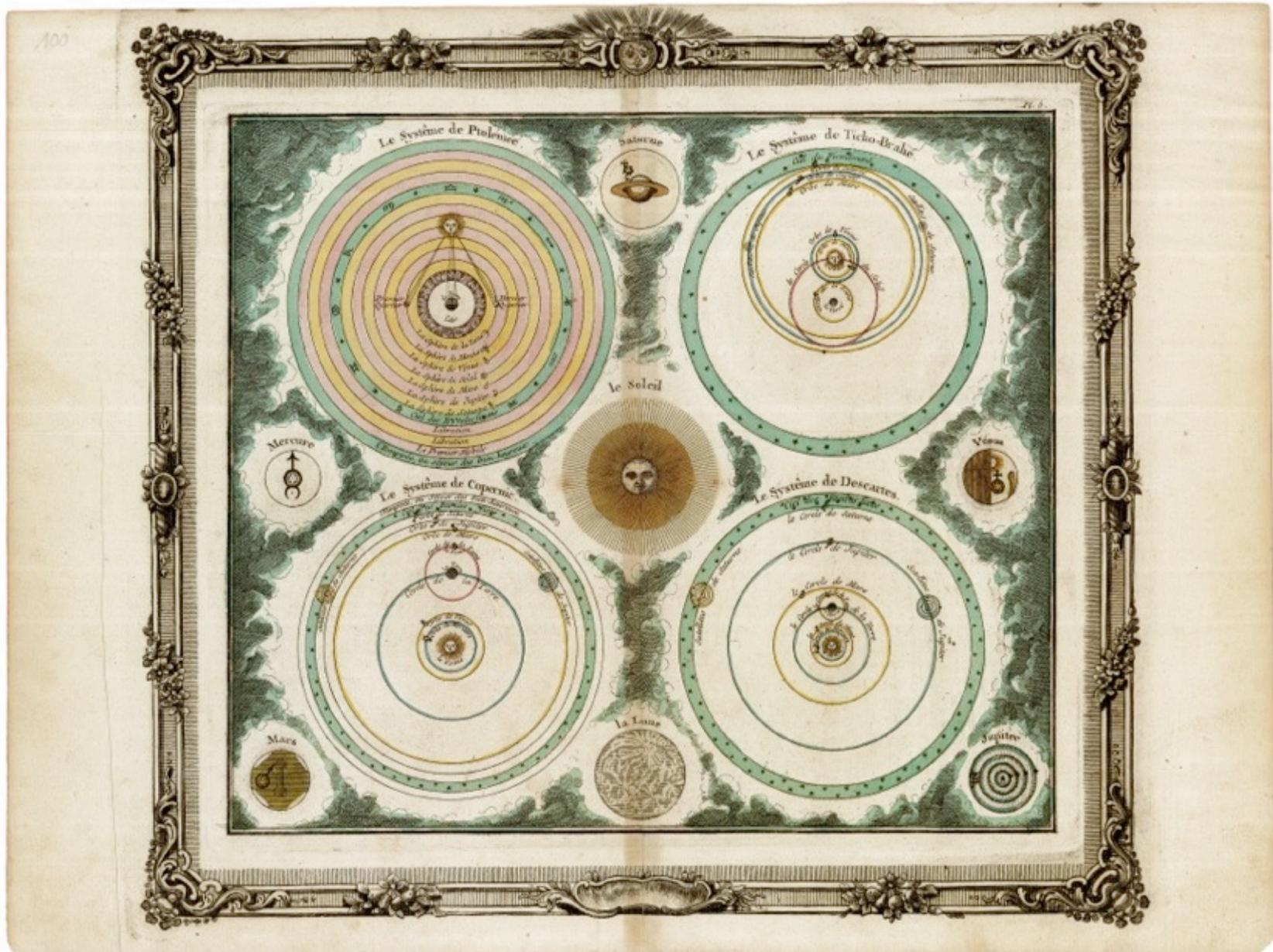


**Du Système Solaire  
aux Exoplanètes :  
considérations historiques  
et épistémologiques**

**Danielle Briot**  
*(Observatoire de Paris)*



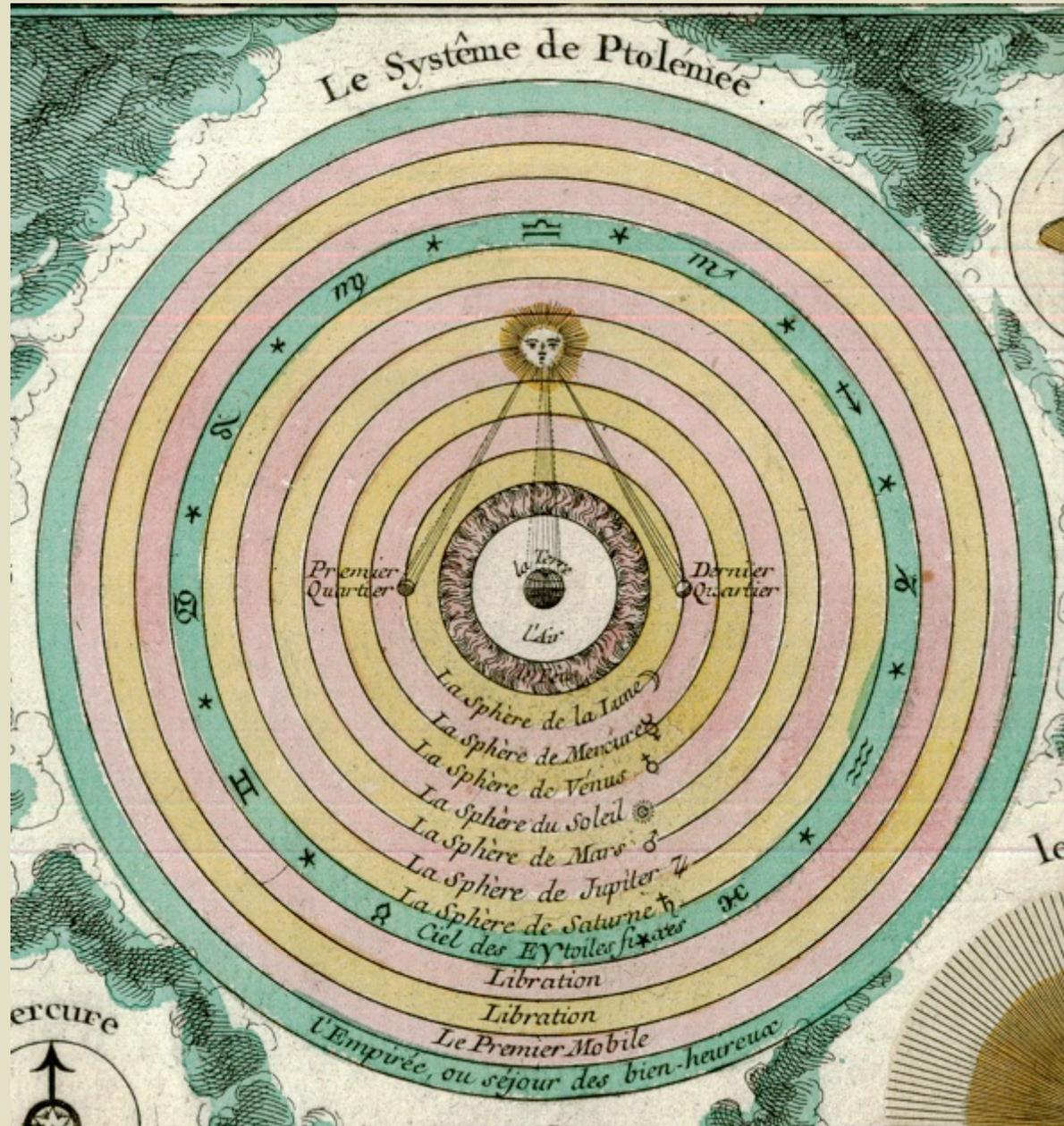
Les systèmes du monde, de Ptolémée (c. 90-158) à Descartes (1596-1650) présentés dans un atlas du XVIIIème siècle <sup>2</sup>

Comment le système solaire a-t-il été identifié comme un objet et comment et quand a-t-on compris qu'il pouvait exister de nombreux systèmes analogues ?

Avant de parler de système solaire, on parle de système du monde.

Pendant des siècles, le système établi par Claude Ptolémée (c.90 A.D.-c.168A.D.), en combinant ses propres observations avec celles de nombreux prédécesseurs, et en particulier celles d'Hipparque (190-120 av. J.-C.), a servi à la prédiction du mouvement des astres.

Dans ce système, le calcul du mouvement des astres s'effectue en combinant des mouvements qui s'inscrivent dans un ensemble de sphères emboîtées.



Le système de Ptolémée présenté dans un atlas du XVIIIème siècle

Dans le système dit de Ptolémée, la Terre est au centre du monde. Différentes sphères mobiles correspondent aux mouvements des différentes planètes. La dernière sphère est la sphère des étoiles fixes, qui tourne dans son ensemble.

Ainsi notre monde était sphérique, limité par la sphère des fixes.

La question fut posée très tôt par les philosophes grecs de l'antiquité : existe-t-il, en dehors du nôtre, d'autres mondes, également limités, semblables ou non au nôtre ? C'est ce qu'il est convenu d'appeler le débat sur la multiplicité des mondes. On voit bien que le sens des mots ne correspond pas au sens que nous donnons actuellement à ces mots-là. En effet, avec nos connaissances et le mode de pensée actuels, pour nous les mots « multiplicité des mondes » signifie l'existence de systèmes planétaires autour d'autres étoiles que le Soleil. Nous avons vu que la figure que l'on se faisait du monde était alors très différente de la nôtre.

En particulier les étoiles étaient loin d'être considérées comme étant d'autres soleils.

La question de la multiplicité des mondes signifiait l'existence, hors de notre monde visible centré sur la Terre, qui contient tous les astres accessibles à notre vue jusqu'à la dernière sphère des étoiles fixes, d'autres mondes, semblables ou non au nôtre, peut-être en nombre infini, et hors de notre portée.

Les plus anciennes références connues en faveur d'autres mondes sont celles des philosophes grecs Démocrite (470-365 av. J.-C.) et Epicure (342-270 av. J.-C.) .

*"Les mondes sont illimités et différents en grandeur : dans certains il n'y a ni Soleil ni Lune, dans d'autres, Soleil et Lune sont plus grands que chez nous, et dans d'autres il y en a plusieurs. Les intervalles entre les mondes sont inégaux et dans certains endroits du cosmos, il y en plus, alors qu'il y en a moins dans d'autres. Certains sont en croissance, d'autres à leur apogée, d'autres encore sont décroissants..."*

*Il existe des mondes dépourvus d'êtres vivants, de plantes, et de toute humidité"*

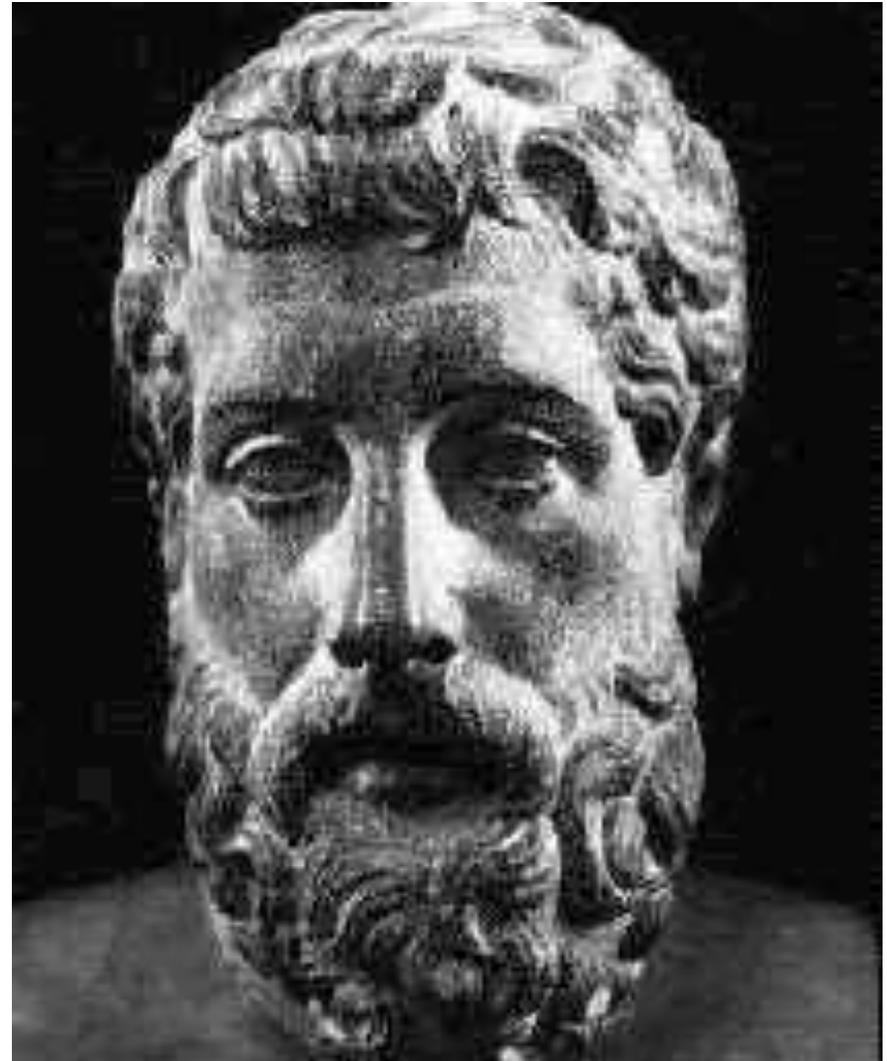
Démocrite

*"Il existe des mondes infinis semblables et différents du nôtre. Car les atomes, étant en nombre infini comme il a été précédemment prouvé, sont emportés loin dans l'espace. Or ces atomes, qui sont de nature à pouvoir créer ou fabriquer un monde, n'ont pas été épuisés par la création d'un seul monde ou d'un nombre limité de mondes... Il s'ensuit qu'il n'existe aucun obstacle à l'existence d'un nombre infini de mondes"*

Epicure, disciple de Démocrite,  
*Lettre à Hérodoté*



**Démocrate**  
(470-365 av. J.-C.)

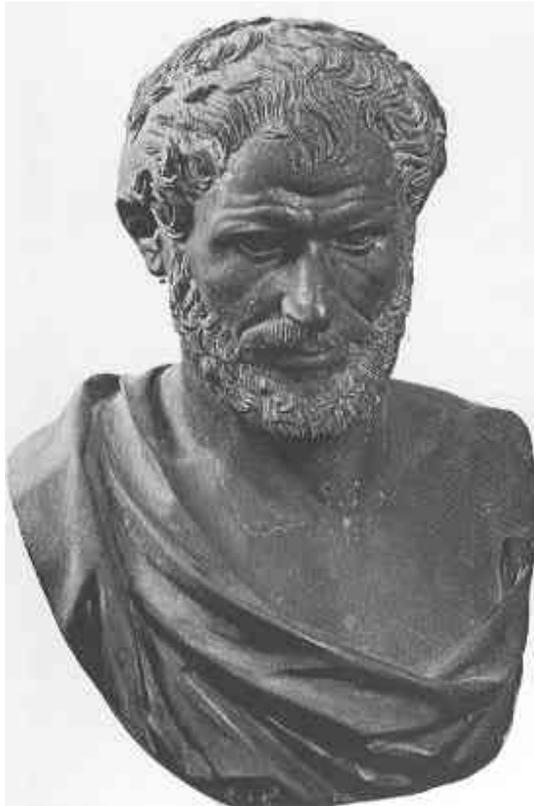


**Epicure**  
(342-270 av. J.-C.)

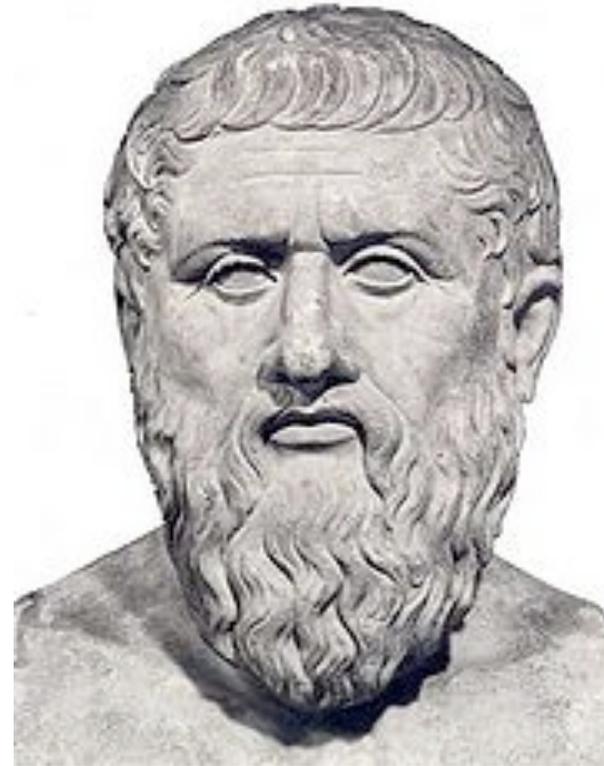
Platon et Aristote sont d'un avis contraire :

*“...S’il en est ainsi, le ciel doit nécessairement être un et non multiple.”*

Aristote



**Aristote**  
(384 -322 av. JC)



**Platon**  
(427-348 av.J.C.)

A partir du Moyen Age, un autre paramètre doit être considéré : l'accord entre la théorie de la pluralité des mondes et la religion telle qu'elle est enseignée.

Deux interprétations théologiques existent :

- Le récit de la création du monde dans la Genèse ne parle que d'un seul monde. Donc l'existence d'autres mondes ne peut pas avoir lieu.
- Mais il n'est pas précisé que Dieu n'a pas créé d'autres mondes, et la toute puissance de Dieu implique qu'il a pu créer d'autres mondes.

La question d'autres mondes donna naissance à controverse.

En 1277, l'évêque de Paris condamna 219 croyances communément admises et l'une de ces croyances était que « la Cause Première ne pouvait créer plusieurs mondes ».

Saint Augustin (354 - 430) fut parmi les premiers auteurs chrétiens à discuter cette idée, à laquelle il était opposé, comme certains des auteurs du Moyen-Age, y compris Albert le Grand (1193 - 1280) et Thomas d'Aquin (1225 - 1274).



**Saint Augustin**

**Albert le Grand**

**Saint Thomas d'Aquin**

Le système de Ptolémée impliquait que le monde entier, à partir de la Lune était parfait. La figure parfaite est la sphère et les astres doivent décrire des trajectoires parfaites, c'est-à-dire circulaires.

Le ciel était immuable.

Cependant , et depuis longtemps, on savait que les observations, qui n'étaient alors que des observations de position, des planètes vues depuis la Terre ne correspondaient pas à la figure parfaite, c'est-à-dire des trajectoires circulaires. On avait alors expliqué les mouvements observés des planètes, en particulier les mouvements rétrogrades de certaines planètes, par des combinaisons de cercles glissant sur des cercles, c'est-à-dire des épicycloïdes.

Au fur et à mesure que les observations gagnaient en précision, on ajoutait des épicycloïdes aux épicycloïdes, jusqu'à obtenir des systèmes extrêmement complexes. En 1543, par une intuition géniale, Nicolas Copernic (1473-1543), dans son livre *De Revolutionibus* met le Soleil au centre du monde, supprimant ainsi tout le système compliqué des épicycloïdes.

Le système héliocentrique remplace le système géocentrique.

La description du système solaire ressemble beaucoup à la nôtre.

Mais qu'en est-il de la sphère des étoiles fixes ?

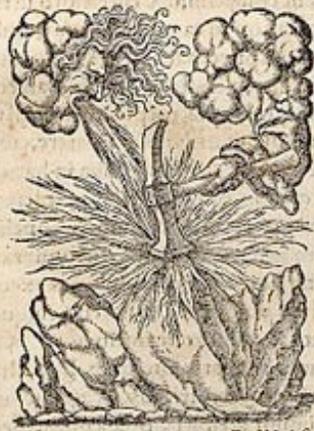


**Copernic (1473-1543)**

NICOLAI  
COPERNICITO-  
RINENSIS DE REVOLVTIONI-  
bus orbium cœlestium,  
Libri VI.

IN QVIBVS STELLARVM ET FI-  
XARVM ET ERRATICARVM MOTVS, EX VETE-  
ribus atq; recentibus obseruationibus, restituit hic autor,  
(Præterea tabulas expeditas luculentasq; addidit, ex qui-  
bus eosdem motus ad quoduis tempus Mathe-  
maticum studiosus facillime calcu-  
lare poterit.)

ITEM, DE LIBRIS REVOLVTIONVM NICOLAI  
Copernici Narratio prima, per M. Georgium Ioachim  
mum Rheticum ad D. Ioan. Schone-  
rum scripta.



Cum Gratia & Priuilegio Cæs. Mæst.  
BASILEAE, EX OFFICINA  
HENRICPETRINA.

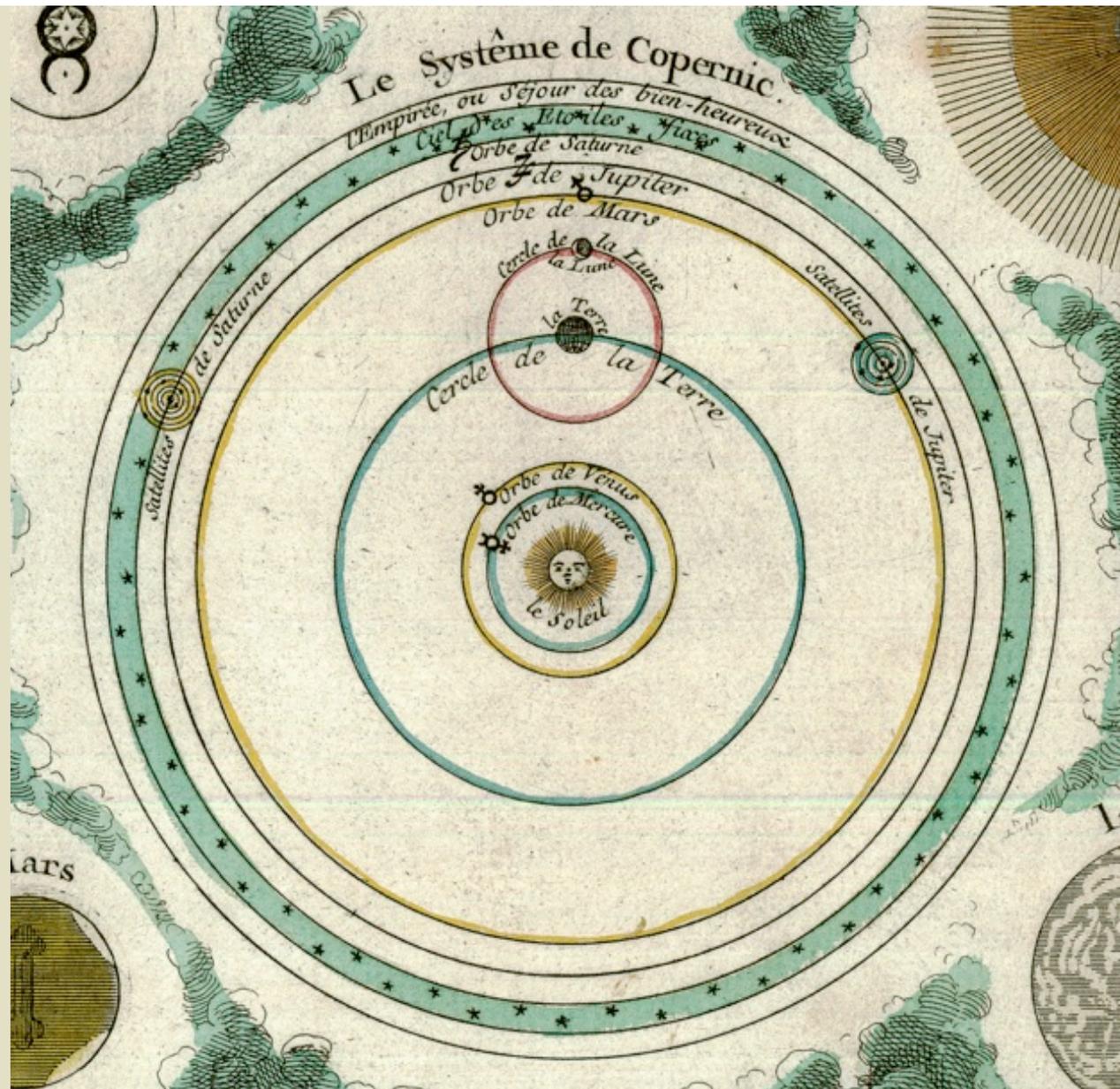
NICOLAI COPERNICI

net, in quo terram cum orbem lunari tanquam epicyclo contineri  
diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum  
deniq; locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circū  
currens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc



pulcherrimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco po-  
neret, quam unde totum simul possit illuminare? Siquidem non  
inepte quidam lucernam mundi, alij mentem, alij rectorem uo-  
cant. Trimegistus uisibilem Deum, Sophoclis Electra intuentē  
omnia. Ita profecto tanquam in folio regali Sol residens circum  
agentem gubernat Astrorum familiam. Tellus quoque minime  
fraudatur lunari ministerio, sed ut Aristoteles de animalibus ait,  
maximam Luna cum terra cognitionē habet. Cōcipit in terra à  
Sole terra, & impregnatur anno partu. Inuenimus igitur sub  
hac

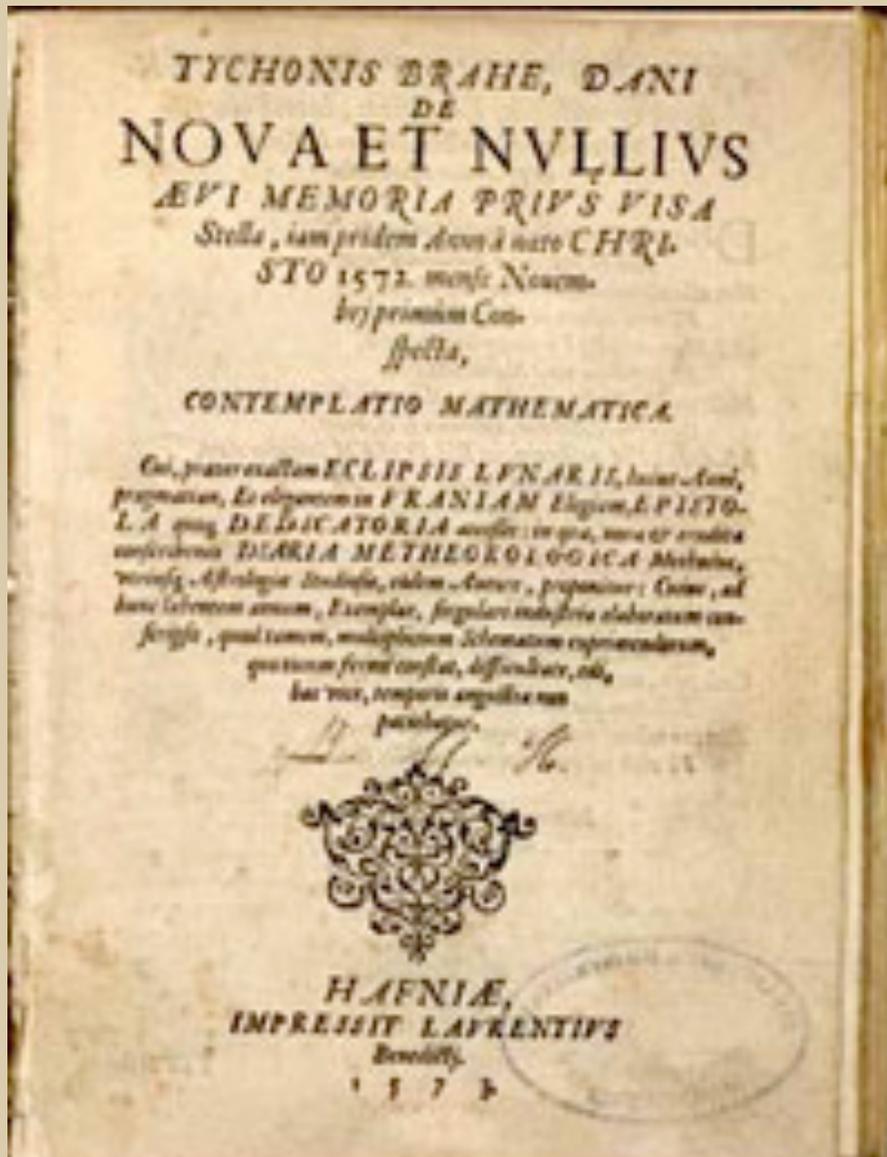
Le livre de Copernic *De Revolutionibus*,  
et le système de Copernic tel qu'il y figure



Le système de Copernic  
présenté dans un atlas du XVIIIème siècle

Un des premiers faits qui servira d'argument contre l'immuabilité des cieux fut l'apparition d'une "nouvelle étoile" en 1572.

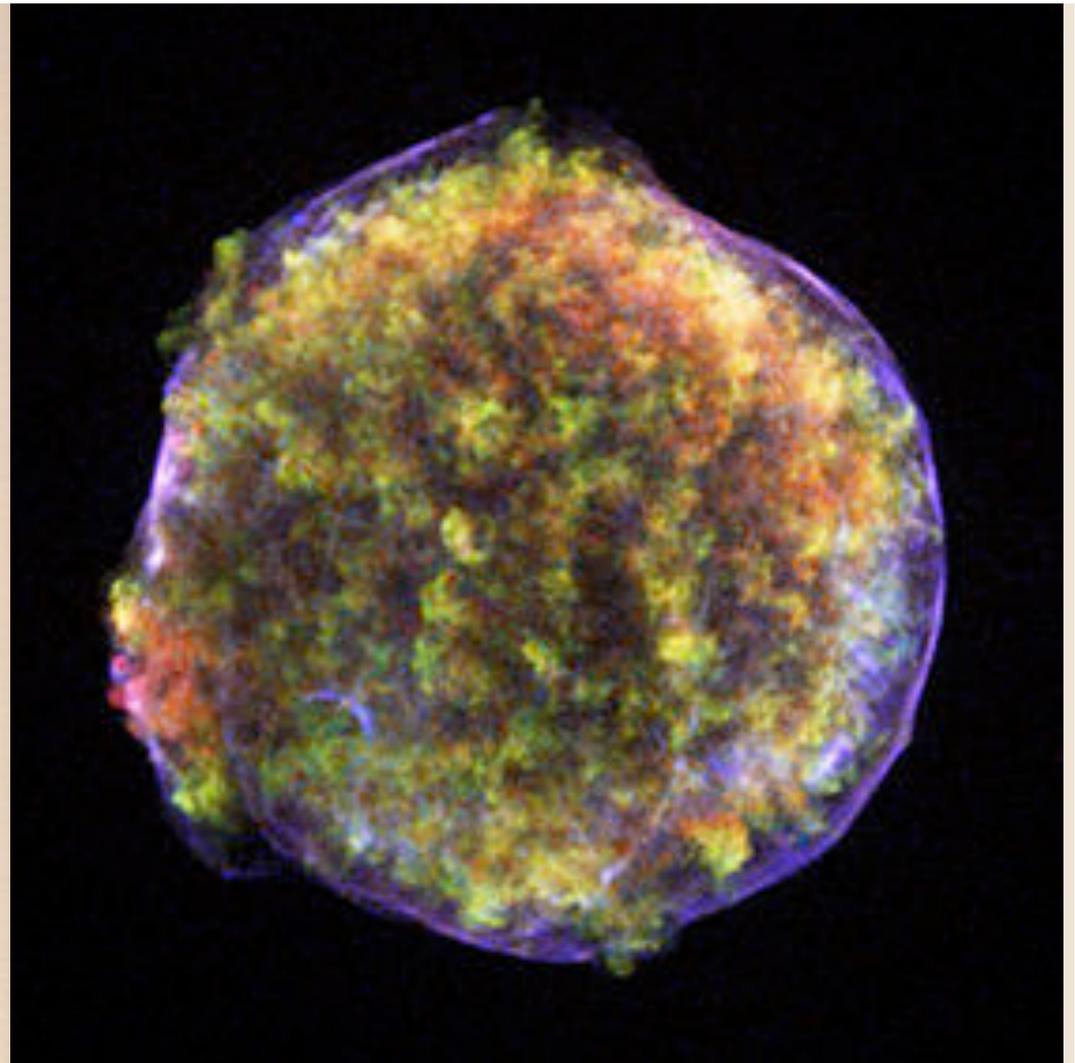
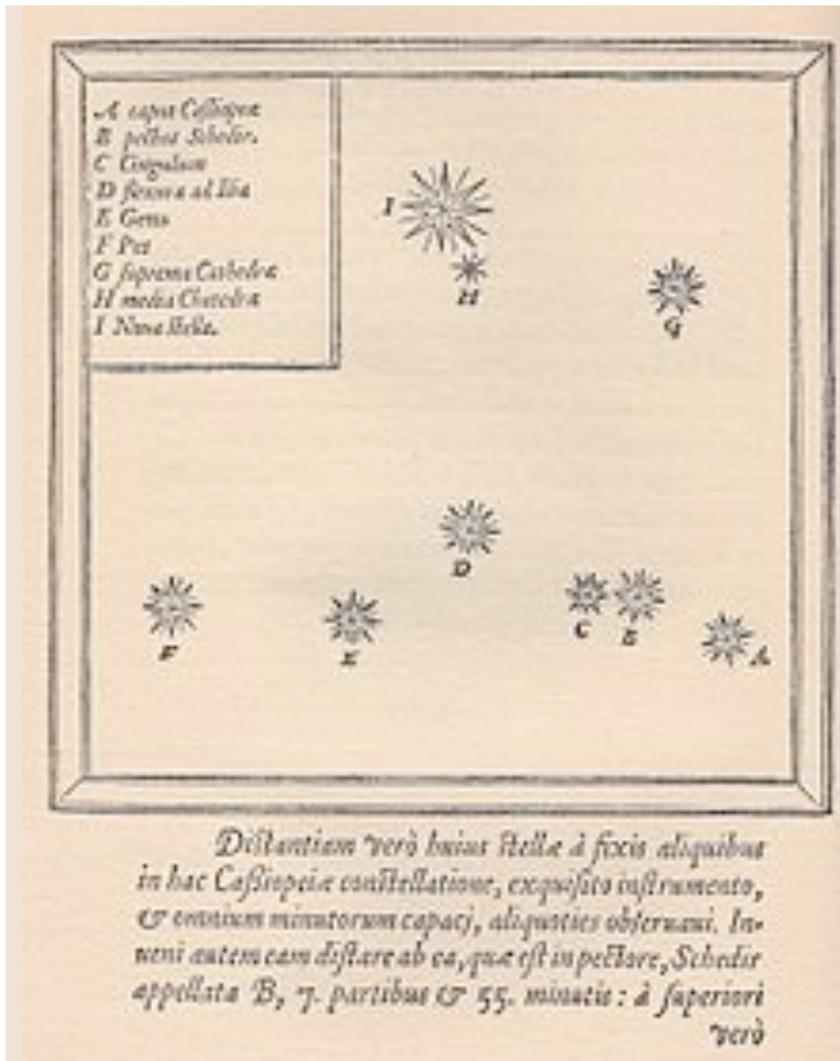
Cette étoile a été très observée par Tycho Brahé (1546-1601) et décrite dans son livre *De Nova Stella, Au sujet d'une Nouvelle Etoile*. Le terme astronomique Nova vient de ce livre. En fait on sait maintenant qu'il s'agissait de ce que nous appelons maintenant une Supernova.



Le livre de Tycho Brahé sur une nouvelle étoile



Tycho Brahé (1546 -1601)



La nouvelle étoile dans  
 le livre de Tycho Brahé

La supernova de Tycho Brahé  
 vue par Chandra,  
 télescope spatial en rayons X

Quand cette étoile est apparue elle était très brillante, puis son éclat a diminué.

Tycho Brahé ne peut en déterminer la parallaxe et, après plusieurs mois d'observations, établit que sa position ne varie pas par rapport aux étoiles fixes. Cette nouvelle étoile ne fait pas partie des orbites correspondant aux différentes planètes et fait donc partie de la sphère des fixes.

Contrairement à ce qui avait été cru et affirmé pendant des siècles, le ciel n'est pas immuable.

A la fin du XVIème siècle, Giordano Bruno (1548 - 1600) à partir d'une démarche théologique défendit la multiplicité des mondes, peuplés d'une multiplicité de vies. Dieu étant infiniment puissant n'a pas pu se limiter à la création d'un seul monde. Le monde est infini. Il adopte le système copernicien et pour lui, les étoiles sont autant de Soleils, avec des planètes.

*"C'est ainsi que l'excellence de Dieu se trouve magnifiée et se manifeste la grandeur de son empire. Il ne se glorifie pas dans un seul, mais dans d'innombrables soleils, non pas en une seule Terre et un monde mais en mille de mille, que dis-je ? une infinité [de mondes]"*



**Giordano Bruno**

Giordano Bruno fut condamné à mort et brûlé sur ordre de l'Eglise, mais ce ne fut pas pour autant un martyr de la science : ses opinions religieuses, le fait qu'il contestait de nombreux dogmes religieux, ont compté bien davantage dans sa condamnation.

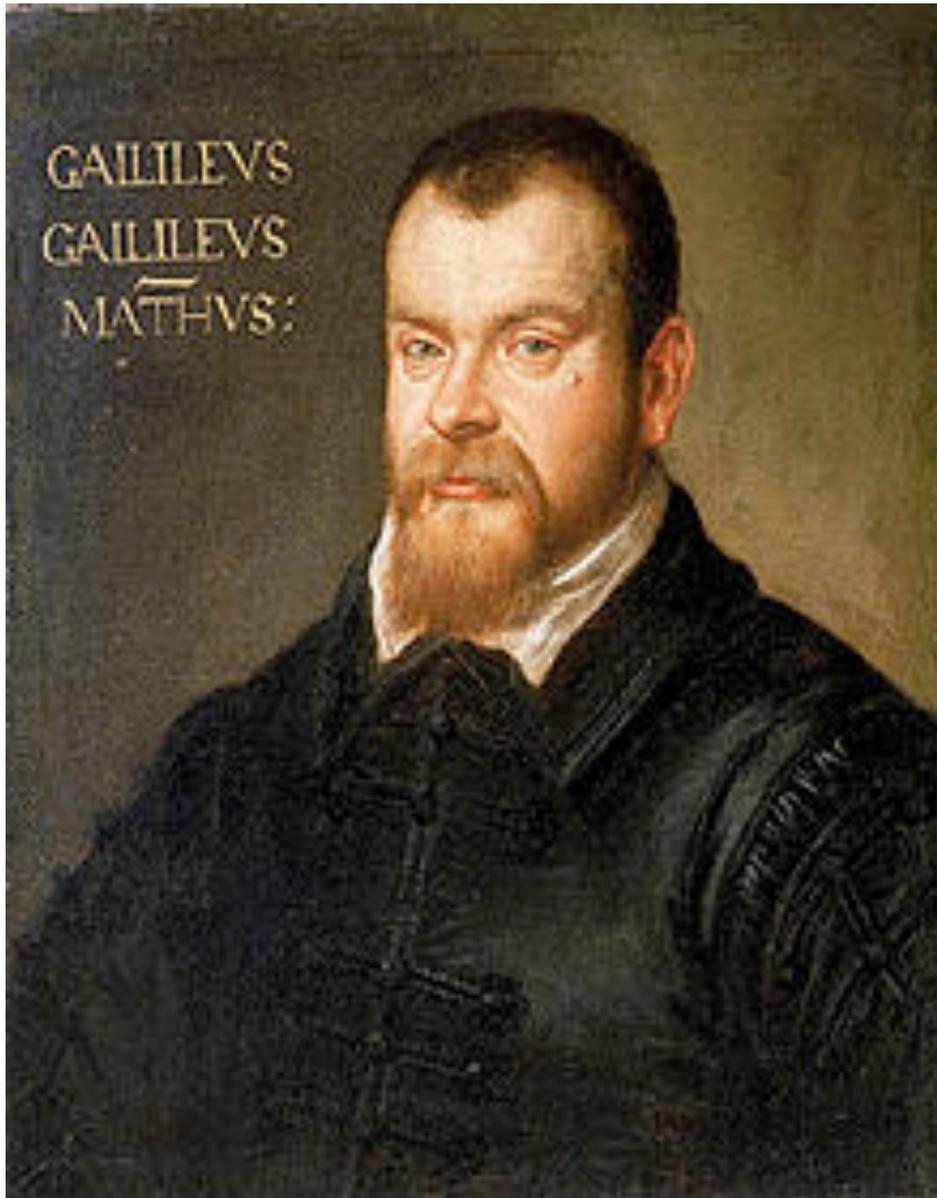
En 1609, Galilée (1564 - 1642) pointe pour la première fois un instrument d'optique vers différents astres. Il fait une extraordinaire moisson de résultats qu'il consigne dans un livre qui paraît très vite :

“*Sidereus Nuncius*”,  
ou “*Le messager céleste*”.

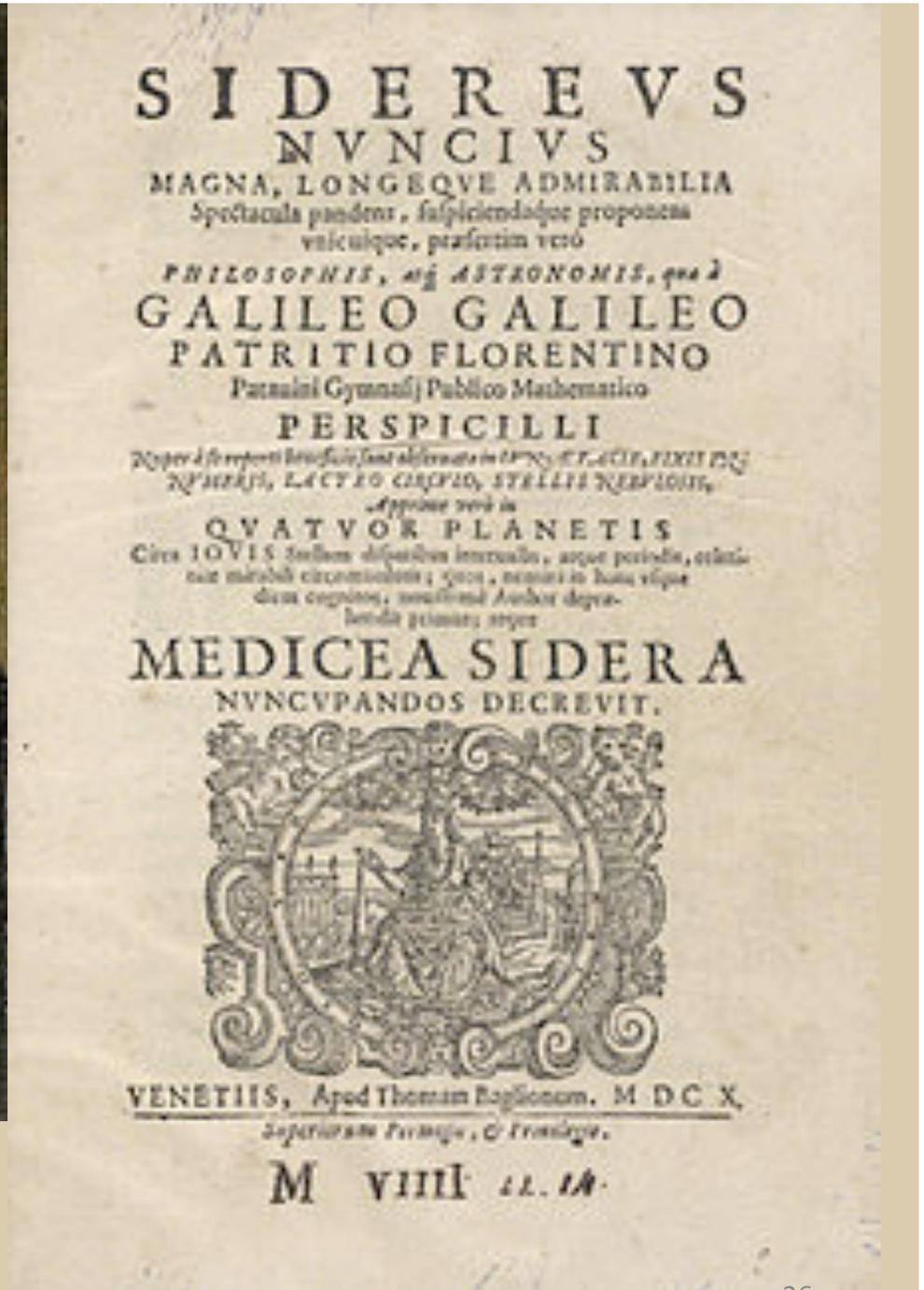
Il observe en particulier des satellites autour de la planète Jupiter, ce qui confirmait que la Terre n'était pas le centre du monde.

Lorsqu'il pointe sa lunette vers la Voie lactée, il découvre qu'elle est formée d'une multitude d'étoiles. Il augmente ainsi énormément le nombre des étoiles de la sphère des fixes.

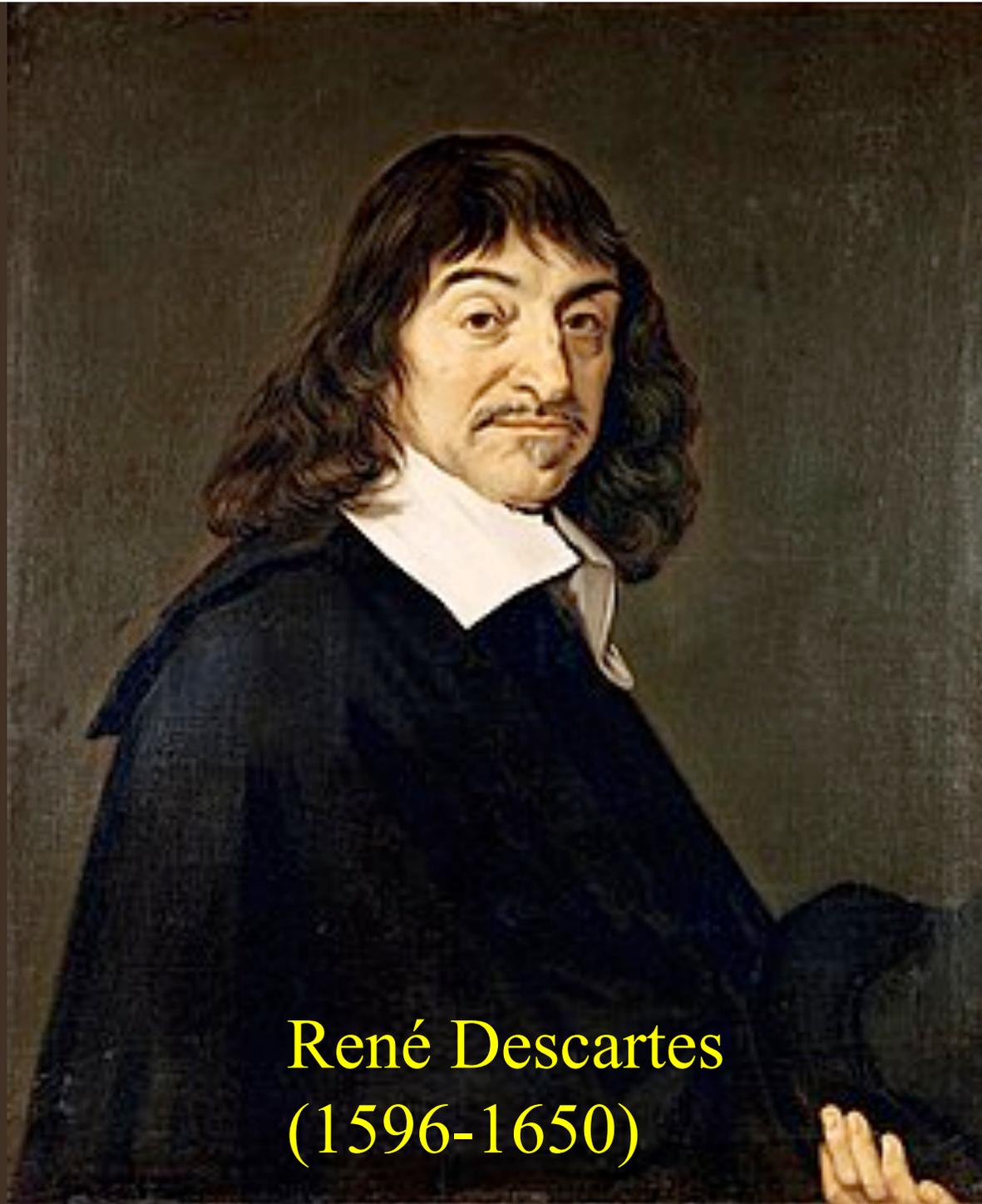
Pour Galilée, chaque étoile est un soleil.



Galilée  
(1564 - 1642)



Comme pour Bruno et Galilée, pour René Descartes (1596-1650) dans le *Traité du monde et de la lumière*, écrit en 1632 et 1633 mais par crainte de l'Inquisition publié seulement après sa mort en 1664, le nombre d'étoiles est infini et chaque étoile est un Soleil.



René Descartes  
(1596-1650)

Christiaan Huygens (1629-1695) fait une estimation de la distance de Sirius en comparant sa luminosité avec celle du Soleil.

On voit donc que pour lui, le Soleil et les étoiles sont des astres comparables.



Christiaan Huygens  
(1629-1695)

En 1686, Bernard le Bovier de Fontenelle (1657 - 1757)  
publia

*"Entretiens sur la Pluralité des Mondes"*

Ce livre fut un vrai « best-seller », dans le sens moderne du terme. Il fut ré-édité à de très nombreuses reprises et traduit en de nombreuses langues. Son influence fut très importante à travers l'Europe.



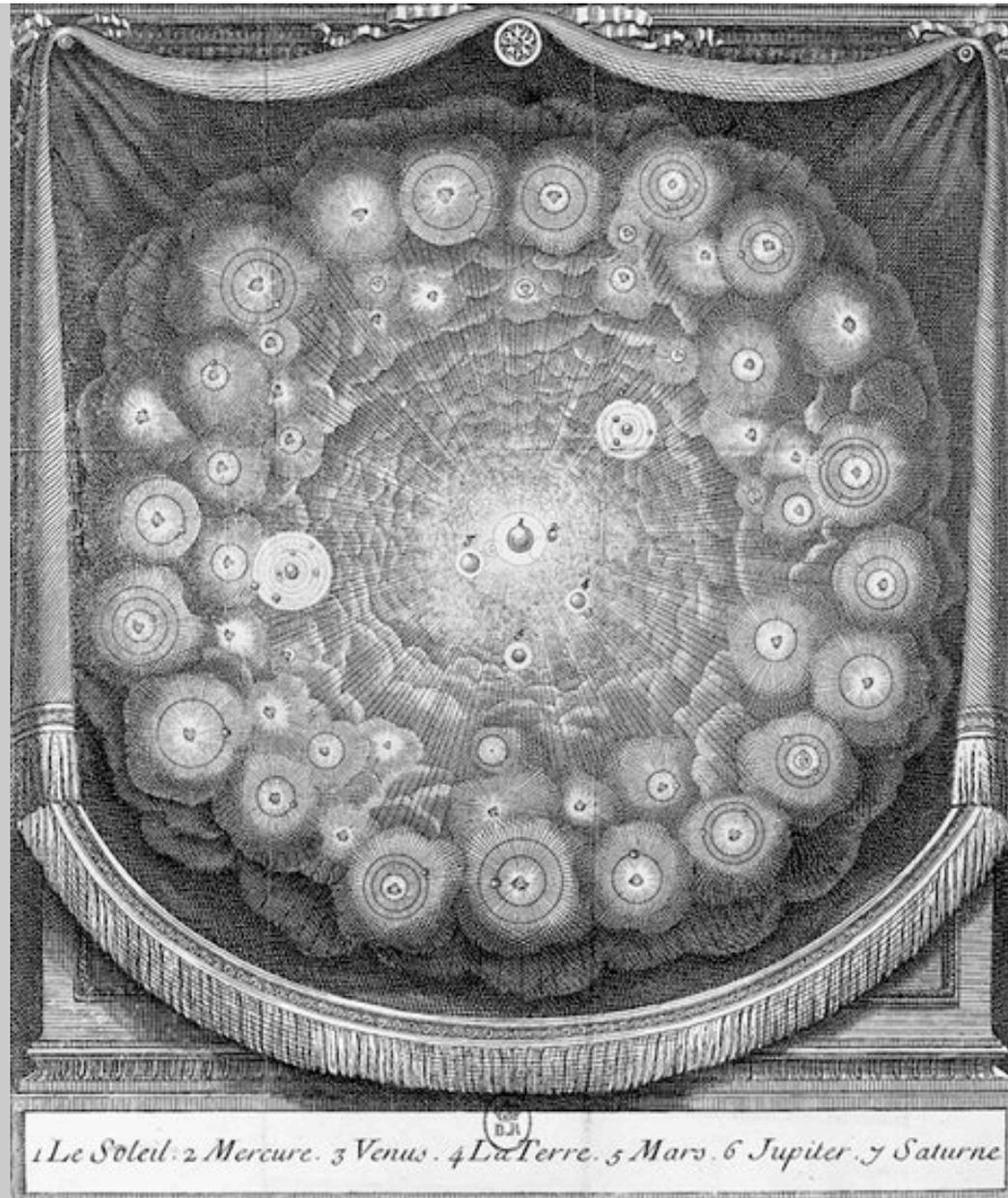
**Fontenelle**

*" Les étoiles sont autant de soleils dont chacun éclaire un monde."*

Fontenelle suppose qu'il y a des habitants dans la Lune et sur chacune des planètes, mais que ces habitants sont différents des hommes.

Il parle aussi de la quantité de vies et de formes de vie sur Terre, même dans des conditions extrêmes.

Le livre a été écrit 76 ans après les observations de Galilée, et montrent les progrès de l'astronomie depuis lors.



Frontispice de nombreuses éditions du livre de Fontenelle montrant *La Pluralité des Mondes*

Au XVIIème siècle, l'existence de la vie sur d'autres planètes en orbite autour d'autres étoiles que notre Soleil était couramment acceptée. En voici un exemple : *"Les cieux sont peuplés de corps lumineux qui, semblables à notre soleil, font vraisemblablement rouler des planètes dans différentes orbites"*

Condillac,  
*Cours d'étude pour l'Instruction du prince de Parme (1775)*



Et Condillac ajoute :

*"et l'univers est un espace immense, où il n'y a point de désert. Notre imagination est aussi embarrassée à lui donner des bornes qu'à ne lui en pas donner"*

## Comment se sont formées les planètes ?

Pendant des siècles, il a co-existé deux modèles principaux pour la formation des planètes : le modèle nébulaire et le modèle catastrophique.

Les modèles les plus anciens pour la formation du cortège de planètes du système solaire sont les modèles dits « évolutionnistes » qui postulent que les planètes naissent de façon naturelle lors de la formation du Soleil et des autres étoiles. Le premier de ces modèles est celui de Descartes (1633) pour qui l'Univers est rempli de tourbillons, au centre desquels les éléments les plus lourds se condensent pour former les étoiles tandis que les plus légers restent en périphérie pour former les planètes.

Un siècle plus tard, Emmanuel Kant (1724-1804) en 1755, et Pierre-Simon Laplace (1749-1827) en 1796, proposent que les étoiles se forment par effondrement d'un nuage de matière, une *nébuleuse*, en rotation sur lui-même. Pour conserver le moment cinétique lors de la contraction, la force centrifuge crée un disque dans le plan de rotation, disque dans lequel se forment des anneaux concentriques, dans lesquels vont finalement se condenser les planètes.



Emmanuel Kant  
(1724-1804)



Pierre-Simon Laplace  
(1749-1827)

Les modèles catastrophiques postulent au contraire que les planètes se forment lors d'évènements isolés, rares et violents. Pour Buffon (1707-1788) en 1741 c'est la collision d'une comète avec le Soleil qui produit un nuage de débris à partir duquel se condensent et se refroidissent les planètes.



Georges-Louis de Buffon  
(1707-1788)

Au début du XXème siècle, le scénario de la nébuleuse primitive semble irréaliste en raison de son incapacité à expliquer que les planètes possèdent 100 fois plus de moment cinétique que le Soleil.

Le scénario de formation des planètes qui semble alors le plus vraisemblable est la collision entre le Soleil et une autre étoile qui arracherait de la matière au Soleil et peut-être aussi à l'étoile, matière qui se condenserait en formant les planètes.

La probabilité de l'existence d'autres systèmes planétaire est évidemment totalement liée au scénario de formation : dans le cas du scénario de la nébuleuse primitive, la formation des planètes est un processus qui peut se produire « naturellement » de nombreuses fois ; dans le cas du scénario catastrophique la formation des planètes est un accident et ne produira que de façon exceptionnelle.

Il est bien évident qu'actuellement le scénario catastrophique n'est plus considéré.

En 1995, grand émoi dans la population astronomique : on a découvert une planète autour d'une autre étoile que le soleil, l'étoile 51 Pégase. La méthode utilisée est la méthodes des vitesses radiales, c'est-à-dire la variation de la vitesse radiale de l'étoile due à la présence s'une planète en orbite autour d'elle.

Cette planète nouvellement découverte possède des propriétés inattendues : elle est étonnamment proche de son étoile. En effet, sa période est de 4,23 jours.

Il faut noter que c'est à cause de cette caractéristique qu'elle a été découverte par l'équipe suisse, Michel Mayor et Didier Queloz.



Michel Mayor et Didier Queloz, les découvreurs de la première planète extrasolaire, 51 Pégase b

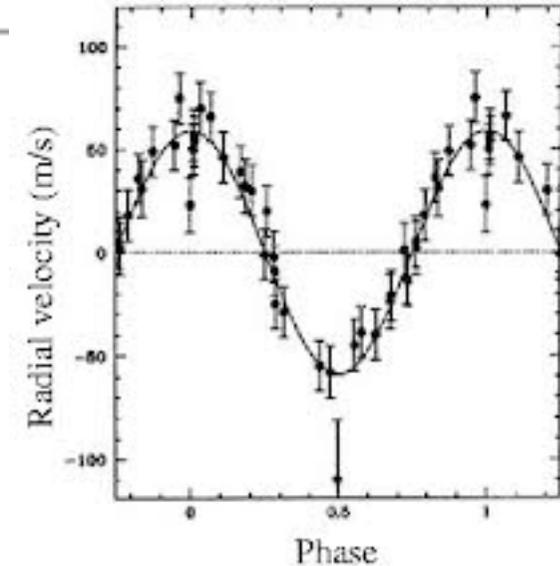
Parameter	Units	Value
-----------	-------	-------

Stellar Parameters:

$M_*$ ....	Mass ( $M_\odot$ ) .....	$1.100 \pm 0.066$
$R_*$ .....	Radius ( $R_\odot$ ) .....	$1.020^{+0.084}_{-0.079}$
$L_*$ .....	Luminosity ( $L_\odot$ ) .....	$1.05^{+0.32}_{-0.24}$
$\rho_*$ .....	Density (cgs) .....	$1.46^{+0.34}_{-0.27}$
$\log(g_*)$ .....	Surface gravity (cgs) .....	$4.452^{+0.061}_{-0.059}$
$T_{\text{eff}}$ .....	Effective temperature (K) .....	$5790 \pm 230$
[Fe/H] .....	Metallicity .....	$0.198 \pm 0.029$

Planetary Parameters:

$P$ .....	Period (days) .....	$4.2307869^{+0.0000045}_{-0.0000046}$
$a$ .....	Semi-major axis (AU) .....	$0.0528^{+0.0010}_{-0.0011}$
$T_{\text{eq}}^a$ .....	Equilibrium Temperature (K) ...	$1226^{+72}_{-69}$



Les caractéristiques physiques de la première planète extrasolaire 51 Peg b, telles qu'elles furent présentées dans la revue *Nature*, en 1995

En effet, on ne s'attendait pas trouver une planète aussi près de son étoile. On savait que seule une planète à peu près aussi massive que Jupiter pouvait suffisamment influencer la vitesse radiale de son étoile pour que cette variation soit détectable. Or les scénarios de formation du système solaire indiquaient que Jupiter était formé au delà de la limite des glaces, donc éloigné du Soleil, ce qui indiquait une période longue pour la planète. Jupiter a une période de 12 ans. Cela aurait donc pu être un programme de recherche à long terme.

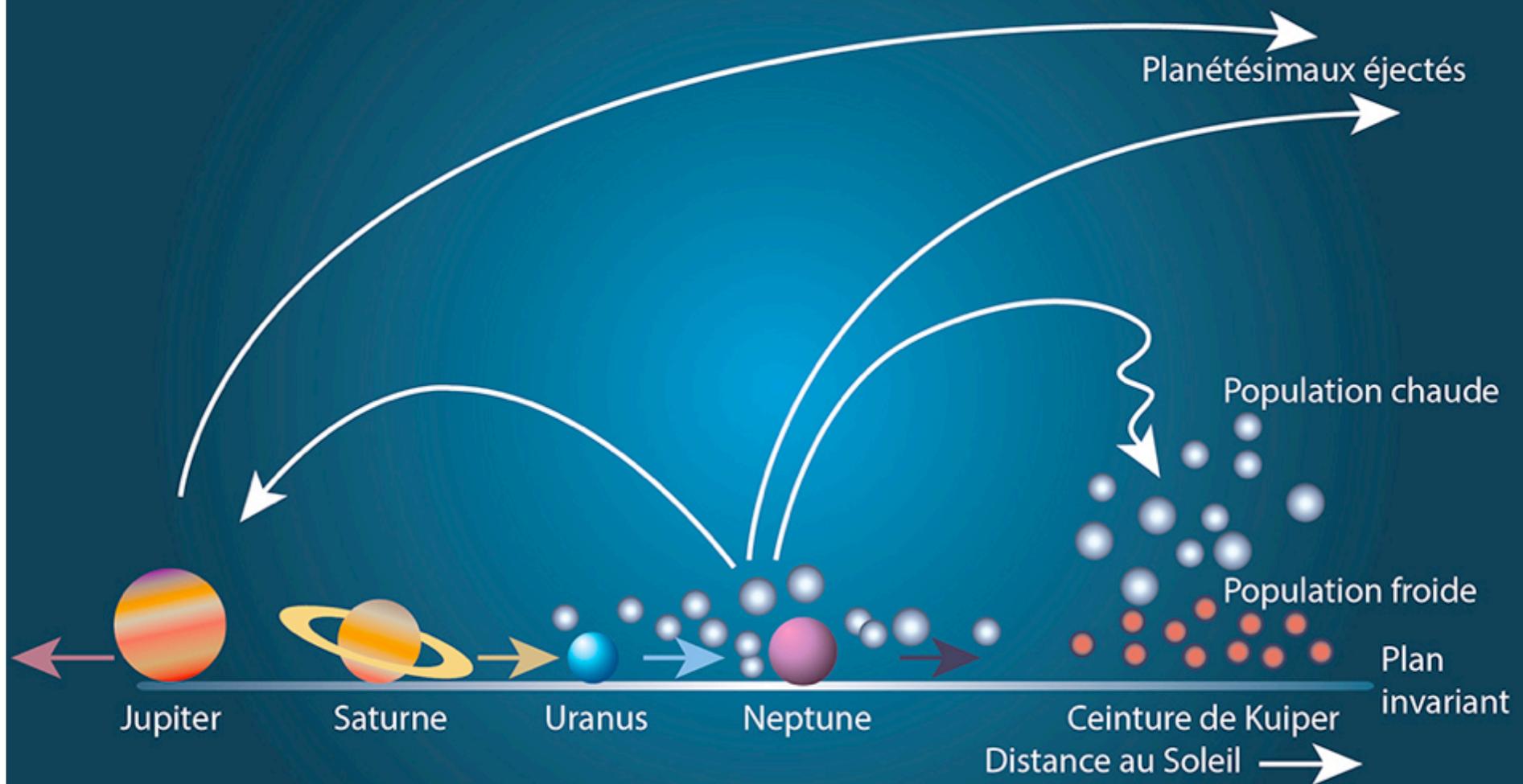
Cependant, le spectromètre Elodie utilisé au télescope de 193 cm de l'OHP donnait immédiatement la valeur des vitesses radiales, le résultat était immédiat.

Comment une telle période, qui indique une planète plus près de son étoile que Mercure l'est du Soleil, est-elle possible ?

Le modèle de formation des planètes pratiquement universellement admis actuellement, est que les planètes se forment loin de leur étoile et qu'il se produit des phénomènes de migration, qui rapprochent la planète de l'étoile.

On a utilisé ce scénario pour le système solaire. On considère maintenant que les planètes du système solaire ne sont actuellement plus à l'emplacement qu'elles avaient lors de leur formation.

Ainsi, les découvertes de systèmes de planètes extrasolaires nous aident à en savoir davantage sur notre propre système planétaire.



## Le modèle de Nice pour la formation du système solaire

Aujourd'hui, mercredi 15 mai 2019, on connaît **4065** planètes réparties dans **3039** systèmes planétaires, dont **658** sont des systèmes de planètes multiples.

Notons que ces données changent pratiquement tous les jours.

A partir des résultats du télescope spatial Kepler on peut estimer que le nombre de planètes dans la Galaxie est plus grand que le nombre d'étoiles, soit plusieurs centaines de milliards d'étoiles.

Parmi ces 658 systèmes multiples connus, combien sont semblables, ou analogues, au système solaire ?

On retrouve ici la notion de système solaire générique.

On peut penser qu'il y a de fortes chances pour que des systèmes plus ou moins semblables au système solaire existent en de nombreux exemplaires dans la Galaxie.

Cependant....

Cependant, un résultat apparu en 1993, dans le domaine mathématique assurément rigoureux de la mécanique céleste, montre que les circonstances qui ont assuré sur Terre des circonstances favorables à l'apparition de la vie sont peut-être dues à une coïncidence beaucoup plus rare que nous ne l'imaginions jusque là.

Cette année-là, un article de Laskar, Joutel et Robutel (Nature, vol. 361, 1993) a démontré que la stabilité de l'inclinaison de la Terre sur l'écliptique était due à la présence de la Lune. Sans la présence de la Lune, l'inclinaison de la Terre ne serait pas stable mais chaotique. En ce cas, le climat sur Terre subirait de très fortes variations susceptibles d'empêcher le développement d'une vie extraterrestre très perfectionnée.

Or actuellement les différentes théories de formation de la Lune s'accordent à expliquer cette formation par un cataclysme dû à un corps perturbateur.

On retrouve ici la présence d'un cataclysme, donc un phénomène qui peut difficilement être généralisé.

Est-ce que le système solaire abritant une vie très développée sur une planète dont le climat est stable est un ensemble unique, ou très peu fréquent dans notre Galaxie ?

L'avenir nous le dira peut-être, sûrement.

A suivre....

Mes plus sincères  
remerciements à  
Frédéric Arenou, Jean-  
Patrice Boudet, Michel  
Crézé, Louis Le  
Sergeant d'Hendecourt,  
Florence Raulin-Cerceau

