

Ophtalmologie et astronomie : contrastes et similitudes

Ou quand un ophtalmologiste rencontre un astronome !

Une interview de J.P. Rivet



Jean-Pierre Rivet (à droite) est né à Nice le 16 janvier 1964. Après des études menées entre Paris et Nice, il intègre l'Ecole Normale Supérieure de la rue d'Ulm en septembre 1984. Il soutient son doctorat de physique en juin 1988 et rentre au CNRS en octobre 1989 après une année passée sous les drapeaux. Affecté à l'Observatoire de Nice, il mène d'abord des études de physique fondamentale sur la modélisation mathématique des fluides. Il aborde ensuite l'étude de systèmes stochastiques dans le cadre de la relativité d'Einstein, et se consacre actuellement à l'astronomie instrumentale, dans le domaine de la coronagraphie stellaire. Parallèlement, il assure une charge d'enseignement universitaire et s'occupe également de vulgarisation scientifique (conférences pour tous publics, animations scientifiques en astronomie). En 2001, il est fait chevalier dans l'Ordre des Palmes Académiques.

La médecine est à la fois un art et une science du vivant, et l'ophtalmologie se consacre à l'étude et au soin de notre organe sensoriel le plus précieux : l'œil. Cette étude peut s'effectuer à une échelle que l'on qualifie de "macroscopique" (échelle "humaine", ce qui est observable à l'œil nu), et "microscopique" quand l'observation fine des tuniques oculaires requiert l'utilisation de systèmes grossissants tels que les microscopes.

A l'inverse, l'astronomie se tourne vers l'immensité de l'espace et l'infiniment grand. En permettant de situer la place de l'Homme dans cet univers et/ou de questionner l'origine de l'humanité et de la vie, l'astronomie partage une indiscutable problématique humaine avec les sciences médicales.

Qui n'a pas ressenti une émotion indicible en mettant pour la première fois son œil dans l'oculaire d'un télescope pour observer la dentelle des cratères lunaires, ou encore la beauté des anneaux de Saturne ? Si la lumière de la lune ne met que quelques secondes pour nous atteindre, celle des astres les plus lointains ne nous parvient qu'au terme d'un voyage de plusieurs milliards d'années. En captant des photons après qu'ils aient traversé l'immensité de l'espace pour y déclencher une réaction photosensible, nos yeux observent ainsi un passé lointain.

La pluridisciplinarité s'avère souvent féconde. La paternité de l'aberrométrie moderne est attribuée à Scheiner,

savant du début du XVII^e siècle à la fois astronome et mathématicien. Young qui a mis un terme à deux siècles de débat concernant la nature de la lumière par sa fameuse expérience objectivant la diffraction des ondes lumineuses était médecin et physicien, de même que Von Helmholtz, dont les travaux sur la théorie de l'accommodation de l'œil sont bien connus en ophtalmologie. Aujourd'hui, les ophtalmologistes qui s'intéressent à la qualité optique de l'œil, que ce soit en chirurgie réfractive ou en chirurgie de la cataracte, ont dû se familiariser avec certains domaines de l'optique physique et instrumentale et emploient aujourd'hui couramment des termes communs avec la science astronomique (ex. : Point Spread Function, polynômes de Zernike, etc.)

L'ophtalmologie et l'astronomie se devaient ainsi de se rencontrer. Ce rendez-vous a été rendu possible grâce aux parainages conjoints du centre Visionis, de l'Observatoire de Nice, et du laboratoire Bausch & Lomb (Journées d'échanges et de réflexions en ophtalmologie). Il a eu lieu le 16 septembre 2006 sur l'impressionnant site de l'Observatoire de Nice, et sous la forme de questions ouvertes adressées à Jean-Pierre Rivet, astrophysicien et chercheur au CNRS, que j'ai eu le plaisir d'interroger.

D. GATINEL
pour *Réalités Ophtalmologiques*

Damien Gatinel : Avant d'aborder les défis et les performances accomplies par les systèmes astronomiques actuels, je présenterai un bref rappel des principales caractéristiques du détecteur optique naturel qu'est l'œil. Ces caractéristiques pourront être utilisées en référence pour apprécier les performances des systèmes actuels de détection astronomique. La performance optique de l'œil en termes de résolution est limitée par ses dimensions physiques (ouverture pupillaire, longueur focale) et la taille de ses photorécepteurs, les cônes fovéolaires. Il est ainsi possible de calculer que ces facteurs limitent la résolution de l'œil à la résolution de $20/10''$ (soit environ 60 cycles par degré, ou encore 30 secondes d'arc) (fig. 1 a et b). Qu'en est-il des instruments astronomiques modernes ?

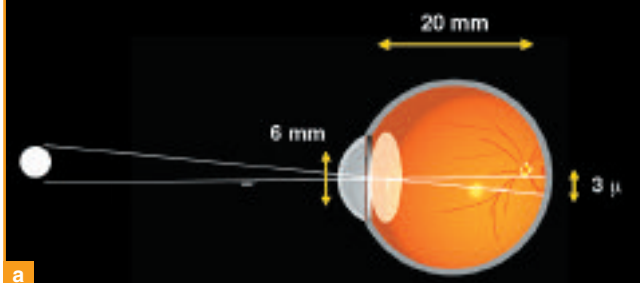
Jean-Pierre Rivet : Avant de parler de pouvoir de résolution, je voudrais fixer les idées en précisant la taille apparente de quelques objets astronomiques. Je les exprimerai en dixièmes, comme il est de coutume dans votre spécialité, et également de manière imagée, par la distance à laquelle il faudrait placer une pièce de 10 centimes d'euro pour qu'elle occupe la même place que l'objet astronomique dans le champ visuel.

La Lune, objet si familier de nos nuits, peut se masquer totalement par une pièce de dix centimes d'euro placée à environ 2 m de l'œil, ce qui correspond à environ 0,3 dixième ! La très belle planète Saturne occupe dans le meilleur des cas le même angle que la pièce de monnaie placée à environ 206 m, ce qui correspondrait à 32 dixièmes. Je parle bien sûr de la planète seule et non de ses anneaux. Elle est visible facilement à l'œil nu, mais comme un point brillant, sans détail, puisqu'un œil humain, même excellent, ne peut atteindre de telles acuités. Une étoile double d'intérêt scientifique, comme "COU979" découverte ici-même, représente 2 000 dixièmes, soit une pièce de monnaie à 13 km ! Enfin, sujet astronomique brûlant s'il en est, une exoplanète (planète tournant autour d'une autre étoile que le Soleil) comme par exemple "51-Pegasi" découverte en 1995, tourne à une distance telle de son étoile, que l'écart vu depuis la Terre ne représenterait pas moins de 17 000 dixièmes, soit une pièce de monnaie à 1 130 km ! On comprend pourquoi ces objets gardent encore un épais voile de mystère, dix ans après leur découverte ! Bien sûr, le pouvoir de résolution n'est pas le seul obstacle à la vision (ou à l'imagerie) de ces objets. Les aspects de luminosité et de contraste sont tout aussi cruciaux.

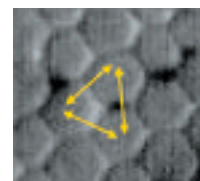
Venons-en au pouvoir de résolution des instruments astronomiques.

Résolution maximale... d'origine OPTIQUE

Diamètre PSF $\approx f/D \approx 20/6 \approx 3 \text{ m}$
Soit acuité visuelle snellen théorique $\approx 20/10$



Résolution maximale... d'origine RETINIENNE



	Moyenne	Interv.
Williams (1988)		
Distance entre les cônes, r (arc min)	0,535	0,51-0,57
Résolution (cyc/deg)	56	53-59
Ac Vis Snellen (X/10)	18,7	18,1-20
Curcio et al. (1990)		
Distance entre les cônes, r (arc min)	0,455	0,36-0,65
Résolution (cyc/deg)	66	46-83
Ac Vis Snellen (X/10)	22,1	15,3-28,5

Fig. 1 a : La résolution théorique maximale d'un œil peut être calculée en fonction du diamètre de la tache d'éclairage rétinienne (PSF: Point Spread Function) et du critère de Rayleigh. En l'absence d'aberrations optiques, ce diamètre ne dépend que des conditions de diffraction et peut être estimé à 3 microns (pour un diamètre pupillaire = 6 mm et une longueur focale de 20 mm). (D. Gatinel).

b : L'acuité visuelle est limitée par la capacité d'échantillonnage rétinienne, qui dépend en retour de la distance minimale entre les articles externes des photorécepteurs fovéolaires, estimée par deux auteurs, Williams (1988) et Curcio (1990). Il est intéressant de noter que la taille des photorécepteurs est parfaitement adaptée aux contraintes issues des lois de l'optique physique (a priori, l'augmentation de la densité des photorécepteurs n'aurait pas un effet majeur sur l'acuité visuelle théorique au regard du diamètre minimum imposé à la PSF par les dimensions de l'œil).

Les limitations du pouvoir de résolution des instruments d'astronomie peuvent être dues à plusieurs facteurs dont les principaux sont :

- les aberrations résiduelles de l'optique qui les compose,
- la taille des photorécepteurs (pixels) que l'on dispose au foyer,
- la diffraction, liée au diamètre de l'instrument,
- et surtout l'effet de la turbulence atmosphérique.

En astronomie terrestre, c'est souvent ce dernier effet qui est le plus limitatif. Compte tenu de ces effets, voici le pouvoir de résolution de quelques instruments d'astronomie.

Pour baser la comparaison, on partira d'un œil humain ordinaire ayant une acuité de 10 dixièmes. Il pourrait distinguer une pièce de 10 centimes d'euro à 65 m environ. Par le mot distinguer, j'entends percevoir que cette pièce est un petit disque et non un simple point, sans supposer pour autant voir les détails de la pièce.

Dans les mêmes conditions, une lunette astronomique d'amateur de 8 cm de diamètre permettrait théoriquement de distinguer la même pièce à 2 km, ce qui correspondrait à 300 dixièmes. Essayons de faire mieux, et passons à la Grande Lunette de l'Observatoire de Nice, dont le diamètre utile est de 76 cm. Lors d'une nuit où l'atmosphère est de qualité moyenne en termes de turbulence atmosphérique, cet instrument impressionnant par ses dimensions ne conduirait qu'à une acuité de 600 dixièmes, ce qui paraît un gain bien modeste (en termes de résolution seulement, car en termes d'intensification de lumière, le gain est évidemment bien plus important). Le principal coupable est la turbulence atmosphérique. Sans elle, le Grand Equatorial conduirait à une acuité de 3 000 dixièmes (une pièce de monnaie à 20 km) !

Si l'on s'intéresse maintenant à des instruments plus modernes, les "VLT", ces quatre télescopes géants de 8,2 m de diamètre installés sur le Cerro Paranal au Chili, atteignent une acuité de 6 000 dixièmes, à condition de diminuer les effets délétères de la turbulence atmosphérique au moyen d'un dispositif sophistiqué, appelé "optique adaptative" (nous y reviendrons).

Puisque l'atmosphère semble être la limitation la plus sévère, passons donc aux télescopes spatiaux, comme le fameux télescope "Hubble", à qui l'on doit une abondante galerie d'images astronomiques d'une rare beauté. Perché à 565 km au-dessus du sol, et donc hors atmosphère, le télescope spatial Hubble atteint un pouvoir de résolution de 10 000 dixièmes (une pièce de monnaie à environ 65 km) !

Pour faire mieux, il faut soit construire des télescopes encore plus grands, soit faire interagir (on dit interférer) la lumière de plusieurs télescopes plus petits mais écartés les uns des autres. C'est le principe de l'interféromètre astronomique. Les fameux télescopes VLT peuvent fonctionner ainsi, et l'acuité qui en résulte est de l'ordre de 60 000 dixièmes (une pièce de monnaie à 390 km) !

D.G. : Quelles sont les solutions que l'astronome utilise pour améliorer ce pouvoir de résolution ?

J.P.R. : Pour la clarté de ce qui suit, rappelons rapidement le principe des instruments collecteurs de lumière pour l'astronomie.

Le but de ces instruments est triple :

- Ils doivent d'abord concentrer la lumière par un simple effet d'entonnoir : ils collectent la lumière du ciel par un orifice de grande taille et la font converger pour qu'à la sortie, le faisceau concentré puisse passer par les 6 mm d'ouverture de la pupille humaine.
- Ils doivent ensuite grossir les images pour donner accès à plus de détails que l'œil seul n'en pourrait percevoir.
- Ils doivent enfin former à distance finie (dans un plan focal) l'image des objets du ciel, qui sont situés pratiquement à l'infini.

Cela permet simultanément de voir nettement les objets du ciel et d'avoir un repère de mesure (réticule, micromètre, graduations, etc.). La mesure des dimensions des objets devient ainsi possible. Deux grandes familles d'instruments parviennent à remplir ces trois missions (*fig. 2*) : les lunettes et les télescopes. Les lunettes utilisent une grande lentille, l'objectif, pour concentrer la lumière. Les télescopes, en revanche, utilisent un grand miroir concave pour faire la même chose. Ce miroir primaire renvoyant la lumière vers le ciel, un miroir secondaire est nécessaire pour extraire la lumière vers l'observateur.

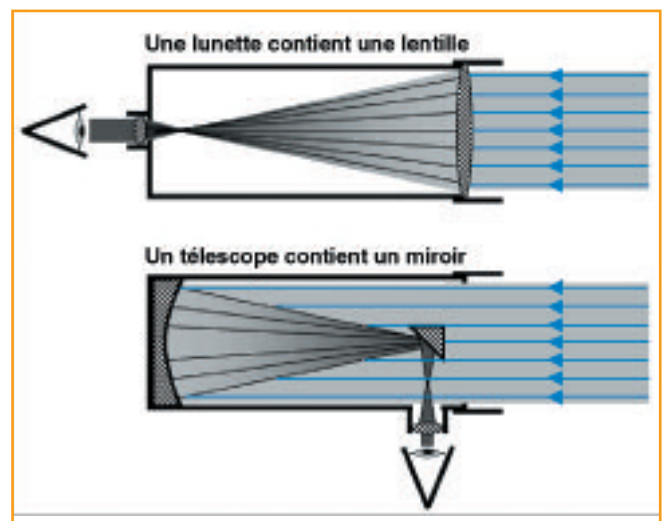


Fig. 2 : Le principe de la lunette astronomique et du télescope.

On combat donc les aberrations géométriques et chromatiques de ces instruments en les minimisant par une conception soignée des lentilles ou miroirs qui les composent. C'est pour cela que l'on utilise souvent dans l'instrumentation astronomique des surfaces asphériques, tant pour les miroirs que pour certaines lentilles.

Par ailleurs, sur les très gros télescopes, le miroir primaire peut se déformer légèrement sous son propre poids selon l'orientation du télescope, chose qui ne se produit sans doute pas dans un œil humain. Cette déformation du miroir, et donc de sa surface optique, provoque des aberrations gênantes. Pour éviter ce problème, on peut fabriquer des miroirs très épais et compter sur la rigidité de la matière pour atténuer les déformations.

Cette stratégie atteint très vite ses limites à cause du poids prohibitif qui en résulte pour les miroirs de grande taille. Pour aller au-delà et construire des miroirs encore plus grands sans les alourdir trop, on peut choisir d'accepter la déformabilité du miroir et la contrôler au moyen d'une batterie de vérins commandés par un ordinateur. Ces vérins appuieront en différents points sur l'arrière du miroir, chacun avec une force calculée exactement par l'ordinateur de manière à compenser les déformations du miroir sous son propre poids. C'est ce que l'on appelle "l'optique active", à ne pas confondre avec l'optique adaptative qui, elle, compense les effets de la turbulence atmosphérique.

On combat les effets thermiques sur la géométrie des composants optiques et de leurs assemblages en utilisant si nécessaire des matériaux à faible dilatation (Zérodur, Invar), si les contraintes environnementales l'imposent (astronomie en Antarctique).

On combat les effets de la diffraction en augmentant les diamètres des pupilles, donc en faisant des télescopes plus gros, ce qui augmente aussi la luminosité. On peut aussi passer à l'**interférométrie astronomique**. Cette méthode résulte des travaux théoriques du physicien français Armand Fizeau et de l'astronome américain Albert Michelson (fin du XIX^e siècle, début du XX^e). La méthode consiste à mélanger de manière soignée (les physiciens disent "de manière cohérente") la lumière céleste récoltée par plusieurs télescopes suffisamment écartés.

De ce mélange cohérent résulte une perception de détails comparable à celle que procurerait un seul télescope géant dont le diamètre serait égal à l'écart entre les télescopes de

L'OBSERVATOIRE DE NICE

L'observatoire de Nice est une des trois composantes de l'observatoire de la Côte-d'Azur, qui regroupe également l'observatoire de Calern et le centre de recherche de Roquevignon. Cet observatoire tricéphale est actuellement le second observatoire de France derrière l'Observatoire de Paris-Meudon.

L'observatoire de Nice fut fondé en 1881 par un riche mécène, Raphaël Bischoffsheim, qui y fit s'exprimer le génie des plus grands créateurs de l'époque (Charles Garnier, Gustave Eiffel, les frères Henry, etc.).

Actuellement largement reconnu à l'échelle internationale pour ses travaux de recherche dans de nombreux domaines de l'astronomie moderne et des sciences connexes, l'observatoire est aussi un lieu d'accueil et de vulgarisation scientifique où les chercheurs qui le souhaitent peuvent rencontrer un public passionné, dans un cadre enchanteur.

l'interféromètre. Deux télescopes de 1 m de diamètre distants de 50 m donneraient ainsi théoriquement des détails comparables à ceux d'un télescope gigantesque de 50 m de diamètre ! Bien entendu, le gain se limite au pouvoir de résolution. En termes d'intensification de lumière, rien ne remplace les grandes surfaces collectrices. Deux télescopes de 1 m de diamètre resteront toujours beaucoup moins lumineux qu'un seul de 50 m.

D.G. : Vous avez parlé de surfaces asphériques : pouvez-vous citer des exemples d'utilisation en astronomie ?

J.P.R. : L'astronomie utilise beaucoup les surfaces asphériques pour minimiser les aberrations. Commençons par le cas le plus fréquent : celui des miroirs. Rappelons qu'en géométrie, on appelle "courbe conique" les courbes que l'on peut obtenir comme intersection d'un cône avec un plan (**fig. 3**). Les paraboles, hyperboles et ellipses sont de cette famille et possèdent d'étonnantes propriétés optiques. Par exemple, un

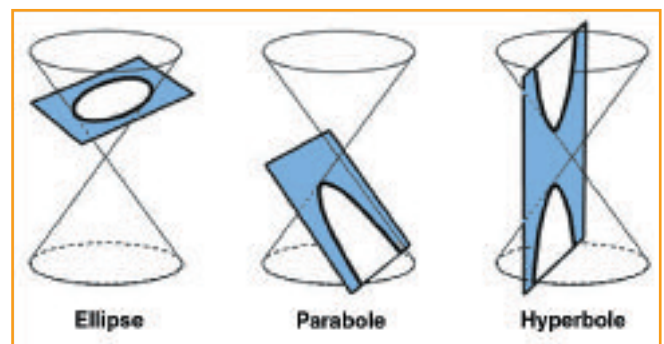


Fig. 3 : Les courbes coniques : intersection d'un cône et d'un plan.

miroir dont le profil serait une parabole (*fig. 4a*) aurait la propriété de renvoyer en un seul point (le foyer) toute la lumière qui lui parviendrait en provenance d'une source lumineuse ponctuelle située à l'infini sur l'axe de la parabole (disons une étoile, par exemple). Cette formation d'image se fait rigoureusement sans aberration, tant que l'étoile source reste sur l'axe optique du miroir. De même, un miroir ayant un profil en forme d'ellipse (*fig. 4b*) concentre en un seul point bien précis (un de ses foyers) toute la lumière issue d'une source lumineuse ponctuelle à condition que cette dernière soit située précisément en un autre point bien précis : le second foyer de l'ellipse. Enfin, un miroir qui aurait un profil hyperbolique (*fig. 4c*) produirait aussi un effet analogue. C'est en combinant habilement ces diverses surfaces asphériques que sont conçus les télescopes astronomiques modernes.

Le premier du genre fut proposé par le savant anglais Isaac Newton en 1671. La lumière du ciel était réfléchiée par un miroir concave taillé et poli dans un bloc de cuivre de manière à avoir un profil parabolique (*fig. 5*). La lumière d'une étoile sur l'axe du télescope était donc réfléchiée par le miroir et concentrée sans aberration en un point précis : le foyer de la parabole. Un simple miroir secondaire plan incliné à 45° per-

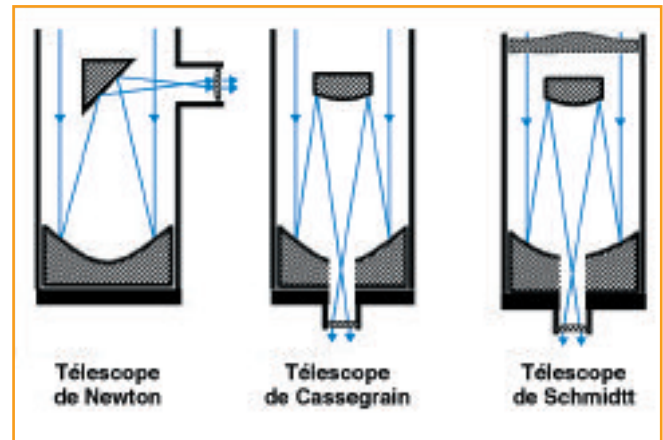


Fig. 5 : Les trois principales sortes de télescopes.

mettait de dévier la lumière vers le côté pour faciliter sa réception par l'œil, au travers d'un oculaire. Ce fut, à ma connaissance, la première utilisation d'une surface asphérique en astronomie.

A peine plus tard, une variante du télescope de Newton fut proposée. Son miroir principal a toujours un profil parabolique, mais un trou est percé en son centre (*fig. 5*). Le miroir secondaire n'est plus un miroir plan incliné, mais un miroir hyperbolique, qui renvoie la lumière vers l'arrière de l'instrument, au travers du trou pratiqué dans le miroir principal. C'est le télescope de Cassegrain, qui utilise deux surfaces asphériques : le miroir primaire parabolique et le miroir secondaire hyperbolique.

Toutes ces variantes du télescope de Newton souffrent d'un défaut commun : si l'image d'un objet sur l'axe du télescope est parfaite, la qualité optique se dégrade assez vite pour les objets hors de l'axe. Il en résulte un champ visuel étroit (on ne peut pas regarder plusieurs étoiles un tant soit peu écartées et les voir toutes avec précision). Pour améliorer cela, il fut proposé de remplacer le miroir principal par un simple miroir sphérique. Ce choix introduit une aberration même pour une étoile parfaitement au centre du champ, et on semble avoir perdu sur les deux tableaux. On ajoute alors à l'entrée du télescope une lentille spéciale (*fig. 5*) dont le profil est en "chapeau de gendarme". Cette lame correctrice, la lame de Schmidt, possède une surface complexe qui est non seulement asphérique, mais aussi non conique. Le télescope de Schmidt qui en résulte donne une qualité correcte pour une étoile sur l'axe optique, et la qualité ne se dégrade pas trop vite pour des étoiles hors de l'axe.

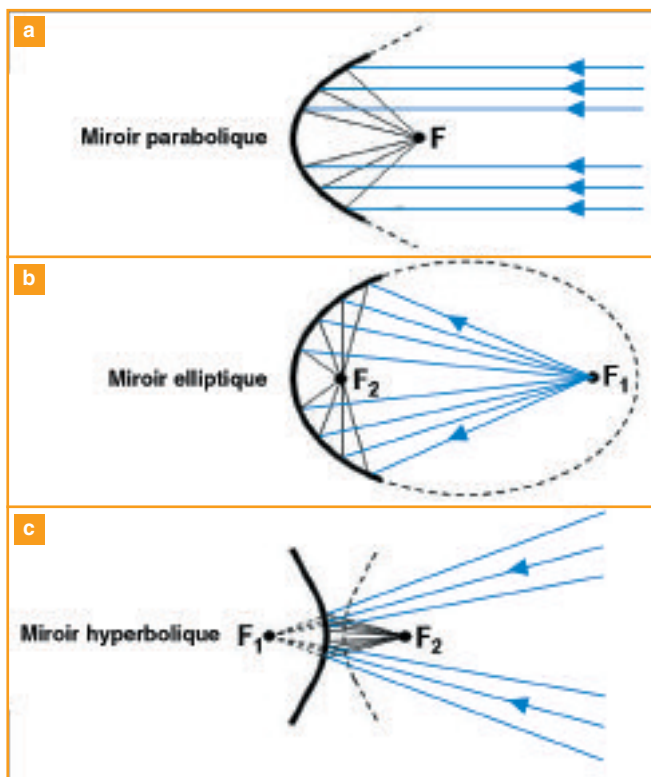


Fig. 4 : Les miroirs coniques ont des propriétés remarquables de stigmatisme rigoureux.

Par ailleurs, on utilise aussi souvent en instrumentation astronomique des lentilles de correction de champ et des réseaux de diffraction dont le profil est asphérique.

D.G.: Vous avez parlé aussi de turbulence atmosphérique, phénomène auquel l'ophtalmologiste n'est pas directement confronté. Comment les astronomes s'en débarrassent-ils ?

J.P.R.: Notre atmosphère est un cocktail de gaz agités en permanence de mouvements à diverses échelles, depuis le petit tourbillon qui naît derrière une cheminée jusqu'aux cyclones et anticyclones de plusieurs centaines de kilomètres. De ces mouvements résultent des contrastes de densité et donc d'indice de réfraction. La couche d'atmosphère qui nous sépare des étoiles se comporte donc comme ces mauvaises vitres qui équipaient les demeures anciennes, et qui faisaient voir le paysage légèrement déformé, à cela près que les défauts d'homogénéité de l'atmosphère sont rapidement changeants et non prévisibles. Ces mouvements turbulents de l'atmosphère ne sont pas aussi importants toutes les nuits en un lieu donné, et de plus, il est des lieux favorisés où la turbulence est statistiquement moins importante qu'ailleurs.

La première méthode de lutte contre la turbulence et ses effets optiques est donc de bien choisir le lieu d'implantation de l'observatoire. Ce n'est pas un hasard si le sommet du mont Mauna Kea (4 205 m), dans l'archipel d'Hawaii, regroupe une impressionnante concentration des télescopes comptant parmi les plus gros du monde. Il en est de même pour le sommet du mont Cerro Paranal (2 635 m), au Chili, qui abrite les installations du célèbre Very Large Telescope (VLT). Évidemment, l'idéal serait un observatoire situé au-dessus de notre atmosphère. C'est le cas du télescope spatial Hubble.

A défaut de pouvoir supprimer totalement la turbulence en montant dans l'espace, un peu d'ingéniosité permet à peu de frais de diminuer quelque peu ses effets. Il s'agit de la méthode de sélection d'image qui repose sur le fait que la turbulence atmosphérique présente de l'intermittence. En effet, la turbulence connaît parfois de très brèves accalmies de quelques dixièmes de seconde au cours desquelles les images sont nettement meilleures. Il suffit donc d'acquérir non pas une image mais toute une rafale au moyen d'une caméra, puis de les trier, pour ne garder que celles qui ont eu le bonheur de correspondre avec un de ces courts moments de répit de la turbulence. Ces quelques images triées sur le volet sont ensuite traitées mathématiquement pour produire une seule image composite de qualité grandement améliorée.

Enfin, avec de gros moyens financiers, on peut corriger activement les effets de la turbulence en amont, c'est-à-dire au niveau de la lumière elle-même et non plus des images déjà enregistrées. C'est ce qu'on appelle "l'optique adaptative".

D.G.: Qu'est-ce que l'optique adaptative ? Pouvez-vous en rappeler simplement le principe ? Est-ce différent de l'optique active ?

J.P.R.: Le principe est de corriger en temps réel les défauts de l'image dus à la traversée de couches atmosphériques agitées par la turbulence, au moyen d'une sorte d'asservissement en boucle (fig. 6). La lumière issue d'une étoile devrait se comporter comme une série de vagues bien planes arrivant régulièrement sur la pupille du télescope. En réalité, la turbulence transforme ces fronts d'onde bien plans en surfaces très cabossées et fluctuantes.

Pour les redresser, une partie de la lumière qui arrive sur la pupille du télescope est prélevée et envoyée sur un analyseur de front d'onde de type "Shack-Hartmann" ou "Roddier". Cet analyseur obéit au même principe que ceux utilisés en ophtalmologie pour mesurer les aberrations de l'œil. L'analyseur mesure la forme instantanée du front d'onde et la délivre non pas de manière brute, mais plutôt sous la forme de coefficients des modes de Zernike jusqu'à un certain ordre, un peu comme lorsque vous mesurez les aberrations d'un œil, à la différence

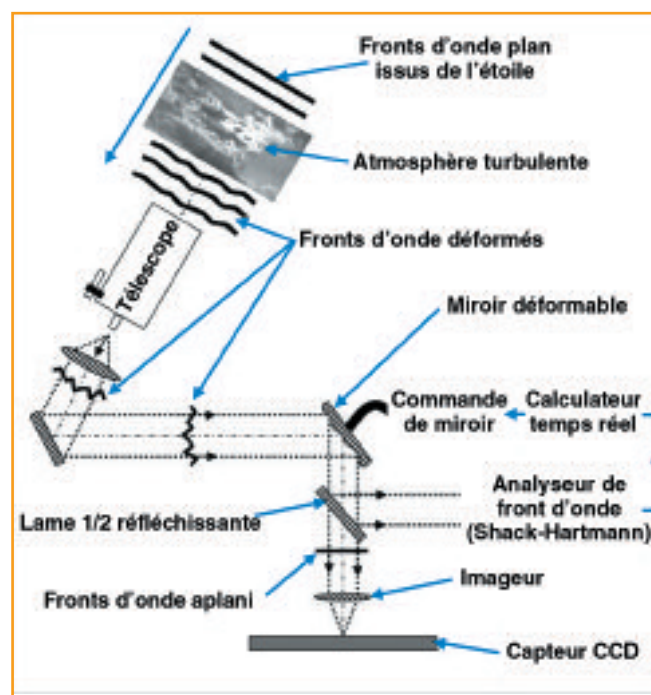


Fig. 6 : Schéma de principe de l'optique adaptative.

près que les défauts d'un œil sont à peu près statiques, alors que ceux de l'atmosphère sont rapidement changeants.

A partir de ces aberrations mesurées en temps réel, un calculateur rapide détermine la meilleure façon de déformer un petit miroir souple de manière à ce que ses déformations compensent au mieux les bosses et creux du front d'onde abîmé par la turbulence. Après réflexion sur ce miroir déformable, le front d'onde est au moins partiellement déca bossé, et l'image s'en trouve améliorée. Ce cycle "mesure, calcul, déformation" se reproduit avec une fréquence suffisante pour prendre la turbulence de vitesse.

D.G. : *Malgré tous ces progrès de l'instrumentation astronomique moderne, fait-on encore au XXI^e siècle de l'astronomie à l'œil nu ?*

J.P.R. : Oui et non. Il est certain que l'on n'utilise plus l'œil comme collecteur autonome de lumière. Sa surface collectrice, celle de la pupille, est notoirement insuffisante pour une bonne perception des objets peu lumineux. De plus, son pouvoir de résolution reste modeste, et surtout, il ne permet pas d'accommoder simultanément sur un objet céleste à l'infini, et sur un repère de mesure à distance finie (mire micrométrique). Même comme récepteur lumineux, l'œil est le plus souvent remplacé par les plaques photographiques, et maintenant par les caméras CCD. Cela dit, dans certains cas assez rares, mais justement représentés à l'observatoire de Nice, l'œil humain sert encore aujourd'hui de juge ultime dans les mesures au micromètre à fils.

A condition que cet œil soit naturellement plus performant que la moyenne, qu'il soit de plus utilisé de manière optimale physiologiquement, et enfin longuement entraîné, ses performances finales restent encore au coude à coude avec celles obtenues sur la même lunette astronomique par une caméra CCD secondée par une machinerie de traitement d'image relativement sophistiquée. Paul Couteau, qui a découvert et mesuré plus de 2 700 étoiles doubles sur nos deux lunettes astronomiques, était de ces hommes. Il a formé quelques successeurs encore en activité.

D.G. : *Qu'entendez-vous par "utilisé de manière optimale physiologiquement" ?*

J.P.R. : L'astronome utilisateur de ses yeux commence la nuit par une période de 20 à 45 minutes passée dans le noir complet, pour atteindre son maximum de sensibilité en vision scotopique. Toute l'observation se fait dans l'obscurité pour ne pas

rebasculer en vision photopique. La lecture et l'écriture de données se font à la lueur d'une petite lampe de couleur orange, la "luciole", qui suffit à cet usage sans éblouir. De plus, l'astronome utilise la vision périphérique pour mieux saisir les objets les moins lumineux. Enfin, tout le système de perception visuelle de l'astronome est entraîné pour faire en quelque sorte de la "sélection d'images à la volée", de manière à extraire les détails scientifiques au milieu du fouillis mouvant des tavelures turbulentes. L'astronome profite ainsi de la propriété d'intermittence de la turbulence atmosphérique (existence de courts instants aléatoires de calme au milieu de l'agitation).

D.G. : *Justement, la vision scotopique se fait quasiment en noir et blanc. Renoncez-vous à la couleur ?*

J.P.R. : Pour ce qui est de ces travaux où l'œil humain est le juge final, la réponse est plutôt oui : l'astronome voit quasiment en noir et blanc, et de toute façon le message coloré importe peu pour ce genre d'étude. En revanche, pour d'autres études, le message de couleur est crucial à décoder. Ces travaux ne se font donc pas avec l'œil humain comme récepteur. On lui substitue alors une caméra CCD munie d'une série de trois filtres colorés. On acquiert trois images du même objet au travers de trois filtres colorés (rouge, vert et bleu). On effectue ensuite un traitement numérique soigneux de ces trois images (ou séries d'images), puis on les aligne géométriquement, et on les recompose par trichromie additive, après avoir compensé les différences de sensibilité de la caméra aux différentes couleurs, pour obtenir finalement une image dont la couleur est reproduite aussi fidèlement que possible. Ce ne sont pas des fausses couleurs, mais des couleurs restituées.

D.G. : *Pour conclure, pouvez-vous comparer sommairement les problèmes posés par l'œil humain et ceux posés par les instruments astronomiques, et par là-même la démarche du chirurgien ophtalmologiste corrigeant un œil et celle de l'astronome corrigeant l'optique d'un instrument ?*

J.P.R. : Je ne peux évidemment pas être exhaustif en répondant à cette question. Commençons par les différences :

- L'œil humain doit pouvoir accommoder sur des objets à distance variable, alors qu'un instrument d'astronomie ne focalise qu'à l'infini.
- Les imperfections de la vision oculaire sont dominées par les aberrations géométriques liées à des défauts morphologiques des composants de l'œil, donc à des causes endogènes, alors que la limitation majeure dont souffre l'imagerie astro-

nomique est principalement liée à une cause exogène : la turbulence atmosphérique, même si les aberrations géométriques et parfois chromatiques du train optique doivent aussi être prises en compte.

- Les défauts de l'atmosphère sont rapidement fluctuants, alors que les défauts morphologiques de l'œil changent lentement.
- L'œil humain en fonctionnement normal doit pouvoir percevoir des scènes comportant des mouvements rapides, alors qu'en astronomie, les objets observés évoluent lentement, voire même pas du tout durant une observation.
- L'œil n'est pas un système centré, alors que les optiques astronomiques le sont souvent. Le traitement mathématique des aberrations s'en trouve modifié quelque peu.
- L'œil ne peut pas effectuer d'intégration (pose longue), alors que les récepteurs astronomiques modernes le peuvent.
- Le traitement de la couleur diffère. Pour l'œil, la perception des chrominances et de la luminance est effectuée simultanément par des cellules spécifiques : les cônes et les bâtonnets ; pour l'astronomie, la perception des informations chromatiques est le plus souvent séquentielle, par exemple par l'interposition successive d'une série de filtres.

Venons-en aux similitudes :

- Les outils techniques et conceptuels pour mesurer et décrire les aberrations sont en gros les mêmes : analyseurs de Shack-Hartmann, polynômes de Zernike, transformation de Fourier, Point Spread Function (PSF).
- La vision binoculaire existe aussi en astronomie, sous une forme subtile. Il ne s'agit pas de regarder la même scène avec deux télescopes pour percevoir la profondeur, mais plutôt de percevoir la même scène avec un seul télescope à deux époques différentes de l'année. Cela revient au même, puisque la Terre (et donc le télescope) se trouvent alors dans deux positions différentes très éloignées du fait du mouvement orbital de la Terre. C'est la méthode de la parallaxe stellaire, inventée par Carl Friedrich Bessel en 1838.
- L'astronome corrige parfois la vue de ses instruments en leur faisant porter des verres de correction (par exemple, la lame COSPAR du télescope Hubble) !
- Tout comme l'ophtalmologie, l'astronomie et ses développements optiques conduisent à de fructueuses interactions entre les scientifiques et les partenaires industriels. La tenue de ce colloque me semble illustrer parfaitement ce point. ■