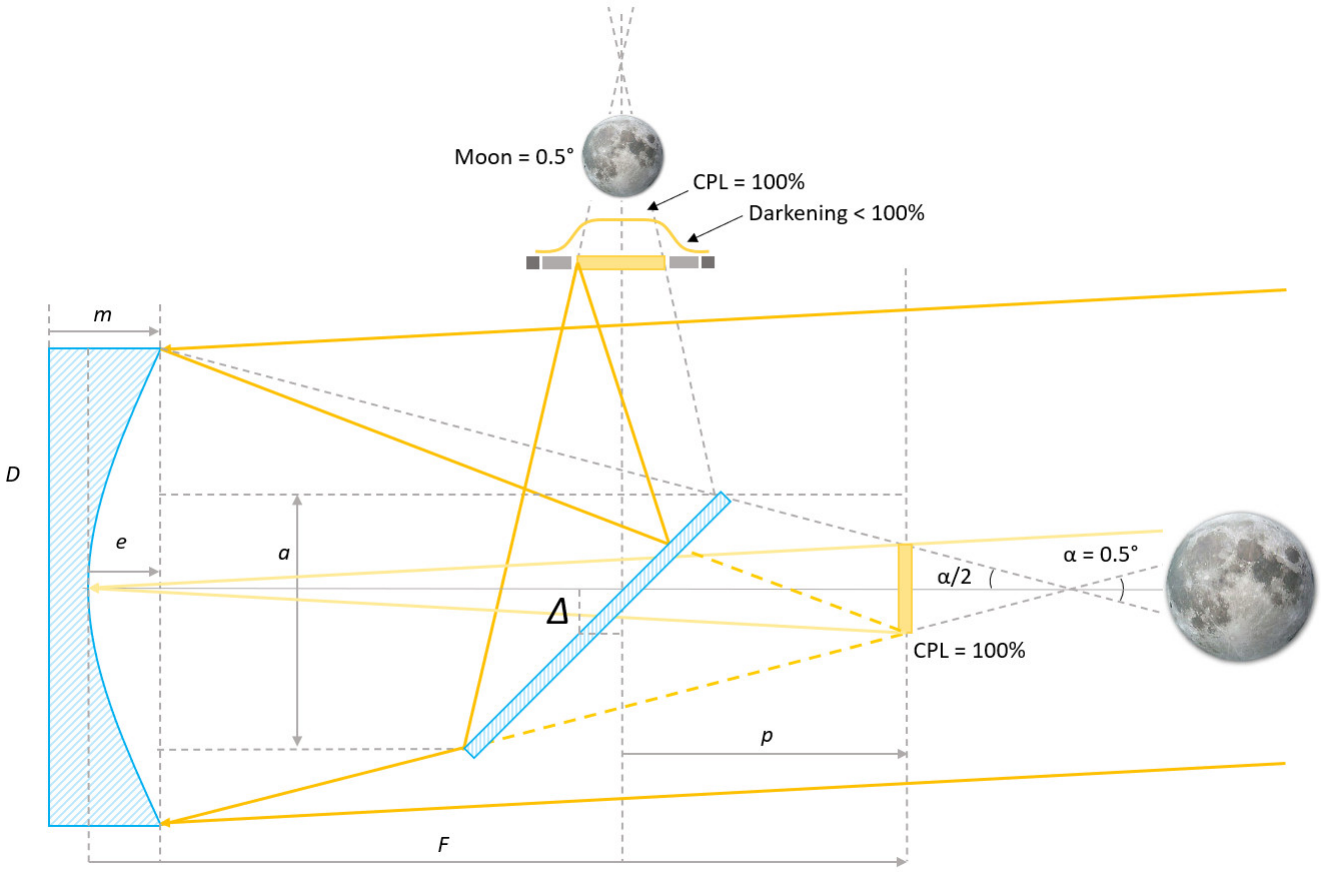
Credit : J.G. Gricourt

Calcul des des longueurs des champs interceptés par le miroir secondaire :

$$a(v=0) = \frac{pD}{F'} \quad \text{zone en bleue sur le plan du secondaire}$$
$$a(v=c) = \frac{c(F'-p)+pD}{F'} \quad \text{zone en jaune sur le plan du secondaire}$$
$$v_{\mathrm{PO}} = \frac{F'fa-(fb+h_{\mathrm{PO}})D}{F'-(fb+h_{\mathrm{PO}})} \quad \text{avec } a(v=v_{\mathrm{PO}})=\ldots \quad \text{zone en vert sur sur le plan du secondaire}$$

Champ Pleine Lumière ou “CPL” désigne la zone éclairée à 100% du champ de vision vue au travers de l’instrument. Cette zone représente la zone du champ où toute la lumière provenant du primaire est entièrement interceptée par le secondaire. On parle de la partie centrtale du champ qui est non vigneté. Les points du plan focal correspondant aux pentes de la courbe du CPL ne sont pas éclairés de manière optimale. Ainsi, une partie des rayons renvoyés par le primaire ne sont pas interceptés par le miroir secondaire, donc cette partie du champ est vignetée par le secondaire (attention, il existe d’autres sources de vigneting). Le CPL c’est aussi l’ensemble des points du plan focal pour lequel le primaire est vu entièrement, car tous les rayons frappant le primaire sont interceptés par le secondaire [664, 376]. En s’éloignant de la zone éclairée à 100% l’éclairement diminue progressivement, on constate donc un vigneting progressif au bord du champ. On estime qu’une baisse inférieure à 0.4 magnitude soit une perte de lumière de 30% vers le bord du champ reste acceptable en visuel [486, 491].

Champ pleine lumière



Credit : J.G. Gricourt

Conventionnellement on peut viser :

— Un CPL de 0.5° la dimension de la pleine lune [620]
— Un CPL de 12-13 mm [208]
— Un CPL illuminant 70% du champ de l'oculaire de focale la plus longue [208] pour un instrument dédié au planétaire

Mike Lockwood préconise un CPL minimum de **0.25" = 6.35mm** en visuel garantissant aussi que les bords du secondaire ne seront pas utilisés pour former l'image au centre du champ.

Dans le cas d'un télescope de type Newton plus le secondaire est large (l'obstruction augmente) et plus le CPL sera large également, ce qui se traduit en visuel par un champ illuminé plus large et en imagerie par un cercle image plus large sur le capteur. Pareillement, plus la distance entre le foyer et le secondaire diminue, plus le CPL sera large. Le champ pleine lumière pour un Newton se calcul comme suit : CPL $= \frac{aF-pD}{F-p}$ où p = distance du secondaire foyer (axe optique), a = dimension du secondaire, cette valeur est à comparer à la largeur du field stop des oculaires utilisés si ce dernier est plus large que le CPL alors tout le champ correspondant au CPL sera effectivement illuminé à 100% sinon le field stop de l'oculaire rajoutera un vigneting supplémentaire.

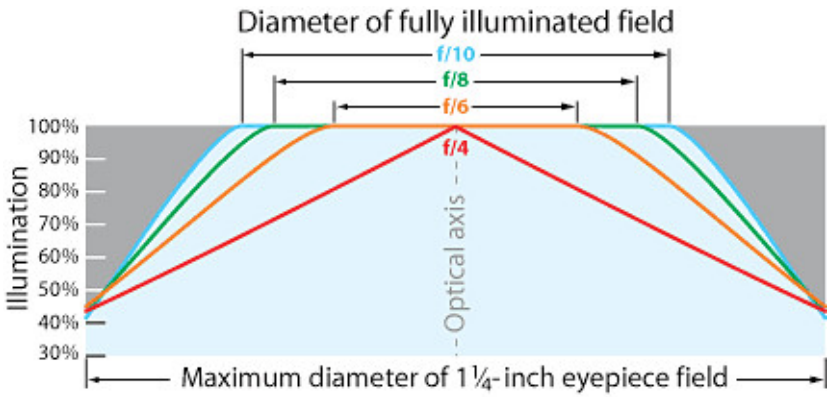
Dans le cas des miroirs à F/D très court inférieur à 4.0, dans la formule il faut remplacer $F \rightarrow F' = F - e$ où e est la flèche du miroir soit la hauteur du creux au centre.

Le CPL exprimé en angle de champ : CPL(°) = CPL/$F \times 57.3°$, voir aussi la formule donnée par Jason D. plus détaillée [377].

De plus à l'intérieur du CPL tous les objets s'y trouvant seront illuminés à 100%. Ainsi, toute la lumière reçue par le primaire sera exploitée et les planètes rentrant complètement dans ce cercle ne pâtiront pas de la baisse de résolution introduite par la contribution des bords du secondaire à l'image. L'utilisation d'un correcteur de coma (TV Paracorr II) ne change pas le CPL malgré l'augmentation artificielle de la focale par 1.15 [178].

Avec l'ajout du secondaire dans le chemin optique, l'illumination au foyer décroit progressivement au-delà de la limite du cercle du CPL.

CPL for 6-inch reflectors with 1-inch diagonals



Credit : S&T

Une simulation via le site de Mel Bartels utilisant la formule de William Peters et Robert Pike publiée dans Sky & Telescope de Mars 1977 - "The Size of the Newtonian Diagonal" :

Common values

What **unit of measurement** shall we use ○ imperial ◉ metric ?

Focal length 1645.92 (mm) Lock focal lengt

Focal ratio 3.6

Aperture 457.2 (mm)

Focal plane...

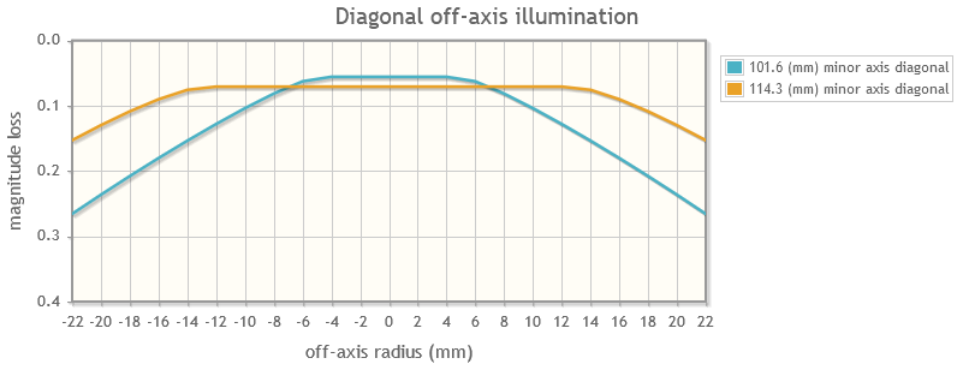
Focal plane to diagonal distance (mm) = 338.6 Calculate using focuser designer

Max field diameter (mm) = 42

Acceptable magnitude loss = 0.4

Diagonals (minor axis) to select from (mm) 101.6,114.3

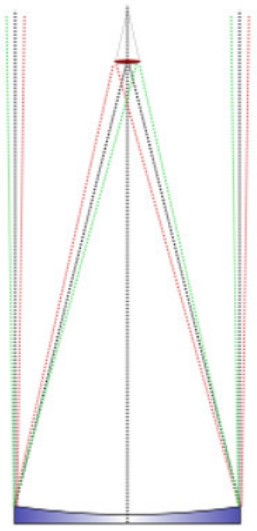
Update diagonal illumination



Results: Smallest possible diagonal = 94.06 (mm)
Smallest user defined diagonal = 101.6 (mm)
Diagonal size maximizing illumination integrated across the field = 114.3 (mm)
Diagonal size for most even illumination across the field = 114.3 (mm)
illumination integrated across the field: 101.6: 85.9%; 114.3: 91.6%;
Equivalent aperture ranges from edge of field to center of field for each diagonal size:
101.6: 404.69 to 445.77 (mm); 114.3: 426.26 to 442.68 (mm);

Central obstructions are 101.6: 22.2% linear, 4.9% area; 114.3: 25% linear, 6.3% area;
RMS wave deformations due to central obstruction are 101.6: 1/21; 114.3: 1/19;

Diagonal offset at center of focal plane = 6.91 (mm)
Diagonal offset balancing edge of field illumination = 4.9 (mm)
Diagonal offset using fully illuminated field = 7.03 (mm)
Diagonal offset 76.2 (mm) above focal point = 6.22 (mm)
Multiply these values by 1.4 to get the offset along the diagonal face.



Le champ pleine lumière (CPL) est la zone rouge sur le plan focal.

Credit : Mel Bartels, Sixela

Hauteur du PO

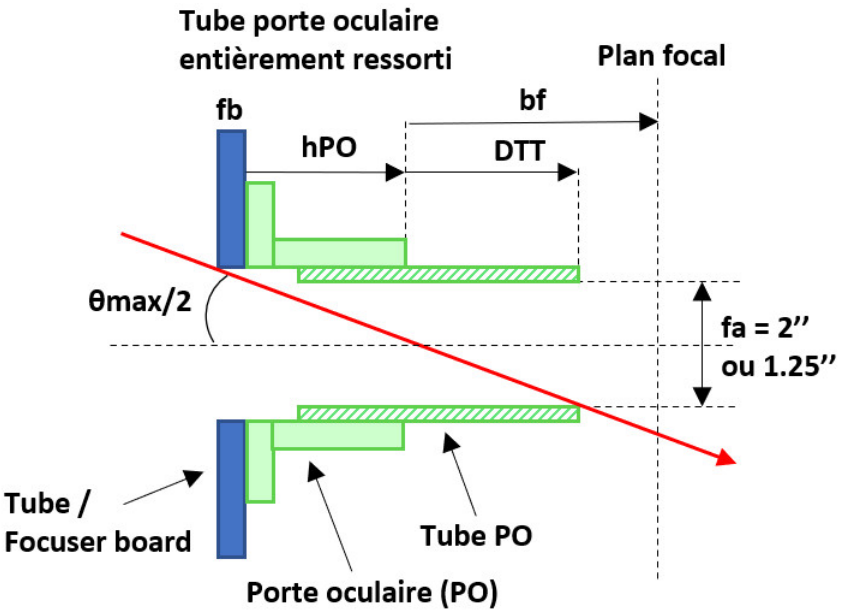
La hauteur de l'oculaire depuis le sol : $H = h + m + (F - e) - p$

h = hauteur du dos du miroir depuis le sol

m = épaisseur du miroir

e = flèche du miroir (au centre)

Backfocus



Credit : J.G. Gricourt

Distance axe optique

La distance axe optique / foyer : $p = \frac{\text{ITD}}{2} + fb + \text{hPO} + bf$

ITD = diamètre intérieur du tube (internal tube diameter)
fb = épaisseur du tube du dobson type tube plein ou épaisseur de l'anneau du dobson de type truss (focuser board)
fp = platine du PO (focuser base plate = focuser mounting plate)
fh = hauteur du tube du PO au dessus de la platine avec le tube rétracté
hPO = la hauteur totale du corps du porte oculaire (base de montage comprise) = fp + fh
bf = backfocus

Dimensionnement du backfocus pour du visuel

Don Pensack préconise **1" = 25.4mm** de backfocus [176, 186, 662] :

— Pour fonctionner avec la plupart des oculaires (position du fieldstop),
— Pour fonctionner avec l'utilisation du correcteur TV Paracorr
— Pour la correction de myopie si nécessaire derrière un oculaire et/ou un oculaire + correcteur de coma [220].

Mike Lockwood préconise **0.6" = 15mm** de backfocus [514].

Mel Bartels préconise **0.875" = 22mm = 14mm Paracrorr II + 8mm myopie** de backfocus [495] donc avec prise en compte des utilisateurs souffrant d'une forte myopie.

Attention si l'on compte utiliser une bino ou faire de la vidéo VA il faudra encore rallonger le "Backfocus" afin de faire ressortir le foyer plus loin. Toutefois les bino sont souvent fournies avec un glasspath permettant de rallonger le foyer (une sorte de barlow).

Dimensionnement du backfocus pour de l'astrophoto

Il faut le dimensionner pour que l'image se forme sur le capteur photo donc il faut en plus prendre en compte les dimenstion physique du boitier contenant le capteur.

Baffle ou "Baffling" désigne dispositif d'anneaux insérés à l'intérieur du tube du télescope (réflecteur ou lunettes) et cela afin de bloquer les lumières parasites réfléchies par l'intérieur du tube dans le but de conserver un contraste optimal. Le baffle joue un rôle essentiellement pour l'observation du ciel profond en préservant le contraste des objets ténus comme les nébuleuses et les galaxies. Le nombre de baffles (anneaux circulaires), leur positionnement et leur dimension doivent être calculés précisément afin d'éviter de vigneter le champ. On peut compenser l'absence de baffle en tapissant l'intérieur du tube avec soit un velours noir ou une repeignant l'intérieur avec une peinture noir mat spéciale.

Rocker ou "Rocker Box" désigne la boite dotée de haches et contenant le barillet et le miroir sur les télescopes de type Dobson. Plus le diamètre des haches du rocker est important plus celles ci permetteront à la structure d'équilibrer un centre de gravité haut en raison une charge au PO plus lourde [594, 18].

Les structures motorisées ont des conceptions différentes des structure purement manuelles :

— Celles ci n'ont pas besoin d'avoir des haches de diamètre important car celles ci sont retenues par le cable en acier en tension car lui même est relié au moteur.
— Celles ci reposent sur les roulements à billes, tout comme la base permettant le mouvement en azimut afin de ne pas imposer de contraintes trop fortes au moteur

Donc une utilisation manuelle, donc moteurs débrayés sur un dobson d'abord conçu pour être motorisé est plus délicate du fait d'un équilibre de la structure plus précaire et de mouvement trop fluides difficile voir impossible à maitriser manuellement [344].

Collage ou "Stick-slip" désigne le phénomène qui produit un démarrage saccadé du mouvement en altitude des montures de type Dobson. Le collage découle de la loi du frottement sec ou loi de Coulomb qui décrit l'existence d'une force de frottement statique s'opposant exactement à la force de tangentielle exercée par l'utilisateur et empêche le rocker de bouger, et cela, tant que cette force ne dépasse pas un certain seuil dépendant du coefficient de frottement fs du matériau $T < fs \times N$ [594, 18].

Retouche de Miroir désigne l'opération qui consiste à re-paraboliser un miroir le plus souvent de qualité moyenne (télescope de type Newton industriel) afin d'améliorer sa forme et surtout la finesse de son poli. La finesse du poli diminue la diffusion de la lumière et améliore le piqué des images. Cette opération nécessite les mains expertes d'un artisan, par exemple Mirrosphere en France.

RTV Silicone ou "Room Temperature Vulcanising Silicone" désigne la colle ou le mastic silicone utilisé pour garantir l'étanchéité des aquariums en verre. Cette colle peut être utilisée pour coller les miroirs secondaires sur leur support ou bien coller le miroir primaire sur leur barillet pour éviter d'utiliser des supports latéraux dans certains cas.

Barillet ou "Mirror Cell" ou "Mirror Support" ou "Lense Cell" désigne le support sur lequel repose le miroir primaire. Il peut s'agir également de la pièce dans laquelle est encastré un objectif de lunette à base d'un doublet ou d'un triplet de lentilles. Dans le cas du miroir, les points de contacts avec le barillet doivent vérifier la loi de l'isostatisme et donc pour le dos du miroir qui est assimilé à un plan, il ne doit avoir que 3 points de contacts [15] et s'il y en avait plus ou moins l'équilibre du miroir serait rompu. De la même manière la tranche du miroir doit être supportée par 2 points exactement. Les miroirs lourds $D > 300mm$ doivent comporter des points d'appuis judicieusement placés afin d'éviter que le miroir ne se déforme

15. Il peut y avoir plus de 3 points de contacts, mais au final cela doit revenir à un 3 points (cas de triangles de flotaison)

sous son propre poids et pour ne pas introduire d'astigmatisme de pliure dans l'image. Le logiciel "PLOP" permet de calculer et de visualiser l'effet des contraintes d'un barillet sur le miroir selon le nombre de points d'appuis choisi [165, 484, 485].

On trouve les types de barillets suivants :

1. Les barillets à triangles de flottaison très populaires aux US que l'on retrouve sur les Newtons amateurs
2. Les barillets à leviers astatiques que l'on retrouve sur certains télescopes d'observatoire historiques
3. Les barillets pour miroir à dos conique

Les barillets exotiques comme ceux à leviers astatiques plébiscités par certains amateurs chevronnés en France se retrouvent finalement que dans de très rares réalisations artisanales, souvent historiques (voir le site AltAz) car la vaste majorité des instruments utilisés dans le monde ont adopté le barillet à triangles de flottaison. Le barillet astatique système, même s'il est très ingénieux sur le papier, pose de nombreuses difficultés en réalité :

— Réaliser un barillet astatique est d'emblée bien plus complexe qu'un barillet classique à triangle de flottaison en raison des nombreuses pièces à produire et à assembler.
— L'ajustement des pièces nécessite une très grande précision afin d'éliminer les frottements
— Ces barillets ont tendance à se dérégler lors du transport. Ainsi, les vibrations peuvent faire coulisser les masselottes sur leur axe, pour cette raison, on préférera laisser ce type d'instrument sous coupole
— Ces barillets ne résolvent pas le problème du support de la tranche et retrouveront les mêmes contraintes que les autres barillets à ce niveau-là.
— Il n'y a pas vraiment de gain significatif à utiliser un barillet astatique sur des réalisations amateurs et des instruments en dessous de 1-1.5 m (les amateurs américains l'ont compris depuis 30 ans) car compte tenu des autres facteurs de nuisance : seeing, refroidissement du primaire etc ... le gain sera très marginal voir complètement nul.

Le barillet doit comporter également des butées latérales en contact avec la tranche du miroir.

On trouve les systèmes suivants :

1. Les 2 butées à 45° matérialisée par 2 roulettes horizontales en position fixe au centre de la tranche du miroir
2. Le câble métallique = "Sling" popularisé par les dobsons Obsession
3. Le "Whiffletree" de John Pratte comporte 4 points astatiques matérialisés par 4 roulettes horizontales et solidaires 2 à 2 sur un balancier [616, 509, 522].
4. Le barillet actif déformé par des vérins et dont la forme s'adapte pour corriger les déformations du front d'onde incident, il s'agit d'un type de barillet que l'on retrouve dans les très grands observatoires (ex : VLT [16]).

Jusqu'à 300 mm, il est aussi possible de coller le miroir sur le barillet à l'aide de colle aquarium [616], dans ce cas pas besoin de butées.[509]. Le système le plus populaire et le plus simple à réaliser reste les butées latérales à 45°.

Dans les cas du câble métallique, du "Whiffletree" ou des 2 butées, il faudra être vigilant à ce que la tranche du miroir reste toujours positionnée afin que les points d'appuis (ou le câble) exercent une contrainte un peu en dessous du milieu de la tranche, et cela, de manière symétrique sur la tranche. Cependant, il peut y avoir des déréglages si les touches ne sont pas solidaires de la partie mobile du cadre du barillet (voir Dobson de type "Sumerian Optics", "Sud Dobson" ou "Dobson Factory"), ce qui signifie qu'au moment de la collimation il y a un risque que les points d'appuis bougent et engendrent au final de l'astigmatisme sur le miroir, et ce, d'autant que la pression du poids du miroir sera forte (orientation à faible altitude). Pour éviter cela, il faut laisser l'une des 3 vis de collimation fixe. Attention aussi à la collimation "New Model"

16. Optique adaptative

(offset partiel) le primaire est alors naturellement de biais et les points d'appuis sortent de leur position optimale et sont alors décalés.

De manière générale, un barillet inadéquat va générer des contraintes sur le verre et introduire de l'astigmatisme de pliure dans la figure de Airy.



Credit : Mike Lockwood

Pour la collimation, il est préférable que les gros boutons de collimation du primaire déplacent d'un bloc tout le barillet (ex : Taurus Telescope et Astrofaktoria) et pas seulement les triangles sous le miroir (ex : DobsonFactory) afin de garantir que le primaire touche en permanence les butées latérales aux mêmes endroits.

Serrurier ou "Serrurier Truss" désigne une structure constituée de tubes (barres truss) en aluminum ou en carbone croisé reliant la cage du secondaire à la base du télescope. On oppose souvent le tube serrurier au tube plein car ce dernier est plus lourd et mal aéré. Ce type de tube présente les avantages suivants :

1. Permet un gain de poids très important tout en restant très rigide
2. Peut être démonté pour le transport

La quasi-totalité des dobson d'artisan reposent sur ce principe afin de gagner du poids sans faire de compromis sur la rigidité du tube.

Tourillon ou "Hâche" ou "Altitude Wheel" ou "Bearing" désigne la partie d'un dobson qui permet les mouvements en altitude. Les tourillons sont fixés sur la boite du primaire et repose librement sur la base permettant de mouvoir la partie haute du dobson. Les tourillons sont en rotation autour du centre de gravité du dobson. Le dimensionnement des tourillons conditionne l'équilibrage du dobson qui doit être garanti pour une plage de poids supporté par le porte-oculaire, et cela, quel que soit l'orientation du tube [594, 18].

L'équilibre du tube est conditionné par :

— Le rayon R du tourillon
— Le déplacement du centre de gravité G du tube lorsque le PO est chargé
— Le coefficient de frottement f des patins

Lorsqu'un dobson est mal équilibré, son tube remontera dès que l'on déchargera le porte-oculaire (changement d'oculaire par exemple).

D'après le calcul, on peut maintenir l'équilibre si l'on augmente le rayon R des tourillons ou si l'on augmente la force N d'appui des tourillons sur le rocker (réalisé avec la pose d'un ressort comme sur les Orion XT).

Les problèmes d'équilibre des structures amateurs sont souvent dû à :

— Des tourillons trop petits
— Des tourillons dont le centre est trop haut ou trop bas par rapport au centre de gravité de l'instrument
— Des patins ou des bandes de glissement mal n'offrant pas suffisamment de frottement

Bob's Knobs les vis de collimation du miroir secondaire ne sont pas préhensiles, il faut en général un tournevis ou au mieux une clé allen pour les manipuler. Cette optimisation consiste à remplacer les vis d'origine par des vis à bouton moleté (knurled screw). Les dimensions sont les suivantes : 3 vis M4x35 mm 12 mm cap et 1 vis M5x50 mm 12 mm cap (la vis centrale). Cependant, si les Bob's Knobs seront plus adaptés pour un Newton, il sera préférable d'utiliser des vis BTR à manipuler avec une clé allen dans le cas de SCT, RC, Dall-Kirkam, Mewlon, Cassegrain où la sensibilité de l'orientation du miroir secondaire est plus importante.

Bride désigne une pièce qui empêche le miroir de sortir du barillet. Il faut veiller à ce que les brides soient complètement desserrées afin que le miroir primaire ne génère de l'astigmatisme dans l'image lorsqu'il est contraint.

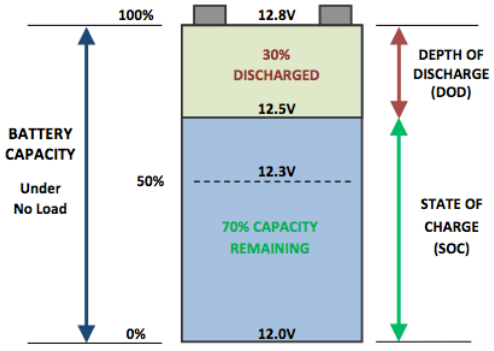
Batterie désigne la source d'énergie nécessaire pour faire fonctionner certains équipements astro donc les indispensables montures EQ en astrophoto. Il en existe plusieurs types :

Batteries

Type	Capacité	Cycles	Rendement	Usage	Durée de vie	Sécurité	Polluant
Pb, Acide / Gel	40 Wh/kg	400	80%	Automobile		⋆	⋆⋆⋆
Booster "Lithium" = Li-ion	200 Wh/kg	500	100%	Automobile	⋆	Fire Risk	⋆
Li-ion (LCO, LMO, NMC)	200 Wh/kg	500	100%	PC portable	⋆	Fire Risk	⋆
Li-Po	190 Wh/kg	400	90%	Modélisme	⋆	Fire Risk	⋆
LiFePO4	120 Wh/kg	3500	90%	Astro / Camping	⋆⋆⋆	⋆⋆⋆	

Avec des batteries LiFePO4 pour maintenir une durée de vie nominale il ne faut pas trop la décharger car plus le DOD est grand moins la batterie pourra réaliser de cycles.

SOC / DOD



Credit : Bravabatteries

Batteries

Type	DOD maximal
Pb, Acide / Gel	50% - 80%
Booster "Lithium" = Li-ion	50% - 80%
Li-ion (LCO, LMO, NMC)	20% - 80%
Li-Po	80%
LiFePO4	80%

Les batteries au Lithium doivent intégrer l'utilisation d'un BMS pour contrôler leur bon fonctionnement et prévenir les cas d'utilisations critiques afin d'éviter les destructions et empêcher une usure prématurée [62].

Le BMS permet [127] :

— D'équilibrer la charge/décharge de chacun des accumulateurs constituant la batterie
— De couper l'alimentation (charge ou décharge) en cas de température trop haute ou trop basse, de tension trop haute ou trop basse

Un accumulateur LiFePO4 doit toujours avoir sa tension comprise dans cette plage [2.5V, 3.65V], le BMS permet de contrôler cela.

Puissance délivrée par un appareil électrique : $P = U \times I$ où P = puissance en Watt, U = tension en Volt et I = intensité du courant en Ampère

Consommation d'un appareil de puissance P : $C_{Wh} = P \times t_h$ où C = consommation en Watt-heure, t = durée d'utilisation en heures.

Donc une batterie doit avoir la une capacité minimum selon le temps d'utilisation de l'appareil pour lequel sa puissance P est donnée :

— Exprimé en Wh : $C_{\text{batterie (Wh)}} \geq P \times t_h$
— Exprimé en Ah : $C_{\text{batterie (Ah)}} \geq I \times t_h$

Note : pour un appareil électrique la tension d'utilisation est constante donc $I = P/U$

La conversion vaut alors : $C_{Wh} = C_{Ah} \times U$, par exemple le Powertank Celestron est donné par le constructeur pour délivrer $C_{Ah} = 13Ah$ sous 12V par conséquent : $C_{Wh} = 13Ah \times 12V = 156Wh$

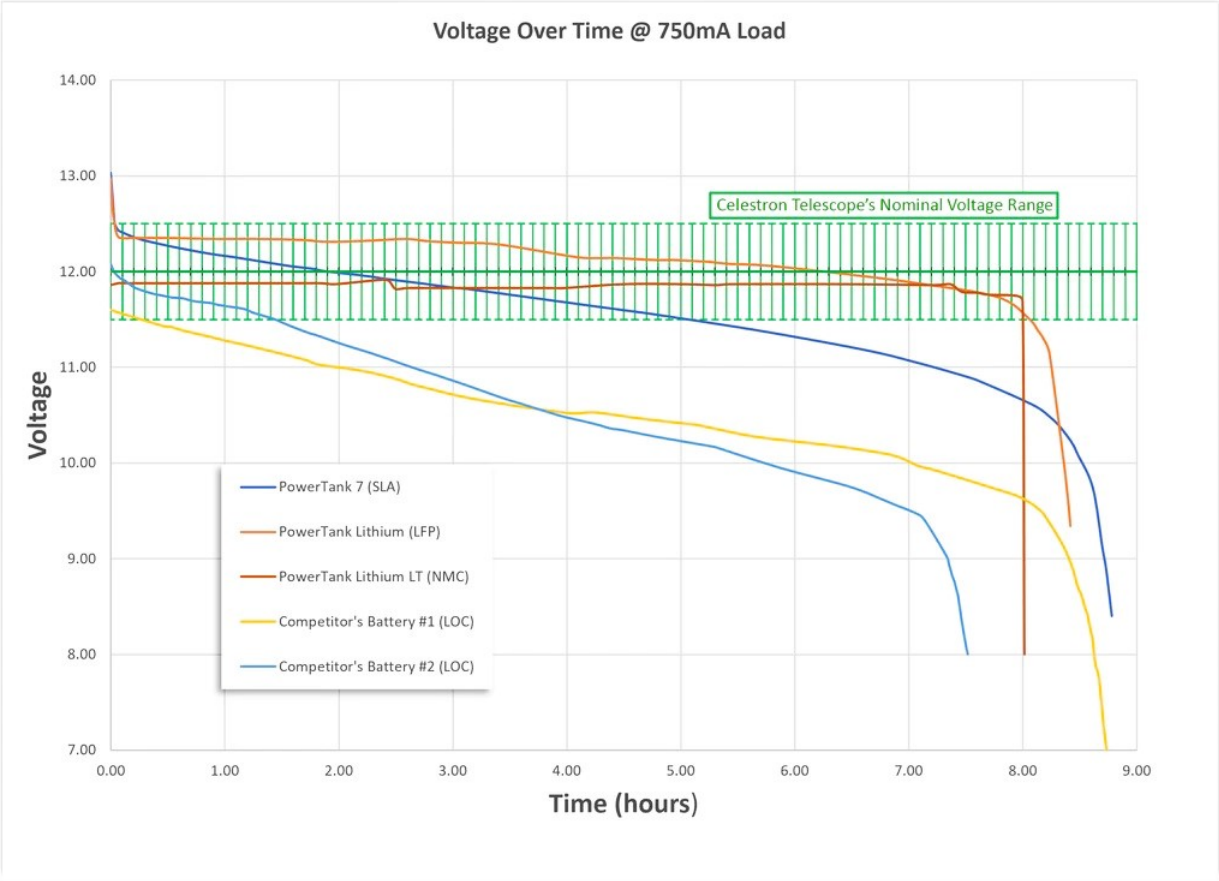
Pour déterminer les caractéristiques d'une batterie pour alimenter plusieurs appareils : monture, bande chauffante, camera etc ... il faut prendre en compte le voltage et l'ampérage maximum délivrable en sortie :

— Sortie DC : 5.5V 3A
— Sortie USB 2.0 : 5V 0.5A
— Sortie USB 3.1 : 5V 0.9A
— Sortie USB C : 5V 1.5A / 3A

La somme des ampérages nécessaires des appareils doit être supérieure à l'ampérage que peut fournir la batterie pour un durée donnée : $C_{\text{batterie (Ah)}} > \sum_1^n I_k \times t_h$

Lorsque la batterie se décharge au cours de son utilisation, son voltage diminue, cela peut aller de 4% à 20% selon les batteries

Celestron Powertank



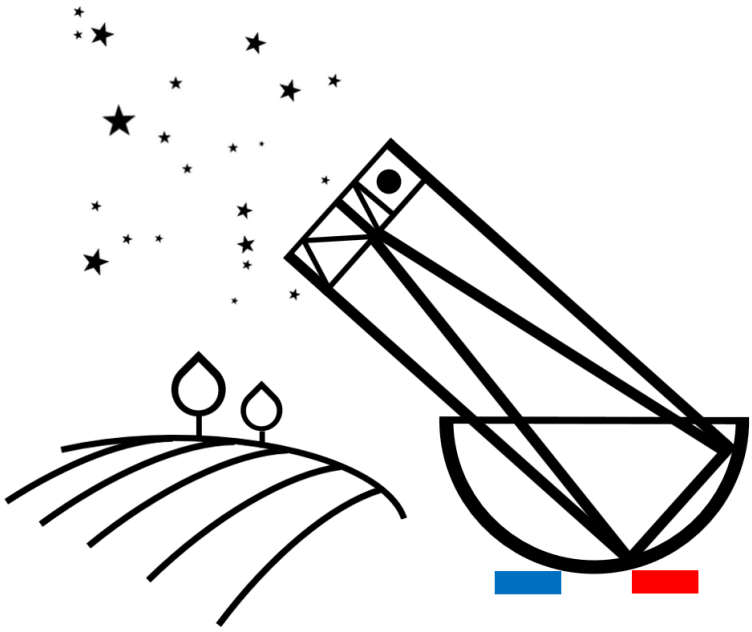
Credit : Celestron

Les batteries voient leur capacité diminuer avec le temps elles fournissent alors un même ampérage moins longtemps qu'au début.

6.12 Etude de dimensionnement d'un dobson

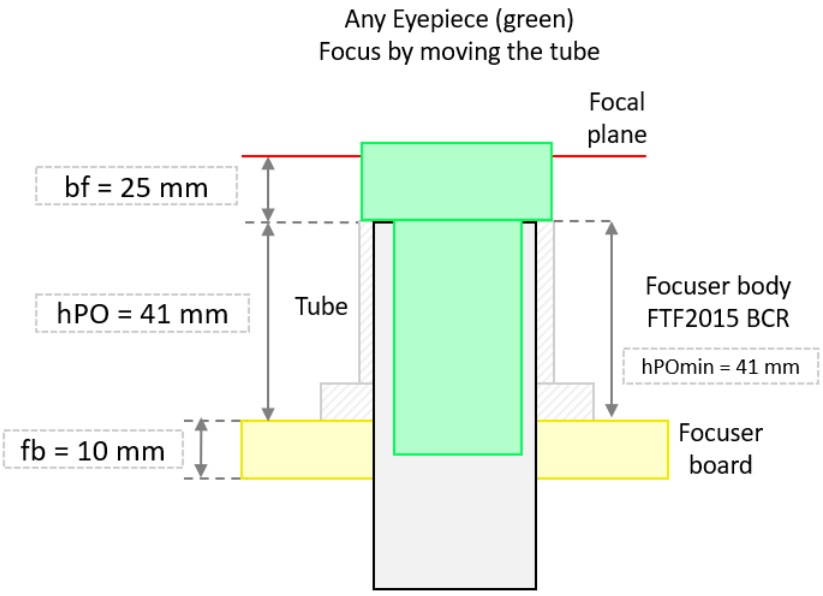
6.12.1 Première version

Cette version n'optimise pas la position d'un correcteur Tele Vue Paracorr II, autrement dit le correcteur va un peu dépasser dans le champ de l'ouverture du dobson.



Prenons le cas d'un dobson ayant les caractéristiques suivantes (il s'agit de mon futur dobson !) :

Oculaire inséré dans le porte oculaire FTF 2015BCR



Credit : J.G. Gricourt

D = 457.2mm (18 inch)

a = 114.3mm (4.5 inch), ici on choisi de ne pas retirer les bordures car le miroir sera directement collé sur un support ...

F = 1645.92mm (F/3.6)

fb = 10mm, l'épaisseur du tube du dobson (focuser board)

hPO = 41mm mesuré, la hauteur totale du corps du porte oculaire (base de montage comprise)

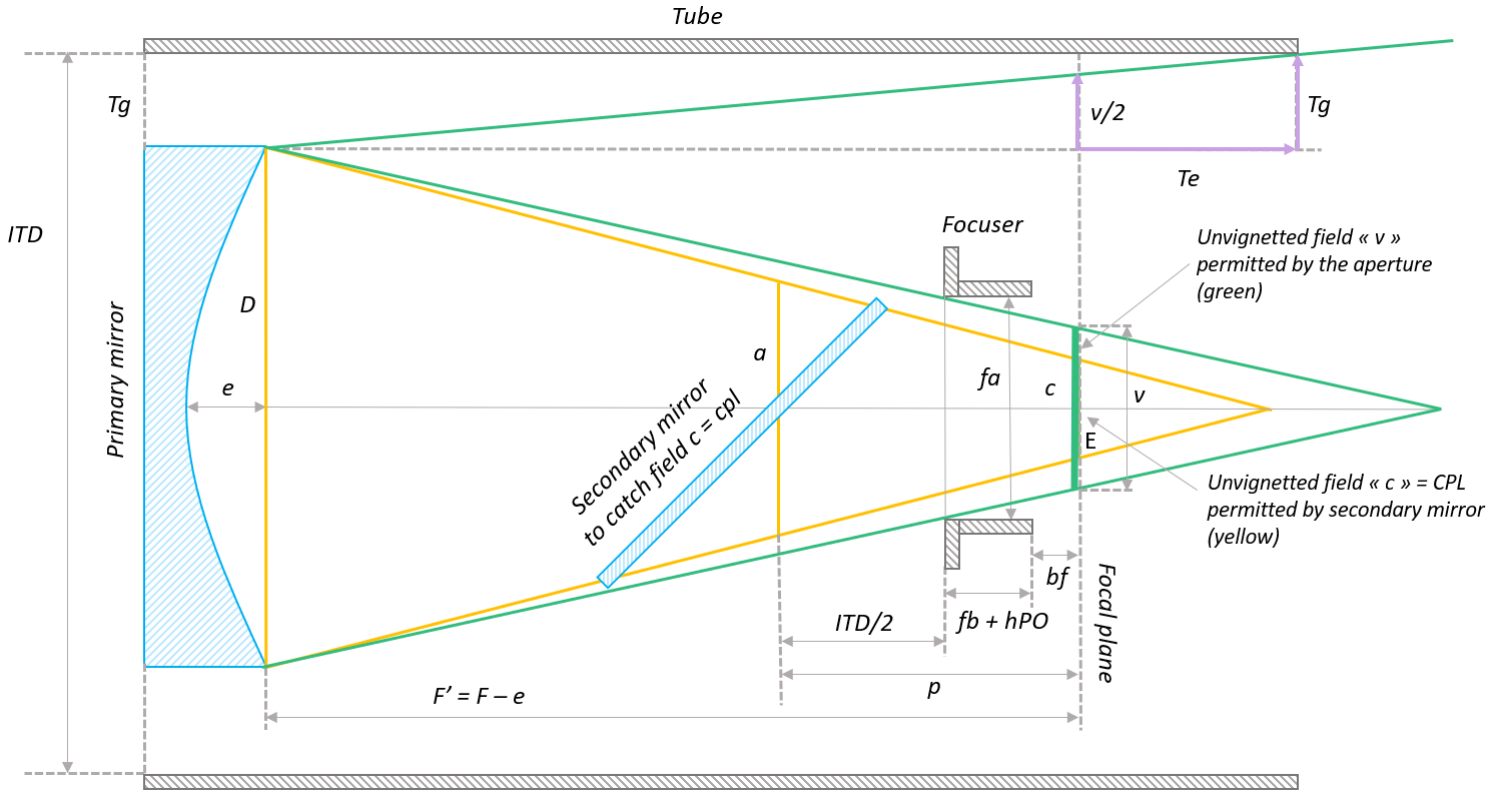
bf = 25mm, le backfocus au dessus du porte oculaire arrondi en partant de 1 inch recommandé par Don Pensack pour permettre la mise au point avec tous les oculaires y compris l'usage du Tele Vue Paracorr II

p = ITD/2 + fb + hPO + bf = 304.6mm et en considérant qu'à minima [199, 245] : ITD = $D + v = D +$champ Ethos 21

(field stop = 36.2mm)

Attention hPO comprends :

— La platine en métal du porte-oculaire (fp = focuser plate)
— Le corps du porte-oculaire



Calcul de la flèche du miroir, ici non négligeable car il s'agit d'un primaire ouvert à F/3.6 :

$$e = R\left[1 - \sqrt{1 - \frac{D^2}{4R^2}}\right] \quad \text{où R = le rayon de courbure du miroir et vaut 2 fois la focale}$$

$$e = 2 \times 1645.92\left[1 - \sqrt{1 - \frac{457.2^2}{4(2 \times 1645.92)^2}}\right]$$

$$e = 7.95\text{mm}$$

Calcul de la focale secondaire F' :

$$F' = F - e$$

$$F' = 1645.92 - 7.95$$

$$F' = 1637.97\text{mm}$$

Calcul de l'ouverture minimum au porte oculaire en fonction du backfocus souhaité f_b pour ne pas vigneter le champ v couvert par l'Ethos 21mm voir le tableau suivant : Tele Vue Eyepiece Specifications

$$fa_{\min} = (f_b + h_{\mathrm{PO}} + b_f) \times \left(\frac{D - v}{F'}\right) + v$$
$$fa_{\min} = (10 + 41 + 25) \times \frac{457.2 - 36.2}{1637.97} + 36.2$$
$$\boxed{fa_{\min} = 57.73mm}$$

L'ouverture du Feathertouch est de $fa = 50.8mm$ il y aura un peu de vignetting mais négligeable car localisé à l'extrême bord du champ.

Le même calcul avec le porte oculaire Baader Diamond Steeltrack :

$$fa_{\min} = (10 + 51 + 25) \times \frac{457.2 - 36.2}{1637.97} + 36.2$$
$$\boxed{fa_{\min} = 58.30mm}$$

L'ouverture du Baader est de $fa = 55mm$ et encore ici il y aura un peu de vignetting mais négligeable comme avec l'autre porte-oculaire.

Calcul du CPL = champ pleine lumière :

$$c = \frac{aF' - pD}{F' - p}$$
$$c = \frac{114.3 \times 1637.97 - 304.6 \times 457.2}{1637.97 - 304.6}$$
$$\boxed{c = 35.97mm}$$

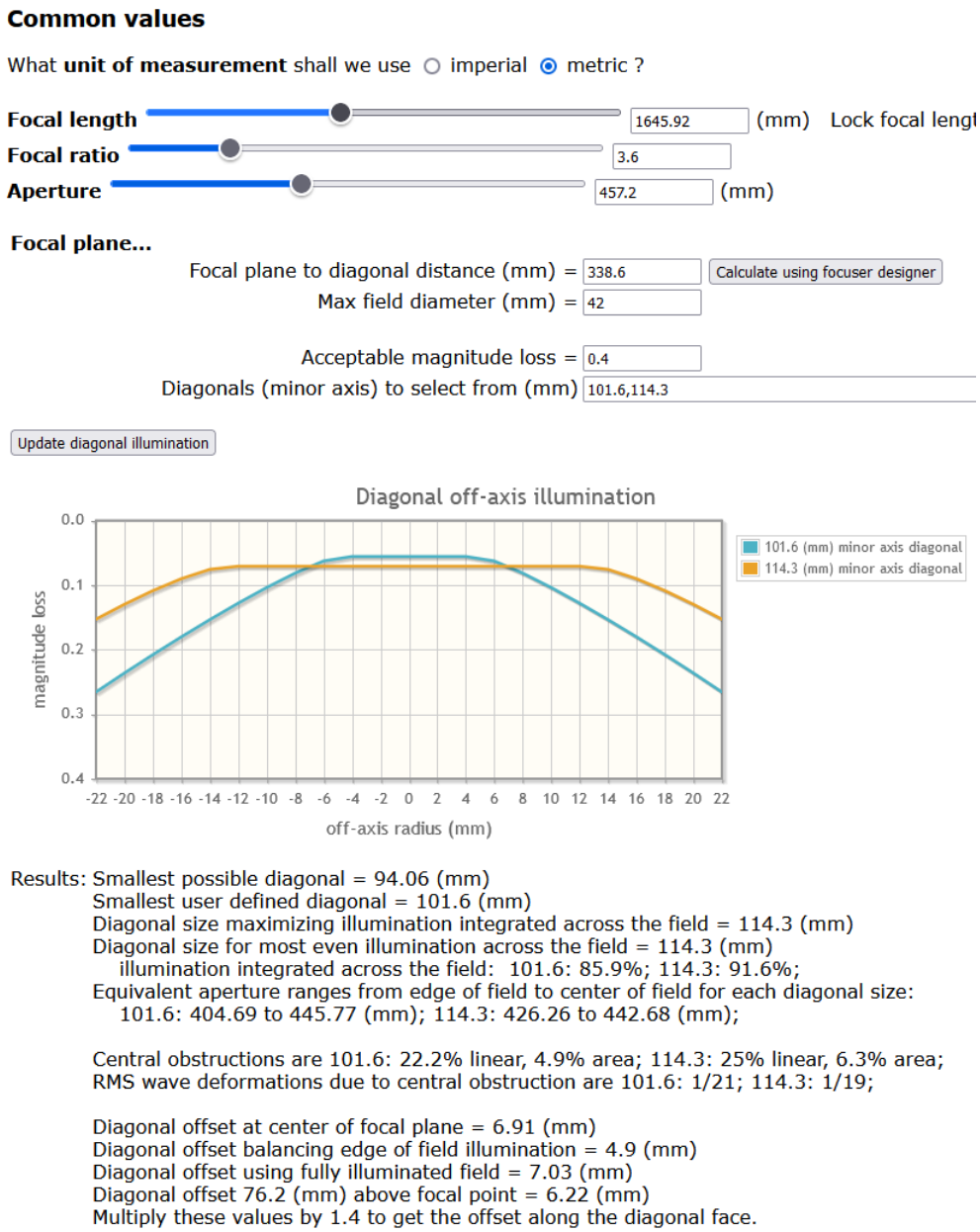
Soit en angle :

$$\theta = c/F$$
$$\theta = 35.97/1645.92$$
$$\boxed{\theta = 1.25°}$$

A titre d'exemple l'oculaire Tele Vue Ethos 21mm donnerait le même champ.

On obtient un champ pleine lumière confortable car cela représente plus de 2 fois la dimension de la pleine lune ! Ceci grâce au miroir secondaire suffisamment large (CO = 25%) pour éviter la contribution des bords du secondaire à la formation de l'image dès le centre du champ car les bords ne sont pas parfaitement plats en général et introduiraient des aberrations dans l'image.

Le CPL selon la taille du secondaire



Results: Smallest possible diagonal = 94.06 (mm)
Smallest user defined diagonal = 101.6 (mm)
Diagonal size maximizing illumination integrated across the field = 114.3 (mm)
Diagonal size for most even illumination across the field = 114.3 (mm)
illumination integrated across the field: 101.6: 85.9%; 114.3: 91.6%;
Equivalent aperture ranges from edge of field to center of field for each diagonal size:
101.6: 404.69 to 445.77 (mm); 114.3: 426.26 to 442.68 (mm);

Central obstructions are 101.6: 22.2% linear, 4.9% area; 114.3: 25% linear, 6.3% area;
RMS wave deformations due to central obstruction are 101.6: 1/21; 114.3: 1/19;

Diagonal offset at center of focal plane = 6.91 (mm)
Diagonal offset balancing edge of field illumination = 4.9 (mm)
Diagonal offset using fully illuminated field = 7.03 (mm)
Diagonal offset 76.2 (mm) above focal point = 6.22 (mm)
Multiply these values by 1.4 to get the offset along the diagonal face.

Credit : J.G. Gricourt

Calcul du Strehl global de l'instrument :

pri = 0.984

sec = 0.987

CO = 114.3 / 457.2 = 25%

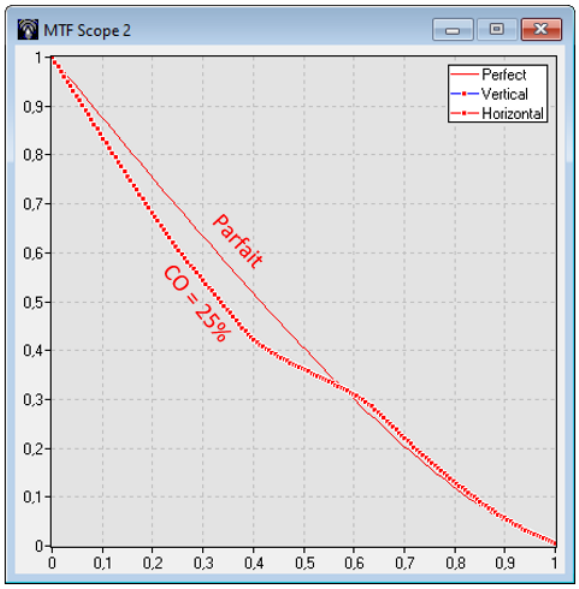
$$\text{Strehl} = (1 - \text{CO}^2) \times \text{pri} \times \text{sec}$$
$$\text{Strehl} = (1 - 0.25^2) \times 0.984 \times 0.987$$
$$\boxed{\text{Strehl} = 0.91}$$

Ce qui reste bien au delà du Strehl de 0.8 minimum pour être “Diffraction Limited”.

Soit un diamètre efficace pour la résolution (équivalent non obstrué) de :

$$D_{\text{eff}} = D \times \text{EER}$$
$$D_{\text{eff}} = D \times (1 - CO^2)^2$$
$$D_{\text{eff}} = 457.2 \times (1 - 0.25^2)^2$$
$$\boxed{D_{\text{eff}} = 402mm}$$

MTF

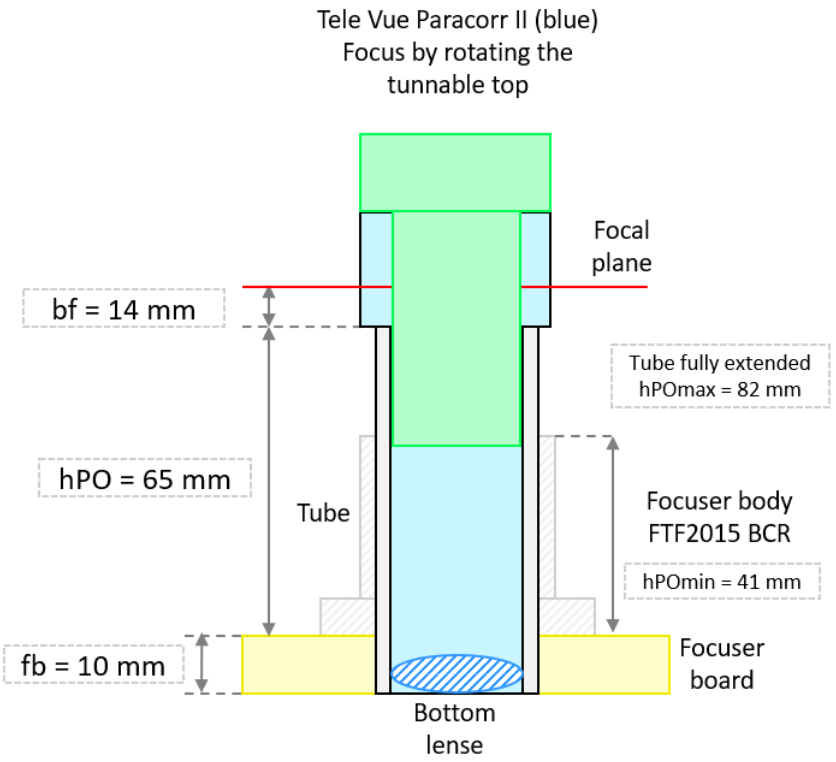


Credit : J.G. Gricourt

6.12.2 Seconde version

Cette version optimise la position d’un correcteur Tele Vue Paracorr II afin que celui ci ne nécessite pas de dépasser dans le champ de l’ouverture du dobson (cas limite).

Correcteur inséré dans le porte oculaire FTF 2015BCR



Credit : J.G. Gricourt

D = 457.2mm (18 inch)

a = 114.3mm (4.5 inch), ici on choisi de ne pas retirer les bordures car le miroir sera directement collé sur un support ...

F = 1645.92mm (F/3.6)

fb = 10mm, l'épaisseur du tube du dobson (focuser board)

hPO = 65mm mesuré, la hauteur totale du corps du porte oculaire + partie sortante du tube + base de montage

bf = 14mm, le backfocus au dessus du porte oculaire du correcteur requis par Tele Vue [17]

p = ITD/2 + fb + hPO + bf = 317.6mm et en considérant qu'à minima : ITD = D + v = D + champ Ethos 21 (field stop = 36.2mm)

Calcul de l'ouverture minimum au porte oculaire en fonction du backfocus souhaité f_b pour ne pas vigneter le champ v couvert par l'Ethos 21mm voir le tableau suivant : Tele Vue Eyepiece Specifications

$$fa_{\min} = (f_b + h_{\mathrm{PO}} + b_f) \times \left(\frac{D - v}{F'}\right) + v$$

$$fa_{\min} = (10 + 65 + 14) \times \frac{457.2 - 36.2}{1637.97} + 36.2$$

$$\boxed{fa_{\min} = 59.1mm}$$

L'ouverture du Feathertouch est de $fa = 50.8mm$ il y aura un peu de vignetting mais négligeable car localisé à l'extrême bord du champ.

17. Le backfocus au dessus du PO vaudrait 38 mm ici ...

Calcul de la distance du miroir secondaire au plan focale = p

$$
\begin{aligned}
p &= \mathrm{ITD}/2 + f_b + h_{\mathrm{PO}} + b_f \\
p &= 493.4/2 + 10 + 65 + 14 \\
\boxed{p &= 335.7\mathrm{mm}}
\end{aligned}
$$

Calcul du CPL = champ pleine lumière :

$$
\begin{aligned}
c &= \frac{aF' - pD}{F' - p} \\
c &= \frac{114.3 \times 1637.97 - 335.7 \times 457.2}{1637.97 - 335.7} \\
\boxed{c &= 25.91\mathrm{mm}}
\end{aligned}
$$

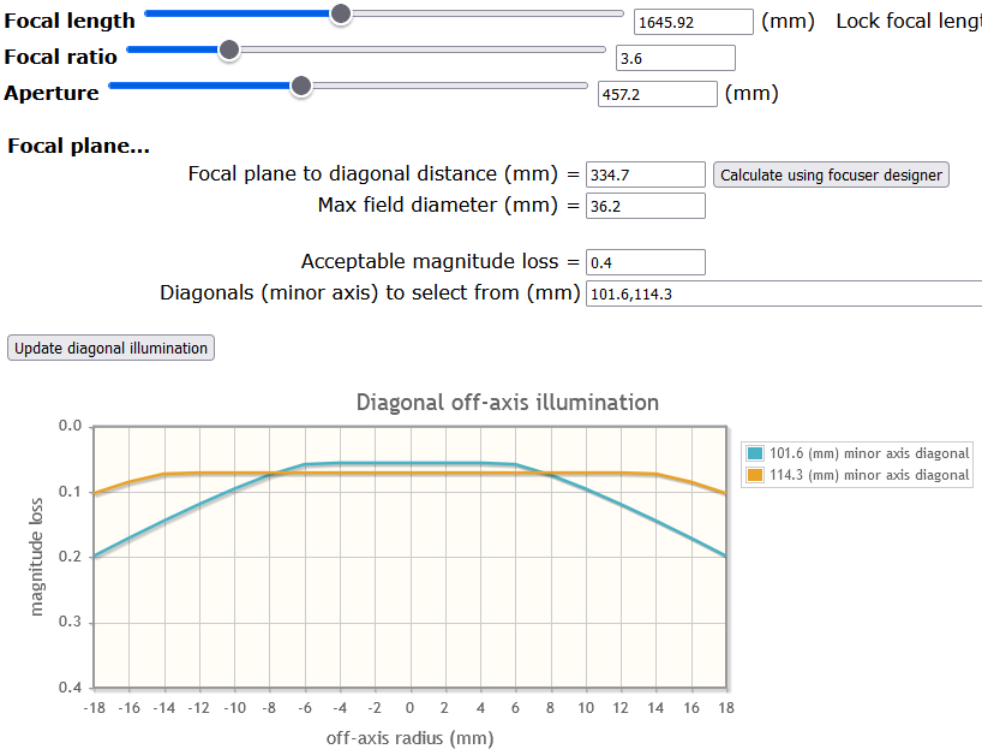
Soit en angle :

$$
\begin{aligned}
\theta &= c/F \\
\theta &= 26.24/1645.92 \\
\boxed{\theta &= 0.90^\circ}
\end{aligned}
$$

Le champ couvert par le CPL correspond à celui d'un oculaire Tele Vue Panoptic 24mm.

On obtient un champ pleine lumière confortable car il représente 2 fois la dimension de la pleine lune ! Ceci grâce au miroir secondaire suffisamment large (CO = 25%) pour éviter la contribution des bords du secondaire à la formation de l'image dès le centre du champ car les bords ne sont pas parfaitement plats en général et introduiraient des aberrations dans l'image.

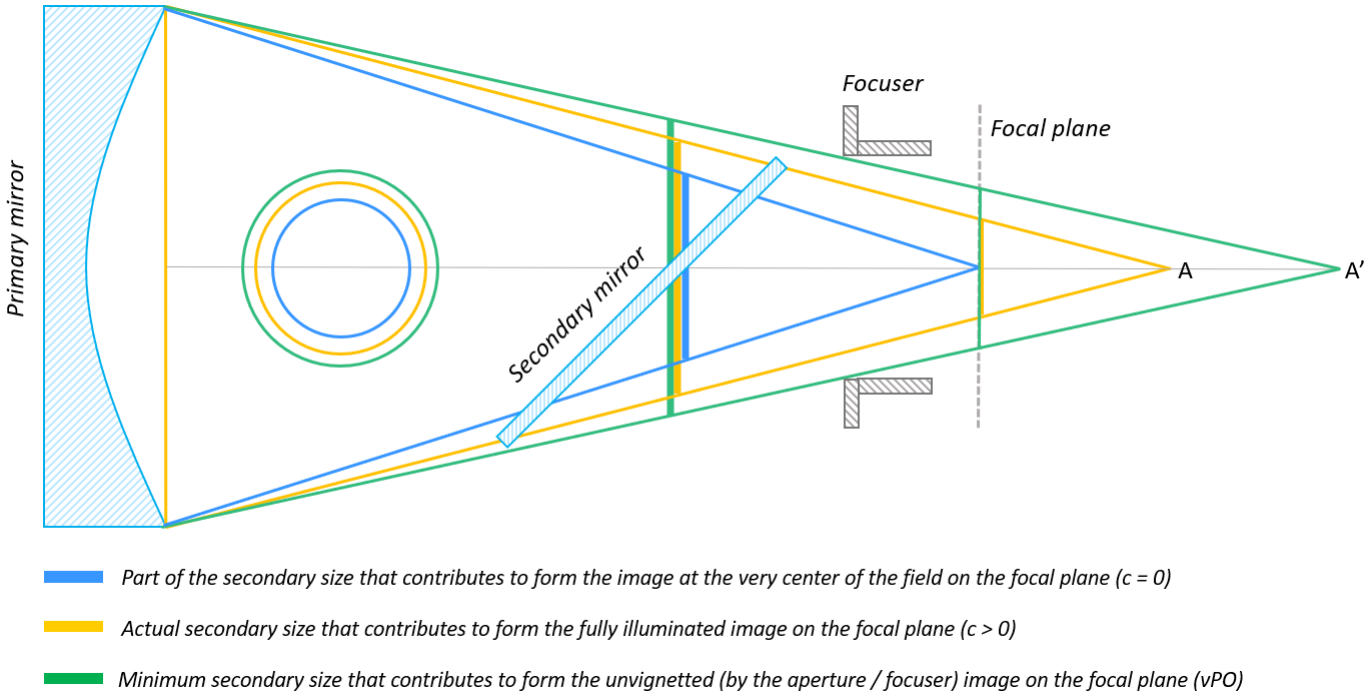
Le CPL selon la taille du secondaire



Credit : J.G. Gricourt

6.12.3 Remarque concernant le choix du secondaire

Le CPL selon la taille du secondaire



Credit : J.G. Gricourt

Calcul de la longueur “a” interceptée par le miroir secondaire correspondant au champ pleine lumière valant 0, le flux lumineux d'une source à l'infini sur l'axe optique :

$$\begin{aligned} a(c=0) &= \frac{pD}{F'} \\ a(c=0) &= \frac{317.6 \times 457.2}{1637.97} \\ a(c=0) &= 88.65mm \end{aligned}$$

Ici les bords d'un miroir hypothétique de 88.65mm contribueraient à la formation de l'image ponctuelle au centre.

Calcul de la longueur “a” interceptée par le miroir secondaire correspondant au champ pleine lumière :

$$\begin{aligned} a(v=c) &= \frac{c(F'-p)+pD}{F'} \\ a(v=c) &= 114.3mm \end{aligned}$$

Cette longueur sans surprise correspond à la dimension du miroir secondaire (calcule inverse du CPL à partir de la dimension du miroir secondaire).

Calcul de la longueur “a” interceptée par le miroir secondaire correspondant au champ permit pas l'ouverture du PO (couleur verte) :

Le champ intercepté par le secondaire sur le plan focal :

$$\begin{aligned} v_{\mathrm{PO}} &= \frac{F'fa-(fb+h_{\mathrm{PO}})D}{F'-(fb+h_{\mathrm{PO}})} \\ v_{\mathrm{PO}} &= \frac{1637.97 \times 50.8-(10+65)457.2}{1637.97-(10+65)} \\ v_{\mathrm{PO}} &= 31.30mm \end{aligned}$$

Le champ intercepté par le secondaire sur le secondaire :

$$\begin{aligned} a(v=v_{\mathrm{PO}}) &= \frac{31.30(1637.97-317.6)+317.6 \times 457.2}{1637.97} \\ a(v=v_{\mathrm{PO}}) &= 113.88mm \end{aligned}$$

En l'absence de vigneting on devrait avoir : $a(v=c) < a(v=v_{\mathrm{PO}})$ or ici les 2 valeurs sont proches donc le miroir secondaire choisi ne vignette pas de manière significative le CPL, on peut donc considérer que l'ouverture permise par le PO capture la

totalite du CPL permi par ce secondaire.

Pour un miroir de 4.5 inch la marge sur un des bords entre la longueur bleue et la longueur effective du miroir en jaune vaut :

$$\Delta a = (a - a(c = 0))/2$$
$$\Delta a = (114.3 - 88.65)/2$$
$$\Delta a = 1.3cm$$

... et sur la surface du miroir : $\Delta a_s = \sqrt{2}\Delta a = 1.8cm$

Pour un miroir de 4 inch la marge sur un des bords entre la longueur bleue et la longueur effective du miroir en jaune vaut :

$$\Delta a = (a - a(v = 0))/2$$
$$\Delta a = (101.6 - 88.65)/2$$
$$\Delta a = 0.7cm$$

... et sur la surface du miroir : $\Delta a_s = \sqrt{2}\Delta a = 1cm$

Le secondaire de 4 inch préconisé par Mike Lockwood laisse moins de marge sur les côtés pour bien positionner le secondaire afin que les bords ne contribuent pas à la formation de l'image au centre donc un secondaire de 4.5 inch conviendra mieux même si l'obstruction augmente marginalement de 22 à 25%.

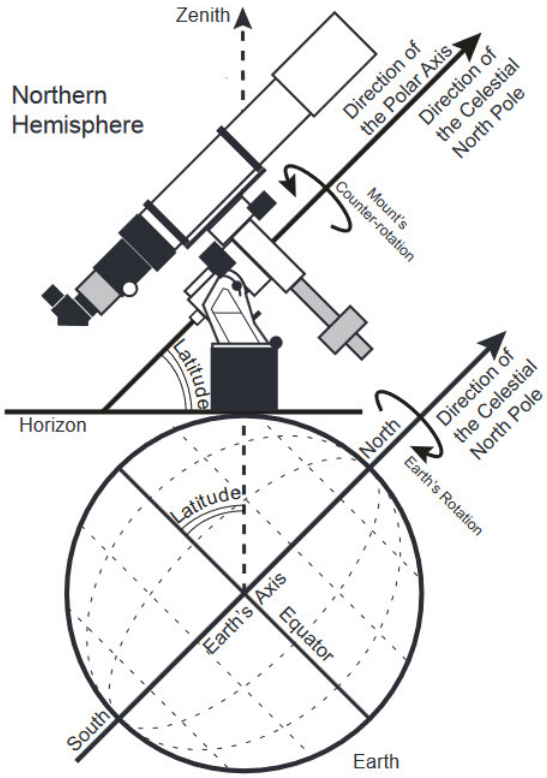
Chapitre 7

La Monture

7.1 Généralités

Monture désigne le support sur lequel repose le tube de l'instrument et qui permet d'orienter le tube dans la direction souhaitée que ce soit manuellement ou automatiquement pour les montures motorisées. En plus de permettre l'orientation de l'instrument dans la bonne direction, la monture si elle est motorisée (au moins sur l'axe horaire pour les montures EQ) permet le suivi des objets visés.

Monture



Credit : 3600GTO Manual - Astrophysics

Il existe différents types de montures :

— Equatoriale
— Monture à fourche (azimutale)
— Monture à fourche “Wedge” (équatoriale)
— Monture Dobson (azimutale)
— Monture en berceau (azimutale)

Seule la monture équatoriale motorisée permet le suivi parfait du ciel qui est absolument nécessaire en longue pose photo (+5 sec). Il est possible de faire de la photo longue pose aussi avec les autres montures seulement si l’on ajoute un dé-rotateur de champ dans le train optique. On peut utiliser une monture équatoriale en manuel, il n’y aura alors que l’axe en AD à faire tourner manuellement pour réaliser le suivi, car l’axe DEC est utilisé pour sélectionner le cercle AD sur le ciel où se trouve l’objet visé.

La qualité du guidage (erreur périodique PE) s’améliore avec :

— L’utilisation d’instruments à focale plus courte
— La mise en station (visée de la Polaire) plus soignée
— L’équilibrage de la monture plus soigné
— La mise en œuvre de l’auto-guidage avec une lunette + camera d’auto-guidage

Roland Christen (Astrophysics) [637] dit :*The single most important item for the imager is the mount. Next comes the mount. Then comes the mount.... Get the picture ?*

Les matériaux :

— Trépied métal, il sera plus sensible aux vibrations
— Trépied bois comme les Berelbach qui sont moins sensibles aux vibrations
— Pied colonne soit en béton pour poste fixe (observatoire) soit mobile en métal

La partie couplage trépied, monture ou “Tripod Hub” dépend du standard utilisé [50] :

Montures du marché

Nom	Poids	Charge max	Moteur
Vixen GP Sphinx Delux SXD2	9.2kg	15kg	Pas à pas
SW NEQ3-2 Pro Go-To	5.5kg	5kg	Pas à pas
SW HEQ5 Pro Go-To	10kg	13kg	Pas à pas
SW EQ6-R Pro Go-To	17kg	20kg	Pas à pas
SW EQ8-R Pro Go-To	25kg	50 kg	Pas à pas
iOptron GEM45	7kg	20kg	Pas à pas
Celestron Advanced VX	13kg	14kg	Pas à pas
Astrophysics 1200GTO	56kg	100kg	Pas à pas
10Micron GM1000 HPS	20kg	25kg	Pas à pas
ZWO AM5 ou AM3 Harmonic	5.5kg	20kg	Harmonic Drive
Pegasus NYX-101	6.5kg	20kg	Harmonic Drive
Rainbow Astro RST-300	8.5kg	30kg	Harmonic Drive

Tous les trépieds “EQ” possèdent un ergot décentré appelé aussi “Teton”, “Azimuth Stop”, “North Pin Alignment”, “North Peg” ainsi qu’une dépression centrale, malheureusement ces standards ne sont pas compatibles entre eux.

Exemple d'adaptation :

Monture de type EQ5 sur un trépied de type EQ6



Credit : Geoptik

Monture Base 3/8" (ex : Giro Ercole) sur un trépied de type EQ5 ou EQ6



Credit : AliExpress

Pour que les lunettes un peu longues évitent de toucher les pieds du trépied, il existe aussi des extensions afin de monter l'instrument plus haut.

Extension monture EQ5

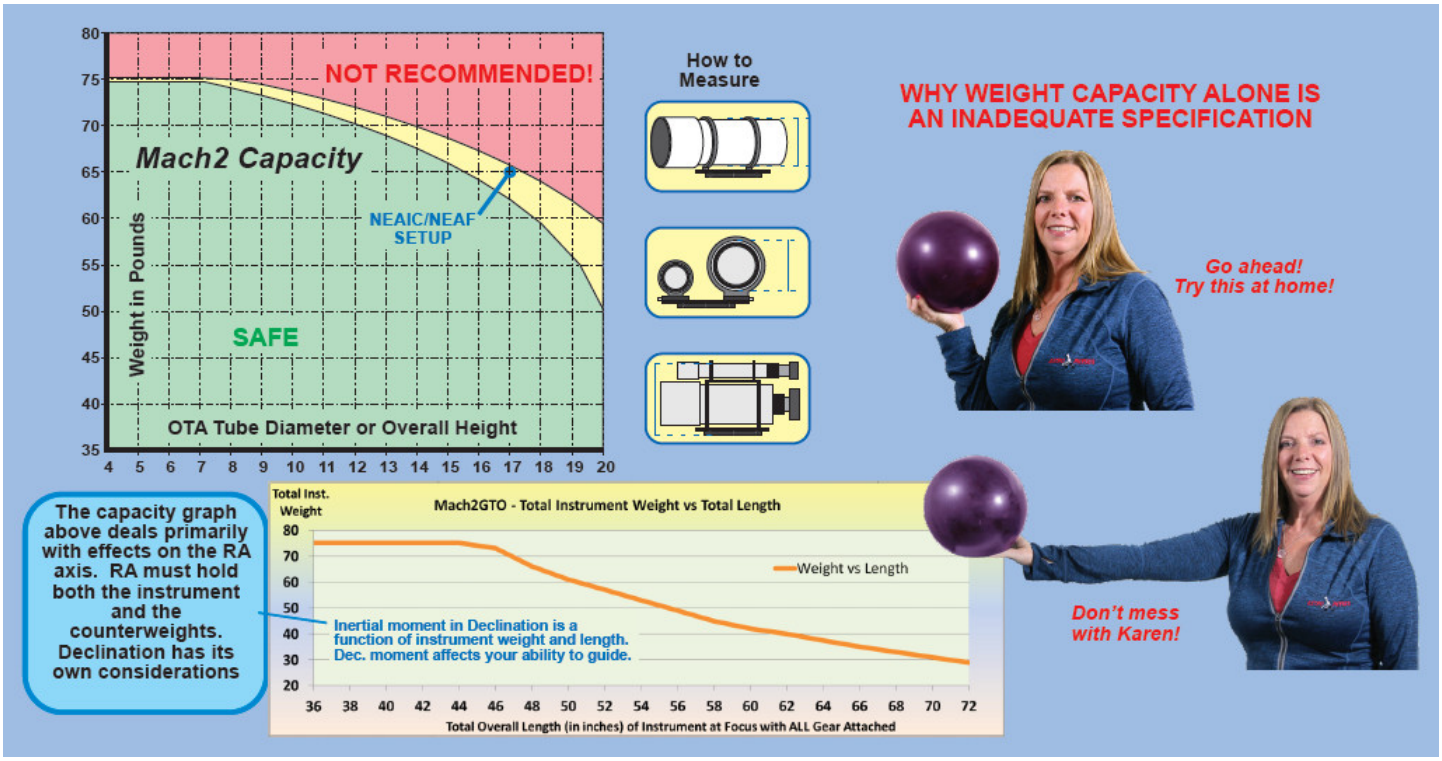


Credit : Skywatcher

Importances de différent facteurs dans le choix de la monture [33] :

— Le mouvement en RA : influencé par la charge portée et le diamètre de l'instrument
— Le mouvement en DEC : influencé par la charge portée et la longueur de l'instrument (le moment d'inertie)

Monture Mach2



Credit :Astrophysics

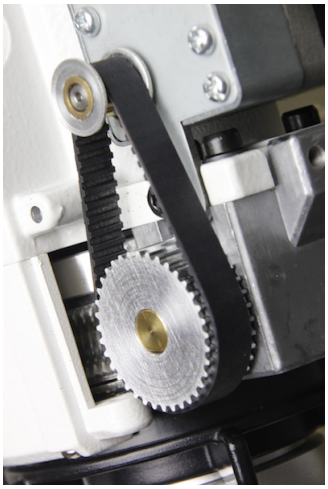
Les montures bas de gamme :

— Sont dotées de moteurs pas à pas ou à courant continu basiques
— Sont dotées d'un engrenage pour entrainer la VSF (vis sans fin) en AD et DEC (seulement si il y a bien un GOTO)
— Sont bruyantes
— La PE (erreur périodique) est plus chaotique

Les montures moyens de gamme :

— Sont dotées de moteurs pas à pas plus précis (0.144 arcsec / pas)
— Sont dotées de courroies pour entrainer les VSF (vis sans fin) en AD et DEC (seulement si il y a bien un GOTO)

Courroie monture EQ6



Credit : Skywatcher

De manière générale lorsque la VSF (vis sans fin) est engagée dans l'engrenage principal, "Drive" (mouvement en RA ou DEC) il ne faut donc pas bouger la monture au risque d'endommager les pignons. De plus lors du suivi du ciel ou lors de manipulation avec le GOTO il faut que l'engrange et la vis sans fin en contact se fasse sous une légère contrainte afin de mieux accrocher.

Les montures haut de gamme :

— Sont dotées de moteurs pas à pas haute résolution ou moteur de type "Harmonic Drive" ou de type "Direct Drive"
— Sont dotées de courroies pour entrainer la VSF (vis sans fin)
— Sont dotés d'encodeur optique absolu pour réaliser le suivit sans lunette de guidage

Attention les montures à encodeur absolu ou celle qui permettent de corriger le guidage d'après une valeur de PEC saisie, ne corrige pas le suivit mais seulement la monture ! En règle général un suivi en auto-guidage sur une monture basique sera aussi bon voir meilleur que sur un monture pratiquant de la correction d'après la PEC de la monture.

Certaines montures, comme l'iOptron CEM permettent que le poids de la charge soit positionné sur le centre de gravité de la monture (axe central du trépied) mais aussi que le viseur polaire, soit utilisable en dehors de la position 0 de la monture.

Les instruments longs comme les lunettes achromatiques ou les Newtons à F/D long nécessitent une monture plus lourde que les instruments courts en raison de l'effet de bras de levier engendré par leur longueur.

La règle en astrophoto est de prendre une monture capable de supporter au moins 2 fois le poids de l'instrument, on parle

aussi de prendre une monture dont le prix est 2 fois supérieur à celui de l'instrument.

Accessoires associés au montage :

- Colliers du tube "'Tube Mounting Rings"
- Queue d'aronde mâle au format Vixen ou Losmandy (plus large pour les gros instruments) est la partie permettant de fixer l'instrument sur la monture en l'enclenchant sur la queue d'aronde femelle de la monture.
- Queue d'aronde femelle est la partie permettant de fixer l'instrument sur la monture

Monture Azimutale où "Monture AZ", désigne un type de monture qui permet de suivre le plus souvent manuellement le mouvement du ciel en compensant la rotation terrestre. Des exemples populaires de monture azimutales chinoises par ordre de qualité : Skywatcher AZ4, SkyTee (et clones), Giro Ercole.

Le nec plus ultra des montures AZ PushTo (intégrant des encodeurs) :

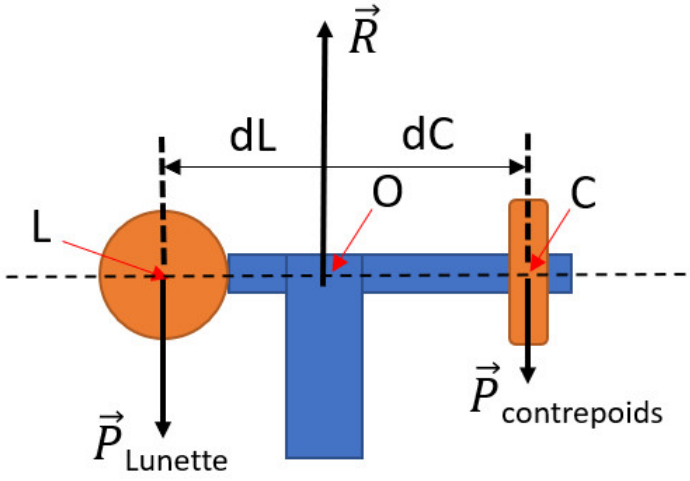
- Rowan AZ 100, Rowan AZ 75 (UK)
- Discmounts DM6, DM4 (USA)
- AYO (Swiss)

Note : Discmounts a fermé depuis le 31/12/2024

Les montures AZ validées pour monter une lunette de 100mm de 6kg au total sans perte de stabilité.

- Rowan AZ 75 (UK) - 4.1kg / 25kg charge max
- Vixen APZ (Japon) - 2.2kg / 8kg charge max
- Giro Ercole (Allemagne) - 3.9kg / 18kg charge max
- Vamo Traveller (Swiss) - 1.4kg / 6kg charge max

Equilibrage d'une monture AZ selon l'axe d'azimut :



Credit : J.G. Gricourt

L'équilibre est atteint si la somme des moments des forces vaut 0 : $\sum M = \overrightarrow{OL} \wedge \vec{P_L} + \overrightarrow{OO} \wedge \vec{R} + \overrightarrow{OC} \wedge \vec{P_C}$ donc au final pour obtenir l'équilibre il faut que le contrepoids soit éloigné sur la barre de la distance : $d_C = d_L \frac{P_L}{P_C}$

L'équilibrage selon l'axe d'azimut permet un équilibre des forces sur les tubes du trépied et évite que le télescope bascule sur

son côté.

L'équilibrage selon l'axe d'altitude permet d'équilibrer la lunette quelle que soit la direction en hauteur visée et éviter que la lunette bascule par-devant (plonge) ou par-derrière (se relève). Cet équilibre est généralement rompu dès que l'on change d'oculaire, il faut alors reculer la lunette dans ses anneaux si l'on charge un oculaire moins lourd et avancer la lunette dans ses anneaux si l'on charge un oculaire plus lourd. Les lunettes de longue focale sont plus sensibles aux changements d'oculaires.

Enfin, la mise au point produira moins de vibration si l'on utilise de base une lunette ED où le poids est plutôt placé en arrière qu'une lunette APO ou le poids est plutôt placé devant à cause des lentilles très lourdes du triplet.

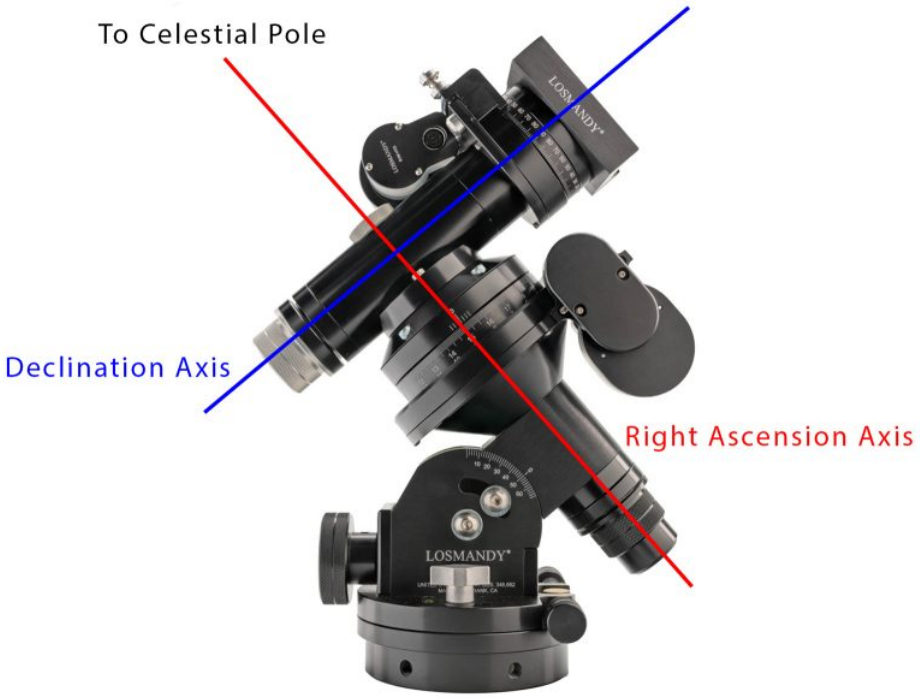
Défauts des montures AZ motorisées :

— La rotation de champ
— Le guidage à fort grossissement manquant de fluidité (par à-coups en escalier) [254]

Les montures AZ motorisée présente le défaut de rotation du champ où les étoiles tournent lentement autour du point visé et donc ne restent pas fixent, ce qui est très préjudiciable en photo longue pose. Il existe cependant des dé-rotateurs de champs adaptés pour ce type de monture (ex : sur Meade LX200). De manière plus radicale, pour éliminer totalement la rotation de champ il faut utiliser une vraie monture équatoriale alignée sur l'axe polaire.

Monture Equatoriale ou "EQ" ou "Monture Allemande" ou "German Equatorial Mount" ou "GEM Mount" désigne un type de monture qui quand elle est motorisée permet de suivre parfaitement le mouvement du ciel en compensant la rotation terrestre. Sans suivi les étoiles produisent des filés sur la photo. Une étoile parcourt $\theta = 15$ arcsec toutes les secondes à l'équateur, cette distance angulaire diminue en s'éloignant de l'équateur : $\theta = 15.04 \times cos\delta$. La monture s'aligne sur l'axe de rotation terrestre (la Polaire) et permet de figer les objets du champ observé ou photographié. Le suivi est réalisé par un moteur entraînant l'axe horaire de la monture RA. En mode auto-guidage le suivi est réalisé par 2 moteurs, l'un en RA et l'autre DEC pour appliquer les corrections de suivi nécessaires. De manière générale ce type de monture, lorsqu'elle est non motorisée et inadaptée à l'observation visuelle, on peut la remplacer avantageusement par une monture azimutale.

Monture Equatoriale



Credit : Alex Conu

La position du tube du télescope de type Newton peut être réglée en déserrant ses colliers :

- En visuel la position la plus ergonomique est de positionner le porte oculaire en opposition par rapport à l'axe RA de la monture afin qu'aaprès le retournement de méridien il ne soit pas nécessaire de repositionner le tube dans ses colliers (porte oculaire à l'envers)
- En astrophoto la position idéale est de positionner le porte oculaire (et donc l'imageur) du même côté par rapport à l'axe RA de la monture afin que le poids supplémentaire de l'imageur soit le plus possible de la monture.

Etapes d'installation d'une monture EQ = Mise en station [311] :

1. Choisir d'un emplacement dégagé où l'étoile Polaire est visible (afin d'aligner la monture sur le pôle céleste)
2. Déserrer les 2 freins
3. Positionner manuellement la monture dans sa position Parking = Home = Neutre
4. Re-serrer les freins (moteur enclenchés)
5. Installer la monture sur son trépied
6. Vérifier avec le niveau à bulle que la monture repose sur un plan parfaitement horizontal
7. Installer la barre de contrepoids avec le contrepoids au bout de la barre
8. Brancher l'alimentation : nécessité d'une prise de courant à proximité ou d'une batterie 12V 5A
9. Brancher le module Wifi
10. Installer le contrepoids à mi-chemin sur sa barre ou bien à l'emplacement connu pour équilibrer la lunette
11. Monter la lunette sur la platine Vixen et serrer les vis manuelles
12. Déserrer le frein du mouvement RA
13. Ajuster l'équilibrage en RA en déplaçant le contrepoids sur sa barre
14. A l'équilibre la lunette ne se déplace plus seule dans un sens ou l'autre

15. Déserrer le frein du mouvement DEC
16. Ajuster l'équilibrage en DEC en déplaçant la lunette dans ses anneaux
17. A l'équilibre la lunette ne se déplace plus seule dans un sens ou l'autre
18. Orienter l'axe de la monture pour faire pointer le chercheur polaire sur la Polaire à l'aide des clés pour le faire monter ou descendre et centrer le chercheur sur la Polaire
19. Positionner la monture dans sa position Parking avec la raquette
20. Si la position finale n'est finalement pas atteinte alors déserrer les 2 freins et mettre la monture dans sa position parking manuellement
21. Re-serrer les freins (moteur enclenchés)
22. Saisir les coordonnées du site et l'heure sur la raquette (étape non nécessaire avec l'application du smartphone)
23. Lancer la procédure de configuration du Goto par l'alignement sur 3 étoiles en visant chaque l'étoile à l'oculaire et en validant le réglage
24. Profiter de la procédure précédente afin d'aligner aussi le chercheur sur l'étoile visée

Note : lorsqu'on transporte ou lorsqu'on range sa monture il faut toujours le faire les freins déserrés pour ne pas abimer la vis sans fin et les engrenages en cas de petits chocs.

Autres réglages pour un suivi précis :

— Colimater le chercheur polaire
— Aligner la monture sur la polaire lorsque celle ci n'est pas visible en exploitant l'alignement sur 3 étoiles du Goto
— Aligner le chercheur polaire par rapport à l'axe de la monture
— Aligner l'axe optique (le tube de la lunette) sur l'axe mécanique de la monture (pointant sur la polaire) afin de corriger l'erreur de cône ★★
— Aligner le chercheur = "Finderscope"
— Corriger le backlash de la vis sans fin VSF

Note : le backlash des roues dentées (sur le côté) peut aussi être corrigé par réglage mais il peut aussi être totalement éliminé en installant le kit de Rowan remplaçant 2 roues dentées par une courroie d'entrainement. Enfin pour limiter un problème de backlash on peut faire de l'autoguidage sur une étoile surtout pour de l'astrophoto du ciel profond en longue pose

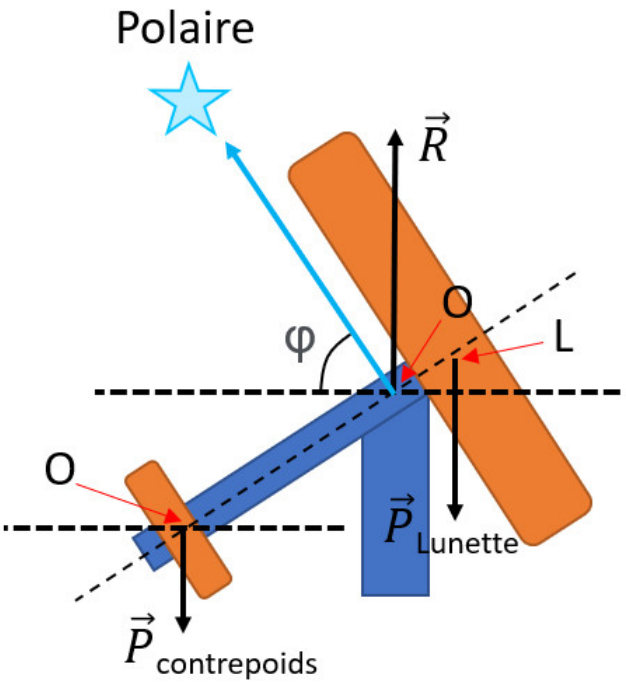
Inconvénients des montures EQ classiques à moteur pas à pas :

— Mise en station sur la Polaire
— Equilibrage nécessaire à l'aide de contre poids
— Mouvement de pointage manuel contre-intuitif, le Goto est indispensable
— Le porte-oculaire se retrouve parfois dans des positions inconfortables pour observer
— Il faut réaliser le retournement au méridien = "Meridian Flip" soit même sauf si on utilise une monture doté du Goto des monture motorisées

Méthode de visée du pôle céleste lorsque la Polaire n'est pas visible (obstacle bâtiment ou arbres) : voir le paragraphe sur l'alignement Polaire.

L'équilibrage des charges est primordial pour un suivi de qualité et il faut éloigner le contrepoids de l'axe DEC pour équilibrer une charge utile plus importante.

Equilibrage d'une monture EQ :

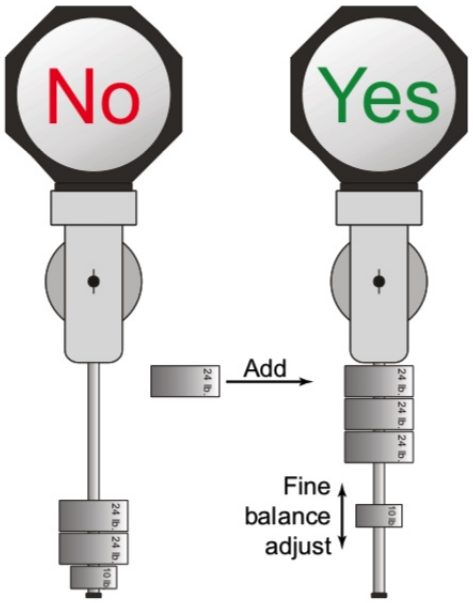


Credit : J.G. Gricourt

Note : ϕ est la latitude du lieu d'observation.

L'équilibre est atteint si la somme des moments des forces vaut 0 : $M_{\text{total}} = \overrightarrow{OL} \wedge \vec{P_L} + \overrightarrow{OO} \wedge \vec{R} + \overrightarrow{OC} \wedge \vec{P_C}$ donc au final pour obtenir l'équilibre il faut que le contrepoids soit éloigné sur la barre de la distance : $d_C = d_L \frac{P_L}{P_C}$

Placement des contre-poids



Credit : wz5mm - CN

Il faut éviter de placer les contre-poids trop loin sur la barre pour éviter de placer trop de tension sur la barre et éviter le flambage ainsi que les vibrations.

Les moteurs de montures peuvent être :

- Un moteur “Stepper Motors” (pas à pas), les bobines du stator sont parcourues par des courants de phases différentes animant le mouvement du rotor, ils sont aussi peu onéreux
- Un moteur “DC Motors” (à courant continus), le mouvement du rotor est continu, il ne produit pas de vibrations
- Un moteur “Friction Drive”, ce moteur repose sur la friction de 2 roues en contact
- Un moteur “Servo Motor” ce moteur est un type de moteur à courant continu, le mouvement est limité à 180°, son utilisation est la robotique principalement.
- Un moteur “Harmonic Drive” ou “Strain Wave Gear” ou “Réducteur Harmonique”, ce moteur est basé sur un système de roues dentée dont l’une est insérée dans l’autre
- Un moteur “Direct Drive”, ce moteur est constinué de multiple bobine de fils de cuivre (brusheless) et d’aimants

Les moteurs “Servo Motor”, Harmonic Drive” et “Direct Drive” : il n’y a plus besoin de VSF, ces moteurs utilisés dans la robotique ont un couple ou “Torque” élevé permettant un rapport charge utile sur poids de la monture très élevé. Ces moteurs répondent très vite en mode l’auto-guidage. Il n’y a aucun jeu mécanique ni backlash mais l’erreur périodique PE à corriger est plus importante que dans le cas d’une monture classique EQ6 mais son évolution est lente (PE lisse). Cependant sans courant, la monture ne maintient pas la position sauf si un frein automatique est prévu.

Dans le cas des moteurs “Harmonic Drive” et “Direct Drive” l’arbre est entrainé par le stator directement.

Caractéristiques selon les types d’entraînement

Type	PE lisse	Backlash	Couple	Charge / poids à vide	Contre poids	Huilage
Engrenages et vis sans fin		✓		✓	✓	✓
Courroies	✓				✓	
Harmonic Drive	✓		✓	✓		
Direct Drive	✓		✓	✓		

Note : engrenages à vis sans fin “VSF” = “Worm Gear”, Courroies = “Belt”.

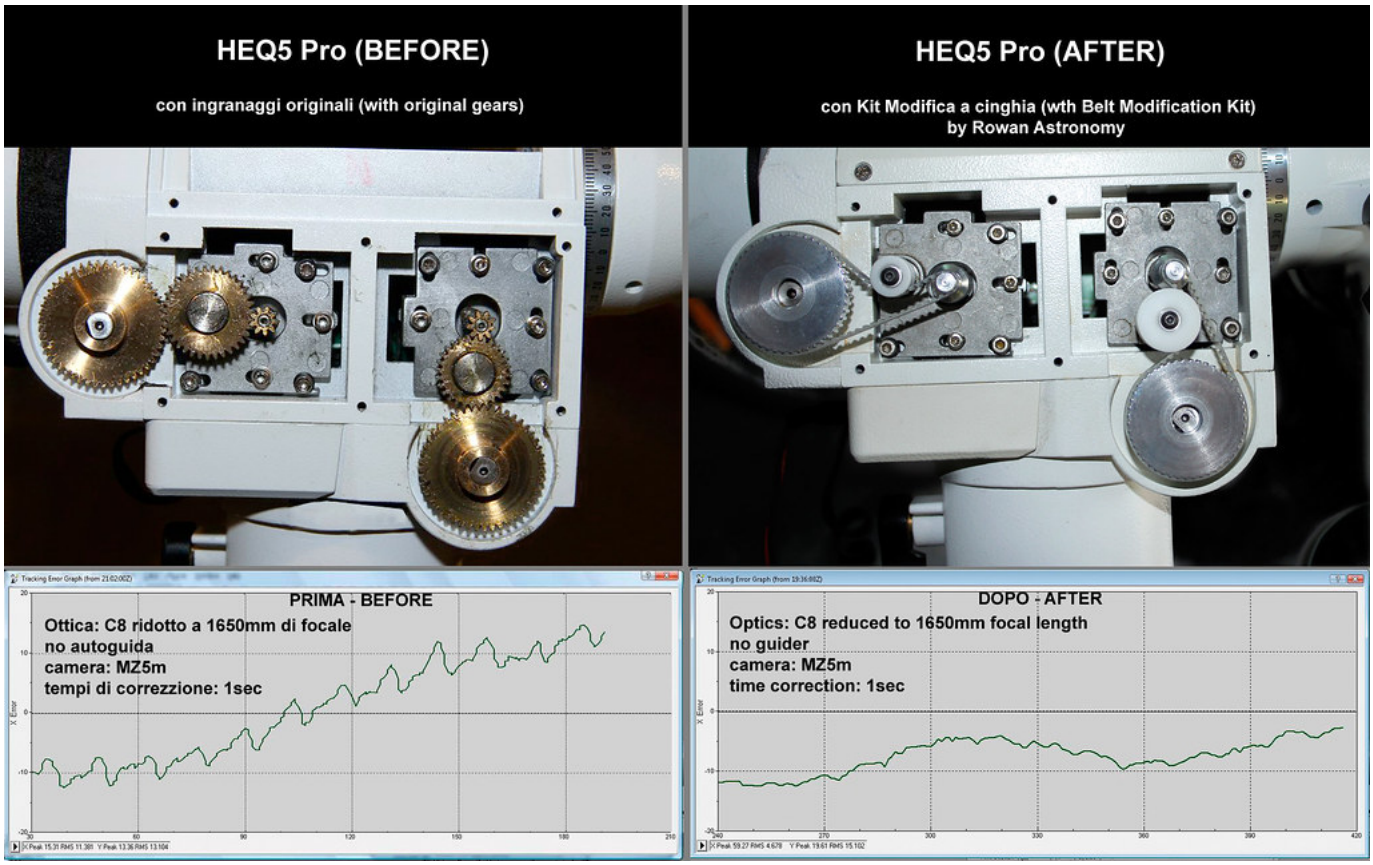
Monture HEQ5 Comme toutes les montures classiques de chez Skywatcher, la transmission est composées dans l’ordre : l’axe AD ou DEC - vis sans fin - courroie (kit Rowan) ou engrenage - moteur pas à pas.

- Correction du backlash d’une HEQ5
- Graissage d’une HEQ5

Le kit Rowan ou l’un de ses clones sur AliExpress permet de remplacer la connexion à engrenage des moteurs à l’axe AD et DEC avec une courroie pour supprimer en partie le backlash typique des engrenages usés ou mal engagés. Avec ce kit le principe d’entrainement en AD et DEC reste bien au final à engrenages via la vis sans fin sur les 2 axes. Cette modification permet de lisser l’erreur de la PE qui peut donc être corrigée plus facilement en live [645].

Voir la procédure d’installation du kit

Le kit Rowan



Credit : Astrohobby

Autres optimisations possible de l'erreur périodique de la monture :

— EQStar
— DarkFrameOptics

Lorsque l'astre visé passe par le méridien, la monture se bloque en butée et il faut alors réaliser un "Retournement de Méridien" en réorientant l'instrument autour de ses 2 axes ce qui aurait pour effet de positionner le renvoi coudé à l'envers à 180°, il faut alors soit réorienter le tube dans ses anneaux de maintien, soit réorienter le porte-oculaire si cela est possible. La motorisation peut être double axe avec bien sûr le moteur en RA, mais aussi un second moteur en DEC. Le moteur en RA permet le suivi de la rotation terrestre.

Des exemple de montures haut de gamme commercialisées : SkyWatcher EQ6-R PRO (Belt), Avalon M-Zero HQ (Belt / Worm Gear), iOptron CEM 26 (Gear / Worm Gear), iOptron CEM40 (Belt / Worm Gear), Celestron AVX (Gear / Worm Gear), AP 1600GTO (Belt / Worm Gear / Servo Motor), ZWO AM5 (Harmonic Drive), Planewave L-350 (Direct Drive).

La motorisation peut être sur 2 axes, l'axe RA pour le suivi et les axes RA et DEC pour le Goto. Le moteur en DEC permet en complément du moteur en RA :

— La fonction Goto pour pointer les objets automatiquement
— L'auto-guidage sur une étoile guide en imagerie longue pose (ciel profond)

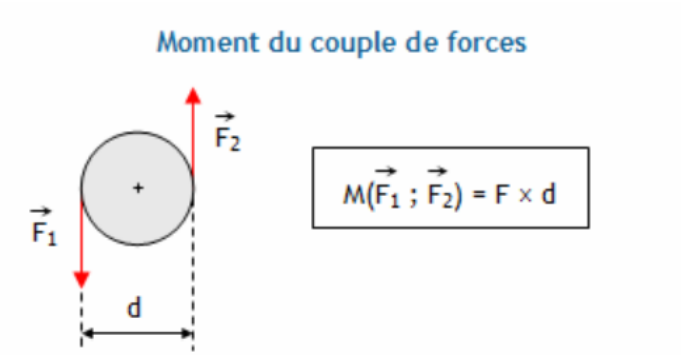
Une erreur d'alignement sur la Polaire a pour effet de dévier en déclinaison l'étoile visée (centre du champ), selon l'équation

de Richard Hook : $\delta_{\text{err}} = \frac{\Delta t \times cos\delta \times \theta_{\text{err}}}{4}$ [308] où δ_{err} est l'erreur en déclinaison (degré) [1], Δt le temps écoulé (min), δ la déclinaison de l'étoile, θ_{err} est l'erreur d'alignement (radian) de la monture (écart angulaire entre le pôle Nord et le point visé).

La présence d'encodeurs en RA et DEC permet de mémoriser la direction pointée sur le ciel, ainsi lorsque la monture est éteinte ou la direction pointée changée manuellement, la reconfiguration sur étoiles brillantes n'est pas nécessaire. Un encodeur en RA précis permet aussi d'enregistrer la position de la roue dentée en RA "Worm Gear" pour enregistrer des modèles de PE pour faire du suivi sans autoguidage ensuite, exemple : certaines montures iOptron en version EC : 0.25 arcsec de résolution.

Le moteur électrique Un objet en rotation tel un moteur électrique produit un travail pendant un laps de temps et donc une puissance.

Le moteur



Grandeur		Unité	
Symbole	Nom	Symbole	Nom
$M(\vec{F_1} ; \vec{F_2})$	moment du couple de forces	N.m	newton-mètre
F	valeur de la force F $F = F_1 = F_2$	N	newton
d	distance des droites d'action de $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$	m	mètre

Credit : Puissance d'un couple de forces

Le moment total des forces vaut :

1. δ_{err} = Declination Drift

$M_{\text{total}} = M(\vec{F_1}/O) + M(\vec{F_2}/O)$

$M_{\text{total}} = \overrightarrow{OM_1} \wedge \overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{OM_2} \wedge \overrightarrow{F_2}$ or $OM_1 = OM_2 = r$ le rayon du cercle, de plus les force sont égales à F

$M_{\text{total}} = rF\sin(\pi/2) + rF\sin(\pi/2)$

$M_{\text{total}} = rF + rF$

$M_{\text{total}} = 2rF$

$M_{\text{total}} = F \times d$ où d est le diamètre du cercle

Le travail en général vaut : $W = F \times l$ où l est la distance parcourue par l'objet soumis à la force F, donc ici il y a 2 forces parcourant une distance l lorsque le moteur à tourné d'un angle α.

$W_{\text{total}} = F_1 \times \delta l + F_2 \times l$ or $l = r \times \alpha$

$W_{\text{total}} = F_1 r\alpha + F_2 r\alpha$

$W_{\text{total}} = 2Fr\alpha$

$W_{\text{total}} = Fd\alpha$

$W_{\text{total}} = M \times \alpha$

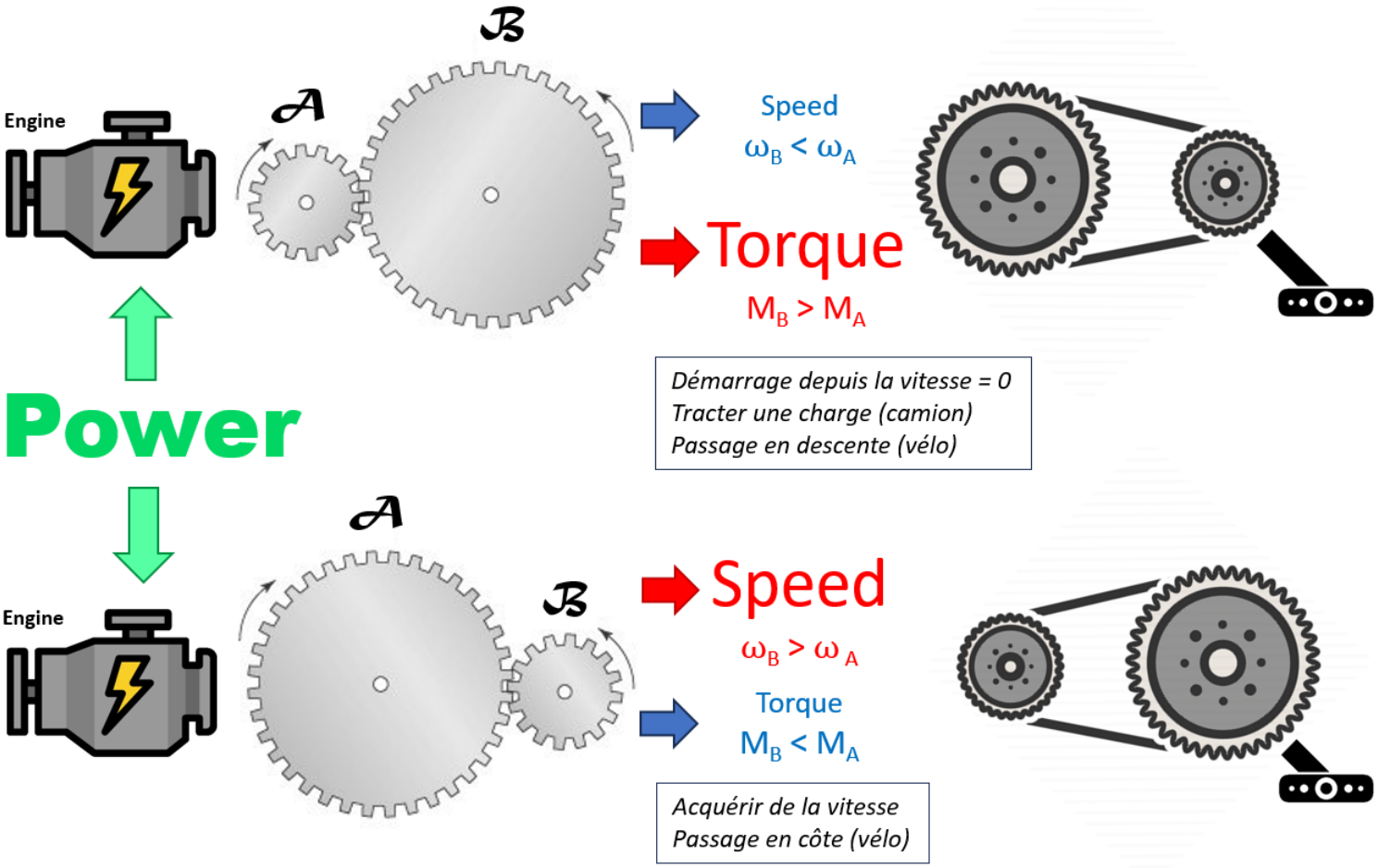
La puissance est l'expression d'un travail réalisé sur une période de temps : $P = \frac{W}{\Delta t}$

$$P_{\text{total}} = \frac{M_{\text{total}} \times \alpha}{\Delta t}$$

$P_{\text{total}} = M_{\text{total}} \times w$ où w est la vitesse de rotaton angulaire du moteur = régime moteur

Le rapport de réduction R est le rapport de nombre de dents n_A de la roue menante sur le nombre de dents n_B de la roue menée : $R_{\text{B/A}} = \frac{n_B}{n_A} = \frac{\omega_A}{\omega_B}$ où ω est la vitesse de rotation angulaire en radian/sec. Donc le rapport des moments à puissance constante vaut : $\frac{M_B}{M_A} = R_{\text{B/A}}$. Donc plus le rapport de réduction est élevé plus le couple M généré est élevé.

Vitesse et moment



Credit J.G. Gricourt

Le cas classique de la monture équatoriale est représenté par le premier schéma où il un grand rapport de réduction permet des vitesse de rotation lente (vitesse sidérale) et un couple (torque) élevé nécessaire pour déplacer des charges lourdes. En général la roue menante est remplacée par une vis sans fin.

Le système de réduction ou "Gear Mesh" [477] produit aussi de la friction et donc de la perte d'energie en chaleur (environ 95% de rendement). La fraction de la puissance restituée (rendement) Pr_{total} en pourcentage dépend du nombre de roues dentées n utilisées : $Pr_{\text{total}} = Pr^n$ où Pr est le rendement d'une seule route dentée.

Sur certaines monture équatoriale motorisée il faudra utiliser des engrenages réducteurs afin de réduire la vitesse de rotation du moteur pour de se caler sur la vitesse de rotation sidérale du ciel. Un fois la monture chargée avec un instrument il faut également suffisamment de couple pour démarrer le déplacement de l'instrument, et cela nécessite des rapports de réduction importants.

Les défauts de contact des dents des engrenages [479, 480] :

— Le "Backlash" produit un retard à la transmission du mouvement de la roue menante et il est dû au fait que les 2 roues sont trop éloignées, introduisant des gaps entre les dents.
— Le "Binding" produit un bruit unusuel et une usure prématurée des dents et il est dû au fait que les 2 roues sont trop proches.

Monture Harmonique Drive désigne une monture dotée de moteur harmoniques. Ce type de moteur possède un couple plus élevé car il produit la réduction plus efficacement “High Ratio Speed Reduction” (sans agrandir la roue dentée B) que de simples engrenages réducteurs. Ce rapport de réduction est de l'ordre de 300 :1 contre 120 :1 (Worm Gear) pour une EQ6. La vitesse de rotation du moteur doit être plus élevée pour produire la vitesse sidérale d'entrainement nécessaire et leur encombrement est nettement inférieur à celui des moteurs pas à pas classiques dont le couple généré est similaire. Des exemples de montures Harmonique : ZWO AM5, ZWO AM3, Juwei-17, UMI-17 ...

ZWO AM3



Credit Optique Unterlinden

EQ6 désigne un modèle de monture équatoriale du distributeur Skywatcher. Les montures de cette gamme se déclinent en plusieurs modèles par capacité de charge croissante : EQ1 (3kg), EQ2 (4kg), EQ3 (5kg), EQ5 (10-15kg), EQ6 (16-20kg) et EQ8 (50kg).

Goto désigne le système mécanique équipant certaines montures motorisées et qui permet à partir de la saisie du nom d'un objet, une raquette, de réaliser un pointage automatique. La monture doit alors être équipée d'une motorisation double axe (un axe pour le suivi/pointage AD et un axe pour le second axe de pointage DEC). Dans le cas où la motorisation est absente, ce système devient alors un PushTo. Le Goto nécessite un alignement sur 2 ou 3 étoiles afin d'assurer un pointage des objets optimale.

Aujourd'hui avec un kit d'encodeur + Nexus II + motorisation sur monture azimutale ou bien avec une clé Wifi pour monture EQ il est possible de pointer un objet dans “SkySafari Plus” sur smartphone ou tablette et de voir le télescope s'orienter automatiquement pour viser l'objet sélectionné afin de le centrer dans le champ de l'oculaire. Le firmware de la monture fait une correspondance entre la position souhaitée sur le ciel et le nombre de pas du moteur pas à pas à effectuer pour l'atteindre. Des montures très haut de gamme possèdent des encodeurs absolus qui permettent d'enregistrer à tout moment la position dans le ciel.

Si le Goto sur dobson propose un confort en permettant de piloter son instrument à la raquette ou au smartphone sans avoir besoin de la manipuler il a quand même des inconvénients :

— Le Goto est complètement dépendant d'une alimentation pour fonctionner, c'est la même chose avec une solution de type Pushto, il faut donc prévoir une batterie chargée comme alimentation avant chaque sortie.
— Il est encore possible de manipuler manuellement le dobson à la condition de débrayer les moteurs cependant la fluidité des mouvements ne sera pas le même qu'avec un dobson sans motorisation
— Le Goto apporte un poids supplémentaire et un inertie au mouvement manuels non négligeable au télescope

— Le Goto permet de réduire les tourillons de la structure pour plus de compacité cependant les tourillons seront trop petit pour assurer un équilibre suffisant moteurs débrayés.
— Très souvent les mouvements du Goto reposent sur des roulements à billes pour plus de précision dans le pointage cependant en mode manuel la structure est trop fluide et devient difficile à contrôler par rapport à des patins de Téflon sur bandes de FRP.
— Le montage et le branchement du Goto demande plus d'attention et ralonge le temps de mise en place du dobson.
— Une solution de Goto basée sur ServoCat coute plus de 3 000€, certains constructeurs savent exploiter des motorisation existante moins chère basée sur une carte électronique Skywatcher par exemple.

La calibration du Goto se fait en pointant des étoiles de références, jusqu'à 3 étoiles afin que la monture saches se repérer dans le ciel.

Pour réaliser la calibration Goto on peut utiliser :

— La raquette SynScan de la monture
— L'application SynScan Android ou PC
— Stellarium : YouTube
— Plate Solver : YouTube

PushTo désigne le système mécanique équipant certains Dobson et qui permet à partir de la saisie du nom d'un objet de guider l'utilisateur lors du pointage, donc celui-ci reste 100% manuels. Un exemple de PushTo est l'Intelliscope équipant certains modèles de dobsons de la gamme Orion XT. Le PushTo nécessite un alignement sur 2 ou 3 étoiles afin d'assurer un pointage des objets optimale.

DSC "Digital Setting Circles" désigne le système de pointage vendu sous forme d'un kit à monter à base d'encodeurs à installer sur une monture azimutale ou un Dobson afin d'encoder les positions pointées sur ciel en fonction de l'orientation du tube du dobson. Ce kit peut être utilisé soit en mode 100% manuel PushTo ou bien couplé à un kit de motorisation Goto permet d'orienter l'instrument vers l'objet choisi et de suivre cet objet en compensant pour la rotation terrestre. Un exemple de kit : Nexus I, Nexus II, Nexus DSC, Argo Navis, SkyCommander.

Résolution de problèmes lié à l'utilisation du DSC

— Calibrer la monture avec non pas avec 1 ni 2 étoiles mais avec 3 étoiles, toujours choisies à mi-hauteur en dehors de l'horizon et du zénith.
— Contrôler l'assiette de la monture repose sur le sol à l'aide d'un niveau à bulle
— Poser des anneaux de ferrite sur tous les câbles pour éviter les dérives de pointage en cours d'utilisation [575]

7.2 Le Suivi

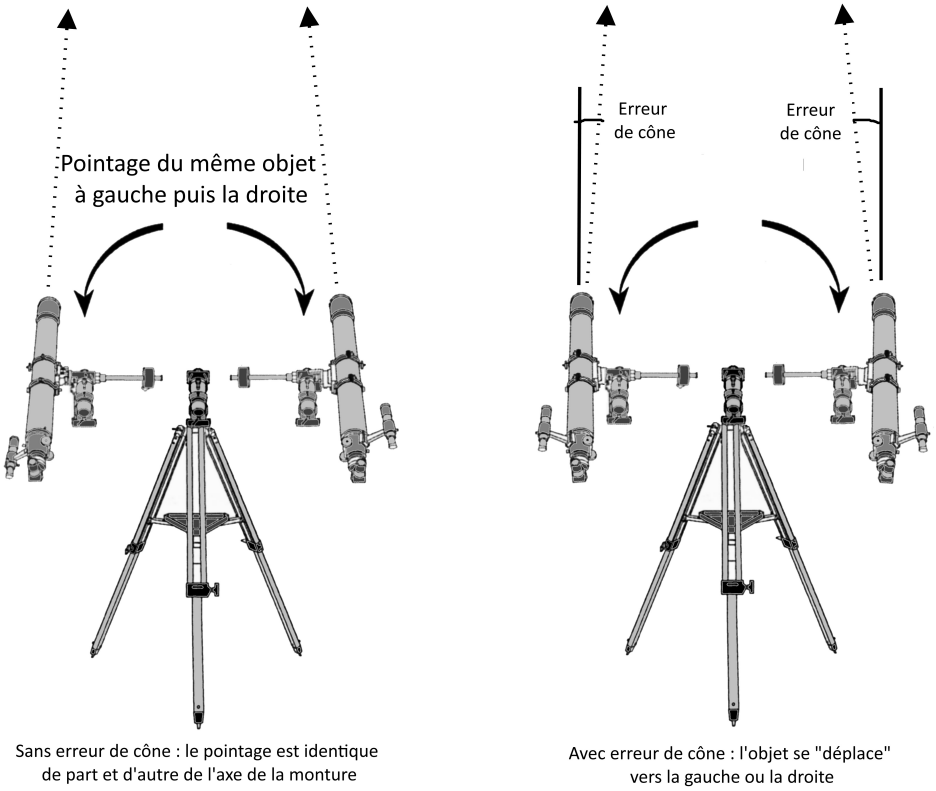
Mise en Station ou "MES" désigne l'opération qui consiste à aligner l'axe AD de la monture équatoriale sur l'étoile Polaire ou plutôt le Nord céleste à proximité. Afin d'aligner la monture sur le pôle céleste, il faut utiliser le viseur polaire optique, prévu à cet effet, ce viseur est réticulé (éventuellement illuminé) et affiche les étoiles visibles dans le champ pour faciliter l'alignement [328]. Un alignement avec une précision de 1° est suffisant pour l'observation visuelle, par contre, ce sera très insuffisant pour une utilisation en imagerie qui demandera une précision de 10 arcmin ou mieux pour 1h de pose. Une erreur d'alignement occasionnera une dérive dans le suivi et une étoile au centre du champ semblera parcourir des ellipses en 24h sidérale, et ce d'amplitude plus important à mesure que sa déclinaison δ augmente (en valeur absolue) [654].

Erreur de cône ou EC désigne le défaut d'alignement de l'instrument solidaire de la monture EQ grâce à sa queue d'aronde par rapport à l'axe mécanique d'ascension droite α = RA (ou AD en français) visant en principe l'axe céleste polaire une

fois la mise en station effectuée. Si une fois la monture alignée sur la Polaire et la déclinaison DEC initiale vaut $\delta = 0°$ on constate à l'oculaire que la Polaire ne passe pas par le centre du champ, alors c'est qu'il y a une erreur d'alignement de l'instrument lui-même qui peut être de type gauche / droite ou et haut / bas. L'erreur de cône induit des erreurs de pointage au Goto mais le suivi n'est pas impacté.

C'est lors d'un retournement au méridien que cette erreur peut se voir facilement.

L'erreur de cône



Credit Pierro Astro

Pour y remédier [51] soit :

- Mettre en pratique la méthode "Pierro Astro"
- Passer par un calibrage de la monture sur des étoiles autour de 20° de la cible (cette solution minimise l'erreur mais en l'a résout pas)
- Mettre de cales sous les anneaux de maintien du tube pour réaligner l'instrument sur l'axe RA
- Régler les vis prévues à cet effet sous la queue d'aronde pour réaligner l'instrument sur l'axe RA

Alignement Polaire ou "Polar Alignment" ou "PA" ou "Mise en station" désigne l'alignement de la monture par rapport à l'étoile Polaire ou plutôt au pôle céleste Nord afin d'assurer un suivi = "Tracking" sidéral optimal. L'alignement se fait à l'aide d'un petit viseur optique ou électronique (capteur photo) placé dans l'axe de la monture équatoriale, ce viseur contient une mire dans laquelle il faut placer l'étoile Polaire afin que la monture soit effectivement alignée sur le pôle céleste Nord (et non la Polaire). Pour ce faire, il faut orienter le trépied et la hauteur de la monture (la latitude du lieu) et viser la Polaire. Dans le cas l'hémisphère Sud il faudra partir de la constellation de la Croix du Sud pour retrouver le pôle céleste Sud. Il est possible d'utiliser une caméra dédiée QHY PoleMaster ou iOptron iPolar pour réaliser l'alignement polaire en contrôlant la

position de la Polaire sur un écran.

Méthodes d'alignements basée sur le calibrage du Goto sur 3 étoiles = "3 stars alignment" avec la raquette :

— Monture Skywatcher : "3 Stars Alignement"
— Montures iOptron : "Polar Iterate Align" ★
— Montures Celestron : "All-Star Polar Alignment" ★

D'autres méthodes :

— La méthode "All Sky Polar Align" de l'Asiair équivalent à la méthode King exploite le plate solving soit par identification automatique d'étoiles sur une photo du ciel (nécessite une camera)
— La méthode PolarFinder Pro Android
— La méthode Polar Clock Android (Free)
— La méthode Polar Scope Align Pro iPhone
— La méthode DARV = Drift Alignment by Robert Vice method [621] (nécessite une camera)
— La méthode Scheiner's drift method [19]
— La méthode Bigourdan
— La méthode King

Pour un usage visuel, l'alignement sur la Polaire peut être approximatif, mais en astrophoto la précision du suivi est primordiale et donc l'alignement sur la Polaire ou plutôt le pôle céleste Nord doit être très précis.

Une fois l'alignement sur la Polaire réalisé, il faut calibrer le Goto pour permettre en plus au logiciel de se repérer dans le ciel = l'alignement sur 3 étoiles = "3 stars alignment" (ou plus)

Dans tous les cas l'alignement sur la Polaire est indispensable pour le suivi même si au final on fait de l'auto-guidage sur une étoile en astrophoto. Certaines montures peuvent exploiter ces alignements supplémentaires afin d'améliorer le suivi.

— Les montures haut de gamme SkyWatcher doté de la fonction PAE = "Pointing Accuracy Enhancement" permettent de repositionner la monture sur l'objet visé et d'enregistrer sa position dans le but d'améliorer le suivi.
— Les montures tel que la 10micron GM1000HPS sont dotées d'encodeurs dit "Absolute Encoders" et peuvent réaliser des corrections périodiques de suivi en exploitant des enregistrements d'alignements sur plusieurs étoiles.

Les montures Altaz n'ont pas besoin d'être alignées sur l'étoile Polaire car elles ne suivent pas le véritable mouvement du ciel, de plus on observe très vite une rotation du champ néfaste pour l'astrophoto mais sans conséquence en visuel.

Alignement Polaire Classique cette méthode permet d'aligner la polaire à l'aide du viseur Polaire et de l'application Polar Scope Align pour savoir où placer l'étoile Polaire dans le cercle du viseur.

Alignement Polaire sommaire si il n'est pas possible de viser la Polaire, car elle peut être cachée par des arbres, un relief, des bâtiments on pourra utiliser cette première méthode d'alignement sommaire, utilisable de jour également :

1. Contrôler l'assiette de la monture avec le niveau à bulle que la monture est bien à plat
2. Se munir d'une boussole indiquant le Nord magnétique
3. Régler la boussole afin de tenir compte de la déclinaison pour indiquer le Nord géographique
4. Orienter la monture (le marquage "N") dans la direction du Nord géographique indiqué par la boussole
5. Orienter l'axe AD à la hauteur du lieu = latitude, ex : 45.5° à l'aide des vis prévues à cet effet

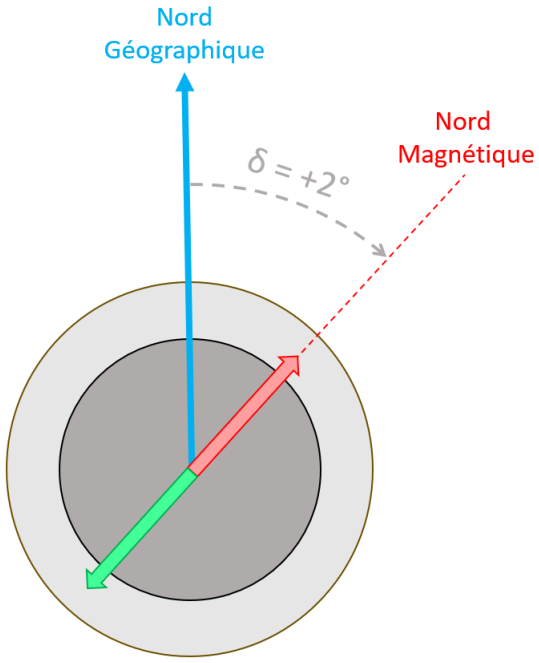
6. Recontrôler la boussole

Note : on pourra remplacer la boussole par une application pour smartphone

— Mobile Déclination - NOAA
— Historical Declination - NOAA
— Polaris Finder - Takahashi
— Polar Clock - Android
— Polar Scope Align - Apple
— PolarAligner Pro - Android

Exemple Lyon : la déclinaison vaut $\delta = +2°$ en 2024

Réglage boussole en 2024



Credit J.G. Gricourt

Alignement Polaire simple Pour réaliser un alignement polaire rapidement on peut demander à la monture de se diriger vers le soleil ou une étoile [167] et corriger l'assiette de la monture ainsi que son orientation :

1. On demande à la monture de se diriger sur une étoile via l'application SynScan
2. Le Goto de la monture dirige le télescope vers un point du ciel à côté de l'étoile
3. Il faut alors recentrer l'étoile en réalisant à la fois :
   — Un réglage de l'assiette de la monture si on suppose que l'altitude = latitude du lieu est déjà correctement réglée
   — Un réglage de l'orientation de la monture vers le Nord céleste
4. A ce stade la monture est correctement mise en station

Alignement Polaire par le logiciel Skywatcher Ici c'est la méthode d'alignement polaire par le logiciel "3 Stars Alignement" de la monture Skywatcher

1. On commence par réaliser l'étalonnage du Goto sur 3 étoiles = procédure "3 Stars Alignement"
2. On vérifie l'erreur de mise en station détectée par la monture (Mel, Mez, Tilt), si celle ci n'est pas satisfaisante et en principe non car on n'a pas aligné la monture sur la Polaire au préalable alors on passe à l'étape suivante
3. On lance la procédure de mise en station = alignement polaire logicielle
4. Le Goto de la monture se dirige vers une des étoiles sélectionnées pour l'alignement initial et on constate que celle ci n'est plus au centre
5. Il faut alors la recentrer en réalisant à la fois un réglage sur la monture elle même :
   — Réglage de l'altitude = latitude du lieu
   — Réglage de l'azimut = direction du pole Nord céleste
6. A ce stade la monture est normalement correctement mise en station

Note : il est possible qu'il faille réitérer l'opération afin de diminuer l'erreur de mise en station.

Suivi désigne l'opération qui consiste à suivre le mouvement de rotation du ciel afin de conserver l'objet visé dans le champ de vision de l'instrument. Le suivi sur l'axe AD seul peut suffire en visuel alors que le suivi double axe AD et DEC nécessitant 2 moteurs est surtout utile en photo pour faire du guidage.

Le suivi peut être réalisé manuellement comme sur les Dobsons ou bien automatiquement avec :

— Une monture EQ motorisée
— Une monture azimutale
— Une table équatoriale
— Un kit de motorisation azimutale de type StellarCAT

Les montures azimutales ont l'inconvénient d'introduire de la rotation de champ donc ne permettant pas l'astrophoto longue pose. Seule la monture EQ permet un suivi pour l'astrophoto longue pose de qualité sans aucune rotation de champ.

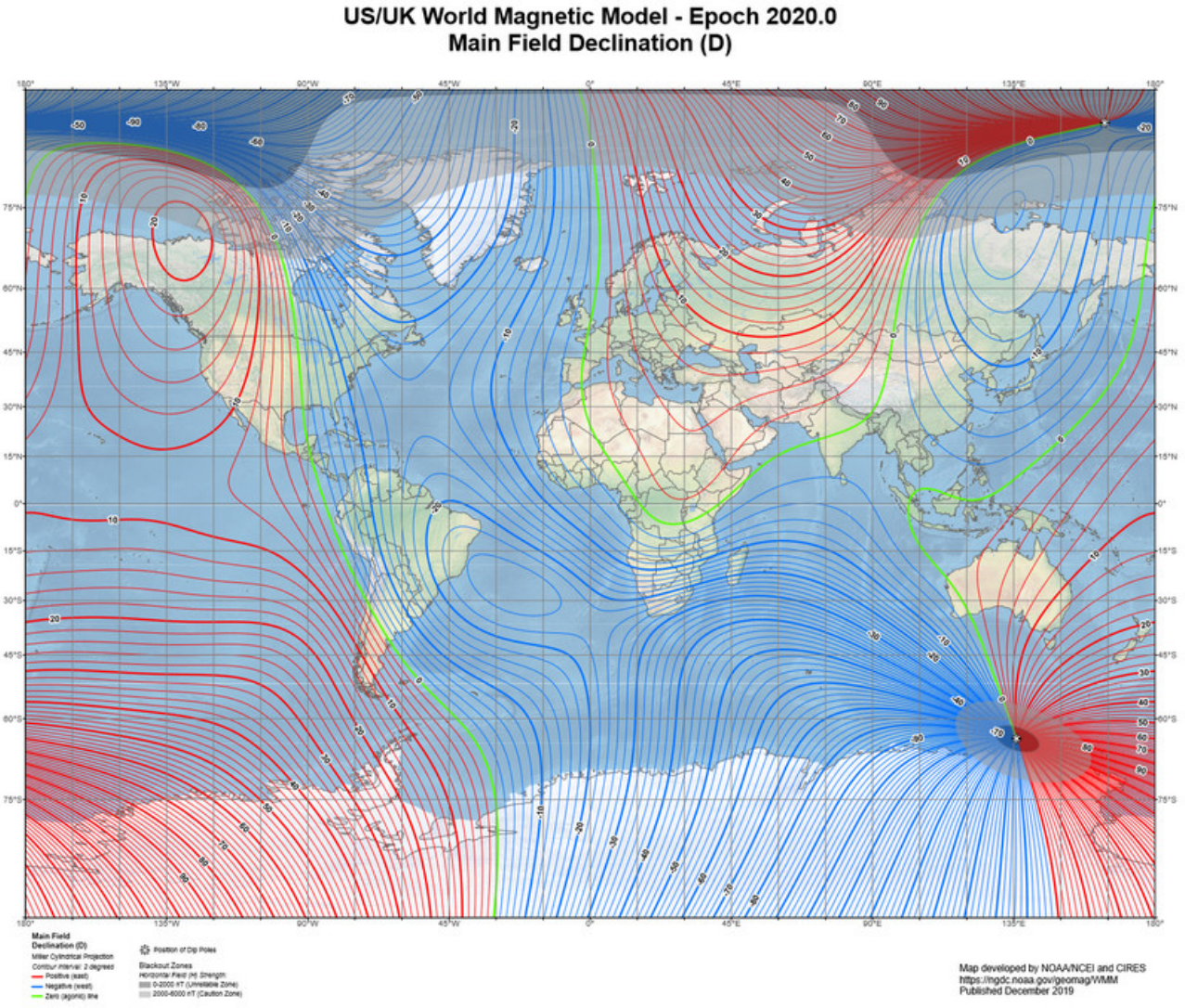
Le suivi des montures EQ peut être amélioré par :

— Le remplacement des engrenages par des courroies pour le couplage à la VSF
— L'auto-guidage via une lunette guide ou un diviseur optique
— L'ajout d'un TDM pour faire baisser l'erreur périodique
— L'utilisation d'encodeurs absolus

Le pôle Nord magnétique désigne l'endroit au niveau des pôles terrestre où les lignes de champs magnétiques de la Terre ressort à la verticale. Ce point au niveau des pôles Nord et Sud change continuellement d'emplacement. La boussole contrairement à une idée reçue n'indique pas ce pôle de convergence magnétique car celle ci s'orientent selon les lignes de champs or celles ci ne sont pas orientées aussi régulièrement que les lignes des méridiens ce qui conduit à des écarts très importants entre la direction indiquée par la boussole et la pôle Nord mangétique selon le lieu.

L'écart entre le Nord magnétique indiqué par la boussole et le pôle Nord géographique est donné par la déclinaison.

Ces écarts peut être faibles de 0 à 1° en France ou en Espagne et à plus de 20° en Alaska ou dans le NordEst du Brésil.



Credit : NOAA

Une application officielle du NOAA permet de connaitre sa déclinaison lorsque le site est ouvert depuis un smartphone : Mobile Declination

Autoguidage désigne une méthode permettant d'améliorer considérablement le suivi des montures. Elle consiste à verrouiller la monture sur une étoile prise pour cible à l'aide d'une petite lunette guide doté d'un imageur accompagnant l'instrument principal sur la monture. Lorsque l'étoile cible dérive en dehors du centre du champ alors le contrôleur de la monture via un logiciel sur PC ou une box Asiair va envoyer un signal de correction en RA ou/et DEC afin de recentrer l'étoile guide dans le champ. Historiquement c'est le port ST4 [286] (système SBIG) de la monture qui permet d'envoyer les signaux de correction à la monture mais il est possible d'utiliser aussi le mode ASCOM via un port série ou un port USB et l'utilisation d'un logiciel adapté. La version la plus moderne de l'autoguidage est le "Pulse Guiding" inventé par Roland Christen [638] et envoyant des signaux correctifs plus nombreux mais imprimant des mouvements plus petits pendant le rythme de croisière afin de ne pas perturber le suivi lors de prises de vues astrophoto. Des logiciels supportant le "Pulse Guiding" via ASCOM : PhD Guding, MaxIm DL, Asiair. La correction "Pulse Guiding" peut aussi travailler de concert avec la correction systématique PEC propre à la monture [286].

Roland Christen à dit : *Long exposure was thought to be more accurate because you are averaging the seeing noise and thus acting only on the actual tracking error. That works in some cases, but today we like to take lots of shorter exposures, dither them so that we can stack and cancel background noise. The problem is that dithering requires several exposures to*

bring the star back to the center. If your exposure is long, it may take a long time if your guide exposure is on the order of 5 to 10 seconds. It would be interesting if the guide software could increase the exposure rate to once a second until the star reaches the center and then automatically slow down to a longer guide exposure. This could also be incorporated during guiding, if the star exceeds the Min Move setting bring it back quickly with a series of short exposures until the star is back to center, then resume the longer exposure series. [672]

L'autoguidage permet de corriger en temps réel les erreurs de suivis dûs à :

- Le backlash (retard aux mouvements) introduit par la mécanique de la monture (roues dentées mal usinées ou usées)
- Un mise en station = alignement sur le pôle céleste (la Polaire par approximation) pas suffisamment précise
- L'erreur de cône soit l'erreur alignement de l'instrument fixé sur la monture
- L'agitation de la turbulence

Retournement au méridien ou "Meridian Flip" désigne une opération manuelle à effectuer sur les télescopes ou lunettes montés sur une monture EQ. La monture EQ permet de suivre un objet visé dans le ciel par une simple rotation autour de l'axe polaire. Cependant, il arrive un moment où l'objet passant au méridien local, que les contrepoids deviennent plus hauts que l'instrument lui-même, ce dernier se dirige alors dangereusement au plus près du trépied. Les montures anticipent cette situation et le mouvement fini en butée et ne peut plus continuer. Aussi, plus l'objet est haut dans le ciel, plus le risque que l'instrument tape dans un pied du trépied est grand. Pour éviter ces désagréments, il faut retourner les axes de la monture afin de repositionner l'instrument de l'autre côté et il se retrouve alors dans une position plus sûre.

Voir le principe du retournement au méridien Ludo.

Après le retournement, il faudra :

- En visuel il faut retourner le renvoi coudé à 180° pour à nouveau observer
- En imagerie il faut retourner la caméra à 180° afin de retrouver le même champ

Il existe cependant des montures exotiques qui permettent de s'affranchir du retournement au méridien :

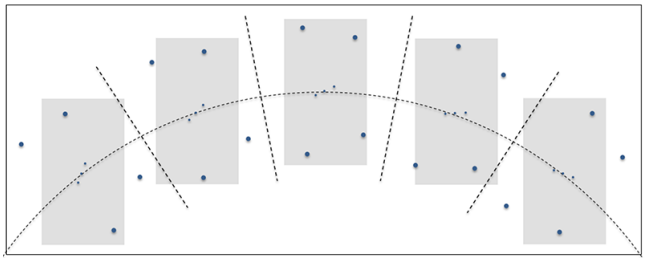
- La monture à fourche de type LX200 sur wedge
- La monture Planewave L-350 wedge
- La monture Avalon M-Zero

Note : aussi, ces montures ne nécessitent pas de contrepoids, mais présentent de la rotation de champ.

Split-Ring ou "Monture Equatoriale en Fer à Cheval " désigne un type de monture en berceau utilisant de larges anneaux directement alignés sur les grands cercles AD et DEC. Le principal inconvénient de cette monture est qu'elle est naturellement déséquilibrée et surtout plus encombrante qu'une monture allemande.

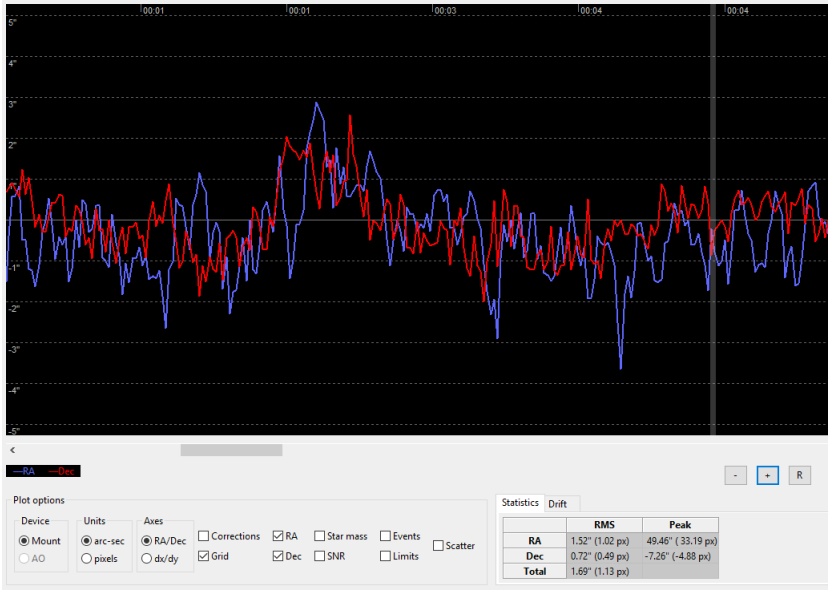
Dérotateurs de champs désigne un dispositif mécanique qui permet de suivre la rotation du champ observée lors de suivi sur les montures de type azimutale. Le dérotateur va compenser la rotation de champ en faisant tourner l'imageur sur son axe. Avec un dérotateur l'imagerie longue pose devient possible, car le suivi est alors parfait comme sur une monture de type équatoriale. Attention, la vitesse angulaire du dérotateur dépend de l'altitude et de l'azimut du centre du champ visé, celle-ci doit doc être adaptée selon l'endroit du ciel visé. En imagerie planétaire, il est aussi possible de prendre en compte la rotation de champ via un logiciel comme WinJupos qui réalise l'opération de dérotation par traitement des images brutes directement.

Rotation du champ désigne le phénomène perceptible en imagerie avec suivi sur monture AltAz où les étoiles semblent décrire des cercles sur la photo. Lors du suivi azimutal entre 2 instants, l'ensemble des étoiles du champ auront opéré un mouvement de rotation circulaire autour du point de visée au centre du champ. Ce phénomène est presque similaire au défaut de suivi d'une monture équatoriale dont la mise en station (alignement du Pôle N géographique) est approximative. Toutefois, les étoiles ne décrivent pas des cercles complets et la vitesse de rotation est maximal à l'approche du méridien local. De même que la vitesse de rotation est maximale à l'équateur (Lat = 0°). Le calcul de la vitesse de rotation horaire du champ (°/h) : $w_{\text{champ}} = w_{\text{terre}} \cos Lat \cos Az / \cos Alt$ où w_{terre} = vitesse de rotation angulaire horaire de la Terre = 15.041°/h, Lat = latitude du lieu, Az = azimut du centre du champ, Alt = altitude du centre du champ visé [439, 651, 457].



Credit Field Rotation and Alt-Azimuth Mounted Telescopes

Erreur périodique ou "PE" désigne l'erreur de suivi mesurée en ascension droite d'une monture EQ motorisée, le plus souvent utilisée pour faire de la photo longue pose. L'erreur mesure l'écart dans le temps par rapport à la position visée sur le ciel. On distingue la PE en ascension droite RA et la PE en déclinaison DEC. Attention cette mesure donnée par le logiciel de pilotage de la monture est exprimée en moyenne RMS = σ = écart type statistique.



Credit morbli - Webastro

Cause de PE du à la monture :

— La dérive de la VSF / "Worm" de la monture impactant la vitesse de rotation en RA (un retard ou avance)
— Le "Backlash" en DEC impactant la position en DEC (des sauts)

De manière générale l'état mécanique de la monture influe sur la PA : graissage des roulements, pression insuffisante entre la vis sans fin et la roue dentée, usure des roues dentées.

Autres sources d'erreur du suivi :

1. Erreur d'alignement de la Polaire
2. Flexions du tube selon son orientation dans l'espace
3. Alimentation du moteur électrique instable
4. Réfraction atmosphérique lorsque le champ photographié est bas sur l'horizon (les étoiles apparaissent plus hautes qu'elles ne le sont en réalité)
5. Composante lente de la turbulence atmosphérique qui peut varier pendant le temps de prise de la photo et donc déplacer légèrement les étoiles du champ [676].

Les causes mécaniques de PE sont le fait des montures utilisant des engrenages ou des courroies d'entrainement pour assurer le suivi sidéral. Un couplage VSF / courroies permet de réduire le blacklash inhérent au couplage classique VSF / engrenage, il réduit les harmoniques de fréquences élevées, mais ne réduit pas fondamentalement la PE. Les moteurs de type "Harmonic Drive" éliminent complètement le "Backlash" mais la PE reste élevée (20 arcmin) mais d'évolution lente.

Idéalement, l'erreur périodique doit être inférieure à la turbulence atmosphérique (et instrumentale) afin d'exploiter au maximum les conditions de prise de vue. Si l'erreur périodique est de grande amplitude (plus de 10 arcmin) on peut réaliser le suivi avec un système d'autoguidage ciblant une étoile guide et alors l'erreur de suivi peut descendre en dessous de 2 arcmin donc une valeur bien meilleure que pour les meilleures montures utilisées sans autoguidage.

Pour contrer cette erreur et rendre la PE plus lisse, certaines montures permettent de réaliser un apprentissage de cette erreur afin de mieux la corriger lors des sessions astrophoto suivante. Le firmware de la monture réalise cet apprentissage pendant une session d'auto-guidage en enregistrant la liste des corrections périodiques nécessaires durant 1 cycle de roue dentée (8 min). Le "PEC" ou "Periodic Error Correction" servira de base pour apporter les corrections en RA et DEC via les moteurs et améliorera le suivit global de la monture (avec ou sans autoguidage) [471]. En RA la correction consiste à changer légèrement la vitesse du moteur RA et en DEC la correction consiste à réaliser une correction ponctuelle pour recentrer l'objet sur le cercle de rotation en RA. Il est possible d'activer la correction automatique PEC avec l'auto-guidage pour un meilleur suivit.

Il existe des montures dotées d'encodeurs dit "Absolute Encoders" sur les axes RA et DEC directement qui sont capables de savoir à tout moment où est la direction pointée dans le ciel même lorsque l'alimentation est perdue. Des exemples de montures de ce type : iOptron en version "EC", 10micron GM1000HPS, Astrophysics 1100GTO-AE, Paramount ME II. Ces encodeurs sont en général très précis et permettent les corrections nécessaires en temps réel donc en boucle fermée "Real Time PEC" de la position dans le ciel, et cela, sans apprentissage préalable comme sur la PEC classique. Les montures dotées de ces encodeurs sont capables de retrouver rapidement la direction du ciel pointée même si l'on bouge les axes de la monture (vent ou intentionnel).

Corrections prises en charge par les "Absolute Encoders" [122] :

— Correction de l'erreur de suivi (dérive) en RA et DEC dû à la VSF grâce à l'encodeur en RA qui est calé sur la vitesse de rotation sidérale
— Correction de l'erreur de backlash en DEC lorsqu'on utilise l'auto-guidage grâce aux encodeurs en RA et DEC

En RA, l'encodeur permet d'annuler l'erreur dû à la vis sans fin "Worm". Ces encodeurs ne sont pas couplés mécaniquement avec les axes, mais avec un coupleur optique [32]. La qualité de la correction ne dépend pas de la précision de l'alignement polaire.

Le TDM ou "Telescope Drive Master" est un dispositif qui permet de suivre les variations de vitesse de l'axe RA avec une

précision de 0.125 arcmin. Le TDM peut équiper des montures classiques afin de réduire l'erreur périodique de 10 arcmin en moyenne. La qualité de la correction dépend aussi de la précision de l'alignement polaire.

Suivi de King désigne une méthode permettant de compenser au mieux l'effet de la diffraction atmosphérique lors d'un suivi équatorial. La réfraction déplace visuellement tous les objets pointés sur le ciel, et ce, d'autant que ces objets se rapprochent de l'horizon. Donc pour corriger cela, il faut faire varier la vitesse d'entraînement du moteur de suivi horaire, vitesse obtenue grâce aux équations analytiques de King. Enfin historiquement, avant les ordinateurs, King avait donné une méthode empirique pour corriger l'alignement polaire de la monture en analysant les traces laissée par les étoiles = "Star Trails" sur une photo, cela permettait de rapprocher le pôle réfracté du vrai pôle céleste [89]. De manière similaire, Bigourdan avait donné aussi sa méthode pour corriger manuellement des dérives d'alignement [52].

Piggyback désigne la technique en astrophoto qui consiste à utiliser la monture pour y installer un APN afin de profiter du suivi de la monture pour faire de l'astrophoto longue pose.

Autoguidage ou "Autoguiding Software" désigne en imagerie la solution logicielle qui consiste à corriger le suivi de la monture équatoriale en visant une étoile guide à l'aide d'une lunette guide ou un v = diviseur optique ou OAG = "Off Axis Guider". L'autoguiding est en général assuré par un logiciel sur PC tel que "PHD Guiding" (Pulse Signal de guidage). Le principe de l'auto-guidage est d'analyser le déplacement d'une étoile guide afin d'asservir les mouvements RA et DEC de la monture équatoriale. Cette méthode permet de s'affranchir de nombreuses erreurs liées au suivi des astres photographiés et permet de plus longues poses dans le but d'acquérir plus de signal versus du bruit :

On peut faire des corrections automatique de trajectoire avec :

- Une lunette de guidage "Guiding Scope" couplé au logiciel d'autoguidage charger des commandes de correction RA et DEC (pulse), sa focale Fl doit respecter : $F_l = F/3$ où F la focale de l'instrument principal [756]
- Un diviseur optique ou "DO" (un prisme de champ) pour faire de l'autoguidage hors axe et fonctionne sur le même principe que la lunette de guidage
- Le logiciel de correction PEC (en RA) de la monture qui d'après un modèle de l'erreur périodique enregistré dans la monture qui corrige la vitesse en RA pour rattraper la vitesse de rotation sidérale.

L'auto-guidage au DO est en général plus précis qu'à la lunette guide, car dans ce dernier cas l'ensemble lunette guide / télescope n'est pas toujours parfaitement rigide quel que soit l'orientation du télescope.

Le modèle de PE peut aussi être enregistrée pendant une session d'autoguidage en analysant la correction en fonction de la position de la roue dentée "Worm Gear" couplée à la vis sans fin "Worm" et de reproduire ce schéma de correction lors d'une session sans l'autoguidage.

7.3 Les Accessoires

Queue d'Aronde Mâle ou "Dovtail" ou "Dovtail Bar" désigne la pièce mâle qui permet de fixer l'instrument sur sa monture (équatoriale). La queue d'aronde est fixée sur les colliers du tube du télescope et s'emboîte dans la platine femelle de la monture équatoriale.

Trépied désigne le support de la monture garantissant sa stabilité. Le trépied doit être dimensionné selon la charge qu'il doit supporter. On mesure les performances du trépied par le "Dampening Time" ou "Settle Time" le temps nécessaire pour que l'image produite par l'instrument se stabilise après un choc sur le trépied. On considère une tolérance en visuel où 1 à 2 sec de temps de stabilisation est acceptable.

On peut améliorer la stabilité de la monture par divers moyens :

— Baisser la hauteur du trépied
— Ajouter des PAD antivibration (VSP = Vibration Suppression Pad)
— Écarter les pieds du trépied
— Utiliser un trépied en bois plutôt qu'un trépied en métal
— Ne pas utiliser de colonne (Pillar) ou de réhausseur
— Rajouter un triangle reliant les 3 pieds

Queue d'Aronde Femelle ou "Platine" ou "Platine Queue d'Arronde" ou "Dovtail Mounting Plate" ou "Clamp" ou "Dovtail Shoe" ou "Saddle" désigne la pièce femelle qui permet de fixer le tube du télescope sur sa monture (équatoriale). La queue d'aronde femelle est fixée sur la monture et permet d'emboîter la queue d'aronde mâle de l'instrument.

Raquette désigne la commande d'une monture permettant de sélectionner les objets visés.

Module Wifi désigne un boitier Wifi à brancher sur la prise AUX de la monture équatoriale Goto afin de piloter celle-ci à distance via un PC ou une tablette. On trouve les modèles Celestron SkyPortal WiFi, Skywatcher SynScan Wi-Fi et Skysafari SkyFi 3.

Chapitre 8

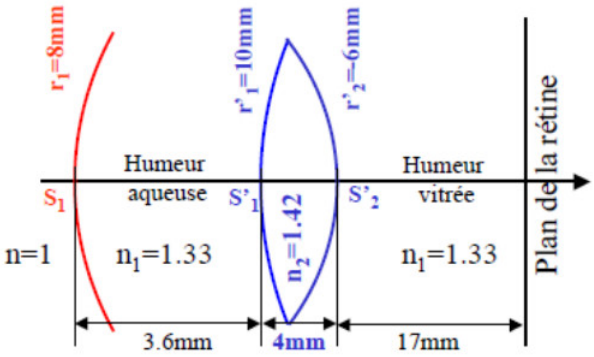
La Physiologie

8.1 Les Généralités

L'Oeil représente le dernier maillon de la chaîne optique de l'observation visuelle. Le rôle de la vision est de former une image réelle sur la rétine à partir d'une image virtuelle fournie par l'instrument.

Du point de vue de l'optique géométrique, l'oeil est constitué de 3 surfaces de différentes dioptres :

1. Une surface fine la cornée séparant l'air (n=1) et l'humeur aqueuse (n=1.33)
2. Une surface le cristallin séparant l'humeur aqueuse (n=1.33) et le contenu du cristallin (n=1.42)
3. Une surface le cristallin séparant leccontenu du cristallin (n=1.42) et l'humeur vitrée (n=1.33)



Credit : Dr. Gatinel

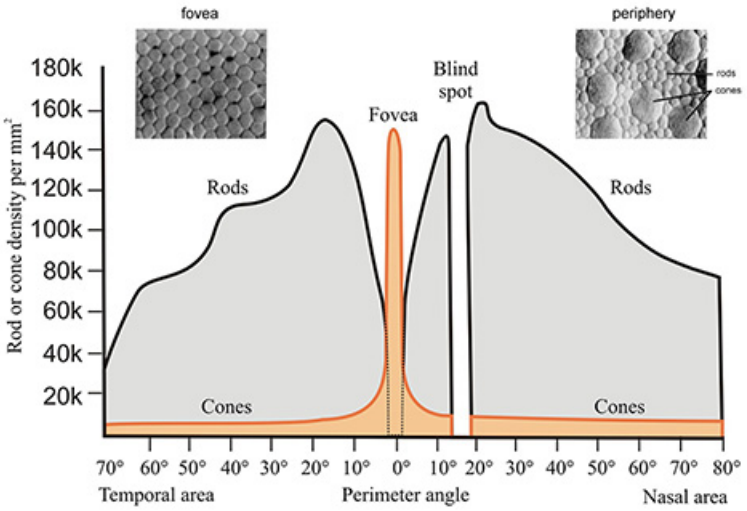
L'oeil a une focale de 22 mm en moyenne [625].

La pupille de sortie maximum théorique est de 7 mm ce qui donne un rapport F/D = 2.4 mais à une ouverture 7 mm l'oeil produit une image mal définie il faut descendre en dessous de 1 mm (voir conditions d'Arnulf) en vision monoculaire [589, 576] pour obtenir une résolution correspondant à un Strehl de 0.80 = "Diffraction Limited" [422]. Statistiquement la pupille de sortir max de l'oeil est très variable mais globalement diminue avec l'age [382].

L'amplitude d'accommodation se calcul en dioptrie et dépend de la distance Δ du "Punctum Remotum" c-a-d de la vision net de loin et de la distance δ du "Punctum Proximum" c-a-d de la vision net de près : $A = \frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}$. Pour un enfant A = 14

dioptries et pour une personne très âgée A = 1 dioptries [1].

Nos yeux sont biologiquement conçus pour voir de la lumière indirecte, donc de la lumière réfléchie du soleil par des objets alors que l'observation astronomique repose essentiellement sur la vision nocturne. Sauf pour l'observation lunaire ou solaire avec filtre (ND5 minimum !) où c'est la vision diurne qui rentre en jeu en raison de l'éclat important de ces objets observés comme pour la lumière ambiante de jour. La vision de nuit est fondamentalement différente de celle de jour et n'implique pas les mêmes zones de la rétine. Les bâtonnets sont responsables de la vision de nocturne et représentent 95% des cellules photosensibles. Les cônes sont responsables de la vision diurne, des couleurs et de la résolution, ils représentent 5% des cellules photosensibles. Les bâtonnets couvrent toute la surface de la rétine alors que les cônes sont concentrés autour de la macula (centre optique de l'oeil) sur 18° de champ.



Credit : Eye to Eye Cameras and Vision

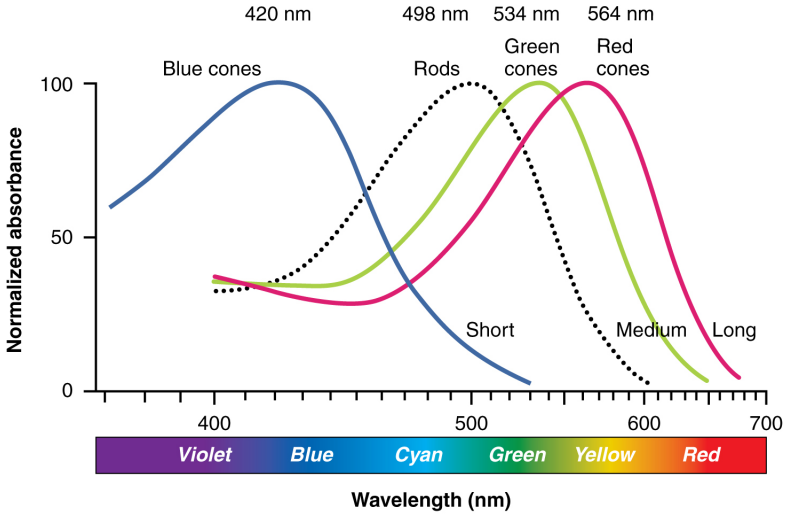
La répartition des cellules réceptrices :

- 1 cône bleu (cônes S)
- 5 cônes vert (cône M)
- 10 cônes rouge (cône L)
- Les bâtonnets (sensibles au cyan)

La résolution des cônes est 5 fois meilleure que celle des bâtonnets mais ces derniers sont sensibles sur toute la bande spectrale contrairement aux cônes qui sont spécialisés.

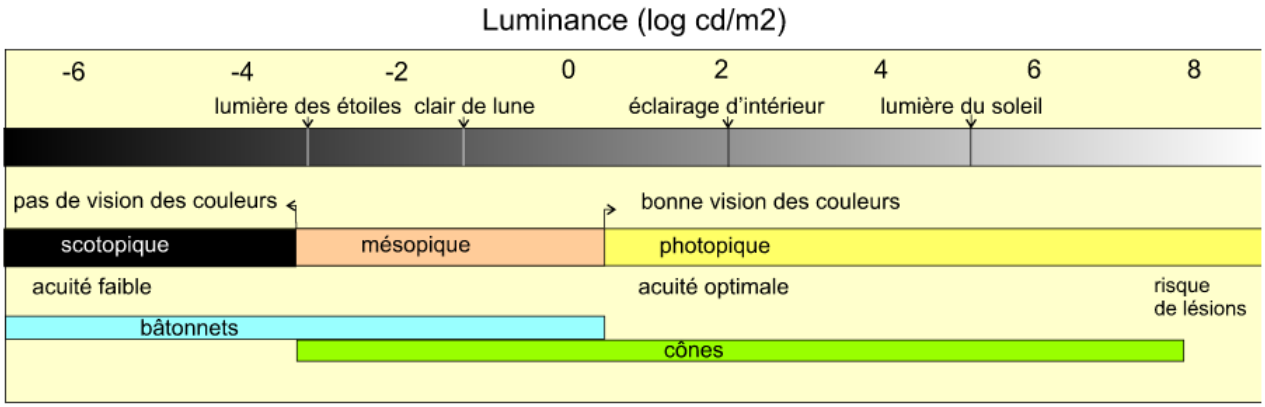
1. Pr Gatinel

Sensibilité des cônes et des bâtonnets



Il existe 3 types de visions :

— La vision photopique ou diurne où ce sont les cônes qui entre action en complément des bâtonnets
— La vision mésopique ou crépusculaire où ce sont surtout les bâtonnets qui entrent action en complément des cônes.
— La vision scotopique ou nocturne où ce sont uniquement les bâtonnets qui entrent action



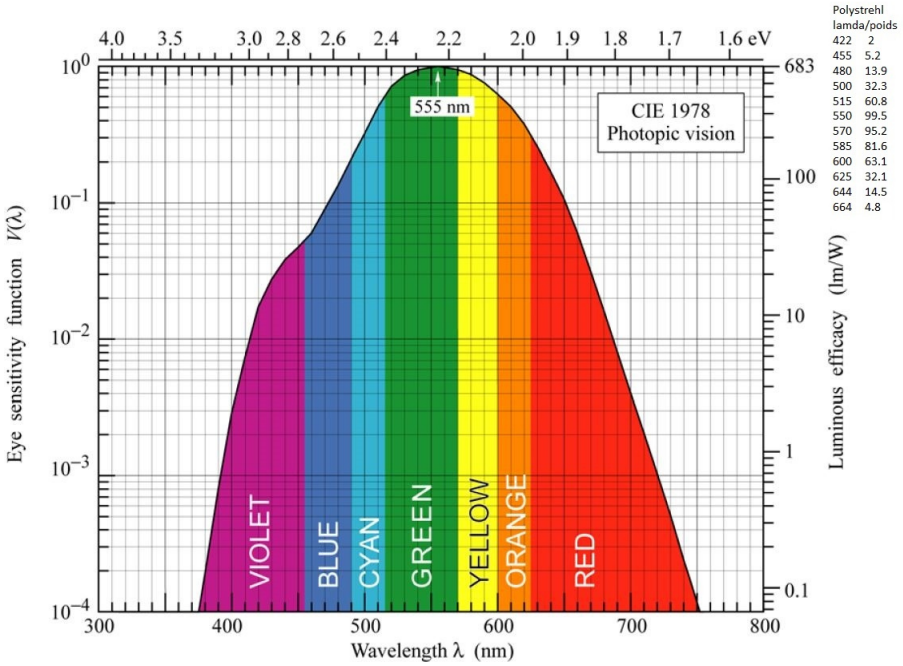
Credit : Wikimedia

Luminance d'activation des 3 types de visions [326] :

— Vision photopique : L > 3 cd/m^2
— Vision mésopique : 0.03 cd/m^2 $<$ L < 3 cd/m^2
— Vision scotopique : L < 0.03 cd/m^2

Le jour (vision photopique) le pic de sensibilité se situe à 555nm.

Sensibilité de l'oeil



Credit : E. Fred Schubert - Rensselaer Polytechnic Institute

Les cônes sont reliés à 1 neurone à la fois alors que plusieurs bâtonnets sont reliés à 1 neurone [259] ce qui explique qu'en vision nocturne la sensibilité des yeux est accrue, mais au détriment de la résolution.

Ce qui compte, c'est :

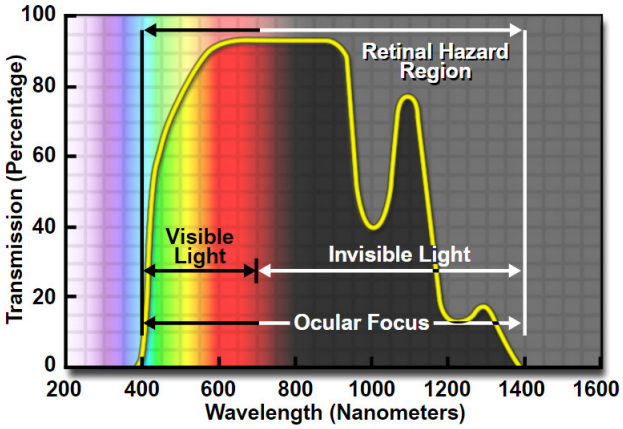
— L'intensité lumineuse perçue
— La dimension de l'objet

Ainsi plus les objets sont gros ou / et lumineux plus la vision se rapproche de la vision photonique où la détectivité sera alors maximale. Par conséquent seuls les instruments de grand diamètre permettrons à l'oeil de mieux fonctionner. On verra mieux une étoile dans un instrument de grand diamètre à pupille de sortie égale et on verra mieux une nébuleuse dans un instrument permettant de plus grossir à diamètre égal quitte à rendre la luminosité de la nébuleuse plus faible !

La résolution passe de 1 ou 3 arcmin en vision mésopique à 6 arcmin en vision scotopique ce qui a pour conséquence d'augmenter le grossissement résolvant de l'instrument de $D/2$ jusqu'à $2.5 \times D$. Selon Roger N. Clark l'oeil humain serait équivalent à un capteur de 576 Mpixels [625]. C'est sous un angle de vision de 40° à 60° que l'oeil perçoit le plus de résolution et sera donc le plus confortable [88] ce qui sera équivalent à un objectif photo Full Frame (22 mm de diagonale) de focale : $F = \frac{22}{\tan 30} = 38mm$ ou $F = \frac{22}{\tan 20} = 60mm$.

Un test très parlant montrant la capacité de nos yeux à distinguer des variations de couleur très ténue comme on peut le voir à la surface des disques planétaire comme sur Saturne et Jupiter : Le défi de la couleur X-Rite et le test Hue.

En astronomie solaire, il est indispensable de protéger les filtres, mais aussi les yeux de l'intensité des IR pour éviter les brûlures irréversibles.



Credit : Microscopy U - Laser Safety

La cornée constitue la lentille frontale de l'oeil, celle ci fonctionne de manière optimale = meilleure acuité visuelle entre 2 et 4 mm de pupille donc avec un oculaire produisant cette pupille de sortie [226]. Lorsqu'un oeil souffre d'un peu d'astigmatisme l'oeil fonctionnera mieux avec une pupille de sortie plus petites puisque une surface plus réduite de la cornée sera utilisée pour la formation de l'image sur la rétine.

Effet de la pupille de sortie sur la capacité de résolution de l'oeil

Pupille	Forme Airy	Taille Airy formée par l'oeil	MTF Low constrast	MTF high constrast	Etoiles au Telescope
2 mm	👍	↘	👍	👎	👎
4 mm	👎	↗	👎	👍	👍

Cause de la dégradation de résolution :

- Lorsque l'iris s'ouvre à 4 mm et plus l'effet de l'astigmatisme devient prépondérant [143]
- Lorsque l'iris se ferme en dessous de 2 mm, l'effet de la diffraction de la lumière devient prépondérant
- Lorsque la pupille est petite, cela signifie que le grossissement résultat est élevé, donc le seeing affecte plus les étoiles et finalement la résolution des images baisse

Selon les expériences, pour distinguer les étoiles les plus faible à la limite de visibilité ou voir les plus fins détails planétaire on recommandera une pupille de sortie inférieur à 1 mm [226] et en général plus le diamètre de l'instrument est petit plus la pupille de sortie dans ce cas pourra être plus petite [227] car l'instrument de petit diamètre produisant des figures de Airy plus grosses sera moins affecté par la turbulence.

L'observation solaire en lumière blanche derrière un filtre à l'avant de l'instrument ou de type prisme de Herschel requiert certaines précautions, notamment la transmission lumineuse ne doit pas excéder 0.001% [461].

Les limites permises selon les ophtalmologues [461, 608, 607] :

- $T < 0.003\%$ = ND4.5 de lumière visible dans la plage [380, 780 nm]
- $T < 0.5\%$ = ND2.3 de lumière IR la plage [780, 1400 nm]

L'oeil et en particulier la rétine peut être dégradée par certaines longueurs d'onde particulièrement les UV jusqu'à 400 nm. Les UV sont 20% fois plus intense en montagne qu'au niveau de la mer. Les lunettes de soleil doivent bloquer les UV afin de protéger correctement les yeux.

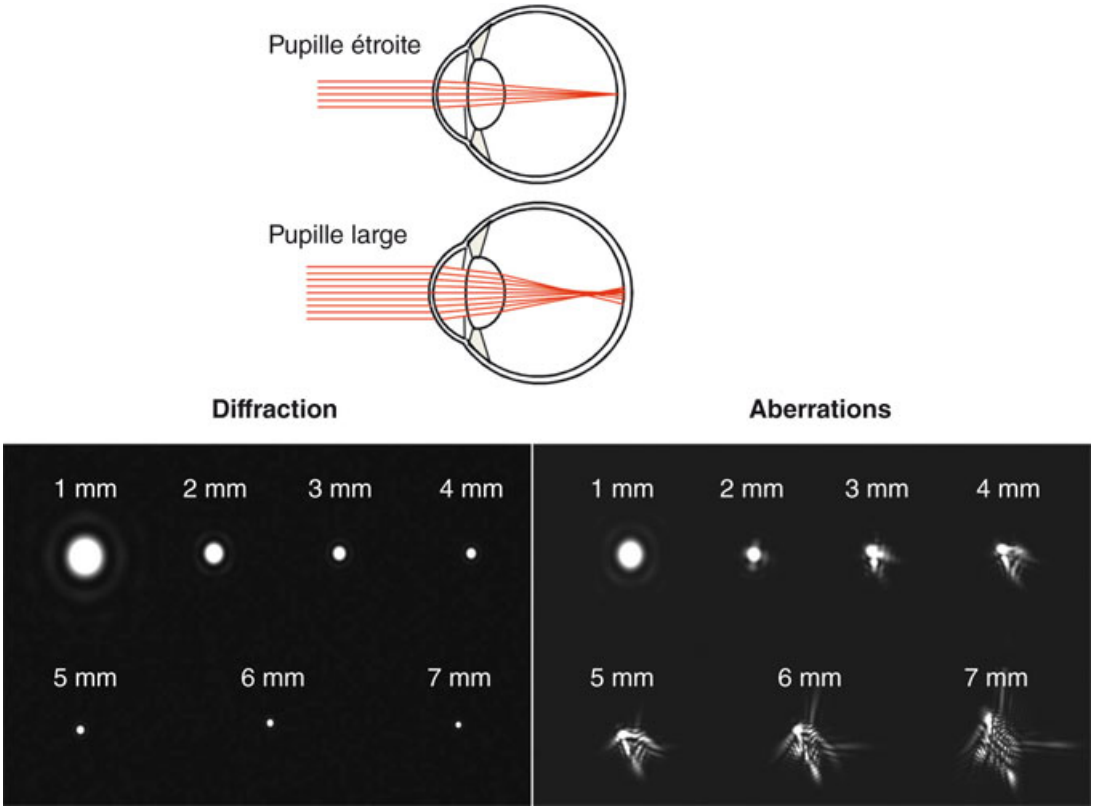
Transmission des UV / IR à l'oeil au niveau de la mer

Onde	Plage	Ozone	Cornée	Cristallin
UV-C	100 - 280 nm	0%	0%	0%
UV-B	280 - 315 nm	10%	0%	0%
UV-A	315 - 400 nm	100%	partial	100%
IR-A	780 - 1400 nm	100%	100%	100%
IR-B	1400 - 3000 nm	100%	100%	0%
IR-C	3000 - 10^6 nm	100%	0%	0%

Note : en rouge, les rayonnements immédiatement dangereux pour l'oeil.

Pupille de l'oeil désigne l'ouverture par où rentre la lumière dans l'oeil humain. Le diamètre maximal de la pupille d'un homme jeune atteint 7 mm puis va en décroissant avec l'âge pour arriver à 4 ou 5 mm vers 60 ans. La pupille de l'oeil va se dilater ou se contracter en fonction de la luminosité entrante, c'est-à-dire de la pupille de sortie de l'instrument. L'oeil est dit "Diffraction Limited" lorsque les aberrations ne jouent plus aucun rôle, ce qui correspond à une pupille inférieure à 2 mm environ de jour et de 2.5 mm en vision nocturne [198]. Cela suppose que le pinceau lumineux sortant de l'oculaire frappe la pupille de l'oeil exactement au centre, autrement la résolution s'effondre (Campbell Effect) car la rétine perd de son pouvoir de sa résolution en périphérie. Par ailleurs, les conditions d'Arnulf [589, 576] indiquent la pupille de sortie d'un instrument qui permettra de voir en conditions diurnes avec une résolution optimale notamment pour l'observation planétaire, serait comprise entre 0.5 et 0.7 mm.

Diffraction et aberrations



Credit : M. Assouline

La série d'images du point image montre que lorsque la pupille de l'oeil est fermée, c'est la diffraction qui domine (la PSF

augmente et la résolution diminue), lorsque la pupille de l'oeil est ouverte ce sont les aberrations (astigmatisme) du cristallin qui dominent.

Si la pupille de l'oeil est trop grande :

1. Le ciel sera d'apparence laiteuse en raison de la pollution lumineuse même légère. Ainsi, pour mieux voir les étoiles, il faut noircir le ciel en diminuant la pupille de sortie de l'instrument à 5 mm ou moins.
2. Le cristallin de l'oeil sera éclairée sur une plus grande surface, mettant en évidence les défauts de courbure du cristallin (l'astigmatisme) de l'oeil occasionnant une perte de résolution en planétaire ou des flares autour des étoiles lumineuses.

Si la pupille de l'oeil est trop petite et / ou que le faisceau est trop fin (Ps de l'intrument trop petite) :

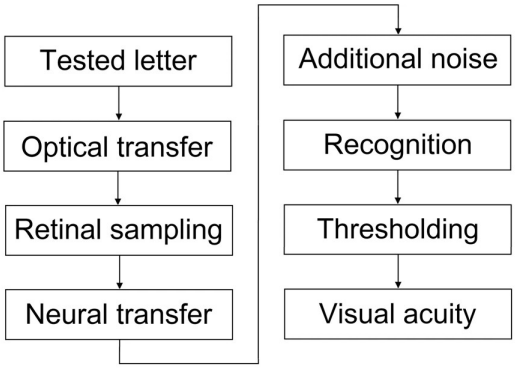
1. Les cônes du fond de l'oeil responsable de la perception de la couleur, de la résolution et des contrastes ne sont pas activés en raison de la luminosité trop faible.
2. Les corps flottants de l'humeur de l'oeil pourraient couper le faisceau lumineux trop fin, ce qui se manifesterait par le phénomène d'ombres volantes, ou pourraient obstruer ou diffracter la lumière par leur passage.
3. Lorsque l'ouverture est trop petite, la lumière va naturellement se diffracter et donc dégrader la résolution des images.

Note : une ouverture de 1 mm donnera une résolution max de 2 arcmin.

La partie optique de l'oeil n'est pas la seule partie à influer sur l'image perçue et la résolution (OTF = Optical Transfert Function), il faut aussi prendre en compte les type de récepteurs de la rétine sollicités (cône, bâtonnets), la fonction de transfert du réseau de neurone (NTF = Neural Transfert Function), les fonctions du cerveau à l'oeuvre dans la vision.

En tenant compte de la NTF Campbell & Green (1965) ont montré que la résolution était optimale pour une pupille entre 2 et 3 mm [2].

Simulation of visual acuity by personalizable neuro-physiological model of the human eye



Credit : Csilla Fülep

2. Optics Of The Human Eye - Chap. 18 Retinal image quality p 194

Limites de l'oeil

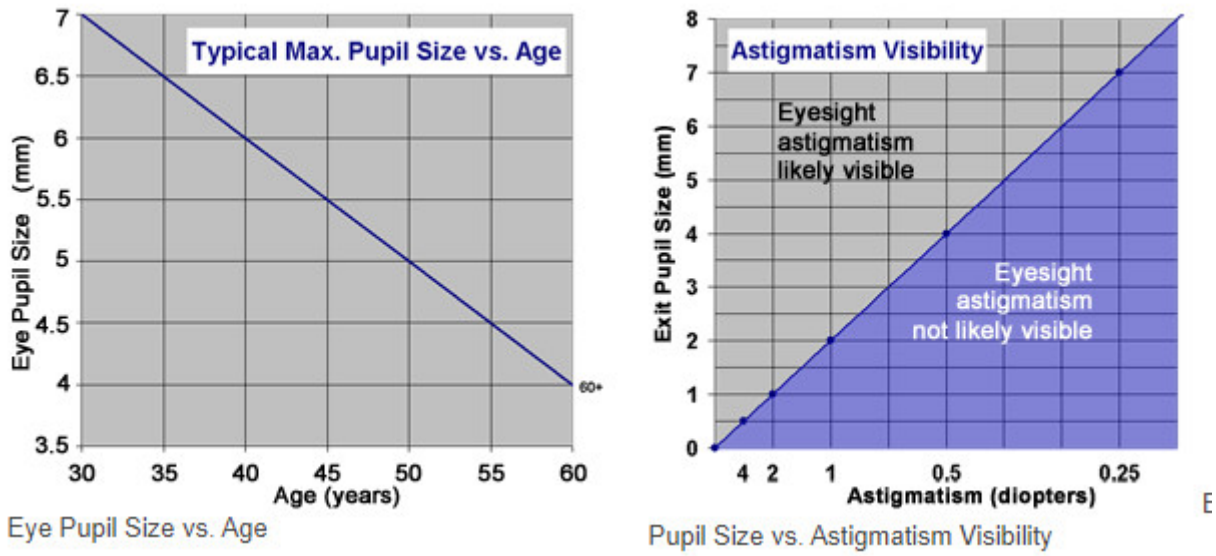
Impactes	Iris ouvert	Iris fermé	Iris ouvert et faisceau fin (Ps instrument petite)
Astigmatisme oeil	↗	↘	↘
Luminosité entrante	↗	↘	↘
Corps flottants	-	-	↗
Diffraction pupille entrée	↘	↗	-

Note : l'iris est ouvert en vision nocturne (max 7 mm), l'iris est fermé en vision diurne et le faisceau entrant est fin pour une pupille de sortie de l'instrument petite (fort grossissement).

Lors de l'observation au travers d'un instrument astronomique, on peut retirer ses lunettes de vue lorsqu'on est myope ou hypermétrope, la mise au point avec le porte-oculaire corrige sa vue automatiquement, en revanche, il est préférable de garder ses lunettes en cas d'astigmatisme de l'oeil. Toutefois, d'après la règle de Richard Alfred Buchroeder et selon le la correction D de cylindre de l'astigmatisme (dioptrie) de la prescription médicale, il sera possible de les retirer si : $d \leq \frac{1}{\sqrt{D}}$ où d est la pupille de sortie de l'instrument [316, 350].

Tele Vue indique sur un graphique la pupille maximale exploitable selon la quantité d'astigmatisme de l'oeil :

Dioptrx



Credit : Tele Vue

Vision désigne la perception humaine (ou animal) des rayonnements lumineux.

En astronomie, la vision dépend [340] :

- Du rayonnement émit par le sujet de l'observation
- De la stabilité de l'atmosphère (seeing)
- De l'instrument et de sa capacité à corriger les aberrations
- De l'oeil et de sa capacité à capter les couleurs et construire une image la plus fidèle possible au fond de sa rétine

En vision nocturne, les objets faibles ne sont perçus que s'ils couvrent suffisamment de champ dans le champ de vision

de l'observateur, à lire "Visual Astronomy Of The Deep Sky" de Roger N. Clark. Un objet faible, petit, mais concentré (magnitude surfacique) pourrait être invisible alors qu'un objet large et peu concentré pourrait être visible [752].

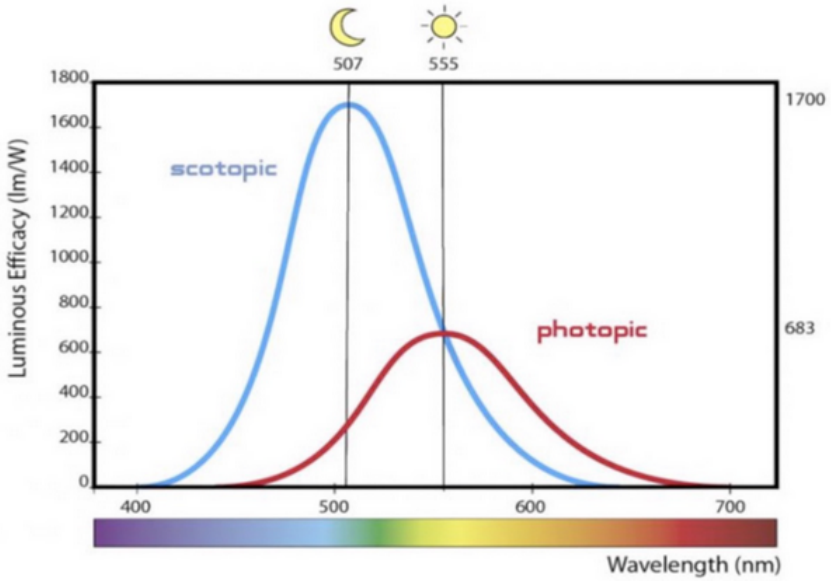
Dans le même temps, le contraste entre le fond du ciel (pollution lumineuse) et l'objet ne change pas avec le grossissement augmentant, mais cette différence devient moins visible.

La Vision des couleurs désigne la vision déclenchée par les 3 types de cônes : S (bleu), M (Vert), L (Rouge). Naturellement l'oeil humain est plus sensible dans le vert en raison de son environnement d'origine vert dû à la végétation.

Le bleu est une couleur particulière pour la vision :

- Il y a peu de cônes S sensibles au bleu que de cône M et L donc la résolution de l'oeil en lumière bleu est plus faible que dans les autres couleurs
- Le cristallin étant une lentille convergente elle souffre d'aberration chromatique, il est donc plus facile de voir du rouge de loin et du bleu de près
- Lorsque la luminosité baisse l'oeil passe de sa sensibilité dominante naturelle au vert à une sensibilité dominante au bleu : [380nm, 450nm] [801]

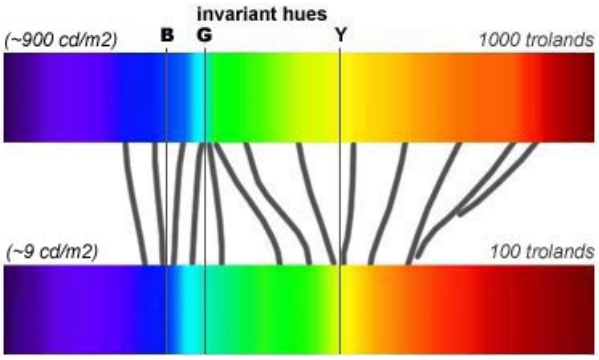
En astronomie lors de session d'observation visuel donc en basse luminosité il sera plus facile de détecter les aberrations chromatiques des instruments dans sa composante bleue.



Credit : Michael Bross

L'effet "Purkinje-shift" [436] montre que la nuit (vision scotopique) la sensibilité de la vision est décalée vers le bleu 507 nm (pic de sensibilité des bâtonnets) au lieu du pic vert/jaune 555 nm de jour, ceci explique aussi que le décalage de la mise au point de la couleur bleue de l'aberration chromatique des lunettes est mieux perçu que le décalage de la mise au point de la couleur rouge.

L'effet "Bezold-Brücke-shift" [81] décrit la modification de la perception des couleurs selon l'intensité lumineuse. En vision photonique, les couleurs d'onde courtes $f < 500nm$ apparaissent plus bleue et les couleurs d'onde longue $f > 500nm$ apparaissent plus jaune. En vision scotopique, les couleurs d'onde courtes ou longues apparaissent plus rouges alors que les couleurs d'onde intermédiaires apparaissent plus vertes [657]. Cependant on constate qu'il existe 3 invariants B,G,Y (voir schéma).



Credit : Adaptation, anchoring & contrast (Handprint)

Blind Spot désigne la zone aveugle du miroir primaire située précisément en son centre. En pratique, cette zone n'est jamais frappée par les rayons lumineux incidents en raison de l'obstruction du chemin optique par le miroir secondaire. En général, on pose aussi un oeillet au centre du miroir primaire pour faciliter la collimation.

Vision Décalée ou "Vision Périphérique" ou "Adverted Vision" est la vision qui permet d'augmenter notre capacité à percevoir des sources de lumières faibles dans l'obscurité. Pour mettre en pratique cette technique il faut regarder légèrement à côté de l'objet visé. La vision décalée utilise les bâtonnets situés en périphérie du globe oculaire qui sont plus sensibles que les cônes dans l'obscurité.

Vision Nocturne ou "Vision Stocopique" est la vision assurée par les cellules bâtonnets de l'oeil qui tapissent principalement la périphérie du globe oculaire et qui ne permettent de voir qu'en noir et blanc contrairement aux cônes de la partie centrale de l'oeil qui voient en couleurs. Les cônes permettent aussi de percevoir la résolution. L'installation de la vision nocturne nécessite toujours un temps d'adaptation de 1h au moins afin que celle-ci soit opérationnelle. Afin de ne pas annihiler sa vision nocturne lors d'une séance d'observation, il faut proscrire l'usage de toute lumière blanche, il est préférable d'utiliser de la lumière rouge à la place si cela est nécessaire.

Accommodation désigne l'effort fourni par l'oeil pour focaliser l'image sur la rétine. Normalement en vison de loin, il n'y a pas besoin d'accommodation, l'oeil est alors au repos, car l'image doit se former directement sur la rétine. En vision de près, il faut accommoder (courber le cristallin) afin d'avancer l'image pour qu'elle se forme sur la rétine. Au début de la vie le pouvoir d'accomodation est de 14 dioptries puis décroît avec l'âge, jusqu'à environ 1.5 dioptrie vers soixante ans [36].

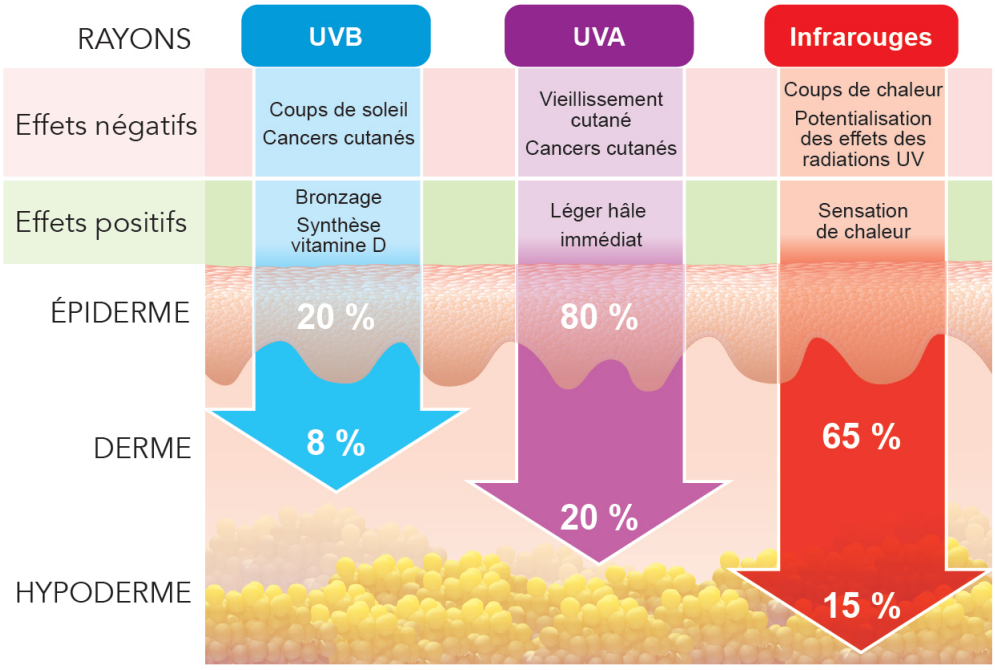
8.2 Effet des rayonnements

Le corps humain est soumis en permanence aux rayonnements solaire selon les circonstances certains peuvent être néfastes notamment pour la peau et l'oeil.

Effet des UV et IR sur la peau :

- Les UVB sont absorbés à 20% par l'épiderme de la peau et sont responsables des coups de soleil, du bronzage et de la synthèse de la vitamine D.
- Les UVA sont absorbés à 80% par le derme de la peau et sont responsable du veillissement de la peau
- Les IR sont absorbés à 65% par l'hypoderme et sont responsable de la sensation de chaleur.

Pourquoi et comment faut-il s'en protéger ?



Credit : crechemploi

Effet des UV sur l'oeil [437] :

- Les UVB sont absorbés à 80% par la cornée et le cristallin adulte et 50% chez l'enfant, le reste parvient jusqu'à la rétine.
- Les UVA sont absorbés à 100% par la cornée et le cristallin adulte et 10% chez l'enfant et sont responsables de la cataracte.

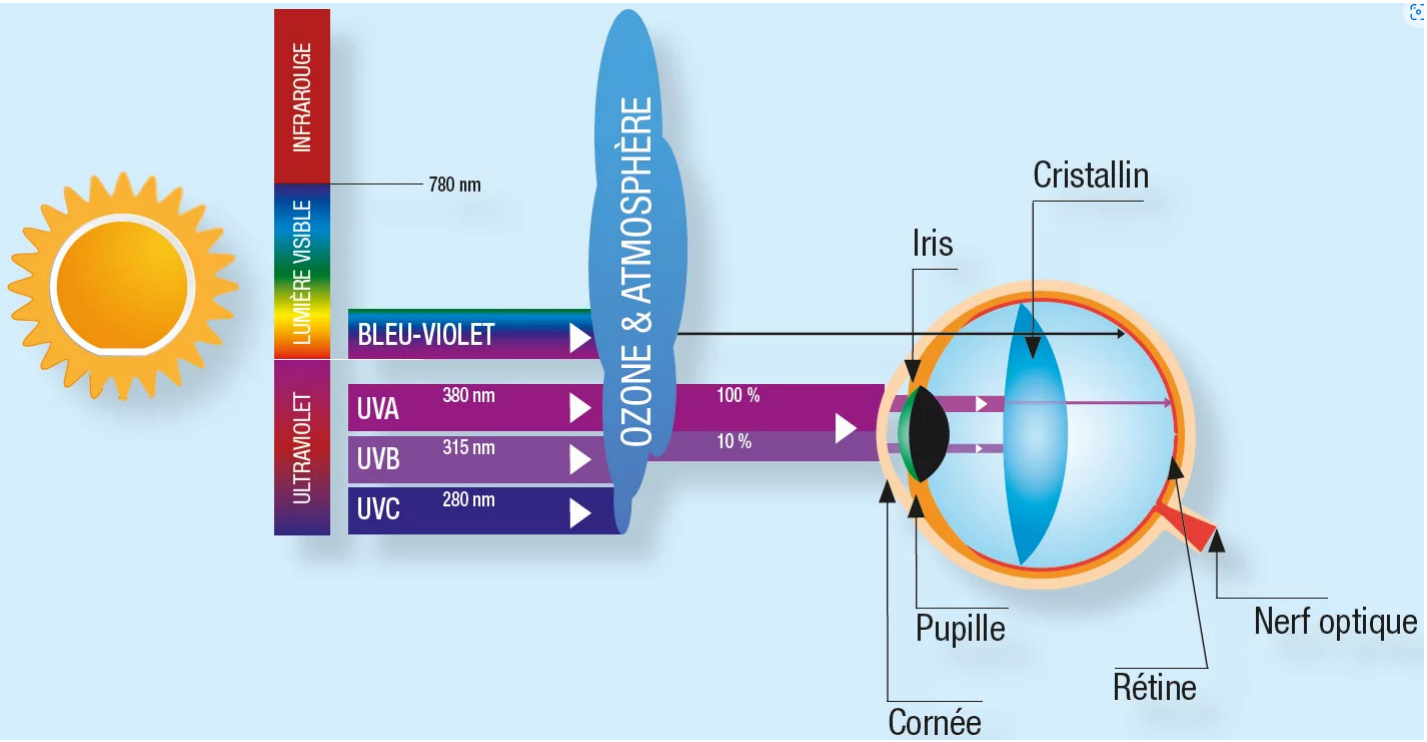
De manière générale les UV n'atteignent presque jamais la rétine (99% ne franchissent pas le cristallin) [343], ils auront des effets photochimique sur l'oeil en altérant l'ADN.

Effet des IRs sur l'oeil [155] :

- Les IRA sont absorbés la rétine
- Les IRB et les IRC sont absorbés par la cornée
- Les IRA sont absorbés par le cristallin

De manière générale les IR auront des effets thermiques car ils peuvent provoquer des brûlures de la rétine et ils favorisent la cataracte du cristallin.

Protégez vos yeux du soleil



Credit : Krys

8.3 Les Défauts de la Vision

Défaut Ophtalmologique désigne les défauts touchant l'oeil de l'observateur. Une vision normale 10/10ème permet de résoudre un couple d'étoiles séparés une minute d'arc [141].

- Myopie : les rayons des objets à moyenne distance ou l'infini focalisent devant la rétine
- Hypermétropie : les rayons des objets à l'infinie ou mi-distance focalisent derrière la rétine
- Presbytie : les rayons des objets proches focalisent derrière la rétine
- Astigmate : la focalisation est différente selon la zone d'impact des rayons incidents sur le cristallin donc à la fois en avant, sur la rétine et en arrière de la rétine

Il est tout à fait possible d'être à la fois presbyte + myope + hypermétrope + astigmate.

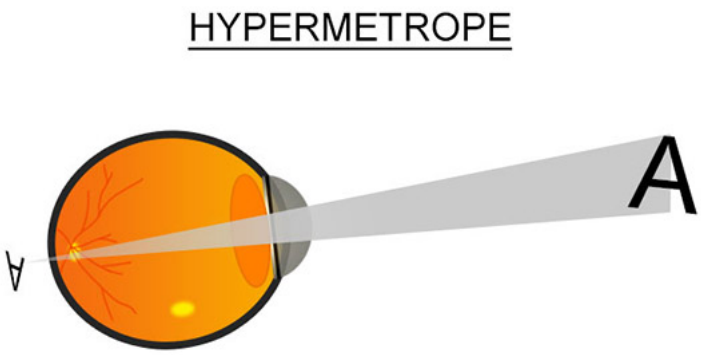
Dans le cas de l'utilisation d'un télescope ou d'une lunette astronomique il est nécessaire de pouvoir focaliser à l'infini. Les utilisateurs souffrant d'hypermétropie = "Farsighted" et/ou de myopie = "Nearsighted" peuvent alors retirer leurs verres correcteurs. Ainsi, le défaut sera parfaitement corrigé parce qu'il sera compensé par la mise au point qui sera faite sur l'instrument qui se fera plus vers l'avant pour les myopes et plus vers l'arrière pour les hypermétropes. Dans le cas de l'astigmatisme, les utilisateurs devront de préférence garder leurs lunettes de correction et privilégier les oculaires ayant :

1. Un dégagement oculaire = "Eye Relief" de plus de 20 mm
2. Une pupille est de sortie résultante est de 2 mm ou moins si on envisage quand même une utilisation sans lunettes
3. Ils doivent aussi s'assurer aussi que leurs verres de lunette sont traités multi-couche (anti-reflet).

Hypermétropie désigne un défaut structurel de la vision de loin où lorsque l'oeil est au repos, l'image se forme en arrière de la rétine en raison d'un globe oculaire trop court. La Sphère de l'ordonndance est alors positive. L'hypermétrope [3] accommode en permanence pour ramener l'image sur la rétine, et ce, plus fortement pour la vision de près que pour la vision de loin. L'hypermétrope éprouve des difficultés pour voir de près, son "Punctum Proxium" le point le plus proche vu net est plus éloigné que celui de l'oeil emmétrope. Ce défaut qui touche les enfants peut se résorber plus tard lorsque le globe oculaire grandira suffisament avec la croissance. En vision de près, l'hypermétrope épuisera plus vite sa réserve d'accommodation qu'un oeil normal.

La lentille correctrice possède la forme d'une lentille convergente de puissance opposée au défaut $\delta_c = -\delta$.

L'hypermétropie affecte légèrement la mise au point des instruments fournissant une image à l'infini : télescope, lunette, jumelles. Sans lunettes correctrices, plus la focale des oculaires est longue, plus le tube du porte-oculaire devra être ressorti vers l'extérieur (outward direction) pour atteindre le point de focus (et obtenir une image nette). Il est possible d'ajouter une bague d'extension au porte-oculaire afin que dans le cas d'oculaire de très longue focale on n'arrive pas en fin de course du tube du porte-oculaire.



Credit : Aurélien Hay

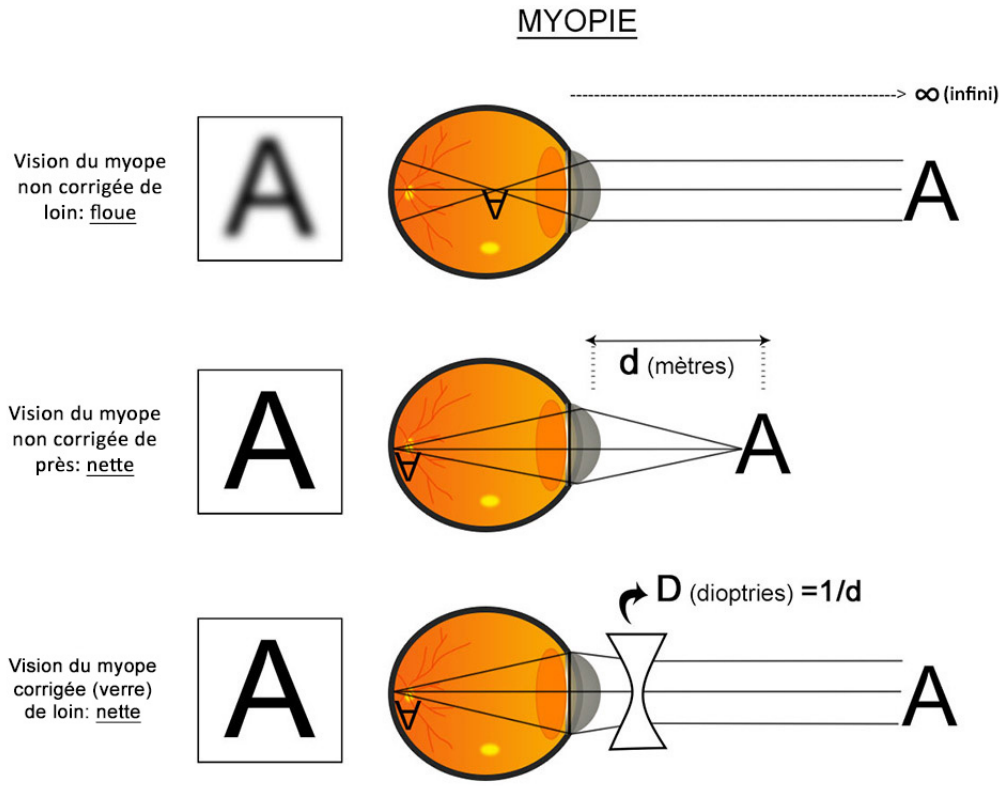
Myopie désigne un défaut structurel de la vision de loin où lorsque l'oeil est au repos, l'image se forme en avant de la rétine en raison d'un globe oculaire trop long. La Myopie empêche la focalisation sur la rétine lorsque le cristallin est totalement relâché c'est à dire pour la vision à l'infini. La Sphère de l'ordonndance est alors négative. Cette anomalie est souvent acquise à un âge jeune, car les enfants abuse très tôt des écrans qui ne sollicitent que la vision de près au détriment de la vision de loin, de plus le manque d'exposition au soleil favorise l'apparition de la myopie. Le myope [4] ne peut faire la mise au point sur des objets à l'infini, car l'oeil étant déjà relâché, il ne peut donc pas ramener l'image sur la rétine. Le myope éprouve des difficultés pour voir de loin, son "Punctum Remotum" le point le plus éloigné vu net n'est pas à l'infinie comme celui de l'oeil emmétrope. Même une légère myopie floute la vision à partir de quelques mètres seulement, $d = 1/\delta$. En revanche un myope avec sa réserve d'accommodation plus importante peut voir de plus près qu'un oeil emmétrope (oeil normal) qui quant à lui devra utiliser une loupe pour voir d'aussi près.

La lentille correctrice possède la forme d'une lentille divergente de puissance opposée au défaut $\delta_c = -\delta$.

La myopie affecte aussi la mise au point des instruments fournissant une image à l'infini : télescope, lunette, jumelles. Sans lunette correctrice, le myope doit rentrer le tube du porte-oculaire (inward direction) vers le miroir (ou l'objectif) pour atteindre le point de focus et obtenir une image nette, et ce, d'autant plus que la focale de l'oculaire utilisée est grande. L'image au foyer de l'instrument devra alors se situer après le plan focal de l'oculaire pour ne plus avoir une image virtuelle à l'infini, mais qui sera plus rapprochée. En conséquence, il faut que le foyer ressorte suffisamment afin que dans le cas des

3. English : far sighted
4. English : near sighted, short sighted

oculaires dont le field stop positionné assez haut, on n'arrive pas en fin de course du tube du porte-oculaire.



Credit : Aurélien Hay

Rappel de l'utilisation du correcteur de coma Paracorr II avec lunettes correctrices [196] :

1. Ajuster le "Tunable Top" à la position spécifiée par Tele Vue pour cet oculaire
2. Réaliser la mise au point en portant ses lunettes correctrices
3. Retirer ses lunettes
4. Retoucher la mise au point uniquement à l'aide du "Tunable Top"

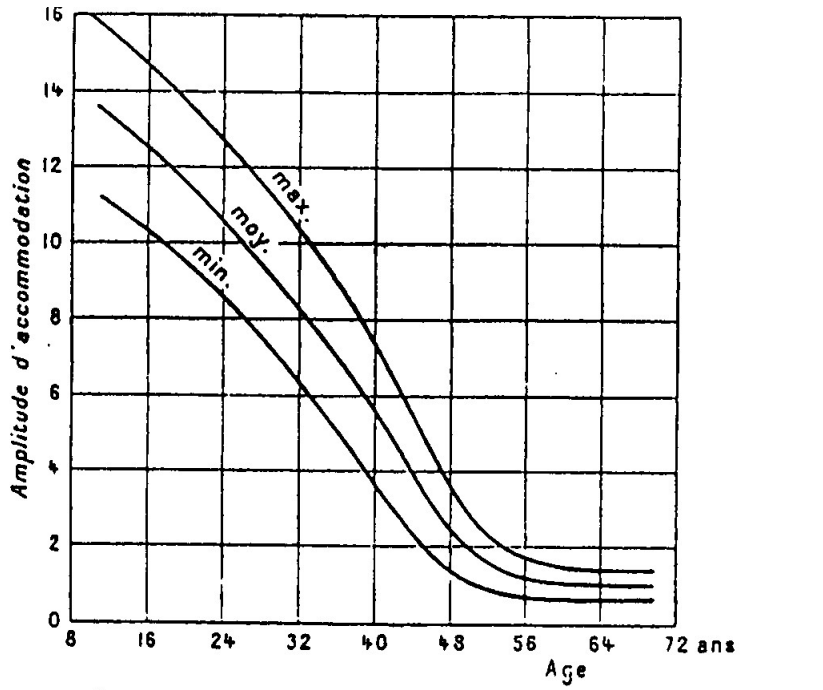
Note : en cas de myopie sévère, la mise au point via "Tunable Top" n'est peut-être pas possible avec certains oculaires, pour corriger cela il faut ressortir un peu l'oculaire du logement du Paracorr.

La myopie nocturne est une myopie se produisant la nuit chez certains sujets qui ne sont pas nécessairement myopes d'ordinaire. La nuit, en l'absence de lumière suffisante, les yeux cherchent à accommoder inutilement rendant flou les objets lointains, de plus la pupille ouverte au maximum réduit la profondeur de champ de la vision proche et aggrave le phénomène. La prévalence de cette affection touche 40% des sujets de moins de 25 ans [570].

Presbytie désigne un défaut d'accommodation de la vision de près lorsque l'oeil n'est plus capable de faire varier suffisamment sa puissance dioptrique afin d'accommoder pour rendre les objets vus de près nets. Pour rappel l'accommodation est la capacité à faire la mise au point. On peut voir la presbytie comme une hypermétropie se manifestant uniquement pour la vision des objets de près. La réserve d'accommodation est alors très faible. Ce défaut apparait à partir de 45 ans pour 83% de la population (occidentale) et se stabilise vers 60 ans.

La lentille correctrice possède la forme d'une lentille convergente de puissance opposée au défaut $\delta_c = -\delta$.

La presbytie



— Amplitude d'accommodation (origine au foyer), selon Duane.

Credit : Paul Jean

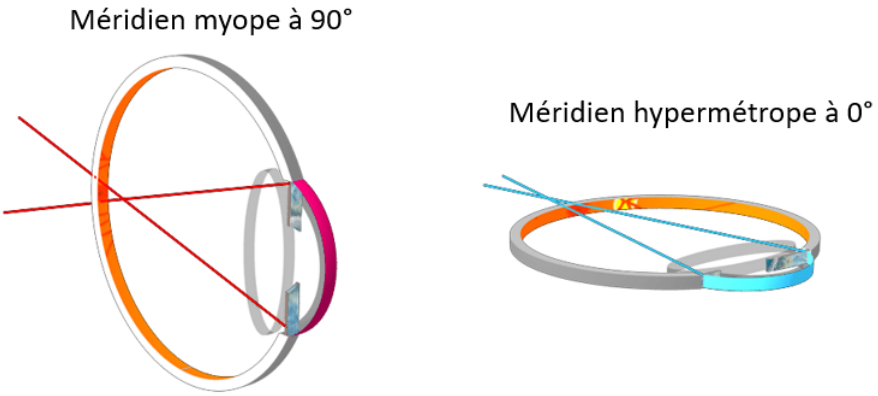
La Presbytie n'a pas d'impact sur l'utilisation des télescopes ou des lunettes, car ceux-ci ne sollicitent que la vision de loin.

L'accommodation δ (en dioptrie) en fonction de l'age : $\delta = 15 - (Age/4)$, la distance du "Punctum Proximum" le point vu net le plus près vaut $d = 1/\delta$. Les sujets jeunes ont une réserve d'accommodation de 14 dioptries et perdent cette capacité en vieillissant pour tomber à 1 dioptrie. Cette réserve permet de compenser les défauts de courbure de champ = "Field Curvature" des lunettes astronomiques en permettant de faire la mise au point sur les étoiles floutées = "Defocused" en bord de champ lorsque la mise au point est faite au centre du champ.

L'astigmatisme désigne l'absence de stigmatisme (convergence des rayons en 1 point unique), il s'agit d'un défaut de courbure du cristallin qui induit une baisse de l'acuité visuelle. Le Cylindre de l'ordonnance possède une valeur non nulle (positive ou négative) selon l'Axe indiqué. L'astigmatisme est un défaut de puissance, c'est comme être à la fois être hypermétrope et myope selon 2 plans ou méridien différents, par exemple avoir une hypermetropie selon le méridien horizontal (0°) et avoir une myopie selon le méridien vertical (90°). En pratique sur l'ordonnace on indiquera l'angle pour lequel l'effet est maximal. Cette aberration est plus gênante lorsqu'elle se manifeste plus selon le méridien vertical (90°) que sur le méridien horizontal (0°) [144]. Le point image n'est plus ponctuel mais un cercle de moidre diffiusion projeté sur le rétine.

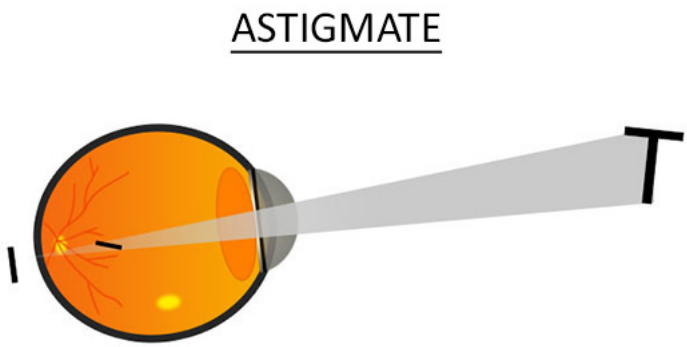
La lentille correctrice selon l'un des axe a la forme d'un demi cylindre.

Les méridiens de l'astigmatisme



Credit : Damien Gatinel

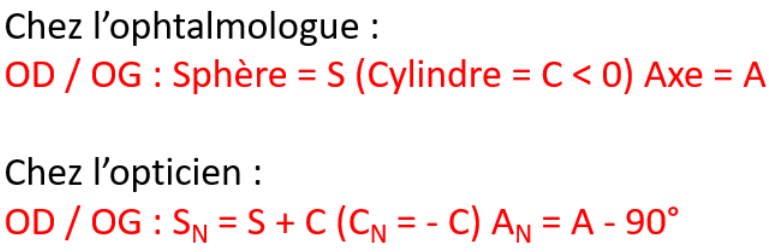
Chez Tele Vue il existe des lentilles correctrices "Dioptrix" à utiliser sur les oculaires. Ce défaut est particulièrement gênant dans l'observation planétaire.



Credit : Aurélien Hay

Convention ordonnance L'ordonnance indique la correction nécessaire des défauts constatés. Cependant l'affichage des mesures de des défauts comme indiqué sur l'ordonnance peut se faire soit en "cylindre négatif" chez l'ophtalmologue soit en "cylindre positif" chez l'opticien [569]. En cylindre négatif on considère le défaut de vergence sur un méridien (e-g horizontal = 0°) et en cylindre positif on considère le défaut de vergence sur un méridien (e-g vertical = 90°) [146]. Un cylindre négatif indique une lentille plus épaisse au centre qu'aux bord alors qu'en cylindre négatif la lentille est plus épaisse aux bords qu'au centre.

La conversion se fait selon la formule suivante :



Credit : J.G. Gricourt

La valeur de l'addition indique seulement la correction positive pour la vision de près qui n'a rien à voir avec l'astigmatisme.

Corps Flottants ou "Myodésopsie" ou "Floaters" désigne ces résidus organiques mobiles de l'humeur vitrée de l'oeil visibles lorsque l'on fixe un fond de ciel bleu, ils apparaissent alors comme de petites mouches volantes. Ce que l'on voit en réalité, c'est l'ombre projetée sur la rétine des corps flottants. Ils sont plus visibles et gênant lors de l'utilisation des forts grosissement au télescope (ou lunette) car alors le faisceau de lumière pénétrant dans l'oeil est plus fin en raison de la pupille de sortie de l'instrument plus étroite.

Ces corps flottants :

1. Bloque la lumière (ombres)
2. Floute les images par diffraction de la lumière

L'apparition de corps flottants est plus fréquente avec l'âge et notamment chez les myopes.

Il existe aussi les phénomènes antopiques apparaissant aussi sur fond bleu et matérialisé par de petits points lumineux, ce sont en réalité des leucocytes se déplaçant dans les vaisseaux capillaires de la rétine. Ces points blancs ne sont pas visibles la nuit et n'occasionnent donc aucune gène.

Chapitre 9

L'Astrophoto

9.1 Généralités

Astrophoto ou "AP" désigne un domaine de la photographie dédiée à la photo du ciel de nuit. L'astrophoto nécessite un instrument astronomique, une monture motorisée compensant la rotation de la Terre ou/et un APN ou encore un capteur CMOS ou CDD ultra-sensible. Dans l'ordre d'importance dans le choix du modèle, on investira d'abord sur :

1. La monture
2. Le capteur
3. L'instrument (le tube)

L'astrophoto fût une discipline au départ marginale dans le monde des amateur à l'époque où l'on ne faisait des photo du ciel nocturne qu'à partir de pellicules argentiques (Kodak TP2415 hyper) très cher et très difficile à développer. Avec le temps l'astrophoto s'est relativement démocratisé grâce à l'avènement du numérique et des logiciels de traitement.

John Dobson à dit en 1988 : *If you want to do astrophotography you've got a disease. Because all the pictures have been taken by the Lick Observatory and all you have to do is go buy them. You can't buy the film for the price you can get pictures.* [499].

Il y a 2 champs d'application très différents, l'astrophoto planétaire et l'astrophoto du ciel profond.

En astrophoto du ciel profond, on peut réaliser des poses longues comme au temps des films argentique ou des anciennes caméras CCD, mais ce ne sera pas sans inconvénients :

— La saturation des pixels du capteur si le temps de pose est trop long
— L'effet destructeur du seeing qui sera aussi capturé
— Les erreurs de compensation de la rotation du ciel ou bien de suivi qui seront aussi capturés

Avec les capteurs modernes très sensibles, il est plus avantageux d'augmenter le SNR non pas en augmentant le temps de pose de la photo, mais en réalisant plusieurs clichés de temps de pose plus courts afin de les accumuler en réalisant un "Stacking" dans le but d'augmenter le SNR de l'image final par effet de moyennage statistique.

Les images obtenues à la sortie du capteur ou de l'APN sont les images brutes. Les bruts ne sont pas exploitables en l'état,

car elles sont fortement entachées de défaut et de bruit qu'il faudra traiter par la suite. Le pré-traitement ou calibration consiste à éliminer des défauts systématiques liés à la caméra (les pixels chauds du capteur, le bruit numérique introduit par l'électronique du capteur, les résidus collés sur le capteur, le vignetting de l'image) on se base pour cela sur des images de références : Dark, Offset et Flat. Enfin, une fois la calibration réalisée, il faudra :

1. Trier les images brutes pour éliminer du lot celles qui ont de trop gros de défauts
2. Aligner les images les une par rapport aux autres afin qu'elles se superposent
3. Pour les planètes, il faut compenser la rotation du globe de la planète pendant le laps de temps de l'acquisition
4. Additionner (stacking) les images par empilement, le bruit résiduel va se moyenner et les détails qui sont toujours au même endroit dans l'image vont au contraire se renforcer, le SNR de l'image augmente.

Attention, les APN grands publics doivent être défiltrés pour une utilisation optimale en astrophoto du ciel afin de capturer le $H\alpha$ des nébuleuses.

Astrophoto du Ciel Profond désigne une discipline de l'astrophoto visant à capturer l'image de champ stellaire ou de nébuleuses lointaines.

Caractéristiques :

— Caméra à grand capteur permettant de capturer de vastes champ stellaire et à grand pixels pour capturer plus de signal cependant la focale courte de ces instruments limite la taille des pixels pour obtenir un bon échantillonnage.
— F/D court permettant de ne pas (trop) agrandir le champ et d'étaler (trop) la lumière car cibles peu lumineuses
— Echantillonnage normal Seeing R/3
— Poses courtes supérieures à la secondes (+200 cliché) afin de capturer le maximum de signal pendant la durée du suivi
— Caméra à FPS lent (pas besoin d'aller plus vite)
— Caméra refroidie pour contrer le signal thermique en pose longue
— Caméra monochrome car il n'y a pas de couleur évidente dans le ciel profond et on utilise souvent des filtres à bande étroite, c'est au moment du post traitement que l'on fera correspondre une image d'un filtre donnée à une couleur
— Caméra à bruit lecture faible et QE élevé
— Monture EQ à correction PEC performante si on n'utilise pas de guidage sur une étoile en vue d'empiler ensuite les images pour augmenter le SNR
— Utilisation de techniques avancées : correcteurs de champ (courbure champ, coma), filtres à bande étroite pour faire ressortir les nébuleuses, auto-guidage pour améliorer le suivi EQ ...

Note : il faudra aussi faire les DOF afin de préparer les images brutes avant empilement dans le but d'augmenter le SNR.

Il faudra choisir la bonne taille des pixels pour avoir le bon échantillonnage tout en gardant des pixels suffisamment gros pour garder une excellente sensibilité dans le but de conserver un temps de pose contenu.

Astrophoto du Planétaire désigne une discipline de l'astrophoto visant à capturer l'image de planètes ou du soleil (par extension)

Caractéristiques :

— Caméra à petit capteur permettant de capturer les petits disques planétaire et à petits pixels pour capturer plus de détails.
— F/D long permettant d'agrandir les disques planétaire, ne nuit pas à l'éclairement du capteur car les cibles sont déjà très lumineuse (utilisation de barlows)

— Echantillonnage un peu supérieur à Seeing R/3 (sous-échantillonnage), ex : R/2
— Poses ultra courtes inférieur à le seconde (+2000 clichés) pour battre le seeing (ne retenir que les meilleurs clichés avant empilement)
— Caméra à FPS élevé + capacité buffer mémoire interne pour capturer le plus d'images dans un laps de temps court
— Caméra refroidie ou non refroidie (indifférent)
— Caméra couleur car on ne peut pas utiliser de filtre pour des raison pratiques
— Caméra à bruit de lecture faible et QE élevé
— Monture EQ standard ou Dobson, le suivi n'est pas crucial car les logiciels de traitement savent repositionner les images planétaires en vue d'empiler ensuite les images pour augmenter le SNR
— Utilisation de techniques avancées : correcteur optique ADC, déconvolution, dérotation planétaire ...

Note : il faudra aussi faire les DOF afin de préparer les images bruts avant empilement dans le but d'augmenter le SNR.

En astrophoto planétaire, on réalise des clichés de pose unitaires ultra-courtes pour battre la turbulence atmosphérique le "Seeing" et obtenir des clichés très propres. On additionne (stacking) les images par empilement dans le but d'augmenter le SNR de l'image. On augmente aussi le gain du capteur au préalable afin de permettre la réduction du temps de pose [1].

IQ signifie "Image Quality"

Projection Oculaire désigne une technique de projection similaire à la projection basée sur une barlow utilisée en photo. La projection oculaire permet de former une image du soleil sur un écran. Le grandissement de la projection vaut : $A = \frac{f-d}{f}$ où d est la distance entre l'écran et l'oculaire (voir la relation de conjugaison des lentilles minces).

Temps de pose désigne le temps d'exposition du capteur photo à la lumière. En astrophoto planétaire, on cherche la vitesse pour battre le seeing, astrophoto du ciel profond, on cherche un compromis entre la vitesse pour ne pas subir les erreurs de suivi / guidage, mais aussi un temps de pose suffisamment long pour acquérir le plus de signal possible par rapport au bruit. Lorsqu'on fait une photo du ciel globale, il faut prendre un temps de pose raisonnablement long pour voir le plus d'étoiles possible (Voie Lactée) mais en évitant de capturer le mouvement de rotation des étoiles.

Il existe plusieurs règles :

— Règle des 500 : $tp = 500/F$ où F est la focale de l'objectif utilisé.
— Règle NPF où le temps de pose tp est donné en fonction de la focale F, de la taille des pixels en micromètre et de la déclinaison du point du ciel visé (les étoiles tournent plus ou moins selon la déclinaison).
— Règle n-crop où le temps de pose tp est donné en fonction de la focale F et du "Crop Factor" de l'APN utilisé.

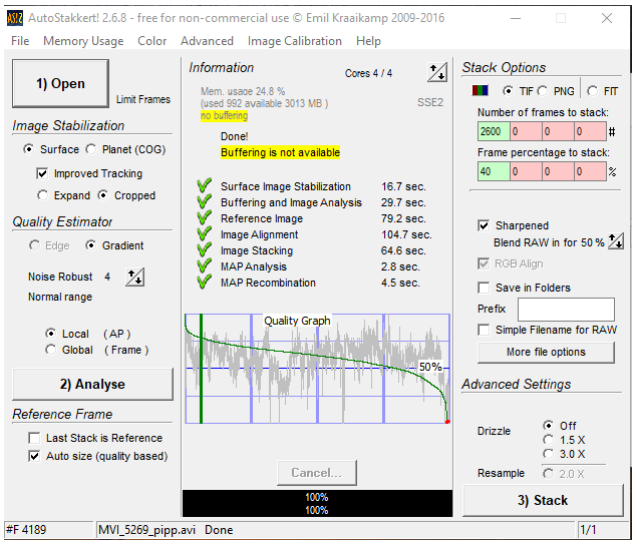
Le "Crop-Factor" vaut 1 pour un capteur Full Frame = 24 x36 mm et il vaut 1.5 pour un capteur APS-C.

Logiciels de Traitement désigne de manière générique les logiciels de traitement d'image astronomique. Ces logiciels permettent de réaliser tout ou partie du workflow du traitement d'image :

1. Calibrer les images brutes
2. Trier les images brutes
3. D'aligner les images brutes (registration)
4. D'empiler les images brutes capturées
5. De traiter l'image finale (contrast, white balance, wavelets, déconvolution)

1. Le gain permet d'obtenir une image bien éclairée à temps de pose très court

Autostakkert



Credit : J.G. Gricourt

9.2 Les Capteurs et le Matériel

Appareil Photo Numérique ou “APN” désigne un appareil photo utilisant un capteur numérique pour capturer des images.

Appareil Reflex ou “Digital Single-Lens Reflex” ou “DSLR” désigne un appareil photo numérique (anciennement à pellicule) a objectif interchangeable et à capteur soit Full Frame 24x36 ou APS-C. Ce type de boitier est pourvu d’une visée optique à base de prismes, d’un miroir de renvoi et d’un obturateur à rideau et parfois d’un moteur d’autofocus (AF sur certain boitier Nikon) constituant les parties mécaniques sensibles du boitier.

Appareil Bridge désigne un appareil photo numérique à objectif fixe et à petit capteur. Ce type de boitier peut être sur une technologie ancienne Reflex ou moderne Hybride.

Appareil Hybride désigne un appareil photo à objectif interchangeable a objectif interchangeable et à capteur soit Full Frame 24x36 ou APS-C. Ce type de boitier est dépourvu de visée et de miroir de renvoi remplacé par un viseur électronique à la place, certains n’ont plus d’obturateur à rideau remplacé par obturateur électronique à la place et le moteur d’autofocus se retrouve sur les objectifs exclusivement. C’est à partir e 2020 que Canon et Nikon ont suivi Sony et se sont tournés vers la fabrication d’Hybrides en remplacement progressif des Reflex.

Ouverture objectif photo désigne la portion utile de la lentille frontale de l’objectif photo. Cette ouverture est modulée par le diaphragme de l’objectif que l’on compte en “Stop” : F/1.4 à F/22 aux extrêmes. Pour chaque objectif photo, il existe une ouverture optimale pour laquelle la définition (le piqué) est maximale. À pleine ouverture ou à F/D minimum (F/1.4) l’objectif utilise toute la surface de verre de la lentille frontale et donc c’est dans ce cas que les conditions de Gauss sont le moins respecté et que les aberrations optiques sont maximales (on dit que l’objectif est "mou" à cette ouverture). De même à l’ouverture minimum (F/22) cette fois-ci c’est la diffraction de la lumière au travers d’une petite ouverture qui réduit le piqué de l’objectif.

Camera désigne le dispositif de capture d’image à partir d’une lunette ou d’un télescope. Les caméras électroniques modernes ont remplacé les films argentiques de type Kodak Technical Pan 2415 = TP2415 hypersensibilisé par refroidissement

[38]. Jusqu'en 2020 il existait 2 technologies de capteur, la CCD et le CMOS (Sony) mais c'est cette dernière qui à pris le dessus, la CCD n'est plus fabriquée pour l'astronomie.

ZWO ASI 1600 MM Pro Mono



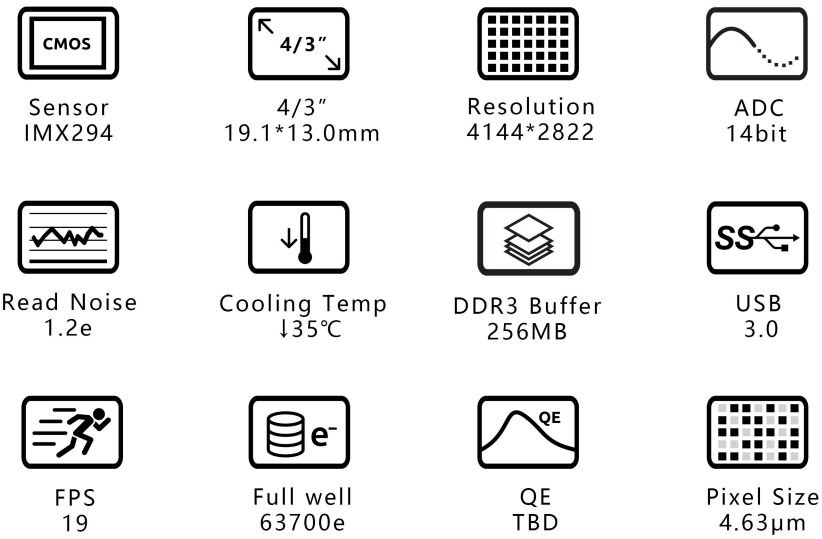
Credit : ZWO

Selon l'usage, il existe plusieurs de caméras :

Type	QE	RON	FWC	Framerate	Pixel size	Shutter
Planetaire	↗	↘	-	↗	↘	Global ou Rolling
Ciel profond	↗	↘	↗	-	↗	Global ou Rolling
Diurne	↗	↘	↗	↗	-	Global

Des exemples de caméras emblématiques : la camera Player One pour le planétaire, ZWO ASI 6200MC Pro pour le ciel profond, QHYCCD QHY183M pour le ciel profond, Moravian Instruments C4-16000 pour le ciel profond.

Les caméras aussi bien utilisées pour la photo classique donc diurne que celles utilisées pour l'astrophoto possèdent un ensemble commun de caractéristiques :



Credit : ZWO

— Le type de capteur CMOS en général mais aussi CCD fût un temps.

— Le format du capteur en général 4/3 pour l'astrophoto mais aussi 24x36 = "Full Frame" ou encore APS-C sur boitiers Reflex et Hybrides.
— La résolution du capteur, c'est à dire le nombre de photosites constituant la matrice de Bayer du capteur (différents du nombre de pixels effectifs).
— La résolution du convertisseur ADC indiquant le nombre de niveau de gris que la caméra peut capturer, par exemple 14 bits donne 2^{14} niveaux, cela participe à la reproduction de la profondeur dynamique des images.
— La valeur du bruit de lecture du capteur indiquant le signal minimum présent sur toute image capturée.
— La baisse de température lorsque le refroidissement est activé.
— Le buffer mémoire interne pour stocker temporairement les images avant de les envoyer sur le PC via USB, très utile si on réalise des captures à fréquence élevée (utile en planétaire).
— Le type d'USB pour connaitre la vitesse de transmission des images sur le PC.
— La fréquence d'acquisition maximale de la caméra (utile planétaire).
— La FWC = "Full Well Capacity" ou la capacité en électrons d'un photosite cela conditionne avec le bruit de lecture la DR = "Dynamique Range" de la camera (capacité à reproduire des différences de niveaux de gris) ainsi que la capacité à allonger le temps de pose
— Le QE = "Quantum Efficiency" ou le nombre de photons produisant un électron dans le condensateur du photosite après conversion du signal lumineux.
— La dimension du photosite = "Pixel Pitch" conditionne le finesse de l'image autrement dit l'echantillonnage permettant de savoir si la focale est adaptée au capteur et au seeing du ciel selon que l'on fait de l'astrophoto planétaire ou du ciel profond.

En 2024 ZWO propose :

— Une camera ASI2600MC/MM DUO contenant à la fois le capteur principal et le capteur de guidage
— Une camera ZWO ASI2600MC-AIR contenant à la fois le capteur principal, le capteur de guidage et un ASiair

Capteur ou "Capteur photo" désigne la pièce électronique sensible à la lumière capable de produire une image électronique de la projection d'une image produite par dispositif, objectif photo ou instrument d'astronomie.

Le capteur photo couleur classique des boitiers reflex est composé des éléments suivants

— Un capteur monochrome
— Une matrice de Bayer
— Un filtre anti aliasing (low pass filter ou OLPF)
— Un filtre IR-Cut

La matrice de Bayer est le filtre coloré apposé au-dessus des photosites du capteur, il permettra de reconstituer les pixels colorés lors de l'opération de débayérisation du firmware de l'APN. En général, on perdra 30% de résolution en passant des photosites aux pixels. Le filtre anti-aliasing permet d'éliminer les effets de moirés dans l'image (inutile si la résolution du capteur dépasse 40 méga-pixels). Le filtre IR-Cut permet de supprimer les fréquences IR pour lesquels l'oeil humain est insensible.

Un grand capteur comme ceux utilisés dans l'astrophoto du ciel profond sera plus impacté par les défauts de corrections de l'optique hors axe (courbure de champ, chromatisme, coma). Un petit capteur aura nécessairement des photosites plus petits et donc sera plus sensible à la présence de poussières.

Capteur CCD signifie "Charge Coupled Device" désigne un type de capteur utilisé en imagerie jusqu'en 2020 et qui a été supplanté par le capteur CMOS depuis. Le CCD est une technologie popularisée par Sony et donc plus ancienne que le CMOS, ses caractéristiques sont :

1. La conversion ADC se fait globalement par ligne de pixels
2. Une consommation électrique est plus élevée
3. Une vitesse d'acquisition moins rapide
4. Obturateur de type "Global Shutter"
5. Un bruit de lecture très élevé comparativement au capteur CMOS

Au moment de la lecture, les charges de la ligne sont transportées jusqu'au registre de lecture (serial register) en bas du capteur pour passer ensuite dans l'ADC.

En astrophoto les CCD avaient le vent en poupe pour l'acquisition d'image du ciel profond en pose longue, mais aujourd'hui les capteurs CMOS ont largement dépassé la technologie CCD en termes de performance pure. Des marques autrefois populaires de caméra CCD dotées de capteurs Sony : Atik, SBIG, Starlight Xpress, DMK, FLI.

Pour comparer 2 trains d'imagerie on peut estimer pour chacun la force du signal reçu (et capté) par le capteur [406] :
$S \propto 1/(F/D)^2 \times T \times (1 - CO^2) \times R \times P^2$ où S le signal, F/D le "Focal Ratio", T le taux de transmission (en pourcentage), CO l'obstruction par un miroir secondaire (en pourcentage), R le rendement quantique QE du capteur et P la dimension du photosite (pixel). La comparaison se fait alors par le ratio : S_2/S_1

Capteur CMOS signifie "Complementary Metal Oxide Semiconductor" désigne le type de capteur le plus utilisé en imagerie. Les CMOS étaient initialement dédiés à l'acquisition d'imagerie planétaire en pose courte, mais ils sont devenus aussi la norme dans l'imagerie du ciel profond. Les capteurs dédiés au ciel profond sont en général refroidis afin de diminuer l'empreinte du bruit thermique et ont une surface plus large pour englober de grands champs stellaires. On trouve cette technologie de capteur dans les smartphones, APN grand public et professionnels et dans les capteurs dédiés à l'imagerie astronomique. Des marques populaires de caméra CMOS dotées de capteurs Sony ou Panasonic : QHY CCD, ZWO, ATIK, Moravian, QSI (racheté par ATIK).

Les caractéristiques des CMOS :

1. La conversion ADC se fait individuellement sur chaque pixel
2. Une sensibilité bien supérieure aux traditionnelles CCD donc les poses courtes sont possibles (très utile en planétaire)
3. Une consommation électrique faible
4. Une vitesse d'acquisition rapide
5. Obturateur de type "Rolling Shutter"
6. Les pixels sont lus individuellement
7. Un SNR qui augmente lorsque le gain augmente (contrairement au CCD où celui-ci est fixe)

Les anciens CMOS présentent l'effet indésirable de "Rolling Shutter Effect" en déformant les sujets rapides. Cependant, cela n'est pas gênant en photo du ciel profond, car il n'y a pas de mouvements. Les nouvelles caméras CMOS utilisée pour le cinéma possèdent un "Global Shutter" éliminant totalement ce défaut.

Normalement, on doit utiliser de gros pixels pour l'imagerie du ciel profond pour la sensibilité et de petits pixels pour l'imagerie planétaire pour la résolution, mais c'est l'échantillonage qui permettra de sélectionner la bonne taille des pixels.

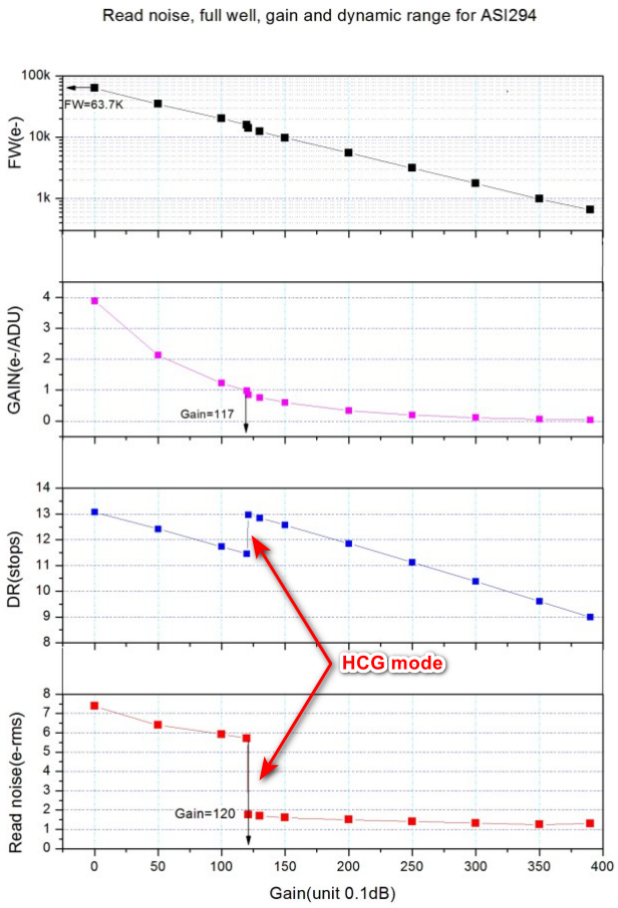
Si le bruit de lecture provient essentiellement de l'ADC qui est fixe et appliqué après le gain, alors l'augmentation du gain s'accompagne de [410] :

1. Une augmentation du SNR car le bruit de l'ADC n'est pas amplifié par le gain

2. Une diminution de la DNR, on peut perdre les hautes lumières (blancs cramés)
3. Une diminution de la FWHM

Le mode HCG (High Conversion Gain) de certains capteurs (Sony A7S, Sony IMX420) utilisé dans les basses lumières permet de conserver une DNR élevée malgré l'augmentation du gain [803] alors le bruit de lecture chute brutalement. Le LCG (Low Conversion Gain) de certains capteurs (Sony A7S) est utilisé dans les hautes lumières pour éviter de saturer les blancs. Ces 2 modes peuvent s'activer en même temps sur les pixels de l'image afin de produire directement depuis le capteur une image à haute DNR, et cela, avant tout post traitement.

Camera ZWO ASI 294



Credit : ZWO

Global Shutter désigne un type d'obturateur pour lequel la lecture des se fait globalement, donc sans décalage dans le temps entre chaque ligne, l'image d'un sujet en mouvement rapide n'est pas déformé.

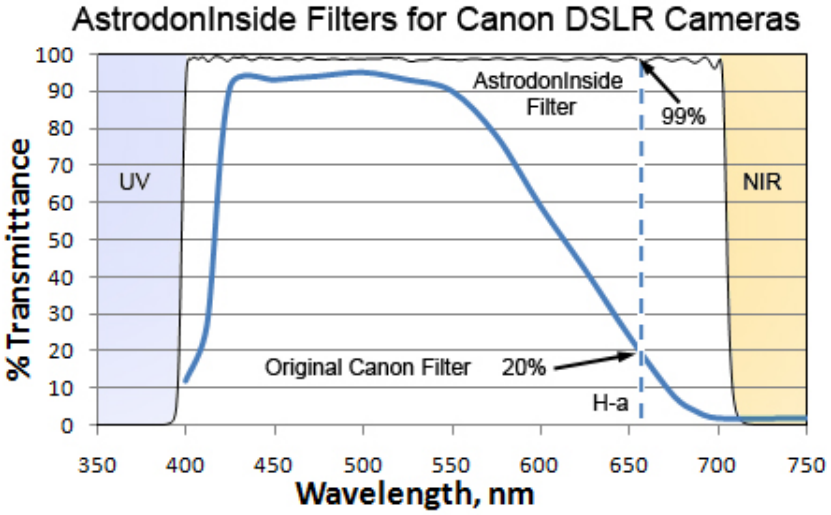
Rolling Shutter désigne un type d'obturateur pour lequel la lecture des lignes se fait individuellement, donc avec décalage dans le temps entre chaque ligne, l'image d'un sujet en mouvement rapide est déformé. En imagerie du ciel profond, ce type de capteur peu convenir, mais sera pénalisant en imagerie planétaire dans le cas où la monture bouge à cause du vent, l'image bougera, mais sera aussi déformée, donc difficilement rattrapable au traitement. Certains APN hybrides permettent d'utiliser un obturateur 100% électronique de ce type, car plus rapide en plus de l'obturateur à rideau classique.

FSI signifie "Front Side Illulminated", la lumière pénétrant dans un capteur de type FSI doit abord passer par la couche de diélectrique (utilisé pour la conversion des photons en électrons) avant d'atteindre la couche sensible de semi-conducteur ce qui occasionne une perte de photons au passage (déviés ou bloqué).

BSI signifie “Back Side Illulminated”, la lumière pénétrant dans le capteur de type FSI arrive directement sur la couche sensible de semi-conducteur. Ce type de capteur est plus performant que les capteurs FSI car il n’y a plus de perte de lumière.

Défiltrage désigne la suppression du filtre IR-Cut apposé devant le capteur de l’APN. Le filtre IR-Cut est utilisé par les capteurs d’APN Reflex car les capteurs sont plus sensibles à la couleur rouge et aux IR que l’oeil humain il faut donc atténuer ces longueurs d’onde grâce à ce filtre. Ce faisant, le filtre IR-Cut atténue aussi considérablement la fréquence $H\alpha$ émise par les nébuleuses lorsqu’on l’utilise en astrophoto. En retirant ce filtre, on multiplie la sensibilité du capteur en $H\alpha$ par 5.

Baaderiser ou “Astrodoniser” désigne une expression signifiant remplacer le filtre IR-Cut de son APN Canon EOS reflex par un filtre UV/IR Baader plus adapté à la photo astronomique. On peut aussi remplacer le filtre d’origine par un filtre “Astrodon Inside” adapté à la photographie des nébuleuses.



Credit : EOS for astro

Matrice de Bayer il s’agit de la grille colorée apposée devant le capteur photo qui permet de coloriser l’image produite. Un capteur photo brut ne sait reproduire que des niveaux de gris (monochrome). Afin de reproduire la couleur, il faut lui adjoindre une matrice de Bayer. La matrice de Bayer place un filtre coloré devant chaque photosites du capteur, celle-ci est composée des couleurs suivantes (par unité de surface) : 1 pixels de couleur bleue, 1 pixel de couleur rouge et 2 pixels de couleur verte. Il y a donc 2 fois plus de pixels verts, car les capteurs photo et l’oeil humain sont plus sensibles au vert qu’aux autres couleurs. Les pixels colorés de l’image sont recrées via un algorithme de “Débayerisation” ou de “Dématriçage” [134] intégré soit dans le micro-contrôleur du boitier photo soit dans le logiciel de traitement. Selon l’algorithme utilisé, on perd environ 30% de résolution en pixels par rapport à la matrice de photosites du capteur. Étant donné le filtrage que constitue la matrice de Bayer on considère que 50% de la lumière incidente est perdue.

Gain désigne en imagerie le nombre d’électrons nécessaire pour enregistrer 1 ADU (1 unité de niveau de gris), le gain s’exprime en électrons / ADU. Le gain maximal du capteur pour ne pas dépasser la valeur maximale de l’ADU : $\text{Gain}_{\text{max}} = \text{FWC}/\text{ADU}_{\text{max}}$ est en général proche de 1 électron / ADU. Le gain permet d’augmenter artificiellement la luminosité de l’image afin de faire ressortir les faibles luminosités où de diminuer le temps de pose pour figer la turbulence par exemple.

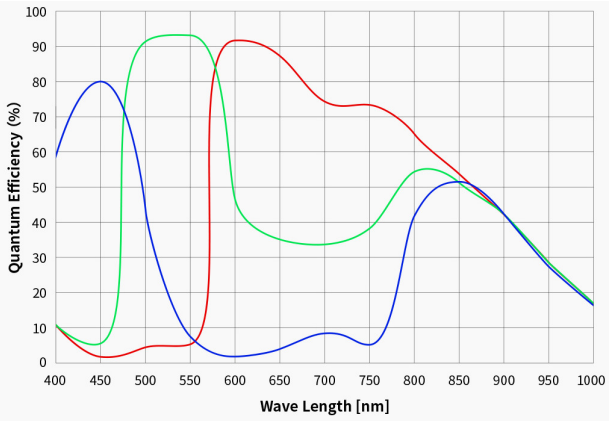
Blooming désigne l’effet de saturation des pixels sur le capteur dont la charge FWC est atteinte et fini par déborder sur les pixels voisins (tache blanche).

ADU signifie “Analog Digital Unit” désigne en imagerie le niveau d’éclairement d’un pixel du capteur exprimé en niveau de gris. Pour un capteur 8 bits la valeur maximale vaut $\text{ADU}_{max} = 2^8 - 1 = 255$. Chaque valeur de ADU est composée du

signal et du bruit ADU = $\text{ADU}_{\text{signal}} + \text{ADU}_{\text{noise}}$. Le gain procuré par l'ISO indique le nombre l'électron lus par unité d'ADU, si l'on double l'ISO le nombre l'électron est alors doublé. On sait qu'avec l'empilement de n photos on arriva à un bruit total moins élevé Noise = $\frac{\text{Signal}}{\sqrt{n}}$ ce qui revient à écrire une fois le signal numérisé le niveau résultant du $\text{ADU}_{\text{noise}} = \frac{\text{ADU}_{\text{signal}}}{\sqrt{n}}$ [730].

Rendement quantique ou "QE" ou "Efficacité Quantique" ou "Quantum Efficiency" désigne en imagerie une mesure en pourcentage de la capacité d'un capteur à convertir les photons $N\nu$ incidents en charge électrique Ne : $QE_\lambda = Ne/N\nu$. Une efficacité de 100% signifie que chaque photon incident est converti en 1 électron en sortie. Cette mesure dépend de la longueur d'onde des photons incidents, voir aussi "FWC" [434].

Camera ZWO ASI 662MC

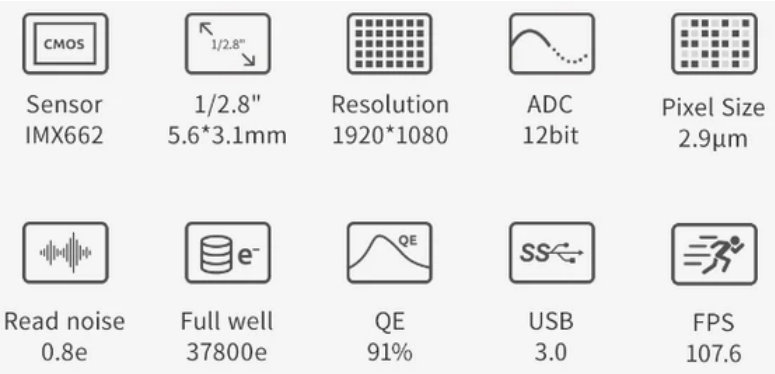


Credit : ZWO

Fullwell Capacity ou "FWC" désigne en imagerie le nombre maximum d'électrons que peut contenir 1 photosite sur le capteur photo avant que celui-ci ne sature et provoque un effet de "Blooming" sur l'image lorsque les pixels adjacents sont touchés. La dynamique exprimée en décibels : DNR (db) = $20 \times log(\text{FWC}/\sigma_{\text{Read}})$ et la dynamique exprimée en bits de codage : DNR (bits) = $\frac{log(\text{FWC}/\sigma_{\text{Read}})}{log(2)}$.

Le gain à l'ISO choisi exprimant le nombre d'électrons par ADU donnera le nombre total d'électrons correspondant à la FWC permise par l'ADC : $\text{FWC}_g = \text{Gain}_{\text{iso}} \times 65535$, où 65535 est la valeur maximale d'un pixel une fois converti pour un convertisseur 16 bits [564]. Très souvent, le convertisseur est réglé pour procurer un gain donnant une Fullwell inférieure à la Fullwell théorique du capteur afin de ne pas saturer les pixels. Plus les pixels sur le capteur sont gros, plus la FWC est importante et meilleure sera la plage dynamique retranscrite par le capteur (dégradé de gris) voir aussi "QE". La FWC doit être la plus large possible en imagerie du ciel profond alors qu'en imagerie planétaire, elle peut être plus réduite.

Camera ZWO ASI 662MC



Credit : ZWO

ISO invariant ou “ISO-Less camera” désigne une propriété de certains APN. Les Nikon Reflex et les Hybrides récents (Nikon, Canon, Sony) sont ISO invariants à partir d’un seuil d’ISO alors que les Canons Reflex ne le sont pas par exemple [353].

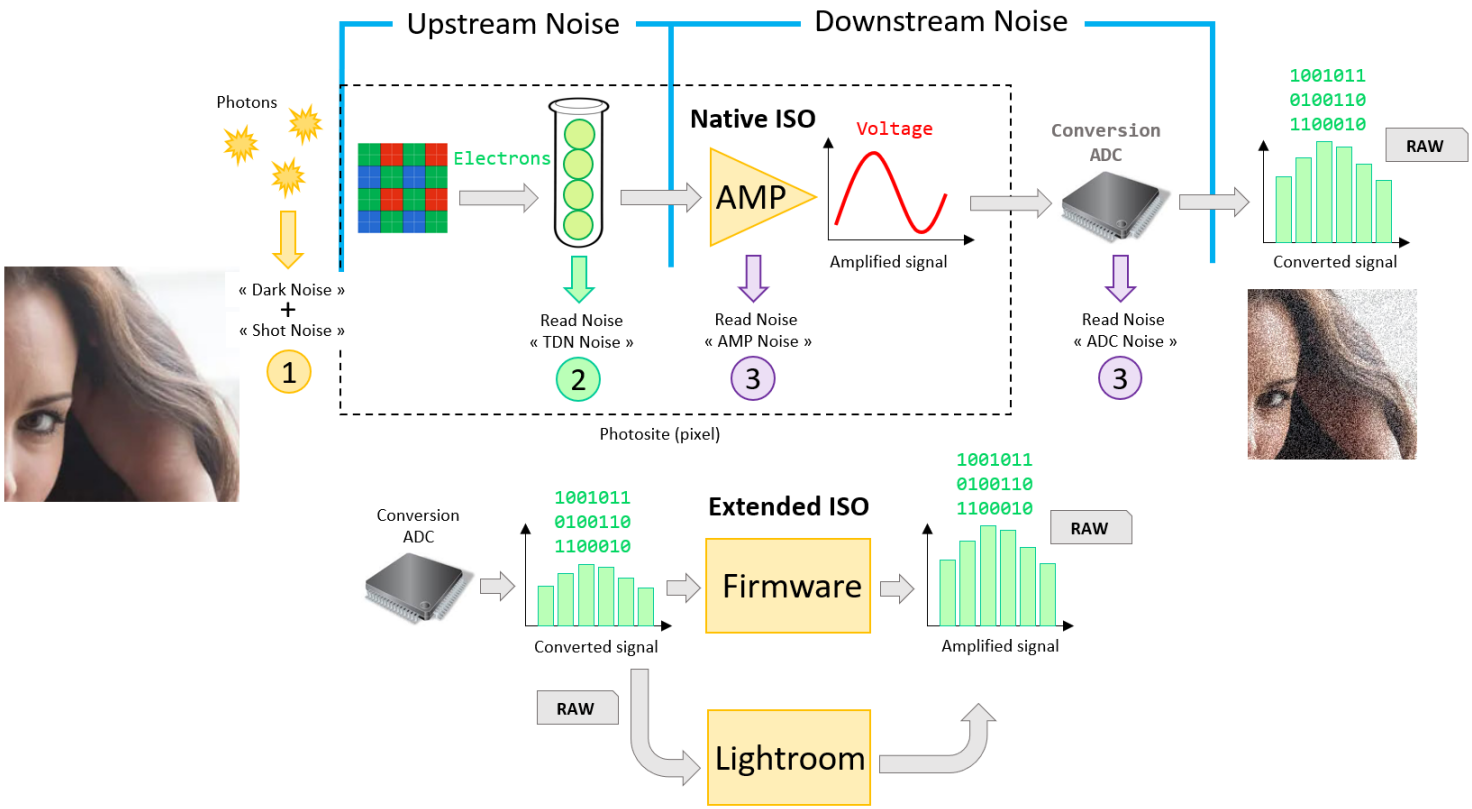
De manière générale, l’effet de l’augmentation des ISO sur une caméra sont les suivants [358] :

— Il y a augmentation de la luminosité globale de l’image
— Il y a diminution de la dynamic range de l’image (étendue des niveaux de gris)
— A exposition constante (tp, N) la quantité de bruit = “Shot Noise” est constante car elle est déterminée par la quantitié de lumière captée

En général en mode auto et semi-auto l’augmentation des ISO fait diminuer soit l’ouverture (mode A/Av) soit le temps de pose (mode S/Tv) pour faire rentrer moins de lumière et donc mécaniquement le bruit de l’ADC augmente dans l’image relativement au signal. C’est lorsque le signal est trop faible et proche du bruit (noise floor) que l’image est bruitée, c’est ce qu’il faut éviter.

Avec les caméras ISO-Less sous-exposer une photo donc prise à bas ISO et augmenter la luminosité dans Photoshop produira le même résultat que si la photo avait été prise à ISO plus élevé directement [671, 358]. Ces ISO n’apportent rien sur la qualité du signal capté (SNR) car le bruit ne change pas. En revanche, pour les APN non ISO-Less sous-exposer une photo donc prise à bas ISO et augmenter la luminosité dans Photoshop produira une image très bruitée . En effet, en l’absence de l’application d’un gain ISO, on ne pourra pas de dépasser le bruit de lecture, il sera préférable de prendre l’image au bon ISO dès le départ dans ce cas.

ISO invariance



Credit : J.G. Gricourt

Plus précisément, dans les caméras, l'ISO est produit par de multiples étages d'amplificateurs analogiques qui introduisent du bruit de lecture dès les faibles ISO [358] de même que l'ADC lui-même produira un bruit de lecture. Dans les caméras ISO invariantes, le bruit de lecture est négligeable et donc relever le signal en post traitement ne révélera pas de bruit supplémentaire.

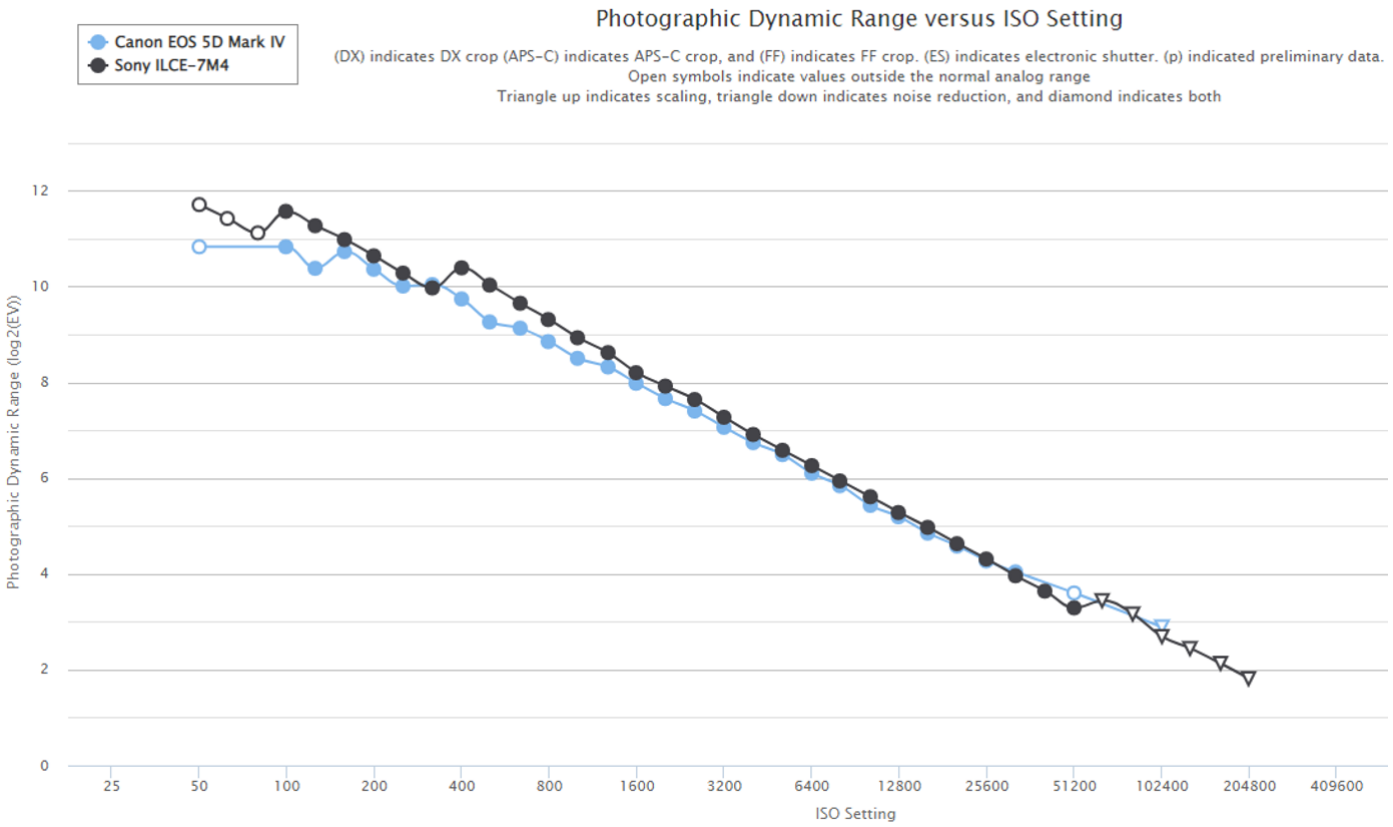
L'ADC doit avoir une résolution la plus élevée possible afin de mieux séparer le bruit et le signal lorsque ce dernier est faible, en général la résolution est de 14 bits sur les hybrides pour cette raison.

Le mode HCG (High Conversion Gain) de certains capteurs (Sony A7S, Sony IMX420) s'active à partir d'un certain niveau d'ISO (souvent ISO 100) et rend ensuite le capteur ISO invariant sur une certaine plage d'ISO. Un APN possède différentes plages ISO (non communiquées par le fabricant) pour lesquelles La récupération dans les ombres sera la même, plus ces plages sont longues et plus nombreuses plus l'APN sera qualifié d'ISO invariant. Le premier ISO de la plage est appelé "Base ISO". Le but d'activer le HCG est de passer d'un puits à électrons de grande capacité (éclairement extérieur élevé, dynamic range élevé, read noise élevée) à un puits à électrons de plus faible capacité (éclairement extérieur faible, dynamic range faible, read noise faible) [154]. Donc garder ISO 100 lorsque la lumière est faible donnera plus de bruit que si l'on sélectionne le ISO de base du second palier (ex : 400 ISO pour le Sony A7 IV) pour lequel le read noise est plus faible.

Les ISO simulés (ISO étendus) des caméras montrent plus de bruit, car ceux-ci ne sont pas natifs puisqu'ils sont amplifiés par l'amplificateur digital (firmware) bien après la production du signal de lecture par l'ADC, ce sont en général des amplifications extrêmes.

Dans le graphe ci-dessous, la dynamic range diminue lorsque les ISO augmentent :

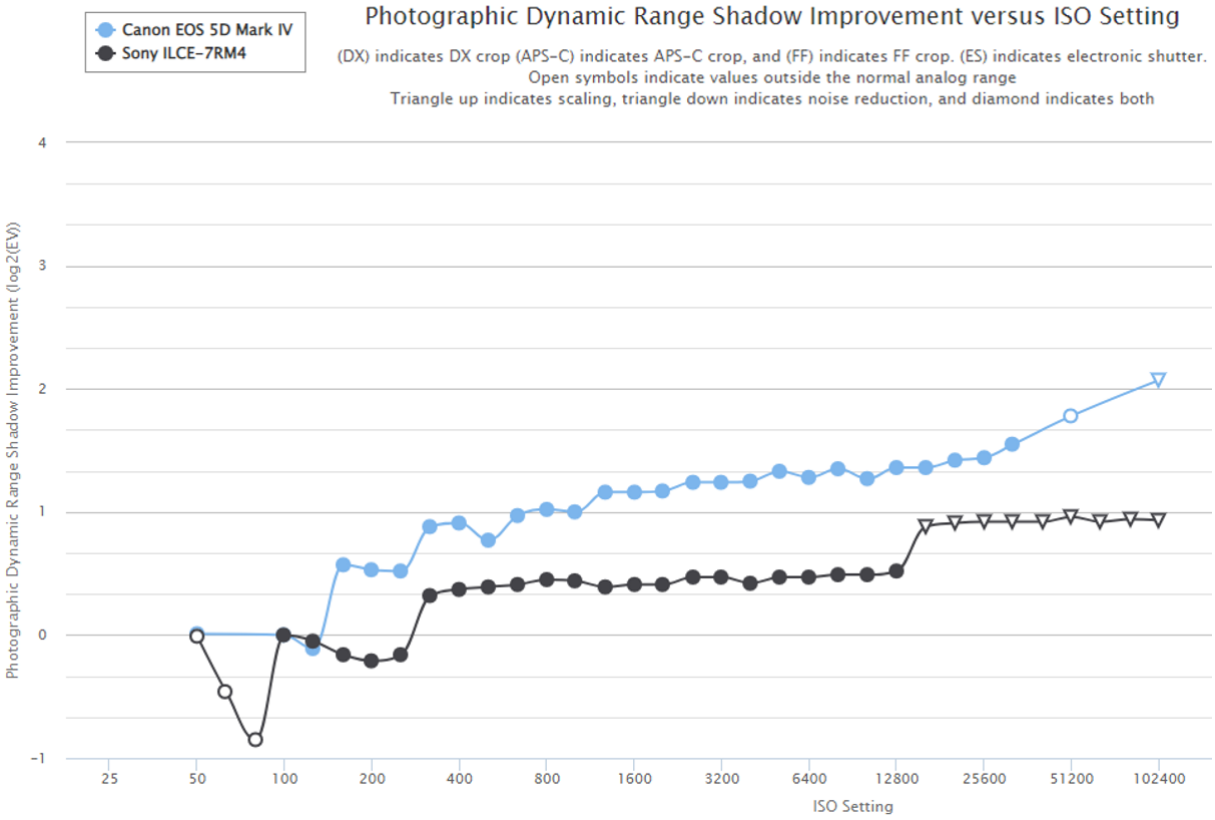
Photographic Dynamic Range versus ISO Setting



Credit : PhotonsToPhotos

Dans le graphe ci-dessous, la zone ISO-Less de la courbe est celle qui est plate :

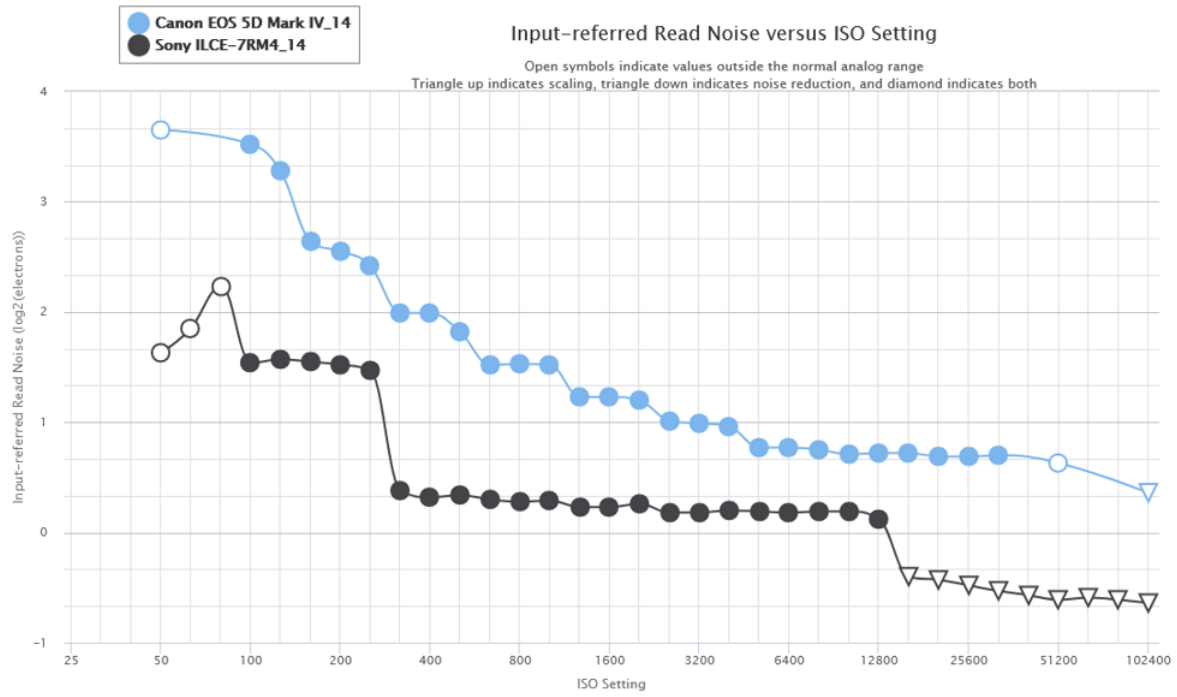
Photographic Dynamic Range Shadow Improvement versus ISO Settings



Credit : PhotonsToPhotos

Dans le graphe ci-dessous, le bruit de lecture (avant application du gain ISO) diminue avec les ISO :

Input Refered Read Noise in DNs versus ISO Settings



Credit : PhotonsToPhotos

Dans le cas du Sony un étage d'amplification est déclenché à 100 ISO puis un autre à 400 ISO.

En photo diurne le bruit augmente avec les ISO, car on est à exposition IL constante (loi de réciprocité) puisque l'ouverture augmente ou la vitesse diminue selon mode de priorité choisi. En photo nocturne, c'est l'inverse, le bruit baisse avec les ISO. En effet, on est à ouverture maximum pour capturer le plus de lumière et temps de pose est constant pour éviter de capturer le mouvement apparent des étoiles. De manière générale, en astrophoto il est préférable d'augmenter les ISO.

DNR signifie "Dynamic Range" désigne l'étendue des niveaux individuels que le capteur peut enregistrer. La DNR intrinsèque du capteur dépend de la FWC et du bruit de lecture du DNR (electrons) = FWC/σ_{Read}. La DNR théorique du pixel sur l'image finale dépend du convertisseur A/D de N bits chargé de convertir la charge d'un pixel en valeur numérique : DNR (niveau) = 2^N

ZWO Asiair Pro désigne un petit boitier autonome du fabricant de camera ZWO. Il remplaçe l'ordinateur portable pour piloter les acquisitions d'image lors des séances d'astrophoto. Il se pilote en Wifi via une application sur smartphone, il est possible de connecter l'alimentation de tous ces accessoires directement sur le boitier, celui-ci peut se fixer sur la monture étant donné son faible poids. L'Asiair Pro stock les images sur une carte SD et supporte tous les capteurs photo de la marque ainsi que la plupart des appareils photo reflex du marché. Pegasus propose un boitier "Pocket Powerbox Advanced Pegasus Astro" avec des fonctionnalité similaires.

Fastar désigne le bloc du miroir secondaire de certain SCT Celestron qu'il est possible de retirer en le dévissant et qui permet de faire de l'astrophoto directe au foyer. L'ensemble du dispositif astrophoto fera passer le SCT d'une ouverture de F/10 ou F/11 à F/2. Ce système en réduisant considérablement les temps de pose, par exemple 30min avec le miroir secondaire équivaut à 30sec sans le miroir secondaire, on divise le temps de pose par $N^2 = (F/D)^2$. De plus, il n'est plus nécessaire d'autoguider le télescope.

Hyperstar désigne un module optique de la société StarArizona à monter à la place du miroir secondaire d'un Schmidt-Cassegrain Celestron. Ce dispositif corrige complètement les aberrations du primaire :

- Aberration de sphéricité
- Courbure de champ
- Coma

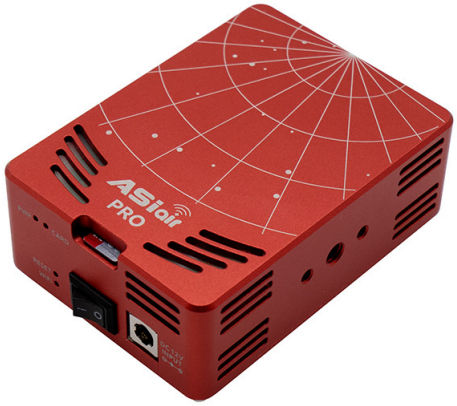
Note : la majeure partie de l'aberration de sphéricité est d'abord corrigée par la lame de Schmidt puis par l'ajout du miroir secondaire en rallongeant la focale effective du télescope.

Hyperstar



Credit : StarArizona

ZWO Asiair Pro



Credit : ZWO

ASCOM désigne une API logicielle commune à plusieurs drivers de matériels dédiés à l'astronomie : monture, caméra, mise au point motorisée... Ce standard de facto rend inter-opérable la plupart des matériels du marché.

Lunette de Guidage où "Autoguidage en Parallèle" ou "Guidescope" ou "Off-axis Guider" désigne une lunette exclusivement utilisée pour guider l'instrument principal lors d'une prise de vue. La lunette couplée à une caméra indépendante est utilisée pour viser une étoile dans le but d'asservir les mouvements de la monture, un ordinateur analyse l'image à intervalles réguliers et donne les ordres de corrections à la monture. Le branchement de la lunette d'autoguidage se fait via la prise ST4 ou USB de la monture.

Diviseur Optique ou "DO" ou "Autoguidage Hors Axe", désigne une pièce optique contenant un prisme et permettant de diviser le flux lumineux et que l'on place au niveau du plan focal de l'instrument. Le diviseur optique est une alternative à la lunette guide, il est donc utilisé en imagerie pour faire de l'auto-guidage hors axe en renvoyant une petite partie de flux lumineux vers un autre caméra. Le logiciel d'acquisition temps réel peut alors corriger la position de la monture en suivant une étoile guide dans le même champ photographié. Le diviseur optique représente une solution alternative à la lunette guide et présente les avantages suivants :

1. Le DO est plus léger qu'une lunette guide
2. L'image est plus lumineuse, car le DO prend le flux provenant de l'ouverture de l'instrument supérieure au diamètre d'une lunette guide

En revanche, le champ perçu par le DO étant le même que celui de l'instrument, il peut être plus difficile de trouver une étoile guide suffisamment lumineuse dans le champ, de plus, il faut un ciel exempt de pollution lumineuse. Lorsque le ciel ne permet pas de trouver une étoile suffisamment lumineuse dans le champ, il vaut mieux passer à la lunette

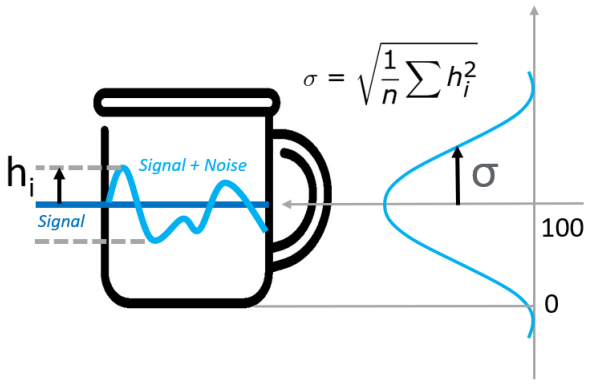
9.3 Le Bruit

Bruit désigne en imagerie l'apparition de pixels parasites dans une photo au moment de son acquisition par un capteur photo, une caméra ou un APN.

Une photo brute sortant du capteur contient une superposition de signaux et du bruits associés à ces signaux. Il n'y a donc pas de signal sans bruit. Le bruit est l'écart en + ou - du signal initial attendu, et si l'on fait la moyenne quadratique de ces

écarts on obtient l'écart type statistique σ.

Mesure du bruit



Credit : J.G. Gricourt

Dans le cas du bruit photonique N_{Shot} et l'écart type statistique sont indissociables par la formule suivante : $\sigma_{\text{Shot}} = N_{\text{Shot}} = \sqrt{\text{Signal}}$, le signal peut être exprimé en nombres d'électrons générés par la conversion des photons collectés. Cependant, le bruit peut être diminué en proportion du signal, car celui-ci n'augmente pas linéairement (mais en racine carrée) lorsqu'on additionne des images par exemple.

Les signaux de l'image et les bruits associés

Signal	Bruit
Signal de la nébuleuse "Nebula Signal"	Bruit photonique "Shot Noise"
Signal de pollution lumineuse "Skyglow Signal"	Bruit photonique "Shot Noise"
Signal de lecture "Read Signal"	Bruit de lecture (TDN, AMP, ADC)
Signal thermique "Dark Signal" = "Dark Current"	Bruit thermique "Thermal Noise", "AMP Glow"
Signal de motifs géométrique "Pattern Signal"	Bruit de motifs géométrique "Pattern Noise"

Le signal Skyglow désigne la diffusion de la lumière artificielle par l'atmosphère et participe au signal de pollution lumineuse.

Le "Read Signal" est un signal composé de :

— TDN Current : la mesure des l'électrons (voltage aux borne du condensateur) contenu dans les photosites
— AMP Current : l'application d'un gain ISO sur le signal (voltage) par un amplificateur
— ADC Current : la conversion du signal analogique en niveaux de gris par le convertisseur ADC

Le bruit de numérisation est un bruit généré par l'ADC et il est dû aux arrondis de la numérisation = "Quantization" directement lié au bit depth utilisé par le capteur : 8 bits, 16 bits, 32 bits ...

Le "Dark Signal" est un signal d'origine thermique :

— Sources de chaleur systématiques souvent introduites par l'électronique produises un signal visible sur le capteur
— Pixels chauds, ce sont des pixels défectueux car ils sont constamment allumés
— Trame de pixels de mauvaise valeurs

Le "Pattern Signal" est un signal parasite systématique correspondant souvent à des défauts d'homogénéité des pixels du

capteur :

- Les pixels morts ou pixels chauds (pixels défectueux)
- Les variations de sensibilités des pixels (zones plus claires, bandes)
- Les poussières sur le capteur
- Le vignetting de l'optique (voir champ pleine lumière et bafflage)
- Les effets de banding autre que ceux produit par le signal de lecture

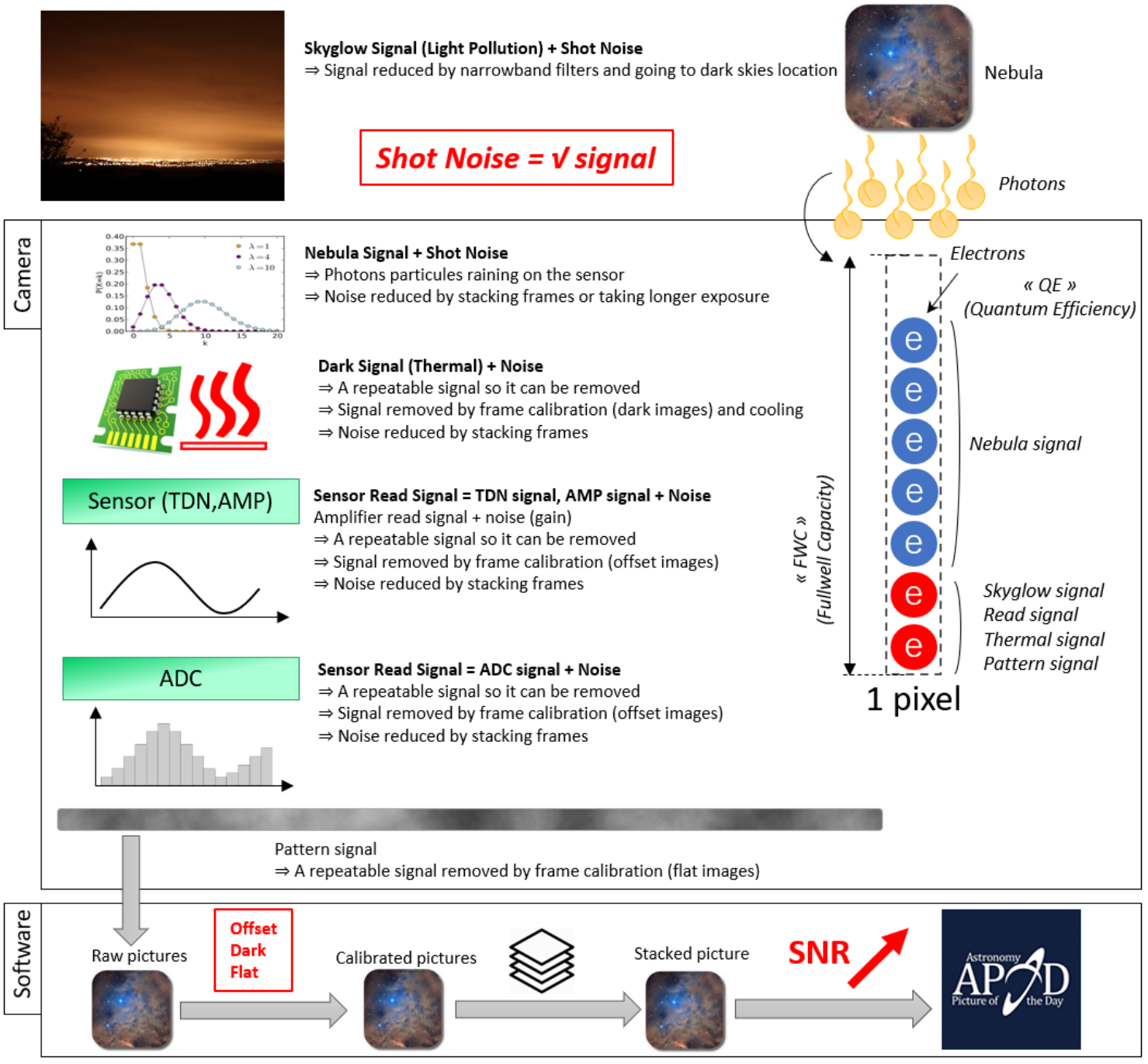
D'autres signaux parasites extérieurs peuvent se superposer à une photo :

- Les rayons cosmiques (Cosmic ray signal) [456]
- Les satellites artificiels
- Les astéroïdes
- Les comètes

Les signaux de nature systématiques : "Read Signal", "Dark Signal" ou "Pattern Signal" peuvent être d'emblée éliminés par la calibration des images brutes, c'est-à-dire par soustraction (ou division) d'images de références Flat, Bias (Offset) et Dark.

Quelque soit l'origine du bruit, celui-ci ne peut être réduit que par moyennage = "Stacking" entre plusieurs clichés de référence lors de la phase de calibration notamment.

Cheminement du bruit dans l'image [303]



Credit : J.G. Gricourt

Le bruit photonique $N_{\text{Sky}} = \sigma_{\text{Sky}}$ suit une loi de Poisson et correspond à l'écart type

Les bruit de lecture $N_{\text{Read}} = \sigma_{\text{Read}}$ suivent à peu de choses près une loi Gaussienne et correspond à à l'écart type. Le bruit de lecture est quasi constant avec le temps de pose.

Le signal global de l'image vaut : $S = S_{\text{Sky}} + S_{\text{Thermal}} + S_{\text{Read}}$

Si on double le temps de pose le signal devient [130] : $S_2 = 2 \times S_{\text{Sky}} + 2 \times S_{\text{Thermal}} + \sigma^2_{\text{Read}}$ où $S_{\text{Read}} = \sigma^2_{\text{Read}}$

Le bruit global compté en nombre d'électrons N vaut [130, 131, 132, 572, 412, 97] :

$$N^2 = \sigma^2_{\text{Sky}} + \sigma^2_{\text{Thermal}} + \sigma^2_{\text{Read}}$$

Note : $\sigma_{Thermal} = TN_{Thermal} \times tp$ où TN = le nombre d'éléctrons par seconde générés par le bruit thermique.

Ici, on confond le bruit photonique de la nébuleuse sujet de la photo avec le bruit photonique de la pollution lumineuse, car ils ont de mêmes natures sous le nom "Sky".

Le signal (et le bruit associé) de nature systématique peut être d'emblée éliminé par la calibration des images brutes, c'est-à-dire par soustraction (ou division) d'images de références Flat, Bias (Offset) et Dark.

Le signal peut être augmenté relativement au bruit par :

1. En empilant = "Stacking" des images brutes (fichiers .fit) calibrées, ce qui moyennera le shot noise. Ainsi, le signal tombera toujours au même endroit sur le capteur contrairement au bruit, ce qui signifie que son intensité se retrouvera décuplée dans l'image résultante alors que le bruit tombera au hasard d'une image à l'autre.
2. En augmentant le temps de pose pour obtenir plus de signal, le bruit augmentera aussi, mais moins vite (en racine carrée)
3. En diminuant le rapport F/D de l'instrument pour densifier les photons arrivant sur le capteur pour augmenter le signal (mais aussi au détriment de la résolution)
4. En utilisant une caméra avec un meilleur rendement quantique.
5. En utilisant des filtres LPR pour diminuer le Skyglow ou des filtres spécifiques (OIII, $H\alpha$) pour ne capturer que le signal de la nébuleuse en filtrant les autres signaux
6. En refroidissant le capteur pour diminuer le signal Dark (et son bruit)

De manière générale, le bruit total est d'autant plus important que :

1. Le temps de pose est long
2. La température ambiante est élevée
3. Les pixels sur le capteur sont petits
4. Le QE du capteur est faible.

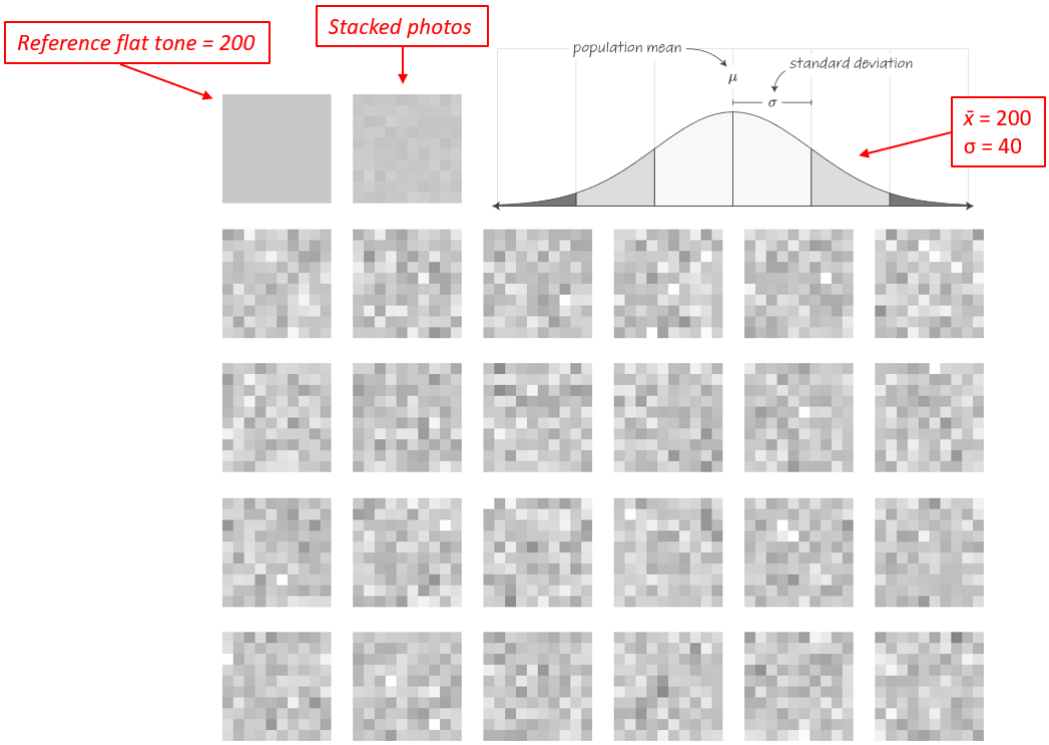
Le bruit photonique est moins visible lorsque les ISO augmentent, cependant en photographie diurne, on constate le contraire, car en mode auto ou semi-auto l'APN va compenser en diminuant le temps de pose ou l'ouverture et donc en diminuant le signal et donc augmenter relativement le bruit [358].

Exemple d'empilement d'image :

Ici une série de 24 photos d'une scène représentée par une teinte plate = 200 (sur 8 bits) soit 78% de gris. On réalise alors 24 photos toutes affectées par du bruit. Le bruit calculé suit une distribution normale autour de la moyenne = 200. On réalise ensuite la moyenne de toutes les photos pour obtenir une photo finale. On constate que la teinte de la photo moyennée

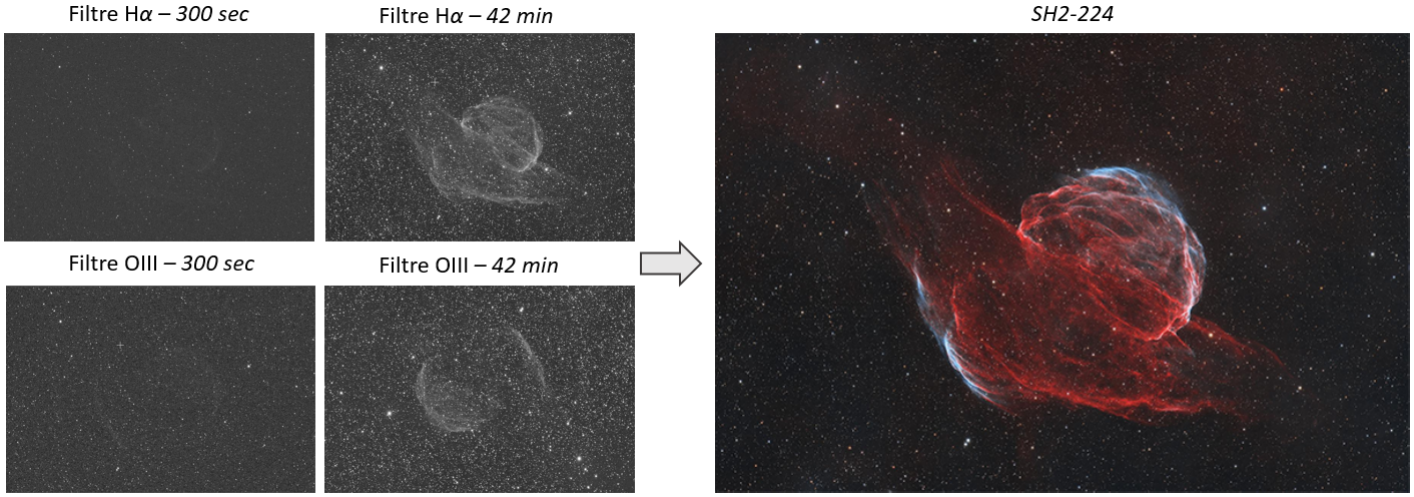
est très proche de la teinte originale de la scène de référence. Si on réalise la même procédure avec une photo couleur on constatera aussi que l'image finale moyennée sera presque complètement débarrassée du bruit.

Stacking



Credit : J.G. Gricourt

Stacking



Credit : Northern France Remote

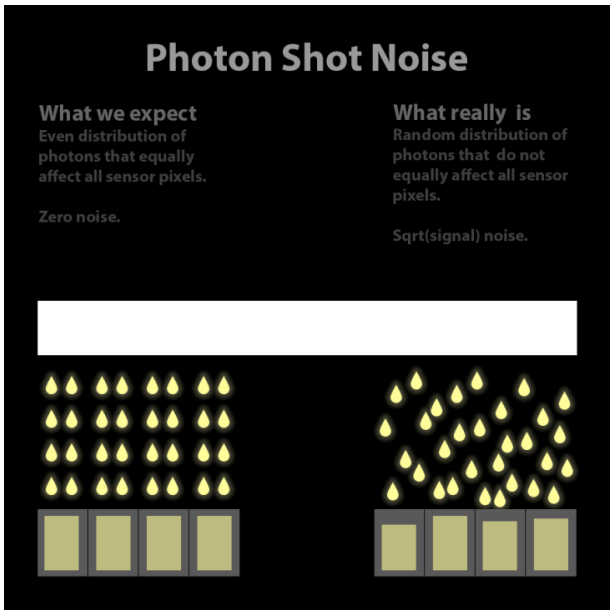
Le temps total de pose vaut : tp = $\sum_{n=1}^{N} tpu$ = pose unitaires

Bruit photonique ou "Shot Noise" ou "Photon Noise" ou "Bruit Quantique" ou "Bruit de Grenaille" ou "Bruit Photonique" désigne le bruit dont le signal résulte de l'arrivée aléatoire des photons sur les pixels photosensibles du capteur [117]. Chaque pixel activé produit alors une certaine quantité d'électrons qui après lecture et conversion donneront en une valeur

d'ADU sur l'image.

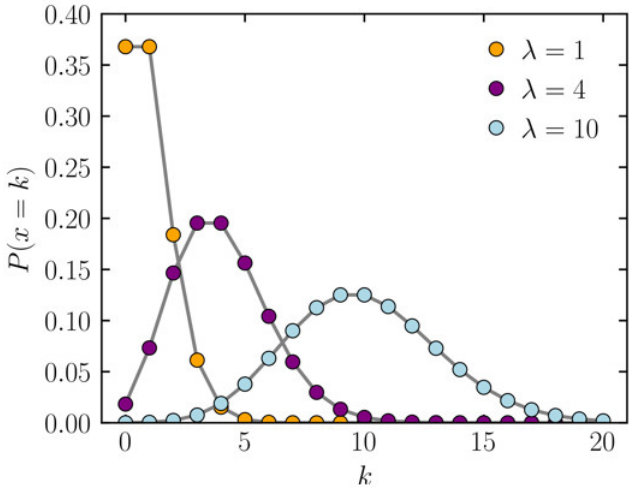
Signal à composante temporelle : un capteur soumis à flux constant de 1000 photons / sec ne reçoit pas exactement 1000 photons chaque seconde, au global, c'est parfois plus et parfois moins.

Signal à composante spatiale : chaque pixel d'un capteur de 1000 pixels soumis à flux constant et uniforme de 1000 photons / sec ne reçoit pas précisément 1 photon chaque seconde, c'est parfois plus et parfois moins.



Credit : Jon Rista

L'exposition des pixels suit naturellement une loi de Poisson qui mesure à chaque seconde la quantité de photon reçu ou d'électrons issues de la conversion de chaque photon reçus. La loi indique donc la probabilité de recevoir n photons sur 1 pixel pendant une exposition de durée Δt connue à l'avance connaissant la moyenne λ de photons reçus sur le $P(X = n) = \frac{\lambda^n}{n!}e^{-\lambda}$. Si en moyenne un pixel soumis à un flux de photon est converti en $\lambda = \bar{x} = 100$ électrons et où $\sigma = \sqrt{\bar{x}} = 10$ electrons est l'écart type et représente le bruit dans le cas de cette loi de probabilité. C'est avec 68% de confiance que l'on peut dire que le nombre de photons capturés par pixel se trouve dans l'intervalle $[\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma]$. Le pic de la courbe est centré sur λ le nombre moyen d'électrons générés par pixel. Ce phénomène est essentiellement observable en très basse luminosité où le nombre de photons capturés n'est pas très important relativement au bruit. Sur une scène très bien éclairée, le nombre de photons arrivant sur le capteur étant très important, la loi de Poisson peut être approchée par une loi Normale où $\sigma = \sqrt{\lambda}$ et ce dès que $\lambda > 5$. La caractérisation du bruit selon la loi de Poisson se calcule par la formule suivante : Bruit photonique $= \sigma = \sqrt{\text{Signal}}$ où Signal = nombre moyen de photons capturés ou encore nombre moyen d'électrons issus de la conversion [409].



Credit : Wikipedia

On appelle σ le bruit photonique et S le signal :

σ = Total photons incident − Total photons du signal = $\sqrt{\text{S}}$ et cela pour 1 pixel durant un temps de pose tp.

$\sigma \propto \sqrt{tp}$ alors que $\text{S} \propto tp$ = temps de pose.

$\sigma \propto \sqrt{n}$ alors que $\text{S} \propto n$ = nombre de clichés empilés de même temps de pose unitaire.

SNR = Signal/Noise = $\sqrt{\text{Signal}}$

Si l'on part d'un signal S_0 sur une seule image, le signal résultant de l'empilement de n images vaut $S = n \times S_0$ et donc le bruit $\sigma = \sqrt{n} \times \sigma_0$:

Cas : signal initial = 10 electron

Nombre d'image	Facteur de diminution du bruit
4	1/2
25	1/5
100	1/10
200	1/14
1000	1/32

Credit : J.G. Gricourt

Bruit de lecture ou "RON" ou "Readout Noise" ou "Read Noise" ou "Temporal Dark Noise" ou "Courant d'Offset", désigne en imagerie le bruit dont le signal est produit au niveau de l'electronique de traitement du signal. Le signal d'offset était à l'origine un Bias introduite intentionnellement par les constructeurs de capteur afin de ne pas tomber sur des valeurs négatives lors des traitements automatisés des APN [137] ainsi une absence de lumière pouvait produire une valeur positive et non zéro [312].

Ce signal possède 3 origines :

— Le signal lié à la lecture des électrons accumulés dans le well, son bruit : "TDN Noise"

— Le signal lié au gain de l'amplificateur appliqué au signal entrant, son bruit : "AMP Noise"
— Le signal lié à la conversion du voltage en valeur numérique, son bruit : "ADC Noise"

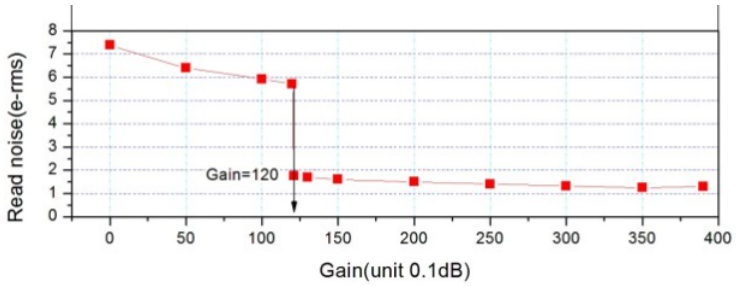
Le signal de lecture est celui recueilli lorsque aucune lumière ne vient frapper le capteur, il se superpose donc au signal de la nébuleuse. Ce signal peut produire des patterns tel que du banding vertical ou des zone d'éclairement différent sur la capteur.

Ce signal se produit en interne dans la caméra indépendamment de l'exposition (quantité de lumière entrante) et de la température extérieure, il définit aussi la capacité intrinsèque du capteur à détecter les faibles contrastes (signaux faibles). À noter que pour un capteur CCD l'ADC est à l'extérieur du capteur alors que pour un capteur CMOS l'ADC est intégré au niveau du capteur. Les CCD avaient un RON de 20 électrons par pixel alors que les CMOS ont un RON de 2 à 1 électron par pixel seulement, donc poser très court donnera toujours suffisamment de signal pour garder un bon SNR. Le bruit de lecture s'exprime en électron RMS (moyenne quadratique) par pixel.

Dans la vaste majorité des CMOS c'est le bruit de l'ADC qui l'emporte, le bruit ADC = "Input-Referred Noise" ou "Code-Transition Noise" [70]. De plus, le bruit de lecture diminue brutalement à partir d'un certain niveau de Gain du capteur CMOS (Sony) [566, 126] mais cela se fait au détriment de la dynamique du capteur.

Ce bruit étant le plus faible de tous, il ne joue un rôle significatif sur le SNR que lorsque le temps de pose est très court, par exemple en imagerie planétaire (cependant les caméras dédiées au planétaire réduisent ce bruit) ou en Visuel Assisté, une technique d'imagerie du ciel profond montrant des images en quasi live.

Camera ZWO ASI 294

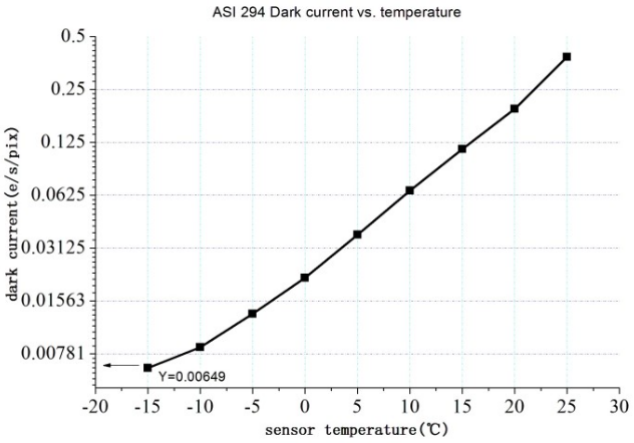


Credit : ZWO

Bruit thermique ou "Dark Current Noise" ou "Dark Noise" ou "Thermal Noise", désigne en imagerie un bruit dont le signal est de nature systématique et d'origine thermique. Le signal thermique augmentent avec la température ambiante et le temps de pose. Souvent ce signal provient d'un composant interne de la camera qui chauffe, le plus important est l'ADC. A l'époque des camera CCD on l'appelait le "AMP Glow" le signal thermique généré par l'amplificateur de sortie du capteur alors les coins du capteur proches des composants plus chauds devenaient plus clairs.

Le bruit thermique s'exprime en électron RMS (moyenne quadratique) par pixel. On peut aussi le réduire en refroidissant le capteur.

Camera ZWO ASI 294



Credit : ZWO

Les derniers capteur Sony IMX refroidis présentent un bruit thermique plus faible que le bruit de lecture [313] contrairement à ce qu'indique l'auteur, il faut continuer à réaliser des Dark lors de la calibration car les capteurs peuvent présenter bien d'autres défauts (pixels chauds, trame de pixels de mauvaise valeurs).

Bruit de numérisation ou "Quantization Noise" désigne le bruit généré par la nature discrète de la mesure au moment de la conversion ADC, les signaux faibles sont le plus affectés. Ce bruit est une compsante du bruit de lecture "ADC Noise".

Le signal est numérisé par un capteur sur un nombre fini de valeurs et l'erreur d'arrondi qui en résulte produit le bruit de numérisation. À une valeur Q donnée par le capteur correspond un ensemble de valeur analogique Av, l'erreur $E = Q - Av$ vaut 0 lorsque $Q = Av$ et de manière générale : $-Q/2 \leq E \leq +Q/2$. Lorsque le signal répond à une distribution uniforme à l'intérieur de $[-Q/2, +Q/2]$ le SNR se calcule par : $\text{SNR} = 6.02 \times N(bits)$ où N est le nombre de bit du convertisseur DAC. Ce bruit correspond à l'aliasing sur le niveau de l'intensité des pixels alors qu'un sous-échantillonnage provoque de l'aliasing sur la répartition spatiale des pixels (repliement du spectre). Pour rendre ce bruit de quantization moins visible on peut ajouter du "Dithering" donc introduire intentionnellement du bruit blanc à bas niveau dans le signal analogique reconstruit.

Rapport contraste / bruit ou "Contrast To Noise Ratio' désigne une mesure de la qualité de transmission du contraste dans une photo [76]. Sa formule est : $\text{SNR} = C/N = (S_{\text{nebula}} - S_{\text{background noise}})/\sqrt{\sum_i^n \sigma_i^2}$ où $\sqrt{\sum_i^n \sigma_i^2} = S_{\text{nebula}} + S_{\text{background noise}} + S_{\text{Thermal}} + \sigma^2_{\text{Read}}$. On peut obtenir une image de la nébuleuse avec un SNR élevé et donc excellent, mais dont le CNR est faible à cause du bruit du fond du ciel.

Rapport signal / bruit ou "Signal To Noise Ratio" ou "SNR" désigne une mesure de la qualité de transmission du signal dans une photo. Le SNR exprimé en décibel (db) se calcule comme $\text{SNR}_{db} = 20 \times Log(\text{Signal/Noise}) = \text{Signal}/\sqrt{\sum_i^n \sigma_i^2}$. Le bruit est avant tout un signal qui vient s'ajouter au signal original.

En astrophoto lorsque toutes les autres sources de bruit son éliminée (par le calibrage) il reste à augmenter le SNR pour voir apparaitre l'image de la nébuleuse et pour cela, il faut acquérir plus de signal, on peut soit [130] :

— Empiler plusieurs prises de vues courtes (stacking des images brutes)
— Exposer plus longtemps chaque prise de vue
— Diminuer de rapport F/D de l'instrument (la focale en général)
— Utiliser des caméras avec un QE élevée (proche de 100%) pour convertir plus de photons en électrons

— Utilisant des caméras à gros pixels donc dotés d'une FWC élevée pour permettre d'engranger plus d'électrons afin de dépasser le bruit et maximiser le SNR

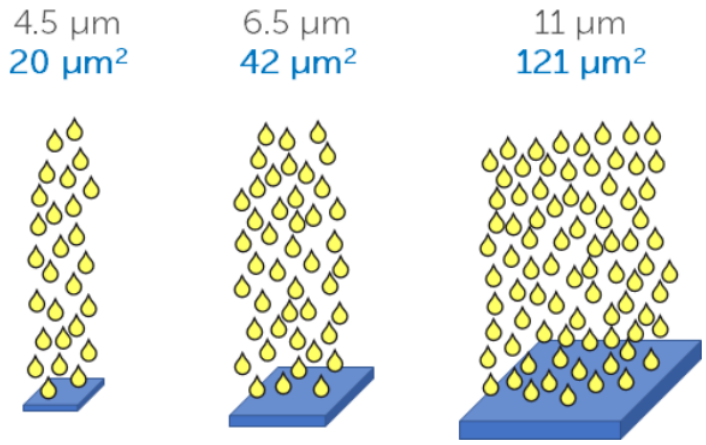


Figure 2: Larger sensors can detect more signal from the sample. A 6.5 µm pixel can collect 2x the signal as a 4.5 µm, while an 11 µm pixel can collect 6x as much.

Credit : Teledyne Photometrics

Le SNR augmentera de 41% dans tous les cas si :

— On double le nombre de photos bruts empilées
— On double le temps de pose

On diminue le rapport F/D pour augmenter l'exposition de 1 EV (on double le flux lumineux par unité de surface du capteur)

À noter qu'en augmentant le temps pose, le signal augmente plus vite que le bruit, car ce dernier augmente en racine carrée seulement alors que le signal connait une augmentation linéaire.

Avec la technique du stacking le SNR augmenter avec le nombre de poses utilisées

SNR $= \sqrt{n}$, où n = le nombre de clichés empilés

Le SNR à l'extrême lorsque le pixel est saturé dépend de la FWC du capteur

$\text{SNR}_{\text{max}} = \sqrt{\text{FWC}}$ [460].

Pour résumer : "One photon is noise, two photons are information" [659].

Cas du stacking d'image brut : lorsqu'on divise l'exposition en plusieurs images, on augmente mécaniquement la part du bruit de lecture σ_{Read} car il s'ajoute sur chaque image une quantité fixe. Une fois les poses empilées, le signal vaut $\text{Sky} = \text{Sky}_0 + \text{Sky}_0 + ... + \text{Sky}_0 = n \times \text{Sky}_0$ et le signal associé au bruit de lecture $n \times \sigma^2_{\text{Read}}$ [443, 444]. Le SNR vaut :

$$\text{SNR} = \frac{n \times \text{Sky}_0}{\sqrt{n \times \text{Sky}_0 + n \times \sigma^2_{\text{Read}}}}$$
$$\text{SNR} = n/\sqrt{n} \times \frac{\text{Sky}}{\sqrt{\text{Sky}_0 + \sigma^2_{\text{Read}}}}$$
$$\text{SNR} = \sqrt{n} \times \frac{\text{Sky}}{\sqrt{\text{Sky}_0 + \sigma^2_{\text{Read}}}}$$
$$\text{SNR} = \sqrt{n} \times \text{SNR}_{\text{unitaire}}$$

En augmentant le nombre d'images, on augmente bien le SNR de $\sqrt{n}$. Aussi, il vaut mieux réaliser des poses courtes plutôt qu'une unique longue pose pour ne pas prendre en compte les défauts de suivi, le passage de satellites, la turbulence ...

Voir aussi la règle dite des 3 sigmas pour bien choisir le temps pose unitaire.

Note : ici on fait abstraction du bruit thermique normalement bien géré par une caméra bien refroidie et on exprime les différentes valeurs en nombre d'électrons.

Le même calcul peut être fait lorsqu'on augmente le temps de pose ou que l'on diminue le rapport F/D, la lumière arrivant par unité de surface du capteur est multiplié par un facteur n et dans ces 2 derniers cas lorsqu'on n'accumule pas les photos brutes, le bruit de lecture σ^2_{Read} n'est pas démultiplié (un seul cliché ici) son influence est alors divisée par le facteur n sur la nouvelle image.

$$\text{SNR} = \frac{n \times \text{Sky}_0}{\sqrt{n \times \text{Sky}_0 + \sigma^2_{\text{Read}}}}$$
$$\text{SNR} = \sqrt{n} \times \frac{\text{Sky}}{\sqrt{\text{Sky}_0 + \sigma^2_{\text{Read}}/n}}$$

9.4 L'imagerie

9.4.1 Généralités

FWHM signifie "Full Width at Half Maximum" en imagerie désigne l'intensité lumineuse d'une étoile sur la photo, celle-ci forme alors courbe de distribution de Gauss (en cloche).

Lorsque rien n'affecte le rendu d'un instrument celle-ci vaut : $\text{FWHM} = 1.02 \times \lambda \times \frac{F}{D}$ donc, $\text{PSF} = 2.39 \times \text{FWHM}$ [713]

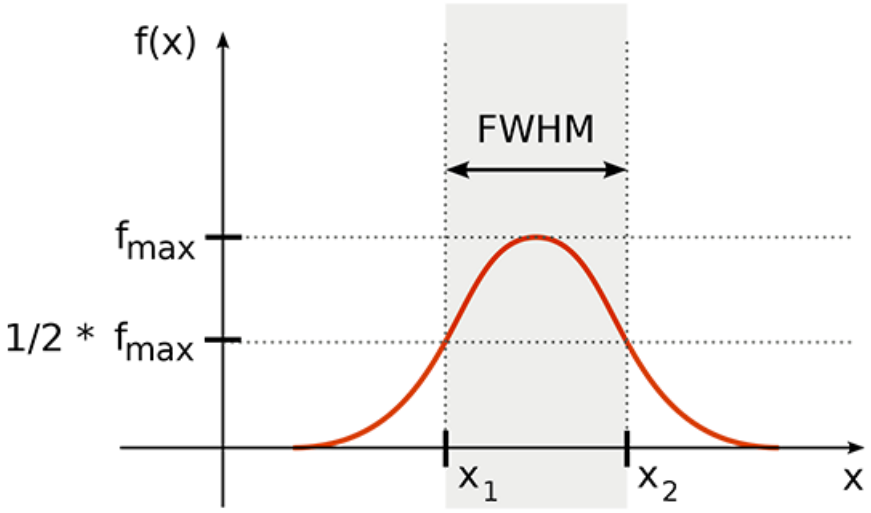
Selon la formule précédente, la mesure de la dimension de la FWHM permet de déterminer la résolution angulaire capturée sur la photo. On peut ensuite en déduire la résolution angulaire apparente θ en arc-second de l'étoile : $\theta = \text{FWHM} \times e$. La FWHM permet aussi d'apprécier la qualité de la MAP en cours d'acquisition d'une image, celle-ci doit être la plus serrée possible.

La FWHM sera plus petite dans les cas suivant :

— Bon seeing

— Bon suivi
— Optique avec grand diamètre
— Optique corrigée pour l'aberration sphérique (absence de TDE ou TUE pour les miroirs)
— Instrument avec faible obstruction

L'étalement de la figure de Airy avec l'obstruction augmente la largeur de la FWHM [331].



Credit : Wikimedia Commons

Plus l'échantillonnage augmente, plus la FWHM s'étale sur la photo, mais sa dimension angulaire reste constante, du moins en théorie. En pratique, la mesure précise de la résolution angulaire du ciel ou seeing R à partir de la mesure de la FWHM en pixels sur une photo nécessite un échantillonnage suffisant.

Pour comparer la luminosité de 2 photos de même temps de pose il suffit de faire le rapport des FWHM en pixels :

$L_{2/1} = \text{FWHM}_2/\text{FWHM}_1$.

La FWHM d'une courbe de Gauss d'écart type σ (somme RMS = quadratique des écarts à la moyenne) est donnée par :

$\text{FWHM} = 2 \times \sqrt{2ln2} \times \sigma = 2.355 \times \sigma$ [307].

L'erreur RMS du suivi est donné par le logiciel de pilotage de la monture : σ_{suivi}

L'erreur RMS du seeing : $\sigma_{\text{seeing}} = \text{FWHM}_{\text{Seeing}}/2.355$ [788, 789].

L'erreur RMS de l'instrument la figure de Airy approchée par une courbe de Gauss : $\sigma_{\text{psf}} = 50/D$ où D est le diamètre de l'instrument en mm

L'erreur RMS sur la photo (arcsec) : $\sigma^2_{\text{photo}} = \sigma^2_{\text{seeing}} + \sigma^2_{\text{suivi}} + \sigma^2_{\text{aberrations instrument}}$

La FWHM photo (arcsec) : $\text{FWHM}_{\text{photo}} = 2.355\sqrt{\sigma^2_{\text{seeing}} + \sigma^2_{\text{suivi}} + \sigma^2_{\text{errations instrument}}}$

Afin d'obtenir des étoiles relativement ronde (et pas filée) on peut empiriquement observer la règle suivante : $\sigma_{\text{suivi}} \leq$

$0.25 \times \sigma_{\text{seeing}}$ [362].

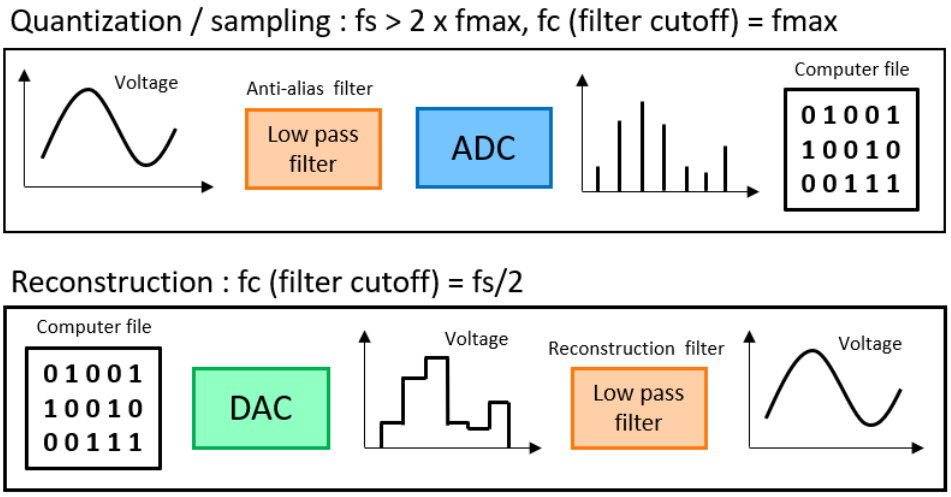
En général en astrophoto du ciel profond on peut négliger l'erreur de suivi et la dimension RMS de la figure de Airy.

Théorème de Nyquist-Shannon Ce théorème fondamental de la théorie mathématique du signal énonce qu'afin de pouvoir reconstruire un signal analogique original à l'identique à partir de sa version échantillonnée via un processus de numérisation il faut impérativement que la fréquence d'échantillonnage f_s du signal soit 2 fois égale à la fréquence maximum $f_{\max}$ contenue dans ce signal qui par ailleurs doit être fini (en durée ou en dimension) : $f_s = 2 \times f_{\max}$.

Pour reconstruire le signal, il faut :

1. Passer le signal échantillonné dans un convertisseur DAC
2. Passer le signal en sortie du DAC dans un filtre analogique passe bas de fréquence de coupure idéalement : $f_c = f_s/2$.

Principe de reconstruction d'un signal



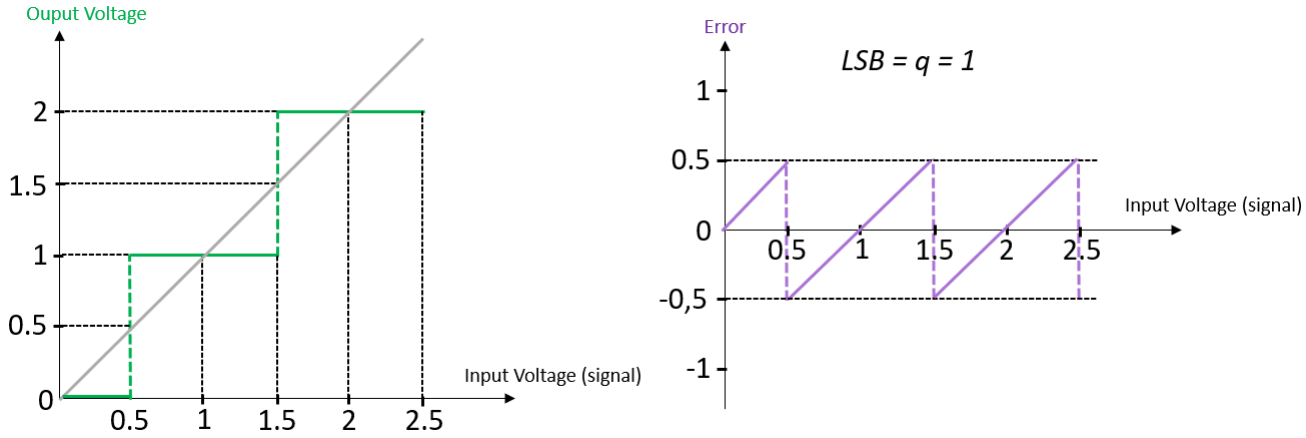
Credit : J.G. Gricourt

Le filtre passe bas ou filtre "Reconstruction Filter" permet de couper les fréquences supérieures à la fréquence d'échantillonnage f_s mais ce filtre idéal n'existe pas, en général, la fréquence de coupure préconisée est celle où le signal est atténuée de 3 dB. Donc un vrai filtre laisse quand même passer des fréquences qui ne sont pas dans le signal original (qui avaient été introduits par la conversion du DAC). Il faut donc prévoir une petite marge en prenant une fréquence f_s un peu au-dessus de $2 \times f_{\max}$, par exemple pour les CD audio reproduisant le spectre 0 - 20 KHz, on prendra $f_s = 2 \times (20\text{kHz} + 2\text{kHz}) = 44\text{kHz}$.

Le nombre de bit utilisé = "Bit Depth" pour échantillonner intervient dans le niveau de bruit de quantization qui sera présent dans le signal analogique reconstruit. Plus la résolution du signal numérique est basse, ex 8bits vs 16 bits plus le "Noise Floor" du signal analogique sera élevé. Pour rendre ce bruit de quantization moins visible on peut ajouter du "Dithering" donc introduire intentionnellement du bruit blanc à bas niveau dans le signal analogique reconstruit.

Pour calculer rapport signal / bruit il faut déterminer la moyenne RMS du signal lui même et la moyenne RMS des écarts (erreur) du signal de sortie par rapport au signal d'entrée que l'ADC est sensé reproduire.

La conversion ADC et l'erreur de quantization



Credit : J.G. Gricourt

La moyenne RMS = σ d'un signal V (formule générique) : $V_{\text{RMS}}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T V^2(t).dt$

La moyenne RMS = σ d'un signal V sinusoide : $V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$

Le LSB = "Least Significant Bit" = q.

La moyenne RMS = σ du signal : $\sigma_{\text{signal}}^2 = \frac{(q\times 2^N)^2}{8}$ où $V_{\max} = \frac{q\times 2^N}{2}$

La moyenne RMS = σ de l'écart (erreur) : $\sigma_{\text{noise}}^2 = \frac{q^2}{12}$

Le SNR se calcule comme suit [793] :

$$\begin{aligned}
\text{SNR} &= 10 \times log\frac{\sigma_{\text{signal}}^2}{\sigma_{\text{noise}}^2} \\
\text{SNR} &= 10 \times log(\frac{(q\times 2^N)^2 \times 12}{q^2 \times 8}) \\
\text{SNR} &= 10 \times log([2^N]^2 \times 1.5) \\
\text{SNR} &= 10 \times [log([2^N]^2) + log1.5)] \\
\text{SNR} &= 10 \times [2Nlog2 + log1.5)] \\
\text{SNR} &= 20 \times Nlog2 + 10 \times log1.5] \\
\text{SNR} &= 6.02 \times N + 1.76
\end{aligned}$$

Finalement : SNR = $6.02 \times N(bits) + 1.76db$ où N est le nombre de bit du convertisseur DAC [793].

Calcul de "Effective Number of Bits" = ENOB compte tenu d'un certain niveau de SNR réel de l'ADC, SINAD = "Signal to Noise and Distorsion Ratio" : ENOB = $\frac{\text{SINAD}-1.76db}{6.02}$

Si l'on échantillonne à une fréquence trop basse des fréquences supérieures du signal original seront ignorées par l'échan-

tillonnage, ce qui dégradera le signal reconstruit à la fin, ce qui produira l'effet d'aliasing. L'aliasing est visible sur les images mal échantillonnées sous forme de pixels ou effets d'escalier. Le seul moyen de s'en débarrasser est de repasser le signal dans un filtre passe bas afin d'atténuer ces hautes fréquences et rendre l'image plus lisse mais moins fidèle [729] [2].

Pour éviter de ne pas échantillonner à partir d'une fréquence max erronée on peut pré-filtrer le signal en entrée avec un filtre passe bas ou filtre "Antialias Filter" = Antirepliement = Filtre Antialiasing qu permet de couper les fréquences supérieures à une fréquence choisie qui sera alors la fréquence max à considérer pour l'échantillonnage.

Principe de reconstruction d'un signal

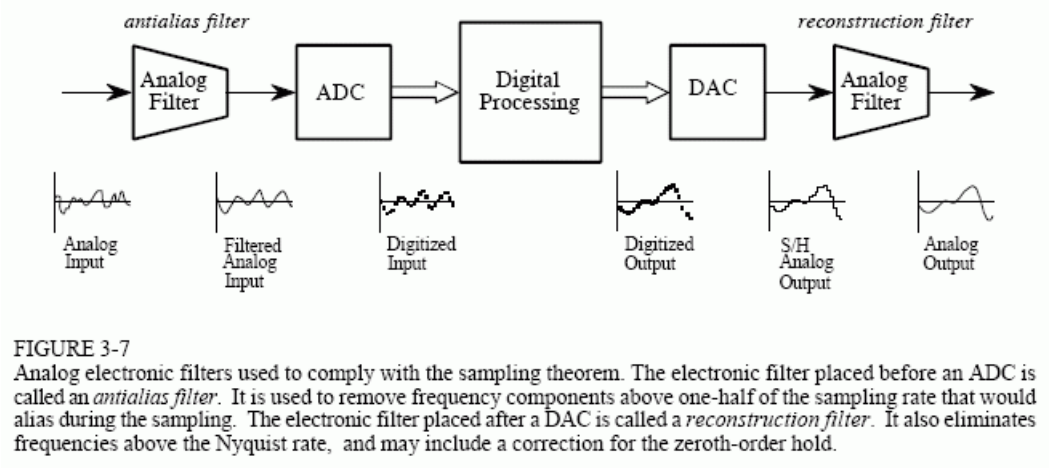
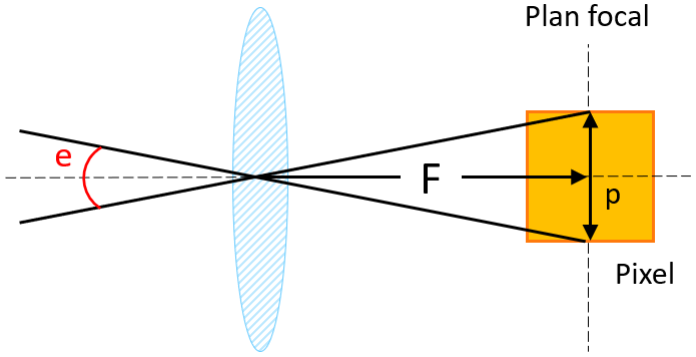


FIGURE 3-7
Analog electronic filters used to comply with the sampling theorem. The electronic filter placed before an ADC is called an *antialias filter*. It is used to remove frequency components above one-half of the sampling rate that would alias during the sampling. The electronic filter placed after a DAC is called a *reconstruction filter*. It also eliminates frequencies above the Nyquist rate, and may include a correction for the zeroth-order hold.

Credit : Shangdawei

Echantillonnage désigne le calcul du champ angulaire (en arcsec) capturé par 1 seul pixel du capteur photo. Au foyer, l'échantillonnage nominal d'un capteur dépend de la dimension du pixel p en μm et de la focale F en mm : $e = 206 \times p/F$ où e est le champ angulaire exprimé en arcsec [39].

L'échantillonage



Credit : J.G. Gricourt

2. Wikibooks : Sampling and Reconstruction

$$\tan(e/2) = \frac{p/2}{F} \quad \text{or si l'angle e est très petit au regard de la hauteur du pixel = p}$$
$$e_{\text{rad}} = \frac{p_{\text{meter}}}{F_{\text{meter}}}$$
$$e_{\text{arcsec}} = 206265 \times \frac{p_{\text{meter}}}{F_{\text{meter}}}$$
$$e_{\text{arcsec}} = 206265 \times \frac{p_{\mu m}/1000000}{F_{\text{mm}}/1000}$$
$$e = 206 \times \frac{p}{F}$$

Pour un capteur couleur il faut compter des pixels virtuels plus gros de 20 à 30% que les pixels effectifs (chacun code une couleur différente). Le champ couvert par un capteur de diagonale L est donné par : Field $= 2 \times atan(L/2F)$. Au passage la dimension linéaire de la figure de Airy vaut $L_{\text{Airy}} = R_{\text{radian}} \times F$ où $R_{\text{arcsec}} = \frac{138}{D}$ pour une longueur d'onde de référence de $\lambda = 550nm$.

Le choix de l'échantillonnage est un compromis entre la résolution (impact le planétaire) capturée et quantité de lumière capturée (impact le SNR en ciel profond) par unité de surface.

Il faut donc doser l'étalement de l'image sur le capteur. Par exemple avec une longue focale (ou de petits pixels) l'étalement est plus important, l'image va perdre en luminosité (sur-échantillonnage) et imposer un temps de pose trop élevé, avec un courte focale (ou de grand pixels), l'image va perdre en résolution (sous-échantillonnage) et ne pas utiliser le plein potentiel du capteur.

Il y a aussi d'autres facteur externe, comme le seeing, le pouvoir séparateur de l'instrument, ou l'erreur périodique de la monture qui vont tous limiter la résolution atteignable quelque soit le capteur et la taille des pixels.

Il existe aussi 2 facteurs qui diminueront la résolution nominale de l'instrument mesuré par R_i (en arcsec) :

1. Le seeing R (en arcsec) mesuré par R_s (en arcsec)
2. La qualité du guidage mesuré par R_g (en arcsec)

Lorsque a valeur de R (max) est établie on obtient la taille des pixels idéale (e = R/2) : $p = F \times \frac{R}{618}$. Si la taille des pixels du capteur utilisé est trop éloignée de cette valeur et pour avoir un meilleur échantillonnage sur la photo il faut donc jouer soit sur la focale de l'instrument (réducteur / barlow) soit changer la matrice des pixels du capteur (taille de pixels).

Si on part d'une situation idéale où $R = R_i$ et alors la taille des pixels idéale vaut : $p = F \times \frac{R}{618}$

Résolution max	Constatation	Mesures correctives
$R_s < R_g < R = R_i$	L'instrument est adapté ...	Aucunes ..
$R_i << R = R_s$	— Le seeing du ciel est trop faible	— Diminuer le diamètre pour que $R_s < R_i$ (diminuer R_i) — Utiliser un réducteur de focale — Utiliser des pixels plus gros
$R_s << R = R_i$	— Le seeing du ciel est élevé — L'instrument n'est pas à température ambiante	— Acclimater l'instrument à la température ambiante — Augmenter le diamètre pour que $R_s < R_i$ (augmenter R_i) — Utiliser une barlow — Utiliser des pixels plus petits
$R_i << R = R_g$	— La monture est inadéquate (trop légère) — Le temps de pause trop long	— Utiliser l'autoguidage — Diminuer le temps de pause — Diminuer le diamètre pour que $R_g < R_i$ (diminuer R_i) — Utiliser un réducteur de focale — Utiliser des pixels plus gros

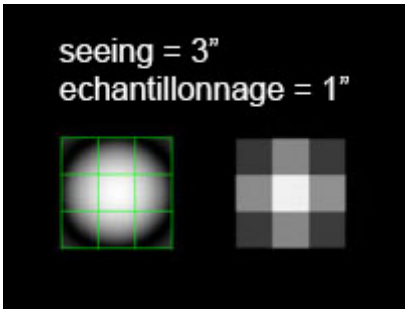
En ciel profond c'est soit le seeing soit l'erreur périodique de la monture qui est le facteur limitant dans la résolution des photos. En planétaire on peut contrer le seeing ou l'erreur périodique de la monture en réalisant des poses ultra-courtes car les objets photographier sont suffisament lumineux.

Selon la loi de Nyquist-Shannon il est préconisé d'échantillonner un signal a minima à $e = R/2$, c'est la règle de base de l'échantillonnage, mais qui devra être affinée par la suite selon les objets imagés.

Attention la loi de Nyquist-Shannon très souvent évoquée en astrophoto est en réalité complètement arbitraire [305, 306] car à aucun moment, on ne cherchera à reconstruire le signal analogique original via un convertisseur DAC. Au final, on ne fera qu'afficher l'image obtenue sur un écran pixelisé donc numérique et non analogique.

Cependant l'idée principale derrière l'échantillonnage est qu'il faut étaler le plus petit détail R permis par l'instrument et le seeing sur au moins un carré de $n \times n$ pixels. Donc 2x2 pixels peuvent convenir toutefois, visuellement, une étoile sera plus esthétique sur un écran si l'on utilise une surface 3×3 pixels, donc en prenant un échantillonnage $e = R/3$.

L'échantillonnage



Credit : Frédérique Tapissier

Pour obtenir un échantillonnage qui correspond à la limite de résolution (d'instrument ou du seeing) il faut jouer soit sur la focale avec une barlow soit sur la taille des pixels en changeant de capteur.

En raison de l'étalement de l'image (et du champ) sur la capteur avec l'allongement de la focale, les instruments à longue focale peuvent se contenter de capteurs à gros pixels alors que les instruments à courte focale devront plutôt utiliser des capteurs à petits pixels.

En général on utilisera un échantillonnage e encadré par R/3 et R/2 ce qui permet de choisir la focale (ou la taille de pixels) qui convient :

$$R/3 \leq e \leq R/2$$
$$R/3 \leq 206 \times \frac{p}{F} \leq R/2$$
$$\boxed{412 \times \frac{p}{R} \leq F \leq 618 \times \frac{p}{R}}$$

Dans le cas où le seeing n'est pas le facteur limitant comme dans l'astrophotgraphie planétaire (on réalise des poses très courtes), c'est la résolution de l'instrument qui devient alors limitant. R vaut donc la résolution théorique de l'instrument (critère Rayleigh) $R_{\text{instrument}} = \text{Ps}$ (Ps = pouvoir séparateur). On pourra échantillonner dans le bleu afin de mieux voir les plus fins détails. Si l'instrument est mauvais dans le bleu (sphérochromatisme du SCT par exemple) alors, on échantillonnera plutôt dans le vert.

De manière général si le choix de la focale est limitée il vaut mieux être en sur-échantillonnage avoir un focale plus longue que nécessaire pour mieux étaler l'image sur la surface du capteur que d'avoir un image trop petite étalée sur la surface du capteur et être alors en sous-échantillonnage.

Le critère de Rayleigh généralisé : $R_{\text{instrument}} = \frac{\lambda}{4 \times D}$ où R est en arcsec et D en mm, donne la résolution maximum de l'instrument selon la longueur d'onde considérée et en prenant comme base du calcul le max d'échantionnage donc e = R/3 : $F = 618 \times \frac{p}{R}$.

Facteur limitant	Couleur	λ	R	F/D max
$R_{\text{instrument}}$	Bleu	$\lambda = 400nm$	100/D	6p
$R_{\text{instrument}}$	Vert	$\lambda = 550nm$	138/D	4.5p
$R_{\text{instrument}}$	Rouge $H\alpha$	$\lambda = 656nm$	164/D	4p

Credit : J.G. Gricourt

Si en revanche le seeing est prédominant et vaut $R_{\text{seeing}} = 4 \times R_{\text{instrument}}$ alors dans le vert : F/D max = $1.1p$.

Autres règles pratiques [124] :

Règles de **Colmic** pour choisir sa caméra [125], on choisit une focale qui produira un échantillonnage encadré par l'échantillonnage minimum à R/2 (inspiré de Nyquist) et un échantillonnage à R/3 : $412 \times p/R < F < 618 \times p/R$

En pose courte (stacking) que ce soit en planétaire ou ciel profond : $e = R/2$ si la turbulence est faible ou $e = R/3$ si la turbulence est forte où R est la résolution maximale de l'instrument.

En pose longue (ciel profond) : $e = R/3$ où R est le seeing, celui-ci descend rarement en dessous de 1.5 arcsec dans nos régions donc $e = 0.5$ au mieux. Idéalement, on réalise un cliché d'une étoile brillante à $e = R/3$ et on mesure sa FWHM sur le cliché et on réalise les poses suivantes avec l'échantillonnage $e = \text{FWHM}/3$.

Le sur-échantillonnage / focale trop longue [158] / pas assez de champ dans 1 pixel :

1. L'image plus grande ramenée à la même échelle que celle de l'image à l'échantillonnage optimal ne contient pas plus de détails
2. C'est le cas, si les pixels sont trop petits pour la focale, alors le potentiel de résolution contenu dans l'image est dépassé et aucune information supplémentaire n'est capturée (le seeing impose la limite ici).
3. Les étoiles sont empâtées = "Bloated Stars"
4. Le temps de pose doit être rallongé (image plus sombre) pour obtenir le même SNR qu'avec l'échantillonnage optimal (e=R/3)
5. La magnitude limite est réduite
6. Les écarts de suivi de la monture seront plus visibles
7. Sans changer de capteur, on capture moins de champ sur la surface globale du capteur, ce qui est moins intéressant en ciel profond et sur la Lune, mais plus intéressant pour les planètes lointaines dont la surface occupée par l'image sera augmentée même s'il n'y aura pas plus de détails (image soft) que pour un échantillonnage optimal sur ce même capteur.

Solution : il faut utiliser un réducteur de focale pour diminuer le tirage.

Le sous-échantillonnage / focale trop courte [158] / trop de champ dans 1 pixel :

1. L'image plus petite ramenée à la même échelle que celle de l'image à l'échantillonnage optimal contient moins de détails
2. C'est le cas, si les pixels sont trop gros pour la focale, alors le potentiel de résolution du capteur n'est pas atteint
3. Une étoile est au mieux capturée par 1 seul pixel (forme carrée = effet aliasing) ou bien sera absente de la photo finale.
4. Les étoiles sont mal pixelisées = "Blocky Stars"
5. Le temps de pose peut être réduit (image plus lumineuse) pour obtenir le même SNR qu'avec l'échantillonnage optimal (e=R/3)
6. La magnitude limite est augmentée
7. Les écarts de suivi de la monture seront moins visibles
8. Sans changer de capteur, on capture plus de champ sur la surface globale du capteur, ce qui est intéressant en ciel profond et sur la Lune, mais moins intéressant pour les planètes lointaines dont la surface occupée par l'image reste petite.

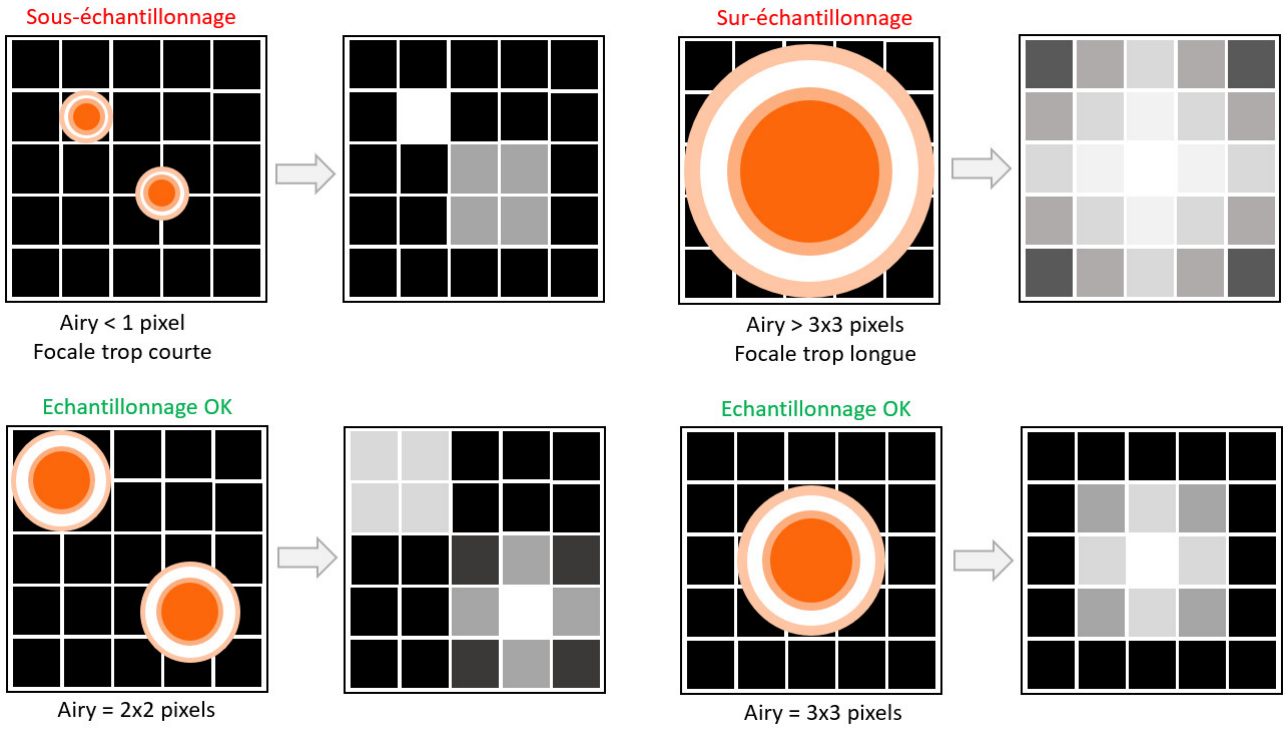
Solution : il faut utiliser une barlow pour augmenter le tirage.

Conclusion :

— Sur-échantillonnage = perte de SNR (en ciel profond, mais ok en planétaire)
— Sous-échantillonnage = perte de résolution

Donc avec un seeing parfait, avec le sous-échantillonnage, on n'exploite pas la résolution du capteur et avec le sur-échantillonnage (longue focale) on perd en SNR et en magnitude alors qu'il n'y a pas plus de résolution dans l'image au final.

Le bon "échantillonnage"



Credit : J.G. Gricourt

Première approche du choix de l'échantillonnage (à même temps de pose) :

Sampling F/D	1p	3p	7p
Résolution écran	0	⋆	⋆⋆
SNR DSO	⋆⋆	⋆	0
SNR Planétaire	⋆⋆⋆	⋆⋆	⋆

Credit : J.G. Gricourt

Il faut évidement revoir ces valeurs en fonction du seeing lorsque celui-ci dépasse le pouvoir séparateur Ps de l'instrument.

En 2024 les cameras sont de plus en plus performantes notamment avec un bruit de lecture insignifiant et des pixels très petits. Si on considère que le seeing moyen en France oscille entre 1.5 et 2 arcsec on obtient :

$$
\begin{aligned}
412 \times \frac{p}{R} \leq F \leq 618 \times \frac{p}{R} \\
\frac{F.R}{618} \leq p \leq \frac{F.R}{412} \quad \text{avec} \quad R = 2\text{arcsec}, F = 500\text{mm} \\
\frac{500 \times 2}{618} \leq p \leq \frac{500 \times 2}{412} \\
1.6\mu\text{m} \leq p \leq 2.4\mu\text{m}
\end{aligned}
$$

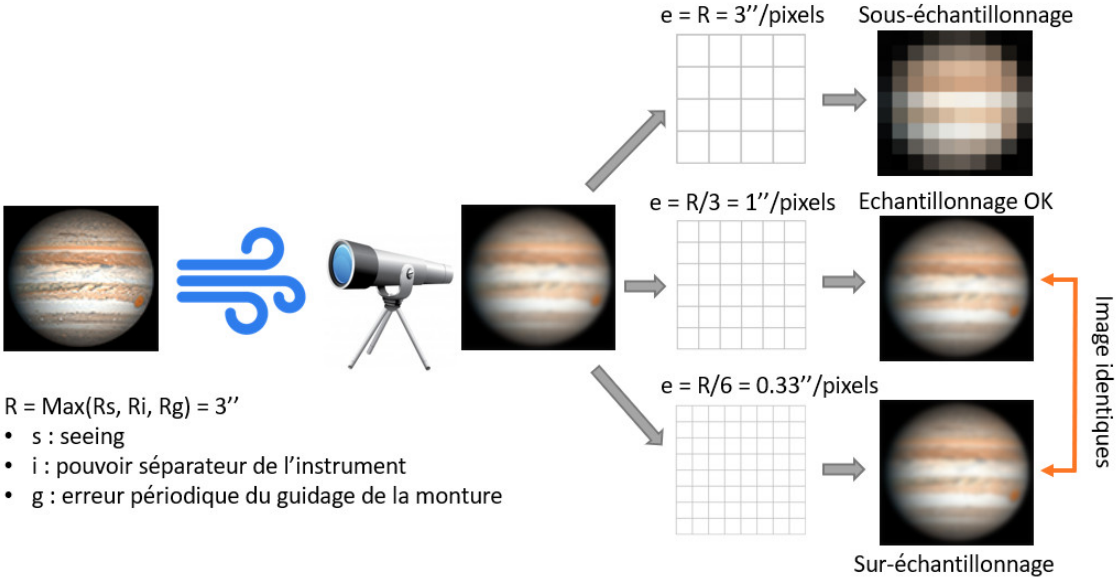
Donc même avec un instrument à focale aussi courte que 500mm il existe des cameras possédant des pixels suffisamment petits permettant d'exploiter la résolution permise sous un seeing courant.

9.4.2 Photo planétaire

Il est préférable de sous-échantillonner à $e = R/2$ donc avec une focale de $F_{\min} = 412 \times \frac{p}{R}$, car les planètes sont très lumineuses et les images sont prises en poses très courtes pour figer le seeing. On utilisera une barlow pour augmenter la focale si nécessaire.

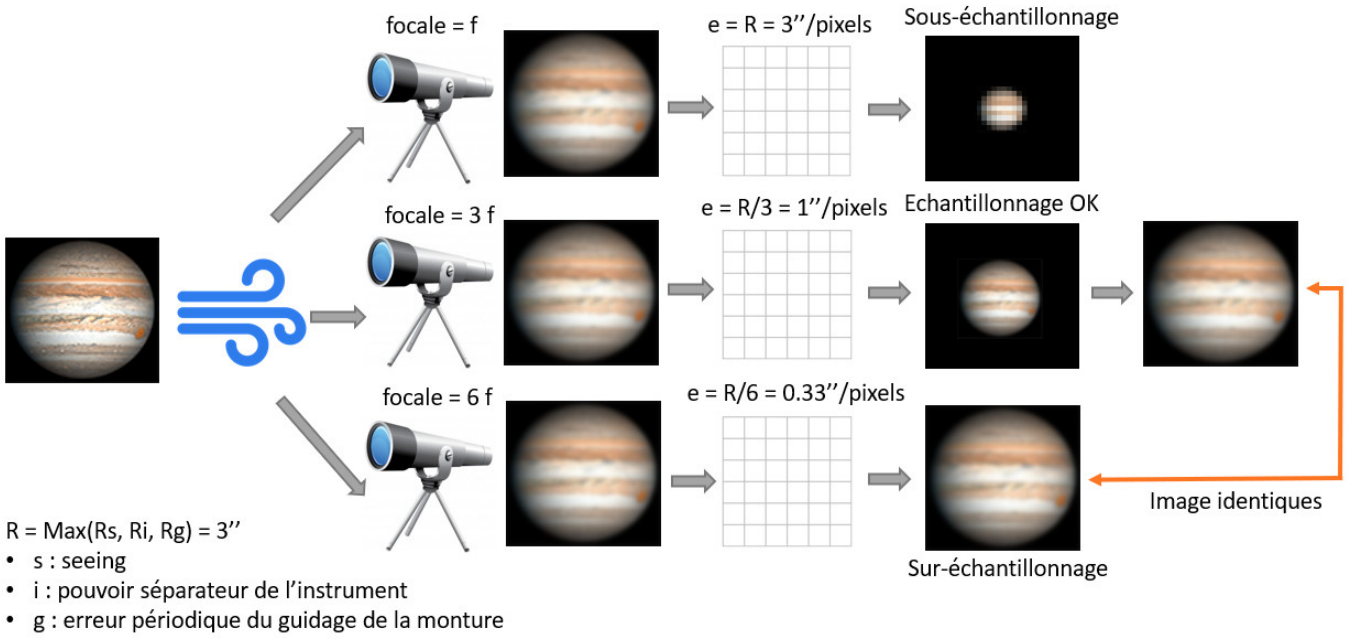
— On augmente encore la focale si le disque planétaire et très contrasté (Mars plus contrasté contient de hautes fréquences spatiales contrairement à Jupiter)
— En gardant la focale longue, cela permet d'agrandir les disque planétaire pour gagner plus de détail dans l'image
— On fait des poses courtes afin d'empiler les images pour augmenter le SNR

Effet de l'augmentation du nombre des pixels



Credit : J.G. Gricourt

Effet de l'augmentation de la focale



Credit : J.G. Gricourt

Règles de **Olivier Désormière alias Olivdeso** pour le planétaire [565] :

Planète	Echantillonnage
Mars	$F/D = 7p$
Jupiter	$F/D = 5p$
Saturne	$F/D = 5p$
Lune	$F/D = 3p$
Soleil $H\alpha$ = 656 nm	$F/D = 3p$

Credit : J.G. Gricourt

9.4.3 Photo du ciel profond

Il est préférable de sur-échantillonner à $e = R/3$ donc avec une focale de $F_{\max} = 618 \times \frac{p}{R}$ car les étoiles sont mieux rendues sur 3×3 pixels. On utilisera un réducteur de focale si nécessaire ou on choisira un capteur avec la bonne taille de pixels.

- Il faut garder un F/D faible afin de limiter le temps de pose pour atteindre un bon SNR (en limitant l'effet cumulatif du bruit de lecture du capteur au cours du temps)
- En gardant la focale courte, cela permet de maximiser le champ capturé
- On sur-échantillonne en passant de $R/2$ à $R/3$ pour avoir un bon rendu des étoiles [30].

Pour un même instrument on peut obtenir le même temps de pose en changeant de capteur si on utilise un réducteur :

Instrument	Réducteur ×0.5	F/D	Pixel	e
Lunette 100 mm	non	F/10	6 μm	1.2"
Lunette 100 mm	oui	F/5	3 μm	1.2"

Rules (1-2 arcsec per pixel) – and when to break them !

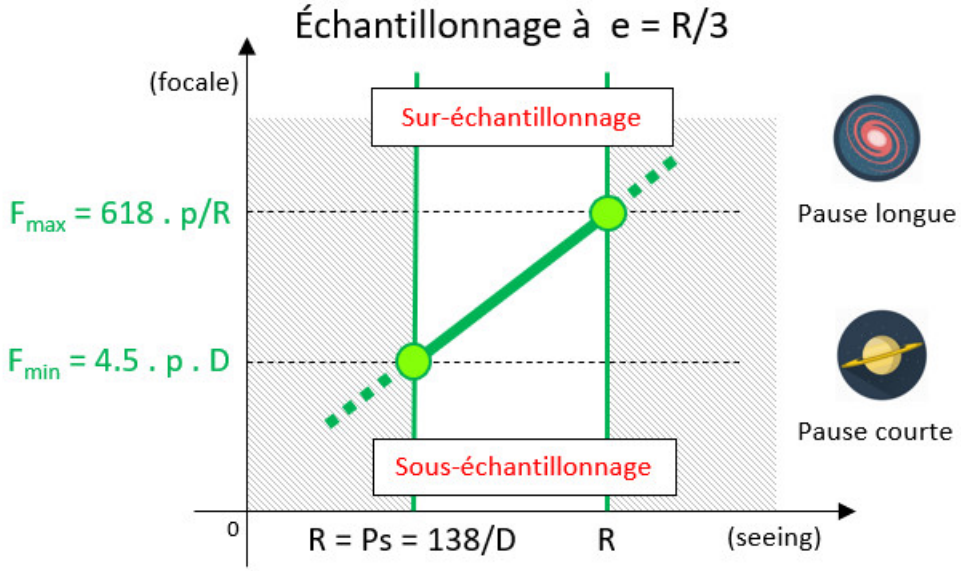
PIXEL SIZE	TELESCOPE FOCAL LENGTH IN mm																		
um	300	350	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1200	1400	1600	1800	2000
3	2.06	1.77	1.37	1.24	1.12	1.03	0.95	0.88	0.82	0.77	0.73	0.69	0.65	0.62	0.52	0.44	0.39	0.34	0.31
3.5	2.40	2.06	1.60	1.44	1.31	1.20	1.11	1.03	0.96	0.90	0.85	0.80	0.76	0.72	0.60	0.52	0.45	0.40	0.36
4	2.75	2.35	1.83	1.65	1.50	1.37	1.27	1.18	1.10	1.03	0.97	0.92	0.87	0.82	0.69	0.59	0.52	0.46	0.41
4.5	3.09	2.65	2.06	1.85	1.69	1.55	1.43	1.32	1.24	1.16	1.09	1.03	0.98	0.93	0.77	0.66	0.58	0.52	0.46
5	3.43	2.94	2.29	2.06	1.87	1.72	1.58	1.47	1.37	1.29	1.21	1.14	1.08	1.03	0.86	0.74	0.64	0.57	0.52
5.5	3.78	3.24	2.52	2.27	2.06	1.89	1.74	1.62	1.51	1.42	1.33	1.26	1.19	1.13	0.94	0.81	0.71	0.63	0.57
6	4.12	3.53	2.75	2.47	2.25	2.06	1.90	1.77	1.65	1.55	1.45	1.37	1.30	1.24	1.03	0.88	0.77	0.69	0.62
6.5	4.46	3.83	2.98	2.68	2.43	2.23	2.06	1.91	1.79	1.67	1.58	1.49	1.41	1.34	1.12	0.96	0.84	0.74	0.67
7	4.81	4.12	3.20	2.88	2.62	2.40	2.22	2.06	1.92	1.80	1.70	1.60	1.52	1.44	1.20	1.03	0.90	0.80	0.72
7.5	5.15	4.41	3.43	3.09	2.81	2.58	2.38	2.21	2.06	1.93	1.82	1.72	1.63	1.55	1.29	1.10	0.97	0.86	0.77
8	5.49	4.71	3.66	3.30	3.00	2.75	2.54	2.35	2.20	2.06	1.94	1.83	1.73	1.65	1.37	1.18	1.03	0.92	0.82
8.5	5.84	5.00	3.89	3.50	3.18	2.92	2.69	2.50	2.33	2.19	2.06	1.95	1.84	1.75	1.46	1.25	1.09	0.97	0.88
9	6.18	5.30	4.12	3.71	3.37	3.09	2.85	2.65	2.47	2.32	2.18	2.06	1.95	1.85	1.55	1.32	1.16	1.03	0.93
9.5	6.52	5.59	4.35	3.91	3.56	3.26	3.01	2.80	2.61	2.45	2.30	2.17	2.06	1.96	1.63	1.40	1.22	1.09	0.98
10	6.87	5.89	4.58	4.12	3.75	3.43	3.17	2.94	2.75	2.58	2.42	2.29	2.17	2.06	1.72	1.47	1.29	1.14	1.03

The ideal resolution for deep sky objects imaging.

Objects could be over sampled and guiding and sky conditions will cause issues.

Objects are under sampled and not enough detail will be seen in the images.

Credit : Atik Cameras



Credit : J.G. Gricourt

Lorsque l'on augmente le nombre de pixels de la matrice du capteur ou que l'on augmente la focale, le capteur ne résoudra pas plus de détails que ce que le seeing ou l'instrument permettra au moment de la prise de vue.

9.4.4 Le Lucky Imaging en ciel profond

Appelée ausi "Lucky Guiding" la pose courte en ciel profond est une technique avancée permise par les cameras de dernières génération en imagerie du ciel profond. Il s'agit de de réaliser la pose courte de 500ms à 3sec où l'on réalise des photos bruts

un peu comme dans l'imagerie du planétaire mais ici l'a technique est adaptée pour le ciel profond [684]. Cette technique à l'instar de l'imagerie planétaire = "Lucky Imaging" permet alors de battre le seeing et les erreurs de guidage et d'obtenir des images de très grande résolution de 1" ou moins en ciel profond.

La pose courte permet de s'affranchir de :

— Traces de satellites dans le ciel
— Traces de météores
— Venues momentanée de nuages
— Erreurs de guidage
— Seeing

Cette technique nécessite des cameras de type planétaire à très faible bruit de lecture, des montures basiques sans auto-guidage et permet d'exploiter de petits instruments de 150mm de diamètre sur des montures basique mais c'est avec des instruments de très gros diamètre que l'on pourra imager des objets très faible et atteindre grâce à cette technique des images en haute résolution jamais vues auparavant.

9.4.5 Visuel Assisté

Le Visuel Assisté ou "VA" ou EEVA = "Electronically Enhanced Visual Astronomy" ou "Live Stacking" désigne une discipline récente (depuis 2020) de l'astro amateur qui consiste à capturer des images en temps réel du ciel sous forme d'un flux vidéo (quasi) continu et à empiler ces images via un logiciel comme SharpCap Pro afin d'augmenter le SNR comme on le ferait en astrophoto classique. Cette technique nécessite des caméras CMOS très sensibles ainsi que l'utilisation de réducteurs de focale pour diminuer le temps de pose au minimum dans le but d'obtenir les image plus rapidement pour donner l'impression d'un flux vidéo continu. Aujourd'hui les instruments permettant de mettre en oeuvre cette technique sont essentiellement des bricolages amateurs cependant, il existe des instruments proposé complet et utilisant cette technique :

Exemple d'instruments dans cette catégorie :

— SmartEye (Pegasus Astro) oculaire 90° AFOV
— Celestron Origin (Celestron) RASA 152mm F/2.2
— Seestar (ZWO) APO (triplet) 150mm F/5
— Stellina (Vaonis) ED (doublet) 80mm F/5
— Vespera (Vaonis) APO (quadruplet) 50mm F/4
— Hyperia (Vaonis) APO (triplet) 150mm F/7
— eVscope (Unistellar) Newton 114mm F/4

StarAziona commercialise le Nexus un réducteur / correcteur de coma dédié pour les dobsons permettant de corriger le champ et de réduire le ratio F/D (un F/4 deviens F/3). Le backfocus requis est de 55mm.

La révolution de cette technique d'astrophoto, qui n'est pas du visuel comme son nom l'indique, permet d'exploiter tout type d'instruments et notamment des instruments à l'origine dédiés à l'observation visuelle comme les gros dobsons. Plus l'instrument est de grand diamètre plus il y aura de signal plus rapide l'image résultat du stacking sera obtenue donnant l'illusion du temps réel. Le suivi peu être assuré par une simple table équatoriale ou bien une motorisation double axe directement sur la structure du dobson.

Logiciels utilisés :

— Firecapture

— SharpCap

En pratique en plus d'empiler les pose courte au fil de l'eau on refait un Dark dès que la température évolue pour l'intégrer dans le traitement afin de supprimer l'AMP Glow.

Il est préférable d'échantillonner de manière à réduire la focale au maximum afin de gagner du temps et fournir une image quasi-temps réel.

— On utilisera un réducteur de focale si nécessaire.
— On fait des poses courtes dans le but d'empiler (stacking) les images pour augmenter le SNR via ce traitement.

En pratique on diminue la focale dans les cas :

1. Où le seeing se détériore
2. En photo du ciel profond

En pratique, on augmente la focale dans les cas :

1. Où l'on utilise un capteur couleur (la débayerisation génère un pixel plus gros)
2. Où l'on utilise un capteur moins sensible
3. En photo planétaire

Moiré ou "Aliasing" désigne l'effet produit sur une image lorsque le signal est largement sous-échantillonné. Les étoiles deviennent des carrés à la dimension du pixel. En théorie du signal, pour éviter cet effet il faut couper le signal après la fréquence max à l'aide d'un filtre passe bas (filtre anti-aliasing) en amont avant échantillonnage.

Binning désigne une technique d'acquisition d'imagerie générant 1 pixel virtuel à partir de plusieurs pixels adjacents. En binning 2x2 ce sont 4 pixels qui sont moyennés pour obtenir 1 pixel ce qui permet d'augmenter artificiellement la sensibilité des pixels. Dans ce cas, la résolution de l'image obtenue est divisée par 2. Le binning peut être réalisé le plus souvent par le hardware du capteur ou par logiciel sur l'image directement.

En binning $n \times n$:

1. La sensibilité du capteur est multipliée par n^2 et le rapport SNR augmente plus rapidement (temps de pose réduit ou moins d'images à empiler)
2. La taille en pixels de l'image est divisée par n
3. L'échantillonnage est multiplié par n

Cette technique est utilisée pour faire ressortir plus rapidement le signal en améliorant le rapport signal / bruit (SNR). On l'utilise aussi lorsque la focale et trop grande et procure alors un échantillonnage trop faible par rapport à l'échantillonnage réel sur le ciel (limité par la turbulence), les étoiles sont empâtées (FWHM).

Avec un capteur CCD le binning est hardware, le bruit de lecture n'est compté qu'une seule fois alors que dans le cas du capteur CMOS le binning est logiciel se produisant une fois que le pixel est déjà lu, le bruit de lecture est donc compté autant de fois que de pixels regroupés pour le binning [318]

Drizzle désigne une technique de traitement d'imagerie du ciel profond développé par la NASA pour Hubble et permettant la reconstruction d'image sous-échantillonnée afin de parvenir à une meilleure FWHM (résolution d'image). Chaque cliché doit faire apparaitre un petit décalage statistique forcé du suivi au moment de l'acquisition, c'est la technique du "Dithering". Le stacking fait alors apparaitre des étoiles pixelisées du fait des décalages et des frontières de nébuleuses qui débordent du fait des rotations de champ dû au "Dithering". Le traitement "Drizzle" permet de dé-pixéliser les étoiles par interpolation en créant de nouveaux pixels. Cette technique conduit à produire une image contenant plus de pixels que les bruts ayant servie au stacking mais aussi mettant plus en valeur des détails dans l'image.

Temps de pose ou "Exposition" désigne le temps d'exposition du capteur à la lumière. En astrophoto planétaire où les objets sont très lumineux, on préfère réaliser des poses très courtes pour ensuite additionner les fichiers (augmentation du SNR).

En astrophoto du ciel profond où les objets sont peu lumineux, on préfère poser un peu plus longtemps pour acquérir plus de signal pour dépasser le bruit dans l'image, mais dans une certaine limite car :

— Il y a un risque de voir des filés d'étoiles en raison des défauts de suivi de la monture
— Il y a un risque de saturer les étoiles (augmentation de la FHWM) et de renforcer une coma ou une aberration chromatique existante
— Il y a un risque de saturer le coeur des galaxies
— Il y a un risque de capturer les vibrations de la monture lié au vent

Pour un capteur donné et un instrument donné, il faut un temps de pose tp plus long lorsque le rapport F/D est plus élevé afin d'obtenir une exposition similaire. Le temps de pose est proportionnel à l'ouverture $tp \propto N^2$ où $N = F/D$. Si l'on a 2 instruments ayant une ouverture N_1 et N_2 respectivement et que $N_2 = k \times N_1$ alors pendant un temps de pose fixé à l'avance la quantité de lumière reçue par l'instrument 2 vaut : $E_2 = E_1/k^2$ et si on retourne le problème pour savoir quel sera le temps de pose nécessaire afin que l'instrument 2 reçoive la même quantité de lumière : $tp_2 = tp_1 * k^2$. En photo classique, le diaphragme s'ouvre par incrément de $k = \sqrt{2}$ donc entre 2 positions consécutives de l'ouverture, la quantité de lumière accumulée est multipliée par 2 à temps de pose fixe et le temps de pose nécessaire pour accumuler la même quantité de lumière est divisé par 2. Plus les pixels du capteur sont gros, plus, ils sont sensibles.

Aussi l'exposition obtenue par un Newton 8" F/10 et un capteur ayant des pixels de 9 μm sera similaire à l'exposition obtenue par un Newton 8" F/5 et un capteur ayant des pixels de 4.5 μm [614]. La lumière à F/5 est plus concentrée qu'à F/10 donc si 2 photons sont capturés à F/5 pour générer 1 charge électrique, il suffira de 1 photon capturé à F/10 pour générer 1 charge électrique étant donné la sensibilité accrue du capteur utilisé. De plus gros pixels capturent plus de photons dans le même temps de pose et ont donc besoin de moins de temps pour obtenir une image avec suffisamment de signal au regard du bruit.

En photo classique (diurne) c'est l'ouverture contrôlée par le diagramme de l'objectif photo qui varie pour déterminer le temps de pose et en astrophoto c'est l'inverse, c'est la focale qui varie pour déterminer le temps de pose, mais aussi l'échantillonnage.

Loi de Réciprocité désigne la loi en imagerie argentique qui relie la lumination H (lux/sec) au temps de pose tp pour donner l'éclairement : $E = H \times T_p$. La lumination H dépends soit de l'ouverture (diaphragme de l'objectif photo) soit de la sensibilité en ISO de la pellicule. La loi de réciprocité ne fonctionne plus lorsque la lumination est faible comme en astrophoto c'est "l'Effet Schwarzschild". Cette loi s'applique encore avec les capteurs électroniques dont le firmware est conçu pour faciliter l'usage des ISO (ou Gain) en gardant les mêmes lois connues des photographes. La différence est la gestion du bruit lorsque le Gain augmente, les capteurs ISO-Less garde un bruit de lecture faible à Gain élevé.

Règle des 500 désigne une règle empirique de calcul du temps de pose maximal pour réaliser une prise de vue unique pour laquelle on ne verra pas de filé d'étoile : $tp = \frac{500}{F \times C}$, où F la focale de l'objectif utilisé et C le coefficient de conversion de focale [304].

Valeur du coefficient de focale :

- Full Frame Factor = 1
- APSC Factor = 1.5

Règle des 3 sigmas désigne une règle fondamentale du temps de pose unitaire des prises de vue brut en vue de réaliser de l'empilement d'images (pour augmenter le SNR). Plus le temps de pose unitaire des images brute est court, plus le SNR résultant de l'image calculée sera faible en raison du bruit de lecture qui deviendra prépondérant. Le bruit de lecture venant du capteur est constant (à gain constant) et intervient dans chaque image individuellement et si le signal est trop faible en raison du temps de pose trop court, alors il sera noyé dans le bruit. Le temps de pose unitaire minimal peut être calculé de manière empirique selon la règle des "3 sigmas" afin de conserver un SNR optimal [126] pour cela le bruit photonique du fond du ciel de l'image doit être 3 fois supérieur à la somme quadratique des autres bruits : $\sigma^2_{\text{Sky}} > 3 \times \left[\sigma^2_{\text{Thermal}} + \sigma^2_{\text{Read}}\right]$ or le bruit thermique est négligeable avec les CMOS donc : $\sigma_{\text{Sky}} > 3 \times \sigma_{\text{Read}}$. Le bruit du fond du ciel est mesuré directement sur l'image (calibrée avec les images Dark et Flat) en ADU, le bruit de lecture est mesuré sur l'image Bias (Offset) en ADU ce qui donne : $\text{ADU}_{\text{Sky}} > 3 \times \text{ADU}_{\text{Read}}$. En imagerie planétaire, le signal étant particulièrement élevé, on pourra réaliser des poses plus courtes sans tenir compte de la règle [724]. En résumé, si le temps de pose unitaire des brutes est suffisamment long pour que le bruit photonique reste supérieur à 3 fois à la somme des autres bruits (en général le bruit de lecture) alors, on pourra empiler les bruts pour faire ressortir les parties de l'image les plus faibles sans trop subir l'impact des autres bruits [128].

BdB signifie "Balance des Blancs" désigne une opération qui consiste à corriger les couleurs d'une image afin que les objets blancs redeviennent blancs sur l'image. En photographie, la plupart des capteurs ne savent pas retranscrire les bonnes couleurs lorsque la scène est éclairée par des lumières artificielles.

Lucky Imaging désigne en imagerie une technique d'imagerie qui consiste à acquérir des séries d'images en poses ultra-courtes (10 images / sec) et de les empiler, le "Stacking". L'opération mathématique peut-être (par ordre croissant de performance) :

1. La moyenne arithmétique des pixels sur le nombre d'images (pas de pixels rejetés)
2. La médiane pour ignorer les pixels allumés par d'autres objets transitoires (rayon cosmique)
3. Le "Sigma clipping" pour ignorer les échantillons en dehors de la plage $[\text{mediane} - \kappa\sigma, \text{mediane} + \kappa\sigma]$ où σ l'acart type sur n échantillons et κ un entier.

Donc en réalisant des poses courtes cette technique permet :

1. De juguler la turbulence (seeing)
2. De juguler l'imprécision du suivi de la monture
3. De se prémunir du passage momentané d'un nuage, d'un avion ou d'un satellite artificiel

Les clichés sont alors empilés afin d'en augmenter le SNR. En planétaire on prendra les meilleurs clichés de la série en éliminant celles trop affectées par la turbulence. Cette technique est systématiquement utilisée pour l'imagerie planétaire et de plus en plus en imagerie du CP.

Lorsqu'on empile n images, on additionne le signal que celles-ci contiennent (on suppose que le temps de pose de chaque image est identique) donc le signal de l'image résultante vaut $\text{Signal} = \sum \text{Signal}_i$ or si l'on ne considère que le bruit photonique celui-ci se caractérise par $\sigma_{\text{Sky}} = \sqrt{\text{Signal}}$ alors $\text{Signal} = \sum \sigma^2_{\text{Sky}} = n \times \sigma^2_{\text{Sky}}$ où n est le nombre d'images empilées et finalement $\text{Noise} = \frac{\text{Signal}}{\sqrt{n}}$. Le bruit diminue avec l'empilement selon $\sqrt{n}$ et le SNR lui augmente mécaniquement, lorsqu'on multiplie par 2 le nombre d'images empilées le SNR augmente de $\sqrt{2}$.

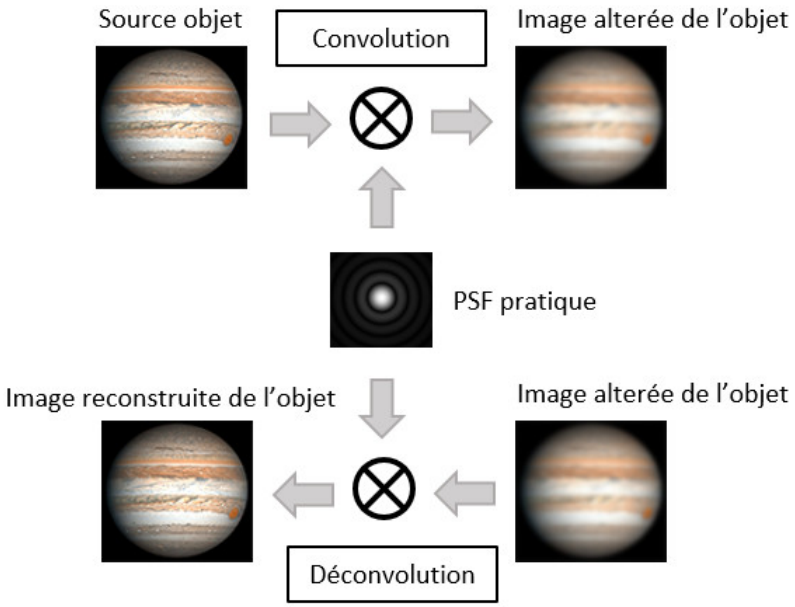
Stacking ou “Compositage” désigne en imagerie l’opération qui consiste après registration à additionner ou empiler les images par moyennage pour augmenter le SNR de l’image.

Registration ou “Alignement” désigne en imagerie l’opération qui consiste à aligner les images avant empilement.

Masque flou désigne une technique de logicielle qui permet le renforcement des détails d’une image. Cette technique, même si elle a pour but de conduire à une amélioration des contrastes d’une image comme dans le cas de la déconvolution basée sur la connaissance de la PSF elle ne permet pas de véritablement récupérer de l’information perdue.

Déconvolution désigne en imagerie une méthode de restauration d’une image à partir de la connaissance de la PSF produite par l’instrument qui a généré cette image.

Opération mathématique de convolution



Credit : J.G. Gricourt

La mise en pratique de la déconvolution se heurte à la fois à la numérisation des images optique qui contiennent du bruit en plus du signal. La déconvolution sur une image globale impose de connaitre la réponse impulsionnelle de l’instrument = la PSF en tout point de l’espace objet ainsi que son évolution dans le temps [601, 781]. En revanche sur un disque planétaire occupant peut de place dans l’espace image et sous condition de turbulence nulle, la déconvolution à partir de la PSF observée moyennée = “Stacking” peut apporter une légère amélioration de contraste [472].

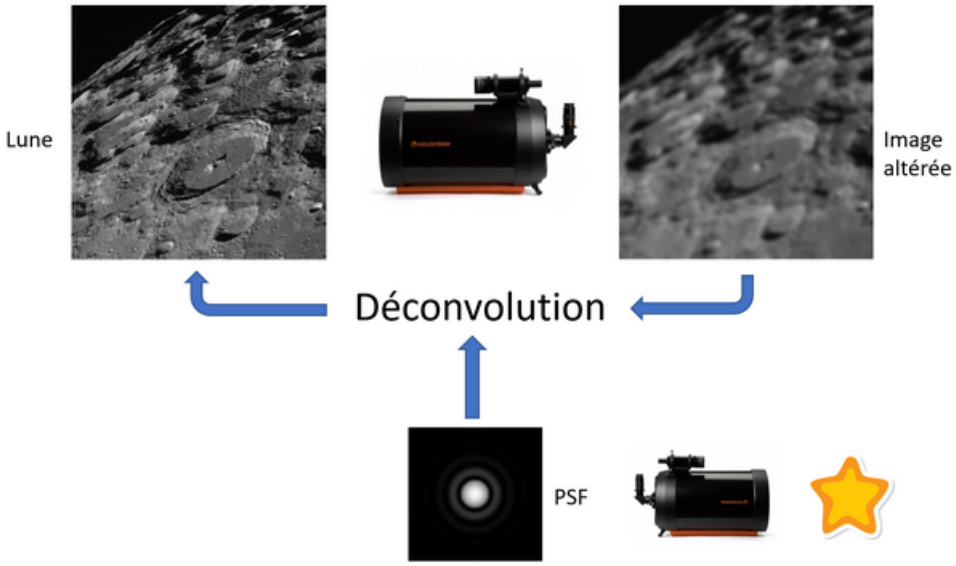
Il existe plusieurs PSF :

— La PSF théorique = celle obtenue au passage d’une ouverture circulaire éventuellement obstruée selon la formule optique de l’instrument
— La PSF pratique = contient la précédente, mais en plus tient compte des défauts réels de l’optique, aberration sphérique, astigmatisme...
— La PSF observée = contient la précédente, mais en plus les tavelures produites par la turbulence atmosphérique produisant des figures d’interférences et non des figures de diffraction = PSF.

La PSF est aussi la réponse à une courbe de Dirac = réponse impulsionnelle = étoile vue par l’instrument lui-même, considéré comme un filtre du point de vue du traitement du signal. En théorie, le Dirac contient toutes les fréquences possibles.

En raison de la turbulence on obtient des tavelures et non la PSF. Pour obtenir la PSF d'une étoile, enfin une approximation à partir des tavelures, il faut faire une moyenne sur un très grand nombre d'images pour minimiser l'effet de l'atmosphère [58].

De la connaissance de la PSF pratique capturée par la caméra à chaque instant, il est théoriquement possible de déduire mathématiquement l'image de la Lune parfaitement nette.



Credit : J.G. Gricourt

La déconvolution à partir de la connaissance de la PSF pratique peut être réalisée par 2 méthodes [298, 646] :

— Un filtre de Wiener (formule directe), adapté pour un bruit Gaussien, son calcul est très rapide
— Un algorithme (itératif) de Richardson-Lucy, adapté pour un bruit Poissonien, son calcul est plus lent

Cette technique permettrait d'augmenter considérablement contraste d'une image à la base floue en raison des défauts introduit = la fonction perturbatrice, de l'optique ou de l'atmosphère. Cette méthode est réalisable avec la PSF dite pratique, car la perturbation de l'optique est constante dans le temps contrairement à la perturbation de l'atmosphère qui est de nature totalement différente [472].

Dans le cas où la connaissance de la PSF pratique est difficile alors la technique de "Blind deconvolution" permet de mettre en pratique la déconvolution sur une image à partir d'une estimation empirique de la PSF d'après l'analyse des images brutes mais celle ci ne fera pas de miracle.

Dans le cas des nébuleuses ou des galaxies on peut utiliser différentes PSF pour réaliser la déconvolution [681] avec parfois des résultats :

— On prend la PSF d'une étoile du champ pour réaliser la déconvolution sur la totalité de l'image
— On prend plusieurs PSF d'étoiles dans le champ pour réaliser la déconvolution ciblé de plusieurs parties de l'image, ex : BlurXterminator
— On prend une PSF synthétique issue de la théorie de la turbulence atmosphérique : Gaussian, Moffat pour réaliser la déconvolution sur la totalité de l'image

Cette technique est impressionnante lorsqu'on l'a simule à l'aide du logiciel AstroSurface en réalisant d'abord une convolution

d'une image parfaite de Jupiter prise par Hubble avec une PSF (arbitraire) déformée et que l'on réalise ensuite la dé-convolution (opération inverse) sur l'image déformée résultat de la convolution précédente. Cependant en pratique il est très difficile d'obtenir une PSF satisfaisante avec des moyens d'amateurs pour les raisons suivantes :

- L'étoile de référence candidate faisant office de PSF observée doit se situer dans l'angle d'isoplanétisme de la planète observée pour que l'effet de la turbulence soit pareil.
- Il n'est pas pratique de trouver une étoile de référence candidate proche de la Lune ou d'une planète
- Il faut en théorie capturer autant de PSF que d'image brutes, un paire (PSF, image brute de la planète) afin d'être certains que les 2 images sont capturés dans le même instant
- Les images brut devraient être exempt de bruit ce qui n'est jamais le cas mêmes avec les caméras les plus performantes

Ondelettes ou "Wavelets" désigne un type de traitement astrophoto. Les ondelettes permettent de révéler les faibles contrastes en accentuant artificiellement les fréquences d'une image. En aucun cas les ondelettes permettent de retrouver l'image originale à partir de la PSF vraie comme le ferait le traitement par dé-convolution [459].

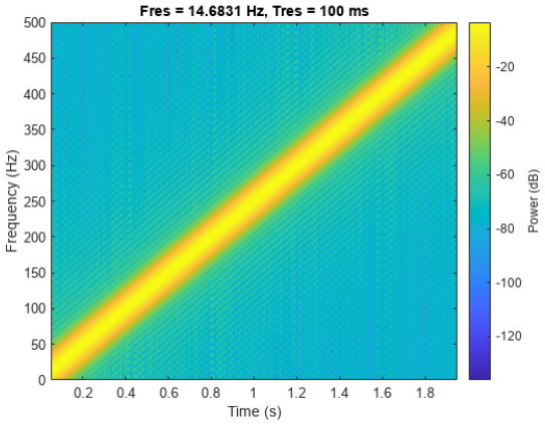
Les ondelettes permettent de modéliser un signal non stationnaire (évoluant dans le temps) à partir de petites ondes pondérées et additionnées alors que la transformée de Fourier TF classique est plus adaptée à la modélisation de signaux stationnaire. Les ondelettes remontent les signaux transitoires difficiles à voir par une simple transformation de Fourier TF. Le traitement consiste à relever les hautes fréquences afin de rehausser les contrastes d'une image. Comme un signal stationnaire peut être décomposé en une série de Fourier avec des sinus et des cosinus, les ondelettes permettent de décomposer un signal non stationnaire en série d'ondelettes. L'ondelette est une fonction arbitraire Ψ respectant la condition mathématique d'orthogonalité. Comme la transformée de Fourier inverse TFinv, la transformée en ondelettes inverse TOinv permet de récupérer l'image originale.

On peut alors agir sur le scalogramme [3] de la TO [4] pour éliminer les signaux transitoires et les fréquences indésirables pour nettoyer l'image sur le même principe qu'avec la TF. Pour réaliser une TO on peut choisir parmi plusieurs types d'ondelettes Ψ certaines sont très connues : Morlet, Daubéchie, Chapeau Mexicain ... Pour avoir une bonne résolution en fréquence, on utilisera plutôt des ondelettes de Morlet (détection de signaux stationnaires) et pour une bonne résolution en temps (détection de signaux transitoires) on utilisera plutôt des ondelettes de Daubéchies ou Gaussienne (DOG) [337, 48, 11]. La TO est aussi utilisé en compression d'image et notamment dans la norme JPEG 2000 (Ψ = ondelette de Daubéchie) alors que la compression audio MP3 utilise la TF (algo DCT).

Le scalogramme d'une ondelette est en 2 dimension et montre l'évolution d'un signal à la fois sur une échelle de temps en ordonnée mais aussi sur une échelle de fréquence en abscisse. Par exemple un signal stationnaire parfaitement sinusoïdal sera représenté par une droite horizontale sur le graphe alors qu'un signal sinusoidal dont la fréquence augmente avec le temps = signal de type "Chirp" sera représenté par une courbe croissante.

3. On parlera de spectrogramme pour la TF.
4. La TO utilise la TF de Ψ

Scalogramme d'un signal "Chirp"



Credit : MathWorks

Lucien à dit : *D'ailleurs il est inutile de parler des Ondelettes comme d'un Graal en traitement d'images car si l'on connait bien Photoshop qui n'utilise pas les Ondelettes, on peut remonter le contraste de manière aussi subtile avec un algo plus classique de Photoshop !* [458].

9.4.6 Le masque flou

La masque flou ou "Unsharp Mask" désigne une technique de post traitement de l'image originale déjà empilée I_0 dont le but est de faire ressortir les détails de la photo.

La technique [7] :

1. Appliquer un masque flou Gaussien à la photo originale (remplacement de chaque pixel par la moyenne des voisins) : $I_1 = I_0 * F_g$
2. Créer un masque de détail et l'amplifier d'un facteur A : $I_d = (I_0 - I_1) \times A$
3. Addition le masque de détail à la photo originale : $I = I_0 + I_d$

Note : la soustraction du masque flou va retirer les zone de l'image de faible contraste (flou masque - flou image = 0) et ne laisser que les forts contrastes et donc les détails.

9.5 La Calibration

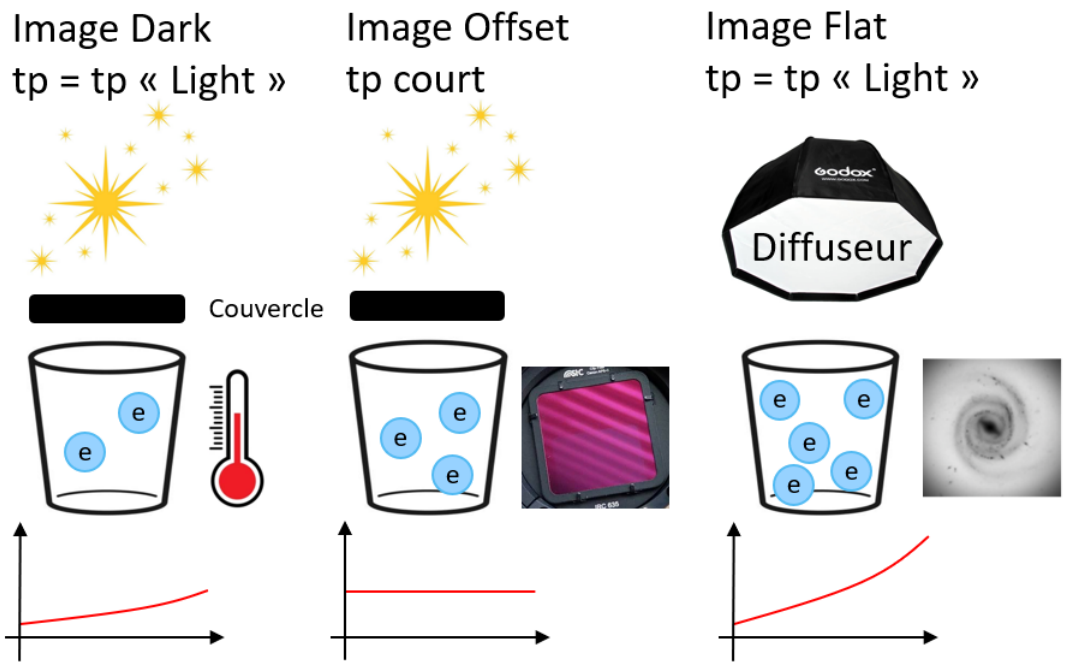
Brut ou "Image Brut" ou "Light" désigne les images directement sorties du capteur photo sans aucun traitement. Ces images produites par une séquence vidéo sont généralement floues en raison de la turbulence et sont fortement entachées de bruit.

Image Calibration désigne en imagerie le processus de pré-traitement de l'image brut que l'on appelle "Light" qui consiste à éliminer les défauts systématiques (répétitifs) de l'acquisition d'image. Le bruit résiduel du signal (bruit photonique) que l'on veut éliminer est réduit par le moyennage d'images, le "Stacking". La calibration utilise plusieurs images de références afin de débarrasser l'image de départ de ces nombreuses altérations :

DOF désigne les 3 types de clichés utilisés pour la calibration des images bruts juste avant empilement (image stacking) : Dark, Offset, Flat [312].

— Dark : caractérise le signal thermique
— Offset = Bias : caractérise le signal de lecture
— Flat : caractérise les poussières, les pixels défectueux, le banding, le vignetting
— Light : caractérise le signal utile = l'image de la nébuleuse

Les DOF



Credit : J.G. Gricourt

Il faudra acquérir le double de chaque type d'image de référence par rapport au nombre d'images "Light". Le but de générer des versions "Masters" de ces images de références est de réduire le bruit associé.

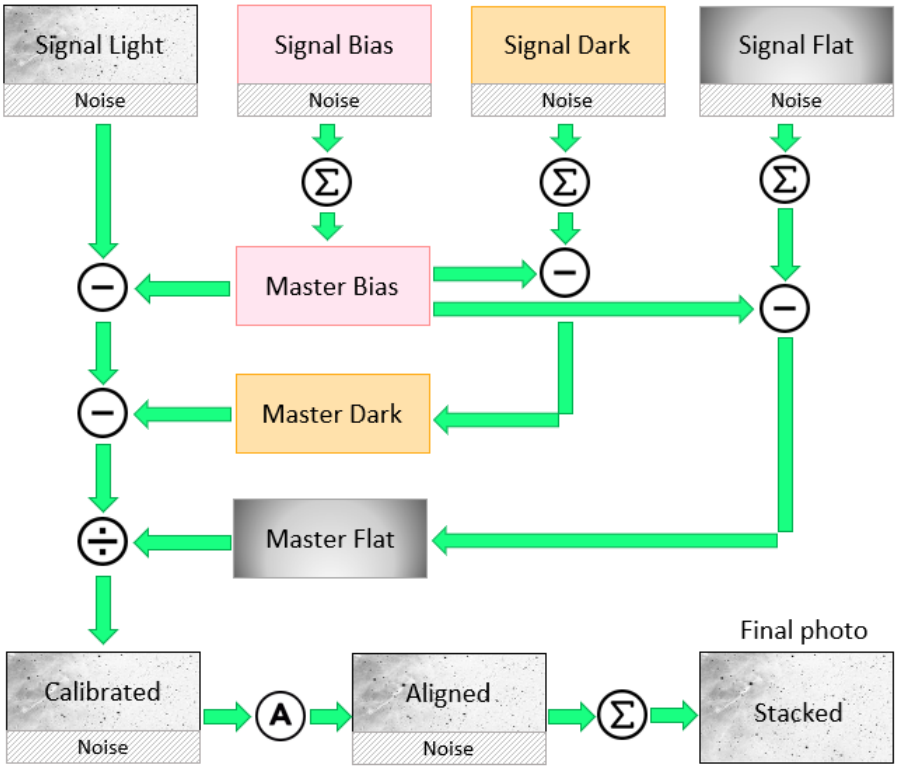
Calibration

Image	Capuchon	Temps de pose	Température	ISO	Binning
Bias	oui	court	-	ISO Light	Bin Light
Dark	oui	pose Light	T° Light	ISO Light	Bin Light
Dark Flat	oui	pose Flat	T° Flat	ISO Flat	Bin Flat
Flat	non	court	-	ISO Light	Bin Light

Formule des images "Light" [456, 171, 667] :

$$\text{Light New} = (\text{Light} - \text{Master Bias} - \text{Master Dark})/\text{Master Flat}$$

Le workflow du traitement photo



Credit : J.G. Gricourt

L'image finale est obtenue en utilisant les images "Light" traitées et en réalisant les opérations suivantes :

1. Régistration (alignement) des images
2. Stacking (empilement) des images

L'empilement des images permettra de d'augmenter le rapport SNR (signal/bruit) de l'image finale obtenue, car le bruit augmente beaucoup moins vite (racine carrée) que le signal lorsqu'on stack les images brutes.

Image Bias ou "Offset" en imagerie désigne l'image de référence utilisée pour éliminer le signal de lecture du capteur photo. Elle est produite en réalisant une photo sans aucune lumière et pendant un laps de temps très court. Le signal de lecture n'est pas influencé par la température du capteur. Un "Master Bias" est une image moyenne réalisée débarrassée du bruit photonique et du bruit de lecture : Master Bias $= \sum$ Bias.

L'image d'offset est à réaliser une fois par ans seulement car leur évolution est directement liée au vieillissement du capteur.

Image Dark ou "Image de Signal Thermique" en imagerie désigne l'image de référence utilisée pour éliminer le signal thermique du capteur. Elle est produite en réalisant une photo sans aucune lumière et pendant un laps de temps égale au temps de pose ciblé pour la photo. Le bruit numérique engendré par ce signal parasite est d'autant plus élevé que la température du capteur est élevée. On peut limiter le signal Dark (et son bruit) en utilisant des caméras refroidies ou en réduisant le temps de pose. Un "Master Dark" est une image moyenne débarrassée du bruit photonique : Master Dark $= \sum$ Dark $-$ Master Bias.

Il est possible de réaliser à l'avance des séries d'images Dark en fonction de la température et de différents temps de pose de référence mais seulement si la camera est refroidie dans le but de mieux contrôler la température de prise de vue. De cette

manière on évite de refaire une image Dark avant chaque prise de vue.

Image Flat ou “Image Plage de Lumière Uniforme” (PLU) en imagerie désigne l’image de référence utilisée pour éliminer la poussière, les pixels défectueux sur le capteur et le vignettage produisant l’éclairement inégal du capteur. Elle est produite en réalisant une photo d’un plan clair que l’on peut reproduire avec un ciel bleu ou une “Boite à Flat” (un diffuseur uniforme de lumière). Un “Master Flat” est une image moyenne débarrassée du bruit photonique : Master Flat $= \sum$ Flat $-$ Master Bias $-$ Master Dark Flat. On peut aussi ne pas prendre en compte de Master Dark Flat dans son workflow [137]. Attention de vérifier que l’image Flat n’est pas cramée, c’est à dire que le niveau des pixels n’est pas à sont maximum (blanc pur) soit une valeur trop proche de 65 535 ADU (2^{16} bits -1) sinon les défauts n’apparaitrons pas sur l’image.

Les poussières prennent un aspects de tâches dans le cas des lunettes ou de donghnuts dans le cas d’instrument obstrués par un miroir secondaire. On peut aussi estimer la distance d en mm d’une poussière à la matrice du capteur par une formule suivante [744] : $d = [D_{\text{dust}} \times p \times F/D]\,/1000$, D_{dust} est le diamètre en pixels de la poussière sur la photo, p est la dimension en μm du pixel sur le capteur et F/D l’ouverture de l’instrument.

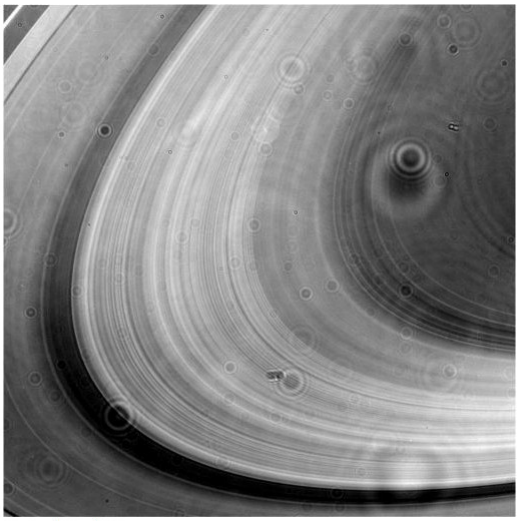
Donuts sur brut



Credit : Henry from NZ

Ces poussières se révèlent surtout sur des photos très faiblement éclairées comme en astrophoto du ciel profoind et parfois même en planétaire dans certaines conditions ! [285].

Cassini March 10, 2009

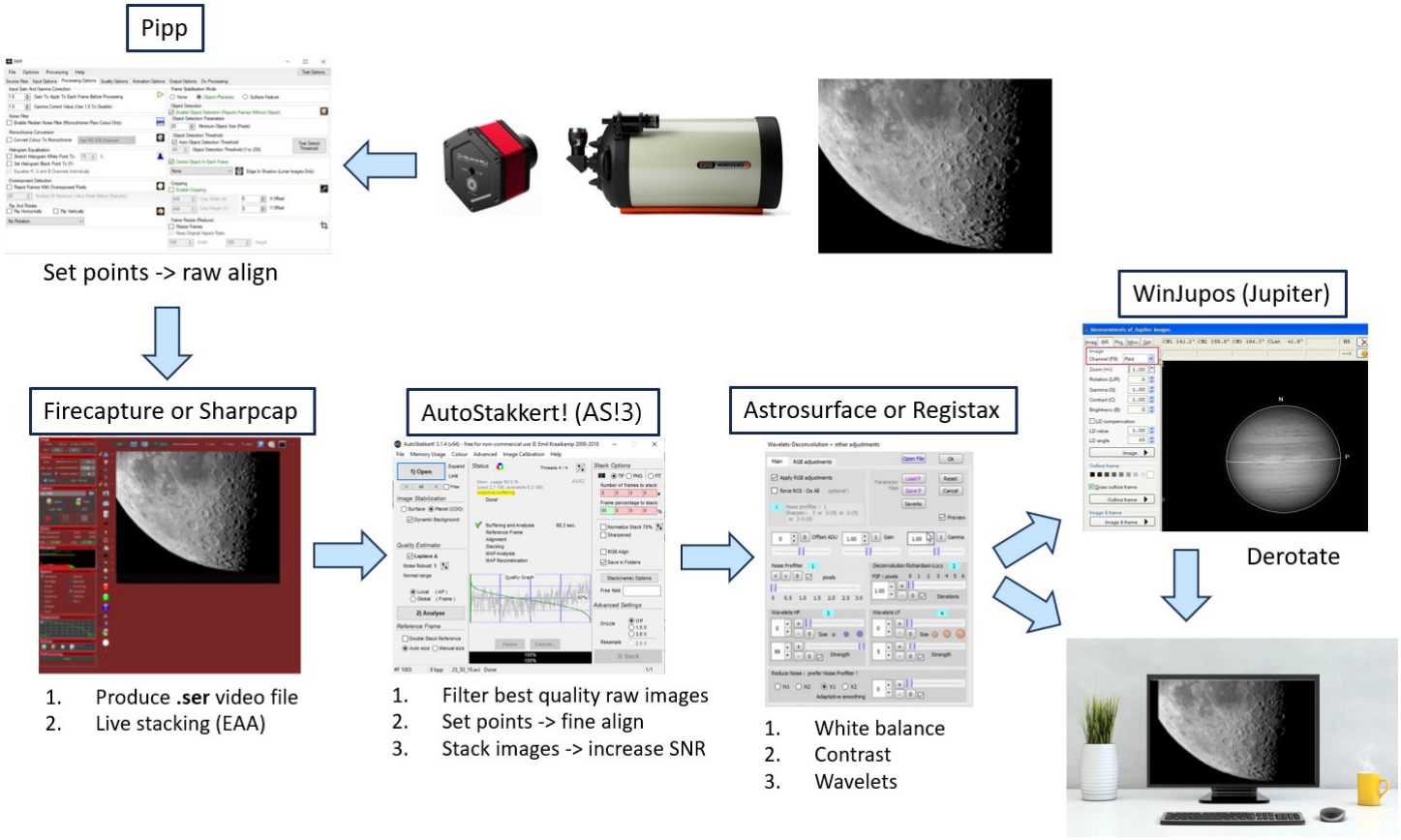


Credit : Emily Lakdawalla

Image Dark Flat désigne une image de Dark réalisée dans les conditions de prise de vue de l'image Flat (utile si le temps de pose du Flat est trop long). Un "Master Dark Flat" est une image moyenne débarrassée du bruit photonique : Master Dark Flat $= \sum$ Dark Flat $-$ Master Bias.

9.6 Workflow Astrophoto Planétaire

La mise en oeuvre d'une chaîne de traitement astrophoto ou "Workflow" nécessite en général plusieurs logiciels, c'est le cas en planétaire aussi où il faut réaliser de nombreuses opérations de la capture au stacking des images bruts.



Credit : J.G. Gricourt

9.7 La mise au point

La mise au point est importante en astrophoto car il faut garantir que les étoiles seront les plus petites possible sur les clichés tout comme pour le planétaire on cherchera à obtenir les détails les plus fins. La mise au point peut être contrôlée visuellement en première intention mais ce n'est pas suffisant il faudra utiliser des outils plus sensible tel que le masque de masque de bahtinov afin d'obtenir un réglage optimal même en visant des étoiles plus faibles que les étoiles principale que l'on a pas toujours dans le champs. On pourra aussi asservir la mise au point du porte oculaire électroniquement afin de suivre les changements de mise au point durant le temps de pose, la mise au point est bonne lorsque le réglage se trouve au creux de la courbe de variation de la FWHM.

Les cause des changements de mise au point :

- Les changements de températures du setup en raison de la rétractation des matériaux lorsque la température diminue
- Les changements de la turbulence atmosphérique modifiant la taille des étoiles

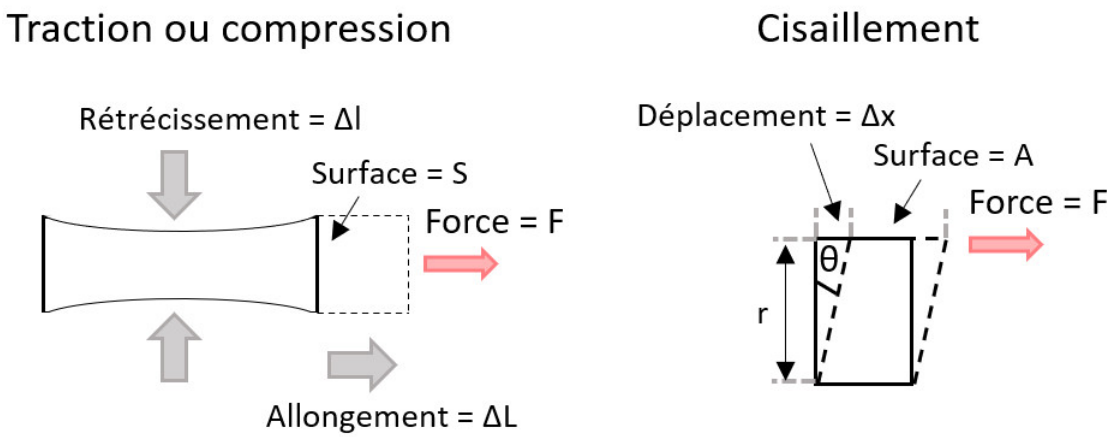
Le masque de bahtinov nécessitera un maillage d'autant plus serré que la focale de l'instrument est courte.

Chapitre 10

Les Matériaux

10.1 Généralités

Résistance des matériaux désigne la science qui étudie les propriétés mécaniques des matériaux. Il existe plusieurs types de contraintes applicables sur un matériau [660].



Credit : J.G. Gricourt

La traction (ou compression) est une force qui s'exerce sur un matériau en l'allongeant (le raccourcissant). Lorsque le matériau s'allonge, il rétréci également. Lorsqu'il s'agit d'un tube soumis à un force de compression, selon le matériaux utilisé il peut subir une déformation en forme d'arc c'est le flambage qui peut conduire à la rupture.

Traction La contrainte en traction dite aussi "contrainte normale" est défini par : $\sigma = F/S$ où S est la surface sur laquelle est appliquée la force (orthogonalement), σ est exprimée en unité de pression (MPa).

Soit E le module de Young ou module de traction ou module d'élasticité définit la résistance du matériau à la traction.

La loi de Hooke ou loi d'élasticité : $\sigma = E \times \epsilon$ où $\epsilon = \Delta L/L$ l'allongement relatif

Le cisaillement est une force qui s'exerce sur un matériau de manière parallèle à une surface.

Cisaillement La contrainte en cisaillement est définie par : $\tau = F/A$ où A est la surface déplacée par la force (parallèle)

Soit G le module de cisaillement ou module de rigidité définit la résistance du matériaux au cisaillement.

La loi de Hooke : $\tau = G \times \frac{\Delta x}{r}$ où Δx est le déplacement.

Pour de petits angles : $\tau = G \times \theta$ où θ est l'angle correspondant à la déformation Δx

Facteur d'amortissement En situation dynamique où une contrainte = "Strain" de type sinusoïdale appliquée au matériau, le module (traction ou cisaillement selon la contrainte) devient dynamique. La réponse du matériau une fois la contrainte passée est aussi sinusoïdale, mais en retard de $-\phi$ (déphasée d'un angle) en raison de l'énergie dissipée au moment de sa déformation sous la contrainte.

Dans le cas d'un matériau parfaitement élastique $\phi = 0$ le module est alors calculé selon la loi de Hooke et il vaut E_0 en dehors de ce cas de figure la loi s'écrit : $E = E_0 \times (cos\phi + isin\phi)$ [802].

Le facteur d'amortissement η = "Damping Factor" = "Loss Factor" est proportionnel à $tan\phi$ et dépend de la température et de la fréquence de la contrainte :

$$
\begin{aligned}
E' &= E_0 cos\phi \quad &&= \text{storage modulus} \\
E'' &= E_0 sin\phi \quad &&= \text{loss modulus} \\
\eta &= \frac{E'}{E''} = \tan\phi
\end{aligned}
$$

Le caoutchouc possède un facteur d'amortissement élevé $\eta = 0.05$, il peut être utilisé dans les cas suivant :

- Absorption des chocs
- Contrôle des vibrations
- Réduction du bruit
- Dissipation de la chaleur

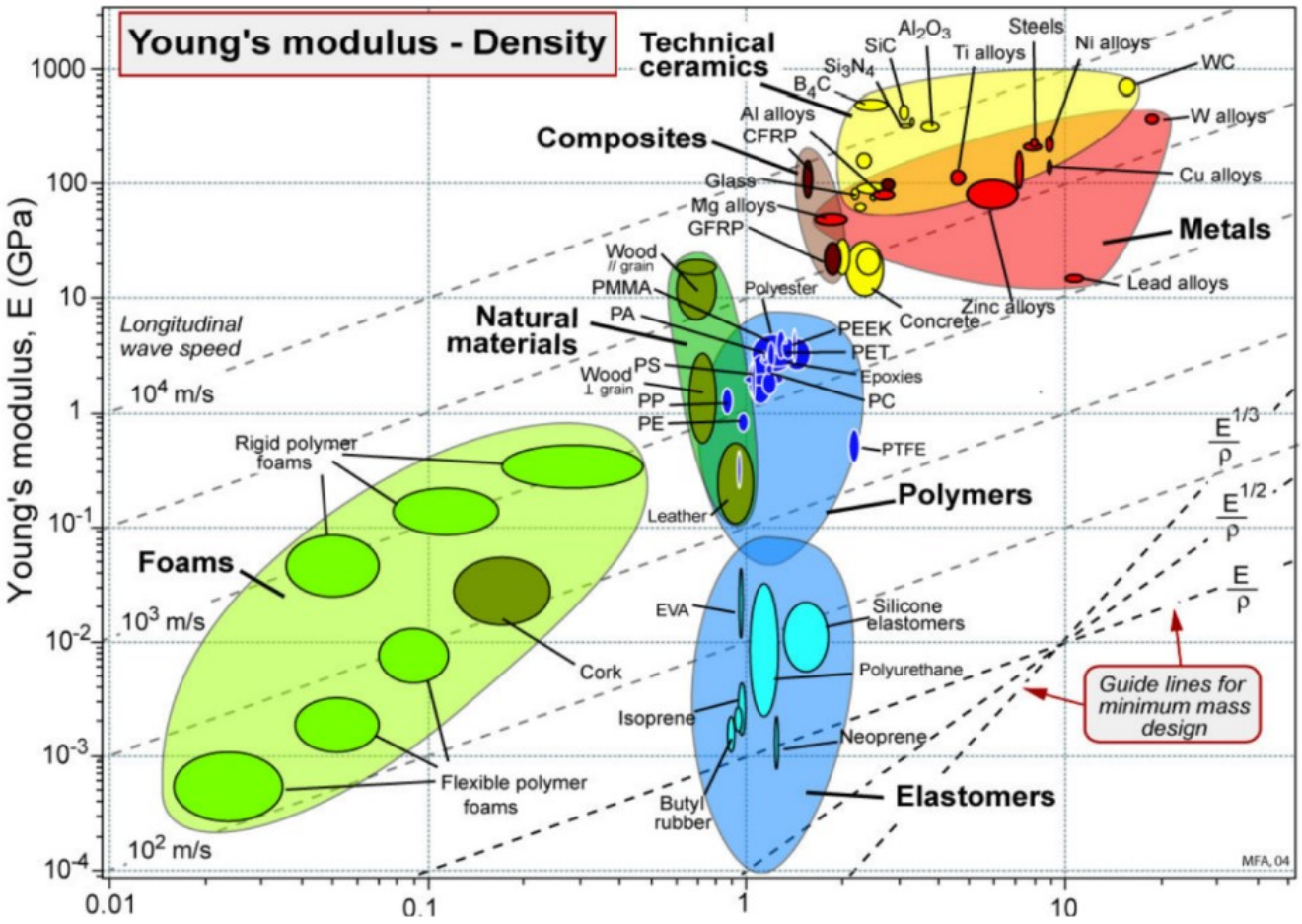
Les matériaux utilisés dans les instruments de musique où les propriétés vibratoires sont importantes possèdent des facteurs d'amortissement faible, il continue de vibrer longtemps avec très peu de dissipation d'énergie.

Matériaux isotropes Lorsque le milieu est homogène, on obtient : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ où ν est le coefficient de Poisson.

Le coefficient de Poisson définit le rétrécissement : $\nu = \frac{\Delta l/l}{\Delta L/L}$.

Choix des matériaux Les graphiques d'Ashby permettent de faire le choix de matériaux selon sa densité ρ et son module de Young E.

Diagrammes d'Ashby : module d'Young E vs densité ρ



Credit : Propriétés comparées des matériaux

Moment quadratique désigne une grandeur qui caractérise la géométrie d'une section. Le moment quadratique permet de calculer sa résistance à la rupture soit en torsion I_O soit en flexion I_x ou I_y.

Le moment quadratique se calcule par rapport à l'axe des (x) soit par rapport à l'axe des (y)

$I_x = \int y^2 ds$ et $I_y = \int x^2 ds$

Le moment quadratique permet aussi de calculer le moment d'inertie.

Par exemple :

Pour un tube creux : $I_G = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32}$ où d = diamètre intérieur et D = diamètre extérieur.

Pour une tige rectangulaire creuse : $I_G = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$ où B,H = côtés extérieurs et b,h = côtés intérieur.

Dans le cas d'une contrainte telle une force F (un poids) appliquée au centre d'une poutre de longueur L on obtient une déformation (la flèche) de $\Delta = \frac{FL^3}{48 \times E \times I_G}$ où E = module de Young du matériau et I le moment quadratique de la poutre.

Moment polaire désigne une grandeur qui caractérise la résistance d'un objet à la torsion.

$I_O = \int r^2 ds = I_x + I_y$ où O est l'origine des axes (x) et (y)

Théorème d'Hugyens, calcul du moment d'inertie d'une section : $I_O = I_G + S \times d$ où I_O est le moment d'inertie par rapport à un axe quelconque, I_G est le moment d'inertie par rapport à un axe passant par le centre de gravité e la surface de la section, S est la surface de la section et d la distance entre les 2 axes.

Dureté de Knoop désigne l'échelle de dureté des matériaux. L'échelle de Mohs est aussi une échelle de dureté.

Dureté des matériaux

Matière	Dureté de Knoop
Diamant	7000
Silicon Carbide	2480
Tungsten Carbidee	2000
Quartz (cristal)	820
Zerodur	620
Verre Quartz	590 - 620
Verre BK7	610
Verre Suprax	-
Verre Supremax	480
Verre ordinaire	-
Fluorite	163
Acier	143
Aluminium	130
Or	69
Bois	10

Emissivité thermique désigne une grandeur physique caractérisant la capacité d'un matériaux à rayonner l'énergie reçu en selon sa température. L'émissivité thermique compare la Luminance Lm du matériaux pour un longueur d'onde ν à la température T à celle d'un corps noir Ln à la même température et longueur d'onde : $\epsilon(T) = \frac{Lm}{Ln}$. Un corps noir possède une émissivité de 1 à toutes les température et longueur d'onde ν [668]. Le choix de certains matériaux dans la construction d'instrument astronomiques se portera sur ceux possédant la plus faible émissivité afin d'éviter le rayonnement de la chaleur sources de baisse de contraste dans les images.

CTE signifie "Coefficient Of Linear Thermal Expansion" exprimé en $10^{-6}K^{-1}$, à ne pas confondre avec la conductivité thermique, il désigne une propriété importante des miroirs utilisés comme primaire dans les télescopes. Contrairement aux verres utilisés, les optiques des lunettes ou des oculaires pour lesquels la transmission de la lumière et la dispersion sont des propriétés importantes, les verres des miroirs doivent être inertes aux changements de température et le CTE mesure cette propriété : CTE $= \frac{\Delta L_{(T_1)}}{L_0 \times \Delta T}$ où l'augmentation de température vaut $\Delta T = T_1 - T_0$ et l'allongement vaut $\Delta L = L_1 - L_0$ [10, 508].

De manière générale, les verres de CTE faibles sont plus facile à paraboliser (pas de déformation sous échauffement) et garde leur forme optimale même soumis à un gradient de température (refroidissement la nuit).

CTE de différents verres [505]

Type	Fab.	Nom	CTE ($10^{-6}K^{-1}$)	Densité (g/cm3)	Dureté (1 kN/mm^2 = GPa)
Clearceram-Z	Ohara	Vitrocéramique	0.01	2.21	-
Zerodur	Schott	Vitrocéramique	0.05	2.53	91
Astrositall	LZOS	Vitrocéramique	0.15	2.46	-
ULE 7972	Corning	Quartz	0.30	2.63	68
Fused Silica	ULS	Quartz	0.50	2.63	71
Borofloat 33	Schott	Borosilicate	3.25	2.23	64
Supremax 33	Schott	Borosilicate	3.25	2.20	-
Pyrex 7740	Corning	Borosilicate	3.25	2.23	63
H-PZ33	CDGM	Borosilicate	3.25	2.23	-
Duran	Corning	Borosilicate	3.33	2.23	-
Silicon Carbide (SiC)			3.70	3.21	364
Suprax	Schott	Borosilicate	4.10	2.30	-
BK7	Schott	Borosilicate	7.10	2.20	-
Soda-lime glass	-	Regular glass	9.00	2.55	-
Acier carbone (AISI 1020)	-	-	11.7	-	-
FPL-53	-	-	14.5	-	-
Acier	-	-	15.9	-	-
Aluminium	-	-	23.4	-	-

Note : Dureté = Young Modulus, CTE $= 10^{-6}K^{-1}$.

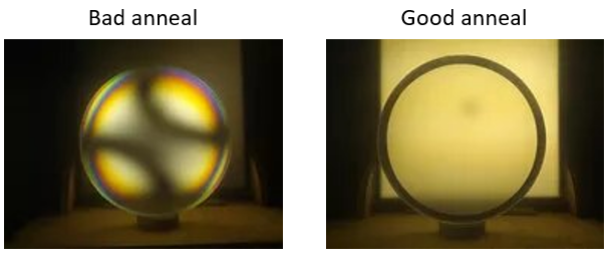
Pour un miroir primaire de diamètre initial D_0 à température initiale T_0 soumis à un différentiel de température de $\Delta T = T - T_0$ (en Kelvin) la variation de diamètre sera : $\Delta D = D_0 \times (T - T_0) \times$ CTE.

Optique / Annealing ou “Recuit” désigne le processus de fabrication du verre qui consiste à le faire refroidir très lentement par palier afin d’éviter la formation de stress internes dans le verre.

Le stress interne du verre se produit lorsque le refroidissement a été trop rapide et a pour conséquence :

1. Fragiliser le verre une fois refroidi par la présence de stress internes
2. Déformer le verre longtemps après le polissage
3. Déformer le verre lors des brusques changements de température

Différence d’annealing



Credit : Ostahowski Optics

Les verres utilisés pour fabriquer les blanks des futurs miroirs sont issus de ce procédé de fabrication. Les matériaux à faible coefficient d'expansion comme le verre Quartz [473] ou le Zerodur ne sont pas sujets aux stress internes lors des chutes brutales de température lors de la fabrication, cependant leur procédé de fabrication usuel est aussi basé sur l'annealing.

Transfert thermique désigne la propagation de la chaleur dans un milieu. Il existe plusieurs modes de propagation de la chaleur :

- La convection : la propagation se fait entre les molécules d'un fluide comme dans l'air (chocs mécaniques)
- La conduction : la propagation se fait au contact d'un matériau intermédiaire, comme la paroi d'un tube de télescope
- Le rayonnement : la propagation se fait par libération d'ondes électromagnétiques telle que les IR = Infrarouge

Le nombre de Rayleigh R_a caractérise la quantité de cellules turbulentes dans un fluide au départ laminaire arrivant au contact d'une paroi. On peut ainsi évaluer si dans un tube de télescope les flux d'air sont laminaire (idéal) ou bien turbulents et convectifs. On sait que les cellules turbulentes dans la turbulence instrumentale sont directement responsables de la dégradation des images.

Calcul du nombre de Rayleigh : $R_a = \frac{g\beta(\Delta T L^3)}{v.\alpha}$ [544], où $g = 9.8m/s^2$ la gravité terrestre, $\beta = 1/T$ le coefficient de dilatation thermique de l'air avec T (Kelvin) la température ambiante, ΔT représente le différentiel de température (Kelvin) entre la paroi et le milieu ambiant (extérieur), L est la longueur du tube, $v = 15.6.10^-6m^2/s$ est la viscosité cinématique de l'air et $\alpha = 20.10^-6m^2/s$ la diffusivité thermique de l'air. La valeur critique $R_{ac} = 1700$ est la valeur à partir de laquelle des cellules de convection vont se former (avant le flux reste laminaire). Le nombre de Raynolds permet aussi de déterminer si un fluide en mouvement s'écoule de manière laminaire ou turbulente.

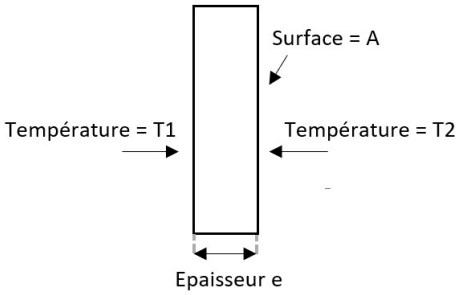
Conductivité thermique désigne la capacité d'un matériau à conduire la chaleur.

Conductivité des matériaux courants

Matière	Conductivité ($W.m^-1.K$)
Diamant	1000
Aluminium	205
Acier	50.2
Zerodur	1.46
Verre Suprax, Supremax, Quartz	1.38
Verre BK7	1.1
Eau (20°C)	0.6
Verre ordinaire	0.8
Bois	0.04 - 0.12
Air	0.024

Lorsque les 2 faces d'un matériau sont à des températures différentes T1 et T2, une quantité de chaleur Q traverse le matériau de la température la plus chaude vers la plus froide jusqu'à a l'équilibre thermique où T1 = T2 à la fin. On calcul cette dissipation de chaleur en Watt par la formule suivante : $Q = C.A\frac{\Delta T}{e}$ où e = épaisseur du matériau, A la surface de transfert de l'énergie et C = conductivité.

Conductivité



Credit : J.G. Gricourt

Effet Pelletier désigne un phénomène de la physique où l'application d'un courant électrique entre 2 matériaux différents produit un déplacement de chaleur. C'est ce principe qui est utilisé pour refroidir les cameras astrophoto (et les glacières). Soumis à une différence de potentiel (voltage) les électrons se déplacent est portent en eux un certaine entropie (agitation thermique = chaleur) qui sera libérée au passage dans un second matériaux.

Blank ou "Mirror Blank" désigne la galette de verre cylindrique avant son polissage.

Poids du verre le verre désigne le matériau principal utilisé à la fois dans les optiques des lunettes et des télescopes à miroir. Le poids d'un matériau dépend directement de sa densité :

Poids des objectifs de différents instruments

Instrument	Poids (kg)	Matériau	Densité (g/cm^3)	ratio D/e
Miroir 152 mm	0.9	BK7	2.20	7
Miroir 203 mm	2.0	BK7	2.20	7
Miroir 254 mm	4.0	BK7	2.20	7
Miroir 305 mm	7.0	BK7	2.20	7
Miroir 406 mm	13.4	Suprax	2.30	9
Miroir 406 mm	15.4	Verre Quartz	2.63	9
Miroir 406 mm	14.8	Zerodur	2.53	9
Miroir 457 mm	19.2	Suprax	2.30	9
Miroir 508 mm	26.3	Suprax	2.30	9
Miroir 610 mm	45.6	Suprax	2.30	9
Miroir 711 mm	72.1	Suprax	2.30	9
Miroir 1000 mm	207.8	Suprax	2.30	9
TS-Optics 102 mm F/7 ED	0.84	-	-	-
TS-Optics 90 mm F/6.6 Triplet APO	1	-	-	-
APM LZOS 304 mm F/7.5 Triplet APO	32	-	-	-

Note : pour les objectifs de lunette, on inclut la cellule dans le poids total.

Le volume d'un miroir de télescope ou d'un objectif (multi-lentilles) de lunette sont très proche du volume d'un cylindre calculé selon la formule : $V = \pi \frac{D^2 e}{4}$ où e = l'épaisseur de la galette.

Le ratio diamètre / épaisseur typique selon les objectifs :

— Objectif doublet ED : 1/7
— Objectif triplet APO : 1/3
— Miroir parabolique : de 1/6 à 1/9

10.2 Traitement Optique

Traitement Anti-Reflet ou “Coating” désigne le traitement chimique appliqué sur les surfaces optiques des lentilles, des objectifs de lunette ou des oculaires afin de supprimer les réflexions internes qui viendraient altérer le contraste de l’image ou produire des artefacts (images fantômes). Sans traitement, les lentilles perdent environ 4% de flux par surface traversée, soit pour 1 seule lentille la transmission passe de 100% à $T = 92\% = 100 \times (1 - 4\%) \times (1 - 4\%)$ [272]. Ce traitement exploite la propriété d’interférence des ondes lumineuses traversant une lame mince et dont l’amplitude peut s’annuler si elles sont en opposition de phase. Le problème avec la couche simple est qu’une partie de la lumière est perdue en étant complètement réfléchie par le verre de la lentille. La couche anti-reflet fait en sorte que toute l’onde lumineuse arrivant sur la surface de la lentille avec un angle d’incidence proche de 0 (lumière des étoiles) est transmise entièrement alors que l’onde lumineuse arrivant sur la surface de la lentille avec un angle d’incidence élevé (reflets indésirables) est réfléchie un déphasage destructif alors l’intensité lumineuse est réduite à néant. Ce traitement améliore sensiblement la transmission du flux lumineux des optiques en réduisant significativement les pertes. En visuel, le traitement anti-reflet le plus courant est celui au MgF2 centré sur 550nm.

Selon les surfaces traitées, il existe plusieurs types de traitement :

1. Coated ou Single-Coated : une seule surface “Air / Verre” est traitée avec 1 couche
2. Fully Coated (FC) : toutes les surfaces “Air / Verre” sont traitées avec 1 couche
3. Multi Coated (MC) : au moins une surface “Air / Verre” est traitée multi-couche
4. Fully Multi Coated (FMC) : toutes les surfaces “Air / Verre” sont traitées multi-couche y compris les prismes, la transmission est alors supérieure à 90%.

Roland Christen (Astro-Physics) indique que la couche de traitement des lentilles ne peut pas être refaite comme une aluminure sur un miroir, car celle-ci fait partie intégrante du verre et nécessiterait un repolissage pour être remplacée [636].

Aluminure ou “Coating” désigne la mince couche réfléchissante déposée sur la surface d’un miroir, généralement en verre ou en céramique. Autrefois, les miroirs étaient recouverts d’argent, un métal très réfléchissant, mais très fragile car ils s’oxydent à l’air et se déteriorent à lumière si ils sont aussi associés à un halogène. Aujourd’hui on utilise une couche d’aluminium et une couche protectrice au-dessus. Il faut distinguer les aluminures des miroirs primaires et secondaires qui sont en général des miroirs de grandes dimensions des miroirs plus petits comme ceux présents dans les renvois coudés.

Les aluminures protégées des miroir primaires et secondaires [534, 273] :

— Aluminium protégée simple (une couche) : Al+SiO2 réfléchissant à 88%
— Aluminium protégé, renforcée (multicouche) : Al+SiO2+Zr02 réfléchissant à 96%
— Aluminium protégé, renforcée, hydrophobe (multicouche) : Al+SiO2+Zr02 couche hydrophobe réfléchissant à 96%

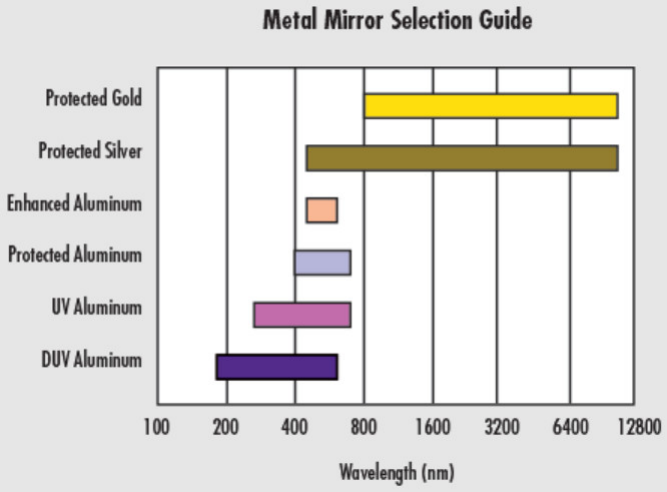
Les aluminures protégées ont la propriété de :

— Maximiser le pouvoir réfléchissant (96% minimum)
— Renforcer la protection de l’aluminium (durée de vie plus longue, 20 ans)

Les mirroirs à aluminure classique “Enhanced Aluminum” et “Protected Aluminum” ont une plage de transmission très

courte englobant uniquement une partie du spectre visible, les miroirs en Or quant à eux transmettent parfaitement les NIR/IR. Les meilleurs miroirs sont à en argent car ils transmettent une plage beaucoup plus large du spectre et ont un meilleurs taux de reflectivité.

Metal Mirror Applications



Credit : Edmund Optics

Les aluminures des renvois coudés à miroir ne comportent pas d'aluminium en général, mais une couche de diélectrique qui améliore la réflectivité et protège mieux le miroir de l'oxydation [188].

Transmission éléments optiques des miroirs secondaires [796]

Element	Material	Layers	Scratch resistant	Transmission
Mirror "Silver Reflective Layer"	-	0	no	98%
Mirror "Protected Coating"	SiO2 or MgF2 (*)	1	no	88%
Miroir "Enhanced Coating"	ZrO2	20 or more	yes	96%
Renvoi coudé	ZrO2	20 or more	yes	99%

Note 1 : La colonne "Material" indique la couche de protection posée sur l'aluminum la couche réfléchissante ici. Note 2 : Les aluminures de type "Enhanced Coating" sont souvent confondues à tord avec un traitement diélectrique.

Le traitement diélectrique comprend plus de 40 couches et son application demande plus de temps et de complexité qu'un traitement classique. Le traitement diélectrique exploite la propriété d'interférence des ondes lumineuses traversant une lame mince et dont l'amplitude peut s'additionner si elles sont en phase. Le problème avec une couche unique est qu'une partie de la lumière est perdue en traversant complètement la couche réfléchissante. La couche de diélectrique fait en sorte que l'onde lumineuse arrivant sur la surface du miroir avec un angle d'incidence élevé (lumière des étoiles) est réfléchie avec un déphasage constructif, alors l'intensité lumineuse sortante est conservée (au global). Ce traitement améliore sensiblement la transmission du flux lumineux des optiques en réduisant significativement les pertes.

On peut retirer la couche d'aluminium des miroirs primaires ou secondaires avec du Perchlorure de Fer (FeCl3) [330] il est sans danger pour le verre et pour l'utilisateur.

On utilise pas de traitement de type diélectrique sur des miroir primaires car [248] :

— Car le courbure du miroir implique des angles d'incidence différence alors que la réflectivité de type de traitement dépend justement de l'angle d'incidence.
— Même sur une surface plane il est diffile à appliquer de manière uniforme.
— Il n'est pas possible de retirer l'aluminure d'un miroir traité avec une couche de diélectrique [719] car dans ce cas il faudra le repolir.

Les composés suivant sont déconseillés car ils attaquent le verre au niveau atomique ce que l'on veut éviter pour ne pas entamer le polissage, cependant sur un miroir de salle de bain certains composés interdit ici peuvent convenir vue l'usage l'usage d'un tel miroir.

— Acide Fluorhydrique (HF)
— Hydroxyde de Sodium (NaOH) = utilisé dans la lessive = soude caustique
— Acide Chlorhydrique (HCl)
— Acide Sulfurique (H2SO4)
— Hypochlorite de Sodium (NaClO) = eau de Javel

Attention HF et NaOH mangent littéralement le verre.

Dielectric Mirror ou "Bragg Mirror" désigne un miroir constitué de multiples fines couches de matériaux diélectriques afin d'optimiser son pouvoir réfléchissant en produisant des interférences constructives. Une portion de rayons incidents sont transmis et une autre réfléchie et en atteignant une couche plus basse encore, une partie du rayon sera aussi réfléchi. Un miroir diélectrique peut réfléchir plus de 99.99% de la lumière.

EBC coating ou "Electron Beam Coating" désigne le procédé de traitement des lentilles de la société Fuji. Le procédé consiste à déposer de nombreuses couches de diélectrique, et ce, afin de réduire les réflexions parasites et d'améliorer la transmission lumineuse.

10.3 Les Verres

Borosilicate désigne un type de verre contenant du trioxyde de bore qui a la particularité d'avoir un faible coefficient de dilatation thermique CTE = "Coefficient Of Linear Thermal Expansion". Le CTE des borosilicates est de l'ordre de 3.3. Le verre ordinaire ou Soda-lime glass à un CTE de 9. Le BK7 qui est aussi un borosilicate est un verre plus dur que le Pyrex et donc plus difficile à faire retoucher. Le B270 possède les mêmes propriétés que le BK7 mais est surtout utilisé pour les miroirs.

ED signifie "Extra Low Dispersion Glass" désigne un type de verre à très faible dispersion chromatique [754]. Afin que la correction chromatique soit effective lorsque il faut que chacun des verres Crown et Flint produisent la dispersion chromatique opposée pour que celle ci puisse s'annuler une fois les verres combinés = appariés entre eux [639]. La forme des lentilles jouent également un rôle car une lentille fortement convergente (verre Crown) disperse plus la lumière donc en général pour réaliser un doublet corrigé pour l'aberration chromatique il faut [540] :

— Une lentille fortement convergente avec un verre peu dispersif (verre Crown)
— Une lentille faiblement divergente avec un verre fortement dispersif (verre Flint)

Le "Coddington Shape Factor" de la lentille prenant en compte ses 2 courbures mais aussi de l'indice de réfraction du verre permet de trouver la forme idéale qui minimise l'aberration sphérique [355].

Il faut donc que le nombre d'Abbe de ces 2 verres soient fortement différents ou éloignés horizontalement dans le graphique de Roland Christen [634].

Le verre ED “star” est la fluorite, un verre ED plutôt un cristal ici qui combiné à un verre classique qui disperse beaucoup et pris dans le graphique de Roland Christen [634] permet de produire les meilleures lunettes à doublet (lunette ED) ou triplet (lunette APO). Cependant la fluorite est difficile à travailler, car trop tendre et fragile. Des verres synthétiques ont maintenant largement supplanté la fluorite dans les lunettes ED de moyen de gamme, ceux-ci possèdent des caractéristiques très proches de la fluorite : FPL-53, FPL-55, FCD-100.

Roland Christen à dit : *The term ED means Extra-low Dispersion. A lot of glass has extra-low dispersion (generally any glass having a Vd value > 70). Not all glasses having this property will produce measurably better color correction than a standard crown-flint combination achromat. Measurably better would be better than 1 part in 2000 color error over the C-F spectrum (red to blue-green). Therefore, you can easily claim to have a (Semi-ED) lens if you use the common design FK5 crown and SF1 flint, yet have exactly the same color error as any normal achromat. It is not ED that produces better color correction. It is the fact that some glasses, notably the ones using fluorite elements in their construction, have a property known as abnormal dispersion. This property allows two dissimilar materials (such as crown and flint) to have opposite and equal color errors which cancel when they are combined. Most (not all) of these glasses with abnormal dispersion also are Extra-low Dispersion glasses, but the two properties should not be confused.* [283]

Fluorite désigne un matériau transparent qui n’est pas du verre, mais un cristal rose utilisé dans la fabrication d’objectif de lunette haute de gamme chez Takahashi dans les années 70-80.

Propriétés remarquables [535] :

- Elle possède un indice de dispersion Abbe = 95 comme le FPL-53 ou le FCD-100 donc le plus élevé des matériaux utilisés pour réaliser des optiques
- Elle est sensible à l’abrasion (fogging) car elle très tendre, indice de Mohs = 4, ce qui rend le polissage difficile à maitriser
- Elle possède un coefficient de dilatation 2.7 fois supérieur au verre [135] et similaire au FPL-53 ce qui rend le polissage plus difficile à maitriser
- Elle se brise facilement et rend le polissage difficile à maîtriser
- Elle ne diffuse pas la lumière, car c’est un cristal pur donc sans défauts internes ce qui est différent des autres types de verres (structure amorphe)
- Elle possède un spectre de transmission lumineuse beaucoup plus large que les autres verres en transmettant les fréquences depuis les UV jusqu’aux IR
- Elle serait sensible à l’humidité mais ce n’est pas formellement prouvé

On dit aussi que la fluorite se dégrade en présence d’humidité, ce qui semble être une légende urbaine, car des tests menés par des industriels ont démontré que cette affirmation est infondée [628].

Canon Optron produit des optiques complètes à base de fluorite (polissage et coating) pour Takahashi.

La fluorite a été utilisée la première fois dans les années 80s chez : Vixen, Takahashi, le verre Crown en fluorite à nu sans traitement mulit-couches (only the front element was multi-coated) était placé derrière le premier verre Flint (design Steinheil) afin de le protéger des agressions extérieures alors que le design optique indiquait qu’il valait mieux le placer devant afin d’obtenir des performances optimales [626], depuis des traitements mulit-couches efficaces permettent de placer la lentille en fluorite devant comme sur les séries de Takahashi modernes (sauf sur la série FC-100).

Pyrex désigne un type de verre de type borosilicate produit pendant longtemps par la société Corning propriétaire du nom et qui était l’unique type de verre à faible expansion utilisé pour les miroirs de télescope. En 2006 Corning cessa la fabrication du Pyrex et en 2009 la société allemande Schott racheta l’outil de production à Corning et continue depuis à produire un verre équivalent, le Supremax 33 [543]. L’appellation Pyrex est souvent utilisée pour désigner un verre de faible

expansion même s'il ne provient pas de la société Schott.

Soda-lime Glass désigne le verre ordinaire.

Float Glass désigne un étape de fabrication du verre, mais aussi désigne le verre ordinaire. Voir "Soda-lime Glass"

Fluage du verre désigne le phénomène physique où le verre étant une matière amorphe et non cristalline (stable) et donc dotée d'une viscosité même très faible, serait donc en mesure de fluer / couler par déformation plastique (permanente) avec le temps à température ambiante par gravité. On retrouve dans la littérature l'exemple célèbre des vitraux de certaines cathédrales quasi millénaires où l'on aura constaté que ceux-ci étaient plus épais en bas qu'en haut. En réalité, il s'agit d'une légende urbaine, le verre ne coule pas, on a démontré que seul le procédé de fabrication des vitraux produisait les déformations constatées [342].

En revanche le verre peut subir des déformations élastiques (non permanentes) soumis à leur propre poids tel un miroir posé sur sa tranche. De même qu'un objectif ou un miroir dans un état de déséquilibre thermique et donc subissant un gradient de température va se déformer le temps d'évacuer la chaleur qu'il contient vers le milieu ambiant plus froid.

Les objectifs des lunettes et les miroirs des télescopes ne se déforment de manière permanente soumis à la gravité et cela a été vérifié à maintes reprises par des opticiens, je cite Charles Rydel : "Supposons qu'en 800 ans le verre a flué de 0.8 mm seulement, il flue donc de 1 micron par an, soit 2 franges... Franchement, les miroirs qui coulent comme le calandos, ça se saurait !".

BK7 désigne un verre très utilisé dans les télescopes industriels grands publique en raison de son coût moindre. Le BK7 n'est pas sans défaut [529] :

- Le BK7 est souvent sujet au stress internes en raison d'un mauvais annealing ce qui le rend difficile à travailler avec une meilleure précision par un artisan qualifié en raison du risque de changement de forme soudain en cours de polissage
- Le BK7 est moins dur un peu comme le verre ordinaire ce qui rend difficile l'obtention d'une surface douce
- Son comportement thermique est moins bon que les verres équivalents au Pyrex, il se déforme sous l'effet d'un gradient de température

Quartz où "Verre Quartz" ou "Fused Silica" désigne le matériau sous forme amorphe (non cristalline) composé de verre à forte teneur en silice (SiO^2) et ayant ls propriétés suivantes [86] :

- Permet de produire des miroirs plus fin pour une rigidité similaire [232]
- Faibles coefficients de dilatation thermique CTE = 0.5 soit 6 fois moins que le Pyrex
- Résistants aux chocs thermiques
- Ne se déforme pas lors des changements de température $\Delta T > 0$, soit 1/6 de la sur-correction des autres verres de type Pyrex [516]
- Il garde sa forme à toutes températures T ambiante et facilite donc le polissage
- Le polissage et le mise en forme (figuring) prennent plus de temps car il est plus dur que les autres verres
- Ce type de verre est très homogène et ne contient donc pas de tensions internes contrairement aux autres verres produits par "Annealing"
- Il est 10% plus dur que le Pyrex, ce qui facilite le polissage fin (même s'il faut insister plus pour l'entamer) [515]
- C'est l'un des verres les plus transparents du marché (version produite en qualité optique) c'est pour cette raison qu'il est utilisé pour des applications d'observation de la lumière UV.

À ne pas confondre avec la forme cristalline de la silice que l'on appelle également Quartz. Le verre quartz pure utilisé dans l'industrie électronique est un matériau très cher. Celui que l'on trouve pour fabriquer les miroirs amateurs provient

exclusivement du recyclage des rejets (wafers) de l'industrie électronique, les "Fab Surplus" [513] qui sont alors 10 fois moins chers que ceux de qualité optique.

En raison de son homogénéité et de sa dureté, il est possible de diminuer l'épaisseur des miroirs à 6 :1 pour du Pyrex à 16 :1 pour du Quartz. Au delà de 16 :1 le risque d'astigmatisme de pliure est plus important [511] il faut alors prévoir de très bons barillets pour supporter des miroirs aussi fins.

Une moindre épaisseur possédant un coefficient de dilatation très faible, il permet :

1. De réduire le temps de mise à température ambiante (refroidir en général)
2. De réduire le temps d'attente entre 2 séances de polissage

Les miroirs en Quartz ou en Zerodur ne se déforment quasiment pas en refroidissant, ils gardent alors leur forme [22] en raison de leur coefficient d'expansion particulièrement bas [1]. De manière générale, en dessous de 12" le gain apporté par des verres de types "Ultra Low Expansion" (ULE) tel que le Pyrex, Supremax, Suprax ou Quartz est semble-t-il insignifiant [22].

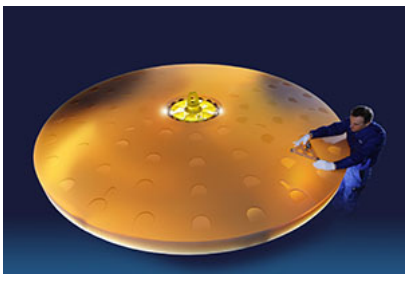
Le quartz étant un peu plus dur de 10%, le Zerodur de 40%, ces matériaux sont plus résistants à l'astigmatisme de pliure. Lors de la fabrication d'un miroir de télescope, il est plus aisé d'obtenir une forme et un état de surface encore meilleur, car les retouches sont plus contrôlables du fait qu'il ne se déforme pas sous l'échauffement de l'outil de polissage de plus le verre quartz ne contient jamais de tension interne du faite de son mode de fabrication "Fused Silica".

En résumé, les miroirs en quartz permettent [792] :

— D'observer immédiatement sans attendre l'acclimation du miroir parce que la parabole ne se déforme pas.
— De ne pas attendre que le miroir refroidisse entre 2 séances de polissage, l'opticien peut produire des miroirs de meilleure qualité.

Vitrocéramique désigne un type de verre contenant 70% de céramique et ayant la particularité d'avoir un faibles coefficients de dilatation thermique (CTE) et d'être résistants aux chocs thermiques. Le CTE des Vitrocéramiques est de l'ordre de 0.5. Le miroir du futur ELT de 39m diamètre, le plus grand télescope jamais construit, sera réalisé à partir de 798 segments hexagonaux en céramique Zerodur par Schott.

Zerodur Mirror



Credit : Sternstunden im Himalaya

10.4 Divers

Ebony Star désigne un matériau utilisé sur les dobsons afin de réaliser les mouvements en altitude ou azimut. La friction idéale est obtenue lorsqu'on utilise l'Ebony Star sur des patins en téflon.

1. English : Near zero expansion material

Carbone désigne un matériau composite fabriqué à partir de fibres de polyacrylonitrile (fibre de carbone) tressées puis collées en plusieurs couches. Il peut être utilisé à la fois pour les éléments de construction de la structure, mais aussi les barres truss.

Avantages :

- Al a fois léger et très rigide, soumis à de fortes contraintes mécaniques.
- Insensible aux variations de température
- Immunisé contre la corrosion

Inconvénients du carbone :

- Cassant en cas de choc (et non réparable)
- Ne résiste pas à l'abrasion
- Conducteur de l'électricité (statique notamment)
- Conducteur de chaleur
- Sensible aux vibrations contrairement au bois, voir le "Damping Factor"

Module de Young

Matériaux	Module de Young
Papier	3
Polystyrène	3
Glace	9
Cheveux	10
Chêne	12
Acajou	12
Laine	14
Brique	14
Toile araignée	25
Plomb	18
Bambou	20
Béton	20
Kévlar	35
Granite	60
Verre	69
Aluminium	69
Dioxyde de Silicium	70
Or	78
Argent	83
Fonte	83
Email dentaire	83
Magnésium	95
Titane	114
Cuivre	124
Fer	196
Acier	210
Fibre de carbone	240
Saphir	420
Carbure de Tungstène	650
Diamant	1000

Credit : J.G. Gricourt

PTFE signifie “Polytétrafluoroéthylène” désigne la matière ultra-glissante de couleur blanche utilisée sous forme de patin “Téflon Pad” pour faire glisser le rocker des dobsons en appuie dessus.

FRP signifie “Fiberglass Reinforced Panel / Plastic” désigne une matière plastique utilisé dans sa forme granuleuse qui appliquée sous la courbure du rocker permet de glisser sur des patins de PTFE (Téflon blanc) pour créer les indispensable mouvements fluides des dobsons. La particularité de cette combinaison FRP sur patin de Téflon = PTFE permet d’éviter le phénomène de collage qui se produit au démarrage du mouvement où le rocker se met en mouvement avec un retard lorsqu’une force lui est appliquée. Le “Ebony Star”sous sa forme granuleuse est une autre matière proche du formica qui peut remplacer le FRP.

Chapitre 11

Appendice A

11.1 Recommandations

Toujours vérifier ses sources !!!

Il est important de vérifier ses sources et de les mentionner dès que l'on avance une info, ce que j'espère avoir respecté dans ce document même s'il n'est pas parfait, je le reconnais.

Si l'on prend l'exemple les discussions ayant lieues dans les forums, on se rend compte très vite, beaucoup d'intervenants répètent sans discernement ce qu'ils ont entendu, lu ou bien compris un jour sans savoir véritablement l'expliquer, faute de connaissances plus approfondies des sujets.

Cependant, ce processus est normal car c'est celui qui amène à la discussion (les forums de discussion) et à la rectification éventuelle des informations lorsque d'autres membres sachants du forum interviennent et donnent toutes les références permettant à chacun de vérifier l'information.

Dans la même veine, des chaînes de Youtubeurs sur l'astro amateur fleurissent un peu partout et pourrait aussi devenir d'autres sources d'information sur l'Astro. L'inconvénient majeur de ce mode d'expression est qu'il est à sens unique. On peut certe y écrire des commentaires, mais ce n'est pas une bonne solution, car souvent les Youtubeurs cherchent à maitriser leur communication pour le bien de leur petite communauté et de leur réputation intimement lié à leur rémunération. Le débat n'y a donc pas sa place. Une chaîne Youtube est la plupart du temps un gagne pain pour leur propriétaire et très généralement, il n'est pas question de remettre en cause le discours du maître de cérémonie. Donc, c'est pour cela que je ne recommande pas beaucoup de chaines Youtube ici.

Tout cela pour dire qu'il faut toujours recouper les informations avec d'autres sources plus fiables comme des ouvrages spécialisés, des textes écrits par des amateurs expérimentés ou des professionnels reconnus. Vérifier le cursus de celui qui dispense un savoir sur un média permet aussi de se faire une idée de la fiabilité de l'information (mais pas toujours !). Malheureusement, toutes ces vérifications d'usage prennent beaucoup de temps et c'est bien la raison d'être de ce document.

11.2 Les forums

Voici une liste de forums qui sont devenus pour moi au fil des ans de véritables bases de connaissances :

— CloudyNights (CN) (USA) : un forum exemplaire et une référence internationale. Beaucoup de contributeurs sont des professionnels de l'optique, des ingénieurs et très souvent d'excellents pédagogues capables de faire comprendre des choses complexes à un public non averti. Pour moi ce forum est une mine d'information colossale, c'est de très loin celui qui m'a le plus appris sur l'astro amateur ! La modération y est à la fois discrète et d'une probité exemplaire dans ses interventions. Le forum est chapeauté par le magasin Astronomics (USA).
— StargazerLounge (UK) : un forum anglais un peu moins populaire en France mais très suivi dans le monde. Beaucoup de produits sont testés par les utilisateurs, la courtoisie est de mise comme fréquemment dans tous les forums anglo-saxons. Son premier sponsor est le magasin First Light Optics UK (Flo) une enseigne offrant un niveau de service de haute volée.
— Astronomyforum (UK) : un autre forum anglais, où on y retrouve des intervenants bien connus de CN.
— IceInSpace (Australie) : le pendant "Aussie" de CN, on voyage avec le ciel australe.
— Astrosurf (FR) : le forum français qui a la côte ! Certains contributeurs sont des scientifiques du domaine voir des journalistes bien connus (Mag, TV , Radio) et qui pour certains se montrent sous un jour surprenant en "backstage" :o). Attention, les débutants ont parfois du mal à trouver leur place dans ce forum qui se veut parfois élitiste sur certains sujets où l'on étale facilement sa science mais aussi ... son portefeuille. La modération y est exemplaire c'est à dire discrète et impartiale, tout en restant très vigilante (campagne d'information sur les arnaques en lignes).
— Webastro (FR) : un forum "populaire" en France jusqu'à son apogée vers 2015 puis connait un changement d'ambiance et une descente en raison de sa gestion clanique et autoritaire qui a fait bannir de nombreux membres. L'accès au site est devenu plus instable au fil des ans et plus récemment il semble qu'il n'accepte plus de nouveaux membres. Habituellement beaucoup de profils d'abonnés se côtoyaient sur ce forum, qu'ils soient astronomes amateurs ou simples curieux. Les débutants y trouvait en général l'aide attendue grâces aux interventions pertinentes de quelques anciens qui animaient encore certains groupes. Après 15 ans de fréquentation, il y a encore trop de connivences entre la direction du forum et certains petits groupes de harceleurs, mais aussi des cercles ouvertement politisés instrumentalisant le forum de manière un peu trop visible.
— AstronomyConnect (USA) : un forum que je connais encore peu mais très actif. Le forum est géré par le magasin Agenaastro USA.
— Astronomie VA (FR) : un forum consacré à la VA = Visuel Assisté, beaucoup d'enthousiasme anime les discussions pour faire avancer des techniques innovantes et en pleine effervescences.
— TheSkySearcher - TSS (US) : un forum ancien mais restauré au gout du jour et très fréquenté par les anglo-saxons.

11.3 Les chaînes Youtube

Voici une liste de chaînes Youtube à suivre :

— La Chaîne Astro : la chaîne Youtube de Christophe de La Chapelle alias CDLC dédiée aux débutants. Ici Christophe fait un vrai travail de production : les tutos, des lives très suivis mais aussi un travail journalistique digne des pros : les interviews, la couverture d'événements (RCE notamment). Christophe est un phénomène à part entière, car il fédère beaucoup d'amateurs, il est aussi très à l'écoute de ses abonnés et reste très honnête sur ses connaissances ce qui est rare de nos jours dans la jungle qu'est devenue Youtube où des prophètes utilisent ce média comme une stèle à leur propre gloire ou comme une machine à cash !
— Astronote : c'est à la fois une chaîne Youtube mais aussi un site de vente de matériel astro produit par Guillaume avant tout un astronome amateur.
— Univers Astro : les sujets abordés par Guillaume Le Mouellic sont surtout en relation avec l'astro photographie, les explications sont claires, il ne sur-joue pas sa présentation et même si ses vidéos sont un peu longues on ne se lasse pas.
— Pause Longue : comme le nom de ce vlog l'indique on parle ici d'astrophoto, Ludo son animateur est un astro-amateur qui a un certain sens pratique et qui ne juge que par le résultat, pas de chichi on va droit au but. Il semble avoir quitté Youtube depuis quelques années.

— Elsasstronomy : voila un vlog plein de fraicheur, Victoria parle d'observation mais surtout d'Astrophoto dans de nombreux tuto sur Siril, Nina et d'autres solutions à disposition des amateurs.
— Enastros : c'est à la fois une chaîne Youtube mais aussi un site de vente de matériel astro, Alexandra présente du matériel récent en condition réelle d'utilisation, pas d'élitisme c'est en général du matériel simple accessible à tous les budgets. C'est le genre de chaîne qui nous fait gagner un temps précieux au moment du choix d'un tout premier instrument.
— Ed Ting : l'excellente chaîne de Ed Ting, il aborde avec enthousiasme des questions que tout le monde se pose au sujet du matériel astro. Il produit peu mais ses interventions sont très suivies.

Des exemples de chaînes ayant une certaine popularité mais que je ne recommanderai pas pour différentes raisons :

— Astronomie Blog : un nouveau venu qui se veut un site pour proposer des articles sur le matériel astro mais qui clairement se veut surtout un site rabatteur pour engranger des commissions auprès de ses partenaires. A la lecture il y a beaucoup de nons sens, des informations fausses, il donne sont "avis" sur tous les produits du catalogue Astro-Shop sans avoir jamais testé aucun de ces produit. L'auteur n'est pas manifestement pas lui même un astronome amateur il compile du texte provenant d'autres sources sans en comprendre le sens, peut être un fan de ChatGPT ?
— Astronomie Pratique : au départ un vlog pour débutant un peu simpliste comportant beaucoup de raccourcis ayant pris un virage mercantile dernièrement pour proposer des "formations" payantes pour “devenir astronome amateur” rien que ça ! Un marketing agressif sur les réseaux sociaux clamant avec confiance : “Première chaîne YouTube d'Astronomie Amateur” ... et un virage récent vers l'élitisme où l'on étale son argent ... bref.
— Fred l'Astronome : un vlog qui partait d'une bonne intention au départ en adoptant un style de présentation “proche des gens”, mais dont les productions sont au mieux maladroites voir désastreuses pour certaines. Le discours est truffé d'erreurs et divulgue de fausses informations. L'animateur consacre des vidéos entières sur ses problèmes de crédit, de surendettement, de santé, ses frustrations ...
— Astronogeek : un autre vlog traitant de divers sujets sur l'astronomie souvent traités de manière confuse et parfois détournés par les opinions tranchées de son animateur qui nous parle avec un ton condescendant (crispant). Cependant, quelques vidéos sont bien faites alors que d'autres sont de la désinformation totale, il sera donc difficile de se repérer dans cette chaîne sans un oeil déjà averti.

11.4 Les magazines

Quelques uns de mes magazines préférés qui de temps en temps proposent des articles sur l'astronomie pratique :

— Sky & Telescopes, USA
— Astronomy, USA
— L'Astronomie, France
— Lettre d'information IMCCE, France
— Astronomy Technology Today, USA
— Reflector, USA
— Archives cahiers Clairaut, France

Je ne mentionne pas Ciel&Espace volontairement car la ligne éditoriale n'est plus celle que je lisais avec passion dans les années 90. Je trouve que ce magasine a clairement perdu de son prestige tout comme Science&Vie dont l'équipe éditoriale est partie pour fonder le magazine indépendant Epsilon en Juin 2021.

Chapitre 12

Appendice B

12.1 Bibliothèques astro photos

Une liste de sites de photos montrant des productions amateurs prisent au travers de différents instruments :

- AAPOD2
- Astronomy Picture of the Day
- Astrobin
- ALPO, Japan
- The International Solar Database
- NovaPix

12.2 Bibliothèques astro dessins

Une liste de base de données de dessins montrant la réalité des objets observés à l'oeil nu par le biais de différents instruments :

- L100 mm, Roger Ivester, USA
- L155 mm, Richard Orr, Maryland USA
- T200 mm, Jeremy Perez, Arizona USA
- T200 mm, Jeremy Perez (ASOD), Arizona USA
- T254 mm, Xavier Camer, France
- T300 mm, Gregory Barchard, France
- T300 mm, Michael Vlasov, Israel
- T254 mm, Martijn Straub, Allemagne
- T305 mm, Yves Argentin, France
- T400 mm, Fred Burgeot, Larzac France
- T400 mm, Peter Kiss, Hungary
- T400 mm, Tom Corstjens, Belgique
- T444 mm, Martin R. Lewis, UK
- T445 mm, Yann Pothier Ciel Extrème, France
- T457 mm, Andreas Domenico, Allemagne
- T500 mm, Alain Gérard, France
- T500 mm, Laurent Ferrero, France

— T600 mm, Alvin Huey USA
— T680 mm, Uwe Glahn, Allemagne
— T635 mm, Bertrand Laville, Provence France
— T700 mm, Howard Banich, USA

12.3 Pollution lumineuse

— Light Pollution Map
— Cartes AVEX, Frederic Tapissier, France
— Darksite Finder
— DarkSky Lab
— Nuit France (extinction des lumières)

12.4 Météo / Seeing

— Info Climat
— Light Pollution Map
— Skippysky Seeing
— Meteoblue Seeing
— Clear Outside
— Clear Sky Chart
— Aurora Forecast
— Geomagnetic Storm Kp Index

12.5 Des outils de calculs et de modélisation

Quelques outils :

— Ray Optics Simulation
— Ray Optics Simulation
— Oslo
— ZEMAX - OpticStudio
— 3D Optix
— Stellafane Newt for the web
— ATMOS, Massimo Riccardi
— Aberrator, Cor Berrevoets
— Quick Fringe,
— FringeXP, Dave Rowe
— Geogebra
— Omni calculator
— Web Graphviz
— Desmos Grapheur
— Mathway Algebra
— Math Microsoft
— Astrolabo
— Celestial Programming

12.6 L'optique instrumentale

Ce sont des sites de référence sur l'optique instrumentale, ceux ci complètent d'autres lectures :

- Astronomical Files from Black Oak Observatory, Bruce MacEvoy
- Notes on Amateur Telescope Optics, Vladimir Sacek
- Techniques d'astronome amateur, Serge Bertorello
- Recherche Education, Damien Gatinel
- Les cahiers d'ophtalmologie - Olivier Touzeau
- The Newtonian Telescope, Lionel Fournigault
- CatsEye Newtonian Telescope Design Planner, Jim FLy
- Cruxis Telescope Site Map, Robert Houdart
- Maskulator, Niels Noordhoek
- Tri-Bahtinov Mask Drawings Generator, Satakagi
- Cambridge In Colour Tri-Bahtinov Mask Drawings Generator
- Interferometry
- WinRoddier ★
- BigDobsonians Group
- All About Telescopes, EdmundOptics
- The Optical Bench, EdmundOptics
- Telescope Finders, EdmundOptics
- The Edmund Sky Guide, EdmundOptics
- Graphical Ray Tracing, EdmundOptics
- Edmun Mag 5 Star Atlas, EdmundOptics

12.7 Les filtres

- Light Pollution Filter Spectral Comparison
- Searchlight (Filtres)
- Filter Performance Comparisons

12.8 Des simulateurs de télescopes

Ces simulateurs permettrons de voir la champ produit à l'oculaire en fonction de l'oculaire utilisé :

- Astronomy Tools, FirstLights Optics
- Simulateur de Telescope, Stelvision
- Eyepiece Planner
- Telescope Simulator Telescopius
- Newton Simulator, Mel Bartels
- Ray Optics Simulation
- Eyepiece Calculator, Tele Vue
- Astronomy Tools 12 Dimensional String
- Useful Formulae, Wilmslow Astro
- Calculs de Focales pour l'Astronome Amateur, CFAA
- Atmos
- Aberrator

12.9 Astrophoto

— IRIS, Christian Buil
— Pixinsight
— NINA
— Registax
— Siril
— ASI Studio
— AutoStakkert!
— MaximDL
— Deepskystacker - DSS
— AstroSurface,
— Graxpert, Extraction de gradients
— Dynamic Backgtround Extraction - DBE, Extraction de gradients
— NASA Deep Star Map

Chapitre 13

Appendice C

13.1 Des cartes du ciel

— The Year-Round Messier Marathon, Harvard Pennington
— La liste du marathon Messier Stelvision
— Pocket Sky Atlas = PSA, Roger W Sinnott
— Sky Atlas 2000.0, Wil Tirion
— Uranometria 2000.0, Wil Tirion, Barry Rappaport
— Interstellarum Deep Sky Atlas (IDSA), Ronald Stoyan, Stephan Schurig
— Cambridge Double Star Atlas, Wil Tirion

13.2 La Lune - cartes

— LROC Moon
— Atlante Luna di Rükl, Antonin Rükl
— LAC, NASA
— Atlas Virtuel de la Lune, Patrick Chevalley
— Moon Map Astrostrona
— Atlas Photographique de la Lune, Jérôme Grenier
— Rükl Index Map, Antonin Rükl
— Wes Higgins Hi-Res Lunar & Planetary Photography, Wes Higgins
— Lune Database, Jérôme Grenier

13.3 La Lune - Livres

— Le Grand Atlas de la Lune, Serge Brunier, Thierry Legault
— Atlas Of The Moon
— Manuel d'Observation Lunaire, Norma, Gérard Coutes
— La Lune : 452 formations hors cratères, Gérard Coutes
— Atlas guide photographique de la lune, Georges Viscardy Librairie de la NASA, beaucoup de publications sur la Lune

13.4 Événements

— EarthSky Latest Conjunctions
— Latest Comets, British Astronomical Association (BAA)
— Bright comets in the coming 3 months, Gideon Van Buitenen
— COBS Comet Observation database, Črni Vrh Observatory (Slovénie)
— Weekly Information about Bright Comets
— All active supernova over mag 17.0
— Transient Name Server
— The Sky Live
— Space Weather Live
— NSO Solar - GONG H-Alpha solar surface
— Celestrak
— AAVSO Light Curve, AAVSO
— Deepsky Network, NASA
— Solar Cycle, NOAA
— Soho Sunspots
— Astro Colibri (Evenements en temps réel)
— Eclipses Solaires

13.5 Catalogues d'objet

— Liste du marathon de Messier - Stelvision
— Astronomical Catalogue Designations
— List of Common Deep Sky Catalogs
— CDS Catalogues
— HyperLEDA
— Catalogs sur CDSARC
— Simbad
— Revised NGC / IC - NGC
— DocDB
— CSOG
— Nasa HEASARC
— Steve Gottlieb's NGC Notes Steve Gottlieb
— Professor C. Seligman
— NED Caltech - NGC
— SEDS - Messiers
— Catalogues Encelade18
— Latest Planetary Nebula - Planetary Nebula
— Wiki ED Board
— DeepskyWatch Observing Guides
— Stelledoppie Database - Double Stars, Stelledoppie
— Star Splitters - Double Stars
— Asas SN - Variable Stars
— AAVSO Vsx - Variable Stars, AAVSO
— HYG - Stars - Stars
— Elite Galactic Wiki
— Astro 5000

— The Extrasolar Planets Encyclopaedia
— Deep Sky Observing Guides, Alvin Huey
— Freestarcharts
— The Deepsky Corner
— Deepskylog
— Deepsky Objects
— Cosmodixi
— The Interactive NGC Catalog Online
— Daviddarling - Science, David Darling
— Etoiles Doubles - Sol Company
— Notable Nearby Stars -
— Deep Sky List
— Siena Galaxy Atlas 2020
— Exoplanets EU - Exoplanets
— Les constellations - Bruno Salque
— Faint-Fuzzies - Robert Zebahl
— Astrofan 80 - DSO - Andreas Schnabel
— Societé Astronomique du Havre - Fred76
— Planetary Nebulae - Pascal LeDû, Thomas Petit
— BAfK - Beobachter-Atlas für Kurzentschlossene

13.6 Catalogues amateurs de DSO notables

— Le Top 200! - DSO, Bruno Salque
— Herschel 400, Jack Estes
— 500 Best DSO List, Don Pensack
— Saguaro Database, Steve Coe
— BAM 600 (Southern Skies), John Bambury
— Deep Sky Database, Duane Frybarger
— Objets du livre “J’observe le ciel profond”, Jean-Raphaël Gilis
— Deep Sky Compendium, Gary Imm ★
— Adventure in DeepSpace, Ray Cash, Mark Wagner, Mimi Wagner, Jim Shields and Steve Gottlieb
— Explore The Southern Skies, John Bambury
— 250+ Deep-Sky Objects Visible with 7x35 Binoculars and the Naked-Eye, Scott N. Harrington

13.7 Ephémérides & calculs & Cours

— Horizons - Nasa JPL
— Approximate Positions of the Planet - Nasa JPL - Nasa JPL
— Horizons API - Nasa JPL
— Astronomical Algorithms - Jean Meeus
— Recueil de problèmes et d’exercices pratiques d’astronomie - B. Vorontsov-Véliaminov
— Celestial Programming (inspired by Jean Meeus) - Greg Miller
— Ephemeris (C++) VSOP87, ELP2000 (inspired by Jean Meeus) - MarScaper
— Calcul Ephémérides - IMCCE
— Calcul Ephémérides API - IMCCE
— Transit Finder
— Occulte Watcher

— Astrometry
— Astronomia - Jacques Gispert
— Minor Planet Center
— Sunearthtools
— Nina
— How to compute planetary positions - Paul Schlyter
— Local Sidereal Time
— Magnetic North Declination
— AstroPlanner

Chapitre 14

Appendice D

14.1 Applications Planétarium

— Stellarium - PC
— Stellarium Web - Web
— CZ Sky (Bertrand Laville) - Web
— Stelvision Skymap - PDF
— Generateur de Planisphère - PDF
— Carte du ciel - PC
— KStar - Linux
— Astroplanner - PC
— Megastar 5 Willman-Bell - PC
— SkyTools - PC
— Binocular Sky
— Sky maps - PDF
— Deep Sky Hunders Atlas - PDF
— In The Sky - Web
— Heavens Above - Web
— CNebulaX - PDF
— The Night Sky Maps - PDF
— TriAtlas Revised - PDF
— Ephemeris AstoPixels - Web
— eSky - Web
— Constellation Guide - Web
— SkyTrack Satellite Tracking Software (pilotage de montures EQ) - PC
— N2YO Satellite Tracking - PC
— NASA Solar System - Web
— Astrometry - Web
— Jupiter Viewer - Web
— Astronomy Simulations and Animations - Web

14.2 Applications Planétarium Smartphone

— Stellarium - Android
— SkySafari Plus / Pro - Android / iOS
— SkyEye (PushTo) - Android
— Light Pollution Map - Android
— Good To Stargaze - Android

14.3 Applications Astrophoto

— Autostakkert Planétaire
— Astrosurface Planétaire, Wavelets / Déconvolution PSF (Lucien)
— ImPPG Wavelets (Filip Szczerek)
— Registax Planétaire
— Firecapture Planétaire
— SharpCap Planétaire, Deepsky
— FireCapture Planétaire
— Pipp Planétaire, Image Alignement
— WinJupos Planétaire, Jupiter Derotator
— Deep Sky Stacker Deepsky
— Siril Deepsky
— PixInsight Deepsky
— PHD2 Guiding Suivi sur une étoile (driver EQMOD)
— BlurXterminator Deepsky, AI Blur Removal
— Astrophotography Tool (APT) - PC
— Prism) Pilotage d'observatoire et automatisation - PC

14.4 Applications Astrophoto Smartphone

— Nocturne Unistellar - iOS
— NightCap - iOS
— DeepSkyCamera - Android
— Light Pollution Map - Android

14.5 Info Matériel / Métrologie

— Astrogear Today
— Tele Vue Eyepieces Specifications
— Mirror vs. Dielectric vs. Prism Diagonal Comparison (CN), William Bill Paolini
— Scopeviews, R P Vine
— Binocular Today (CN), Pinac
— Best Binocular Review
— Astro Foren, Wofgang Rohr
— Lecleire Optique, Jean-Marc Lecleire
— Quels sont les fabriquants du matériel astro ?
— Liste des fabricants
— Test oculaire 2016, Ernest Maratovich - Astrotalks

— 2024 Eyepieces Buyer's Guide, Don Pensack - Stargazers Lounge
— 2024 Eyepieces Buyer's Guide, Don Pensack - CloudyNights
— Barlow Shootout - Samual de Roa
— Mirror O Matic - Dennis

14.6 Galleries Amateurs (voir aussi AstroBin)

— Infinity Astro - Roland Schliessus
— Cosmic Colors - Jarrett Trezzo
— Astronomie Passion - Georges Chassaigne

14.7 Amateur mags / blogs

— Debunking Flat Earth Misconceptions
— Ciel Extrême - Yann Pothier (Yapo)
— Ciel Extrême (ancien site) - Yann Pothier (Yapo)
— ALPO Journal
— Ciel Mania

14.8 Usinage

— Astromecca
— Skymeca

Chapitre 15

Appendice E

15.1 Télescopes et montures

Nom	Depuis	Artisan	Produits	Pays
SudDobson	2014	Didier Vincent	Dobson en bois	France, Val d'Arcomie 15320
DobsonFactory	2005	Pierre Desvaux	Dobson en bois + carbone	France, Blanzy 71450
SkyVision	2005	Phala Lu	Dobson en métal + carbone, Astrographes DK	France, Lamothe-Montravel 24230
Stellarzac	2021	Frédéric Géa	Dobson 600+ en bois + carbone + barillet astatique	France, La Roque Sainte Marguerite 12100
Arp83	2020	Frédéric Amirayan	Dobsons en bois	France, Saint-Zacharie 83640
Astr'Industries	-	Cedric Vicarini	Dobson en métal + carbone	France, Montcet 01310
Shelyak	-	François Cochard	Spectroscopes	France
Lukehurst	2003	David Lukehurst	Dobson en bois	UK
DocTelescope	2016	Marco Guidi	Dobson en métal + Goto	Italie
Reginato Telescopes	-	Reginato	Dobson en bois	Italie
Officina Stellare	-	Riccardo Gianni	Astrographes	Italie
Summerian Optics	-	Michael Kalshoven	Dobson en bois UC	Pays-Bas
Alluna Optics	-	-	Astrographes RC	Allemagne
Nauris	2014	Daniel Restemeier	Astrographes RC	Allemagne
ASA	-	Egon Döberl	Astrographes RC	Autriche
Astrothingy	-	-	Plateforme EQ	Allemagne
TMS Astro	-	-	Plateforme EQ	Hongrie
TEPP	-	-	Plateforme EQ Photo	Hongrie
Astroreflect Telescopes	-	Ivan Trifonov	Dobson en bois	Bulgarie
Taurus Telescopes	2017	Adam Salawa	Dobson en bois + PushTo	Pologne
AstroFaktoria	2012	Pawel Rojewski	Dobsons en bois + carbone	Pologne

Nom	Depuis	Artisan	Produits	Pays
Obsession Telescopes	-	Dave Krieg	Dobson en bois	USA
Waite Research	-	Gordon Wait	Dobson en bois	USA
New Moon Telescopes (NMT)	2013	Ryan Goodson	Dobson en bois	USA
JP Astrocraft	-	John Pratte	Dobson en bois	USA
Teeter's Telescopes	-	Robert Teeter	Dobson en bois	USA
Starmaster	-	Rick Singmaster	Dobson en bois	USA
Webster Telescopes	-	Eric Webster	Dobson en bois	USA
AstroSystems Telekits	-	Randy Cunningham	Dobson en bois	USA
Teleport Telescopes	-	Tom Noe	Dobson en bois	USA
Discovery Telescopes	-	Terry Ostahowski	Dobson en bois	USA
SpicaEyes Telescopes	-	Tom Osypowski	Dobson en métal, Plateforme EQ	USA
PlaneWave	-	Richard Hedrick	Astrographes CDK, RC	USA
DeepSky Intruments	-	-	Astrographes RC	USA
SDM Telescopes	-	Peter Read	Dobson en bois	Australie

Des fabricants qui ont arrêté leur activité :

- StarSplitter - Jim Brunkella (2007)
- Starmaster - Rick Singmaster (2020)
- Lightolder Optics - John Lightolder (2024)
- Sumerian Optics (2020) - Michael Kalshoven
- Starstructure - Mike Zam (2024)
- Obsession Telescopes (classic wooden scopes) - Dave Kriege (2020)
- DobStuff - Dennis Steele (2020)
- JP Astrocraft - John Pratte (2021)
- Mag.1 Instruments (Porta-ball) - Pete Smitka (2000)
- Discovery Telescopes - Terry Ostahowski (2009)

15.2 Miroirs artisanaux

Nom	Artisan	Specialty	Pays
Ostahowski Optics	Terry Ostahowski	Quartz Mirrors from 12.5 - 25" from f/3.3 Coating service, Interferometric testing	USA, Anza, CA
Lightholder Optics	John Lightholder	Mirrors from 8 - 24" f/4.5	USA, Lake Tahoe, CA
Zambuto Optical Company (ZOC)	Carl Zambuto	Mirrors from 8 - 20" f/4.5 Coating service	USA, Rainer, WA
Lockwood Custom Optics (LCO)	Mike Lockwood	Mirrors from 16 - 50" f/3.3 Very thin mirrors	USA, Philo, IL
Waite Research	Gordon Waite	Mirrors from 6 - 38" f/2.7	USA, Chandler, AZ
Optiques Fullum	Normand Fullum	Mirrors from 16 - 36" f/3.5 Coating service, Sandwich glass	Quebec, Vaudreuil-Dorion
Mirrosphere	Franck Grière	Mirrors from 8 - 24" f/3.3 Coating service by MCM	France, Marzy 58180

Credit : J.G. Gricourt

Note : les miroitiers US listés ici livrent tous en France.

15.3 Lunettes

Fabricants de lunettes APO

Nom	Pays	Designer(s)	Année	Modèles	Diamètres
Takahashi (Taka)	Japon	Kitaro Takahashi	1932	FSQ, TSA, TOA, DC, DZ	85 - 150 mm
Astro-Physics (AP)	USA	Roland Christen	1975	Starfire EDF ★, Stowaway	92 - 175 mm
TMB Optical	USA	Thomas M. Black	1990	TMB	80 - 175 mm
CFF Telescopes	Europe	Pal Gyulai, Cătălin Fus Octavian Stănescu	2008	CFF	105 - 180 mm
TEC	USA / Ukraine	Yuri Petrunin Gerd Düring	1994	TEC	140 - 180 mm
Stellarvue	USA	Vic Maris	1998	SVX	102 - 152 mm
Agema Optics	USA	Eduard Trygubov	-	-	-
Istar Optical	China / USA	Ales Krivanek	-	-	-
William Optics	Taiwan	William Yang	1996	Fluorostar (TMB design)	
APM / LZOS	Germany / Russia	Markus Ludes	1990	LZOS (TMB design)	100 - 510 mm
Sharpstar Optics	China (Jiaxing)	-	2000	Sharpstar, Askar, Fra	80 - 200 mm
Airy-Disk	China / USA	-	2020	-	60 - 200 mm

Des lunettes japonaises non APO (achromat) mais qui offrent une qualité proche pour un prix bien moindre (même à l'export) :

— Scoptech 80mm F/15 - Scoptech

— Starbase 80mm F/10 - Takhashi
— Vixen A80 MF 80mm F/11 - Vixen

15.4 Montures et accessoires

Nom	Designer	Produits	Pays
Tele Vue	Al Nagler	Oculaire haut de gamme	USA
Starlight Instruments	Werner Detlef Schmidt	Porte oculaire haut de gamme	USA
Astrophysics	Roland Christen	Monture haut de gamme	USA
10 Micron	Thomas Baader	Montures EQ haut de gamme	Allemagne
Baader	Thomas Baader	Adaptateurs, renvoi coudé ...	Allemagne
ADM	Anthony Davoli	Adaptateurs, platines ...	USA
Berlebach	Peter Otto Berlebach	Trépied en bois haut de gamme ...	Allemagne
Astrothingy	-	Table Equatoriale	Allemagne
OVNI	Jonathan Kobs (Joko)	Intensificateur de lumière	Paris
Lumicon (SVOtek)	-	Filtres	USA
Astronomik	Eric Vesting and Gerd Neumann	Filtres	Allemagne
IDAS	-	Filtres	Japon
Optolong (Astro Hutech)	-	Filtres	Chine

15.5 Réparation instruments

Medas - France

Chapitre 16

Appendice F

16.1 La petite histoire des télescopes amateurs

Ce paragraphe tente de retracer les événements marquant de l'observation astronomique amateur rassemblés dans un tableau ci-dessous. Ces notes ne sont pas exhaustives, il manque beaucoup d'autres instruments qui ont eu leur place dans le paysage, mais c'est surtout le parcours de ces illustres qui m'a le plus marqué et qui selon moi ont le plus contribué à la fabrication d'instruments accessibles aux amateurs en termes de moyens techniques et financiers. Entre ces grandes lignes, il y a bien évidement eu d'autres épopées qui ont eu moins de portées, pour certaines qui se sont éteintes très vite et pour d'autres qui ont animé de petits groupes d'amateurs qui ont contribué aussi à populariser l'observation astronomique auprès du grand public.

Année	Lieu	Personnage	CV	Événement
1916	Springfield Vermont USA	Russell W. Porter	Peintre, ingénieur (télescope du Mont Palomar) et explorateur (expédition polaire de F. Cooke)	Russell W. Porter a écrit une série d'article dans le magasine "Popular Astronomy" sur la construction de télescope amateur
1928	New York USA	Albert G. Ingalls	Chroniqueur dans le magazine "Scientific American"	Albert G. Ingalls publit dans "Scientific American" des articles sur le polissage de miroirs
1950	Long Beach USA	Thomas Cave	Entrepreneur et grand observateur de Mars	Tom Cave à produit en masse des Newton et des Cassegrain de grande qualité pour le monde amateur
1951	France	Jean Texereau	Ingénieur opticien et animateur de la Commission des Instruments de la SAF	Jean Texereau popularise les techniques de polissage de miroir amateur et la fabrication de télescope amateur dans un livre devenu culte dans le monde entier "La construction du télescope d'amateur"
1968	San Francisco USA	John Dobson	Moine Bouddhiste et fondateur des "San Francisco Sidewalk Astronomers"	John Dobson popularise la fabrication du dobsons de grands diamètres à partir de simple tubes de carton Sonotube et de miroirs que l'on fabrique soit même, il organise les fameuses séances d'observations improvisées en pleine rue.
1971	Japon	Kitaro Takahashi	Entrepreneur japonais, propriétaire d'usines dans l'industrie du moulage de pièces en aluminium depuis la guerre	Il est le premier à sortir des lunettes à verre de Fluorite supprimant parfaitement les aberrations chromatiques. C'est la société Canon Optron qui produit tous les objectifs des lunettes Takahashi. De nos jours les légendaires lunettes à verre de Fluorite restent la spécialité de la marque mais depuis Takahashi emploi d'autres types de verres à faible dispersion (FPL-53 ou FCD-100)
1974	France	Pierre Bourge	Horloger de formation, fondateur de l'AFA et du magazine "Ciel & Espace"	Pierre Bourge démontre que l'on peut construire un télescope de type Newton de 200 mm sur monture EQ à fourche avec des moyens d'amateur, il est également l'auteur de l'ouvrage "A l'affut des étoiles"
1980	USA	Al Nagler	Ingénieur opticien de la NASA ayant travaillé sur un simulateur visuel pour les missions Apollo et fondateur de la société "Tele Vue"	Al Nagler révolutionne l'astronomie amateur en proposant des oculaires spécialement corrigés pour les Newtons de courte focale (ratio F/D < 8) les fameux oculaires Naglers dont le champ corrigé atteint 82° ! Cette révolution technologique permet désormais aux amateurs de se doter de dobsons toujours plus gros et toujours plus court. Plus tard, en 2007 Tele Vue sortira la ligne des Ethos, des oculaires de 100° de champ !

Année	Lieu	Personnage	CV	Événement
1989	USA	Al Nagler	Ingénieur opticien de la NASA ayant travaillé sur un simulateur visuel pour les missions Apollo et fondateur de la société “Tele Vue”	Al Nagler révolutionne à nouveau le marché en proposant un correcteur de coma le “TV Paracorr” capable de corriger complètement la coma des dobsons jusqu’à F/D = 3 avec le correcteur “TV Paracorr Type II” sorti en 2010 !
1989	USA	David Kriege	Dentiste de profession et passionné par la construction amateur de dobsons de grands diamètres a écrit le livre “The Dobsonian Telescope”	Il fonde la société “Obsession” fabricant de dobson en bois de grands diamètre (400 mm et plus).
2000	USA	Greg Babcock	-	Greg Babcock inspiré par Mel Bartel et Dan Gray invente le “Flex Rocker” un dobson doté de barres truss, de grands tourillons et une structure possédant un centre de gravité très bas
2003	Saint Quentin en Yvelines France	Pierre Strock	Ingénieur concepteur d’appareil de mesure dans le Nucléaire chez Framatome et membre du club “Magnitude 78” dans les Yvelines	Pierre Strock invente le “Télescope de voyage”, un petit dobson de 250 mm de moins de 10kg à fabriquer soit même qui peut être entièrement démonté pour tenir dans une valisette, on parle maintenant de “Strock” pour désigner ce type de télescope.

Année	Lieu	Personnage	CV	Événement
2005	Blanzy France	Pierre Desvaux	Responsable dans une société d'assurance au Japon, artisan autodidacte qui a hérité de l'atelier de son grand-père qui fabriquait des moules pour les usines du Creusot	Pierre Desvaux invente le "DF = Dobson Factory" un style de dobson mono anneau en bois multiplie de hêtre haute densité. Ce type de dobson est reconnaissable entre tous, on parle maintenant de "DF" pour désigner ce type de télescope. Depuis 2020 le cadre du barillet à l'origine en métal est désormais constitué de bois et tiges de carbone pultrudé. Le "DF" est fabriqué pour des diamètres allant de 300 mm à 600 mm. Tout premier artisan à proposer des télescopes clé en main sur le marché français (2005), mais aussi tout premiers dobson en kit à monter soit même en 2018. Pierre est aussi l'artisan qui a certainement réalisé le plus de dobsons pour la France, mais aussi pour l'étranger.
2015	La Roque Sainte Marguerite France	Frédéric Géa	-	Fréderic Géa d'abord connu pour proposer la location de dobson géants (dont 1m ètre) dans gite sur le plateau du Larzac, ouvre sa société Stellarzac en 2015 afin de devenir lui-même officiellement constructeur de dobson. Il propose des dobsons en bois à partir de 560 mmm, de facture et de finition très haut de gamme. Les barillets sont de type astatiques et chaque pièce métalliques sont usinées par ses soins à la fraiseuse. C'est celui qui a probablement le plus poussé le concept de fabrication 100% artisanal dans des structures. Voir aussi le site AltAz
2020	Italie	Marco Guidi	-	Marco Guidi est un fabricant de dobson doté de Goto dernier cri et de grands diamètres conçu entièrement en métal dont le design est très épuré afin de proposer des structures découpées au laser qui sont à la fois légères et sans compromis sur la rigidité. Son modèle phare est la LaserMax II, il fournit de nombreux amateurs dans le monde entier.

16.2 Portrait de Donald E. Pensack

Don Pensack est un astronomer amateur de 73 ans en 2024 (né en 1951), il est très assidu des forums astro, ses interventions sont nombreuses et toujours pertinentes. Il a été une revendeur de matériel astro et propriétaire du magasin **www.EyepiecesEtc.com** à Los Angeles, fermé depuis fin 2023 suite à son départ à la retraite. Don Pensack est une source d'information inépuisable sur le matériel astro, il est très respecté pour un bon nombre des membres des différents forums où il intervient. Ses réponses sont toujours pertinentes, précises et référencées, en le lisant on apprend énormément sur l'utilisation du matériel mais aussi sur l'expérience de l'observation son domaine de prédilection.

Les forums où on peut le croiser :

— Cloudynights, alias starman1
— Stargazerlounge, alias Don Pensack

— Iceinspace, alias Don Pensack
— The Sky Searchers, alias Don Pensack

Ses publications personnelles les plus populaires :

— 2024 Eyepiece Buyer's Guide
— 500 Best DSO list
— 2024 Visual-Use Nebula Filters Buyer's Guide
— COLLIMATION AND THE NEWTONIAN TELESCOPE v.4
— Seeing and Transparency

Son matériel :

— Un Dobson Teeter de 12.5 inch F = 1826mm
— Miroir "fin" Zambuto pesant 11.5 lbs (5.2 kg), reposant sur un barillet 18 points
— Miroir secondaire 2.3 inch Antares Optics L=1/30
— Refroidi par 2 ventilateurs pour chasser la Boundary Layer (bulle d'air chaude au dessus du primaire)
— Poids total de l'instrument 92 lbs (42 kg)
— Le dobson est équipé par une système de pointage manuelle Astro Device DSC
— Glatter laser, Farpoint Cheshire, Catseye autocollimator
— Berlebach Charon Observing Chair

Ses oculaires favoris [359] :

— TV Apollo 11mm (confortable with glasses on)
— TV Ethos 6mm (pinpoint stars accross the 100° view + no light scatter + great for planetary)
— Baader Morpheus line [234]
— TeleVue Panoptic 22mm (sharpest) et 24mm (abandonné en raison de son ER trop court)
— APM UFF 30mm

Note : ces dernières années Don privilégie les oculaires confortables à utiliser avec des lunettes de vue.

Son Atlas favori : Uranometria All Sky Edition

Un interview de Mai 2024 : Astronomy Talks - Don Pensack talks telescope viewing

Contact : pensack1@gmail.com

16.3 Des Astrophotographes

— Planet DIY, François Doffin

Chapitre 17

Réflexions

17.1 Combien coûte le dobson de ses rêves ?

Très souvent cette questions revient de manière latente dans les forums et il est parfois diffile d'y répondre de manière précise car les constructeurs de télescopes amateurs d'exception ne font des propositions que sur devis. Cependant je rassemble ici quelques exemples concret dont le prix à pu être confirmé par le possesseur du télescope. Les prix comprennent à minima la structure, les miroirs et le porte oculaire, si des options sont inclues (DSC, moteur) ils seront indiqués.

Télescope	Diamètre	Miroir	Constructeur	Prix TTC	Année
SL 560 F/4.0, Stellarcat + Nexus DSC	560 mm	Mirrosphère	Stellarzac	19 800 €	2019
SV 500 F/3.3, Stellarcat + Nexus DSC	500 mm	Bonnin	Skyvision	18 500 €	2022
DT 500 F/4.0, Stellarcat + Nexus DSC	500 mm	Mirrosphère	DocTelescope	15 600 €	2024
AP 460 F/4.0	460 mm	Mirrosphère	Arp83	11 000 €	2023
DF 460 F/3.6	460 mm	Ostahowski Optics	Dobson Factory	9 170 €	2023
SD 460 F/4.0	460 mm	Mirrosphère	Sud Dobson	9 150 €	2024

17.2 Un instrument à rapoprt F/D court n'est pas fait pour le planétaire ?

Cette affirmation n'est pas complètement fausse, ni totalement vraie. Il faut en réalité distinguer 2 type d'instruments ici, les lunettes et les télescopes à miroir. Pour observer ou imager les planètes il faut de gros instruments et donc du diamètre pour obtenir la résolution nécessaires pour détecter les détails peu visibles de la surface des planètes. Il faut aussi de la focale que ce soit en visuel ou en astrophoto pour atteindre les forts grossissements / grandissements (astrophoto).

Donc par la limitation de leur diamètre les lunettes seront automatiquement de mauvais candidats pour les observateurs ou les astrophotographes du planétaires. De plus les lunettes courte présenteront trop d'aberration chromatique pour réellement exploiter leur résolution théorique sur de forts grossissements, c'est pour cela que pendant longtemps les lunettes longue avaient la faveurs des observateurs planétaires [250].

Les instruments les plus adaptés pour le planétaires sont des télescopes à miroir : Newton, SCT ou Mak. Un correcteur de coma performant comme le TV Paracorr II permettra d'exploiter le plein potentiel du diamètre un télescope de rapport F/D très court F/3.6 [531, 532]. Contrairement aux lunettes les miroirs sont exempts d'aberration chromatique et donc aucune autre correction supplémentaires ne sera nécessaire. De plus les forts grossissements / grandissements (astrophoto) pourront être facilement atteint avec l'addition de barlow si besoin.

17.3 Quelle lunette semi APO ou APO pour l'observation ?

Les lunettes APO donc à base de triplets sont des instruments d'abord conçus pour l'astrophoto et pas du tout pour le visuel, et cela, pour plusieurs raisons :

1. En visuel déjà, on n'a pas besoin d'une correction chromatique aussi poussée, car nos yeux n'accumule pas la lumière comme le font les capteurs électroniques plus sensibles aussi aux longueurs d'onde en dehors du champ visuel.
2. Les lunettes APO optimisent (le max de résolution) souvent la correction des couleurs adaptée à la sensibilité des capteurs qui n'est pas celles de nos yeux
3. Les lunettes APO sont en vaste majorités construites très courtes afin de réduire d'emblée le F/D pour l'astrophoto longue pose, or le temps de pose un concept totalement étranger à la vision humaine
4. Accessoirement les lunettes courtes produisent beaucoup plus de courbure de champ ce qui devient gênant à partir d'un certain age car notre plage d'accommodation n'est plus aussi étendue qu'auparavant.
5. Un "bonne" lunette APO nécessite un réglage précis des 3 lentilles du triplet, pour offrir la correction optique annoncée et donc en raison de cette caractéristique ces instruments sont aussi plus onéreux.

Conclusion : ce serait donc un mauvais calcul de partir sur une APO pour du visuel pur car pour un prix similaire, il est possible d'avoir un peu plus de diamètre, un F/D plus long pour des images plus belles et mieux résolues et surtout un doublet ED qui fera nettement la différence par rapport à des lunettes bas de gamme achromatique voir d'autres lunettes à base de triplet vendues comme "APO".

17.4 Il faut choisir son miroir par rapport à certaines caractéristiques techniques

Ceci est en partie vrai, on peut citer les critères suivant :

— Meilleure RMS / Strehl afin d'obtenir la plus belle parabole possible, e-g : Strehl > 0.90
— Granulosité de surface très faible dans le but de minimiser la diffusion
— Un miroir fin pour une mise en température plus rapide

Cependant, un miroir primaire n'est pas le seul élément à prendre en compte, la formation d'une image est le résultat d'une chaîne optique complexe. Il faut voir les critères de qualité du miroir comme une base à partir de laquelle les autres éléments de la chaîne optique vont intervenir pour finir par altérer une petit peu l'image.

Dans la réalité, il sera donc difficile de rester "Diffraction Limited" au bout de la chaîne optique :

— Le miroir secondaire n'est pas à négliger, car c'est par lui que passe toute la lumière envoyée par le primaire afin d'être renvoyée vers l'oculaire, il faut donc s'assurer que le secondaire est aussi plat et lisse que possible (voir valeur PtV)
— L'oculaire est l'avant-dernier élément qui reformera l'image à l'infini (avec un grossissement), il ne doit pas introduire du chromatisme ni de l'astigmatisme.
— Notre oeil, c'est peut-être l'élément le moins maitrisable, hormis utiliser des verres correcteurs dans certains cas, car nos yeux sont loin d'être parfait même si on a une vision estimée à 10/10 devant l'echelle de Monoyer chez l'ophtalmologue !

Autres facteurs à prendre en compte :

— Les supports des miroirs ne doivent pas les contraindre pour ne pas introduire de l'astigmatisme

— Les matériaux de la structure ne doivent pas se dilater sous l'effet des changements de température afin de conserver les alignements
— Les optiques doivent être parfaitement alignées (collimation) pour ne pas introduire d'aberrations
— Les optiques doivent être à l'équilibre thermique pour ne pas se déformer
— Une fois les alignements réalisés il ne doivent pas dériver dès que l'on réoriente le tube du télescope.

Enfin il ne faut pas oublier l'atmosphère qui prend trop souvent la forme d'une départementale de la Creuse au lieu d'une autobahn allemande aussi lisse que du billard, celle-ci va donc réduire radicalement les performances de notre instrument certaines nuits moins favorables.

17.5 Un miroir ou un objectif sale doit être nettoyé

Les surfaces optiques peuvent parfois apparaitre "sales" ou poussiéreuses, cela est d'autant plus flagrant lorsqu'on les observe sous une lumière rasante ! Cependant, même une optique très sale ne détériorera pas les images.

Des tests de destruction d'objectifs photo ont montré qu'un objectif tronqué d'un morceau de son verre frontal [446, 129] continuera de former des images étonnamment bonnes. Un grand télescope célèbre de 2.7m le McDonald Observatory [20] qui avait été endommagé par plusieurs balles de revolver a continué à être utilisé sans aucune incidence sur les images produites.

Le nettoyage est une opération délicate pouvant engendrer de micro rayures, si la méthode employée n'est pas la bonne, celui-ci doit être le plus tardif possible. Cependant, certains contaminants corrosifs pour aluminure ou le verre doivent être retirés le plus tôt possible en revanche. La procédure est décrite dans ce document, il ne faut surtout pas improviser car chaque détails comptent. Attention aussi à ce que vous lisez dans les forums car certains "Experts" vont vous recommander des composés chimiques très corrosifs pour l'aluminium mais aussi pour le verre !

17.6 Un miroir parabolique façonné par une machine sera de meilleure qualité

Il n'y a rien de plus faux dans le monde amateur. Ainsi, les miroirs destinés à équiper des instruments produit industriellement sont réalisés en série rapidement et finalement très peu de contrôles sont réalisés hormis un contrôle qualité aléatoire par échantillonnage de la production, ce qui suffit amplement en général pour maitriser la chaîne de production afin de sortir des instruments aux standards de qualité amateur.

Façonner un miroir requiert des mouvements aléatoires de polissage dans le but de ne pas créer de "zones" dans la forme du miroir qui produiraient inévitablement de l'astigmatisme, or l'expérience montre que les machines automatisées produisent des mouvements reproductibles, donc de nature très peu aléatoires en fin de compte. Seul un humain opticien produira involontairement des mouvements adéquats [398] suffisamment chaotiques pour former une belle parabole de qualité bien supérieure à ce que pourrait produire une machine entièrement automatisée, aussi perfectionnée soit elle. On peut dire aussi que c'est la distribution régulière de l'irrégularité qui crée de la régularité, mais l'inverse n'est pas vrai cependant !

17.7 Quel instrument choisir ?

C'est la question la plus posée sur les forums et en même temps la plus difficile à répondre. Il y a en fait autant de choix que d'utilisateurs et de niveau d'expérience. Malgré les nombreux conseils donnés, il faudra quand même s'attendre à faire parfois de "mauvais choix". Cependant, ce sont bien ces choix "malheureux" qui nous aiderons à faire les bons par la suite, car il est impossible de tomber dans le 1000 dès le premier achat parce qu'il faut bien expérimenter pour savoir ce qui va nous plaire ou au contraire nous rebuter. Plus tard, et en prenant pour support la courbe de satisfaction de Wundt celle-ci nous dira où se trouve notre curseur à un moment donné de notre expérience.

Mais avant il faut revenir à nos motivations primaire qui nous pousse à observer le ciel et en quoi est ce si extra-ordinaire. Observer le ciel est une expérience reproductible unique car le ciel est là pour tous et se présente de la même manière à tous observateur sur Terre profitant d'une expérience entière sans compromis limité uniquement par l'atmosphère et l'instrument choisi.

Robert Burnham JR à dit : *Considered as a collector of rare and precious things, the amateur astronomer has a great advantage over amateurs in other fields ... the amateur astronomer has access at all times to the original objects of his study ; the masterworks of the heavens belong to him as much as to the great observatories of the world. and there is no privilege like that of being allowed to stand in the presence of the original.* Burnham's Celestial Handbook.

Il est tentant de croire que seuls les plus gros instruments, au vu de leur performance, nous donnerons encore plus de satisfaction, en fait, c'est souvent l'inverse. Par exemple il y a une différence abyssale de performance entre un télescope dobson de 600 mm sur monture AZ motorisé, l'ensemble frôlant les 100kg et nécessitant une remorque pour le déplacer comparé à une petite lunette de 80 mm montée sur une monture AZ légère qui pourra cependant nous procurer également beaucoup de satisfaction dans notre pratique, car celle-ci est vite sortie et aussi rapidement rangée dès que les nuages voilent complètement le ciel. Un indicateur possible de sa propre courbe satisfaction est de compter le nombre de soirs que l'on sortira son instrument dans l'année.

Jon Isaacs a dit : *Cost is one factor, portability is a factor, but in my experience, these are not the most important factors. The scope should be chosen based on usability and manageability. A scope that gets used a 100 nights a year will show you more and be more enjoyable than a scope that only gets used 10 nights a year because its too much work to use on a regular basis* Difference between 10 and 14 Inch Dobsonian.

Parfois il faut déconstruire beaucoup d'idées reçues sur le matériel comme il faut prendre une lunette de 80 mm sous un ciel urbain pollué et un dobson de 300 mm à la campagne, ou encore que les lunettes sont faites pour le planétaire et les télescopes pour le ciel profond ... Un document à lire Idées fausses sur le matériel d'astronomie, il s'agit d'un point de départ pour avoir les idées claires sur les instruments et pour éviter de se faire polluer par de fausses affirmations répétées à l'envie dans les forums.

Laurent Vadrot a dit : *Comme je le dis souvent dans les star parties et autres soirées dans les clubs et entre potes : Je me félicite toujours d'avoir modifié mon projet initial d'un 20" à F/D 4 pour un 18" à F/D 3,7 ce qui au passage m'avait permis d'acheter à l'époque en plus l'indispensable Paracorr et les cercles digitaux ... Il vaut mieux avoir le plus grand diamètre des petits qui servira et restera facile à déplacer et qu'on utilisera sans escabeau plutôt que le plus petit diamètre des grands qu'on utilisera malheureusement que 4x dans l'année et qui demandera une autre logistique* 1ere vraie sortie avec le 450

Parfois, il faut faire le chemin inverse pour retrouver le plaisir d'observer en revenant aux fondamentaux avec un instrument plus modeste et si les moyens sont là, autant prendre la crème de la crème ☺.

Mike D. à dit : *Perhapse strangely to some, but going from a 6" Tak to a 4" has been revolutionary, as although the 6" was superb it was also massive, and as a consequence I looked for reasons not to set it up and observe. Buying a Tak FC-100DC and later a FC-100DZ, I found my time at the eyepiece, and my enjoyment, increased dramatically. The FC-100D refractors, like most 4" apo/ED refractors are an absolute joy to use.* What equipment has revolutionised your observing?

Joël Cambre (Halfie) à dit : *Tous les tubes cités plus haut en astrophoto planétaire (Mewlon 250, Vixen VMC 260L, Celestron C11 Edge) ne pourront faire le poids face à ces dobsons motorisés cités (Dobson Orion Skyquest XX14G ou Dobson Orion Skyquest XX16G), aussi bonne la qualité optique soit-elle car rappelons le, les lois de l'optique étant ce qu'elles sont, "La plus belle femme du monde ne peut donner que ce qu'elle a"* Vixen vmc 260 ou c11

Jon Isaacs a dit : *The magic, there is a magic, a special beauty, a reality in the eyepiece that is not present in a photo.*

That is why some crazies put up with the difficulties and hardships involved in living under dark skies, they are doing the ultimate side-by-side comparison. General Observing and Astronomy - 27/08/2017.

Robert Burnham a dit : *As a Japanese sage has said : One must be open to the experience of the Ah ! of things..* Burnham's Celestial Handbook: An Observer's Guide to the Universe ..., Volume 3 - p 2079.

Autrement, voici une liste d'instruments ultra-classiques approuvés depuis des décennies par de nombreux astro-amateurs :

Instrument	PL	CP	☼	Visuel	🖼 CP	🖼 PL	EQ	Prix ↑	Modèle
Dobson 250 mm F/4.7	✓	✓		✓				800€	Orion Skyquest XT 10
Lunette Achro F/5	✓	✓		✓			✓	700€	Skywatcher 150/750
Lunette Achro F/10 sur EQ	✓		✓	✓			✓	260€	Skywatcher AC 90/900 EvoStar
Lunette ED 100 mm F/9	✓	✓	✓	✓			✓	900€	Skywatcher Black Diamond 100 ED
Lunette APO 80 mm F/6	✓	✓			✓		✓	1000€	TS Photoline 80/480 APO
Newton 200 mm F/4		✓			✓		✓	600€	Skywatcher 200/800 LP
Mak ou Cassegrain 180 mm	✓			✓		✓	✓	1000€	Skywatcher Mak 180
Schmidt Cassegrain C8	✓			✓		✓	✓	1300€	Celestron C800 XLT

Credit : J.G. Gricourt

Note : PL = Planétaire (visuel), CP = Ciel profond (visuel), EQ = Monture EQ, ☼= Solaire seulement avec l'ajout d'un écran filtre à l'avant !, 🖼 CP = Astrophoto du ciel profond, 🖼 PL = Astrophoto planétaire.

Il faudra aussi compter la monture pour la plupart des instruments (sauf Dobson et Lunette achromatique EvoStar) ce qui revient en général de 500€ à 1000€ de plus ou bien à 2 à 3 fois le prix de l'instrument si l'on compte faire de l'astrophoto.

La satisfaction quoi qu'il en soit, reste bien personnelle, car on peut être pleinement satisfait de posséder un instrument qui ne sort pas beaucoup certe mais que d'autres ne peuvent que "rêver" d'avoir. D'ailleurs certaines marques ont cette sorte d'aura à la Apple qui galvanise des foules d'aficionados pour qui prendre un crédit à la consommation afin de se payer une lunette de 100 mm à 6 000€ ou un dobson artisanal de 800 mm à 45 000€ est une nécessité vitale. Comme dans toutes passions ou hobbies il faut savoir prendre du recul dans le but de remettre de l'ordre dans ses priorités tel que Pierre McSween le décrit dans son ouvrage "En as-tu vraiment besoin ?" [1] et surtout ne pas laisser guider ses choix par les autres qui de toute manière ne sont ni les utilisateurs ni les payeurs de vos instruments.

Mel Bartels avait théorisé précisément la valeur d'un instrument en fonction de plusieurs caractéristiques : luminosité, ratio F/D, résolution, seeing, poids / ergonomie [488], il avait alors montré l'importance du grossissement employé au-delà du diamètre pour observer le ciel profond indiquant qu'un modeste instruments permet déjà de voir beaucoup si les conditions sont réunies, voir aussi ce que dit Roger N. Clark dans "Visual Astronomy Of The Deep Sky" dans son analyse de la perception et de l'influence des paramètres de l'instrument dans l'observation. Tom Dey avait aussi sa propre théorie personnelle où la satisfaction suivait une échelle logarithmique [746].

17.8 A propos des "Smart Telescopes"

Il y a quelques années sont apparus des instruments bardés d'électronique proposant aux débutants ou aux astro amateurs frustrés, et frustrés je veux dire par là, soit par la pollution lumineuse ou soit par indifférence devant une image produite par un oculaire, une nouvelle façon d'observer le ciel en quelque sorte. Mais qu'en est t-il vraiment ? Les points communs à tous ces Smart Telescopes sont les suivant :

1. Pierre McSween : En as-tu vraiment besoin ?

— L'appareil produit une image issue d'un traitement logiciel reproduisant en différé le workflow d'un astrophotographe utilisant une caméra derrière un instrument
— L'appareil est connecté sur Internet afin de fournir des informations sur les objets affichés sur l'écran (faux oculaire ou smartphone) et permet des activités de sciences participative : recherche d'extra-terrestres, étude des astéroïdes ...

Que l'on adhère ou pas au concept on constatera sans hésitation que l'appareil, et je préfère appeler ça un appareil, montrera bien une image en couleur des objets ce qu'aucun télescope même très gros sera à même de faire aussi aisément et tout ceci dans un format compact avec très peu d'attente lors de la formation de la photo faisant office d'observation.



Source : Bini

Certains continuerons d'appeler ça de l'observation visuel, pour ma part il s'agit d'astrophoto automatique. Comme à une époque on avait sorti les premiers appareils photo tout automatique et les appareils jetables, alors il n'était plus nécessaire d'apprendre la photo pour s'en servir et faire des photos, certes médiocres mais de qualité suffisantes pour les masses, aujourd'hui les smartphones les ont remplacé. Les logiciel d'IA dont ils sont affublés s'appliquent à modifier lourdement les photos pour se conformer à un look tendance sur les réseaux sociaux.

Le fléau de ce siècle c'est l'extinction progressive des étoiles du ciel à cause de la pollution lumineuse toujours galopante dans nos pays fortement industrialisés et urbanisés. Cependant je trouve qu'il est difficile de renoncer aux instruments d'observation pour de l'astrophoto une discipline très différente ne pouvant pas remplacer l'expérience purement visuelle de l'observation avec ses imperfections certes mais qui nous oblige à travailler notre imaginaire et à mieux connaitre ces objets étranges et lointains.

C'est comme si à un enfant on lui demandait d'abandonner son activité dans un club de foot, de renoncer aux matchs dominicaux pour une console de jeux où il pourrait "jouer au foot" en prenant en main (aux manettes) une équipe renommée du championnat et prendre le dossard d'un joueur star afin de réaliser des performances hors du commun qu'il n'aurait jamais été capable d'accomplire sur le terrain de foot municipal.

Si un jour le ciel devient complètement inexploitable en visuel je renoncerai alors complètement à l'astronomie car pour moi ce sera bel et bien finit. Les photos ont peu d'interêt pour moi car la vaste majorité des objets du ciel sont figés du moins à l'échelle humaine, donc on verra exactement les mêmes clichés produit par tous ces appareils ne relatant aucune expérience individuelle d'observation, car avec ces dispositifs ce n'est pas "mon observation" mais celle de l'appareil !

17.9 Visuel ou Astrophoto 2 hobbies ?

Voici un sujet qui divise bien plus qu'il ne rassemble. Tout est partie d'une déclaration de Daniel Mounsey membre de CN et professionnel du secteur [169] :

"I used to host my own star parties for 12 years. I remember engaging in discussions with visual observers about what we

were or weren't seeing and how objects were or may have been formed. As soon as imaging hit the scene, all these discussions about astronomy went out the window. All the discussions changed from astronomy related topics to tracking errors, guiding issues, software problems, software updates, processing, weird stars in the corners and the list goes on and on and on with the endless technical problems. It's not even astronomy anymore. It's just endless issues about how to manipulate images. Just because you have a mechanical self playing piano doesn't make anyone a piano player. I just don't know what end-users have become anymore. I've worked in astronomical retail for 25 years. Imaging is plagued with way too many headaches and endless problems and is far too primitive today."

J'avais longtemps remarqué comment beaucoup de clubs étaient quasi exclusivement composés d'astrophotographes, les rares visuelleux était toujours seuls, les autres étant affairés avec leur matériel de haute technologie demandant beaucoup d'attention pour le montage, la réglage, la prise de vues, et le post-traitement qui prend à lui seul autant voir plus de temps que passé sur le terrain. Vers 2010 je me souviens une fois avoir invité chez moi un des membres du club que je venais de fréquenter car nous étions presque voisin. Il n'était pas tout jeune à l'époque, et ne faisait que de l'astrophoto depuis 10 ans. J'avais été chez lui quelques temps avant pour voir comment se passait une séance photo chez lui. J'ai été très surpris de voir toutes les frustrations auxquelles il était contraint de composer dans une session d'astrophoto entre les câbles qui récalcitrants qui se coupe, la monture qui ne suit plus, l'ordinateur qui plante, les logiciels horriblement complexes qu'il avait tout les difficultés à comprendre et à utiliser etc ... je me rendais compte des efforts fournis pour un résultat peu probant à mes yeux. Je lui propose donc une expérience totalement différente, c'est à dire de regarder dans un instrument de 500mm certe imposant mais qui se pilote manuellement, au petit doigt en réalité. Il était d'abord un peu sceptique et puis impressionné par la dimension du dobson. Je lui propose pour commencer le double amas de Persée, il n'en a pas cru ses yeux, "Je n'ai jamais vu ça ! Je n'ai jamais imaginé que le double amas pouvait être comme ça !", il faut dire que dans cet instrument l'amas est un véritable feu d'artifice, une profusion d'étoiles. Les dentelles du Cygne sans filtre en direct montre un enchevêtrement de filaments complexe. Enfin après d'autres objets tout aussi impressionnants on fini de le convaincre. Après cette soirée je me suis demandé si nous étions en train de pratiquer le même hobbie, ce n'était plus du tout évident pour moi depuis ce soir là.

17.10 Si l'on était "riche" qu'achèterait-on ?

Voilà une question remontée dans un forum qui a suscité beaucoup de réactions. Intuitivement, on aurait envie de prendre directement un télescope de 1 mètre de diamètre, car chacun sait que plus le télescope est gros, mieux, on voit et plus la vue est impressionnante.

Toutefois, ce serait un très mauvais calcul :

- Les fabricants de télescope de 1m n'existent pas, ce sont des commandes spéciales en général parce qu'il n'y aucun marché pour ça
- Un télescope dès 500 mm nécessite une certaine logistique pour être déplacé comme des rampes ou une remorque voir une grue de levage !
- Un télescope dès 500 mm nécessite un temps de montage/réglage/démontage dépassant 2h et souvent plus selon les circonstances
- Sous nos contrées, le seeing ne permet pas de mieux voir (résolution) qu'un petit télescope du commerce de 200 mm et cela durant 90% du temps d'observation, donc à quoi bon vouloir exploiter le plein potentiel de résolution d'un télescope de 500 mm et plus ?
- Pour exploiter le pouvoir collecteur de lumière d'un télescope de grande dimension, par exemple un 300 mm il faut un site dépourvu de pollution lumineuse, ce qui sera forcément un lieu très éloigné des villes.
- Attention à l'installation d'observatoire privé ou d'instruments en poste fixe car rien ne garantie que la pollution lumineuse ne se dégradera pas rapidement avec les années, comme avec l'arrivée d'une zone commerciale en rase campagne ou un site industriel par exemple, ce qui arrive plus souvent qu'on l'imagine.

— Faire de l'astrophoto avec un télescope à partir de 300 mm nécessite de maitriser beaucoup de techniques dépassant largement les compétences d'un amateur en moyenne
— Un télescope d'observatoire de 500 mm et plus nécessite des compétences de mécanicien et d'opticien pour son entretien et les professionnels capables de réaliser ce travail pour les particuliers n'existe pas (faute de demande) il faut alors se faire des amis dans une association pour trouver de l'aide.
— Avec un dobson 600 m de diamètre ouvert à l'extrême F/D = 3.3 on a 2 m de focale. Ainsi, il faudra un marchepied et le plus souvent pour d'autres instruments du même calibre une échelle pour accéder à l'oculaire, ce qui rendra les observations très inconfortables et périlleuses...
— Le grossissement minimal augmente aussi avec la focale et il sera peut être impossible d'observer chaque objets de messiers en entier.
— Un miroir de 400 mm et plus représente une masse de verre de plusieurs dizaines de kilos. Selon son épaisseur et les conditions d'observation et la météo, celui-ci n'arrivera peut-être jamais à température au cours d'une nuit d'observation et la résolution sera alors anéantie 100% du temps.

John Isaacs à dit : *I like to keep in mind - Optical perfection is unnecessary to observe the universe - Some use their equipment to observe the universe.. Others use the universe to observe their equipment.* [431]

17.11 Je viens d'acheter un télescope, mais je vois la Lune floue ?

Points à vérifier avant de lancer le plan ORSEC !

— Régler la mise au point avec la molette
— Vérifier que le crayford ne tourne pas à vide, si oui resserrer la vis de réglage de tension du crayford
— Vérifier que l'on a bien utilisé l'un ou les 2 extensions 2" et 1.25" pour un dobson de la marque Skywatcher car une seule extension est nécessaire en fonction du format d'oculaire
— Desserrer le maintien de l'oculaire dans le porte-oculaire et avancer ou reculer l'oculaire pour voir si la mise au point est possible, ensuite lorsque la map est trouvée rajouter ou retirer une extension
— Tester l'instrument de jour en visant un objet lointain en utilisant un oculaire de longue focale
— Vérifier que les miroirs sont bien alignés (la collimation)

17.12 Les forums sont-ils une bonne source d'information ?

Voilà une question épineuse, le forum comme tout média social rassemble beaucoup de profils d'utilisateurs, il n'y a pas de concours d'entrée donc n'importe qui peut s'y inscrire et participer aux nombreux débats qui y ont cours. Il faut du temps avant de connaitre les intervenants et comme ailleurs le forum a aussi ses propres déviances. Il n'est malheureusement pas rare que des abonnés peu scrupuleux et cachés derrière d'énigmatique pseudo utilisent cet espace public comme terrain de jeu afin de harceler d'autres utilisateurs, de donner leurs opinions sur des sujets qui leur sont totalement étrangers, d'imposer un ton professoral et de manipuler les scores de popularité, d'inciter à la haine, de divulguer des théories "scientifiques" fumeuses... Les cas de figures sont légion encore aujourd'hui. Méfiance également face aux mouvements de masse ou à la formation de "Think Group" (psychologie) dans les fils de discussion.

L'homme est une espèce grégaire, mais aussi très influençable et le forum qui est aussi un groupe social n'est naturellement pas épargné. Il arrive ainsi qu'untel condamne une marque, un fabricant, un scientifique, un autre abonné pour que d'autres abonnés suivent le mouvement sans réfléchir telle une meute en chasse. En effet, il est infiniment plus valorisant de suivre et d'agir comme une majorité de circonstance que d'argumenter et prendre la direction parfois opposée. Pour beaucoup de personnes manquant singulièrement de personnalité, suivre un leader reste une forme d'intégration puissante dans un groupe de pensée. Malgré ces travers inévitables, il y a aussi des membres formidables qui sont de véritables pédagogues et qui partagent sans réserves leurs connaissances ou bien vous encourage à poursuivre vos projets s'ils n'y contribuent pas

directement !

“The person who says he knows what he thinks but cannot express it usually does not know what he thinks.” – Mortimer Adler

17.13 AliExpress c’est fiable ? C’est de la qualité ?

Voilà une séries de question que beaucoup d’amateurs s’est posé un jour. AliEpxress est la plateforme grand public de la société chinoise AliBaba Group.

AliBaba Group est composé de 3 filiales :

- AliBaba : le commerce en gros pour les entreprises (B2B) ouvert à l’international
- TaoBao : le commerce au détail pour les particuliers (B2C) ouvert uniquement au marché chinois
- AliExpress : le commerce au détail pour les particuliers (B2C) ouvert à l’international

Les points importants :

- AliExpress est le second site de commerce en ligne dans le monde juste derrière Amazon.
- AliExpress ne fabrique pas de produit alors que Amazon possède une ligne de produit propre et comme Amazon ils offrent une vitrine pour leurs marchands partenaires.
- AliExpress assure une sécurité de transaction et protège l’acheteur, leur plateforme de résolution de litige est particulièrement efficace
- AliExpress livre en général 1 semaine pour l’Europe et les frais de livraison restent relativement faibles
- AliExpress collecte maintenant la TVA pour les produits envoyés en EU et dont le prix est inférieur à 150€ et ce depuis 2021. Il n’y a pas de taxes douanière en dessous de 150€ non plus. 1

Contrairement à Amazon, AliExpress ne divise pas son site en ligne en zones géographiques car AliExpress ne possède pas d’entrepots en EU. La plateforme AliExpress est devenue la plateforme préférée des “DropShippers” qui commercialisent des produits Ali sur Amazon à un prix plus cher.

Comme chez les partenaires Amazon il y a du bons et du moins bon, cependant concernant le matériel astro quelques marques chinoise inconnue en EU se dégagent par la qualité de leur produits qui n’a rien à envier à Skywatcher par exemple :

- SV Bony
- SkyRover
- EYSDON

Les principaux fabricants Chinois et les sous-marques de leurs produits :

- Sunny Optics (Ningbo)
- JOC = Jinghua Precision Optics & Electronics (Explore Scientific)
- Synta = Technology Corporation Of Taiwan (Orion, Skywatcher, Celestron, Meade, Medas, Baader)
- GSO = Guan Sheng Optical (Omegon)
- KUO = Kunming United Optics (Oberwerk, TS, APM)
- Long Perng
- Sharpstar Optics = Jiaxing Sharpstar Optical Instrument (Sharpstar, Askar)

Note : Certaines sous-marques appartiennent au fabricant et d'autres non.

17.14 Comment nettoyer ma lunette mon télescope ?

Les parties qui sont le plus susceptible de s'encrasser sont les parties largement exposées à l'air libre, donc la lentille frontale de la lunette et la surface réfléchissante du miroir dans le cas du télescope. Le nettoyage d'un instrument est une opération délicate, en plus de risquer de rayer la surface optique on peut endommager le traitement anti-reflet de la lunette ou la surface réfléchissante du miroir si on emploie la mauvaise méthode. On lit souvent dans les forums des méthodes plus ou moins hasardeuses qu'il ne faut surtout pas reproduire si on tient à son investissement.

17.14.1 La Lunette

La liste de course :

— Une soufflette puissante, j'en ai testé des dizaines que j'ai vite mis à la poubelle, la seule qui marche vraiment est la Giotto Rocket Air Blower ! Elle peut être utilisée pendant 10-15 ans environ, après, il faut la changer, car le caoutchouc se détériore à la lumière.
— Un flacon de Purosol, ce n'est pas donné, mais une bonne lunette astronomique non plus ... l'alcool isopropylique de pharmacie à 99.999% souvent recommandé laisse des traces et ses propriétés se détériore vite avec le temps, le nettoyant pour vitre est à proscrire absolument car trop agressif pour les traitements des lentilles de précision !
— Un lot de compresses chirurgicales non tissées. Les lingettes micro fibre souvent plébiscitées ne conviennent pas car elles capturent les particules et ne sont pas jetables.



Credit : J.G. Gricourt

La méthode :

1. Choisir un lieu adapté (éviter la grange de pépé) comme une pièce où le ménage a été fait récemment (mais pas le jour même !) et bien aérée, idéalement un temps automnal pluvieux évitera les particules en suspension dans l'air.
2. Commencer par lancer plusieurs coups de soufflette énergique sur la lentille frontale, lunette orientée vers le bas pour éviter les re-déposition des particules.
3. Vaporiser loin de la lunette du Purosol sur la compresse et exécuter des ronds sur la surface de la lentille frontale sans jamais appuyer
4. Jeter la compresse à chaque passage, car on ne repasse jamais 2 fois avec la même compresse !

Il ne faut pas être maniaque, on ne nettoie pas une lunette toutes les semaines, au mieux une fois par saison si celle-ci a été beaucoup utilisées.

Pour les poussières qui pourraient se loger entre les lentilles (ne concerne pas les objectifs à bain d'huile), cela arrive tout le

temps, il ne faut pas s'en inquiéter, même les grosses lunettes de précision Takahashi hors de prix en ont toutes à l'intérieur après quelques années de sortie, cela n'altère en rien les performances de l'instrument et tenter de sortir les lentilles du doublet ou du triplet de leur logement (le barillet) serait vraiment très préjudiciable (calage et collimation à refaire !)

17.14.2 Le Télescope

Pour un miroir c'est la méthode du liquide vaisselle Paic qui est recommandée et qui a fait ses preuves.

La liste de course :

- Une paire de gant en latex neuve
- Une soufflette puissante
- Un flacon de Paic Citron formule classique
- Une baignoire, ou alors une pataugeoire plastique pour enfant
- Un bidon de 5L d'eau déminéralisée (pour le repassage)
- Du papier ultra-absorbant = du PQ
- Un sèche-cheveux



Credit : J.G. Gricourt

La méthode :

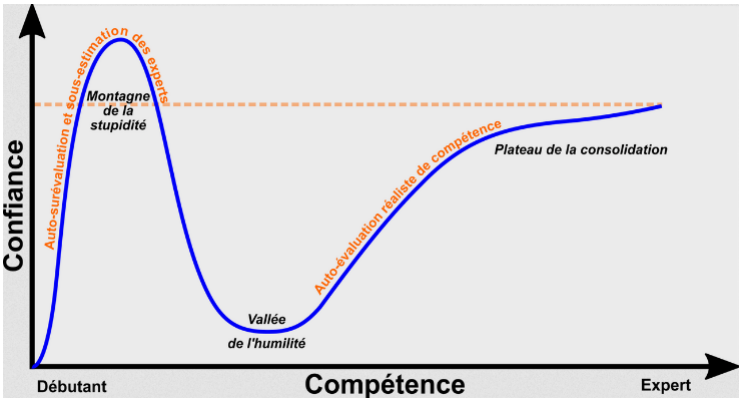
1. Il faut ici sortir le miroir de son logement car on ne nettoie pas un miroir dans le télescope car le risque de détériorer des parties bois ou métal sera plus grand.
2. Il faut se munir des gants en latex afin de manipuler le miroir pour éviter de rajouter des traces de gras sur la surface.
3. Commencer par lancer plusieurs coups de soufflette énergique sur la surface du miroir afin de décrocher les particules les moins adhérentes comme les redoutés grains de sable,
4. Passer le pommeau de douche, le mitigeur réglé à la température ambiante, asperger en abondance le miroir relevé dans la baignoire avec des serviettes de bain pour le caler
5. Badigeonner ses mains dans le Paic et tartiner le miroir avec ses mains engluées dans le Paic, la surface est alors entièrement jaune si on en a mis suffisamment.
6. Faire mousser le miroir en faisant des ronds avec le plat de la main sans jamais appuyer, tout ce qui collait encore sur le miroir partira.
7. Réaliser un premier rinçage au pommeau de douche pour évacuer tout le liquide vaisselle.
8. Vider ensuite la totalité du bidon de 5L d'eau déminéralisée sur le miroir.

9. Sécher les gouttes résiduelles, les plus grosses en se servant de morceaux de PQ qui absorberont l'eau par capillarité (on ne frotte surtout pas !)
10. Utiliser le sèche-cheveux réglé au minimum (pas trop chaud) qui finira d'évacuer l'humidité résiduelle, s'il fait 35° dans la maison ce n'est même peut-être pas nécessaire.

La méthode de Mike Lockwood : Cleaning your mirror, and prolonging coating life

Effet Dunning-Kruger il s'agit d'un biais cognitif qui montre qu'une personne incompétente tend à surestimer son niveau de compétence. Dans les forums, beaucoup de personnes répondent spontanément à toutes les questions et certaines même mettent en avant leur ancienneté ou leur autorité auto proclamée dans le domaine (tiens un autre biais). On remarquera que ces mêmes personnes posent peu de questions voir jamais pour la plupart. Il est naturellement difficile de reconnaitre que l'on n'est pas compétent dans certains domaines ou simplement sur une question précise et que répondre à tout va juste pour étaler ses connaissances ne va pas aider la personne en recherche de réponses.

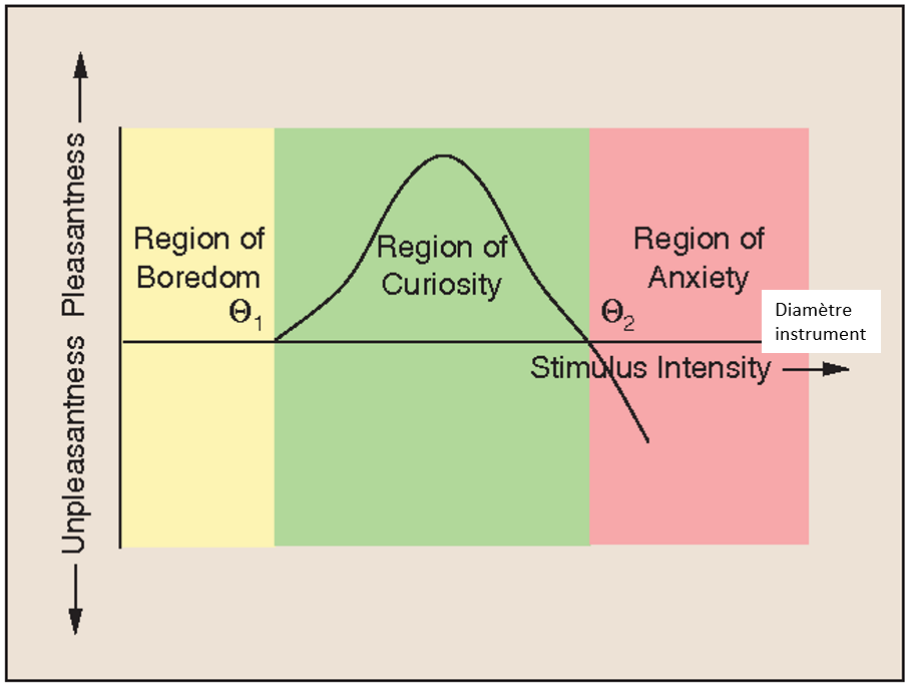
Effet Dunning-Kruger



Credit : Wikipedia

Wundt Curve ou "Courbe de satisfaction de Wundt" désigne une courbe montrant un effet psychologique de l'évolution de la motivation d'un sujet soumis à un stimulus (1896) [17, 669]. On peut appliquer ce principe dans divers domaines dont l'astronomie par exemple. L'acquisition d'instruments d'observation (ou d'imagerie) toujours plus gros, plus perfectionnés et toujours plus chers ne conduit pas à une satisfaction infinie, au contraire, passé un cap dépenser plus d'argent pour son loisir ne procure pas plus de satisfaction, voir cela peut même entrainer de la frustration ! [2]

2. How To Avoid The Agony When Buying Your First Telescope



Credit : Qiong Wu, C. Miao IEEE Computational Intelligence Magazine (2013)

A lire sur la psychologie des achats compulsifs :

- The Science of Gear Acquisition Syndrome = GAS
- En as-tu vraiment besoin ?

Enfin pour conclure :

"Don't worry about what telescope you own, or its quality. Just get out under the night sky, and enjoy God's wondrous universe".
– Thomas Back 1957 - 2007 [735]

17.15 Arnaques comment les éviter ?

De plus en plus on achète son matériel astro sur Internet que ce soit sur des plateformes de type Leboncoin, eBay ou dans les petites annonces des forums spécialisés comme Astrosurf. L'avantage est que l'on y trouve facilement du matériel très souvent peu utilisés (achat coup de coeur). Le prix du matériel astro varie peu une fois la décôte de l'occasion prise en compte et même certains matériel voient leur prix augmenter face à la rareté. Enfin les astronomes amateurs sont réputés pour prendre soin de leur matériel. Donc il y a beaucoup d'avantage à acheter du matériel astro dans l'occasion.

Il faut cependant être très méfiant car les arnaques sont légions, il faudrait respecter quelques règles pour les éviter au maximum :

Vérifier la compétence du vendeur Normalement lorsqu'une annonce provient des petites annonces que ce soit sur Leboncoin, Ebay ou d'un forum spécialisé on s'attend à ce que le vendeur connaisse la matériel qu'il propsoe à la vente. Il suffit de lui poser des questions techniques / pratiques sur le matériel, sur sa pratique de l'astro etc ... entamer une discussion permet souvent d'éliminer des vendeurs un peu trop évasifs ou désintéressé. Cependant il peut parfois arriver que le vendeur

réalise un vide grenier suite à un décès et ne sait pas nécessairement ce qu'il vend en détail.

Vérifier que le prix demandé n'est pas ridiculement bas Des objets de valeurs ne se vendront pas à prix cassés même sur Leboncoin ! Même si le vendeur ne sait pas ce qu'il vend il ira quand même voir des annonces similaires et calera son prix dessus qui en général comprend une petite marge de négociation. Cependant pour des annonces anciennes le prix affiché peut être plus bas que la moyenne.

Vérifier l'IBAN auprès de la banque émettrice Lorsque la transaction se fait par virement et donc par le biais d'un IBAN il faut impérativement vérifier la nom de la banque et appeler le service client de la banque pour valider le NOM et PRENOM du propriétaire du compte et demander si ce compte est bien solvable où n'a pas fait l'objet d'une mesure d'interdit bancaire.

Vérifier la réputation de la banque Lorsque la transaction se fait par virement et donc par le biais d'un IBAN il faut impérativement vérifier la nom de la banque mais aussi sa réputation auprès de services comme Truspilot. Les banques à privilégier : Crédit Agricole, Crédit Lyonnais, BNP Paribas, Société Générales, Caisse d'Epargne, CCF.

Refuser les IBAN provenant de néo-banques Lorsque la transaction se fait par virement et donc par le biais d'un IBAN il faut absolument éviter les IBAN émit par des "néo banques" car la quasi totalité des arnaques utilisent ces établissements financiers qui ne sont pas de véritables banque, parfois ce sont de simples sociétés de paiement qui n'offrent aucun service de sécurisation de la transaction en protégeant l'acheteur ou le vendeur en cas de non réception du colis. La plupart sont utilisées pour blanchir de l'argent, exemple de fausses banques abritant les comptes des arnaqueurs : Treezor, N26, Revolut, Fortuneo, Monabanq, HelloBank !, BoursoBank, BFor, Orange Bank, Ma French Bank, Neosurf ... A place il faut privilégier les banques françaises ayant pignon sur rue : BNP Parisbas, Crédit Lyonnais, CCF, Crédit Agricole, Banque populaire, Société Générale, Caisse d'Epargne etc ... On peut aussi faire totalement confiance à la société de paiement Paypal ou les services de paiement de Ebay qui offrent un niveau de sécurité très élevé pour les 2 parties.

Utiliser Paypal un moyen de paiement sûr Oui Paypal est un moyen sûr pour réaliser une transaction mais pour cela il faut impérativement éviter de choisir le paiement entre amis ! ! ! afin de bénéficier de la protection de l'acheteur lors de la transaction. Cela un coup mais très faible au regard du service rendu au moment où l'on a besoin de se faire rembourser !

Rester sur la plateforme en ligne ou passer par Paypal Pour effectuer le paiement il est fortement recommandé de rester sur la plateforme en ligne (ex : Leboncoin ou Ebay) ou de passer par Paypal. En général les arnaqueurs préfèrent passer soit par un mandat cash type Western Union, ou un virement bancaire via un IBAN émit par une néo-banque douteuse.

Vérifier l'adresse postale auprès de la mairie Un moyen de savoir si la personne (vendeur ou acheteur) habite à l'adresse indiqué il suffit de poser la question à la mairie de sa commune.

Vérifier la réputation du vendeur sur LBC La réputation est indiquée par des étoiles données par des acheteurs lors de précédentes transactions avec ce vendeur. C'est un élement supplémentaire à prendre en compte mais jamais un gage de légitimité.

Vérifier les autres annonces LBC Vérifier la nature des autres annonces, le type d'objets en vente, l'adresse indiquée, si cette dernière n'est jamais la même alors méfiance.

Vérifier la carte d'identité Il faut tenter de débusquer les faux papiers en recherchant le NOM PRENOM sur Internet pour savoir si cette personne existe vraiment, souvent il s'agit de cartes volées et retravaillées sous Photoshop. La personne trouvée sur Facebook n'a rien à voir avec l'adresse, la photo n'a pas l'aspect d'une photo d'identité non plus. Il manque la photo du verso de la carte d'identité. Il peut être recommandé de porter ce document à la police pour vérification.

Exiger la facture Pour les achat d'un certain montant il faut exiger la facture, celà permettera de valider auprès du magasin indiqué que ce matériel à bien été acquis dans ce magasin grace au numéro de série et bien par cette personne.

Eviter un vendeur qui n'a pas d'historique de vente Encore un argument qui doit être pris en compte en complément d'autres vérifications. Un arnaqueur ne s'embarasse pas à passer du temps sur un site pour se constituer un historique sur plusieurs années.

Fuir un vendeur qui prend les devants Par exemple le vendeur propose d'emblée un contrat de vente faussement rassurant avec 60% d'acompte et 40% à la reception, le contrat est rédigé en des termes pseudo juridiques engageant le vendeur à réaliser son obligation d'envoyer le matériel. C'est très suspect d'ailleurs ce document n'a aucune valeur juridique. De plus si il fourni sa carte d'identité sans qu'on lui demande celà renforce le caractère frauduleux de la transaction.

Fuir les vendeurs trop exigeants Par exemple les vendeurs qui exige une remise en main propre uniquement ou qui exigent un prix ferme. Ces vendeurs n'ont rien compris au prinipe de le vente en ligne où la plupars des acheteurs potentiels ne pourront pas se déplacer quant aux prix fermes il s'agit de vendeurs qui ne sont pas vraiment décidé à vendre et en géneral le prix affiché est éloquant.

Fuir les annonces qui ne sont que des copié / collé Des vendeurs un peu trop pressé ou négligeant ne prennent pas le temps de décrire correctement leur objet à la place ils copient / collent le descriptif du fabricant et souvent celui ic est accompagné de photos commerciales. Dans ce cas il est impossible de savoir ce que l'on achète et les très mauvaises surprises sont au bout de l'achat.

Signaler les annonces frauduleuses Lorsque beaucoup d'indices vont dans le mauvais sens il ne faut pas hésiter à signaler l'annonce soit au service de publication en ligne soit à l'administrateur du forum afin que son compte soit bloqué pour l'empêcher d'agir.

Bibliographie

[1] Mirror Optical Coatings, AccuCoat

[2] Truss tube diameter question, Achernar - 1/05/2011

[3] Ratio de Strehl, Frederic Jabet

[4] L'aberration sphérique, Frederic Jabet

[5] Le Star Test, Frederic Jabet

[6] Baader Glasspath Corrector, Agena Astro

[7] La technique du masque flou, Alain Maury, 31/12/2009

[8] Thermal Management In Newtonian Reflectors, Alan French, 01/2002

[9] Would you rather have a triplet refractor with ED Glass or a doublet with FCD-100 and Lanthanum Glass?, Alan French, 16/02/2021

[10] Thermal expansion measurement of glasses, Alexander Fluegel - 2005

[11] How Wavelets Allow Researchers to Transform, and Understand, Data, Alexander Hellemans - 14/10/2021

[12] Transmission Oculaires, Amateurastronomie

[13] Telescope aperture comparison, Andrej Flis - 8/01/2019

[14] GSO 90mm f/11 Achromat, Andrès Esteban - 21/04/2020

[15] The Effective Temperature and the Absolute Magnitude of the Stars, Angel Fierros Palacios - 12/01/2016

[16] The Schiefspiegler (Oblique Telescope), Anton Kutter - 3/2016

[17] Wundt curve, American Psychological Association

[18] Dobson Slide Bearings, Arjan Te Marvelde - 9/2017

[19] New approach for Polar Alignment, Ashirwad Tillu - 27/09/2019

[20] The McDonald gun shooting incident, Astro Anecdotes - 26/03/2015

[21] Autocollimation test, Astro Bananas (Bea)

[22] Glass for Telescope mirrors, Astrofox

[23] Binoviewers in binofriendly refractor - use of glass path/optical corrector, Thomas Jensen - 22/09/2016

[24] daystar quark + (what refractor?), Thomas Jensen - 26/08/2018

[25] Dobsonian with annoyingly good bearings, Thomas Jensen - 21/08/2024

[26] Seeing and Transparency Guide, Astronomical League - 2023

[27] Highest Useful Magnification, Astronomics - 2022

[28] How the Jet Stream impacts astronomical seeing, Astronomy Club Of Asheville

[29] CCD Suitability, The evolution of eyepiece developments at Tele Vue - 13/10/2015

[30] CCD Suitability, Astronomy Tools

[31] ASTRO-PHYSICS 130 mm f/6.3 Starfire GTX, AP - 2018

[32] Renishaw Absolute Encoders for the Mach2, 1100GTO and 1600GTO Mounts, Astrophysics - 30/08/2020

[33] Mach2GTO German Equatorial Mount, Astrophysics

[34] MAXBRIGHT 2" Mirror Diagonal, Astrophysics
[35] Cooling a 10" Newtonian, Anthony Wesley - 22/03/2005
[36] Qualité de vision après compensation chirurgicale de la presbytie, M. Assouline - EM Consult -
[37] Herschel Wedge - does size matter?, At dusk - 23/04/2018
[38] Film KODAK Technical Pan 2415, 4415 et 6415, Observatoires de Augerolles Cunlhat
[39] L'échantillonnage, fredogoto alias Frédéric Tapissier - 2004
[40] Baader Star Diagonals, Baader - 03/2021
[41] Baader 2" ClickLock Diagonal Mirror M68 thread, Baader
[42] Baader BBHS reflective properties, Baader
[43] Baader 2" Cool-Ceramic Safety Herschel Prism, Baader
[44] Telecentric System or Barlow Lens, Baader
[45] , Baader Planetarium
[46] filtre erf alternative, Banjo (Paul) - 23/04/2021
[47] Brightness induction magnitude declines with increasing distance from the inducing field edges, Barbar Blakeslee - 15/01/2013
[48] Ondelettes et applications, Béatrice Pesquet Popescu
[49] From soup to cells: The origin of life, Berkeley
[50] Berlebach Tripod, Berlebach
[51] Erreur de Cône (CE) des montures Equatoriales, Bernard Bayle
[52] Mise en station suivant Méthode de Bigourdan, Bernard Bayle
[53] , Bernard Bayle - 16/05/2022
[54] Comprendre la turbulence atmosphérique en imagerie astronomique, Bernard Trégon - 29/07/2020
[55] optique adaptative ... ca en est ou?, Bernard Trégon - 18/08/2021
[56] Interférométrie des tavelures, Bernard Trégon - 29/07/2020
[57] Voir la turbulence, Bernard Trégon
[58] Wave-front, Bernard Trégon alias brizhell - 28/03/2022
[59] Comprendre la Turbulence, Bernard Trégon- 28/03/2022
[60] Effect of Barlow mag. on eye relief, Bill P. - 22/01/2014
[61] Night-time measurements of astronomical seeing at Dome A in Antarctica, BinMa - 29/07/2020
[62] Pourquoi ai-je besoin d'un BMS sur ma batterie lithium ?, BMS Powersafe - 22/03/2012
[63] Eyepiece AFOV calculation, Bob4BVM - 11/05/2017
[64] Refractor Bresser 102/1350 in h alpha ?, Bob Yoesle - 8/05/2019
[65] Etalon Basics, Bob Yoesle - 02/11/2014
[66] Coronado SMII 90mm DS vs Lunt 80mm DS, Bob Yoesle - 08/02/2017
[67] Using a Nightime H-Alpha filter for Solar viewing?S, Bob Yoesle - 16/04/2008
[68] Lunt Solar Wedge, Bob Yoesle - 25/07/2017
[69] Herschel wedge configuration?, Bob Yoesle - 17/07/2022
[70] ADC Input Noise The Good, The Bad, and The Ugly. Is No Noise Good Noise ?, Bonnie Baker & Alain Guery
[71] Telescope limiting magnitudes, Bradley E. Schaefer - 20/09/1989
[72] Long vs short focal ratio for lunar & planetary observation, Rodger W. Gordon
[73] A closer look at High magnification, Rodger Gordon
[74] Depth of Focus, Rodger Gordon
[75] Collimation Checks, Brett Catshill Design - 10/10/2021
[76] X-ray Contrast to Noise (CNR), Brian Nett - 2023

[77] Optical Aberrations, Bruce MacEvoy
[78] The Astronomical Image, Bruce MacEvoy
[79] Telescope & Eyepiece Combined, Bruce MacEvoy
[80] Eyepiece Designs, Bruce MacEvoy
[81] Double Star Astronomy, Bruce MacEvoy
[82] The Nature of Turbulence, Bruce MacEvoy
[83] Comment régler son télescope avec méthode..., Bruno Salque - 21/03/2010
[84] How atmospheric seeing affects telescopes with different focal ratios, Bryan Greer - 01/2007
[85] Understanding thermal behavior in Newtonian reflectors, Bryan Greer - 26/05/2003
[86] Why Quartz Mirrors?, Bryan Greer - 12/03/2007
[87] Understanding Thermal Behavior in Newtonian Reflectors, Bryan Greer - Sky & Telescopes- 09/2000
[88] Cameras Vs. The Human Eye, Cambridge In Colour
[89] Drift Almignment, Canbury - 28/08/2019
[90] Products CaF2, Canon Optron
[91] Night Vision EBI Image Intensifier Dark Current, Carpe Nocturnum - 26/05/2011
[92] 7 Easy Steps For Perfect Collimation
[93] Using the INFINITY XLKTM w/HotSpot
[94] What are the optimum back focus distances for Celestron SCTs?, Celestron - 4/11/2012
[95] Le télescope de Dobson et autres instruments pour l'amateur, Charles Rydel - 5/02/2016
[96] Algorithmic Foundations for the Diffraction Limit, Sitan Chen & Ankur Moitra - SIGACT - 16/04/2020
[97] Comparaison des CANON 40D, 50D, 5D ET 5D Mark II, Christian Buil
[98] Le SolEx, Christian Buil - 24/04/2022
[99] Le StarEx, Christian Buil - 2023
[100] Astronomical filters spectral transmission, Christian Buil - 2023
[101] Il y a 1 000 ans, le Groenland était une "terre verte" et hospitalière, vrai ou faux ?, Christophe Magdelaine - 5/07/2018
[102] Cinq trucs à connaître pour mieux collimater son télescope, Christophe Pellier - 14/07/2013
[103] Cinq situations météo qui favorisent le bon seeing, Christophe Pellier - 17/11/2013
[104] La planète Vénus observée par les astronomes amateurs, Christophe Pellier - 2014
[105] Les progrès récents en imagerie solaire haute résolution, Christian Viladrich - 11/11/2016
[106] SCT (non HD) et correction de champs : mission impossible ?, Christian Viladrich - 22/03/2021
[107] Solar narrow field images, Christian Viladrich - 2018
[108] Daystar Ha filter theoritical performances, Christian Viladrich
[109] Astrosolar + filtre UV/IR en visuel ?, Christian Viladrich - 15/01/2019
[110] Le cocktail nécessaire pour la HR, Christian Viladrich - 11/2021
[111] feuille astrosolar ND5 ou ND3.8?, Christian Viladrich - 25/02/2024
[112] Filter transmission curves, Christian Viladrich
[113] TEST divers Filtres en Solaire du 15 mai 2022, Christian Viladrich - 16/05/2022
[114] Passe bande vs. diamètre, Christian Viladrich - 15/03/2024
[115] Filter transmission curves, Christian Viladrich - 2023
[116] Sol'eil 200 - mon nouveau télescope (solaire!), Christophe de La Chapelle - 18/08/2024
[117] Finding the Optimal Sub-frame Exposure, Chuck Anstey - 13/02/2007
[118] Resolution, Magnification and Contrast: Their Interrelationships Explained, Cityastronomy - 4/04/2023
[119] Ocala Light Pollution Map, ClearDarkSky - 2017
[120] Building my Schupmann Medial Telescope, Cliff's Astronomy Site - 2018

[121] Improving Refractor Performance with a Prism Diagonal, Clive Gibbons - 28/08/2008
[122] R.A. and Dec. Absolute Encoder and Readhead System, Cloudbreaks Optics
[123] Absolute Flux Calibrated Spectrum of Vega, L. Colina - 22/04/1996
[124] Lunette ou Newton, Colmic - 31/10/2018
[125] Lucky Imaging, Colmic - 11/07/2019
[126] Calculs et généralités autour des CMOS, Colmic - 10/04/2021
[127] "Grosse" capacité dans un petit volume (Ah), Colmic - 14/10/2021
[128] Calculs et généralités autour des CMOS (calcul des 3 sigma ...), Colmic - 10/04/2021
[129] Does a Dirty Lens Affect Image Quality? , Connor Brustofski - 24/01/2022
[130] What do all great shots have in common ?, Craig Stark - 21/11/2014
[131] Signal to Noise: Understanding it, Measuring it, and Improving it Part I, Craig Stark - 01/05/2009
[132] Signal to Noise: Understanding it, Measuring it, and Improving it Part II, Craig Stark - 26/05/2009
[133] "Aperture, f-ratios, myths, etc.", Craig Stark - 12/11/2008
[134] Debayering Demystified, Craig Stark - 09/2006
[135] Calcium Fluoride (CaF2), Crystran
[136] Seeing and Turbulence, Cyril Cavadore - 25/05/203
[137] Stop à la mode des dark flats, Cyril Richard - 2021
[138] An examination of the effects of optical aberrations, obstruction and seeing ..., Damian Peach
[139] The Ultimate Location for Amateur Astronomy ?, Damian Peach - 2004
[140] Predicting Astronomical Seeing in the UK, Damian Peach - 2006
[141] Acuité Visuelle, Résolution et Pouvoir Séparateur, Dr Damien Gatinel - 26/01/2015
[142] Loupe Grossissement, Dr Damien Gatinel
[143] Diffraction, Dr Damien Gatinel
[144] Particularités de la lumière Laser, Dr Damien Gatinel
[145] Astigmatisme, Dr Damien Gatinel
[146] Effet de l'astigmatisme chez le myope, Dr Damien Gatinel
[147] HELP me build this Istar 150mm f8 anastgmatic refractor, Dan Chaffee - 28/12/2022
[148] Les effets optiques de la turbulence atmosphérique dans les images astronomiques, Daniel Bonneau - 27/10/2023
[149] La collimation, Daniel Palazy (AltAZ) - 01/06/2006
[150] Secrets of Telescope Resolution, Daniel Rickey (Sky & Telescopes) - 01/06/2006
[151] Lunettes et Télescopes, André Danjon et André Couder - page 181
[152] Lunettes et Télescopes, André Danjon et André Couder - page 133
[153] Lunettes et Télescopes, André Danjon et André Couder - page 99
[154] ISO on Sony cameras is often INCREDIBLY misunderstood, Dan Fox - 29/04/2022
[155] The effects of radiation on the Eye in industrial environments, Daniela Mariana Barbu - 08/2015
[156] SkyWatcher ED Esprit 120mm Apochromatic Triplet, Darren Thibodeau - 17/08/2014
[157] "Good enough optics" for visual astronomy, Dave Cotts- 23/06/2022
[158] Determining resolution with a camera, David Cotterell (alias Cotts) - 8/01/2019
[159] Five Decades of Research on the Question of How Life Can Begin , David Deamer - 2 May 2019
[160] Perception 30 Lecture Notes: Brightness, David Heeger -2006
[161] Long vs. short barlows for fast scopes, David Knisely - 05/01/2005
[162] Deep Sky Objects not as bright as their expected magnitude, David Knisely - 16/04/2022
[163] Filter Performance Comparisons For Some Common Nebulae, David Knisely
[164] Useful Filters For Viewing Deep-Sky Objects, David Knisely - 30/10/2013

[165] Automated Mirror Cell Optimization, David Lewis
[166] Petits et gros diamètres les effets de la turbulence, AltAz (DV)
[167] How to polar align during the day, Dave Eagle - 4/05/2020
[168] Diagonal upgrade - prism or mirror, David P. - 17/02/2012
[169] Is software rendering premium triplet refractors (practically) obsolete?!?, Daniel Mounsey - 30/11/2023
[170] Optical performance of large ground-based telescopes., Dierickx, P. - 1992 Journal of Modern Optics, Vol. 39, No. 3, p. 569 - 588
[171] La théorie ou comment obtenir de meilleures images, Deepskystacker
[172] CA, Derek Wong - 25/11/2016
[173] Apodization, Dick Suiter - 30/05/2003
[174] Deriving an estimate for the Fried parameter in mobile optical transmission scenarios, Dirk Giggenbach - 12/08/2010
[175] Collimation And The Newtonian Telescope V.4, Starman1 alias Don Pensack - 20/09/2011
[176] Moonlite + Paracorr type 2 vs SIPS, Starman1 alias Don Pensack - 15/09/2015
[177] How to use CATSEYE Collimation tools, Starman1 alias Don Pensack - 5/11/2007
[178] New Book: "Telescopes, Eyepieces and Astrographs", Starman1 alias Don Pensack - 13/04/2012
[179] Coma corrector effect on secondary size?, Starman1 alias Don Pensack - 7/12/2016
[180] About seeing air current coma collimation etc, Starman1 alias Don Pensack - 31/07/2017
[181] Which is the best collimation device (1.25"/2" capable) for a 14" Dob?, Starman1 alias Don Pensack - 3/08/2017
[182] Powermate Equivalents?, Starman1 alias Don Pensack - 15/04/2013
[183] Does a 2x barlow also reduce the exit pupil? for a 14" Dob?, Starman1 alias Don Pensack - 18/11/2015
[184] Paracorr 2 on-axis performance, Starman1 alias Don Pensack - 25/04/2017
[185] Eyepiece Qualities and Aberrations, Starman1 alias Don Pensack - 09/01/2006
[186] Where to put the focal plane with a Paracorr?, Starman1 alias Don Pensack - 02/12/2015
[187] New Book: "Telescopes, Eyepieces and Astrographs", Starman1 alias Don Pensack - 11/09/2012
[188] Mirror coating and durabiity, Starman1 alias Don Pensack - 16/02/2017
[189] Eyepieces with fewer elements, Starman1 alias Don Pensack - 30/07/2016
[190] Barlow lens vs CA, Starman1 alias Don Pensack - 15/02/2019
[191] Barlow lens vs CA, Starman1 alias Don Pensack - 21/08/2007
[192] Coma Corrector Mad Science – Paracorr AND Baader MPCC-MKIII, Starman1 alias Don Pensack - 18/06/2016
[193] TeleVue Apollo 11, Starman1 alias Don Pensack - 7/04/2019
[194] Formula for Coma free zone, Starman1 alias Don Pensack - 9/12/2014
[195] Effect of mis-placed center spot on autocollimator?, Starman1 alias Don Pensack - 17/08/2017
[196] Paracorr settings and myopic observers., Starman1 alias Don Pensack - 21/09/2019
[197] Identifying eyepiece aberrations, Starman1 alias Don Pensack - 9/07/2013
[198] What is your best Exit Pupil? A poll., Starman1 alias Don Pensack - 19/04/2005
[199] 12.5 inch F/5 - Secondary Cage & Focuser, Starman1 alias Don Pensack - 9/03/2012
[200] Help interpreting SQM readings, Starman1 alias Don Pensack - 8/07/2016
[201] What are the pro's & con's of a erect image prism type vs mirror diagnal, Starman1 alias Don Pensack - 28/11/2015
[202] Eyepeice Abberations, Starman1 alias Don Pensack - 27/08/2019
[203] 12.5 inch F/5 - Secondary Cage & Focuser, Starman1 alias Don Pensack - 9/03/2012
[204] Telescope Limiting Magnitude, Starman1 alias Don Pensack - 12/09/2006
[205] To SIPS or not to SIPS?, Starman1 alias Don Pensack - 5/09/2019
[206] paracorr 1,25'´ ?, Starman1 alias Don Pensack - 25/06/2021
[207] Fully Illuminated Field: Please enlighten me, Starman1 alias Don Pensack - 13/03/2009

[208] Newtonian Focusers - Low Profile, Starman1 alias Don Pensack - 2/01/2018
[209] Newtonian Focusers - Low Profile, Starman1 alias Don Pensack - 7/07/2018
[210] How to Collimate your Newtonian, Starman1 alias Don Pensack - 31/07/2021
[211] The Baader Bbhs-sitall Silver Diagonal, Starman1 alias Don Pensack - 1/04/2016
[212] The Baader Bbhs-sitall Silver Diagonal, Starman1 alias Don Pensack - 08/04/2017
[213] Magnitude vs. Surface Brightness or why I can't see stuff?, Starman1 alias Don Pensack - 23/08/2018
[214] EOFB, Starman1 alias Don Pensack - 16/05/2021
[215] Vixen SSW Ultra Wide Angle Eyepieces: Review, Starman1 alias Don Pensack - 12/08/2017
[216] Formulas for collimation tolerances, Starman1 alias Don Pensack - 27/08/2021
[217] EOFB, Don Pensack - 03/05/2021
[218] Dob counterweights or elastic bands, may I see yours?, Starman1 alias Don Pensack - 03/07/2022
[219] Fully Illuminated Area?, Starman1 alias Don Pensack - 04/10/2009
[220] SIPS or Paracorr T2?, Starman1 alias Don Pensack - 01/09/2022
[221] The 1X / 2X / 3X Magnification Protocol for eyepiece set selection, Starman1 alias Don Pensack - 25/05/2021
[222] New 85 °Pentax Eyepieces, Starman1 alias Don Pensack - 14/11/2022
[223] Vernonscope Silver Quartz Diagonal, Starman1 alias Don Pensack - 27/11/2021
[224] Sharpness on-axis, Starman1 alias Don Pensack - 14/08/2021
[225] Why are short focal length eyepieces tall and long focal length ones shorter?, Starman1 alias Don Pensack - 22/12/2018
[226] Minimum exit pupil, Starman1 alias Don Pensack - 1/09/2023
[227] Minimum exit pupil, Starman1 alias Don Pensack - 27/05/2022
[228] Paracorr type 2... not impressed, Starman1 alias Don Pensack - 17/01/2020
[229] Premium mirrors, glass material and thermal effects., Starman1 alias Don Pensack - 16/05/2015
[230] Eyepiece Performance using a Prism Diagonal, Starman1 alias Don Pensack - 6/12/2013
[231] Coma and magnification–a mystery, Starman1 alias Don Pensack - 4/02/2013
[232] Want a Zambuto Mirror: What to Order?, Starman1 alias Don Pensack - 27/02/2015
[233] Astronomy Talks - Don Pensack talks telescope viewing, Starman1 alias Don Pensack - 26/05/2024
[234] After a few years with Morpheus eyepieces, Starman1 alias Don Pensack - 13/04/2024
[235] Magnification vs. Exit Pupil, Starman1 alias Don Pensack - 2/06/2024
[236] Astronomik 2" OIII Filter, SO underrated!, Starman1 alias Don Pensack - 23/05/2023
[237] The Eyes are it, Starman1 alias Don Pensack - 23/07/2024
[238] Help With New Eyepeice, Starman1 alias Don Pensack - 20/08/2024
[239] Eyepiece size, Starman1 alias Don Pensack - 5/03/2024
[240] Eyepiece size, Starman1 alias Don Pensack - 31/07/2024
[241] Eyepiece size, Starman1 alias Don Pensack - 5/08/2024
[242] Cheshire or barlowed laser - most accurate?, Starman1 alias Don Pensack - 28/08/2024
[243] SIPS or Paracorr T2?, Starman1 alias Don Pensack - 2/09/2022
[244] Are super-sized Dobsonians a specialist item?, Starman1 alias Don Pensack - 17/09/2023
[245] how to calculate tube diameter, Starman1 alias Don Pensack - 30/10/2017
[246] TS Concenter adjustment eyepiece, Starman1 alias Don Pensack - 16/11/2022
[247] Catseye–Triangle, Hotspot, Red or White?, Starman1 alias Don Pensack - 29/08/2015
[248] Why don't telescope mirrors use dielectric coating?, Starman1 alias Don Pensack - 20/10/2020
[249] Orion UK 150 f/8 Newtonian Wavefront Analysis, Starman1 alias Don Pensack - 23/12/2024
[250] Orion UK 150 f/8 Newtonian Wavefront Analysis, Starman1 alias Don Pensack - 21/12/2024
[251] Night sky getting brighter, Starman1 alias Don Pensack - 21/03/2023

[252] Jupiter's great red spot could soon disappear, Doris Elin Salazar - 21/02/2018
[253] Sky Brightness Nomogram, DARK SKIES AWARENESS
[254] How Smoothly Does the Ioptron Az Mount Pro Track at High Power?, dustyc - 4/06/201/8
[255] What does it mean if the view is "soft", Eddgie - 9/02/2017
[256] Daytime Photos through Skywatcher 150 & ES AR 152, Eddgie - 3/03/2014
[257] About seeing, air current, coma, collimation etc ..., Eddgie - 30/07/2017
[258] Air Spaced objective lenses, Why?, Eddgie - 26/06/2014
[259] Mesopic mode, and why does it matter ?, Eddgie - 8/11/2013
[260] Field curvature of a small APO for visual use, Eddgie - 31/08/2016
[261] 8" Edge HD vs C8 shootout, Eddgie - 08/11/2011
[262] Feathertouch vs Moonlite focuser?, Eddgie - 10/06/2020
[263] Seeing and Central Obstruction, Eddgie - 1/02/2008
[264] EBI Comparisons, Eddgie - 1/09/2018
[265] How to understand an MTF chart..., Eddgie - 28/02/2011
[266] Moonlite vs. Featherlight vs. Baader vs etc., etc., Eddgie - 23/08/2022
[267] diagonal prism vs mirror, Eddgie - 06/01/2023
[268] Star Test on Takahashi FC-100DZ, Eddgie - 27/01/2023
[269] Diffraction Limited, Eddgie - 3/09/2024
[270] Optical Glass, Edmund Optics
[271] Telecentric Lenses, Edmund Optics
[272] Anti-Reflection (AR) Coatings, Edmund Optics
[273] Metallic Mirror Coatings, Edmund Optics
[274] Rapport de Strehl et irrégularité des asphères, Edmund Optics
[275] Prism Tunnel Diagrams, Edmund Optics
[276] Metallic Mirror Coatings, Edmund Optics
[277] Metallic Mirror Coatings, Edward Jones - Chiefspeigler
[278] Binoviewer vs. binocular telescope, EdZ (Ed Zarenski) - 12/01/2004
[279] Binoviewer vs. binocular telescope, EdZ (Ed Zarenski) - 2/08/2004
[280] Binocular Vision Summation, EdZ (Ed Zarenski) - 16/04/2006
[281] What does the 'Visibility Index' tell you?, EdZ (Ed Zarenski) - 03/01/2007
[282] Mirror vs Prism Diagonal, EdZ (Ed Zarenski) - 16/02/2012
[283] ED glass in binoculars, EdZ (Ed Zarenski) - 1/07/2009
[284] Divergent/Convergent Binocular Test Wanted, EdZ (Ed Zarenski) - 31/03/2004
[285] Attack of the dust donuts, Emily Lakdawalla - 20/03/2009
[286] ST-4, ASCOM Pulse Guiding and PEC, EQMOD
[287] Manipulations sur les coacervats, ENS Lyon
[288] TMB Super Monos, Eric Jamison - 16/05/2005
[289] Contrôle de quelques miroirs industriels, Eric Royer - 16/07/2021
[290] Measured aberration spots for some eyepieces, Ernest Maratovich AstroTalks - 09/01/2016
[291] Barlow and AFOV, Ernest Maratovich - 03/05/2017
[292] Eye pupil size, exit pupil size, and SAEP, Ernest Maratovich - 02/09/2024
[293] Kasai Linear Binoviewer Review, Erwin Matys - 2021
[294] Charts for limiting magnitude estimation, Erwin Matys
[295] Advanced Telescope Making Techniques, Vol 1, Optics - Choice of Focal Ratios, Edgar Everhart

[296] Diffraction Patterns, The Astronomical Journal, Edgar Everhart - 11/02/1959
[297] Les distances en cosmologie, Fabrice Lamareille - 29/06/2007
[298] Quelles sont les principales différences entre une déconvolution de Wiener et la déconvolution de Richardson-Lucy ?, Fabrice Pautot - 2021
[299] Interférence à N ondes, Femto Physique - 05/2021
[300] Why does light slow down in water?, Fermilab - 2020
[301] Why does light bend when it enters glass?, Fermilab - 2020
[302] Lowering the Threshold, W.D. Ferris - 2005
[303] How to Evaluate Camera Sensitivity, FLIR Machine Vision White Papers
[304] La règle du 500 : comment photographier un ciel étoilé, Francis Gagnon - 17/06/2013
[305] What determines undersampling or oversampling?, Franck alias freestar8n - 11/03/2019
[306] Nyquist Sampling Theory - Empirical research – Double star – High resolution, Franck alias freestar8n - 12/09/2019
[307] Seeking FWHM/HFR - what can you acheive?, freestar8n - 24/12/2016
[308] Determining Polar Axis Alignment Accuracy, Franck Barrett - 09/21/2016
[309] Test miroir primaire, Franck Grière - 14/10/2021
[310] Construction d'un spectrographe à protubérances, François Costard - L'Astronomie / Commision des Instruments - 06/1985
[311] AZEQ6 - Imprecision pointage, Fred_76 - 13/08/2022
[312] Les DOFs, Fred_76 - 21/01/2021
[313] Nouveaux capteurs : ne faites plus de dark, Frédéric Tapissier - 11/01/2024
[314] Diagonals; Prisms vs. Mirrors, Gary Hand - 12/05/2005
[315] No-Tools Telescope Collimation, Gary Seronik - 21/04/2014
[316] Should i wear eyeglasses while observing?, Gary Seronik - 19/07/2006
[317] Reflector mysteries, Gary Strumolo - 20/06/2023
[318] CCD vs. CMOS, Gatan
[319] Night Vision Phone Photography, Gavin Orpin - 02/06/2018
[320] A better formula for telescopic limiting magnitude, Gerald North - British Astronomical Association - 1997
[321] Kommentar zum Test APM ED152 NR.143, Gerd Düring - 18/04/2016
[322] Delta T, Gilbert Javaux
[323] Les filtres colorés pour l'observation et la photographie planétaire, Gilbert Javaux
[324] Center Spotting Techniques, Glenn Le Drew - 28/08/2013
[325] Magnitude and Surface Brightness, Glenn Le Drew - 17/01/2016
[326] DSO object visibility chart, Glenn Le Drew - 29/09/2016
[327] Critical size for detection of DSO, Glenn Le Drew - 18/04/2006
[328] King's polar drift method
[329] Critical Focus Zone - Traditional Goldastro - 2016
[330] Stripping the Aluminum Coating from a Telescope Mirror, Gordon Waite - 2014
[331] Star sizes refractors versus reflectors, Greg Bradley - 1/06/2015
[332] Designing & Building the 24 inch f/4 ultra light Dobsonian Telescope, Greg Babcock - 1999
[333] How many stars are in the sky?, Nasa
[334] Polynomial expression for DELTA T ?, Nasa
[335] Imagerie Planétaire HR Lunettes versus Télescopes, Guillaume Blanchard - 11/2021
[336] Absorption spectrale du rayonnement solaire, GUIDEnR - 25/07/2020
[337] Transformée en ondelettes, Gwyddion - 23/07/2021

[338] The great Unknown, Harlod R. Suiter - 2001 - page 273
[339] Focuser Motion Related to Defocusing Aberration, Harlod R. Suiter - 2001 - page 84
[340] Telescopes Are Filters, Harlod R. Suiter - 2001 - page 39
[341] The Strehl Ratio & What It Means, Harlod R. Suiter
[342] The Myth Of Glass Flow, Henry Halem - 2005
[343] Ultraviolet light exposure and its penetrance through the eye in a porcine model, Hideki Fukuoka - 2/02/2023
[344] Dobsonian with annoyingly good bearings, Hilmi Al-Kindy - 21/08/2024
[345] Distortion and globe effect in binoculars, Holger Merlitz - 11/2014
[346] Catalogue Lichtenknecker, Holger Merlitz
[347] Night Vision Technologies Handbook, Space and Naval Warfare Systems Center Atlantic - 10/2013
[348] JPL Horizons, Ryan S. Park
[349] Glass Cross Reference Index, Hoya Group Optics Division
[350] To Wear or Not to Wear Glasses?, Howard L. Cohen - AAC Newsletter FirstLight - 10/2006
[351] The Influence of Magnification on Resolving Power of Telescopic Systems for Foucault Test Objects of Different Inherent Contrast, Howard S. Coleman - Journal of the Optical Society of America Vol 39 - Issue 9 - 1949
[352] Photometric Systems, Units, and Zeropoints, HST User Documentation
[353] Mon appareil photo a-t-il un capteur à ISO invariant ? Comment savoir ? Qu'est ce que ça implique ?, Hugo Fortier - 2019
[354] Optical Interferometry Part 1: Introduction & ZYGO GPI layout, Huygens Optics - 9/2023
[355] Meniscus Lenses, Hyperphysics
[356] Everything about refractors : Their Objective Lenses, Ian Morisson
[357] Rich Field Telescopes And Wide Field Observing, Ian Morisson
[358] How to Find the Best ISO for Astrophotography: Dynamic Range and Noise, Ian Norman - 22/03/2017
[359] Your best/favourite EP?, IB20
[360] Caméras SPAD : technologie avancée pour la détection de photons, Imasolia - 2020
[361] Celestron EdgeHD back focus tolerance, Innovations Foresight
[362] How much guiding error is too much?, Innovations Foresight
[363] La compartimentation de protéines et de l'ADN, Inra Bordeaux - 23/10/2017
[364] Fungus: how to prevent growth and remove it from optical components, Ismael Cordero - 2013
[365] Predicting Binocular Visual Field Sensitivity from Monocular Visual Field Results, Jacqueline M. Nelson-Quigg - 07/2000
[366] Working with Magnitudes and Color Indices, James Battat - 12/05/2005
[367] Concise thread about autocollimators, Jason D alias Jason Khadder - 1/01/2010
[368] Laser collimation not all its cracked up to be..., Jason D alias Jason Khadder - 24/02/2012
[369] Cool It! - Experiments in cooling my 10 inch mirror, Jason D alias Jason Khadder - 26/01/2010
[370] Effect of mis-placed center spot on autocollimator?, Jason D alias Jason Khadder - 16/08/2017
[371] Disappointing Collimation with Catseye Infinity XLKP, Jason D alias Jason Khadder - 28/03/2017
[372] Disappointing Collimation with Catseye Infinity XLKP, Jason D alias Jason Khadder - 26/02/2017
[373] Secondary Sizing, Jason D alias Jason Khadder - 16/03/2013
[374] Autocollimator vs. Barlowed Laser Accuracy?, Jason D alias Jason Khadder - 29/04/2009
[375] Useful info about secondary mirror alignment, Jason D alias Jason Khadder - 8/04/2019
[376] Fully Illuminated Field: Please enlighten me, Jason D alias Jason Khadder - 15/04/2011
[377] My Howie Glatter Laser Collimator Experience, Jason D alias Jason Khadder - 13/03/2009
[378] New idea to improve the autocollimator (AC) tool, Jason D alias Jason Khadder - 26/04/2009

[379] Question on Secondary Mirror Positioning, Jason D alias Jason Khadder - 20/01/2018
[380] Effect of mis-placed center spot on autocollimator?, Jason D alias Jason Khadder - 19/07/2017
[381] Catseye–Triangle, Hotspot, Red or White?, Jason D alias Jason Khadder - 29/08/2015
[382] Dark-adapted pupil diameter as a function of age measured with the NeurOptics pupillometer, Jay Bradley - J. Refract Surg - 27/03/2011
[383] Recommendations for Beginning Amateur Astronomers - Aperture Wins !, Jay Freeman - 2009
[384] Focal Ratio, JCB - 4/02/2017
[385] Telecentric barlow questions, Jeff Struve - 27/04/2018
[386] Test de Hartmann au moyen d'une camera CCD ou d'un APN, Jean Dijon
[387] La vision dans les instruments astronomique et l'observation physique des surfaces planétaires, Jean Dragesco (L'Astronomie Vol 83) - 1969
[388] Les changements climato-environnementaux de l'Holocène ancien et la néolithisation du bassin méditerranéen, Jean-François Berger
[389] Materiel H alpha, Jean-Francois Roudier - 06/2018
[390] L'observation du Soleil - Matériel / Configurations, Jean-François Roudier - 2022
[391] Mak lequel?, Jean-Luc D'Auvergne - 30/07/2019
[392] Rapport de Strehl corrigé ?, Jean-Luc D'Auvergne - 20/08/2012
[393] Mesurez votre optique facilement, Jean-Luc D'Auvergne - 5/10/2012
[394] Astronomical Algorithms, Jean Meeus - 31/12/1998
[395] Jumelles et prismes à correction de phase, Jean-Pierre Liegeois - 30/12/2017
[396] La construction du télescope d'amateur, Jean Texereau
[397] La Turbulence atmosphérique - chap 15, Jean Texereau
[398] Réalisation d'un grand miroir - chap 2, Jean Texereau
[399] Construction du télescope d'amateur, Jean Texereau
[400] La dispersion atmosphérique, Jean-Pierre Prost - 2020
[401] Planetary Imaging, Processing, and stacking Forum, Jerzy Tagiewka - 29/07/2023
[402] Collimation instructions for APM APO-Bino 100-45°/90°, Joerg Kneip - 19/08/2015
[403] Apodizing Screen Design Charts Optimized for Planetary Contrast, John Gibb - 01/2015
[404] Lacerta 2" Solar Wedge & Bresser 127L, Johninderby (StargazerLounge) - 25/07/2017
[405] Considering filter thickness when calculating backfocus, John Hayes alias jhayes_tucson (CN) - 25/07/2017
[406] etendue calculator, John Hayes alias jhayes_tucson (CN) - 8/05/2019
[407] the Flex Rocker, John Sherman - 2011
[408] Astropriorat Observatory, Joan Genebriera - 26/05/2020
[409] Digital noise: What is it ?, Jonathan Rista - 17/12/2013
[410] Why does CMOS read and quantisation noise *decrease* with gain?, Jonathan Rista - 29/12/2016
[411] Trying to understand why stars are bloating, Jonathan Rista - 28/02/2019
[412] Am I understanding the whole "swamp read noise" thing correctly for a CMOS?, Jonathan Rista - 10/01/2020
[413] Comparing refractors to Newtonians to Catadioptric scopes - Curiosity, Jon Isaacs - 7/03/2018
[414] Best magnification for stargazing?, Jon Isaacs - 25/06/2020
[415] Field curvature of a small APO for visual use, Jon Isaacs - 30/08/2016
[416] Focus on infinity during daytime?, Jon Isaacs - 15/04/2013
[417] What is the difference between FK-61 and FPL-53?, Jon Isaacs - 27/04/2020
[418] 80mm FK-61 vs. Achro, Jon Isaacs - 18/11/2019
[419] Telescope common aperture size comparison chart, Jon Isaacs - 10/01/2019

[420] Coma, eyepiece field stop, and the relative value of a coma corrector?, Jon Isaacs - 15/07/2021
[421] Collimation is about to make me dump both my Dobs, Jon Isaacs - 19/02/2012
[422] What would the Strehl Ratio of the lens in my eyeball be?, Jon Isaacs - 04/02/2022
[423] What's the widest TFOV eyepiece that you actually use?, Jon Isaacs - 13/09/2020
[424] Sidgwick vs. Conrady...who has it right?, Jon Isaacs - 17/06/2011
[425] Pan 27 vs. APM 30mm UFF, Jon Isaacs - 8/11/2020
[426] What is the Best Planetary Telescope, Jon Isaacs - 19/03/2005
[427] Barlow lens: apo vs achro?, Jon Isaacs - 30/06/2013
[428] Magnification vs. Exit Pupil, Jon Isaacs - 01/06/2024
[429] Telescope common aperture size comparison chart, Jon Isaacs - 10/01/2019
[430] / Back focus–a definition, Jon Isaacs - 23/04/2017
[431] A comment from Burnham - Perseus/NGC869-NGC884, Jon Isaacs - 16/07/2024
[432] Mirror scratch and image affects?, Jon Isaacs - 9/04/2018
[433] F ratios for Planets, Jon Isaacs - 21/12/2024
[434] Well Depth, Pixel Size, and Quantum Efficiency, JonMinnick
[435] On the Prediction of Visibility for Deep-Sky Objects, Jose Ramon Torres Lapsio - 13/02/2000
[436] Mesopic Contrast Measured With a Computational Model Of the Retina, Justine Decuypere - Université de Mons-Hainaut
[437] UV radiation and the Eye, Karen Walsh - 2009
[438] Dispositif binoculaire droit ELS, Kasai Trading - 2018
[439] Field Rotation and Alt-Azimuth Mounted Telescopes, Kelly Flanagan - 28/03/2018
[440] Myths of Conditional Alignment, Kevin Busarow (Oberwerk) - 1/11/2016
[441] Collimation - Jumelles, Knives and tools
[442] AtmosFringe - help needed, Karel alias KpS (CN) - 5/07/2017
[443] Can not sufficiently swamp read noise w/3nm Astrodons, ks___observer - 19/07/2018
[444] Read Noise and Dynamic Range for a Newbie, ks___observer - 24/05/2019
[445] Explain the Sips, Kunama - 29/08/2021
[446] Dirty lens article, Kurtmunger - May 2009
[447] Basics of Shortwave Radio Propagation, KW2P - 11/07/2023
[448] What's wrong with FCD100 and FDL55?, Larry alias LMO - 09/07/2021
[449] Un Maksutov : le TEC MC200 F15.5M, Laurent -
[450] Performances instrumentales Analyse multi-critères, Laurent - 9/2023
[451] Soleye Telescope, Laszlo Francsics
[452] Performances instrumentales - Analyse multi-critères, Laurent -
[453] Quels critères pour une bonne optique?, Lightwhite - 2020
[454] La Candela, LNE = Laboratoire National de Métrologie et d'Essais - 2023
[455] Image numérique astronomique, Louis Joly
[456] Capture des images de calibration, Louis Joly
[457] Astrophotographie et rotation de champ, Louis Joly
[458] Images planétaires HD : traitement par ondelettes ou par déconvolution, choix possible ? Lucien (Astrosurface)-20/08/2019
[459] Images planétaires HD : traitement par ondelettes ou par déconvolution, choix possible ? Lucien (Astrosurface)-20/08/2019
[460] Understanding Dynamic Range, Lumenera Corp.

[461] Lunt Solar Safety, Lunt Corp.
[462] Star Tests and Inside vs. Outside focus luxo II - 23/03/2021
[463] High resolution Solar imaging. What refractor size? Martin Wise alias Malveaux - 4/05/2018
[464] High resolution Solar imaging. What refractor size? Martin Wise alias Malveaux - 9/05/2018
[465] Lacerta herschel prism 2" or 1,25" Martin Wise alias Malveaux - 20/03/2022
[466] Using a 1.25 Herschel wedge on a 152mm refractor Martin Wise alias Malveaux - 29/03/2023
[467] Baader Astrosolar film question/problem Martin Wise alias Malveaux - 1/03/2020
[468] Baader Astrosolar film question/problem Martin Wise alias Malveaux - 29/02/2020
[469] Baader Triband-SCT for Sun and Deep Sky Martin Wise alias Malveaux - 7/06/2023
[470] Space weather impact on radio communication and navigation, Mamoru Ishii -26/07/2024
[471] Faire un PEC, Mantrabrain
[472] Real PSF deconvolution on Planetary Images Marco Lorenzi - 15/12/2023
[473] Quartz Glass from China Mark Cowan - 7/08/2017
[474] The Ronchi Test – What it Measures and how Sensitive is It? Mark Cowan - 6/03/2016
[475] The new APM 140 mm F/7 douplet FPL-53 arrived Mark Ludes - 14/10/2015
[476] Experimenting calcium imaging with small refractors Mark Townley - 21/09/2018
[477] How Gear Ratios Work, Marshall Brain (How Stuff Works) - 30/04/2023
[478] , Marsyas - 17/08/2024
[479] Tuning the Backlash on a Skywatcher HEQ5 Pro Mount Martin's Astrophotography - 2020
[480] Skywatcher HEQ5 Stripdown and Rebuild Martin's Astrophotography - 2020
[481] Lunt Herschel wedge questions Martin Wise - 29/12/2022
[482] The Orion SkyQuest XT6 Classic Dobsonian Telescope: How Good Is It? Marthew Wedel - 27/07/2017
[483] My method for the control of the boundary layer Mauro Da Lio - 30/08/2009
[484] La cella di un grande dobson Mauro Da Lio - 02/2010
[485] Supporti laterali Mauro Da Lio - 02/2010
[486] Diagonal Off-Axis Illumination Calculator Mel Bartels
[487] Strehl, RMS and Peak-Valley Calculator, Mel Bartels
[488] Aperture implications, Mel Bartels
[489] 6000X, Mel Bartels - 28/08/1997
[490] Newtonian Telescope Designer by Mel Bartels, Mel Bartels
[491] Newtonian Diagonal Analysis, Mel Bartels
[492] Another interpretation of the data from Blackwell, Mel Bartels
[493] The Joy of Mirror Making: Parabolizing, Mel Bartels
[494] Ronchi Test Calculator, Mel Bartels
[495] Coma corrector (calculator), Mel Bartels
[496] The 1974 Telescope Secondary Experiment, Mel Bartels
[497] Star B-V color index to apparent RGB color, Mel Hosseiny
[498] Brightness induction, Michael Bach - 21/07/2020
[499] Astrophotography Memes, Michael W. Dean - 14/02/2024
[500] iStar 127 mm (5") R30 F/12 Doublet Refractor Review, Michael R. Nofi
[501] A Brief Guide to Hand Lenses, Michael Joseph Skvarla - 5/09/2017
[502] Attaching a Cooling Fan to a Newtonian Telescope, Michael Vlasov
[503] Observation solaire - Qualité de protection oculaire, Michel Willemin - 23/10/2000
[504] Natural Night Sky Brightness during Solar Minimum, Miguel R. Alarcon - 22/06/2021

[505] Refractive Index Info, Mikhail Polyanskiy - 2018
[506] Vintage Takahashi FC-100 F8 vs FC-100DF, Mike (MikeDnight) - 19/04/2021
[507] Central Obstruction/MTF question, Mike I. Jones - 15/09/2008
[508] Thermal Modeling and Athermalization in Telescope Optical Design, Mike I. Jones - 9/12/2014
[509] A modern guide to mirror support, Mike Lockwood - 2016
[510] Four Lessons in Mirror Testing, Mike Lockwood - 2014
[511] Mirror substrate material, Mike Lockwood - 11/07/2017
[512] Why aren't my stars round ?, Mike Lockwood - 2016
[513] Borosillicate glass (Pyrex) vs Quartz (SiO2), Mike Lockwood - 28/05/2015
[514] Table of Secondary Mirror Sizes for Visual Newtonian Telescopes, Mike Lockwood - 2019
[515] LOC - Faq, Mike Lockwood
[516] First light on a 20" Ostahowski/Teeter, Mike Lockwood - 24/10/2018
[517] SIPS Setup and Facts, Mike Lockwood
[518] Adventures in Nightvision, Mike Lockwood - 12/10/2017
[519] Elliptical Flats : Facts, Tests, and Recommendations, Mike Lockwood
[520] Secondary Mirror Obstruction?, Mike Lockwood - 08/07/2019
[521] Secondary Mirror Advice for Starmaster, Mike Lockwood - 29/08/2022
[522] 20" f/3.0 mirror cell mods and support point experiments, Mike Lockwood - 11/09/2016
[523] An example of deceptive interferometryDo interferometers lie?, Mike Lockwood - 16/01/2011
[524] Premium mirrors, glass material and thermal effects., Mike Lockwood - 16/05/2015
[525] Question- fast big dobs, Mike Lockwood - 17/09/2023
[526] SIPS Setup and Facts, Mike Lockwood - 2016
[527] Real VISUAL performance on really fast (F4 or F3.6) Dobsonians ?, Mike Lockwood - 16/04/2023
[528] Cassegrain Formulas and Tips, Mike Lockwood - 2006
[529] Premium mirrors, glass material and thermal effects., Mike Lockwood - 16/05/2015
[530] 12" vs 16" for planets - seeing is the limit?, Mike Lockwood - 14/06/2024
[531] Real VISUAL performance on really fast (F4 or F3.6) Dobsonians ?, Mike Lockwood - 16/04/2023
[532] F ratios for Planets, Mike Lockwood - 01/01/2024
[533] To offset or not offset your secondary, Mike Zammit
[534] Miroir Parabolique, Franck Grière
[535] Fluorite vs. FPL53, Mladen (MKV) - 4/02/2020
[536] Matching Ronchi Screen LPI to Focal Ratio, Mladen (MKV) - 8/03/2019
[537] R25 achromat, Myriam alias Lyl - 10/01/2019
[538] Peut-on encore être accro aux achros ?, Myriam alias Lyl - 3/07/2018
[539] Strehl....? Entre 0.95 et 0.98, Myriam alias Lyl - 04/03/2020
[540] Question verre ED/ crown? flint?, Myriam alias Lyl - 15/04/2019
[541] Measurement Methods, Nauris
[542] The War on Truth: The Triumph of Newtonianism, Neil English
[543] The Availability of Pyrex and Pyrex Blanks, Newport Glass Works, Ltd.
[544] Qu'est-ce que Nombre de Rayleigh?, Nick Connor - 14/10/2019
[545] Simulate you own mask diffraction pattern, Niels Noordhoek - 18/09/2019
[546] Some Collimation Myths and Misunderstandings, Nils Olof Carlin - 27/03/2015
[547] FAQ about Collimating a Newtonian telescope, Nils Olof Carlin - 06/2005
[548] barlowed laser problem.., Nils Olof Carlin - 27/11/2013

[549] The Autocollimator (AC) and its reflections, Nils Olof Carlin - 07/2010
[550] Another interpretation of the data from Blackwell, H R (1946), Nils Olof Carlin - 07/1997
[551] Refocusing to compensate for nearsightedness?, Nils Olof Carlin - 06/07/2015
[552] Common star collimation mistake, Nils Olof Carlin - 10/03/2015
[553] The Autocollimator (AC) and its reflections , Nils Olof Carlin - 1/07/2010
[554] Transmittance of glasses comparison, NIST
[555] Choix d'instrument pour l'observation solaire, Norma - 18/02/2020
[556] Conférence Introduction à l'observation solaire - Norma, La Chaine Astro - cdlc48 - 2019
[557] Comprendre (enfin!) le RELIEF LUNAIRE... (par Norma), La Chaine Astro - cdlc48 - 2022
[558] Understanding Image Intensified (I2) Night Vision, Night Vision Specialists
[559] The Pogson Platform - a truss focuser, Oberon - 23/10/2016
[560] Le décalage spectral pour mesurer les distances des galaxies, François Hammer - Observatoire de Paris
[561] soleil et Héliosphère, Observatoire de Paris
[562] Caractérisation de la turbulence atmosphérique, Victorien Merlé - Observatoire de la Côte d'Azure - 2013
[563] S-FPL53, Ohara
[564] calcul dynamique réele d'un capteur, Olivdeso alias Olivier Désormière - 24/04/2018
[565] Echantillonnage, Olivdeso alias Olivier Désormière - 25/05/2018
[566] ASI294MC PRO Pb buée éventuel, Olivdeso alias Olivier Désormière - 25/05/2018
[567] Collimation sur une étoile...comment procéder ?, Olivdeso alias Olivier Désormière - 18/08/2021
[568] Quelle perte de luminosité dans les lunettes et les telescopes, oliver55 - 22/09/2018
[569] Quantification de la composante sphérique de la réfraction, Oliver Touzeau - 1/04/2014
[570] La myopie nocturne, Opticiens Par Conviction
[571] https://www.opto-e.com/en/basics/image-quality, Opto Engineering
[572] CCD Signal to Noise Ratio, Oxford Instruments
[573] Comparing Different Civilizational Scales, Owen Lewis - 19/05/2020
[574] About the focal ratio of apochromatic lenses, Pal Gyulai
[575] Retour fonctionnement Nexus DSC, Pat Webastro 11/05/2023
[576] Sensibilité au contraste Perception spatiale et temporelle, Patrick Ferrand - Université Aix Marseilles - 5/12/2016
[577] Triplet Apo gone dead..., Pablito - 21/05/2014
[578] Les critères, Patrick Lequèvre - 21/08/2013
[579] Les défauts des optiques, Patrick Lequèvre - 21/08/2013
[580] Caractérisation de la turbulence atmosphérique, Paul Verdier 2014
[581] Optical Performance of The Refractor, Peak2Valley Instruments
[582] Today's SUN (20210331) | Lacerta 2" Herschel Wedge, Pedro Ré - 31/03/2021
[583] Newton Rings, Paul (Peeluba) - 08/10/2019
[584] Learning DPAC with Tak, LZOS, TEC, CFF + equipment, Paul (Peeluba) - 30/10/2020
[585] Ronchi and autocollimation "dual pass" explained, Paul (Peeluba) - 4/01/2024
[586] Optical Quality in Telescopes, Peter Ceravolo - 03/1992
[587] Measuring Optical Quality, Peter Karboulonis - Opticstar - 25/05/2018
[588] Cleaner Stars - How to install an aperture mask on your Newtonian, Phil Brewer - 07/04/2019
[589] Télescope Newton Courts, Philippe Morel (SAF) - 08/04/2008
[590] L'astrotest M27, Philippe Morel (SAF) - 03/08/2005
[591] Mise en station plateforme équatoriale, Pierre Desvaux - 9/11/2013
[592] Un grand télescope démontable, Pierre Desvaux - 2018

[593] Le télescope strock-250, Pierre Strock - 15/12/2006
[594] Le grand problème de l'équilibre du tube, Pierre Strock - 15/12/2006
[595] Quantité de lumière qui arrive sur 1 pixel?, Pierre Strock - 30/04/2022
[596] La photométrie pour amateur, Pierre Strock - 2017
[597] Comparatif Purosol contre les autres produits nettoyant, Pierro Astro
[598] Fiche de collimation, Pierro Astro
[599] I can easily hold a 20×80 binocular by hand for my observations of the night sky, Pinac
[600] Why I swapped a Takahashi for a Skywatcher. . .., Pop Topper, 5/04/2023
[601] Traitement par PSF, Pyrophorus - 2/10/2021
[602] La qualité du ciel, Jean-Pierre Maratrey - 01/2012
[603] Taille de miroir amateur, Quasar95
[604] La chronique du vivant : l'oxygène, Radio France - 9/12/2020
[605] Collimation of Binoculars with a Lamp, and a Screen, Rafael Chamón Cobos - 01/2013
[606] Was ist ein visueller Apochromat?, Ralf Mündlein - Astro theke
[607] EYE SAFETY DURING SOLAR ECLIPSES, B. Ralph Chou - NASA - 04/1997
[608] Transit of Venus 2012: Eye Safety, Ralf Chou - Royal Astronomical Society Of Canada (RASC) - 04/03/2012
[609] 22" f/4.0 lowrider, Rafael Reiner Volgel
[610] Equatorial platform, Rafael Reiner Volgel
[611] Equatorial platform, Remi Petit Demange - 27/03/2015
[612] The Origin of the Refractive Index, Richard Feyman - The Feynman Lectures on Physics - 1963
[613] Know your lens fungus, Richard Kinch - 04/2019
[614] Under and Over Sampling, Rick J - 19/03/2016
[615] Contrast Thresholds of the Human Eye, Richard H. Blackwell - 12/08/1946
[616] Mirror Edge Support Calculator, Robert Houdart (Cruxis)
[617] Glass Selection and Lens Designs, Doris Robert May
[618] Rich Field Telescopes, Robert Martinayers
[619] A Better Method of Measuring Optical Performance, Robert F. Royce
[620] Calculating the size of your diagonal, Robert F. Royce
[621] D.A.R.V (Drift Alignment by Robert Vice), Robert Vice - 6/01/2013
[622] SN Stats 2021, Rochester Astronomy - 2021
[623] How to really make a decent Refractor, Roger Ceragioli - 2021
[624] Magnification and Detecting Detail in Astronomical Objects, Rodger N. Clark - 9/04/2002
[625] Notes on the Resolution and Other Details of the Human Eye, Rodger N. Clark - 28/12/2018
[626] Takahashi FC-100DZ Review, Roger Vine
[627] Takahashi FS-102 Review, Roger Vine
[628] Takahashi FS-102 Review, Roger Vine
[629] What is an APO?, Roger Vine - 25/02/2010
[630] Color Correction in Refractors, Roland Christen
[631] More on Color Correction, Roland Christen
[632] Mark V Binocular Viewer from Baader Planetarium, Roland Christen
[633] Musings on APOs, Roland Christen
[634] Achro, Semiapo, ED, Fluorite, etc., Roland Christen - 15/11/2011
[635] SCT, 1/4 wave & 33% obstruction, Roland Christen (Razzmatazz) - 17/05/1999
[636] Care Of Your Astro-physics Refractor, Roland Christen - 9/04/2014

[637] Mounts, Roland Christen - 2023
[638] PulseGuide, Roland Christen (Ray Gralak) - 2018
[639] More on Color Correction, Roland Christen - 04/2006
[640] Notes on Star Testing Refractors, Roland Christen
[641] 2inch vs. 1.25inch Dielectric Star Diagonals, Roland Christen
[642] Reflection & Refraction of Light Tutorial, Rocky Mountain Instrument Co - 2014
[643] La "seconde intercalaire" va être abandonnée dans la mesure du temps, RTS Radio Télévision Suisse - 29/11/2023
[644] Mesure de la réfractivité atmosphérique par radar météorologique : comparaison avec un réseau de capteurs au sol, Ruben Hallali (URSI France) - 24/03/2015
[645] Skywatcher HEQ5 Rowan Belt Modification, Ruzeen Farsad - 2020
[646] Easy Two-Photon Image Scanning Microscopy with SPAD Array and Blind Image Reconstruction, Sami Koho - 02/2019
[647] Takahashi Starbase 80 ...Anyone have one?, Sany alias SandyHouTex - 28/09/2019
[648] Variation de la focale d'un Schmidt Cassegrain avec la mise au point, Michel Vampouille
[649] Amateur Astronomer's Handbook - Aberrations, J. B. Sidgwick - 1981 - page 79
[650] Amateur Astronomer's Handbook - Aberrations, J. B. Sidgwick - 1981 - page 71
[651] Théorie sur la rotation de champ, Sébastien Leboutte - 2021
[652] Supernovae observed in the Milky Way, Hartmut Frommert
[653] Les correcteurs de champ, Serge Bertorello
[654] Pourquoi mettre en station un instrument équatorial?, Serge Bertorello
[655] Les aberrations, Serge Bertorello
[656] Grossissement et grandissement, Serge Bertorello
[657] A new look at the Bezold–Brücke hue shift in the peripheral retina, Sheila MImhoff - Department of Psychology, Colorado State University, Ft. Collins, CO 80523-1876, USA - 12/02/2003
[658] StarEx, Shelyak
[659] Am I crazy, or can I see some things better in my binos than my large reflector?, Shneor - 10/06/2018
[660] Mechanical and thermal properties of optical glass, Schott - 10/2018
[661] FPL-53/FCD-100 Doublet vs FPL-51/FCD-1 Triplet, Simoes Pedro - 25/03/2021
[662] Master Eyepiece Focus Distance Chart, Sixela alias Alexis Cousein - 15/11/2011
[663] Real life experiment with fan configurations..., Sixela alias Alexis Cousein - 17/10/2010
[664] Collimation : avant de toucher quoi que ce soit, Sixela alias Alexis Cousein - 6/02/2017
[665] Feathertouch and Paracorr 2 any experiences ?, Sixela alias Alexis Cousein - 16/02/2011
[666] Rectilinear and Angular Magnification Distortion, Sixela alias Alexis Cousein - 12/05/2007
[667] Utilitaire SIRILIC, m27trognondepomme - 12/05/2019
[668] Chaleur naturelle, Sodielec
[669] How To Avoid The Agony When Buying Your First Telescope, Soggy Astronomer - 9/04/2013
[670] PRODUCT DATA of Calcium Fluoride, Spacematdb - 27/05/2017
[671] ISO Invariance Explained, Spencer Cox - 27/05/2017
[672] Mach1 DEC Oscillations – Our Experience, Stelios - 22/06/2018
[673] Re-collimating a Binocular, Steve Tonkin
[674] Rate Your Skyglow, Tony Flanders Sky&Telescope - 5/12/2008
[675] How to Successfully Beat Atmospheric Seeing, Alan MacRobert Sky&Telescope - 14/08/2006
[676] Guiding a Telescope for Imaging Like a Pro, Rark J. Coco Sky&Telescope - 8/08/2006
[677] Seeing vs. Transparency: What's the Difference ?, Richard S. Wright Jr. Sky&Telescope - 11/12/2017
[678] Offsetting your secondary mirror, Nils Olof Carlin Sky&Telescope - 17/07/2006

[679] SIPS instructions for installation and use, Starlight Instruments
[680] CCD f-ratio Myth, Stan Moore - 2005
[681] Detail Recovery through Spatially Variant Distortion Correction, StarTools - 2022
[682] Objectifs adéquats pour une vision industrielle de haute précision, Stemmer Imaging
[683] Lecture 10 – Binocular Summation, Steinman
[684] Le ciel profond en Lucky Imaging - avec Stéphane Gonzales, Stephane Gonzales (Vlog Astrofleet) - 2022
[685] Apparent field curvature, Steve Hoes - 7/05/2017
[686] Pan 27 vs. APM 30mm UFF, Tamiji Homma - 8/11/2020
[687] About Takahashi Seisakusho, Takahashi America
[688] A documentary by the manufacturer Takahashi, Takahashi Japan
[689] Manual FC-100 DZ, Takahashi Japan p 22
[690] Telescope central obstruction : size criteria, Telescope Optics - Vladimir Sacek
[691] The effect of aperture obstruction, Telescope Optics - Vladimir Sacek
[692] Semi-APO and APO Examples, Vladimir Sacek
[693] Refractive Telescope Objective: Achromats, Vladimir Sacek
[694] Star testing telescope quality, Vladimir Sacek
[695] Focal extenders and reducers, Vladimir Sacek
[696] Schmidt-Cassegrain off-axis aberrations, Vladimir Sacek
[697] Refracting telescope objective semi-APO and APO, Vladimir Sacek
[698] Semi-apo and apo lens objective examples, Vladimir Sacek
[699] Eyepiece Aberrations II : Eyepiece distortion, Vladimir Sacek
[700] Telescope eyepieces: comparative raytracing, Vladimir Sacek
[701] Paracorr Type-2 Instructions, Tele Vue - 2010
[702] Choosing Eyepieces (Basic), Tele Vue
[703] Eyepiece Distortion, Tele Vue
[704] Powermates, Tele Vue
[705] Paracorr, Tele Vue
[706] Choosing an Eyepiece - Step by Step, Tele Vue - 2014
[707] Pacacorr Type-2 Instructions, Tele Vue - 2010
[708] Tele Vue Eyepiece Specifications, Tele Vue - 2021
[709] About Al Nagler, Tele Vue - 01/04/2013
[710] Tele Vue APO Design and Build "Secrets", Tele Vue - 08/08/2019
[711] Paracorr-Newtonian for Visual and Imaging to f/3!, Tele Vue - 25/06/2021
[712] Clyde Bone and His Two Unusual Mersenne Telescopes!, Tele Vue - 11/08/2019
[713] Pixel Peeping , Tele Vue - 16/08/2023
[714] Paracorr II Instruction, Tele Vue
[715] Superpoli, Terence Pelletier
[716] Interferometry - The Myth Buster, Terry Ostahowski
[717] Primary Optics, Terry Ostahowski - 2006
[718] It looks like tonight I will get first light on my 24" f/3.3 Ostahowski/StarStructure, Terry Ostahowski - 20/07/2024
[719] Optical Coating, Terry Ostahowski
[720] , Nicholas C - Firearms Not Politics - 24/04/2020
[721] Quels sont les effets de l'obstruction ?, Thierry Legault
[722] La collimation, Thierry Legault

[723] A l'interféromètre : Takahashi TOA130, Thierry Legault - 20/06/2010
[724] Discussion sur le temps de pose unitaire, et temps de pose global, Thierry Legault - 27/02/2010
[725] Importance de la distance primaire - secondaire sur un RC ?, Thierry Legault - 13/07/2017
[726] Backfocus à ajouter pour les filtres ?, Thierry Legault - 11/03/2019
[727] Quels sont les effets de l'obstruction ?, Thierry Legault - 28/11/1996
[728] Question échantillonnage ?, Thierry Legault - 11/02/2024
[729] Sampling: What Nyquist Didn't Say, and What to Do About It, Tim Wescott - 20/01/2016
[730] Théorie : bruit de fond de ciel, Thomas Bexant - 04/2020
[731] After 0.25 century and six weeks..., Thomas Jensen - 8/12/2019
[732] Defining Apochromatism, Thomas Back - 29/06/2003
[733] The Astro-Physics 8.1" f/12 Mak-Cassegrain, Thomas Back - 6/29/2003
[734] What is a TMB? A little History., Thomas Back - 25/09/2006
[735] Thomas M Back: 1957 - 2007, Tom Trusock - 9/21/2007
[736] Grating Tutorial, Thorlabs
[737] Eucalyptus Plywood vs. Birch Plywood, Dongguan Tongli Timber Products
[738] A Guide to Neutral Density Filters, Todd Vorenkamp - 10/10/2023
[739] Newtonian scope back-focus for visual....., Tomdey - 21/11/2020
[740] Point of focus the same for everyone?, Tomdey - 5/06/2019
[741] Huge Scratch on a primary mirror, Tomdey - 2/11/2018
[742] Field Stop: Calculated vs Manufacturer?, Tomdey - 22/10/2021
[743] True Field of View, Tomdey - 07/01/2023
[744] Identifying origin of dust in Optical train. Please advise., Tomdey - 06/08/2021
[745] High Strehl Guarantees, Tomdey - 12/12/2020
[746] How I cured my aperture fever., Tomdey - 20/12/2022
[747] Truss tubing, 5/8 or 7/8 ?, Tomdey - 6/11/2020
[748] Choosing between aperture and mirror quality, Tomdey - 31/12/2018
[749] Dawe's limit being wrong, Tomdey - 14/09/2024
[750] Equatorial Platforms, Tom Osypowski
[751] Nagler Mythos. . ., Tom Trusock - 4/2004
[752] Contrast Limit Defined, Tony Flanders - 1/04/2011
[753] Echantillonnage, Pierre Toscani - 10/03/2018
[754] Verre à faible dispersion et fluorine, Pierre Toscani - 6/10/2019
[755] Point of focus the same for everyone?, Toups01 - 7/06/2019
[756] Autoguiding a Telescope for Deep-Sky Astrophotography, Trevor Jones - 2021
[757] Conversion Calculator - NELM (V) to MPSAS (B) systems
[758] Convert visual mags/arcsecond² to cd/m²
[759] AtmosFringe - help needed, Uwe Pilz - 11/08/2020
[760] Leap second list
[761] Two-mirror aplanatic telescopes with a flat field, Valery Terebizh - 02/2022
[762] Resolution: a survey, Van Den Bos
[763] Newtonian Axial Tolerances Origin, Vic Menard - 6/13/2011
[764] New perspectives on newtonian collimation, principles and procedures, 5ème édition, Vic Menard
[765] Addendum to the Fifth Edition of New Perspectives on Newtonian Collimation, Vic Menard - 2012
[766] About secondary mirror rotation and tilt, Vic Menard - 1/12/2013

[767] ....Barlowed Laser Vs Cheshire Collimator, Vic Menard - 31/03/2014
[768] Center Spotting Techniques, Vic Menard - 30/12/2017
[769] Focuser movement causing laser collimation shift, Vic Menard - 3/07/2016
[770] Centre-spotting a mirror. Tolerances?, Vic Menard - 3/03/2017
[771] Autocollimator & laser not agreeing, Vic Menard - 5/06/2021
[772] Vic Menard's Carefully Decollimated Primary, Vic Menard
[773] Collimation is about to make me dump both my Dobs, Vic Menard, 16/02/2012
[774] Center Spotting Techniques, Vic Menard, 30/12/2017
[775] Center Spotting Techniques, Vic Menard, 31/12/2017
[776] Formulas for collimation tolerances, Vic Menard, 28/08/2021
[777] Problems with Catseye XLKP collimation, Vic Menard, 7/07/2024
[778] TS Concenter adjustment eyepiece, Vic Menard, 8/03/2020
[779] TS Concenter adjustment eyepiece, Vic Menard, 9/03/2020
[780] Le SolEx V2, Vincent Duchene
[781] Collimation is about to make me dump both my Dobs, Vincent Mazet, 2020
[782] Eyepiece Abberations, Vladimir Sacek - 27/07/2019
[783] Refracting Telescope Objective: Semi-APO and APO, Vladimir Sacek - 14/07/2006
[784] Coma Optical Aberration, Vladimir Sacek - 14/07/2006
[785] Is there a way to calculate what wave a mirror is?, Vladimir Sacek - 29/10/2006
[786] 26-Takahashi FC100DZ 100mm f/8 fluorite apo doublet, Vladimir Sacek - 2006
[787] Seeing and aperture, Vladimir Sacek - 2006
[788] Guiding accuracy, Vlaiv - 31/03/2022
[789] M51 SCT at f10 vs triplet at f7.5, Vlaiv - 13/04/2022
[790] Utilisation optimale d'une binoculaire, Yann Fournereau - Astrosurf Magazine N°48 - 01/01/2011
[791] Caractérisation de la turbulence optique pour la Haute Résolution Angulaire, Wassila Dali Ali - 5/11/2013
[792] Quartz Mirror 18" F3.6, Waite Research
[793] Taking the Mystery out of the Infamous Formula, SNR=6.02N + 1.76dB, Walt Kester - 2009
[794] Measuring Optical Quality - Benchmarks, Which Telescope
[795] List of solar eclipses in the 21st century, Wikipedia
[796] Mirror vs. Dielectric vs. Prism Diagonal Comparison, William Bill Paolini alias BillP - 29/03/2014
[797] The baader bbhs-sitall silver diagonal, William Bill Paolini alias BillP - 13/02/2016
[798] Dieter Lichtenknecker und Lichtenknecker Optics, Wolfgang Paech
[799] Teleskop-Optik und Qualitätsprüfung, Wolfgang Rohr - 2017
[800] How to collimate a APM 100 Bino, Wolfgang Rohr
[801] Lumière bleue : Avantages et Inconvénients, Zeiss - 16/10/2022
[802] Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials, Zhang01 - 1993
[803] ASI 2600 MC PRO GAIN and OFFSET values, Zwo - 14/04/2021