

Convergence : Le Coronographe interférentiel achromatique ou CIA

Jean GAY

Astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), Département Fizeau.

Résumé : *Chacun sait que, depuis quelques dizaines d'années, les astronomes n'ont pas d'affaire plus pressante que d'éteindre les étoiles. Ces lointains soleils restent trop aveuglants pour qu'on parvienne à percevoir dans leur environnement proche les planètes qui les accompagnent. Chaque jour apporte la révélation de nouvelles exo-planètes par la méthode cinématique, si brillamment illustrée en 1996 par Michel Mayor et Didier Queloz de l'Observatoire de Genève, opérant à l'Observatoire de Haute Provence avec le spectrographe Elodie fourni par les astronomes marseillais. Mais savoir qu'il y a planète n'apporte pas toute la connaissance, ni la satisfaction qu'apporterait la vision directe.*

Il est d'usage de comparer la perception d'une planète comme la Terre près d'une étoile comme le Soleil, à ce qu'on peut espérer de contraste entre une luciole et le phare de la Garoupe, pour prendre des exemples familiers aux provençaux. Aussi, pour espérer voir une exoplanète, il faut *éteindre* l'étoile qui la gouverne. Le défi est gigantesque quand un calcul approché (cf. annexe) montre qu'une exo-terre est dix milliards de fois moins brillante que son soleil en rayonnement visible. Dans l'infrarouge, le rayonnement thermique propre de la Terre (corps noir à 280K) ramène ce rapport à dix millions (cf. annexe), encore assez élevé et qui devrait refroidir les ardeurs «extinctrices» des chercheurs de planètes. Cependant rien ne les arrête, l'auteur en est la triste preuve, mais il a tellement de complices, qu'il accepte ici d'avouer les turpitudes qui l'ont entraîné dans cette voie fatale.



Figures 1 et 2 : Interprétation possible de l'acronyme et Astronome éteignoir ou pompier stellaire (d'après Paul PONS, 1996)

Pour éteindre l'étoile, ils utilisent un « coronographe », terme impropre puisque qu'un tel instrument, magnifiquement développé dans les « années 30 » par Bernard Lyot (1897-1952),

servait à cacher le soleil pour en révéler la couronne, comme au cours des trop rares éclipses de Soleil. Les « coronographes » stellaires, qui s'inspirent de techniques très diverses, éteignent une région bien plus étendue que la couronne des étoiles (figure 3).

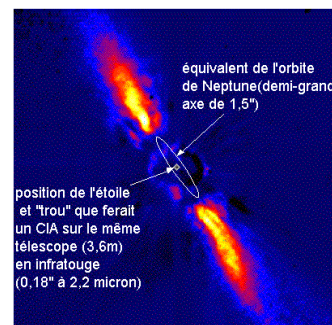


Figure 3 -Image infrarouge (bande K, 2,2 microns) de la lumière zodiacale entourant l'étoile beta pictoris dont la contribution est occultée par le masque de Lyot du coronographe ADONIS. (Document ESO, Mouillet et al. 1997 A&A 324, 1083)

Pour les plus proches (4 AL), même une exo-terre resterait cachée. Cependant, le terme est resté depuis que les premiers coronographes stellaires ont exploité la technique de Lyot qui s'appuie sur un masque focal et un diaphragme pupillaire de sortie. Il n'est pas question de détailler ici tous les procédés d'extinction. On ne présentera que celui connu sous l'acronyme CIA inventé par l'auteur, dont les propriétés alléchantes se sont révélées plus délicates à exploiter que ce qu'une description théorique laissait espérer...Mais n'en est-il pas

toujours ainsi ? C'est cependant, jusqu'à nouvel ordre, cet instrument qui permet de sonder au plus près de l'étoile : jusqu'au tiers du rayon du premier anneau sombre de la tache d'Airy, soit 22 milli-arcseconde (mas) en bande K ($2,2 \mu\text{m}$) sur un télescope de classe 8m soit encore 0.44UA pour un exo-soleil à 20pc (60 AL)...Mais on en n'est pas encore là, loin s'en faut.

On épargnera au lecteur l'histoire contournée qui conduisit à ce qui est représenté sur les figures 4, 5 et 7. Qu'on se souvienne simplement que depuis Gouy (1890) on sait qu'une onde passant par un foyer se déphase de π radians, propriété mise à profit par l'auteur pour annihiler la contribution stellaire par interférence destructive de façon absolument achromatique, en sortie de l'interféromètre à deux ondes schématisé sur la figure 4 (ici un simple « Michelson » en admettant que la lentille du rétro-rélecteur est d'épaisseur

idéalement nulle, ce qu'on obtient sans peine avec une optique à miroirs, plus complexe à représenter de façon limpide comme le révèlent les figures 5-7).

Le premier exemplaire d'un CIA (figure 5) fut exploité sur le télescope de 152cm de l'Observatoire de Haute Provence (OHP) équipé d'un banc d'optique adaptative d'étude (BOA) réalisée par l'ONERA. La grande longueur des trajets optiques et l'absence d'une isolation des bras de l'interféromètre engendraient des fluctuations de la différence de marche. Cependant, les résultats furent assez convaincants (figure 6) pour qu'on réalise un autre modèle plus compact et mieux isolé (figures 7 et 8) adapté au faible espace disponible entre l'Optique Adaptative (OA) « PUEO » et la caméra infrarouge « KIR » développées à Meudon pour le télescope de 3,6 m de l'Observatoire franco-canadien de Hawaii (TCFH).

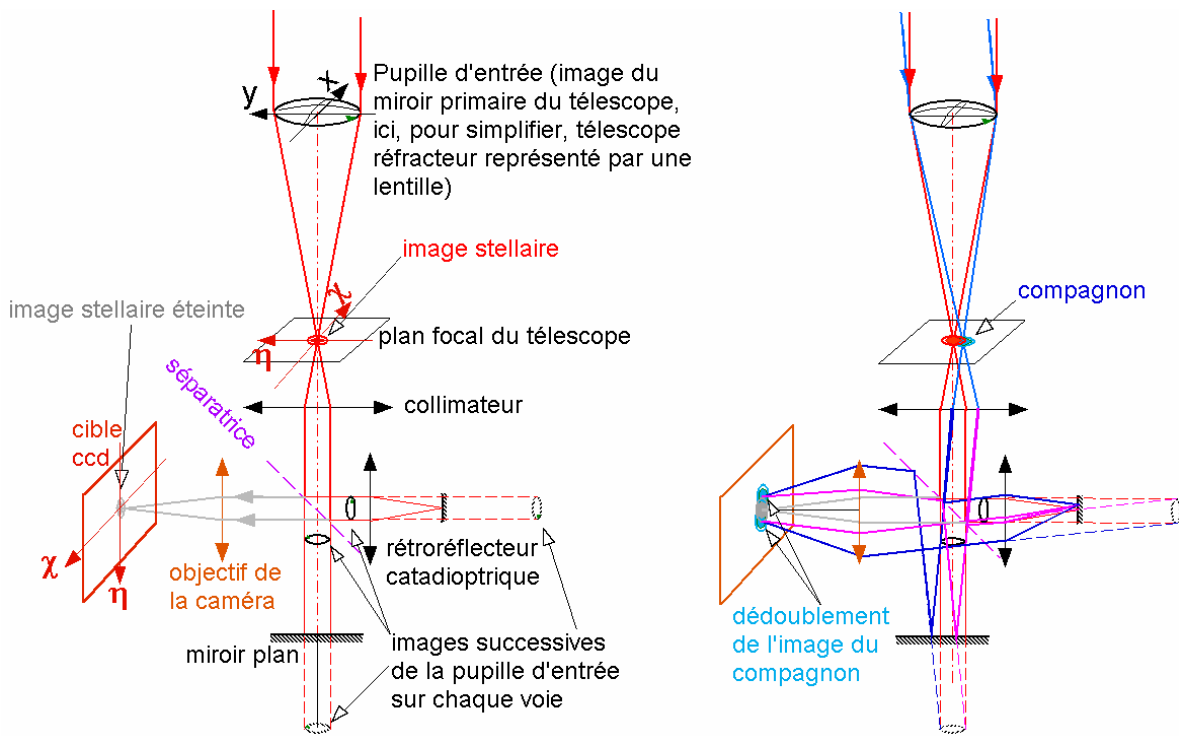


Figure 4-Une séparatrice divise l'onde plane incidente issue du collimateur, en deux fractions qui parcourent la même longueur de chemin optique. L'une se réfléchit directement sur un miroir plan, l'autre est renvoyée par un rétro-rélecteur catadioptrique qui assure le retour de l'onde sur elle-même, mais retournée et subissant un déphasage de π par passage par un foyer. La courbure du miroir secondaire de ce rétro-rélecteur est calculée pour que les faisceaux qui se recombinaient en sortie semblent provenir d'une même image de la pupille d'entrée. L'objectif de la caméra superpose les deux images du champ. Si l'étoile (en rouge) est sur l'axe (direction normale au miroir plan) ses deux images sont confondues et se neutralisent « en tout point du champ » puisque le déphasage de π met les ondes correspondantes en opposition. Par « en tout point du champ », il faut entendre « au centre et sur tous les motifs de la tache de diffraction qui s'étendent dans le champ »

Pour un compagnon (en bleu sur la figure de droite), placé hors de l'axe d'extinction, le système délivre deux images symétriques l'une de l'autre qui ne peuvent interférer si elles sont assez séparées (plus du tiers du premier rayon sombre de la tache d'Airy).

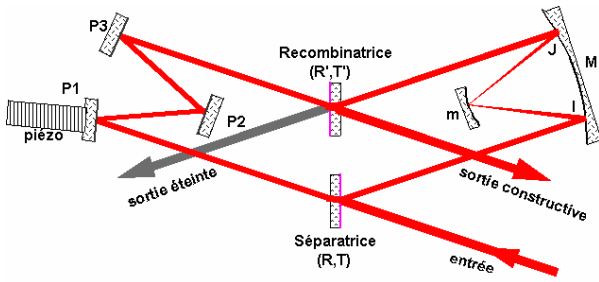


Figure 5 - Schéma de principe du premier CIA (en haut). Il est formé de miroirs avec même nombre de réflexions et mêmes angles de réflexion sur chaque bras. Le miroir M étant sphérique (figure du bas), l'astigmatisme qu'il produit par réflexion en I est neutralisé par le même astigmatisme de la réflexion en J car les plans d'incidence en I et J sont perpendiculaires ce qui permet de permuter les focales d'aberration et de neutraliser l'astigmatisme. Ceci se paie par une complication mécanique dans laquelle l'angle droit n'est pas le roi ! L'actuateur piézo-électrique sert au maintien de la différence de marche nulle.

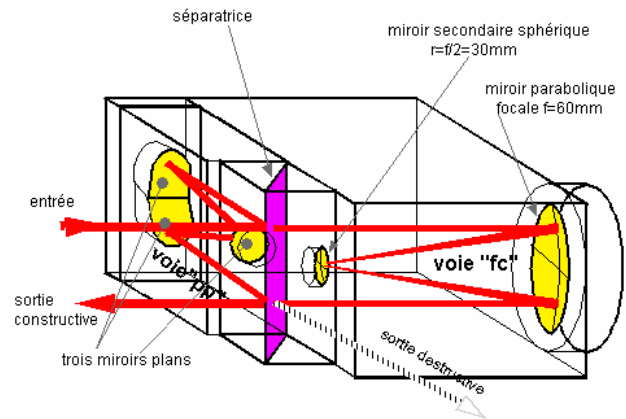


Figure 7-CIA compact à miroirs. Toutes les pièces sont taillées dans de la silice afin d'annuler les effets de la dilatation. La différence de marche est idéalement imposée nulle à l'assemblage, mais l'étanchéité des voies permet d'en rattraper les défauts d'ajustement par contrôle de la différence de pression entre les deux bras de l'interféromètre. La voie de sortie « constructive » peut être exploitée pour des servitudes d'observation (contrôle de centrage, référence photométrique...). Ce modèle très ramassé prévu pour une installation au Télescope Franco-Canadien de Hawaii a été réalisé en deux versions : l'une collée par résine polymérisée aux UV, l'autre en adhérence moléculaire. La première, seule exploitée au TCFH, requerrait 85 torrs de différence de pression dont le réglage nocturne, au froid, depuis le haut d'une échelle, avec contrôle du résultat par un collègue en cabine d'observation, s'est révélé bien trop difficile à exploiter. Le second montage, qui ne requiert que quelques torrs de correction, est en cours d'évaluation en laboratoire.

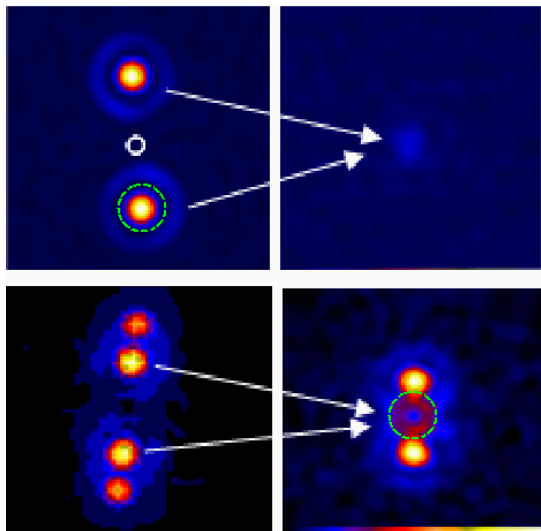


Figure 6- En haut à gauche, image d'une étoile simple hors d'axe. Le cercle blanc repère le centre de symétrie du CIA. Le cercle pointillé coïncide avec le premier anneau sombre de la tache d'Airy (0,73'' de diamètre). A droite, l'étoile est recentrée sur l'axe d'extinction. Le résidu central révèle l'erreur sur la différence de marche. En bas, l'étoile double 72 Peg : séparation 0,53'', l'écart de magnitude en bande K (2,2 μm) est de 0,32. A gauche, l'étoile principale est hors de l'axe d'extinction, à droite, elle est centrée, aussi ne voit-on que le compagnon dédoublé dont les deux images sont à 1,06'' l'une de l'autre. L'anneau rouge foncé intérieur au cercle pointillé est dû à l'effet moyen du résidu de « tilt » incomplètement maîtrisé par l'OA..

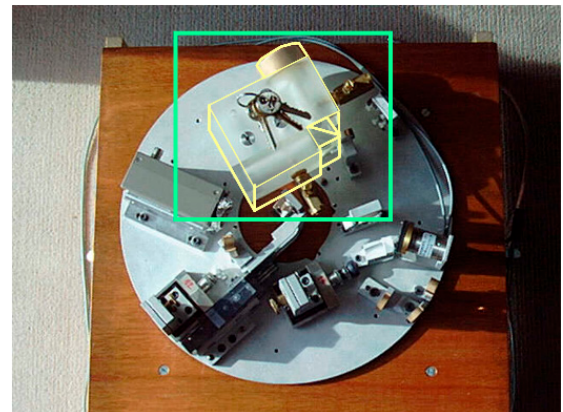


Figure 8-Le CIA compact de l'OCA dont le trousseau de clés donne la dimension imposée par l'espace disponible représenté par le support circulaire qui reçoit également les optiques d'interface avec l'OA (au-dessus) et la caméra IR (en dessous). On perçoit en couleur bronze, dans le rectangle vert, les vannes de pompage pour l'ajustement de la différence de marche. Sur le côté droit, se trouve l'actuateur piézo-électrique de centrage de l'image portant le miroir sur lequel on forme une image de la pupille.

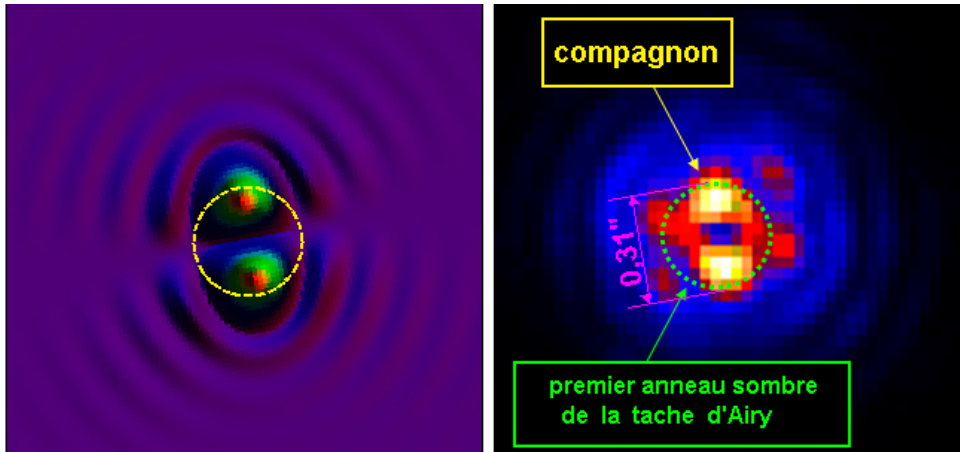


Figure 9 Observation en bande K (2,2 microns) au TCFH, avec le CIA compact de l'OCA, de l'étoile double 97339 Hipparcos : séparation 0,13''. Résolution du télescope de 3,6m : 0,154'' (Pierre Baudoz, thèse, Nice 1999). A gauche, la simulation avec un CIA parfait...Qu'il y loin de la coupe aux lèvres !

(Pour ceux qui voudraient approfondir le sujet, la présentation théorique détaillée figure sur notre site voir l'encadré ci-dessous, - GP).

Reviens par ici, lecteur pressé, et comprends que ce que tu viens de sauter n'est encore qu'une simplification de la dure réalité. Si les caprices atmosphériques n'induisaient qu'un « tilt » aléatoire¹, on pourrait s'en accommoder en acceptant que l'exploration proche du centre soit compromise. Mais bien d'autres effets perturbants interviennent. Malgré le dévouement de l'Optique Adaptative (AO), la surface d'onde reste encore cabossée. Cependant, les écarts à l'idéale planéité sont très inférieurs à la longueur d'onde, ce qui autorise le développement au premier ordre des effets de phase, en supposant l'absence d'autres défauts.

On a incorporé le tilt aux autres aberrations décrites. On voit ainsi que seules les aberrations antisymétriques (impaires), dont le tilt, mais aussi les comas 3 et 5, dégradent l'extinction de l'étoile centrale. Mais leurs effets sont doublés. Les aberrations paires (défocalisation, astigmatisme, aberrations sphériques etc.), sont sans effet.

Par traitement du signal, on peut améliorer fortement les effets moyens induits par ces résidus turbulents. Mais leur effet principal et incontournable est qu'ils injectent des photons stellaires là où on pense trouver un compagnon faible. Or, ces photons stellaires arrivent de façon aléatoire et le bruit qu'ils apportent ainsi n'est pas maîtrisable. C'est là, certainement, la limitation essentielle du CIA quand on l'exploite au plus près du centre, mais c'est aussi celui des autres

coronographes quand ils cherchent à explorer les zones très proches de l'étoile. On peut toujours améliorer les OA pour réduire les effets turbulents. On peut aussi « apodiser »² la pupille pour réduire la lumière dans les pieds du résidu stellaire, mais ceci est une autre affaire... en cours d'étude.

La distribution d'éclairement résiduel montre que les motifs sont les mêmes d'une longueur d'onde à l'autre à une dilatation d'échelle près dans le rapport des longueurs d'onde. On peut donc éliminer ces défauts en effectuant une soustraction d'images simultanées, ramenées à la même échelle de diffraction et affectées du coefficient qui minimise l'écart. La simulation présentée en figure 10 rend compte de l'efficacité du procédé dit « soustraction à échelle adaptée »

Plus de détails sur l'article

Notre ami Jean Gay nous a donné des détails sur les calculs, en particulier ceux donnant la distribution d'éclairement résiduel, qui est discutée à ce stade de l'article. Faute de place et pour ne pas entraver la lecture naturelle de l'article, nous donnons sur notre site Internet l'article intégral. La lecture ne se fait plus alors dans un fauteuil ; il est préférable d'être à sa table de travail, un stylo à la main.

Allez voir sur notre site Internet : clea-astro.eu, à la rubrique "Les Cahiers-Clairaut", numéro 124 GP

¹ "tilt" : inclinaison du plan d'onde incident - GP

² Apodisation : technique qui consiste à atténuer le flux parasite dans les bords (pieds) des images, par une altération, au niveau de la pupille d'entrée, du flux transmis (filtrage à géométrie contrôlée). - GP

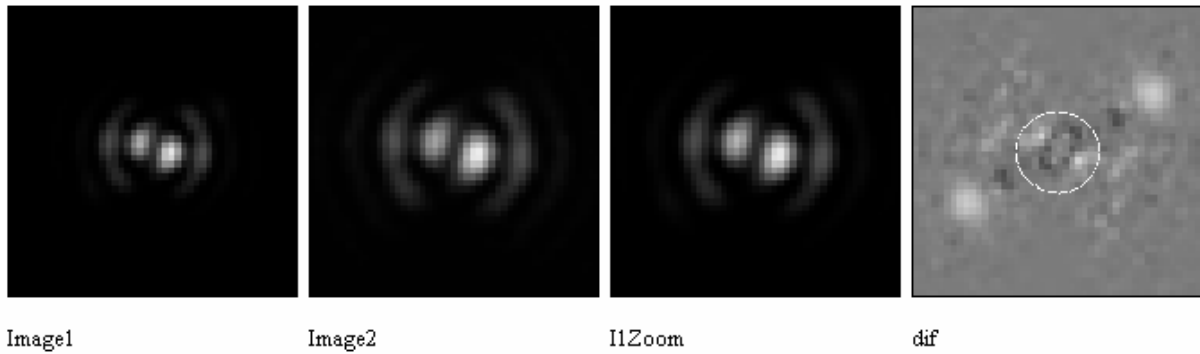


Figure 10 - Simulations de la soustraction à échelles adaptées : Image 1 est l'image résiduelle à 1600nm affectée d'un bruit de photon, Image 2 est la même à 2200nm également bruitée, I1Zoom est l'image à 1600nm ramenée à l'échelle de l'image 2. dif est la différence pondérée des images précédentes (I1Zoom-coef.Image2) qui fait apparaître un compagnon positif issu de I1Zoom, donc écarté de sa position, et en négatif le compagnon en Image2 à sa vraie position. Le cercle blanc repère le premier anneau sombre de la tache d'Airy. L'image est symétrisée ce qui améliore le rapport signal à bruit, mais le bruit de photon reste perceptible dans la différence calculée, surtout là où le résidu stellaire est perceptible. Les « haricots » de tilt, aberration prépondérante, présentent un déséquilibre qui traduit celui des deux voies de l'interféromètre.

Un Coronographe interférentiel axial (CIAXE)

Pour terminer, évoquons les méfaits du dogmatisme mandarin : le CIA ayant été proposé pour être monté sur l'optique infrarouge (MIRI) du *New Generation Space Telescope* (NGST et depuis JWST pour *James Webb Space Telescope*), il apparut que son insertion était impossible en raison des coude que cela imposait au trajet optique. Mon collègue Yves Rabbia, copromoteur du CIA, m'incitait à concevoir un modèle axial qui se serait aisément inséré dans MIRI. Hélas, je lui démontrais à coups d'arguments d'autorité que c'était impossible jusqu'au jour, trop tardif hélas, où sous la contrainte de son insistance, je méditais le schéma axial reproduit en figure 13. On voit qu'il y a trois paramètres, les rayons de courbure de trois dioptries et qu'il y a trois conditions à satisfaire... Un enfant de cinq ans aurait compris ça ! Après tout ce que le lecteur attentif a été contraint de digérer jusque là, il serait indécent de lui imposer un problème d'optique géométrique. Qu'il le soumette à ses élèves afin de leur offrir de saines distractions.

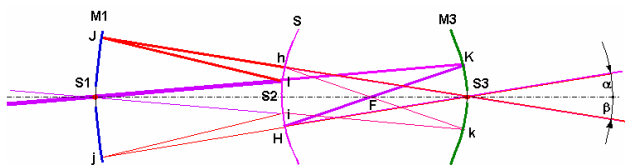


Figure 13-Principe du CIAXE ou CIA « dans l'axe ». M1 et M3 sont des miroirs concaves à égale distance de la séparatrice S de rayon R2 . Une petite zone circulaire autour des sommets S1 et S3 est transparente pour que

s'y forme l'image du champ. Les paramètres du problème sont : l'épaisseur $d=S1S2=S2S3$ et les rapports des différents rayons à cette épaisseur : $r1=R1/d$, $r2=R2/d$, $r3=R3/d$ qui sont les seules inconnues, d n'étant qu'un facteur d'échelle. Les contraintes à satisfaire sont :

- S1 imagé en S2 par réflexion sur S puis sur M1 puis transmis par S.
- S1 imagé en S2 par transmission à travers S puis réflexions sur M3 et sur S et passage par un point de convergence F
- α et β égaux, c'est-à-dire que les grossissements relatifs à ces deux conjugaisons doivent vérifier $\Gamma_{SM1} = -\Gamma_{M3S}$ (cette opposition de signe implique le passage par F)

Le problème est du second degré, à deux solutions réelles (qui correspondent aux deux sens de traversée). On « montre que » les sommets S1 et S3 présentent de jolies relations de conjugaison avec les centres de courbure des trois sphères et F...un vrai plaisir géométrique qui se prolongera par la contemplation des propriétés de $\sqrt{2} \pm 1$ et $\sqrt{2} \pm 4$.

Un prototype en silice de ce CIAXE est en cours de réalisation (figure 14), formé de deux lentilles épaisses, M1S et SM3, accolées par une couche séparatrice de rayon R2 en S. La difficulté principale est l'obtention d'une identité des épaisseurs au centre à quelques nm près... On en reparlera, peut-être, mais c'est trop tard pour JWST/MIRI. Moralité : méfiez vous de la paresse intellectuelle des mandarins qui cachent cette tare derrière de fallacieuses arguties.

Annexe. Luminosités comparées du Soleil et de la Terre

Rapport des luminosités dans le "visible"

La Terre, de rayon r , gravite à la distance a du Soleil et n'intercepte que la fraction $\pi.r^2 / 4\pi.a^2$ de la luminosité L du soleil (figure A1). Cette fraction est réémise vers l'espace par diffusion sur les nuages, les mers et les sols selon un albédo A de 20% en moyenne (40% coté jour, 0 coté nuit). Le rapport entre la luminosité l de la Terre et celle L du Soleil est donc :

$$\frac{l}{L} = A \frac{\pi.r^2}{4\pi.a^2} = 0.2 \left(\frac{6400km}{2 \times 150000000km} \right)^2 \cong 10^{-10}$$

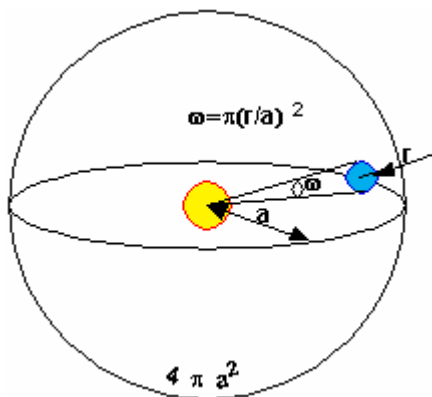


Figure A1- Evaluation du flux solaire intercepté par la Terre.

La figure A2 rend compte de ce rapport selon le domaine spectral pour la partie diffusée comme pour la partie due à l'émission thermique

Rapport des luminosités en infrarouge

On se place dans le domaine de l'approximation de Rayleigh-Jeans qui indique que la luminance du corps noir est proportionnelle à la température. Le rapport des luminosités est alors dépendant du rapport des surfaces émettrices pondéré par les températures (250K pour la Terre compte tenu de la couverture nuageuse et des pôles) :

$$\frac{l_{IR}}{L_{IR}} \cong \frac{4\pi.r^2}{4\pi.R_{Soleil}^2} \frac{T_{Terre}}{T_{soleil}} = \left(\frac{6400km}{700000km} \right)^2 \frac{250K}{6000K}$$

$$\frac{l_{IR}}{L_{IR}} = \frac{1}{300000}$$

Rapport optimiste qui suppose l'approximation de RJ bien satisfaite, ce qui n'est vrai qu'en infrarouge lointain pour la Terre, là où l'atmosphère devient hélas opaque. Dans la fenêtre à dix microns, bien transparente, le rapport devient 30 fois moins favorable, ce qui nous met à un rapport de luminosité de dix millions.

L/Lo

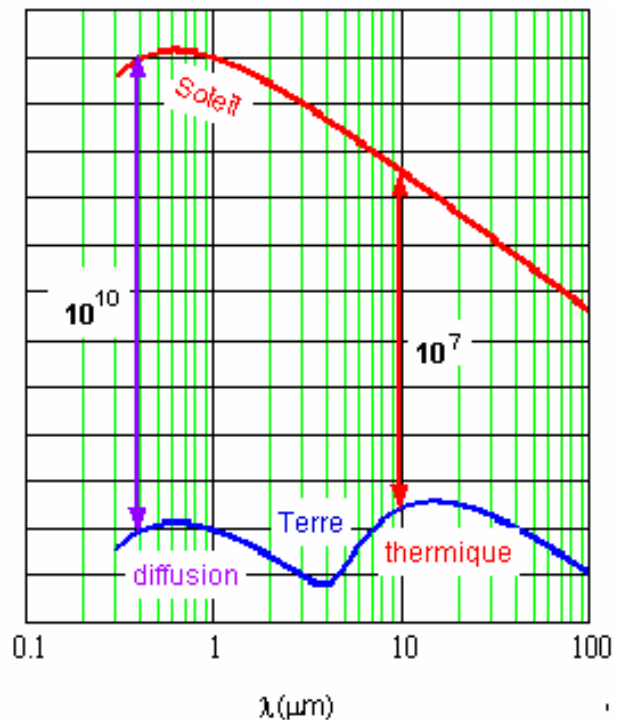


Figure A2- Luminosités spectrales comparées d'une terre et de son soleil. Le rapport de dix milliards (ou 25 magnitudes) à 0,5 micron (domaine visible), qui résulte de la diffusion du rayonnement solaire par la Terre, pourrait désespérer les plus optimistes, surtout si on réalise qu'à 10 années lumières de distance, cela correspond à 2 photons par seconde pour tout le domaine visible sur un télescope de la classe 8 mètres ! On se rassure en s'intéressant au domaine infrarouge pour lequel le rayonnement thermique propre de la planète devient prépondérant : le milliard prend la place du million, ce ne qui fait encore que 50 photons par seconde dans la fenêtre atmosphérique 8-12 microns sur le même télescope. Mais qu'en est-il alors des fluctuations aléatoires du rayonnement thermique ambiant ? Elles sont si pénalisantes qu'il n'y a que dans l'espace qu'on peut espérer les réduire assez en refroidissant tout le système ; certains pensent aussi à un observatoire en Antarctique (Dôme C) au risque d'y refroidir aussi l'astronome (espèce qui résiste assez bien aux basses températures).