



À la *mesure* du Ciel

Ce feuilletton est consacré à l'une des disciplines sans doute les plus méconnues sinon les plus austères de l'astronomie : l'astrométrie ou la mesure de la position des astres dans le ciel. Elle est aussi l'une des premières activités des astronomes de l'Antiquité. Elle est au fondement de l'astronomie. Sans elle et sans le gain en précision associé à cette branche, acquis au fil du temps jusqu'à nos jours, l'astronomie n'aurait pu se développer. Il était donc urgent de revenir aux racines de l'astronomie.

— par Pascal Descamps

DANS LA MESURE DE L'IMPOSSIBLE

La fin de l'histoire

NOUS ARRIVONS au bout de la route de ce feuilleton consacré à cette discipline méconnue et sous-médiatique de l'astronomie qu'est l'astrométrie. C'est l'occasion de se poser pour revenir sur les grandes étapes de cette histoire et en dresser le bilan tel qu'il se présentait à la fin du siècle dernier, à un moment auquel certains astronomes pensaient « qu'aucune amélioration majeure n'était possible ». La messe semblait être dite.

En moins de 2000 ans, la précision de la fixation des étoiles sur la sphère céleste s'est améliorée d'un facteur 24 000 – soit près de 5 ordres de grandeur (chaque fois qu'un ordre de grandeur est franchi, la précision est dix fois meilleure que précédemment) –, passant de 20' de degré dans l'*Almageste* de Ptolémée au II^e siècle de notre ère à 0,06" vers la fin des années 1980.

Depuis l'Antiquité, quand Hipparque dresse le premier catalogue d'étoiles de l'histoire (voir l'[épisode 2 : « À la recherche du catalogue perdu d'Hipparque »](#) paru dans la Lettre d'information de mars 2023), jusqu'au xx^e siècle, la mesure des positions célestes est toujours au cœur des préoccupations des astronomes. Position rime avec précision, l'une ne peut aller sans l'autre. La quête de précision est ainsi sous-jacente à la recherche des positions.

Pendant très longtemps, les mesures sont faites à l'aide de grands instruments métalliques en forme de compas géants munis d'un limbe divisé en fractions d'angle. Il s'agit de sextants et de quadrants – dont le limbe couvre respectivement un anneau de soixante et quatre-vingt-dix degrés – conçus pour mesurer les angles entre des paires d'étoiles. Dans un premier temps, de rapides progrès en la matière sont obtenus simplement en dressant d'immenses instruments avec des secteurs angulaires de rayon croissant. Ainsi, la dissection des angles et leur inscription sur les limbes annulaires se font de plus en plus précisément. L'exemple le plus saisissant de cette démesure instrumentale est donné par Ulugh Beg, petit-fils du conquérant mongol Tamerlan, qui construit en 1428 à Samarkand un sextant de trente-six mètres de rayon, placé en arc de cercle entre des murs de marbre (voir l'[épisode 3 : « L'Île aux étoiles de Tycho »](#) paru dans la Lettre d'information d'avril 2023). Avec des positions d'étoiles précises à environ 20' de degré près, le catalogue d'étoile qu'il tire de ses observations est généralement considéré comme le plus grand catalogue d'étoiles à côté de ceux d'Hipparque et de Tycho Brahe (fin xvi^e siècle, voir l'[épisode 3 : « L'Île aux étoiles de Tycho »](#) paru dans la Lettre d'information d'avril 2023).

Mais cette course en avant instrumentale atteint rapidement ses limites, celles imposées par les structures elles-mêmes, trop lourdes pour supporter leur propre poids sans se déformer. La seule

façon de progresser repose dès lors sur l'art de diviser un secteur angulaire de rayon donné de la façon la plus fine et la plus précise possible. L'obstacle est purement technique. Tycho Brahe, dont les observations ont servi de base aux lois de Kepler sur le mouvement des planètes, est le premier à s'y confronter sérieusement à la fin du XVI^e siècle (voir l'[épisode 3 : « L'Île aux étoiles de Tycho »](#) paru dans la Lettre d'information d'avril 2023). Il développe toute une gamme d'instruments dans son somptueux observatoire d'Uraniborg, sur l'île danoise de Hven, construit sous le patronage de Frédéric II, roi du Danemark et de Norvège, dont son grand quadrant de sept mètres de rayon. Il fait reculer les limites de la précision des mesures à environ 20" de degré. L'adjonction d'un micromètre filaire muni d'une lunette astronomique à la fin du XVII^e siècle ouvrira également une branche nouvelle de développements techniques qui contribueront à effectuer les lectures les plus précises possibles des limbes gradués (voir l'[épisode 4 : « Des lentilles et des hommes »](#) paru dans la Lettre d'information de mai 2023). Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, l'art de graduer les échelles circulaires en subdivisions de plus en plus fines fait l'objet de recherches intensives, mais menées en grande partie dans le secret, car la compétition fait rage entre les constructeurs d'instruments. La diffusion des méthodes pratiques s'est accélérée lorsque le *Board of Longitude*, créé en Angleterre en 1714 pour résoudre le problème de la détermination de la longitude en mer, persuade John Bird de publier ses méthodes en 1767. Au cours des décennies suivantes, Jesse Ramsden et Edward Troughton continuent de faire progresser les mesures angulaires (voir l'[épisode 7 : « Diviser pour mieux mesurer »](#) paru dans la Lettre d'information de septembre 2023). Vers la fin du XVIII^e siècle, les progrès de l'instrumentation permettent d'atteindre une précision de quelques secondes d'arc.

En parallèle aux progrès instrumentaux, souvent l'œuvre d'artisans professionnels, les astronomes font évoluer de leur côté les méthodes d'observa-

tion de position en concevant et développant les observations méridiennes. Ces observations sont effectuées à l'aide d'instruments muraux fixés dans le plan du méridien – cercle imaginaire perpendiculaire à l'équateur céleste et à l'horizon. Tycho Brahe en est l'un des promoteurs les plus fameux avec son grand quadrant méridien (voir l'[épisode 3 : « L'Île aux étoiles de Tycho »](#) paru dans la Lettre d'information d'avril 2023). Fixées à l'horizon local, les étoiles semblent dériver au-delà du méridien local au fur et à mesure que la Terre tourne : cela permet d'obtenir une partie des coordonnées de l'étoile (l'ascension droite qui est l'équivalent de la longitude géographique sur la Terre) à partir du relevé du moment de son passage par le méridien du lieu, et l'autre partie (la déclinaison qui est l'équivalent de la latitude géographique) à partir de l'instrument gradué lui-même. Ces instruments sont ensuite remplacés par les cercles méridiens au XIX^e siècle, constitués d'un axe horizontal orienté selon la direction est-ouest et reposant sur des supports fixes, autour duquel un télescope monté à angle droit tourne librement (voir l'[épisode 9 : « L'Observatoire-factory »](#) paru dans la Lettre d'information de novembre 2023). Bien qu'arbitraire, le chiffre symbolique d'une seconde d'arc est désormais à portée de vue : il sera atteint vers la fin du XIX^e siècle. Près d'un ordre de grandeur supplémentaire sera encore conquis à l'aube des années 1990 après l'introduction de nouvelles techniques, comme la photographie et les micromètres photoélectriques (voir l'[épisode 10 : « Le ciel à la carte »](#) paru dans la Lettre d'information de décembre 2023).

À l'ère moderne, en 400 ans depuis Tycho Brahe, la précision est améliorée d'un facteur d'environ 250 et le nombre d'étoiles mesurées est quasiment augmenté dans les mêmes proportions (voir fig.1).

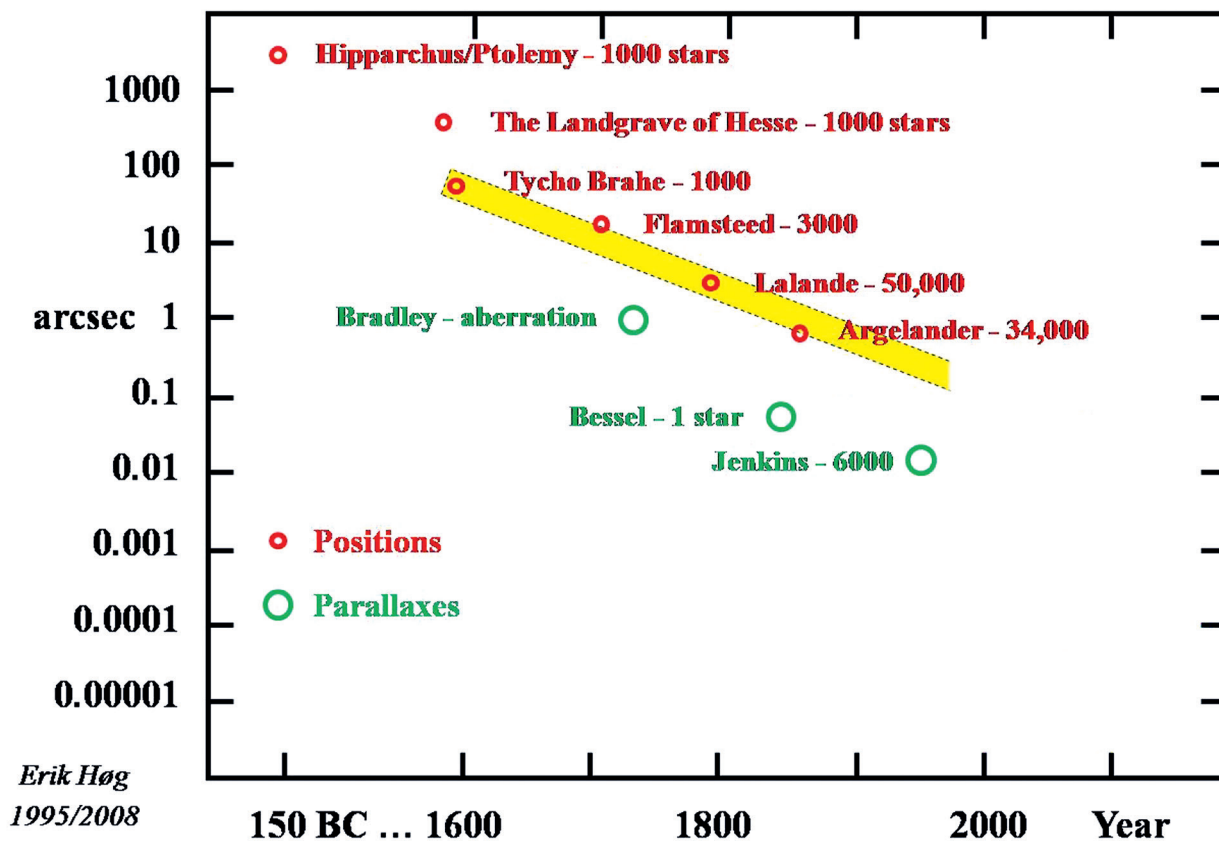


Fig. 1 – Évolution de la précision astrométrique, positions et parallaxes, depuis Tycho Brahe jusqu'à la veille des missions astrométriques spatiales.

D'après Høg, 2010

Quand la bulle de savon éclate

OUTRE LES POSITIONS des objets célestes sur la sphère céleste, les astronomes et les philosophes ont également cherché à se représenter le monde – l'Univers – en développant des conceptions cosmologiques. Cela passait par la connaissance des distances et des tailles des objets célestes.

Après les réalisations remarquables des Grecs de l'Antiquité, notamment leurs premières estimations de la taille et de la distance du Soleil et de la Lune, le récit s'intensifie à la clôture du Moyen Âge. Dans son ouvrage majeur *De la docte ignorance* (1440), le cardinal Nicolas de Cues (1401-1464) est le premier à affirmer « l'intermination » – à défaut de son infinité – de l'Univers et par conséquent à re-

mettre en question le concept de monde clos ou de *cosmos* cher aux Grecs, exception faite des atomistes Épicure et Lucrèce, dont le *De rerum natura* n'est découvert qu'en 1417. Ainsi, selon de Cues, « il est clair que cette terre se meut véritablement, bien que ce mouvement ne nous soit pas apparent. Car nous n'appréhendons pas le mouvement si ce n'est pas une certaine comparaison avec [quelque chose] de fixe ». Cependant, l'Univers peut toujours être terminé par de jolies sphères cristallines qui portent les étoiles – la sphère des fixes –, mais cette sphère doit être fort épaisse, c'est ce qu'implique le monde de Copernic qui résulte de l'hypothèse héliocentrique. Pour Copernic, le monde des étoiles fixes est non mesurable, si grand que la Terre, comparée aux cieux, est « comme un point ». Copernic n'a pas besoin d'une sphère des fixes, mais lui donne toutefois une existence et une immobilité dans son *De revolutionibus orbium coelestium* de 1543 : « C'est

assurément le lieu de l'Univers auquel se rapporte le mouvement et la position de tous les autres astres. »

Ce faisant, le monde copernicien s'élargit comparé à celui du Moyen Âge : il est au moins 2000 fois plus grand. L'historien des sciences Alexandre Koyré écrit à ce sujet en 1962 (*Du monde clos à l'Univers infini*) que « la boule du monde, comme une boule de savon à laquelle la compare Kepler, doit enfler avant d'éclater ». Il ne reviendra finalement pas à Copernic de déclarer que la sphère des étoiles fixes n'existe pas et que les astres sont situés à différentes distances de la Terre. Les premiers à franchir le pas sont Thomas Digges (1546-1595) en 1576, puis Giordano Bruno (1548-1600) en 1600. Avant même 1600, les astronomes s'accordent à dire que la preuve cruciale nécessaire pour détecter le mouvement de la Terre est la mesure de la parallaxe trigonométrique, la minuscule oscillation de la position apparente d'une étoile qui résulte du mouvement annuel de la Terre autour du Soleil. C'est la conséquence inévitable de l'hypothèse héliocentrique de Copernic. À moins d'être à une distance infinie, les étoiles dites « fixes » doivent posséder un *déplacement* parallactique. Malgré ses talents d'observateur, Tycho a tenté, sans succès, de détecter le mouvement de parallaxe. Mais les précisions qu'il a obtenues lui ont permis de déduire que les étoiles doivent être plusieurs milliers de fois plus éloignées du Soleil que la Terre.

Commence alors un nouvel effort pour détecter ce petit déplacement, qui n'est qu'une illusion, une apparence, armé de la certitude que l'effet recherché sera minuscule. Il faut pour cela améliorer considérablement la précision des mesures avant de pouvoir mesurer l'effet. L'échauffement est terminé et la course à la mesure de la parallaxe peut commencer.

En 1718, Edmund Halley découvre que les étoiles fixes ont par ailleurs un mouvement réel en propre

dans l'espace, après avoir constaté que trois étoiles brillantes qu'il suit ont changé de position depuis l'Antiquité grecque. À cette occasion, Halley déclare que les étoiles sont au moins 20 000 ou 30 000 fois plus éloignées que le Soleil. On peut également en conclure que les observations les plus précises de l'époque n'ont pas permis de mettre en évidence une parallaxe éventuelle sur ces étoiles. Dès 1728, James Bradley étend cette limite inférieure à au moins 400 000 fois, car l'impossibilité de mesurer la parallaxe annuelle avec ses instruments de précision prouve qu'elle doit être inférieure à une demi-seconde d'arc (voir l'[épisode 7 : « Diviser pour mieux mesurer »](#) paru dans la Lettre d'information de septembre 2023). En ne détectant pas la parallaxe de l'étoile γ Draconis, même au niveau sans précédent d'environ une seconde d'arc, les observations de Bradley constituent la première preuve directe que la Terre se déplace dans l'espace, confirmant ainsi la théorie copernicienne et la découverte par Roemer de la vitesse finie de la lumière 50 ans plus tôt. Elles confirment également l'hypothèse de Newton sur l'immensité des distances stellaires. Les tentatives de mesure de la parallaxe s'intensifient donc. Mais comme les distances des étoiles les plus proches sont encore inconnues, personne ne peut prédire quelle précision angulaire est nécessaire pour que l'effet soit détecté. Il devient urgent d'établir des critères de sélection des étoiles susceptibles d'être proches du Soleil, afin d'éviter de perdre du temps à essayer de mesurer des étoiles lointaines. En 1837, l'Allemand Wilhelm Struve, qui travaille à Dorpat en Russie (aujourd'hui Tartu en Estonie), fait trois suggestions (voir l'[épisode 8 : « La troisième dimension »](#) paru dans la Lettre d'information d'octobre 2023) : l'étoile cible doit être brillante ; elle doit se déplacer avec une grande vitesse angulaire dans le ciel (bien qu'il puisse s'agir d'une étoile qui se déplace rapidement à grande distance, il est plus probable qu'elle soit « proche ») ; et si l'étoile fait partie d'une paire binaire, les deux composantes doivent être bien séparées, d'après le temps qu'elles mettent à orbiter l'une autour de l'autre. Struve dresse alors une liste d'étoiles qui répondent à ces critères. Nos connais-

sances actuelles confirment que les astronomes ont enfin pu sélectionner certaines des étoiles les plus proches sur lesquelles ils ont concentré leurs mesures minutieuses. On avait enfin compris que les distances entre les étoiles peuvent être mesurées en utilisant le mouvement de la Terre autour du Soleil, et on avait repéré les étoiles les plus prometteuses à mesurer en raison de leur proximité probable. Les améliorations apportées à la taille, à la qualité et à la précision des télescopes ont inspiré et motivé cette quête incessante.

Friedrich Bessel est généralement considéré comme le premier à avoir publié une parallaxe pour 61 Cygni (l'étoile volante de Piazzi), à partir d'observations effectuées entre 1837 et 1838. Thomas Henderson publie une parallaxe pour α Centauri en 1839, à partir d'observations effectuées en 1832-1833 au cap de Bonne-Espérance. En 1840, Wilhelm Struve présente sa parallaxe pour Véga à partir d'observations réalisées en 1835-1837. La confirmation que les étoiles se trouvent à des distances très grandes, mais finies, représente un tournant majeur dans la compréhension de l'Univers. John Herschel, alors président de la *Royal Astronomical Society*, félicite les membres d'avoir « vécu pour voir le jour où la ligne de sonde dans l'univers des étoiles a enfin touché le fond ». La lunette utilisée par Struve pour mesurer la parallaxe de Véga se trouve toujours au musée du vieil observatoire de Tartu, en Estonie. L'héliomètre de Bessel, ainsi que l'observatoire et la ville de Königsberg ont cependant été détruits pendant la guerre de 1944-1945.

Les observations visuelles à l'aide d'héliomètres continuent à dominer jusqu'à l'aube du xx^e siècle. Peu à peu, le nombre de distances stellaires augmente. Mais les progrès restent douloureusement lents, et les longues discussions sur les erreurs renforcent la difficulté toujours très grande de la tâche. Pour certains, l'ère de la mesure de la parallaxe des étoiles semble déjà révolue, les astronomes étant à

nouveau, selon les termes de Hirshfeld, « vaincus par l'immensité même du domaine qu'ils [tentent] de cartographier ». Le nouveau moyen de communication qu'est la photographie arrive à point nommé. Jacobus Kapteyn, à Groningue, publie une liste de seulement 58 parallaxes en 1901. Les cercles méridiens de Leyde et de Heidelberg, ainsi que les plaques photographiques de Pulkovo et de Cambridge, portent le total à 365 en 1910. En 1924, Franck Schlesinger (1871-1943) publie son *Catalogue général des parallaxes stellaires*, portant le total connu à un peu moins de deux mille, et étendant le maillage très lâche des distances stellaires à quelques dizaines d'années-lumière. L'œuvre de sa vie lui vaudra la médaille d'or de la *Royal Astronomical Society* en 1927 et la médaille Bruce, une autre des plus hautes distinctions dans le domaine de l'astronomie, en 1929. Le catalogue trigonométrique des parallaxes de Yale – dernière mise à jour du *General Catalogue of Trigonometric Stellar Parallaxes* publié à Yale en 1952 par Louise Freeland Jenkins (1888-1970) – qui compte un peu plus de huit mille étoiles, est établi par l'astronome de Yale William van Altena. C'est ce catalogue que les astronomes du monde entier consultent encore vers la fin du deuxième millénaire pour connaître la distance d'une étoile.

Les mondes perdus de l'astrométrie

A L'AUBE du troisième millénaire, la qualité des positions des étoiles est loin d'être à la hauteur des progrès réalisés dans de nombreux autres domaines de l'astronomie. Les distances exactes ne sont encore connues que pour quelques milliers d'étoiles proches, ce qui constitue un obstacle majeur à la compréhension des processus physiques à l'intérieur des étoiles. Pour l'astrophysicien, le principal apport de l'astrométrie est la détermination des parallaxes stellaires, qui permettent de trans-

former les caractéristiques observées (par exemple les magnitudes apparentes) en valeurs absolues en termes de quantités physiques.

Un autre objectif majeur de l'astrométrie est l'établissement d'un cadre de référence céleste par rapport auquel les mouvements des corps célestes sont référencés. Il est fondamental pour la dynamique que les mouvements soient donnés dans un système de coordonnées non rotatif. Le système de référence une fois défini, sa matérialisation – on parle plutôt de *réalisation* – doit être faite à l'aide d'un *repère* de référence. Le catalogue d'étoiles FK5 (*Fundamental Katalog* version 5) est reconnu à partir de 1988 par l'UAI (Union astronomique internationale) comme un *catalogue fondamental* dont le but premier est de servir à matérialiser un système de référence inertiel.

La terminologie utilisée dans la résolution de l'UAI de 1991 sur les repères et systèmes de référence établit une distinction entre l'utilisation des termes « système de référence » et « repère de référence ». Un système de référence est la spécification complète de la formation d'un système de coordonnées célestes. Il définit l'origine et les plans fondamentaux (ou axes) du système de coordonnées. Il spécifie également toutes les constantes, les modèles et les algorithmes utilisés pour transformer les quantités observables et les données de référence conformes au système. Un repère de référence consiste en un ensemble de points repères identifiables sur le ciel avec leurs coordonnées, ce qui constitue la réalisation pratique d'un système de référence.

Le FK5 compte 1 535 étoiles fondamentales plus brillantes que la magnitude 7,5 dont les positions sont connues avec une précision de 0,062". Selon une résolution de l'UAI de 1991, les positions et mouvements propres des étoiles du catalogue FK5 sont remplacés à partir de 1999 par un autre catalogue fondamental construit à partir de la position

de 212 radiosources extragalactiques à un niveau de précision inférieur au millième de seconde de degré connu sous le nom d'ICRF (*International Celestial Reference Frame*). L'ICRF est une matérialisation du système de référence céleste international (ICRS – *International Celestial Reference System*) – défini lors de l'assemblée générale de l'UAI de 1997 (résolution B2) – dont les axes sont confondus avec ceux du FK5 et dont l'origine est placée au barycentre du Système solaire. Le plan principal de l'ICRS est défini par le plan de l'équateur donné par les modèles conventionnels de la précession et de la nutation lors des assemblées générales de l'UAI de 1976 et 1980. La direction du pôle céleste de l'ICRS est confondue avec celle du système FK5 au niveau de l'incertitude de ce dernier (pôle moyen J2000 connu avec une incertitude de 50 mas soit 0,05").

À l'instar d'un ancien relevé cartographique de la Terre réalisé à l'aide d'instruments d'arpentage primitifs, le résultat de ces siècles d'efforts est une sorte de carte du ciel, mais qui reste encore très déformée par son imprécision. Les positions des étoiles restent entachées d'erreurs contre lesquelles un sentiment d'impuissance se développe. Leurs mouvements dans l'espace sont également connus avec une qualité variable. Plus important encore, les distances demeurent largement inconnues, comme le souligne avec justesse Michael Perryman en 2010 :

Les minuscules signatures de leurs minuscules parallaxes étant enfouies sous un linceul de mesures sujettes à erreur, imposées par l'atmosphère vacillante.

Atmosphère ? Le mot est lâché, cette atmosphère sous laquelle nous nous trouvons pour observer les étoiles, cette voûte semi-opaque, changeante qui écrase les prétentions des astronomes. Une approche fondamentalement nouvelle de la mesure de la position des étoiles est donc rendue absolument indispensable pour atteindre tout ce qui se dérobe aux astronomes.

Atmosphère ! Atmosphère ! ...

LES MONDES CÉLESTES parlent à notre imaginaire de façon intuitive et immédiate. Ils sont hors de notre Terre, dans l'espace, ils peuplent l'Univers, ils constituent le Ciel, les cieux. Si le ciel peut se recouvrir d'étoiles par une nuit noire, quand il se couvre, c'est forcément de nuages. Le ciel est alors attaché à la Terre. Cette ambivalence sémantique dont nous nous sommes accommodés depuis des millénaires a failli nous faire oublier que le ciel, celui qui nous est le plus commun, qu'il soit bleu ou gris, ennuagé ou découvert, est notre atmosphère, et qu'en définitive, nous voyons du Ciel ce que le ciel nous laisse bien voir. Dans la seconde moitié du xx^e siècle, 300 ans après Cyrano de Bergerac et son « voyage dans la Lune » (*Histoire comique des États et Empires de la Lune*), avec le lancement du premier satellite artificiel Spoutnik 1 en 1957 par l'Union soviétique, l'homme vise l'espace, au-delà du ciel. Quant à l'astronome, lui aussi, se met à reconsidérer le ciel sous sa forme d'atmosphère et ne conserve que son double, l'espace. Les effets causés par l'atmosphère sont connus depuis bien longtemps – telle la réfraction connue depuis l'Antiquité –, mais les observations au sol se heurtent de plus en plus aux effets de l'atmosphère terrestre. Ils sont aggravés par les flexions thermiques et gravitationnelles des instruments, et l'absence de visibilité sur l'ensemble du ciel.

Tout télescope sur Terre ne peut observer qu'une partie du ciel à la fois : un télescope situé dans l'hémisphère nord ne voit jamais que le ciel du nord. Malgré cela, il faut une année pour que toute la région soit observable de nuit. Une grille de positions d'étoiles qui couvre l'ensemble du ciel ne peut être obtenue qu'à partir d'une vaste toile d'araignée de milliers de triangulations géométriques provenant de télescopes distincts qui observent des parties accessibles du ciel à des moments différents. Cependant, entre les différentes observations soigneusement recollées, toutes les images d'étoiles se sont

déplacées dans d'infimes proportions. En outre, chaque instrument a ses propres erreurs systématiques, inconnues. Le résultat de la combinaison ne peut permettre de les éliminer toutes, si bien que le catalogue qui en est issu sera grevé d'erreurs systématiques régionales. Les instruments au sol subissent également les mouvements de la Terre. Il faut donc connaître parfaitement ceux-ci pour atteindre des coordonnées dans un système de référence céleste.

L'atmosphère demeure cependant l'obstacle majeur. La réfraction atmosphérique tout d'abord qui déplace systématiquement la direction apparente des astres. Ce systématisme dépend de la température et de l'état hygrométrique des couches traversées et ne peut donc pas être parfaitement corrigé. Par ailleurs, l'air n'est jamais tout à fait stable, et il y a des couches avec des températures et des densités différentes, ce qui provoque des convections et des turbulences. La turbulence thermique inévitable de l'atmosphère au-dessus de l'observatoire produit des variations imprévisibles (bien que faibles) de la direction d'arrivée des rayons provenant d'une étoile donnée. Pour l'œil humain, les phénomènes les plus impressionnants sont la scintillation et la variation de couleur des étoiles les plus brillantes (en termes populaires, les étoiles « scintillent »). En effet, la petite ouverture de la pupille n'accepte qu'une petite partie du front de l'onde lumineuse issue de l'étoile, de sorte qu'à un moment donné, tous les rayons convergent et l'étoile apparaît plus brillante ; à un autre moment, tous les rayons divergent et l'étoile s'assombrit. Un télescope quant à lui recueille la lumière sur une plus grande surface, ce qui égalise les changements rapides et diminue la scintillation. Sur le plan focal d'un télescope, la position et la forme de l'image stellaire varient rapidement, avec des caractéristiques qui dépendent de la taille de l'ouverture. Alors que l'œil humain a des temps de réponse de quelques dixièmes de seconde et n'intègre pas le signal, les détecteurs tels que la plaque photographique et plusieurs détecteurs à semi-conducteurs intègrent

la faible lumière stellaire pendant des secondes, des minutes, voire des heures. En raison de son temps de réponse rapide, l'œil peut parfois discerner des détails qui seront invisibles sur de longues expositions (c'est le cas typique des étoiles binaires visuelles). En revanche, à la fin d'une longue exposition, la lumière de l'étoile remplit une région approximativement circulaire dont le diamètre est appelé *diamètre de seeing*. Le diamètre du disque de *seeing* peut varier de moins d'une seconde d'arc à plusieurs dizaines de secondes d'arc.

Le français Pierre Lacroute (1906-1993), directeur de l'observatoire de Strasbourg, propose en 1967 lors de la XIII^e assemblée générale de l'UAI la réalisation des mesures astrométriques depuis l'espace. Lacroute décrit un équipement d'environ 150 kilogrammes qui pourrait être utilisé sur un satellite stabilisé à environ une minute d'arc. À l'instar du dispositif à deux miroirs proposé par Maurice Loewy sur le grand équatorial coudé de l'Observatoire de Paris (voir l'[épisode 11 : « L'ère des coudés »](#) paru dans la Lettre d'information de janvier 2024), un système de miroirs superpose sur un même objectif deux champs séparés par un angle prédéterminé de l'ordre de 90°. Le plan focal de l'objectif est balayé par deux compteurs de photons. Les angles entre les étoiles plus brillantes que la magnitude 7 pourront être mesurés en une seconde de temps avec une précision de 0"01. De plus, au-delà des forces de déformation de la gravité terrestre, le télescope ne s'affaissera pas de manière imprévisible au cours de son recensement cosmique. Loin de la Terre, le satellite aura une vue ininterrompue de l'ensemble du ciel. En outre, la partie la plus ingénieuse de l'idée de Lacroute est d'observer en même temps dans deux directions très éloignées l'une de l'autre. En combinant ces deux lignes de visée différentes dans un seul foyer de télescope, au moyen d'un miroir divisé spécial qui regarde dans deux directions simultanément, on obtiendra un réseau de mesures à grand angle qui couvre l'ensemble de la sphère céleste dans sa totalité. Dans le rapport de la commission 8 de l'astrono-

mie de position de l'UAI réunie les 23, 24 et 25 août 1967 à Prague, il est noté à propos de l'intervention de Pierre Lacroute : « Il est clair que le moment est venu pour les astrométristes de s'intéresser aux mesures effectuées dans l'espace. »

Lacroute espère à l'origine que ses idées seront soutenues et transportées dans l'espace par l'agence spatiale nationale française, le CNES. Mais leurs études du premier concept de satellite suggèrent qu'il serait trop complexe, trop coûteux et trop risqué pour la France de faire cavalier seul. En particulier, la mise en œuvre proposée par Lacroute du miroir à combinaison de faisceaux qui permettrait, avec une acuité sans précédent et une stabilité suprême, de regarder dans différentes directions en même temps, s'est rapidement révélée être un formidable défi technique. Après la création de l'ESA (Agence spatiale européenne) en 1973, l'idée d'un télescope astrométrique spatial prend forme petit à petit jusqu'à son acceptation par l'ESA en tant que programme scientifique le 8 juillet 1980, donnant ainsi naissance au concept d'un satellite astrométrique baptisé *Hipparcos*, acronyme quelque peu artificiel comme les astronomes les aiment, et par la suite rarement utilisé, de « *High Precision PARallax COLlecting Satellite* » (satellite de collecte de parallaxes de haute précision), mais qui rend également hommage au pionnier grec de la cartographie céleste que fut Hipparque (voir l'[épisode 2 : « À la recherche du catalogue perdu d'Hipparque »](#) paru dans la Lettre d'information de mars 2023).

Il était temps comme le souligne l'astronome danois Erik Høg, membre de l'équipe scientifique du satellite *Hipparcos*, près de 30 ans plus tard, en 2008. Si le programme n'avait pas été accepté par l'ESA, sans doute n'y aurait-il jamais eu d'astrométrie spatiale faute d'astrométristes... :

*Pendant des décennies, jusqu'en 1980,
la communauté astrométrique s'est de plus*

en plus affaiblie, la génération plus âgée a pris sa retraite et très peu de jeunes scientifiques sont entrés dans le domaine. J'aurais moi-même perdu confiance dans la capacité des astrophysiciens à mener à bien une telle mission, et d'autres auraient également quitté le domaine de l'astrométrie spatiale. Si quelqu'un avait tenté de relancer Hipparcos une ou deux décennies plus tard, les compétences astrométriques disponibles auraient été plus faibles, et d'où serait venue alors la foi dans l'astrométrie ? Lorsque Hipparcos est devenu un projet européen en 1975, et que les espoirs étaient grands quant à sa réalisation, les compétences de nombreux pays européens se sont rassemblées et ont finalement été en mesure de mener à bien la mission. Cela n'aurait pas pu se reproduire après un rejet.

L'ère de l'astrométrie spatiale

AVEC LE LANCEMENT du satellite *Hipparcos*, l'année 1989 est à marquer d'une pierre blanche dans l'histoire de l'astrométrie. Une nouvelle ère s'ouvre : la mesure de l'impossible entre dans le domaine du possible. Le centième de seconde de degré (10 mas) semblait être l'horizon indépassable de la précision astrométrique, alors que dire du millième de seconde de degré (1 mas) ? Pour en comprendre la portée, rappelons-nous qu'une étoile ayant une parallaxe de 1" se trouve à une distance de 3,26 années-lumière (ou 1 parsec, contraction de « parallaxe-seconde », symbole pc) de sorte que l'angle sous-tendu par le rayon d'un cercle de 1 au (unité astronomique) soit précisément de 1".

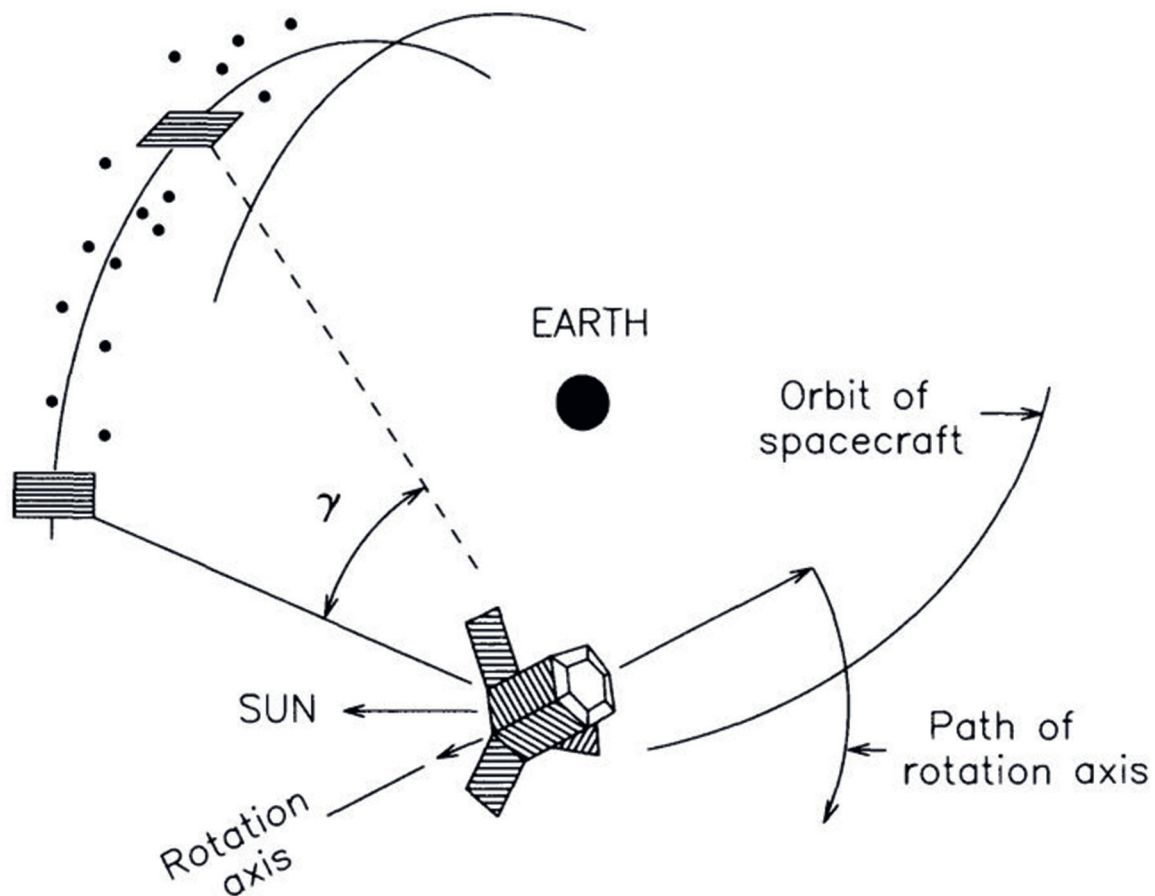


Fig. 2 – Mesure par le satellite Hipparcos de grandes distances angulaires entre couples d'étoiles à l'aide des moitiés inclinées du miroir et par rotation du télescope autour de son axe de figure indiqué.

D'après Walter et Sovers, 2000

Par conséquent, une précision de 1 % dans les mesures de distance n'est obtenue que dans un rayon de 30 années-lumière (10 parsecs), soit une infime partie de notre galaxie dont l'extension est d'environ 100 000 années-lumière ! Même une précision de 10 % n'est obtenue que dans un très proche voisinage du Soleil.

L'astrométrie pénètre pour la première fois de son histoire le territoire qu'elle s'est chargée de mesurer, l'espace. C'est le couronnement d'un long processus d'étude et de lobbying, et la première expérience spatiale dédiée à l'astrométrie. *Hipparcos*, comme nous le verrons pas la suite, a représenté une avancée majeure en physique, a coûté quelque 600 millions d'euros et sa réalisation a impliqué quelque 200 scientifiques européens et plus de 2 000 personnes de l'industrie européenne. Lancé le 8 août 1989, le satellite *Hipparcos* a fonctionné jusqu'en 1993. Les résultats de la mission ont été finalisés en 1996 et publiés par l'ESA en juin 1997 sous la forme d'une compilation de 17 volumes reliés, d'un atlas céleste et de six CD, qui comprennent les catalogues *Hipparcos* et *Tycho*. Les détails de l'exploitation du satellite et les étapes de l'analyse des données, ainsi que la validation et la description des produits de données détaillés, sont inclus dans le catalogue publié.

Le principe de la mesure est simple et astucieux, il profite de la situation spatiale du satellite qui permet d'embrasser le ciel dans son intégralité et de connecter entre elles des zones du ciel très éloignées les unes des autres. On parle alors d'*astrométrie globale*, impossible à faire au sol. En tournant lentement sur lui-même en un peu plus de deux heures, *Hipparcos* vise à l'aide de ses deux télescopes deux directions du ciel séparées de 58° – appelé *angle de base* – qui vont décrire ainsi un cercle complet de mesures sur le ciel (fig. 2). Ces deux champs stellaires sont rassemblés dans le plan focal où s'effectue la mesure des séparations angulaires finales (fig. 3).

En outre, l'axe de rotation du satellite tourne continuellement. Ainsi, par un grand nombre de cercles de mesure, toutes les directions qui traversent le ciel sont balayées au cours du temps. Le résultat est un réseau dense de nombreuses paires d'angles différents entre n'importe quelle étoile choisie dans le ciel et les nombreuses autres qui l'entourent. Au cours de trois années de mission, *Hipparcos* trace dix mille de ces cercles. Ce faisant, chacune des cent mille étoiles du catalogue est observée plus d'une centaine de fois, chaque étoile étant reliée à d'innombrables autres. La carte qui en résulte est très rigide ; chaque étoile est fermement fixée à sa place par le réseau dense des autres mesures. Tout se passe comme si un fil invisible et inextensible était tiré entre les étoiles de chaque paire mesurée sur une sphère. À cette première maille, d'autres viennent se rajouter en densifiant progressivement la couverture de la sphère, de sorte que chaque étoile finit par être tenue par plusieurs mailles. Le maillage ainsi construit est alors d'une très grande rigidité. Il est également aisé de comprendre pourquoi l'angle de base choisi n'est pas un multiple de 15° , car dans ce cas, les étoiles d'un champ donné seraient toujours reliées aux mêmes étoiles de deux autres champs distants de 15° et la rigidité finale du réseau en serait grandement affaiblie. La situation s'améliore donc presque magiquement si l'angle entre les deux télescopes du satellite ne se divise pas exactement en un cercle complet. Au fur et à mesure que la structure tourne, et après seulement quelques rotations, toutes les parties du ciel sont connectées, et les positions des étoiles sont très bien fixées. L'image finale est en fait très simple. Bien que les étoiles se déplacent les unes par rapport aux autres d'une manière très complexe en fonction de leurs mouvements spatiaux et de leurs distances, le mouvement de chaque étoile dans le ciel nocturne est entièrement décrit par cinq nombres seulement : les deux coordonnées de position, les deux coordonnées de mouvement propre et l'angle de parallaxe. Ensemble, ces cinq nombres décrivent la position de l'étoile à un moment donné, la façon dont elle se déplace dans l'espace et la distance à la-

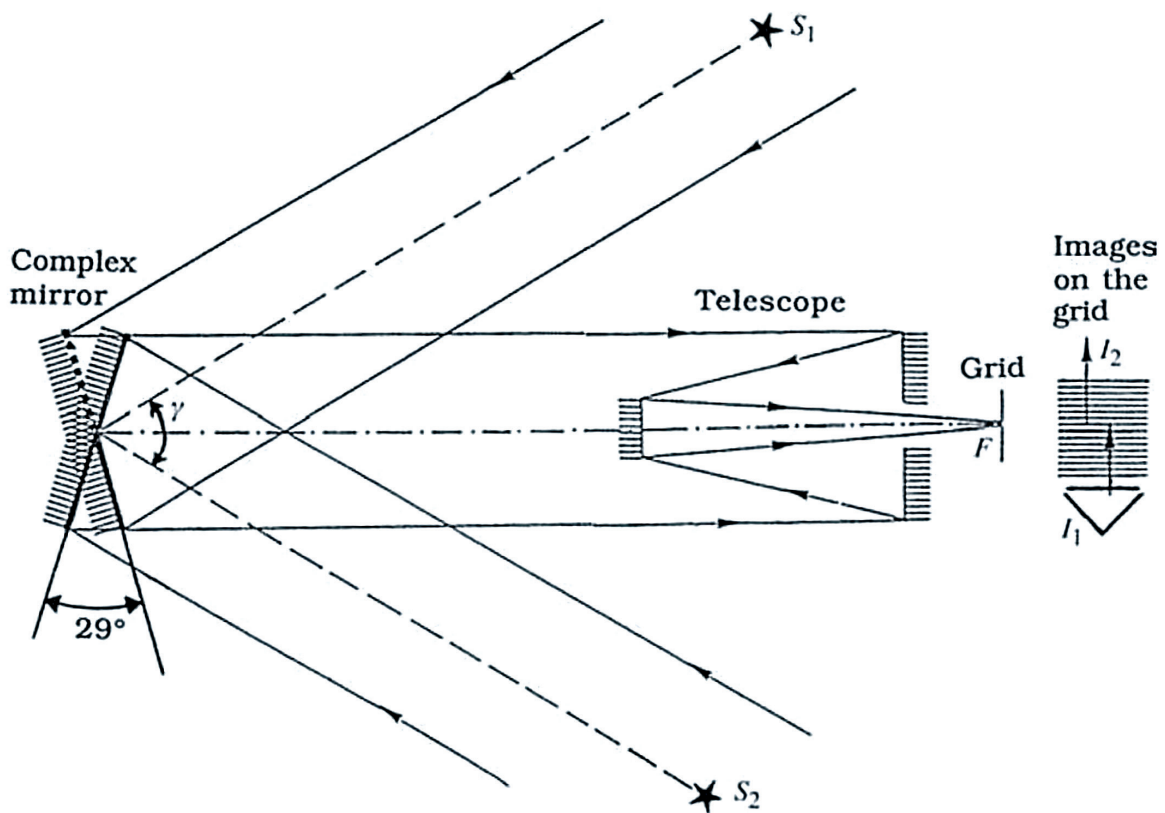


Fig. 3 - Principe d'Hipparcos.

Les images I_1 et I_2 des étoiles S_1 et S_2 situées dans des champs stellaires éloignés l'un de l'autre de 58° sont formées au foyer du télescope sur une grille de mesure photométrique qui permet de mesurer précisément leur séparation

D'après Kovalevsky, 1995

quelle elle se trouve (fig. 4). À partir de ce puzzle céleste de mesures, de cette interminable séquence de séparations angulaires, parcourant le ciel pendant trois ans, il devient possible de reconstruire leurs mouvements et leurs distances ; leur distribution stéréoscopique, tridimensionnelle et leur mouvement dans l'espace. Pourquoi une mission de trois années ? Une durée plus longue aurait donné des résultats un peu meilleurs, mais il y a toujours un équilibre à trouver entre la qualité des résultats, le coût d'exploitation du satellite et le temps nécessaire pour effectuer les calculs au sol.

Le satellite Hipparcos est lancé le 8 août 1989 depuis Kourou. Il doit atteindre son orbite géostationnaire à 12° à l'est du méridien de Greenwich, mais à cause d'une panne de son moteur d'apogée, il reste sur son orbite de transfert très elliptique (fig. 5). Les

communications avec le satellite s'interrompent le 17 août 1993. Les ingénieurs de l'ESA doivent s'adapter très rapidement à cette situation venue compliquer considérablement les mesures (passage du satellite dans les ceintures de Van Hallen...). Il s'en est donc fallu de très peu pour que le projet *Hipparcos* vire au désastre, et avec lui la première expérience d'astrométrie spatiale. *Hipparcos* a démontré qu'une astrométrie globale peut être réalisée avec une précision de l'ordre de la milliarcseconde au moyen d'un satellite à balayage continu qui observe deux directions simultanément. C'est le grand avantage de l'astrométrie spatiale sur l'astrométrie au sol.

Avant l'avènement d'*Hipparcos*, la précision des mesures de position les plus précises atteint à peine 0,1 arcsec, seuls quelques milliers d'étoiles ont des mouvements propres connus à mieux que 0,01 arc-

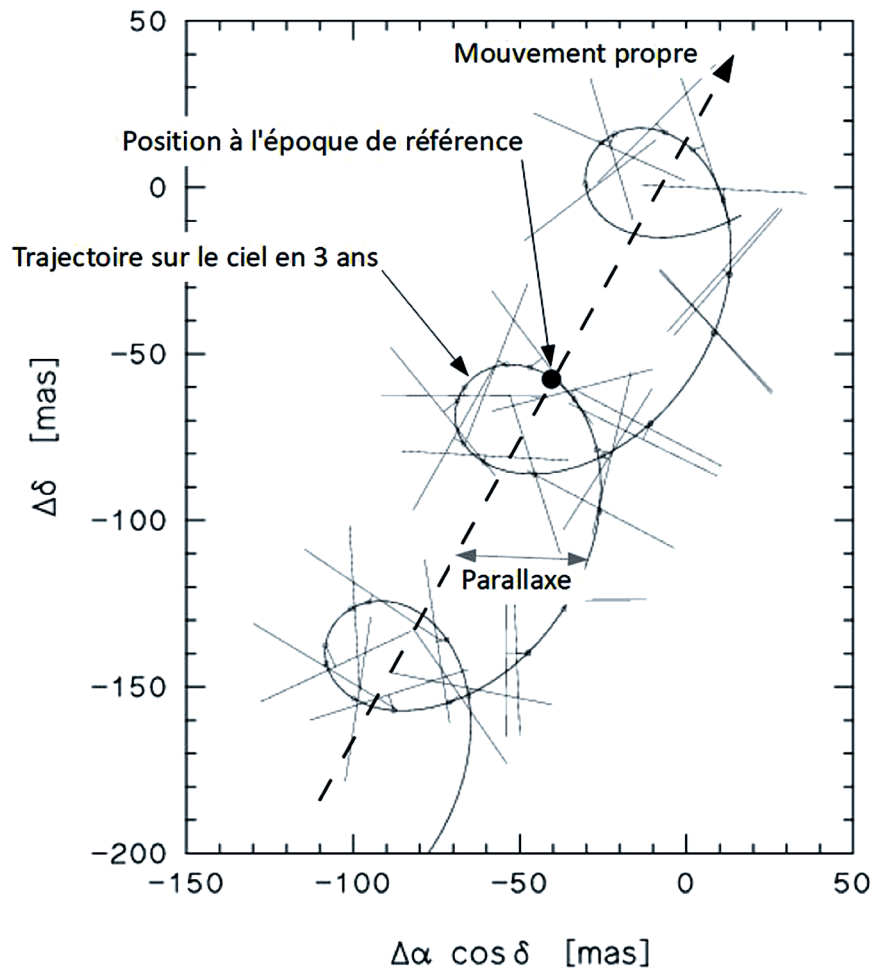


Fig. 4 – Trajectoire sur le ciel d'un des objets du catalogue *Hipparcos* (repéré par ses coordonnées équatoriales dans le plan tangent à la sphère céleste), sur une période de trois ans.

Chaque ligne droite indique la position observée de l'étoile à une époque donnée : comme la mesure est unidimensionnelle, la position précise le long de cette ligne de position n'est pas déterminée par l'observation. La courbe est la trajectoire stellaire modélisée ajustée à toutes les mesures. La position déduite à chaque époque est indiquée par un point, et le résidu par une courte ligne qui relie le point à la ligne de position correspondante. L'amplitude du mouvement oscillatoire donne la parallaxe de l'étoile, la composante linéaire représentant le mouvement propre de l'étoile. Les données astrométriques intermédiaires permettent d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle et éventuellement de l'affiner.

D'après ESA (1997, vol. 1, fig. 2.8.1)

sec par an. Le nombre d'étoiles, dont les parallaxes (et donc les distances) sont connues à plus de 10 %, est inférieur à 100. *Hipparcos* a mesuré la plupart de ces trois paramètres pour 118 218 étoiles, ce qui correspond à une moyenne d'environ trois étoiles par degré carré sur l'ensemble du ciel, avec une précision supérieure à 1 milliarcseconde (mas).

Quelque 20 000 distances sont déterminées avec une précision supérieure à 10 %, et 50 000 avec

une précision supérieure à 20 %. *Hipparcos* a également permis de construire un second catalogue, moins précis, mais plus dense : le catalogue *Tycho*, compilé à partir du système de mesures par le « star mapper » (repéreur d'étoiles) du satellite. Le catalogue *Tycho*, dont les paramètres astrométriques sont moins précis, présente néanmoins deux attributs majeurs. Tout d'abord, il fournit une photométrie bicolore pour compléter les données astrométriques des étoiles du catalogue *Hipparcos*. Ces données sont incluses dans le catalogue *Hipparcos*

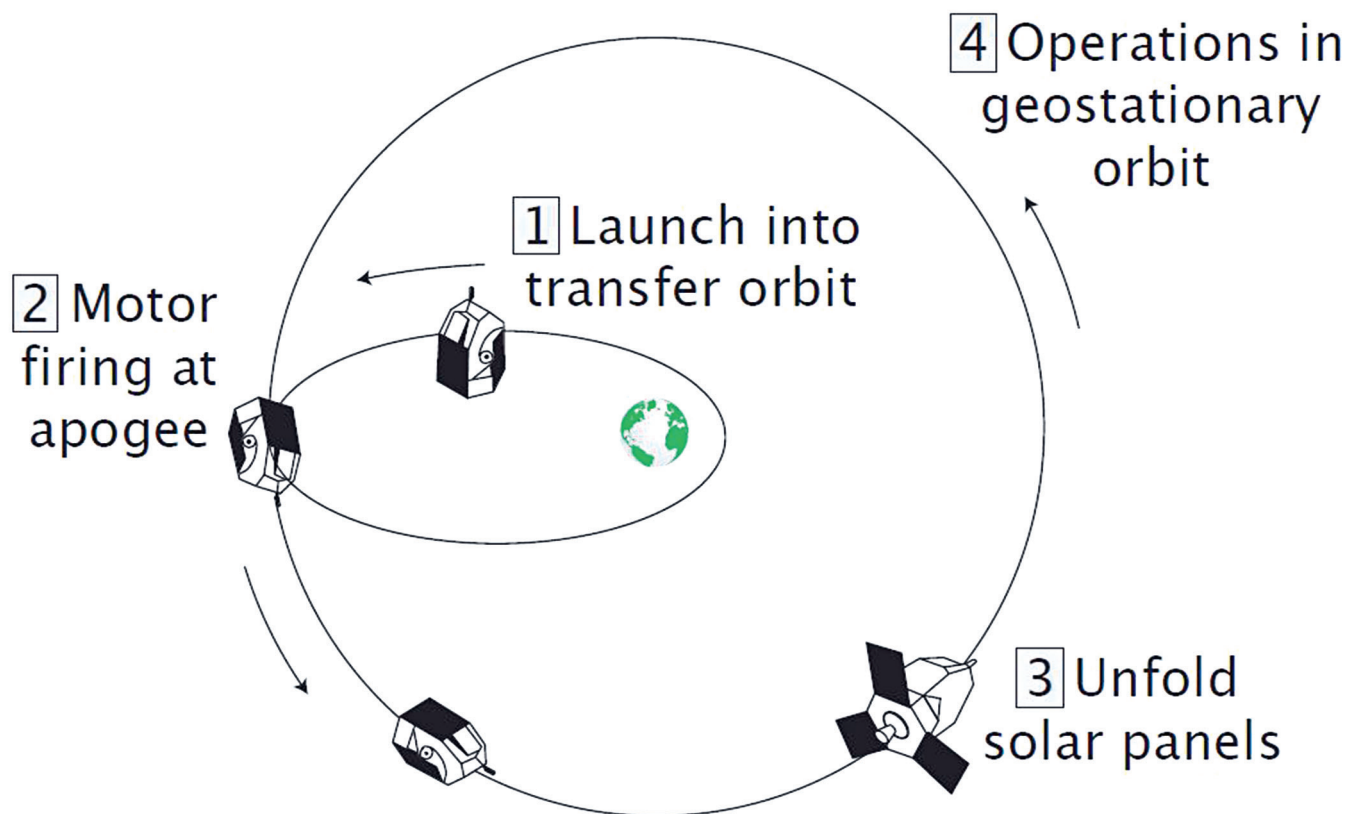


Fig. 5 – Hipparcos vers son orbite géostationnaire qu'il n'atteindra jamais en raison de la panne du moteur d'apogée.

Il restera sur son orbite de transfert pour toute la durée de la mission.

D'après Perryman, 2010

publié. Deuxièmement, les mesures *Tycho* permettent non seulement une augmentation significative de la densité de la grille d'étoiles de référence (de trois étoiles par degré carré dans le catalogue *Hipparcos* à environ 25 étoiles par degré carré dans le catalogue *Tycho*), mais aussi un catalogue plus uniforme. Le catalogue *Tycho*, qui compte un peu plus d'un million d'étoiles, est remplacé en 2000 par le catalogue *Tycho 2*, qui compte quelque 2,5 millions d'étoiles. Grâce à *Hipparcos*, le Catalogue astrophysique de la Carte du ciel (voir l'[épisode 10 : « Le ciel à la carte »](#) paru dans la Lettre d'information de décembre 2023) a subi une cure de jouvence par une nouvelle réduction (analyse) des mesures grâce à un réseau dense d'étoiles de référence précises qui provient du catalogue *Tycho* (même en tenant compte de près de 100 ans de mouvements propres). L'USNO (observatoire naval des États-Unis) s'en est chargé. Le catalogue qui en résulte,

AC 2000, contient 4 621 836 étoiles qui couvrent la totalité du ciel, à l'époque moyenne de 1907. En parallèle, le catalogue de référence *Tycho* (TRC) et le catalogue astrophysique de référence (ACT) combinent indépendamment les informations de position du catalogue astrophysique avec celles du catalogue *Tycho* (époque de référence J1991.25) afin d'obtenir des mouvements propres améliorés. Le TRC contient les positions et les mouvements propres de 990 182 étoiles du catalogue *Tycho*. L'ACT contient les positions et les mouvements propres de 988 758 étoiles du catalogue *Tycho*.

Après l'éclatant succès de la mission *Hipparcos*, et les premières applications astrophysiques d'une astrométrie au niveau de 1 mas, les astrométristes et les astrophysiciens se mettent très vite à envisager son successeur qui, en descendant au niveau de 10 μ mas

(soit 0,01 mas), permettrait de *voir* notre galaxie – la Voie lactée – et notre environnement galactique proche et d’en comprendre l’évolution dynamique avec une acuité exceptionnelle, totalement inconcevable à peine quelques décennies plus tôt. En outre, ce dont n’a pu bénéficier *Hipparcos*, la technologie CCD (*Charge Coupled Device*) a fait son apparition dans le monde de l’astronomie. À elle seule, elle vient révolutionner la technologie des détecteurs comme ceux utilisés sur *Hipparcos* où la mesure au foyer se faisait à l’aide de photomultiplicateurs capables de convertir la lumière qui tombe sur la grille placée au foyer en signal électrique. Grâce à l’utilisation d’une mosaïque de détecteurs CCD en mode balayage, les relevés de position peuvent atteindre la magnitude 20.

C’est ainsi que dès le milieu des années 90, de nombreuses missions sont envisagées, notamment par la NASA qui s’est fait voler la vedette par l’ESA. C’est aussi l’époque des premières découvertes de planètes extrasolaires. Le sujet devient si priori-

taire que des missions interférométriques dans l’espace sont imaginées. L’interférométrie, en tant que moyen de découvrir des planètes invisibles à partir du mouvement non linéaire d’une étoile, est choisie comme l’une des premières étapes vers cet objectif. L’idée originale, due à Antoine Labeyrie en 1992, est de substituer à l’analyse d’une figure de diffraction un interférogramme produit par un interféromètre de Fizeau. La NASA conçoit la mission d’interférométrie spatiale SIM. Mais à nouveau, l’ESA porte un projet incommensurablement plus ambitieux : la mission *Gaia*, acronyme de *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics* (Interféromètre astrométrique mondial pour l’astrophysique), par référence à la déesse primordiale de la mythologie grecque, également mère des titans, sans doute parce que les astronomes porteurs du projet le veulent titanesque. *Gaia* vise à faire plus (gain d’un facteur 10 000 en nombre d’étoiles observées), plus précis (gain d’un facteur 100 en précision), et plus loin (gain d’un facteur 1 000 en magnitude limite). Très vite, *Gaia* écrase toute la concurrence (voir table 1).

Projet	Agence	Magnitude limite	Nombre d'étoiles (en Millions)	Précision (en μ mas)	Statut
Hipparcos	ESA	12	0,1	1000	1989-1993
Tycho	ESA	11,5	2,5	7000	
Roemer	ESA	18	400	140	Remplacé
GAIA	ESA	20	1000	15	2013-2025 ?
DIVA	ESA	15	35	900	Annulé en 2003
FAME	NASA	15	40	50	Annulé en 2002
OBSS	NASA	23	1000	10	
Nano-Jasmine	Japon	9	0,1	2000	Indéterminé
JASMINE	Japon	14	10	10	2028
JMAPS	USA (USNO)	14	40	1000	Annulé en 2012

Table I – Missions spatiales astrométriques.

GAIA : la mère des missions astrométriques spatiales

EN DÉPIT des nombreuses années passées à observer le cosmos à l'aide de télescopes toujours plus puissants, il reste encore beaucoup à apprendre sur notre galaxie hôte, la Voie lactée, son contenu stellaire, son évolution, et également sur notre système solaire. Nous ne pouvons pas quitter notre galaxie pour obtenir une vue extérieure complète de sa forme et de ses propriétés, comme nous le faisons lorsque nous étudions d'autres galaxies. Nous sommes immergés dans la Voie lactée et nous sommes donc limités à la cartographie de l'intérieur et à partir d'un seul point d'observation. Sa caractérisation complète passe par trois instruments qui devront être à même de mener de front des mesures astrométriques, photométriques et spectroscopiques. Ce sera la mission du satellite *Gaia*⁽¹⁾.

Lancé le 19 décembre 2013 depuis Kourou, le satellite européen *Gaia* est posté à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Depuis le 25 juillet 2014, il opère par un mouvement rotatif un balayage systématique du ciel selon le même principe qu'*Hipparcos*. Aussi détecte-t-il au sein de la Voie lactée et dans ses environs tous les objets dont la magnitude apparente se situe entre 3 et 21. Tout comme son prédécesseur, *Gaia* observe simultanément, par le biais de deux télescopes, deux directions de visée écartées de $106,5^\circ$, en tournant de manière continue à la vitesse de 1 degré d'angle par minute de temps, soit une rotation complète sur lui-même toutes les 6 h. Un champ d'étoiles observé par le premier télescope est de nouveau observé par le deuxième, 106 minutes 30 secondes plus tard. L'axe de rotation de *Gaia* n'est pas fixe dans l'espace.

Prévue initialement sur 5 ans, près de dix ans plus tard, en mars 2023, la mission est prolongée une

seconde fois jusqu'au deuxième trimestre 2025. À cette date, le satellite devrait avoir épuisé les ergols indispensables pour le contrôle de son pointage et de son orbite, ce qui devrait signifier la fin de la collecte des données dans l'espace. Depuis qu'il a commencé à scruter le ciel en 2014, le satellite a compilé un ensemble de données inégalé sur les positions, les distances et les mouvements d'environ 1,8 milliard d'étoiles. Les prouesses réalisées par *Gaia* donnent le vertige : plus de 14 000 balayages du ciel pour observer 813 000 étoiles doubles, 214 exoplanètes, 158 000 objets du Système solaire. *Gaia* a jusqu'à présent mobilisé plus de 450 personnes, généré plus de 10 000 publications scientifiques, 128 thèses, et collecté 126 téraoctets de données. *Gaia* a réalisé 1 600 milliards de mesures astrométriques, 320 milliards de mesures spectrophotométriques et 32 milliards de spectres.

Ces données ont déjà permis de livrer le 16 septembre 2016 un premier catalogue, *Gaia DR1* (*Data Release 1*), puis le 25 avril 2018, un deuxième, *Gaia DR2*. Le 13 juin 2022, un troisième catalogue *Gaia DR3* voit le jour : il contient toute l'analyse des données obtenues par *Gaia* pendant les 34 premiers mois de mission, soit sur une période comprise entre le 25 juillet 2014 et le 28 mai 2017. Les apports de *Gaia DR3* par rapport à la version antérieure *Gaia DR2* sont considérables : il contient désormais les positions, éclats et couleurs de 1,8 milliard d'étoiles. Pour les objets dont la magnitude apparente est située entre 12 et 17, le catalogue est quasiment complet. Pour 1,5 milliard de ces sources, les parallaxes, les mouvements propres et la couleur sont également disponibles. Pour les données astrométriques et photométriques, il gagne en précision, en exactitude et en homogénéité. La précision sur les parallaxes trigonométriques est améliorée d'environ 30 % (étant de l'ordre de $17 \mu\text{as}$, ce qui signifie une précision de 20 % jusqu'à des distances de 12 kpc) et celle

(1) Dont l'acronyme a maintenant été revu comme *Global Astrometry Instrument for Astrophysics*.

des mouvements propres est typiquement deux fois meilleure. *Gaia DR3* inclut enfin les 7 millions de vitesses radiales déjà contenues dans *Gaia DR2*, mais corrigées pour l'occasion d'un petit nombre de valeurs erronées.

Le quatrième catalogue *Gaia DR4* doit être publié au mieux fin 2025. Il exploitera les données collectées durant 66 mois. Il comprendra les résultats astrométriques et photométriques, ainsi que les vitesses radiales pour l'ensemble des étoiles. Toutes les solutions disponibles pour les étoiles variables et les étoiles non simples seront fournies, ainsi qu'une liste d'exoplanètes. Le cinquième et dernier catalogue *Gaia DR5*, qui exploitera l'ensemble des données collectées jusqu'à la fin de la mission spatiale, sera publié au plus tôt fin 2030. Avec le temps, le rapport signal/bruit des données *Gaia* – parallaxes y compris – s'améliore comme la racine du temps ($\sqrt{t}$).

En conséquence, les précisions de *Gaia DR4* et *Gaia DR5* sont attendues d'être améliorées respectivement d'un facteur 1,4 et 2,6 par rapport à *Gaia DR3*. Pour les mouvements propres, la trajectoire observée des étoiles croissant avec le temps, l'amélioration croît beaucoup plus rapidement avec le temps comme $t^{1,5}$, donc un facteur d'amélioration attendu de 2,8 et 6,6 respectivement. La figure 1 peut maintenant être complétée et enrichie des résultats des missions *Hipparcos* et *Gaia* (fig. 6).

Au cours des deux décennies qui séparent *Gaia* d'*Hipparcos*, l'astrométrie spatiale est passée d'une expérience très originale, mais risquée, à une technologie astrométrique maîtrisée et performante par le moyen d'une transition technologique unique entre le capteur monocal de *Hipparcos* et la grande mosaïque de 180 CCD de *Gaia*. Des considérations élémentaires sur la résolution et le bruit des photons

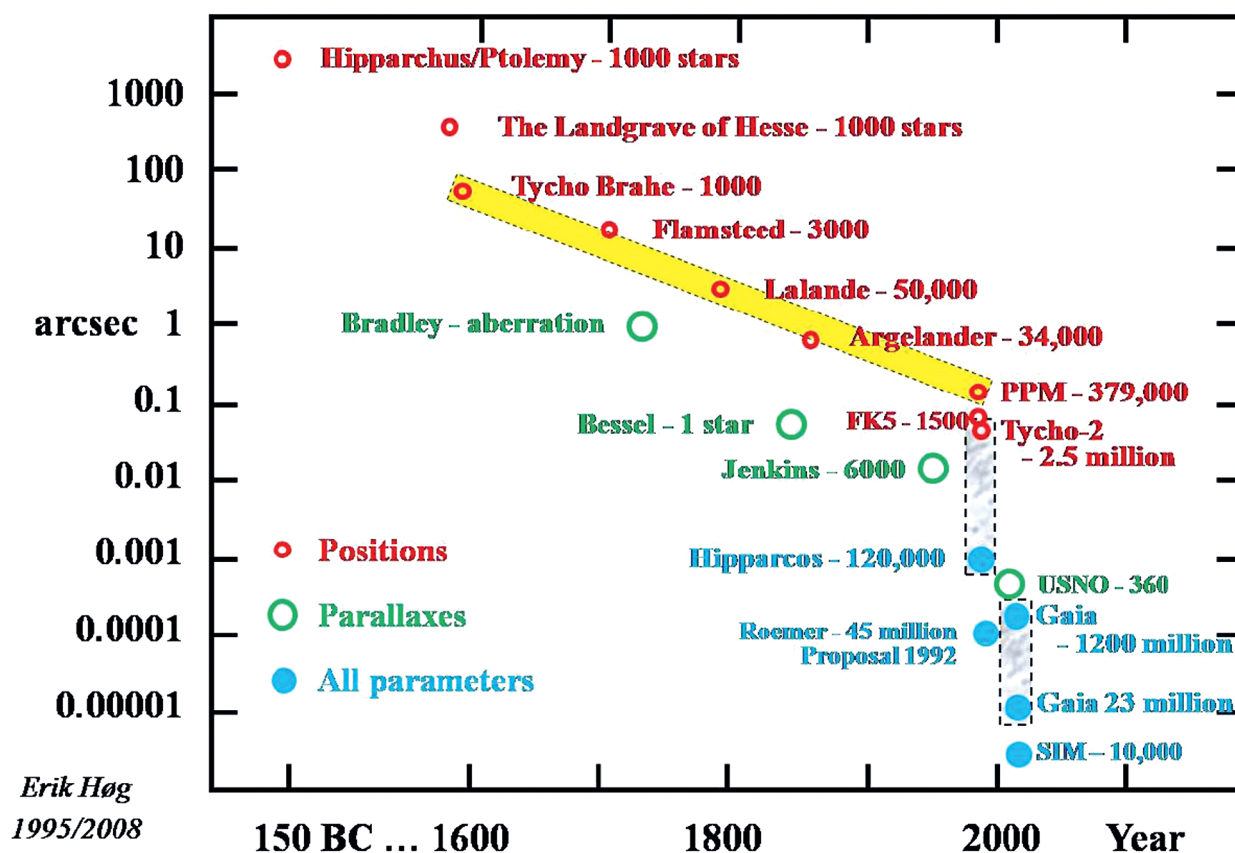


Fig. 6 – Évolution de la précision astrométrique depuis 400 ans.

Tiré de Høg, 2010

montrent que, pour une mission à balayage continu comme *Gaia*, la précision astrométrique évolue comme $\sigma \sim 1/DM$, où D est la taille linéaire de l'ouverture, et M le nombre d'éléments de résolution (pixels) dans le champ de vision dans la direction du balayage. Par conséquent, pour augmenter la précision d'un facteur important, il faut soit un télescope beaucoup plus grand, soit une matrice de détecteurs avec beaucoup plus de pixels, soit les deux. Il est probable que ces deux éléments puissent être améliorés d'un facteur modéré, notamment grâce à une nouvelle génération de capteurs d'images.

Cependant, malgré ces succès impressionnants et la quantité proprement astronomique de données collectées dont la moisson occupera nombre d'astrophysiciens durant des décennies, des interrogations et des inquiétudes se font jour, timidement, ici ou là, quant à l'avenir de l'astrométrie. Les astrométristes étaient presque en voie d'extinction à la veille d'*Hipparcos*. Un sursis heureux a été donné grâce aux deux missions astrométriques spatiales phares de l'ESA, mais de nouveau se pose la question du renouvellement de cette discipline laborieuse, exigeante, peu reconnue, difficile d'accès pour le grand public. Les astrométristes vieillissent, l'enseignement de l'astrométrie tend à disparaître des cursus universitaires au profit de l'astrophysique et des grandes problématiques cosmologiques, y aura-t-il encore un astrométriste à la fin du siècle... ? Il faut l'espérer, car l'astrophysique, la cosmologie, la mécanique céleste ont besoin de l'astrométrie, le prochain gain d'un ordre de grandeur – atteindre la μ as et même viser la nanoarcsec (10^{-9} ") – demandera à nouveau un saut technologique majeur et notamment la modélisation d'effets relativistes, mais il nous permettra de connaître notre galaxie et son évolution dynamique presque aussi précisément que la Terre (avec par exemple des parallaxes connues à mieux que 3 % pour l'ensemble des étoiles de la Galaxie).

La guerre des étoiles n'aura pas lieu

AVANT D'EXPLIQUER en quoi les premières missions astrométriques spatiales ont revêtu un intérêt majeur pour les astrophysiciens, a priori davantage versés dans la physique des corps célestes que dans la connaissance de leurs positions et vitesses, remontons le temps lorsque cette division disciplinaire n'allait pas de soi.

Vers la moitié du XIX^e siècle, avec la transformation des méthodes de l'astronomie, notamment par l'introduction de la spectroscopie, l'astronomie physique sort peu à peu des limbes pour prendre une place à part. En France, les astronomes des vieux observatoires en place y voient ombrage et sont nombreux à refuser la transformation du métier. La fonction traditionnelle d'un astronome est la mesure des positions. Comme chef de file, Urbain Le Verrier. Les étoiles appartiennent aux astronomes et non aux chimistes. La guerre éclate presque entre les anciens et les modernes lorsque Jules Janssen (1824-1907) propose en 1862 son projet de constituer un nouveau type d'observatoire, alors dénommé « observatoire d'astronomie expérimentale ». Le projet est interrompu durant la guerre de 1870 pour ne revenir qu'en 1874 devant l'Académie des sciences. Les débats y sont houleux, Le Verrier s'y oppose farouchement. Hervé Faye (1814-1902) y présente son rapport sur les nouvelles méthodes physiques qui pénètrent de plus en plus l'astronomie. Il note que des observatoires d'un genre nouveau sont apparus en Allemagne, en Angleterre ou en Amérique :

*On dirait plutôt un laboratoire de chimie [...].
Nous autres astronomes anciens, nous avons
peine à nous y reconnaître, tant les idées,
les méthodes, les objets que l'on a en vue
et jusqu'à l'esprit qui y règne, diffèrent des nôtres.*

Mais la guerre des étoiles n'aura pas lieu et en 1876, l'observatoire de Meudon est créé comme observatoire d'astronomie physique. Janssen en est nommé directeur. Progressivement, à l'Observatoire de Paris, temple de la mécanique céleste, l'astronomie physique fait sa place. Des astrophysiciens apparaissent aux côtés d'astronomes traditionnels. Quand la vieille génération de septuagénaires cède la place vers la fin des années 1920, une nouvelle génération de jeunes trentenaires arrive, celle des Henri Mineur (1899-1954), Daniel Chalonge (1895-1977), Nicolas Stoyko (1894-1976), André Couder (1897-1979), Daniel Barbier (1907-1965), Bernard Lyot (1897-1952), etc. Le lent processus de rénovation s'amorce en 1925 quand le grand cercle méridien de Gambey est mis à l'arrêt, après celui des autres instruments méridiens de Gambey en 1909. Ils sont remplacés par de petits instruments des passages. Seul subsiste le cercle du Jardin qui se consacre à l'observation des étoiles de repère du catalogue de la Carte du ciel. En 1934, le service des équatoriaux de la terrasse change de nom pour se transformer en *service d'astrophysique et des équatoriaux de la terrasse*, tout un symbole. Peu à peu, l'Observatoire se dégage ainsi de son tonneau des Danaïdes auquel il semblait voué éternellement : faire et refaire sans cesse des catalogues de position d'étoiles. L'horizon se dégage, l'Observatoire sort des brumes et, à la faveur du gouvernement du Front populaire de Léon Blum de 1936, l'astronomie du xx^e siècle se constitue en France, notamment avec la création de l'observatoire de Haute-Provence et de l'Institut d'astrophysique de Paris. Dix ans plus tard, André Danjon, nouveau directeur de l'Observatoire de Paris, pourra enfin clamer en 1946 son souhait que « les jeunes astronomes français n'aient pas le sentiment d'avoir gaspillé leurs belles années à des besognes sans rendement et de s'être dépensés en lutte stérile contre l'indifférence ». Et finalement, il reviendra à un Français, Pierre Lacroute, de mettre l'astrométrie spatiale sur orbite. Si les astrophysiciens ont un temps été au coude à coude avec les astronomes – dont les plus proches descendants de nos jours sont les astrométristes –, ils sont

maintenant côte à côte. La division de la discipline est somme toute arbitraire et l'importance d'une bonne détermination de la distance est devenue vitale pour l'astrophysique, car c'est le seul moyen de transformer des mesures apparentes (diamètres d'étoiles, flux photométriques ou déplacements angulaires) en quantités physiques réelles. La connaissance du mouvement propre des étoiles est un autre paramètre fondamental pour étudier la cinématique et la dynamique de la Galaxie et l'évaluation de ce que l'on appelle maintenant la *masse manquante* : la cinématique de la Galaxie dérivée des mesures des mouvements individuels nécessite des forces gravitationnelles beaucoup plus importantes – et donc plus de masse – pour être cohérente avec une théorie dynamique.

L'astrométrie permet ainsi ce dépassement de l'apparent pour accéder au réel.

Hipparcos et Gaia, une révolution astrophysique

HIPPARCOS a ouvert la voie des résultats en astrophysique. Pour la première fois, l'amas ouvert des Hyades est vu en trois dimensions. L'importance de l'amas des Hyades dans les études de la structure galactique, dans la compréhension de l'évolution chimique de la Galaxie et dans la détermination de l'échelle de distance de la Population I, est bien documentée dans la littérature. Il est gigantesque, avec une extension angulaire dans le ciel d'environ 20° , il est même discernable à l'œil nu depuis un endroit sombre. L'amas des Hyades a aussi été utilisé comme base d'observation pour plusieurs relations fondamentales en astrophysique. À 40-50 pc, il se trouve un peu au-delà de la distance à laquelle les parallaxes au sol des étoiles individuelles sont facilement mesurées, ou généralement consi-

dérées comme totalement fiables. Pendant près d'un siècle, des efforts considérables ont donc été déployés pour établir la distance de l'amas à l'aide d'une grande variété de méthodes indirectes. Pour la première fois, *Hipparcos* a mesuré avec précision la distance de chacune des étoiles de l'amas ; son centre de masse observé est de $46,34 \pm 0,27$ pc (151,08 al).

Toutefois, pour reprendre les mots de Timo Prusti, responsable scientifique du projet *Gaia* à l'ESA, « les découvertes de *Gaia* représentent un changement radical dans la façon dont nous comprenons la Voie lactée. Ce que cette mission a découvert en un laps de temps relativement court est stupéfiant ». La carte tridimensionnelle de la Galaxie et du groupe local extraordinairement précise, peuplée d'environ un milliard d'étoiles, est en cours de construction par *Gaia*. Elle se densifie et se précise au fur et à mesure de la publication des données. En cartographiant les mouvements spatiaux des objets galactiques, *Gaia* permet de répondre à des questions fondamentales, telles que la date de formation des étoiles de la Voie lactée, le moment et la manière dont la Voie lactée s'est assemblée, et la distribution de la matière noire dans notre galaxie. Ce faisant, quantité d'objets exotiques sont inventoriés en grand nombre : plusieurs milliers de planètes extrasolaires avec leurs orbites ; des dizaines de milliers de naines brunes et de naines blanches ; quelque 100 000 supernovae extragalactiques. Les études du Système solaire vont également bénéficier de *Gaia* grâce à la détection de plusieurs dizaines de milliers de nouvelles planètes mineures ; des troyens intérieurs et même de nouveaux objets transneptuniens, y compris des plutinos.

Gaia a ainsi révélé cet « arbre généalogique » de galaxies plus petites qui ont contribué à faire de la Voie lactée ce qu'elle est aujourd'hui, en découvrant notamment que la Voie lactée a fusionné avec une galaxie, baptisée *Gaia-Sausage-Enceladus*, au début

de sa formation, ce qui constitue une avancée majeure dans notre compréhension de l'histoire des galaxies. Les 30 000 étoiles au mouvement étrange qui ont révélé cette fusion nous entourent presque entièrement ; elles se déplacent toutes très différemment de la plupart des autres étoiles de la Voie lactée, se déplaçant « à l'intérieur et à l'extérieur » plutôt qu'« autour ». La Voie lactée et *Gaia-Sausage-Enceladus* ont fusionné il y a environ 10 milliards d'années, et cet événement a considérablement façonné la forme et l'évolution de notre galaxie depuis lors.

Autre résultat susceptible de bouleverser les idées sur notre galaxie, mais également sur les galaxies spirales de manière générale, celui obtenu en septembre 2023 à partir des parallaxes et mouvements des étoiles issues des données *Gaia* DR3. Grâce à ces données précises, qui toutefois ne concernent qu'une fraction du contenu en étoiles de la Voie lactée (1,8 milliard sur environ 1 000 milliards d'étoiles), il a été possible pour la première fois d'obtenir une courbe de rotation robuste de la Galaxie (fig.7). La difficulté majeure a toujours tenu dans le fait que nous appartenons à notre galaxie et qu'il ne nous est par conséquent pas possible – du moins pour le moment – d'en sortir afin de l'observer depuis un lieu de l'Univers qui lui est extérieur. La courbe de rotation donne la vitesse à laquelle tourne la Galaxie en fonction de la distance à son centre. La rotation ne se fait pas d'un bloc, auquel cas la courbe de rotation serait plate du centre à son bord externe, avec une vitesse identique en tout point de la Galaxie, mais est différentielle. Ceci tient au fait que la Galaxie est composée de constituants qui peuvent se déplacer librement en son sein, sous l'influence toutefois des forces de gravitation en jeu. Ces constituants sont ce que l'on voit, les étoiles et le gaz interstellaire, mais aussi ce que l'on ne voit pas, la trop fameuse matière noire, jusqu'à ce jour invisible et indétectable, mais dont l'existence demeure l'hypothèse la plus pertinente. Jusqu'à présent, les observations des courbes de rotation des galaxies spirales ont mené à la conclusion que celles-ci sont

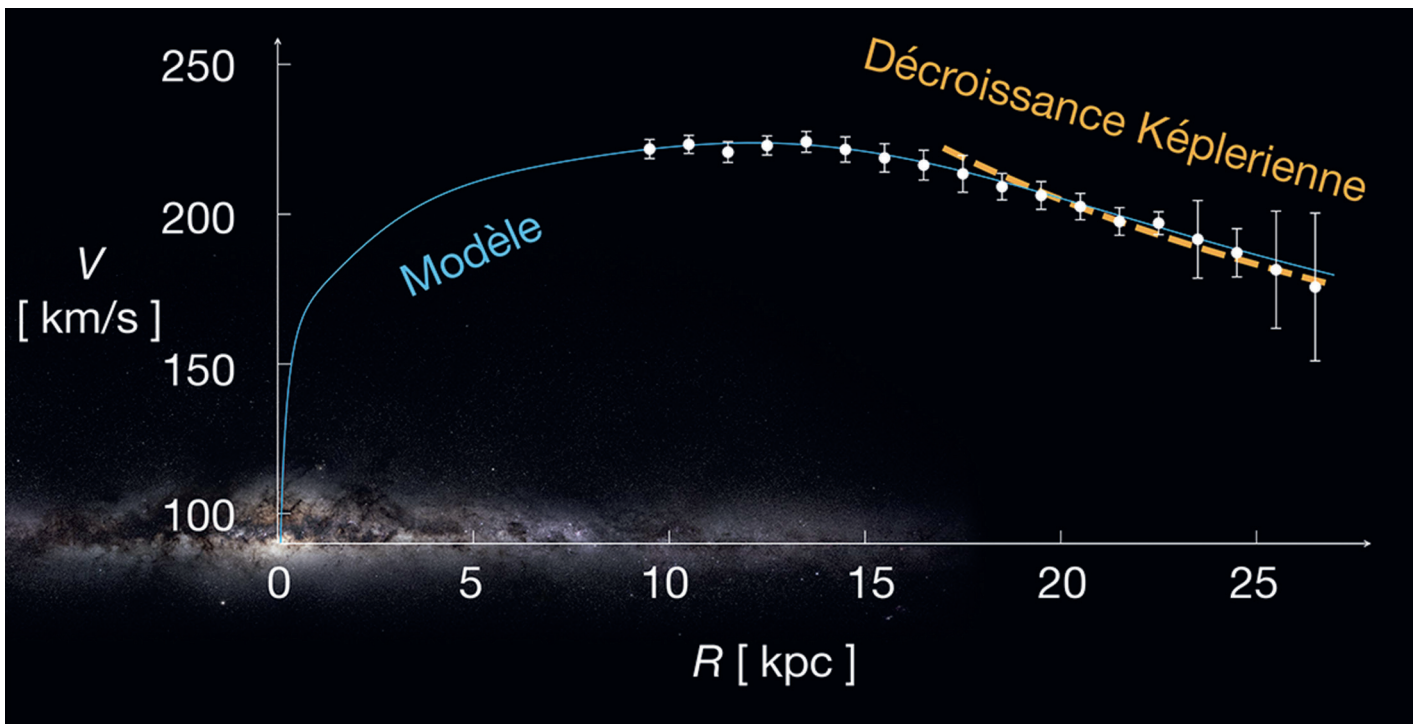


Fig. 7 – Courbe de rotation de la Voie lactée représentant la vitesse circulaire de rotation en fonction de la distance au centre.
 Les points blancs et les barres d'erreur représentent les mesures obtenues à partir du catalogue *Gaia* DR3. La courbe bleue représente le meilleur ajustement de la courbe de rotation par un modèle qui inclue matière ordinaire et matière sombre. La partie orange de la courbe montre la décroissance képlérienne, qui commence au-delà du disque optique de notre galaxie.

D'après Jiao et al., 2023

plates à partir d’une certaine distance du centre, en d’autres termes, la vitesse de rotation devient alors constante. Dans le cas qui nous préoccupe, pour la première fois, à partir des mesures de *Gaia* DR3, il se trouve que la courbe de rotation chute à partir d’une distance du centre galactique de 19 kpc (entre 50 000 et 80 000 années-lumière). À cette distance, nous nous trouvons très près du bord externe du disque stellaire de la Galaxie. En outre, la décroissance observée est purement képlérienne, elle suit donc la troisième loi de Kepler qui lie la vitesse de rotation orbitale d’un corps à la masse centrale qui agit sur lui. Autrement dit, il n’est plus besoin de faire appel à un halo de matière sombre pour expliquer les vitesses supposément très élevées de la périphérie galactique, mais une décroissance képlérienne indique en revanche l’absence de matière à l’extérieur du disque optique. Cela remet donc en cause le rapport entre la matière lumineuse (dite *baryonique*, celle dont nous sommes

constitués) et la matière noire. Ce rapport ne serait plus de 6 – rapport censé assurer la cohésion nécessaire des galaxies pour éviter que leur contenu se disperse dans l’Univers sous l’effet de leur rotation élevée –, mais de 3, soit deux fois plus faible. S’il y a moins de matière noire, cela entraîne aussi une réévaluation de la masse de la Voie lactée qui serait de l’ordre de 200 milliards de fois la masse du Soleil, cinq fois moins qu’estimé auparavant. Ces résultats sont sujets à controverses dans le petit monde des spécialistes galactiques. Cependant, avec les publications attendues des catalogues *Gaia* DR4 et *Gaia* DR5, la vision de notre galaxie s’affinera, gagnera en résolution et précision, ce qui nous permettra d’y voir plus clair.

Références

A.W. Hirshfeld, *Parallax: The Race to Measure the Cosmos*, W.H. Freeman and Company, 2001.

E. Høg, « Miraculous Approval of Hipparcos in 1980 », *Contributions to the History of Astrometry*, number 6, 2008.

E. Høg, « Astrometric accuracy during the past 2000 years », *400 Years of Astronomical Telescopes: A Review of History, Science and Technology*, Bernhard R. Brandl, Remko Stuik, J. K. Katgert-Merkelijn eds. Leiden Observatory, Leiden, The Netherlands, 2010.

Y. Jiao, F. Hammer et al., « Detection of the Keplerian decline in the Milky Way rotation curve », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 678, A208, 2023.

A. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, Presses universitaires de France, 1962.

J. Kovalevsky, *Modern astrometry*, Springer Berlin Heidelberg, 1995.

D.G. Monet, « Recent advances in optical astrometry », *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 26, 1988, p. 413-440.

M. Perryman, *The Making of History's Greatest Star Map*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

H.G. Walter and O.J. Sovers, *Astrometry of Fundamental Catalogues. The Evolution from Optical to Radio Reference Frames*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.