

# L'EXTENSION DE L'UNIVERS MESURÉ

PAR

M. ANDRÉ COUDER

délégué de l'Académie des Sciences

---

L'Astronomie est riche d'un long passé et son état actuel est une exubérante floraison. Écrire son histoire, c'est retracer une partie importante de l'aventure intellectuelle de l'humanité. Ce que je vais tenter est beaucoup plus modeste et, de ce fait, paraîtra peut-être moins téméraire. Les astres peuvent être étudiés sous de nombreux points de vues; je me propose seulement de raconter les efforts qu'on a faits pour mesurer leurs distances. Dans ce récit, nécessairement bref et partiel, je me garderai de séparer les résultats des méthodes qui les ont procurés. Cet exemple particulier suffira, je l'espère, à montrer combien ont changé les buts et les moyens de la recherche selon les âges et les hommes. Ainsi une harmonieuse unité est précisément ce que vous ne devez pas attendre, — mais la plus belle cathédrale n'a-t-elle pas une crypte carolingienne, une nef romane et, plus haut, un chœur flamboyant?

La science antique n'évoluait pas vite; pour en représenter un certain état, une vue instantanée n'est pas nécessaire si on ne cherche pas les détails. Nous examinerons donc synoptiquement une période

de l'astronomie grecque qui va du III<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ au II<sup>e</sup> siècle de notre ère. Cet intervalle de cinq cents ans qui commence à Eratosthène, s'achève avec Claude Ptolémée et qui comprend l'œuvre d'Hipparque, est marqué par des acquisitions importantes. D'abord la mesure de la Terre, dont la forme sphérique était déjà connue des vieux pythagoriciens. Tout comme les modernes, les anciens ont mesuré la distance itinéraire de deux points d'un même méridien ainsi que la différence de leurs latitudes. Comparer leurs résultats aux nôtres est assez difficile, car leurs mesures sont exprimées en unités mal définies et diverses. Sous cette réserve, si on adopte les valeurs du stade ou de la coudée considérées comme les plus vraisemblables par les érudits, on trouve que les anciens ont surévalué la grandeur de la terre de quelque 15 ou 20 %. Cette erreur n'est pas telle qu'elle puisse empêcher de philosopher correctement. Je dirai tout à l'heure que les astrophysiciens d'aujourd'hui souhaiteraient connaître toujours avec pareille exactitude les distances qu'ils mesurent, bien plus grandes il est vrai.

L'astre le moins inaccessible est la Lune; elle est seulement à une portée de fusée. Les Grecs connaissaient trois procédés pour comparer sa distance au rayon terrestre. D'abord viser la Lune de deux points éloignés de notre globe; ils ne paraissent pas l'avoir employé. Cet autre moyen devait être préféré par des gens casaniers mais ingénieux : construire un triangle qui a pour sommet un observateur sédentaire et pour base deux positions bien déterminées de la Lune sur son orbite, positions que je ne préciserai pas, faute de temps. L'étude des éclipses fournissait un troisième procédé. Les Anciens s'intéressaient beaucoup aux éclipses, surtout aux éclipses de Lune, qui sont, comme chacun sait, plus fréquemment observables dans un lieu donné que celles du Soleil. La prédiction détaillée des éclipses de Lune est relativement facile; les astronomes grecs la réalisaient fort bien, et en recueillaient un grand prestige sans trop de peine. Le temps que la Lune met à pénétrer dans l'ombre de la terre et le temps qu'elle y reste sont deux données qu'une clepsydre peut fournir assez exactement. Si on y joint la mesure de l'angle soustendu par le disque apparent du Soleil et de la Lune, on a, en principe, tout ce qu'il faut pour évaluer la distance et la grandeur des deux astres rapportées au diamètre de la Terre. Cette méthode élégante est mauvaise en fait parce que l'ombre de la Terre n'est pas une ombre géométrique : elle est éclairée, grossie,

estompée par notre atmosphère. Malgré cela, les Grecs ont déterminé avec une exactitude surprenante la distance moyenne de la Lune et son diamètre.

Au contraire, les tentatives qu'ils ont faites pour évaluer la distance du Soleil ont complètement échoué. Au début de la période que nous considérons, Aristarque avait cru prouver que le Soleil est vingt fois plus éloigné de nous que la Lune; — il l'est en réalité quatre cents fois. Jusqu'au xvi<sup>e</sup> siècle, on a persisté à croire le Soleil vingt fois moins loin qu'il n'est. Ainsi, l'Univers correctement mesuré par les astronomes grecs se limitait à l'orbite de la Lune, soit à quelque 400 000 kilomètres.

Au reste, les Anciens n'ont jamais dressé un plan correct du monde planétaire. Ils se proposaient de représenter la direction où l'on observe les astres mobiles dans le champ des étoiles; ils y parvenaient par certaines constructions géométriques donnant assez correctement les positions angulaires, mais non les distances. Dès le siècle de Périclès, Philolaüs savait que ces constructions sont équivalentes, soit qu'on place la Terre au centre de l'épure, soit qu'on y mette le Soleil. Jusqu'au xvi<sup>e</sup> siècle, les astronomes, à la quasi-unanimité, y compris le grand Tycho Brahé, ont préféré la représentation géocentrique. Fontenelle explique la persistance de ce choix malheureux en disant à la marquise, son élève : « La même inclination qui fait qu'on veut avoir la place la plus honorable dans une cérémonie, fait qu'un philosophe, dans un Système, se met au centre du monde, s'il peut. »

Il a fallu attendre que soit constituée la Dynamique, c'est-à-dire que Newton vint, pour que le système héliocentrique apparaisse une obligation logique.

♦♦

L'esprit moderne, qui ne se contente plus de représentations empiriques partielles, mais s'efforce vers une synthèse cohérente, apparaît dans le grand livre de Copernic, imprimé en 1543. Le premier, Copernic place les planètes autour du Soleil, chacune à la distance qui convient en valeur relative. Il construit ainsi un plan correct de notre système, auquel manque toutefois l'indication de l'échelle à laquelle il est tracé. Pour fixer cette échelle, il suffit de comparer la distance de deux points quelconques marqués sur le plan à une unité de

longueur déjà connue, par exemple le rayon terrestre. L'opération trigonométrique est évidemment d'autant plus sûre que la distance est moindre. En septembre 1672, Mars devait se trouver proche de la Terre. Une campagne d'observation fut organisée par l'Académie des Sciences. Tandis que Picard et Røemer restaient à Paris, Richer était allé planter son observatoire à Cayenne. Cassini préféra une variante heureuse : comparer entre elles des visées faites au début et à la fin de la nuit. Dans cet intervalle de temps, la rotation terrestre déplace l'observateur autant que peut le faire un long voyage, mais sans frais et sans peines. Les observations recueillies, combinées entre elles de diverses manières, permirent plusieurs évaluations indépendantes de la distance de la Terre à Mars, et par conséquent au Soleil. Les meilleures sont d'une précision admirable pour l'époque : l'erreur est seulement de 5 à 8 % par défaut. On déduit immédiatement la distance au Soleil de Saturne, la plus lointaine des planètes alors connues, soit un peu moins d'un milliard et demi de kilomètres, nouvelle limite du monde mesuré par nos habiles confrères de 1672. Trois ans plus tard, Røemer avait déterminé, par l'observation des satellites de Jupiter, le temps mis par la lumière à parcourir le rayon de l'orbite terrestre; ce rayon étant connu, la mesure absolue de la vitesse de la lumière en découle. Ainsi fut acquise la première évaluation d'une grandeur physique fondamentale.

Le xvii<sup>e</sup> siècle, qui s'est ouvert par les travaux de Képler et de Galilée, et qui s'est clos par ceux de Newton, qui vit naître l'optique instrumentale, la cinématique et la dynamique célestes, exécuter, parmi bien d'autres, les travaux que j'ai rappelés, peut, dans l'histoire de l'Astronomie aussi, être appelé un grand siècle.

\*  
\*\*

Jusqu'à l'époque où nous sommes parvenus, le grand problème de la distance des étoiles offrait une difficulté trop grande pour être utilement abordé : les astronomes, soucieux d'efficacité, s'attachaient à des entreprises plus certainement fructueuses. Ce sont les progrès faits au xvii<sup>e</sup> siècle dans la construction des instruments qui vont rendre l'espoir, et par conséquent le zèle, aux observateurs. Je ne puis pas esquisser ce chapitre d'histoire sans prononcer et définir un mot technique : la parallaxe. C'est l'angle dont change la position appa-

rente d'une étoile lorsque l'observateur se déplace transversalement d'une longueur égale au rayon de l'orbite terrestre. Cet angle étant mesuré, la distance de l'étoile est de ce fait comparée à un terme connu. La parallaxe est toujours extrêmement petite et vous devez vous représenter l'astronome arpentant les espaces célestes comme occupé en réalité, à compter des millièmes de millimètre au foyer de sa lunette.

En 1727, Bradley, ayant fait choix d'une heureuse méthode — l'observation d'une étoile passant près du zénith de son observatoire — et pourvu d'un excellent instrument, réussit à mettre en évidence un déplacement apparent de période annuelle. Mais l'effet observé se présentait avec un retard de trois mois sur l'effet escompté de la parallaxe. Bradley comprit immédiatement qu'il s'agissait de tout autre chose : la direction où l'on voit une étoile est altérée du fait que la vitesse de la lumière n'est pas infinie, mais seulement 10 000 fois plus grande que la vitesse orbitale de la terre. En découvrant ce qu'on appelle l'aberration de la lumière, Bradley corroborait magnifiquement la mesure de Røemer. Il se remit au travail, et cette fois pour vingt ans. En 1747, il avait mis en évidence la nutation, c'est-à-dire un mouvement de l'axe de rotation de la terre qui a pour période dix-huit ans et sept mois, autre découverte capitale. Ainsi, Bradley a trouvé tout autre chose que ce qu'il cherchait. — La rencontre de l'imprévu est l'un des charmes de la recherche scientifique.

Vers 1780, Herschel, ayant construit de ses mains des télescopes d'une puissance inconnue avant lui, fit le raisonnement suivant. De deux étoiles d'éclats apparents très différents, on peut parier que la plus brillante est la plus proche; elle aura peut-être une parallaxe appréciable, l'autre non. Or la mesure de la distance angulaire de deux étoiles visibles ensemble dans le champ de l'instrument est susceptible d'une grande précision : le déplacement relatif mesurera la parallaxe de l'étoile brillante. Malgré son assiduité célèbre, Herschel n'a pas mesuré une seule parallaxe, mais il a fait une magnifique découverte, celle des étoiles binaires, c'est-à-dire d'étoiles associées par couple, tournant l'une et l'autre autour de leur barycentre commun, et prouvé ainsi que la gravitation newtonienne impose sa loi à un univers bien plus vaste que le monde solaire où elle a été découverte.

Le meilleur roman à « suspenses » doit aboutir à un dénouement; j'y arrive. Nous sommes à Kœnigsberg, en 1838; l'Observatoire est

dirigé par un grand astronome et grand mathématicien, Bessel. Il dispose d'un instrument, construit par le célèbre opticien Fraunhofer, mieux adapté aux mesures angulaires que les télescopes de Herschel; reste à bien choisir l'étoile à étudier. Celle qui a été cataloguée par Flamsteed dans la constellation du Cygne sous le N° 61 retient l'attention parce qu'elle s'est appréciablement déplacée dans un intervalle de cent cinquante ans. Ce mouvement angulaire exceptionnel peut s'interpréter de deux manières : ou bien il est l'indice d'une grande vitesse propre, ou bien il est l'effet d'une relative proximité. Bessel opte pour la seconde hypothèse et commence une série de mesures, prenant comme repères les étoiles voisines dans le champ. Après un an, il peut enfin annoncer la première détermination d'une parallaxe stellaire. Elle vaut un tiers de seconde de degré; autrement dit, l'étoile est 600 000 fois plus éloignée que le Soleil; la lumière met onze ans pour venir d'elle à nous.

Cette éclatante réussite a ranimé le zèle des astronomes — et élevé leurs demandes de crédits financiers. Les grands instruments mis en service durant les trois derniers quarts du XIX<sup>e</sup> siècle sont avant tout destinés à l'étude des étoiles doubles et à la mesure des parallaxes. A partir de 1880, la photographie est venue étendre le domaine de l'observation visuelle. On a mesuré aujourd'hui par la méthode directe les parallaxes de quelques milliers d'étoiles. Une dizaine d'entre elles, seulement, surpassent celle de 61 Cygne; le choix de Bessel était donc très judicieux.

Malheureusement, la médiocre qualité optique de l'atmosphère terrestre limite à un centième de seconde de degré la précision de nos visées angulaires; une parallaxe à laquelle nos mesures assignent cette valeur peut, en réalité, être nulle ou double. Ainsi les mesures directes perdent toute signification à une distance qui vaut vingt millions de fois celle du Soleil; la lumière la parcourt en trois cent vingt-cinq ans. Telle était l'étendue du domaine arpenté vers le début de notre siècle. Depuis ce temps, de nouvelles méthodes ont été élaborées, fondées, non plus seulement sur l'étude des mouvements apparents des astres — l'Astronomie de position, ou Astrométrie — mais sur la mesure et l'analyse de leur rayonnement, c'est-à-dire de l'Astrophysique. Les méthodes nouvelles, dont je vais tenter l'esquisse, ont prodigieusement accru la portée atteinte, mais il faut souligner dès maintenant qu'elles ont toutes pour base les données numériques acquises par la mesure

directe des positions, qu'on exige de plus en plus sûre; c'est donc à juste titre que l'Astrométrie est aussi appelée l'Astronomie fondamentale.

Le Soleil n'est qu'une étoile parmi beaucoup d'autres, que nous avons seulement la chance d'observer d'assez près; cela, on l'avait imaginé depuis longtemps. Fraunhofer le prouva enfin en 1814 lorsqu'il créa l'analyse spectrale, et découvrit l'analogie du spectre du Soleil avec celui de certaines étoiles. On peut donc se poser le problème suivant. Sachant que l'éclairement produit par une source varie en raison inverse du carré de la distance, à quelle distance faudrait-il mettre le Soleil pour qu'il nous éclaire autant — je veux dire aussi peu — que telle étoile donnée? La difficulté expérimentale de comparer des éclats apparents aussi différents est très grande et elle n'est surmontée que depuis peu; mais que signifie le résultat trouvé si nous ne sommes pas assurés que l'étoile proposée a le même éclat intrinsèque que le Soleil? Or nous savons de façon certaine que les éclats intrinsèques des étoiles peuvent être prodigieusement différents, aussi différents que le sont une simple bougie et le grand phare de l'île d'Ouessant. Pouvoir apprécier l'éclat intrinsèque d'une étoile ou — comme l'on dit lorsqu'on utilise une échelle logarithmique — déterminer sa magnitude absolue, est l'un des objets les plus importants des recherches de l'Astrophysique. Voici deux exemples :

Il existe des étoiles qui offrent une variation périodique d'éclat; leur intensité est représentée par une courbe régulière dont l'étoile  $\delta$  Céphée offre le spécimen le plus anciennement connu. Au cours de la période, les caractères du spectre se modifient, et le déplacement des raies suggère un gonflement périodique de l'astre; on les appelle étoiles pulsantes. Connaissant la parallaxe de quelques-unes d'entre elles, on en peut déduire leur magnitude absolue. Miss Leavitt montra en 1912 que la période de pulsation est liée par une loi simple à la magnitude absolue de l'astre. Si donc nous pouvons mesurer l'éclat apparent et la période d'une Céphéide, sa distance peut être conclue. Comme ces astres sont intrinsèquement très brillants, on les voit de loin, et la méthode a une grande portée. Mais voici une mésaventure : depuis peu d'années, on s'est aperçu que la classe des étoiles pulsantes n'est pas homogène et, qu'à période égale, certaines étoiles sont quatre fois plus brillantes que les vraies Céphéides, avec lesquelles on les avait d'abord confondues. Pour une magnitude apparente donnée.

elles sont donc deux fois plus éloignées. Il a fallu doubler les évaluations primitivement adoptées.

L'étude des spectres stellaires permet, d'autre part, de déterminer l'éclat intrinsèque. Les raies spectrales qui caractérisent un élément donné révèlent, outre la composition chimique, les conditions d'excitation : à une température donnée, certaines raies apparaissent seulement si la pression est faible, donc si l'étoile est de faible densité et de grand volume. Je ne puis insister : il suffit qu'on conçoive possible de tirer de l'examen des spectres un critère de magnitude absolue. Je dois aussi me contenter de faire mention d'une difficulté grave. L'espace compris entre les étoiles n'est pas vide; il contient une certaine quantité de matière — grains de poussières ou atomes libres — qui absorbe une partie importante de la lumière des astres très lointains. Si l'on ne tenait compte de cette absorption, on commettrait dans l'évaluation de leur distance, une forte erreur par excès comme nous surestimons la distance d'une lampe vue à travers la brume. J'arrive au résultat cherché, qui est la mesure de la Galaxie.

Le plan de cette immense agglomération d'astres dans laquelle nous sommes plongés avait été entrevu par Herschel. La mise en service des grands télescopes américains, à partir de 1908, et l'amélioration des plaques photographiques d'autre part, ont progressivement révélé la répartition et la distance des divers constituants. Toutefois, maints détails de structure nous sont masqués par l'absorption du rayonnement dans l'espace interstellaire. On s'est aperçu que les étoiles de tel type bien défini apparaissent d'autant plus rouges qu'elles sont plus éloignées. Lorsque la longueur d'onde est plus grande, l'absorption est plus faible, et la portée de nos observations s'accroît. Des progrès capitaux ont été réalisés lorsqu'on a pu disposer de plaques photographiques très sensibles au rouge et à l'infra-rouge. On peut attendre plus encore de la réception des ondes électromagnétiques beaucoup plus longues, de l'ordre de celles qui portent nos télécommunications. La Radioastronomie s'est développée depuis 1940; depuis 1948, on étudie des sources isolées, véritables astres radioélectriques; depuis 1951, Oort et ses élèves, observant sur la longueur d'onde 21 centimètres émise par l'atome d'hydrogène, ont pu préciser des détails de structure que l'observation optique ne peut déceler. Enregistrons seulement quelques résultats numériques : le diamètre de la Galaxie surpasse trois cents fois la portée de la mesure directe des

parallaxes; il est tel que la lumière met cent mille ans à le parcourir. Le soleil se trouve à une distance du centre un peu supérieure à la moitié du rayon, dans une région où les étoiles sont relativement espacées. L'ensemble est fortement aplati puisque son épaisseur maxima n'excède pas le sixième du diamètre.



Nous allons maintenant faire un nouveau bond, le dernier, mais le plus grand dans l'échelle des distances aujourd'hui mesurables, celles des nébuleuses. Parmi ces astres étendus, aux contours estompés, il en est qui sont des masses gazeuses appartenant à notre Galaxie; d'autres, de forme lenticulaire, offrant souvent une structure spiralée, rayonnent comme le feraient d'immenses agglomérations d'étoiles. La plus grande et la plus brillante est visible à l'œil nu dans la constellation d'Andromède. On soupçonnait depuis longtemps que les nébuleuses spirales sont d'autres galaxies semblables à celles où nous sommes plongés, mais on n'en avait aucune preuve. En 1917, le doute cessa : les étoiles temporaires ou *novae* que Ritchey, d'une part, Curtis d'autre part, découvrirent sur leurs clichés, offraient un éclat trop faible pour qu'on puisse les supposer à l'intérieur de notre système. Hubble chercha des étoiles pulsantes et en trouva une cinquantaine; il put appliquer la méthode de mesure indirecte que j'ai résumée tout à l'heure. Ses mesures, bien cohérentes, étaient toutefois entachées d'une erreur systématique dont j'ai dit un mot. Toutes corrections faites, nous devons admettre que la lumière qui nous parvient chemine depuis un million et demi d'années.

La nébuleuse d'Andromède est l'une des spirales les plus proches de nous. Mais le ciel fourmille littéralement d'objets de même nature, que leur éloignement nous fait apparaître minuscules. En comptant jusqu'aux plus faibles que le grand télescope du Mont Palomar puisse photographier, on pourrait sans doute en dénombrer plus de cinq cents millions. Leur énorme distance peut être évaluée en discutant des mesures photométriques. On sait maintenant que l'éclat intrinsèque d'une spirale, qui renferme des milliards d'étoiles, n'est pas une grandeur aussi follement variée que l'éclat intrinsèque d'une étoile isolée, car la loi des grands nombres entre en jeu. Si tel de ces faibles objets nous paraît un million de fois moins brillant qu'une autre

spirale, dont la distance est connue, on peut le supposer mille fois plus éloigné. C'est ainsi qu'on estime à deux milliards d'années le temps de parcours de la lumière venant des nébuleuses les plus lointaines que nous photographions.

En raisonnant ainsi, nous supposons implicitement que l'espace inter-galactique n'est pas absorbant. Or, il y a quelques années, Zwicky a photographié au Mont Palomar des traînées de matière faiblement lumineuse flottant entre des spirales, et qui leur paraissent associées. Il doit donc exister aussi de la matière obscure et absorbante. Dans ce cas, il faudra rabattre de nos évaluations. En revanche, nous pouvons compter que l'observation photoélectrique, qui tend à se substituer à l'observation photographique, va sûrement nous permettre de voir plus loin. Quant à l'émission radioélectrique des spirales, elle n'est pas encore assez bien connue pour permettre de pronostiquer le gain à espérer.

Après avoir énoncé le chiffre qui exprime la profondeur de l'espace actuellement sondé, il me faut ajouter la clause : sauf erreur ou omission. Cette formule n'exprime pas ici l'appréhension mais au contraire un souhait; car, dans les sciences, la correction d'une erreur est le fruit d'un progrès technique, et celle d'une omission est une découverte.