

Comment l'information astronomique nous parvient-elle ?

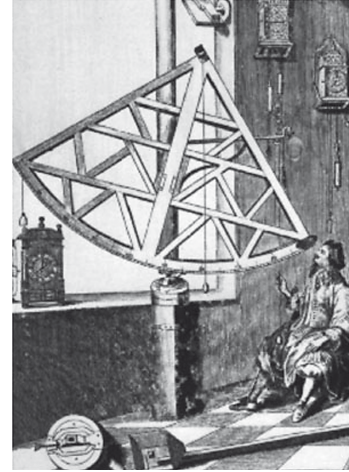
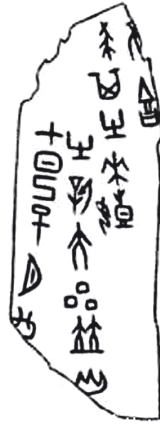
Pierre Léna

L'œil et ses successeurs

Pendant des millénaires, l'homme ne disposa que de ses yeux pour observer le ciel, la Lune et le Soleil, les étoiles du ciel qu'il organisa en constellations, les astres brillants et mobiles qu'il appela planètes, ces phénomènes éphémères que sont les éclipses, les comètes et les météorites. Avec émerveillement et patience, il nomma ces objets, très tôt les repéra dans le ciel et les dessina (cf. Fig. 1) et voulut en comprendre les mouvements. Il fut surpris de voir certaines étoiles varier régulièrement, telle l'étoile Mira Ceti dans la constellation de la Baleine. La merveilleuse sensibilité à la lumière dont l'évolution avait doté cet œil, dont la pupille, lorsqu'elle est dilatée dans l'obscurité, ne mesure que 8 millimètres de diamètre, lui permettait de distinguer aussi de faibles taches nébuleuses, de la nature desquelles il ignorait tout. Aidé de viseurs de plus en plus perfectionnés (cf. Fig. 2), il mesura des positions avec une précision croissante, des alignements, des angles, il établit des cartes qui n'ont cessé de s'améliorer (cf. Fig. 3). Très tôt encore, il s'interrogea sur les distances qui séparaient la Terre de ces objets célestes, et par de subtiles observations parvint à mesurer la Terre, puis à décider ce que *très loin* voulait dire pour la Lune ou le Soleil, par exemple en terme de l'unité grecque de longueur (le stade). En

Figure 1. Le texte le plus ancien connu (XIII^e siècle avant notre ère), écrit sur une écaille de tortue et faisant état de l'apparition d'une nova, étoile dont l'éclat augmente brusquement. Les caractères en chinois ancien signifient : « Le soir du septième jour, une nouvelle étoile apparut près de l'étoile rouge » (il s'agit d'Antarès dans la constellation du Scorpion).

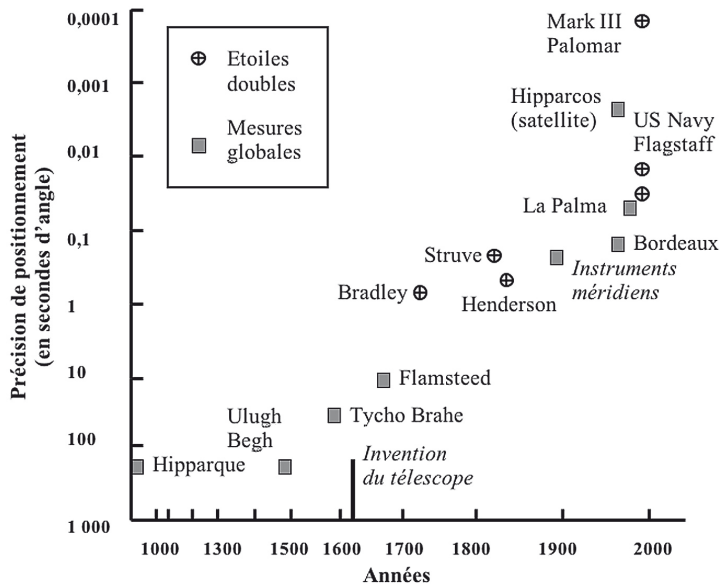
Figure 2. Système de visée à l'œil, appelé quadrant azimutal, utilisé par l'astronome Johannes Hevelius, de trente ans plus âgé qu'Isaac Newton, en 1670. On note sur l'image la présence d'une horloge, la position d'un astre dans le ciel dépendant de l'heure à cause du mouvement diurne de la Terre.



1609, à la veille de la nuit où Galilée pointait la première lunette sur Jupiter ou la Voie lactée, le bilan de l'astronomie faite à l'œil était déjà extraordinaire.

Les lunettes astronomiques augmentèrent la capacité de collecter la lumière, et à la fin du XIX^e siècle leurs lentilles atteignaient un mètre de diamètre. Les télescopes à miroir, plus efficaces, prirent alors le relais, dans une course à l'ouverture qui n'a cessé depuis (cf. Fig. 4), puisqu'une bonne dizaine de télescopes optiques en service en 2009 dépassent huit mètres de diamètre, tandis que la génération suivante, aujourd'hui à l'étude, vise plusieurs dizaines de mètres !

Figure 3. Les progrès dans la cartographie du ciel. La précision de détermination de la position d'un astre sur la carte du ciel fait appel à deux méthodes : ⊕ mesures à courte distance angulaire, par ex. séparation entre les composantes d'une étoile double ; ■ mesures globales de position sur la sphère céleste. Mark III (Californie) est un interféromètre optique.



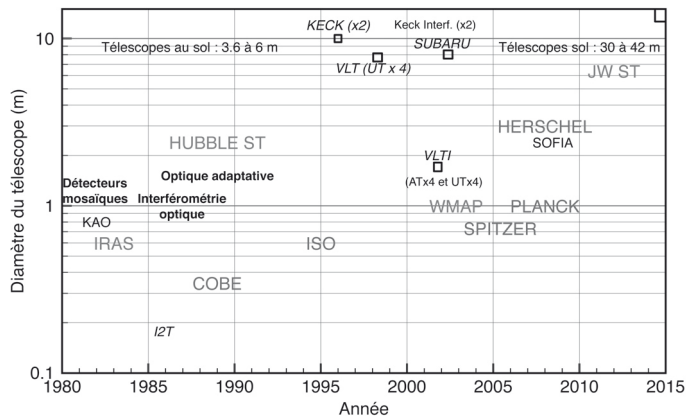


Figure 4. La croissance du diamètre des télescopes, tant au sol que dans l'espace (noms en gris), dans les domaines du visible et de l'infrarouge, depuis 1980.

La lumière et ses propriétés

Newton, le premier, analysant la lumière de l'arc-en-ciel avec un prisme de verre, comprit que la lumière blanche se décomposait en un spectre formé de différentes couleurs ; puis Mariotte et Huyghens comprirent que la lumière ne se limite pas à ce qu'en perçoit l'œil. L'étude de la lumière progressa tout au long des deux siècles qui suivirent : nous nous représentons aujourd'hui la lumière comme une onde, dite électromagnétique, qui se propage dans le vide à grande vitesse (300 000 km/s). Lumière et matière peuvent échanger de l'énergie : un corps matériel chauffé, tel le gaz du Soleil, perd de l'énergie en émettant de la lumière dans l'espace, tandis qu'un corps opaque, par exemple la surface de la Terre, absorbe la lumière solaire et s'échauffe. Ces échanges d'énergie se font par grains, appelés encore *quanta* de lumière ou *photons*. Un corps éclairé peut aussi renvoyer (*diffuser*) la lumière qu'il reçoit, en la modifiant plus ou moins. Ainsi, la plupart des corps célestes – étoiles, nuages de gaz – émettent de la lumière, tandis que d'autres se contentent de diffuser celle qu'ils reçoivent. Cette lumière, émise ou diffusée, va cheminer dans l'espace et parvenir à la Terre après un voyage plus ou moins long – 1 seconde pour la Lune, 8 minutes pour le Soleil, des milliards d'années pour les galaxies les plus lointaines. C'est elle dont les photons, collectés par le miroir des télescopes, interagissent avec notre œil, une plaque photographique ou les détecteurs plus sensibles qui équipent aujourd'hui les instruments. C'est cette lumière qui apporte une grande richesse d'informations sur l'objet qui l'a émise, c'est donc par elle que nous connaissons les profondeurs de l'univers.

La gamme des longueurs d'onde et leur observation

Figure 5. La galaxie d'Andromède observée, de gauche à droite : dans le domaine des rayons X avec le satellite Rosat (crédit : rosat/mpe/NASA) ; dans l'ultraviolet avec le satellite Galex (crédit : Galex/Caltech) ; dans le visible (dss/stsci) ; dans l'infrarouge moyen avec le satellite SPITZER à 24 micromètres (crédit : NASA/JPL-Caltech/K Gordon, University of Arizona) ; dans l'infrarouge lointain (175 micromètres) avec le satellite européen ISO (cf. cahier couleur, planche 5).

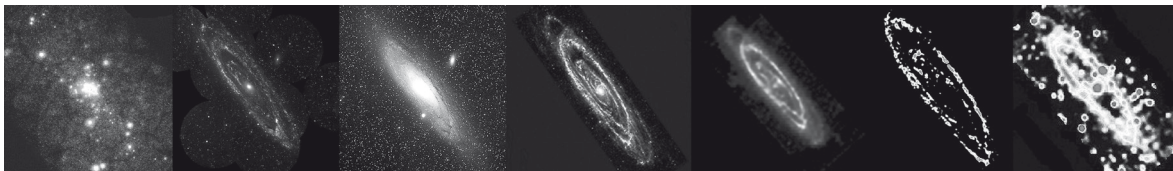
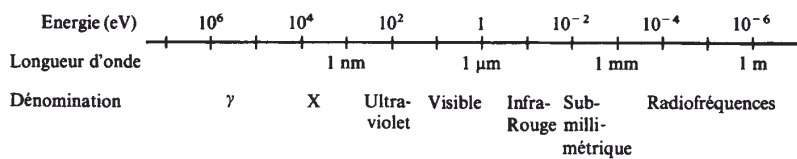


Figure 6. L'étendue du spectre électromagnétique. En bas : la dénomination de chaque domaine spectral. Au milieu : l'échelle des longueurs d'onde. En haut : l'énergie des photons associés, mesurée en unité d'électron-volt (eV). On note la très large gamme d'énergies concernées. Ce spectre se poursuit encore à gauche et à droite du diagramme.



L'EXPLORATION DES LONGUEURS D'ONDE

Avec l'œil, puis la photographie et ses premières applications astronomiques (1850), seules les longueurs d'onde du visible étaient perçues. Mais au cours du XX^e siècle, l'astronomie allait rapidement conquérir l'accès à toutes les longueurs d'onde et en découvrir la richesse, tout d'abord avec la naissance de la radio-astronomie (1933) recevant et mesurant les ondes radio du Soleil et la galaxie.

Comme l'atmosphère de la Terre, cette mince pellicule d'air qui l'entoure, est opaque à la quasi-totalité des longueurs d'onde, il fallut s'élever pour accéder à toutes les autres. Placés sur le sommet de hautes montagnes, les observatoires reçoivent le rayonnement infrarouge ; des télescopes placés sur des avions, des ballons, des fusées à partir des années 1960 observent le ciel en rayons X, dans l'ultraviolet ou le submillimétrique ; les nombreux observatoires

placés récemment dans l'espace, autour de la Terre, sont enfin débarrassés complètement de la nuisance de son atmosphère (cf. Fig. 7). S'il n'était pas si coûteux de placer un observatoire dans l'espace, et parfois si difficile techniquement de lui donner une dimension importante, tous les télescopes y seraient désormais placés et y bénéficieraient de conditions exceptionnelles d'observation.

Un observatoire astronomique rassemble un ou plusieurs télescopes, et les nombreux services périphériques qui sont nécessaires à son fonctionnement. Alors que les observatoires situés à la surface de la Terre sont mis en œuvre par des équipes d'astronomes, d'ingénieurs et de techniciens présents sur place, ceux qui sont placés dans l'espace sont pratiquement toujours automatiques et télécommandés depuis la Terre.

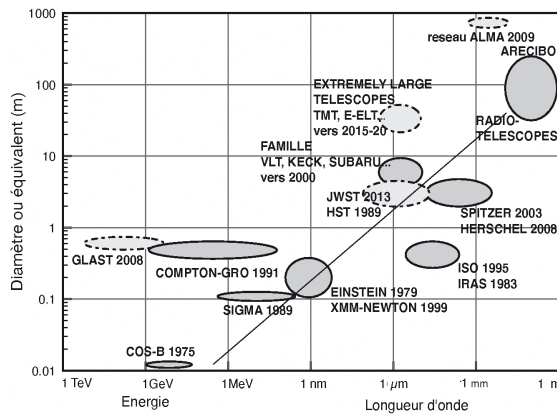


Figure 7. Une vue d'ensemble du progrès de la capacité de collecter la lumière par les télescopes, placés au sol ou dans l'espace dans les dernières décennies. En trait plein : instruments antérieurs à 2007 ; en tireté : instruments à venir. En grisé intense : instruments au sol ; en grisé léger : instruments dans l'espace.

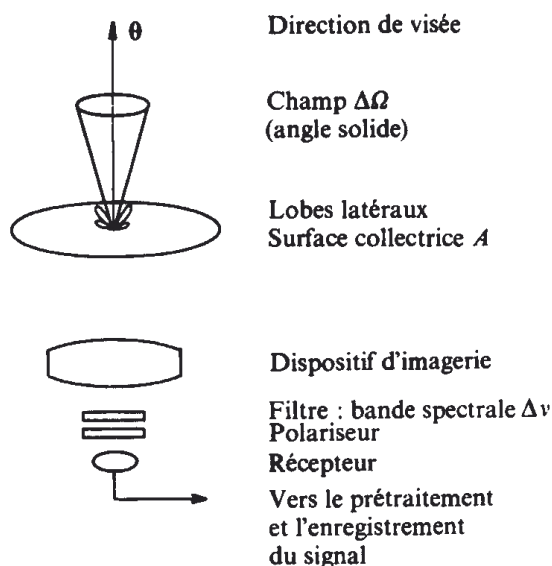
LA LUMIÈRE REÇUE, REFLET DE SA SOURCE

Quel est l'intérêt de recevoir et analyser une pareille gamme de longueurs d'onde ? La réponse est simple : la production de lumière par un objet astronomique et les caractéristiques de cette lumière dépendent de toutes les conditions physiques de cet objet, de sa température et de sa pression, des atomes et molécules qu'il contient, des mouvements qui s'y produisent, des champs magnétiques qui y règnent. Un objet très froid n'émettra que de l'infrarouge, l'atmosphère chaude d'une étoile brillera dans le visible, une violente explosion se traduira par une bouffée de rayonnement X ou γ très énergétique, etc. Il est donc très intéressant d'étudier un même objet astronomique sous toutes ses coutures, c'est-à-dire d'en faire l'image à toutes longueurs d'onde, puisque chacune des lumières reçues de lui apporte une palette d'informations complémentaires, qui après l'observation permettent de reconstruire tout ce qui le caractérise.

Les télescopes et leurs objectifs

Les télescopes modernes sont de puissantes machines, qui recueillent la lumière et en mesurent les propriétés de façon détaillée. Quelle que soit la longueur d'onde d'observation, le principe général est le plus souvent celui-ci : le système optique du télescope forme une image de la région choisie du ciel sur un récepteur de lumière, lequel convertit les photons en un signal numérisé, qui est mis en mémoire pour être analysé par l'astrophysicien (cf. Fig. 8). Dans le détail de la construction, un télescope et ses instruments sont néanmoins réalisés de manière très différente, selon la longueur d'onde d'observation à laquelle ils sont destinés.

Figure 8. Schéma très simplifié d'un système d'observation astronomique : le télescope collecte la lumière sur la surface de son miroir primaire, autour d'une direction de visée et dans un champ déterminé par son optique. Celle-ci produit une image sur un récepteur de lumière, après qu'ait été isolé un certain domaine de longueur d'onde dans le spectre. Le signal est alors envoyé vers un ordinateur pour numérisation et stockage.



La fonction la plus évidente assignée à un télescope est de faire une *image* de la région céleste qu'il observe, et ces images – de planètes, de nuages interstellaires, de galaxies – révèlent au professionnel comme au grand public la diversité et la beauté des objets qui peuplent l'univers. La photographie est aujourd'hui supplantée, à presque toutes les longueurs d'onde, par les récepteurs de lumière photoélectriques, qui transforment directement l'impact lumineux en signal électrique, dont la valeur est stockée sous forme numérique dans une mémoire d'ordinateur, qui peut ainsi retranscrire l'image sur son écran. Les exigences des astronomes sont sans limites, et quatre objectifs leur tiennent particulièrement à cœur : obtenir des images à toutes longueurs d'onde ; détecter dans ces images les objets les moins lumineux possibles, sans que le temps d'observation (le *temps de pose*) devienne prohibitif ; distinguer dans

les images des détails de la plus petite taille possible ; enfin, être en mesure de séparer la lumière reçue selon les longueurs d'onde qu'elle contient, même lorsque celles-ci sont très proches. D'autres objectifs importants découlent plus ou moins des premiers, telle que la possibilité d'observer des objets variables dans le temps, parfois sur plusieurs décennies, parfois en quelques millièmes de secondes.

Ces objectifs vont donc guider la construction des systèmes d'observation, formés du télescope et de ses instruments, en poussant à l'extrême les ressources qu'offre la technologie à un moment donné. Ceci explique aussi pourquoi naissent sans cesse de nouveaux systèmes de performances améliorées, au fil des progrès technologiques et de l'inventivité des concepteurs d'instruments. Les chapitres qui suivent vont donc détailler, l'un après l'autre, ces objectifs.

LA QUÊTE DE SENSIBILITÉ

Le chapitre 2 aborde la réalisation de télescopes de taille croissante, au sol ou dans l'espace, afin de recevoir le plus de lumière possible et d'étudier, soit des objets proches mais très peu lumineux, soit des objets très lointains. Mais à quoi bon disposer d'un grand télescope si le détecteur qui traduit la lumière en signal n'est pas suffisamment sensible ? C'est pourquoi ce chapitre considère simultanément les progrès des télescopes et ceux des détecteurs de lumière, appliqués notamment à quelques-uns des problèmes les plus passionnants de la cosmologie.

DES IMAGES RICHES EN DÉTAILS

Chacun sait que nos yeux, tout performants qu'ils soient, ne peuvent distinguer de trop fins détails sur un objet distant. On dit que leur *pouvoir de résolution* est limité. Il en est de même des télescopes, alors que les astronomes voudraient pouvoir discerner sur les objets observés, par exemple la surface des étoiles ou celle des exoplanètes, des détails révélateurs de plus en plus fins. Comment faire ? Augmenter le diamètre d'un télescope permet de collecter plus de lumière, mais il se trouve que cela améliore aussi sa capacité de résolution : on fait, en somme, d'une pierre deux coups. Et comme des limitations techniques ne permettent pas de construire des télescopes faisant plusieurs centaines de mètres de diamètre, ou davantage encore, il fallut inventer le moyen de contourner cette limite, en organisant des *réseaux de télescopes*. Le chapitre 3 décrit donc comment s'est déroulée cette course à la finesse et

jusqu'où elle a conduit aujourd'hui. Toutefois, l'amélioration de la résolution avec le diamètre n'est pas toujours acquise, parce qu'à la surface de la Terre, la finesse des images données par un grand télescope est gravement perturbée par les défauts que crée la traversée de l'atmosphère de la Terre par la lumière. Heureusement, des méthodes ont été inventées pour pallier, au moins en partie, à ces fâcheuses dégradations et ces systèmes d'optique adaptative équipent aujourd'hui avec succès nombre de grands télescopes.

L'ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE

La façon dont la lumière, émise par un objet particulier, se répartit selon les longueurs d'onde est caractéristique, nous l'avons dit, d'un grand nombre de propriétés de cet objet, lesquelles intéressent fortement les astronomes. *L'analyse spectrale* (ou *spectroscopique*) de la lumière est donc l'objet du chapitre 4, qui en décrit les outils et quelques-uns des résultats. Parmi leurs innombrables succès, les raffinements des outils d'analyse spectrale ont joué un rôle décisif en 1995 dans la découverte de la première planète extrasolaire, et des centaines de découvertes d'objets semblables qui ont suivi.

Une nouvelle astronomie

Avec ces trois chapitres, le lecteur aura fait le tour des outils de l'astronomie classique, celle qui a prolongé l'œil par des télescopes de plus en plus grands, des récepteurs de plus en plus sensibles et des longueurs d'onde invisibles devenues accessibles à l'observation. Néanmoins, il n'aura pas rencontré encore ce que l'on appelle parfois la *nouvelle* astronomie. D'autres signaux physiques, qui ne sont pas de la lumière, se propagent en effet dans l'espace après être issus des objets célestes. On connaît depuis longtemps les météorites, petits grains de poussière qui nous viennent de l'espace et donnent les étoiles filantes. Depuis un siècle, d'autres particules de matière – atomes, protons, électrons – se sont manifestées sous une forme élémentaire, bombardant en permanence la Terre et détectables. On les appelle *rayons cosmiques* et leur étude nous a beaucoup appris. Bien que ces particules cosmiques et le rayonnement lumineux gamma soient de nature physique différente, leurs énergies sont très semblables. On les associe souvent sous le terme d'*astro-particules* tant les méthodes de détection et le rôle que joue à leur égard l'atmosphère terrestre sont souvent proches.