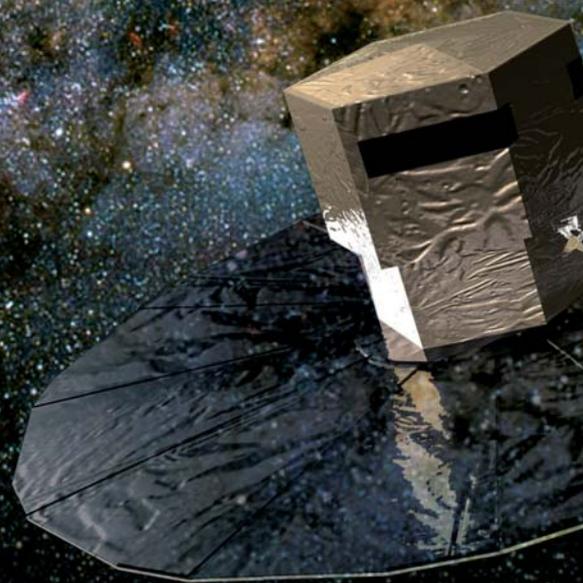


TROISIÈME DIMENSION : DE PLUS EN PLUS LOIN DANS NOTRE GALAXIE



© NASA / ISS

Un peu d'histoire

La Grande Ourse, Orion, la Couronne boréale, l'Aigle. Ces belles constellations sont observées depuis toujours par les hommes, car elles sont faciles à distinguer à l'œil nu. La première impression est qu'elles sont immuablement dessinées sur une sphère qui entoure la Terre : c'est la "Sphère des fixes" des anciens. Est-ce que la Terre est au centre ? Est-ce que tout tourne autour d'elle ? Quel est cet Univers que l'on voit autour de nous ? Quelle est sa forme ? sa dimension ? de quoi est-il constitué ? Est-ce qu'il évolue au cours du temps ? Comment s'est-il formé ? Est-ce que toutes ces étoiles sont toutes à la même distance de la Terre ? Autant de questions qui intriguent les humains depuis la nuit des temps.

Dès les VI^e et V^e siècles avant J.-C., certains mathématiciens et philosophes grecs, qui étaient aussi astronomes, se préoccupaient d'observer et d'interpréter

les mouvements des astres. Pythagore de Samos (~575/~495 avant J.-C.) fut l'un des premiers à comprendre que l'astre le plus lumineux après le Soleil et la Lune, l'étoile du soir ou du matin, était en fait un même et unique objet (Vénus !). Les mouvements des planètes sur la Sphère des fixes sont observés en détail dès cette époque, et Eudoxe de Cnide (~410/~350 avant J.-C.), disciple de Platon, est le premier à concevoir un modèle mathématique susceptible de les expliquer : outre la Sphère des fixes, un emboîtement centré sur la Terre de trois sphères concentriques pour le Soleil, autant pour la Lune et quatre pour chacune des cinq planètes connues. Aristarque de Samos (310/~230 avant J.-C.), parallèlement à ses travaux sur la mesure des distances et diamètres de la Lune et du Soleil, fit déjà deux hypothèses essentielles : la Terre tourne sur elle-même, ce qui explique fort simplement la succession des jours et des nuits, et la Terre tourne

autour du Soleil et non l'inverse. L'argument essentiel de ses détracteurs (hormis le caractère impie de vouloir mettre la Terre ailleurs qu'au centre du Monde...) était que, si la Terre se déplaçait autour du Soleil, on devrait voir les étoiles dans des directions différentes au cours des saisons. Hélas, si on ne voyait pas ces déplacements c'est que les étoiles étaient très lointaines. Ce qui est tout à fait remarquable dans les raisonnements d'Aristarque, c'est que c'était le fruit d'une démarche scientifique rigoureuse pour tenter de comprendre la nature et la structure de l'Univers à partir de l'observation des mouvements des astres et de théories mathématiques permettant de les interpréter. La découverte des différents mouvements qui animent les "étoiles fixes" a dû attendre la mise au point du télescope avec Galilée, et a ensuite été très progressive. Il a fallu attendre le milieu du XIX^e siècle pour que les progrès instrumentaux permettent les pre-



« Toujours la vue des étoiles me fait rêver, aussi simplement que me donnent à rêver les points noirs représentant sur la carte géographique villes et villages. Pourquoi, me dis-je, les points lumineux du firmament nous seraient-ils moins accessibles que les points noirs sur la carte de France ? »

Lettres à Théo, Vincent Van Gogh



1. Les mouvements et la distance des étoiles

Est-ce que les étoiles fixes bougent ?

On peut très schématiquement rappeler quelques-unes des étapes qui ont amené les astronomes à comprendre les différents types de mouvements dont sont animées les étoiles :

- **Hipparque**, ~-190/~-120 : découvre la précession des équinoxes (lent changement de direction de l'axe de la Terre).
- **Galilée**, 1564-1642 : suggère que des étoiles doubles optiques permettraient de mesurer des parallaxes d'étoiles (en comparant le mouvement de la plus brillante, supposée la plus proche, par rapport à la plus faible).
- **Edmund Halley**, 1656-1742 : découvre en 1718 les mouvements propres, en comparant les positions d'étoiles observées à son époque avec celles de

Ptolémée.

- **James Bradley**, 1693-1762 : découvre l'aberration en 1725, en cherchant à mesurer des parallaxes trigonométriques.
- **Jérôme Lalande**, 1732-1807 : dans son *Abrégé d'Astronomie*, en 1795, explique fort clairement : « La connaissance de la parallaxe annuelle nous conduisait à celle de la distance des étoiles, si cette parallaxe pouvait s'observer ; mais, puisqu'elle est insensible, nous en tirerons au moins par exclusion une des limites de cet éloignement. »
- **William Herschel**, 1738-1822 : découvre en 1802 le mouvement d'étoiles binaires en cherchant des parallaxes.
- **Bessel-Struve-Henderson** 1837-1839 : premières mesures de parallaxes.

mières mesures de parallaxes trigonométriques (lire encadré 1).

On peut faire un parallèle saisissant entre la compréhension de la structure, des distances et des mouvements dans le Système solaire avec celle de notre Galaxie : Herschel en tenta une carte en 1785 et il a fallu attendre les années 1930 pour établir que le Soleil n'était pas au centre de celle-ci, et pour en déterminer la forme (encore approchée !) et la dimension. En dehors de la difficulté à nous imaginer ailleurs qu'au centre du Monde – que le Monde soit le Système solaire ou la Galaxie – il y a un point commun entre ces deux problèmes scientifiques : un manque criant de mesures précises des distances des objets considérés.

La distance des étoiles

Il est intéressant de voir que beaucoup des astronomes dont l'histoire a retenu le nom ont tenté de donner un ordre de

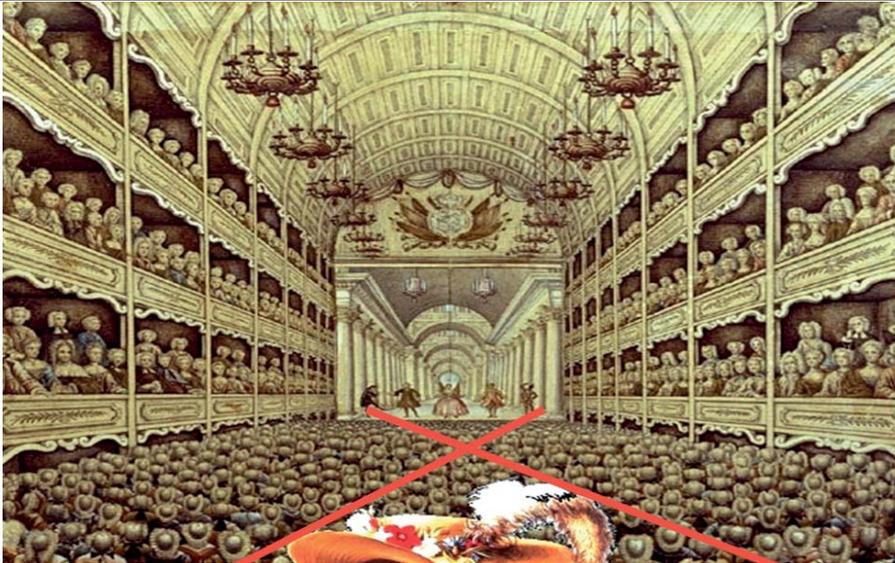
Nom	Date approchée	Distance (en 10 ⁶ km)
Aristarque	-280	Immense !
Ptolémée	150	0,1
Copernic	1500	immense !
Tycho Brahe	1580	0,09
Képler	1621	~217 / ~383
Newton	1685	~140 000
Bessel-Struve-Henderson	1838-1839	> 30 000

Étoile (auteur de la mesure)	1 ^{res} mesures (en 10 ⁶ km)	Mesures Hipparcos (en 10 ⁶ km)
Sirius (Newton)	130 000	81 370 ± 340
Centauri (Henderson)	31 000	41 570 ± 80
61 Cygni (Bessel)	98 500	107 450 ± 560
Véga (Struve)	117 000	239 330 ± 1 000

I. La distance des étoiles au cours des siècles.

grandeur à la "distance des étoiles". La table 1 en donne une sélection, ainsi que la comparaison des premières mesures de distances avec les distances obtenues par le satellite Hipparcos. Newton a obtenu la distance de Sirius par comparaison de la magnitude de Sirius avec celle de Saturne ; la fraction de la lumière réfléchiée par Saturne, sup-

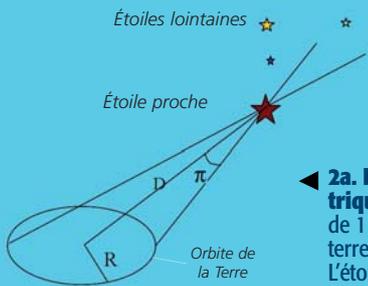
posant connus le rayon de celle-ci, sa distance au Soleil et son albédo, indique la distance à laquelle il faudrait repousser le Soleil pour qu'il ait la magnitude apparente de Saturne. Bessel, Struve et Henderson sont les auteurs des premières mesures de parallaxes trigonométriques.



2. La parallaxe trigonométrique

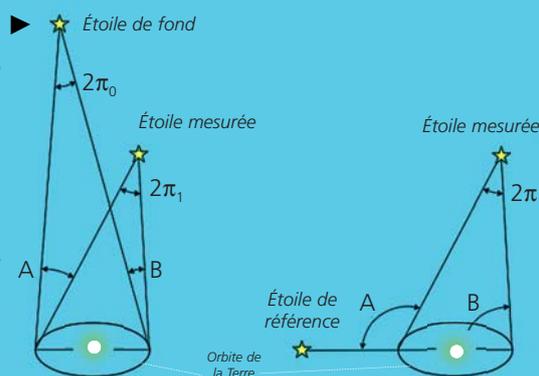
La parallaxe est la principale méthode qui permette de déterminer la distance d'une étoile sans aucune hypothèse sur la physique de l'étoile ni modélisation préalable de son atmosphère. La parallaxe est l'angle sous lequel on verrait le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil depuis l'étoile considérée. C'est aussi la moitié de la variation de l'angle sous lequel on observe une étoile par rapport au fond du ciel pendant que la Terre parcourt son orbite. Le principe de la parallaxe est simple. Il a été schématisé par J. Lalande dans *L'Astronomie des Dames* (illustration 1).

Appliqué aux étoiles, il permet de mesurer la distance d'une étoile proche par rapport à la distance des étoiles du même champ, dont on fait l'hypothèse qu'elles sont beaucoup plus lointaines et que leur propre parallaxe est négligeable (figure 2a). Les mesures effectuées depuis le sol, ou d'un instrument pointé tel le télescope spatial Hubble, font ainsi des mesures dans de petits champs du ciel. Ces mesures donnent des parallaxes relatives. L'une des grandes innovations du satellite Hipparcos et, dans le futur, de Gaia, c'est que, grâce à leurs systèmes optiques complexes, ils observent des objets dans deux champs du ciel séparés par un grand angle (58° pour Hipparcos, 106,5° pour Gaia), et ont ainsi la possibilité de mesurer directement de grands angles et d'obtenir des parallaxes absolues (figure 2b). ●



◀ **2a. Distance des étoiles et parallaxe trigonométrique.** La distance D est de 1 parsec si la parallaxe π est de 1 seconde de degré. R est le demi-grand axe de l'orbite terrestre : $R = 1$ unité astronomique (u.a.). $D = R / \pi$. L'étoile la plus proche, Proxima Centauri est à une distance de 1,3 pc, sa parallaxe trigonométrique est de 0,77".

▶ **2b. Parallaxe trigonométrique relative et absolue** (adapté de L. Lindegren). La figure de gauche montre la mesure de parallaxe trigonométrique dans un petit champ : la mesure des (petits) angles A et B (en réalité beaucoup plus petits que sur ce dessin) permet de déterminer la parallaxe relative $\pi_1 - \pi_0 = (A-B)/2$. La figure de droite montre le principe des mesures avec Hipparcos ou Gaia : quelle que soit la distance de l'étoile de référence, on a $\pi_1 = (A-B)/2$.



Le principe de la mesure d'une parallaxe trigonométrique est expliqué dans l'encadré n°2. Les difficultés sont multiples :

- Tout d'abord les quantités à mesurer sont extrêmement petites car il se trouve que le Soleil est dans une zone peu peuplée de notre Galaxie : l'étoile la plus proche est à 1,3 parsec (soit 4,2 années de lumière) avec une parallaxe trigonométrique de 0,77 seconde de degré (la seconde de degré est notée " ci-dessous), et il n'y a que 50 étoiles à moins de 5 pc (parsec), avec une parallaxe trigonométrique plus grande que 0,2". Pour se rendre compte à quel point ces quantités sont petites, il faut s'imaginer observer une myrtille située à un kilomètre, et essayer de distinguer le trajet effectué par un moucheron allant d'un côté à l'autre de la myrtille en une année ! Ceci est équivalent à mesurer une parallaxe trigonométrique de 1", soit une étoile située à une distance de 1 pc. Une milliseconde de degré (notée mas ci-dessous) la précision du satellite Hipparcos, est l'angle sous lequel on verrait un personnage sur la Lune. Enfin, une microseconde de degré (notée μ s ci-dessous), est l'angle sous lequel on verrait le pistil d'une fleur sur la Lune ou un rosier sur Mars... La précision espérée pour Gaia pour les étoiles les plus brillantes (jusqu'à la magnitude $V = 10$) est de 7 μ as (lire l'article suivant).
- Une deuxième difficulté vient du fait que le mouvement dû à l'effet de parallaxe trigonométrique n'est, de loin, pas le seul qui perturbe la position des étoiles sur la Sphère des fixes. Elles sont, en particulier, animées d'un mouvement par rapport au Soleil. Sa projection sur la sphère céleste est le mouvement propre (sa projection sur la ligne de visée est la vitesse radiale).
- Une troisième difficulté tient au fait que de nombreuses étoiles font partie de systèmes doubles ou multiples, et que chacune des composantes de tels systèmes tourne autour du centre de gravité du système, ce qui se traduit par autant de mouvements sur la sphère céleste.
- Enfin, la quantité physique recherchée est la distance de l'étoile observée. Elle permet de placer l'étoile dans la Galaxie et, par comparaison avec son éclat apparent, de déterminer sa luminosité intrinsèque. Au sol, les observations sont effectuées dans de petits champs, et on obtient la parallaxe relative de l'étoile observée, c'est-à-dire la distance de l'étoile comparée à celles des quelques étoiles qui l'entourent dans le champ de l'instrument, étoiles que l'on suppose très lointaines. Avec des satellites comme Hipparcos et Gaia, les deux champs d'observation, séparés par un grand angle sur la sphère céleste, permettent de mesurer directement de grands angles et d'obtenir

II. Principaux catalogues de parallaxes trigonométriques.

Date	Auteur(s)	Titre du catalogue	Nombre d'étoiles
1904	Newcomb		72
1924	Schlesinger	First General Catalogue of Trigonometric Parallaxes	1 870
1963	Jenkins	Yale Parallax Catalog	6 300
1995	van Altena et al.	Fourth General Catalogue of Trigonometric Parallaxes	8 112
1997	ESA, Perryman et al.	The Hipparcos Catalogue	118 218
2020	ESA, DPAC	The Gaia Catalogue	> 1 milliard

une parallaxe absolue, donc la distance réelle de l'étoile.

En conséquence de toutes ces difficultés, la qualité et le nombre de mesures de parallaxes trigonométriques ont très lentement progressé depuis les trois mesures pionnières de Bessel, Hendersen et Struve jusqu'à l'avènement des mesures astrométriques dans l'espace, ou astrométrie spatiale. Ceci est montré dans la table 2. Les deux sauts quantitatifs correspondent à l'avènement des méthodes photographiques au début du vingtième siècle puis à celui de l'astrométrie spatiale. Dans les années 1980, les techniques photographiques, bien qu'ayant fortement progressé, avaient montré leurs limites : en une année (1984), l'observatoire de Flagstaff avait obtenu 50 mesures. À ce rythme, il aurait fallu 2 000 ans pour obtenir des mesures pour autant d'étoiles qu'avec le satellite Hipparcos en 3 ans, et de plus elles auraient été moins précises.

Ces grandes difficultés étaient bien connues des astronomes. Les deux citations suivantes, de deux astronomes très reconnus, en sont un exemple :

– « Les mesures des distances stellaires présentent de si grandes difficultés que,

même de nos jours, nous ne connaissons les distances approchées que de moins d'une centaine d'étoiles. Sur aucun autre point de la science astronomique, il n'y a le besoin d'une meilleure connaissance, une urgence si forte, que sur le sujet des distances stellaires. » (W.W. Campbell, 1910).

– « La détermination des distances dans l'Univers, comme tant de questions qui occupent l'attention des astronomes, est par essence, une tâche impossible... Il serait plus sage de se concentrer sur l'échelle de distance dans notre Galaxie. » (P.W. Hodge, 1981).

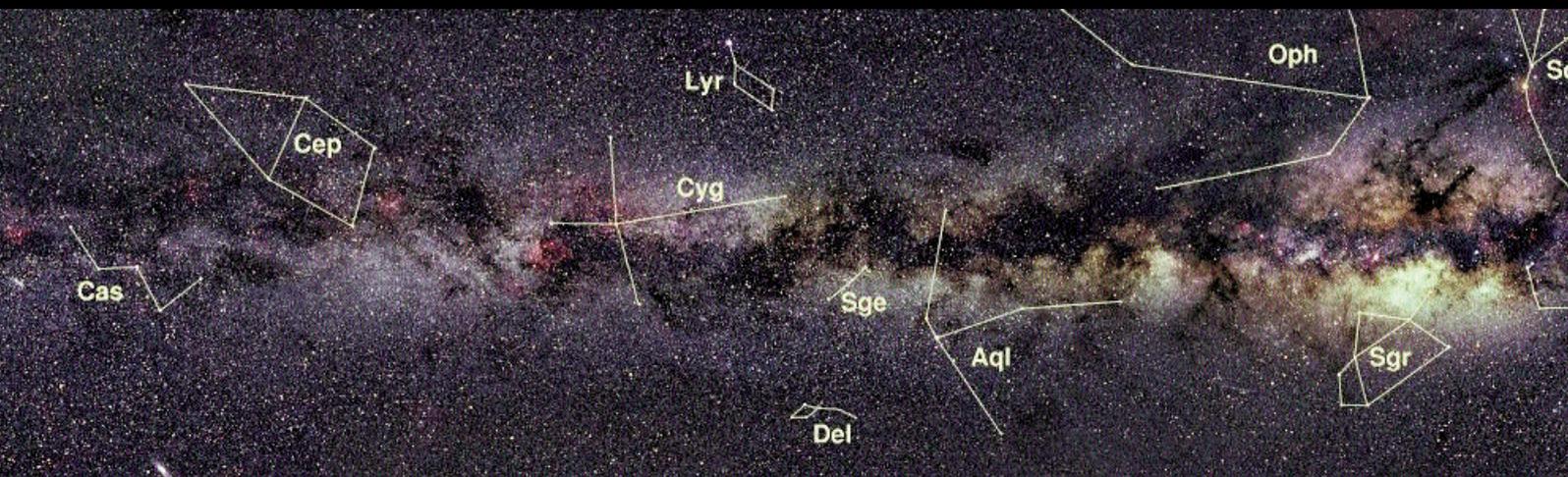
Dans les années 1960, la précision des mesures de parallaxes trigonométriques au sol n'était suffisante pour déterminer la luminosité absolue des étoiles que pour un très petit nombre d'entre elles. Sur les 6 000 étoiles du catalogue de Jenkins, seulement environ 300, les très proches du Soleil, avaient une distance mesurée à mieux que 10 % près. Dans le catalogue Hipparcos, il y en a 21 000, jusqu'à une distance de 220 pc. Avec Gaia, on en espère de l'ordre de 100 millions, jusqu'à environ 15 000 pc. Ces améliorations successives de plusieurs ordres de grandeur ont permis avec Hipparcos une étude détaillée du voisi-

nage solaire, et vont permettre avec Gaia un décryptage complet de notre Galaxie et de tous les types d'étoiles qui la composent.

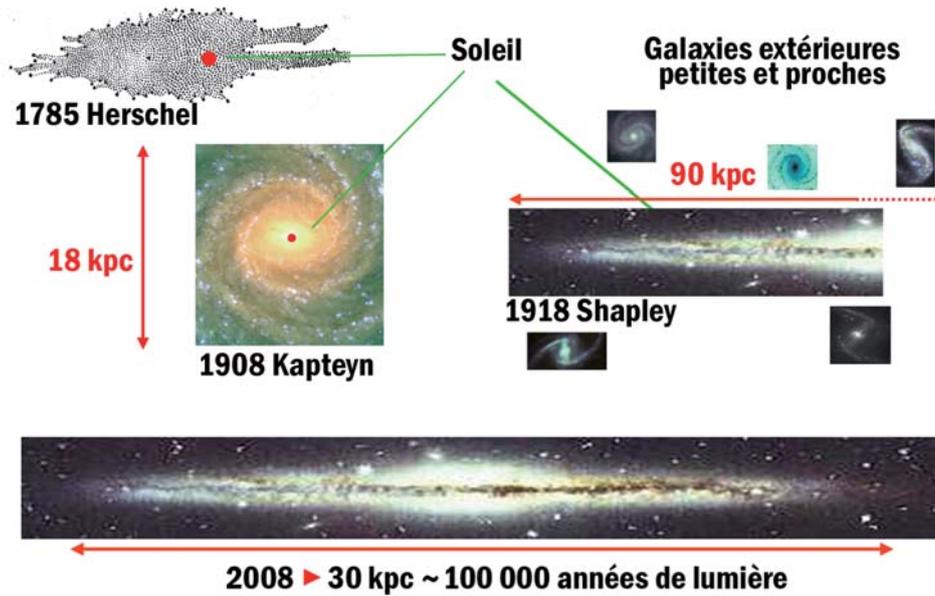
La Galaxie où nous vivons

Une observation attentive du ciel montre qu'il y a des zones du ciel beaucoup plus riches en étoiles que d'autres : la Voie lactée traverse le ciel (figure 3). Elle avait déjà été remarquée par les Anciens. La mythologie grecque avait une explication : Zeus voulait rendre immortel Héraclès, le fils qu'il avait eu avec Alcmène, simple mortelle. Pour cela, il mis le bébé au sein de son épouse, la déesse Héra, pendant le sommeil de celle-ci. En se réveillant, elle repoussa ce bébé inconnu et son lait s'échappa dans le ciel, créant la Voie lactée. Quelques gouttes, tombées sur le sol, firent fleurir des lys.

Dès la fin du XVIII^e siècle, William Herschel (1785) essaya de comprendre la forme de notre Galaxie, et la position du Système solaire à l'intérieur de celle-ci. Pour cela, il effectua de très soigneux dénombrements d'étoiles, jusqu'à une magnitude apparente constante de $V = 15$ dans toutes les directions. Pour les interpréter, et faute d'informations supplémentaires, il est amené à faire un



3. Voie lactée, observée en optique. Panorama de la Voie lactée en coordonnées galactiques sur une zone du ciel de $360^\circ \times 45^\circ$, avec l'indication des constellations, obtenu à partir de 51 photographies grand-champ prises avec un appareil photo numérique depuis la Californie et l'Afrique du Sud. Une description détaillée est donnée par l'auteur à l'adresse suivante : <http://home.arcor-online.de/axel.mellinger/> © Axel Mellinger



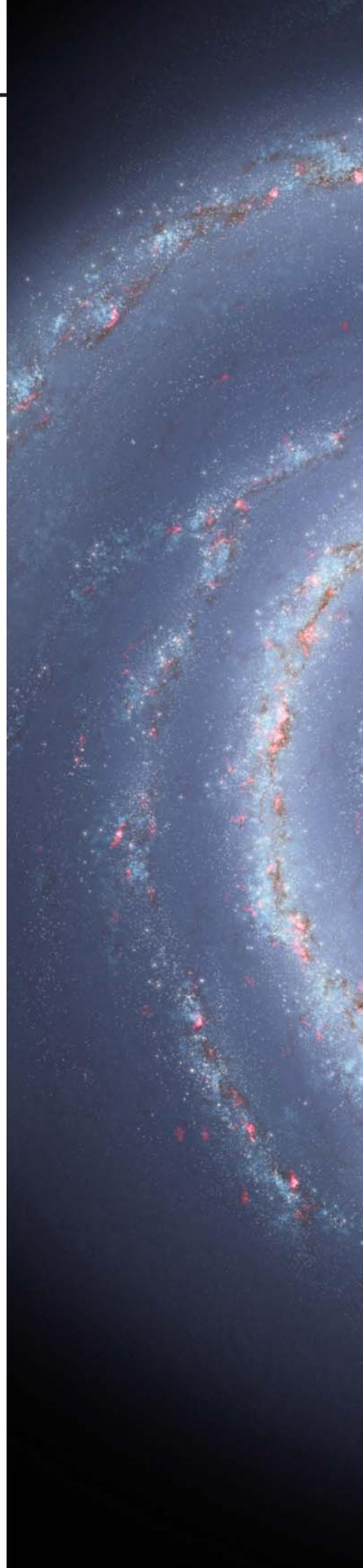
4. Évolution de la représentation de notre Galaxie au cours des derniers siècles.

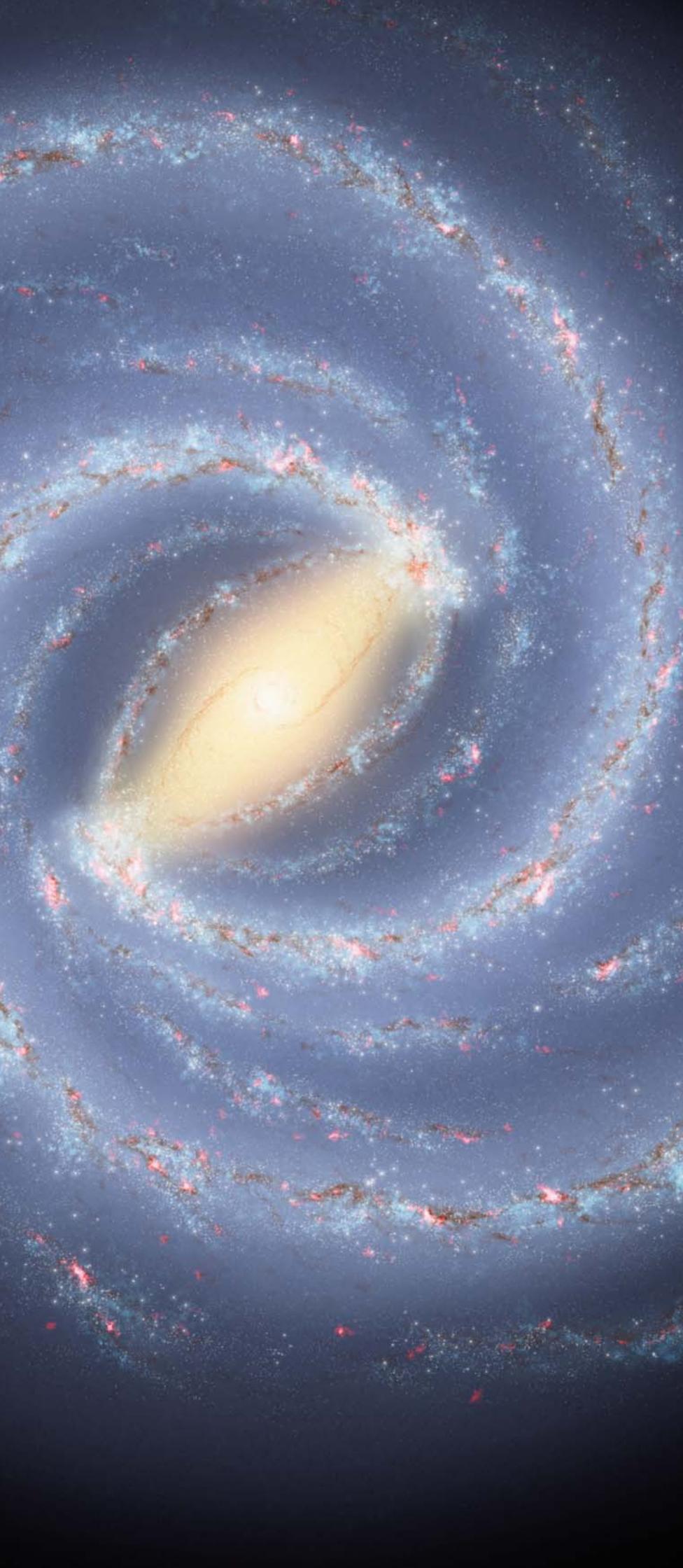
certain nombre d'hypothèses : les étoiles sont uniformément réparties dans toutes les directions, l'espace interstellaire est transparent, toutes les étoiles sont observées jusqu'aux confins du système et elles ont toutes la même luminosité absolue (malheureusement aucune de ses hypothèses n'était correcte). Il obtient le dessin montré sur la figure 4, avec le Soleil au centre. On y reconnaît clairement les deux bras de la Voie lactée telle qu'on peut l'observer par une belle nuit d'été. Un manque crucial : des distances correctes.

La forme et la taille de notre Galaxie feront l'objet de débats acharnés au début du XX^e siècle : Kapteyn prétendait que le rayon de la Galaxie était de 9 000 pc, avec le Soleil proche de son centre. À l'opposé, Shapley soutenait que ce rayon était dix fois plus grand, et que le Soleil était loin (20 000 pc) du centre. Par contre, curieusement, il pensait que les galaxies extérieures, les *nébuleuses*, dont on connaissait déjà la variété de formes, étaient petites et proches. Le diamètre de notre Galaxie, sa forme exacte et la distance du Soleil au centre galactique sont encore sources d'études et sujets à révision actuellement.

Notre Galaxie est une galaxie spirale barrée dont les principales composantes sont un bulbe avec une ou deux barres ; un disque définissant le plan galactique, dont le diamètre est de l'ordre de 30 kpc, et qui est généralement décomposé en deux composantes de disque d'épaisseur différentes (300 et 900 pc) ; et un halo très étendu (jusqu'à environ 100 kpc). La détermination la plus récente de la distance au Soleil est de $7,6 \pm 0,3$ kpc alors qu'elle était estimée à environ 10 kpc il y a seulement 40 ans. Deux des principales difficultés dans ces études sont la présence de matière absorbante, gaz et poussière, essentiellement concentrée dans le disque de notre Galaxie et le fait que notre Soleil n'est que 10 à 15 pc au-dessus du plan galactique.

Notre Galaxie est composée de gaz, de poussières et de diverses sortes d'étoiles. Ce que l'on distingue rapidement à l'œil nu ce sont les couleurs différentes des étoiles les plus brillantes, mais bien d'autres paramètres permettent de les caractériser et de les classer en différentes populations. Les étoiles d'une même population stellaire ont de nombreuses caractéristiques communes : ce sont des étoiles de même origine, formées à partir de gaz contenant les mêmes éléments chimiques en même quantité.





Elles ont donc le même type de distribution spatiale dans la Galaxie, et suivent des orbites similaires.

Le concept de population stellaire a été introduit Walter Baade en 1944 : il distinguait les étoiles de Population I au voisinage solaire, les plus jeunes, et les étoiles de Population II, plus anciennes, semblables aux étoiles des amas globulaires. Des subdivisions plus fines sont maintenant faites pour décrire les différentes composantes de notre Galaxie. Chaque composante a des caractéristiques spatiales, chimiques, cinématiques, et dynamiques communes, et l'analyse des relations entre ces différentes caractéristiques permet de comprendre comment ces composantes se sont mélangées au cours du temps, et de reconstituer ainsi l'histoire de la formation et de l'évolution de notre Galaxie. Pour pouvoir progresser, il est essentiel de disposer de grands échantillons d'étoiles statistiquement bien définis et pour lesquels on a obtenu des mesures précises de position sur le ciel et dans la Galaxie (distance au Soleil), de cinématique (mouvements propres et vitesses radiales) et des caractéristiques physiques (observations spectroscopiques et/ou photométriques). Hipparcos a apporté une révolution dans la connaissance du voisinage solaire proche. Gaia va permettre un saut énorme dans le décryptage de la Galaxie et de chacune de ses populations d'étoiles en apportant des informations détaillées pour tous les types d'étoiles, même les plus rares ou dans les phases d'évolution les plus rapides. Ces deux missions spatiales européennes sont présentées dans l'article suivant.

C. Turon
et **F. Arenou** ■

Vue d'artiste de la Voie lactée telle qu'elle est imaginée actuellement. Présentation au 212^e meeting de l'American Astronomical Society en juin 2008. © NASA/JPL-Caltech

Liens utiles :

<http://www.hip.obspm.fr/gaia/AS>

<http://sci.esa.int/gaia>

<http://www.rssd.esa.int/gaia>

(voir en particulier la section "Gaia Outreach").