

Conférence

Du centre du monde à la diversité des mondes : les questionnements sur la place de la Terre et du Soleil dans l'Univers

L'observation récente des exoplanètes a ravivé les débats sur l'unicité ou la pluralité des systèmes semblables au nôtre : « notre système solaire est-il exceptionnel ou banal dans l'Univers ? » (diapo 2). Cette question que l'on croyait plutôt relever de la littérature de science-fiction ou du cinéma a trouvé un certain intérêt dans les médias scientifiques.

Les questionnements sur la place de la Terre et du Soleil dans l'Univers et donc sur la possibilité d'une pluralité des mondes possibles n'est pourtant pas nouvelle, elle a toujours existé, même lorsque le poids des croyances empêchait de l'exposer librement. C'est ce que nous allons tenter de montrer dans cette conférence.

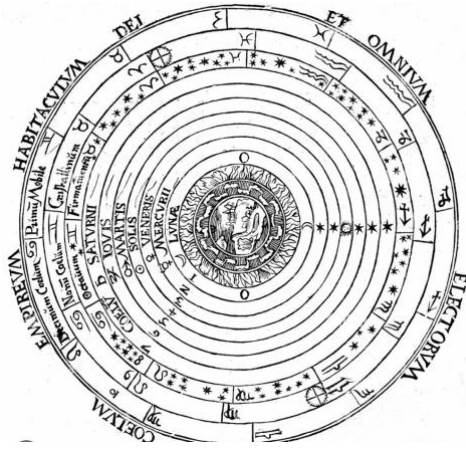
1. Une vision anthropocentrique : la Terre et l'homme au centre du monde

- La Terre au centre du monde unique (diapo 3)

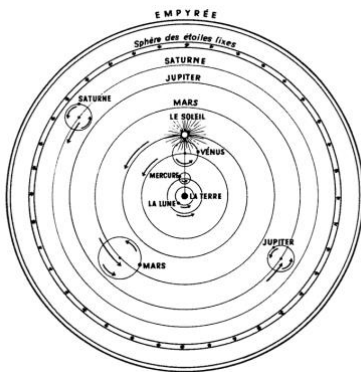
Les questionnements sur le ciel, la Terre et les astres remontent à la Grèce archaïque, dans les cités grecques d'Anatolie (Milet, Éphèse, Samos...), où des scientifiques vont rejeter les représentations du monde donnée par les récits mythologiques. Ils n'ont eu de cesse de se poser certaines questions : quelle est l'étendue de l'univers ? Est-il fini ou infini ? Pourquoi y a-t-il quelque-chose plutôt que rien ? le vide existe-t-il ? l'être peut-il naître du vide ? La matière connaît-elle des états successifs ? De quoi est-elle constituée ? etc....

Pour tenter d'y répondre l'approche est d'abord philosophique, elle propose des théories de la connaissance où s'opposent durant toute l'Antiquité les Platoniciens aux Aristotéliens. Les premiers considèrent qu'une étude scientifique de la nature est impossible, qu'il y a des vérités absolues et insaisissables qui expliquent le monde, qu'il faut spéculer à partir d'idées transcendantes pour le comprendre. Ils conçoivent l'idée d'un dieu organisateur du monde, créateur de la matière et doté d'un projet, d'une intention. **Aristote**, au contraire, croit qu'une étude scientifique de la nature est possible, il faut observer et expérimenter pour en comprendre les mécanismes. Il est inutile d'en référer aux idées transcendantes et aux spéculations pour expliquer le monde. Le but de la démarche scientifique est la recherche des causes premières qui peuvent être d'origine divine, même si le dieu d'Aristote n'a pas d'intention et n'organise pas le monde. Il reste d'Aristote la conviction que les phénomènes observés relèvent davantage de données fournies par des expériences rigoureuses que de spéculations théoriques seules.

Diapo 4



Aristote nous propose un approche « scientifique » et géocentrique du monde qui va s'accorder pendant plusieurs siècles avec les pensées religieuses et philosophiques dominantes. On peut en retenir que le monde est une sphère finie dont la Terre sphérique immobile occupe le centre. Les orbites des astres sont des cercles et leur vitesse est uniforme. Le monde au-dessus de la lune (supralunaire) est immuable, parfait et le monde au-dessous de la lune (sublunaire) changeant, imparfait où les choses apparaissent et disparaissent. Les changements sont imputables à la matière des corps : les corps lourds, « graves » dont la nature est de tomber vers le centre de la Terre et des corps légers, volatils qui au contraire s'élèvent. Les corps, constitués des 4 matières, la terre, l'eau, le feu et l'air, se mélangent, bougent et retrouvent le repos dans leur milieu naturel, au sol pour la terre et l'eau, au ciel pour le feu et l'air. Ainsi tout mouvement est forcé par une origine externe et s'arrête lorsque ce moteur s'arrête.



Livre des Hypothèses:

Astre	Distance en rayons terrestres
$Lune_{min}$	33
$Lune_{Max} = Mercure_{min}$	64
$Mercure_{Max} = Venus_{min}$	166
$Venus_{Max} = Soleil_{min}$	1 079 (1 160)
$Soleil_{Max} = Mars_{min}$	1 260
$Mars_{Max} = Jupiter_{min}$	8 820
$Jupiter_{Max} = Saturne_{min}$	14 187
$Saturne_{Max} = Fixes$	19 865

Diapo 5

Ce monde sphérique, centré sur la Terre et l'homme (anthropocentrique), est expliqué par le grec **Claude Ptolémée** au IIe s. ap. J-C. Il invente un système complexe qu'il présente dans la *Composition mathématique (ou Almageste)*. Il ne prétend pas décrire réellement l'orbite des planètes, il cherche à prévoir assez correctement leur position. Surtout, son système respecte les dogmes des philosophes antiques (vitesse uniforme, orbites circulaires). Dans le *livre des Hypothèses*, il décrit l'aspect physique de l'univers et tente d'en donner la taille ! La sphère des étoiles est située à 10 000 diamètres terrestres. Les sphères sont emboîtées les unes dans les autres car elles se transmettent

les mouvements jusqu'à la dernière qui porte toutes les autres et qui tourne autour de la Terre en 24h. Le vide n'existe pas, le ciel est rempli d'une substance cristalline, l'éther qui permet de transmettre les mouvements.

Diapo 6

Cette vision anthropocentrique du monde va durer presque 2000 ans et poser le principe anthropique : l'évolution de l'univers a pour finalité l'homme ! Car ce principe est en accord avec les Écritures. Au Moyen-âge, les lettrés occidentaux vont tenter de réconcilier les thèses d'Aristote et la Bible. Pour eux, la raison n'est pas un obstacle à la foi, l'univers d'Aristote est en mouvement, le moteur qui en est à l'origine est Dieu.

- Les débuts de l'héliocentrisme ne bouleversent pas la vision anthropocentrique du monde

Diapo 7. On ne sait pas trop quand **Nicolas Copernic** (1473-1543) a eu l'idée de son système du monde : l'héliocentrisme. En 1512, il rédige le *commentariolus*, un texte court où il expose les grandes lignes de son système. Durant les trente années suivantes, il observe, fait des calculs qui lui permettent de rédiger les 6 parties de son livre, le *De revolutionibus*. Le nouveau système, publié peu avant sa mort en 1543, peut se résumer en quelques postulats.

- Le centre de l'univers n'est plus la Terre mais le Soleil, toutes les planètes tournent autour de lui.

- Les mouvements de la terre, sur elle-même en 24h et sur son orbite en 1an, expliquent tous les mouvements apparents des planètes et du soleil.

- La sphère des étoiles est fixe.

Le modèle qu'il décrit n'est pas parfait et n'est pas beaucoup plus simple que celui de Ptolémée finalement car il doit utiliser des épicycles. Sa faiblesse vient du fait qu'il conserve des orbites circulaires et des vitesses uniformes

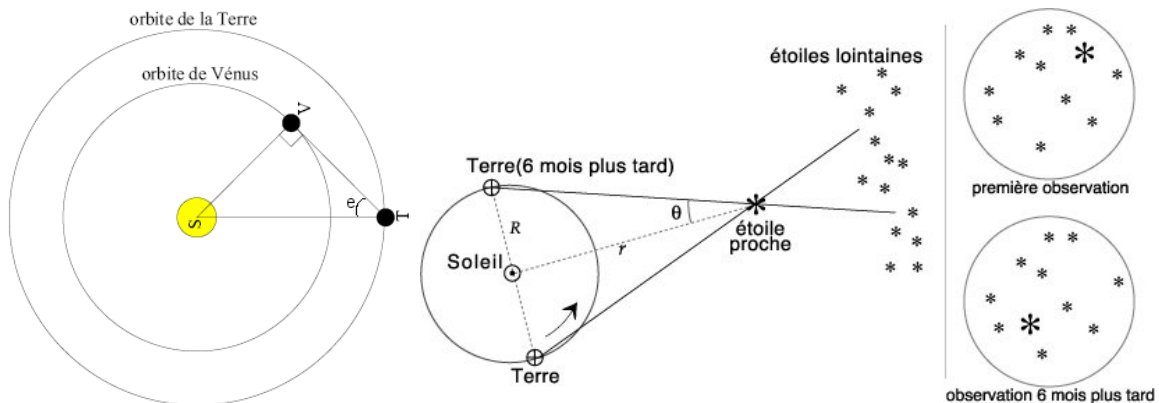
Après les travaux de Copernic, **Kepler** et **Galilée** adoptent l'héliocentrisme comme modèle pour prévoir les trajectoires et expliquer l'organisation du monde. Le géocentrisme est peu à peu rejeté au cours du 17^e s. même si **Tycho Brahe** tente de le maintenir en construisant un modèle géo/héliocentrique qui connaîtra un certain succès.

Diapo 8

En fait l'héliocentrisme s'accorde parfaitement avec l'idéologie du siècle, l'humanisme qui assigne à l'homme une place centrale. L'homme qui observe, mesure, expérimente est capable comprendre le monde créé par Dieu et de se rapprocher de lui. Au début l'Église l'accepte, les thèses de Copernic sont présentées comme un modèle mathématique qui doit permettre de mieux calculer la position des planètes, il ne prétend pas expliquer comment est organisé le monde. D'ailleurs, c'est le sens donné à la préface du *de Revolutionibus* rédigée par le mathématicien et théologien **Andreas Osiander** qui s'était occupé de la publication de l'œuvre. Cette préface va donner lieu à

de nombreuses controverses entre les détracteurs et défenseurs de l'héliocentrisme. L'Eglise va s'en accommoder jusqu'au procès de Galilée.

- Le système solaire s'agrandit pourtant



Diapo 9. Le système de Copernic permet de mesurer plus facilement la distance des planètes à la Terre et au Soleil. Comme la distance de la Terre au Soleil n'est pas connue avec précision avant le XVIIIe s., on ne peut donner qu'une estimation en fonction de cet étalon (la distance Terre-Soleil ou UA). Pour les planètes inférieures on effectue une mesure d'angle au moment de l'élongation maximale de la planète au Soleil, quand le triangle Terre-Planète-Soleil est rectangle.

Cette élongation (e) est de 24° pour Mercure et 45° pour Vénus. On applique la formule $(\sin e) = VS \text{ (distance Vénus-Soleil)} / TS \text{ (distance Terre-Soleil)}$; $VS = (\sin e) \times TS$.

Pour les planètes supérieures on utilise la méthode de la triangulation à 6 mois d'écart du parcours de la Terre sur son orbite. La position de la planète sur le fond de ciel n'étant pas la même, on peut mesurer la parallaxe, l'écart angulaire entre la planète et l'étoile repère.

On applique la formule Tangente de l'écart angulaire en radians = distance Terre-Soleil / distance Terre-Planète (comme c'est un angle très petit, sa tangente est assimilable à l'angle en radians).

Diapo 10

A la fin du XVII e s. On sait que la distance au soleil de Mercure est 0.38UA, Vénus 0.72 UA, Mars 1.5UA, Jupiter 5.2UA, Saturne 9.5 UA. Les découvertes d'Uranus et de Neptune en 1781 et 1846 repoussent les limites à 19 et 30 UA.

La fin du XVII e s. et le XVIIIe s. est l'époque des grandes expéditions maritimes pour calculer l'UA. Il s'agit d'observer, à partir de deux points éloignés sur Terre, la planète Mars lors d'une opposition et de calculer la distance Terre- Mars pour en déduire, avec la 3^e Loi de Kepler, la distance Terre-Soleil. Une autre méthode consiste à observer les transits de Vénus devant le soleil et de mesurer la parallaxe solaire (taille apparente du rayon terrestre vu du Soleil) selon une méthode prévue par Edmund Halley. La mesure de l'UA est peu à peu affinée (145-150 M de Km soit 23500 rayons terrestres !).

A partir du moment où l'UA est connue, il est aisé d'obtenir la distance des autres planètes à la Terre ou au Soleil par l'application de la 3^e Loi de Kepler.

$$\begin{aligned} & (\text{Période de révolution de la Terre})^2 / (\text{distance Terre-Soleil})^3 \\ &= (365)^2 / (149 \text{ M})^3 = (\text{Période révolution d'une autre planète})^2 / (\text{La distance de cette planète au Soleil})^3 \end{aligned}$$

- La sphère des étoiles éclate



Diapo 11. Copernic et ses successeurs font éclater la sphère des étoiles. Ne pouvant mesurer une parallaxe stellaire, ils en arrivent à penser que les étoiles sont situées à une grande distance du système solaire. C'est d'ailleurs l'impossibilité de mesurer cette parallaxe qui conduit les opposants à Copernic à refuser le déplacement de la Terre autour du Soleil.

Diapo 12



Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) ; Ejnar Hertzsprung (1873-1967) et Henry Norris Russell (1877-1957)

C'est **Friedrich Wilhelm Bessel** (1784-1846) qui mesura la 1^{ère} parallaxe (0.3 '' d'arc) d'une étoile, 61 Cygni. L'étoile se situe à 680 000 UA ou 10.5 AL selon Bessel !!! La parallaxe stellaire concerne des angles infimes souvent à la limite théorique de résolution des instruments de l'époque. Il n'y a qu'une cinquantaine d'étoiles dans notre environnement stellaire correspondant à 0.2 '' d'arc soit 15 AL (télescope de 60cm), 1800 étoiles dans un rayon de 50AL, soit 0.07'' d'arc (pouvoir de résolution d'un télescope de 2 mètres).

Pour les étoiles plus lointaines, il faut trouver d'autres solutions. Le problème c'est que l'intensité d'une étoile dans le ciel, c'est-à-dire sa brillance apparente ne nous renseigne pas sur sa distance. Il nous faut connaître sa

luminosité, sa quantité réelle de lumière émise, pour évaluer sa distance car son intensité diminue avec le carré de sa distance.

$$\text{Intensité (I)} = \text{Luminosité (L)} / \text{Distance(D)}^2$$

L'intensité est définie par la magnitude, c'est la seule donnée dont dispose les observateurs. Il est possible de calculer la luminosité pour les étoiles dont on connaît la distance par la méthode de la parallaxe. Attention tout cela reste approximatif dans la mesure où tout n'est qu'estimation : de l'intensité lumineuse (magnitude), avant l'invention de la photométrie ; la distance par la parallaxe de l'étoile.

Pour les étoiles dont on ne connaît pas la distance, il faut procéder par équivalence. Pour deux étoiles qui semblent identiques (couleur) on utilise les données connues de luminosité pour la 1ère et on mesure la distance de la seconde en fonction de la différence d'intensité entre les deux.

Diapo 13

Toutefois il est risqué de parier que deux étoiles sont véritablement identiques. Pour déterminer le type d'étoile auquel on a affaire, il faut analyser le spectre de la lumière de l'étoile. Ils sont une sorte d'empreinte digitale des étoiles. Les photons émis ont traversé l'enveloppe gazeuse de l'étoile et ont été absorbés par ses différents éléments chimiques, trahissant leur présence. Ainsi, chaque raie d'absorption nous renseigne sur les éléments présents (hélium, hydrogène, carbone, métaux, molécules plus complexes...) dans cette enveloppe.

Ainsi, toutes les étoiles peuvent être classées dans des groupes présentant des spectres identiques. Ces groupes spectraux (O,B,A,F,G,K,M) nous donnent leur luminosité, leur couleur et leur température de surface. Ce sont les travaux de **Hejnar Hertzsprung** (1873-1967) et **Henry Norris Russell** (1877-1957) qui ont donné naissance au graphique de luminosité des étoiles en fonction de leur température de surface, appelé aussi diagramme HR en l'honneur des deux savants.

Diapo 14. Sur celui-ci on s'aperçoit que les étoiles ne sont pas distribuées uniformément, mais qu'elles se regroupent dans certaines zones bien déterminées. 80% des étoiles sont dans la séquence principale. Toutes les étoiles y passent plus de 90% de leur vie. Pour les étoiles qui se trouvent en dehors, c'est leur taille qui les place dans d'autres groupes, ce sont des étoiles géantes ou naines. Sur le plan observationnel, une difficulté apparaît : pour un même groupe spectral on peut avoir une géante, une étoile proche du soleil ou une naine ! Les différences sont établies par les niveaux d'intensité globales des raies spectrales, les étoiles géantes ont des raies intenses et étroites, les naines blanches ont des raies moins intenses et plus larges.

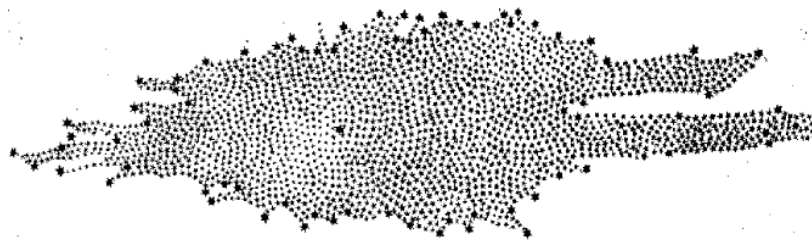
Au début du XXe s. La sphère des étoiles a éclaté, les étoiles sont de plus en plus lointaines mais le système solaire est toujours en position centrale.

Diapo 15 : les types spectraux des étoiles les plus proches du Soleil

- L'étendue de la Voie Lactée

Diapo 16

1610 : Galilée découvre que la Voie lactée est en fait une multitude d'étoiles invisibles à l'œil nu. Cette idée avait déjà été énoncée dans l'Antiquité par Démocrite et reprise au Moyen-Âge par de nombreux savants arabes, alors que pour Aristote elle est un phénomène météorologique. Il faut attendre le milieu du XVIIIe s. pour que **Thomas Wright** (1711-1786) dans *Une théorie originale ou une nouvelle hypothèse sur l'univers*, imagine que la Voie lactée est un disque stellaire dans lequel se situe le système solaire. Cette idée est reprise un peu plus tard par Kant.



En 1780 l'astronome anglais **William Herschel** tente une représentation en 3 dimensions de notre galaxie sans aucune mesure de distance en comptant les étoiles dans différents secteurs du ciel. Statistiquement sur un grand nombre d'étoiles on peut établir que les étoiles les plus faibles sont les plus éloignées.

La fin du XVIIIe s. est l'apogée de la vision classique de l'organisation du monde avec le système solaire au centre.

Au XIXe s. des travaux de comptage et d'étude statistique d'un grand nombre d'étoiles ont pour but de proposer une distribution des étoiles de la Voie lactée. A partir du moment où les instruments permettent de mesurer la parallaxe annuelle des étoiles les plus proches il est possible de proposer des dimensions à notre galaxie.

Diapo 17



Le point culminant des travaux est atteint au début du XXe s avec **Jacobus Cornelius Kapteyn** (1851–1922). Il compile les données de 40 observatoires, étudie la disposition des étoiles dans 206 directions du ciel, leur mouvement propre (par rapport au fond du ciel) et leur vitesse radiale (éloignement ou rapprochement du soleil) à partir du décalage spectral. Il évalue la taille de l'Univers à 40 000 AL avec le soleil situé à 2000 AL de son centre.

Au tournant du XXe s., l'Univers se limite encore à la Voie lactée. On connaît avec une précision relative la distance et le mouvement propre de seulement 1500 étoiles et le système solaire est encore au centre de cet ensemble.

Diapo 18

Ce travail de distribution des étoiles autour du soleil et de vision en 3 dimensions de la Voie lactée se poursuit aujourd'hui avec le satellite d'astrométrie et de spectrométrie Gaia. Il fournit depuis 2014 les coordonnées, la distance, le mouvement propre et la vitesse radiale, à partir du décalage spectral, des étoiles de la Voie lactée. Toutes les zones du ciel sont balayées et elles devraient l'être des dizaines de fois avant la fin de sa mission pour souligner les changements stellaires. Le satellite a fourni des mesures de magnitude très précises, des calculs de distance pour 1.5 milliards d'étoiles, des courbes de lumière de variables, des températures de plusieurs millions d'étoiles. Le calcul des distances repose sur une mesure de parallaxe très précise (0.01 mas pour des étoiles jusqu'à la magnitude 13, 0.8 mas au-delà) sans tenir compte du type d'étoile visée.

Le succès de la conception anthropocentrique du monde n'a pas empêché un discours sur la pluralité et la diversité des mondes. Et ceci depuis l'Antiquité

2. De la pluralité des mondes à la diversité des mondes

- Une pensée philosophique ancienne (diapo 19)

La question de savoir s'il existe un seul monde ou plusieurs est une interrogation récurrente en Occident depuis les Grecs.

Dans la Grèce antique, elle oppose Aristote et Démocrite ou Épicure, les atomistes.

Aristote considère que le monde est unique, forme un Tout. Supposé la pluralité des mondes suppose pour le philosophe de reconnaître l'existence de l'infini et du vide. Si le Tout est formé d'une diversité de monde, il faut que ceux-ci soient séparés par du vide. Le vide est inconcevable pour Aristote, un corps est forcément lié à son milieu car il est son enveloppe. Les corps lourds sont attirés par le centre, s'il existe une pluralité de centres, le mouvement des corps en serait contrarié. De plus, le Tout ne peut être infini, car dans la physique d'Aristote, les corps sont attirés vers leur milieu naturel (terre ou ciel) avec des mouvements limités qui ne sont jamais infinis.

Enfin supposé une pluralité de mondes oblige à penser plusieurs moteurs qui ordonnent, structurent leur fonctionnement. Un principe métaphysique qui n'est pas admis par le philosophe.

Les atomistes, **Leucippe, Démocrite ou Épicure** recherchent une compréhension du Tout à partir de ce qui est accessible à l'être humain, notamment grâce à ses sens, puis aux idées et aux notions. Or pour les atomistes, seules sont accessibles les réalités proches, un discours unique du Tout est donc impossible. Ainsi, la pluralité des mondes provient de la pluralité des explications possibles, de l'impossibilité de tenir un discours unique pour ce qui concerne les réalités moins accessibles.

Pour Épicure, il est impossible de réduire la multiplicité des phénomènes observés à un seul principe explicatif car l'intelligence humaine ne peut le concevoir. Faute de mieux, l'humain, limité par son intelligence ne peut que concevoir la pluralité ou la diversité.

Finalement, le débat porte moins sur l'existence « réelle » de la pluralité des mondes que sur la capacité à la connaître. Une connaissance de type global, comme chez Aristote conduit à affirmer l'unicité du monde. La connaissance limitée, comme chez Épicure, aboutit au contraire à affirmer la pluralité des mondes. Ces deux conceptions différentes trouvent donc leur origine dans une approche différente du réel et de la connaissance qu'on peut en avoir.

La question sur la pluralité des mondes existe tout au long du Moyen-Âge et à l'époque moderne dans l'Occident chrétien. Elle correspond à une autre façon de faire de la théologie qui dépasse le simple commentaire des Écritures, au moment où l'on redécouvre les écrits d'Aristote. Ainsi les penseurs forgent 3 niveaux d'étude du réel. Le premier reprend les propos d'Aristote notamment *la Physique* et le *Traité du Ciel*, il est une compréhension rationnelle du réel. Le 3^{ème} niveau est purement théologique, il est bâti à partir des Écritures. Le second niveau fait le lien entre les deux, il est la connaissance des principes qui organisent le réel et conduit à affirmer l'existence de Dieu comme ordonnateur du monde. Un discours sur l'unicité du monde s'inspirant d'Aristote et qui fait de Dieu le « moteur » du monde a pu se répandre aisément. Cependant la multiplicité des mondes a été discutée car l'infini -et donc la possibilité de concevoir l'existence réelle de plusieurs mondes- s'accorde parfaitement avec la puissance infinie de Dieu. Pour certains théologiens, ces autres mondes ne sont pas ordonnés par Dieu, ils sont donc imparfaits corrompus, un seul monde correspond au « réel ». Pour d'autres, au contraire, c'est la physique d'Aristote qui est imparfaite, il peut exister d'autres mondes organisés autrement et dont Dieu est l'ordonnateur. Il y a donc une théologie qui accepte l'idée que plusieurs mondes réels peuvent exister.

Mais la question de la connaissance de cette diversité va opposer les théologiens et conduire peu à peu à la condamnation du discours sur la pluralité des mondes. En effet le discours sur l'unicité du monde se satisfait des mots, ceux des Écritures, pour expliquer la réalité. Pour les tenants de la multiplicité des mondes, les mots ne renvoient qu'à une réalité singulière, mais Dieu a doté l'homme de facultés (l'intuition, l'imaginaire et la raison) qui lui permettent d'appréhender la possibilité d'autres mondes.

Diapo 20

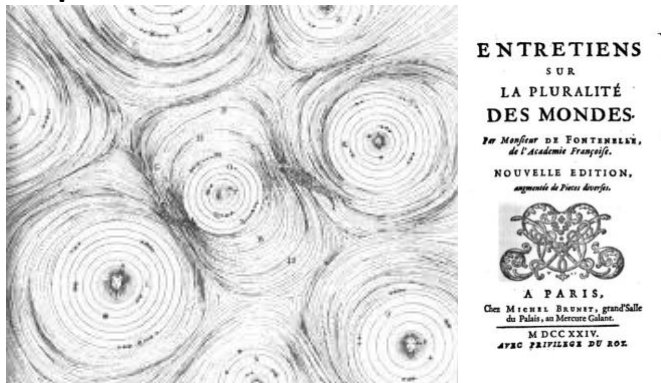
C'est cette démarche réflexive qui conduit **Giordano Bruno** dans *De l'infini, de l'univers et des mondes* (1584) à concevoir une pluralité de mondes habités dans un univers infini. Pour appuyer sa démarche, il utilise les thèses de Nicolas Copernic. Il introduit dans ses écrits plusieurs idées promises à un grand avenir :

- La relativité des mouvements. « Toutes choses qui se trouvent sur la Terre se meuvent avec la Terre, (tout comme) la pierre jetée du haut du mât reviendra en bas, de quelque façon que le navire se meuve. » Il rejette donc Aristote pour qui l'expérience d'une pierre jetée en haut d'une tour est la preuve de la fixité de la Terre ;

- L'univers infini et l'absence de centre. Il est un copernicien et garde le schéma héliocentrique du monde. Mais, pour lui toutes les étoiles sont des centres, constitués d'un soleil et de planètes. Il participe à l'éclatement de la sphère des étoiles en attribuant une profondeur à l'univers ;

- « La pluralité des mondes habités ».

Diapo 21



Une cinquantaine d'années plus tard, **René Descartes** (1596-1650) envisage que les étoiles et leurs planètes sont le produit d'un processus physique de création. Il expose dans son ouvrage *Principia philosophiae*, la « théorie des tourbillons ». Selon lui, le fluide d'éther qui remplit l'espace est en permanence animé de tourbillons, dont les mouvements circulaires provoquent le mouvement des planètes. De plus, les tourbillons donnent naissance aux étoiles et aux planètes ; ce qui conduit bien sûr à une pluralité des mondes, les tourbillons occupant tout l'espace disponible. Descartes exerce une grande influence en Europe. En France, la théorie des tourbillons va longtemps avoir cours, encouragée par un ouvrage de vulgarisation :

Entretiens sur la pluralité des mondes de **Bernard le Bouyer de Fontenelle** (1686). Au milieu du XVIIIe s. au moment où les astronomes avec des instruments plus performants s'intéressent aux objets flous, le philosophe **Emmanuel Kant** pense que l'univers est composé d'autres groupements d'étoiles comme la Voie Lactée. Il les appela « univers-îles ».

- La diversité dans le ciel est confortée par les observations astronomiques

Diapo 22. Lorsque **Galilée** pointe sa lunette vers le ciel à partir de 1610, il met en évidence la grande diversité des objets visibles.

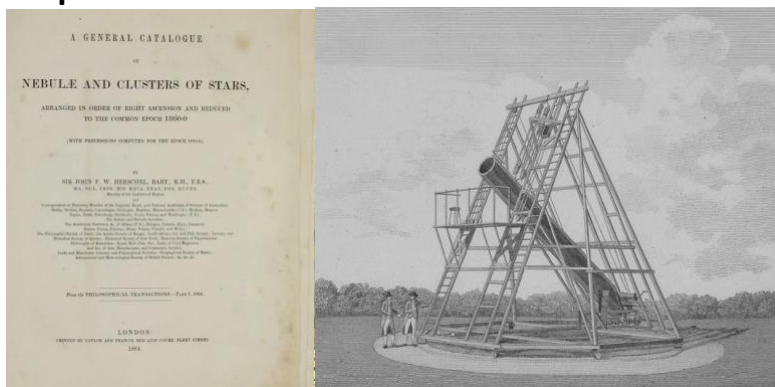
Cette diversité des objets célestes avait déjà intrigué les astronomes, elle concernait des objets dont la visibilité était éphémère (nova), des étoiles dont l'éclat varie ou des astres errants dont la trajectoire ne correspond pas aux

modèles existants (comètes). Ils avaient permis de questionner les thèses d'Aristote et de Ptolémée.

Avec l'invention de la lunette et du télescope, les questions se font plus nombreuses. D'abord sur le nombre d'étoiles. Galilée envisage de compter les étoiles de la constellation d'Orion mais il renonce car ce sont des centaines de nouvelles étoiles qui apparaissent dans sa lunette. Il se retourne vers l'amas des Pléiades qui comprend 6 étoiles visibles à l'œil nu. Il en dessine une trentaine dans son *Siderius nuncius*. Il est évident qu'à partir de ce moment les espoirs d'exhaustivité de l'astronomie ancienne sont perdus... Comme il est impossible de cataloguer les étoiles, comme nous l'avons déjà vu, c'est maintenant la question de la structure de la Voie lactée qui va occuper les astronomes pour au moins 2 siècles.

Puis sur l'énigme des nébuleuses : amas ouverts, amas globulaires, nébuleuses de gaz et galaxies. Comme certaines sont visibles à l'œil nu, elles ont déjà été mentionnées par les astronomes de l'Antiquité et du Moyen-Âge. Pour Galilée, les nébuleuses sont des amas d'étoiles si serrés qu'ils apparaissent flous, vaporeux à l'œil nu. Bizarrement il ne parle pas de la nébuleuse d'Orion alors qu'elle est observée par **Nicolas Fabri de Peiresc**, un astronome provençal qui correspond avec lui. La nébuleuse d'Orion est rapidement oubliée et seule perdure l'explication générale de Galilée. Mais deux siècles plus tard les nébuleuses réapparaissent dans le contexte de la chasse aux comètes. Les astronomes recensent les objets diffus qui peuvent être confondus avec les astres errants. En 1774, **Charles Messier**, l'observateur et le découvreur de nombreuses comètes, publie un premier *Catalogue des nébuleuses et amas d'étoiles* (Catalogue Messier) qui établit une liste de 103 objets. Mais Messier ne devise pas sur la nature des nébuleuses qu'il a cataloguées.

Diapo 23



télescope de 20 pieds

Peu après la parution de catalogue de Messier, **William Herschel** commence lui à recenser les objets célestes inconnus avec ses télescopes de grands diamètre (7, 20 et 40 pieds de longueur focale et de 16cm à 1.2m de diamètre). Au terme de ses travaux, il obtient une liste de près de 2500 objets, son fils **John Herschel** porte ce nombre à 5000 et publie un catalogue en 1864, *le General catalogue of nebulae and clusters*. Ce catalogue est encore enrichi

par le danois **John Dreyer** pour devenir le célèbre catalogue NGC en 1888. En observant une nébuleuse particulière qu'il qualifiera de « planétaire » William Herschel doute que toutes les nébuleuses soient constituées d'étoiles. Il terminera sa vie en pensant que la nature des cieux est insondable !

Au début du XIXe s. au-delà des spéculations sur la pluralité des mondes, la seule connaissance vraiment établie est que l'univers est constitué d'étoiles, des astres brillants possédant une source de luminosité propre comme le Soleil et c'est à peu près tout. Au point qu'**Auguste Comte**, le fondateur du positivisme, dans les années 1840 considère qu'il est inutile de s'intéresser aux étoiles, car jamais ces astres distants seront à la portée des instruments de mesure des hommes. Heureusement à la même époque se développe la spectroscopie...

- Notre galaxie prend forme dans sa complexité

Diapo 24. Au début du XXe s. l'astronome hollandais **Cornelius Kapteyn** en est désolé, ses travaux montrent que le système solaire est à peu près au centre de l'Univers. Les astronomes semblent dans une impasse. Mais très vite de nouvelles observations vont permettre de découvrir les contours de la Voie lactée.

D'abord avec l'étude des amas globulaires. Ces concentrations de millions d'étoiles restent des amas nébuleux jusqu'à William Herschel. C'est l'astronome anglais qui parvient le premier à résoudre l'amas M22 dans le sagittaire, et qui en identifie 70 autres dans son propre catalogue. Après Herschel les astronomes vont s'intéresser à la distribution de ces amas dans le ciel. Herschel a observé que de nombreux amas se situent vers le centre galactique, notamment dans la constellation du sagittaire. Cette idée prime jusqu'au début du XXe s. lorsque l'astrophysicien **Harlow Shapley**, constatant que des amas se situent également dans d'autres régions du ciel, pense que les amas sont répartis sur tout le ciel à la façon d'un grand nuage enveloppant l'ensemble de la Galaxie. Ses observations vont permettre de montrer que le Soleil est situé à une distance significative du centre de notre Galaxie. Pour proposer une vue en trois dimensions de cette distribution il va utiliser une nouvelle méthode car il est impossible d'utiliser la parallaxe stellaire étant donnée la distance des amas. La solution vient de l'observation d'un type particulier d'étoiles : les céphéides.

Diapo 25



Les céphéides sont un type d'étoiles variables, c'est-à-dire d'étoiles dont l'intensité lumineuse varie. Ce sont des étoiles géantes qui connaissent des changements de structure, généralement de contractions et de gonflements (toute ou partie) qui traduisent des transferts de chaleur du centre vers la périphérie. Ces étoiles sont périodiques (de 1 à 100 jours) et l'astronome américaine **Henrietta Leavitt** (1868-1921) découvre dans les années 1910 une relation entre la période et la luminosité. Plus une céphéide est lumineuse, plus sa période est longue.

L (Luminosité) = C (constante) $\times$ P (période en jours)

En 1913, l'astronome danois **Ejnar Hertzsprung** parvient à déterminer la distance de quelques céphéides proches avec la méthode de la parallaxe. En utilisant l'équation qui lie la luminosité, l'intensité et la distance ($I = L/D^2$), il peut trouver L . Comme il connaît maintenant la luminosité et la période de quelques céphéides, il peut définir la constante C . On obtient donc :

Pour les céphéides de type 1 (étoiles plus jeunes riches en métaux) : L (luminosité) = $400 \times P$ (période en jours) ; pour les céphéides de type 2 (vieilles étoiles des amas globulaires pauvres en métaux) : $L = 100 \times P$. L'analyse spectrale permet donc de différencier ces étoiles variables.

Grâce aux céphéides, **Harlow Shapley** peut estimer la taille de l'enveloppe qui entoure notre Galaxie et qui contient les vieux amas globulaires. Cette enveloppe a son centre dans la constellation du sagittaire, à 60 000 AL du système solaire, et l'enveloppe fait environ 300 000 AL de long pour 150 000 AL de hauteur. Shapley fait donc l'hypothèse que la Galaxie est une structure relativement plate dont la Voie lactée révèle l'épaisseur entouré d'un halo plus grand contenant les amas.

En 1920, le système solaire a perdu sa position centrale dans l'univers, mais on considère encore que tous les objets observables au télescope font partie de la Galaxie.

- Notre galaxie n'est pas la seule dans l'Univers

Diapo 26. Dans les années 1910 certaines nébuleuses retiennent l'attention des astrophysiciens. Ce sont des nébuleuses « spiralées » alternant des structures brillantes et plus sombres. L'Américain **Vesto Slipher** parvient en analysant le spectre d'étoiles de « nébuleuses » à montrer qu'elles s'éloignent rapidement du Soleil, ce qui semble difficile à concilier avec des objets situés dans notre Galaxie. Ces mesures de vitesse sont obtenues en analysant le décalage des raies du spectre d'un objet en mouvement. Comme la lumière est une onde, les raies sont décalées vers des longueurs d'onde plus grandes (vers le rouge) lorsque l'objet s'éloigne, des longueurs d'onde plus courtes (vers le bleu) lorsqu'il se rapproche. Ce décalage spectral correspond aux longueurs d'onde observées divisées par les des raies d'absorption des longueurs d'onde prévues en laboratoire.

$$z = \frac{(\lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{repos}})}{\lambda_{\text{repos}}}$$

Finalement, une équation simple (mais approximative) prévoit que le décalage spectral (Z) est égal à la vitesse de l'objet divisée par la vitesse de la lumière. Cette équation ne vaut que pour des vitesses inférieures à 0.1C. Au-delà, il faut introduire les effets du ralentissement du temps, imputables à la grande vitesse, qui introduisent un décalage supplémentaire.

A partir de ce moment deux écoles s'opposent : la première pense que ces objets appartiennent à notre galaxie et ses dimensions sont plus importantes que prévues ; la seconde opte pour des dimensions limitées de la Voie lactée et l'existence d'autres galaxies à l'extérieur de celle-ci. Cette opposition atteint son plus haut niveau lors du Great Debate qui oppose les astronomes Shapley et Curtis en public à Washington en avril 1920.

Diapo 27

En 1924, avec un télescope de 2.5m, l'astronome **Edwin Hubble** (1889-1953) découvre que l'une des étoiles de la galaxie d'Andromède qu'il pense être une nova est en fait une étoile variable, une céphéide. Il peut alors mesurer la distance de cette étoile qu'il sait ne pas appartenir à notre galaxie : 900 000 AL ! Il affirme alors que les « nébuleuses spiralées » sont en fait des galaxies semblables à la nôtre. Il multiplie les observations pour déterminer les distances de nombreuses galaxies. De celles-ci, il établit une loi qui associe la vitesse de récession (éloignement) des galaxies à leur distance et une constante (H) :

$$v = H \times d.$$

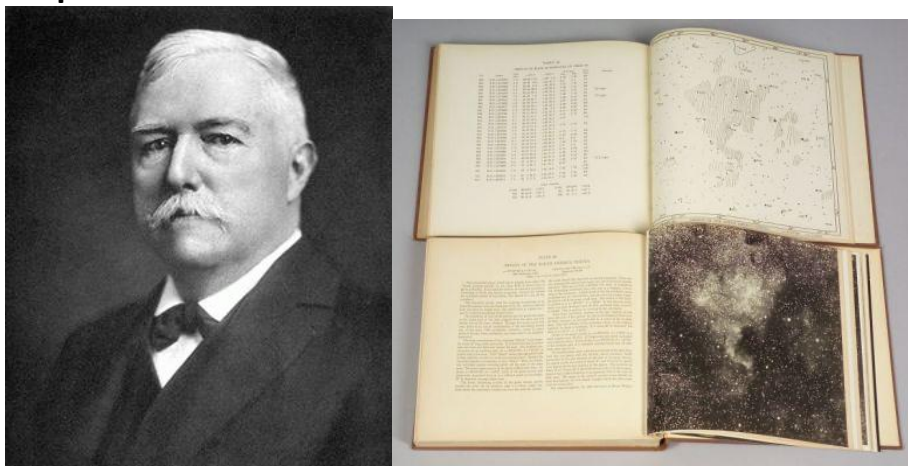
La vitesse peut également être trouvée par le décalage spectral ($v = z \times c$).

Hubble obtient une constante à 500 km/s par Mpc, valeur surestimée à cause d'une sous-évaluation de la distance des galaxies.

Ainsi, le débat ouvert par **Emmanuel Kant** en 1755 sur l'existence d'une multitude d'« univers-îles » est tranché !

Diapo 28 : un exemple de décalage spectral entre deux galaxies

Diapo 29



Dans les milieux scientifiques, le consensus est obtenu dans la décennie 1930. Une découverte va permettre de comprendre les nombreux problèmes soulevés par l'observation des étoiles, de leur spectre et par l'étude la structure de la Voie lactée. Il s'agit des nébuleuses sombres, jusque-là associée à des espaces sans étoile. Au tournant du XXe s. l'astronome **Edward Emerson Barnard** réalise un catalogue de 370 zones sombres : le *photographic Atlas of selected regions of the Milky Way*. Lui hésite sur la nature de ces espaces car l'idée d'un espace vide transparent n'affectant pas la lumière (= l'éther de Descartes) est encore très présent. D'autres astronomes constatent que de nombreuses céphéides apparaissent moins brillantes que ce qui était prévisible avec les calculs de distance effectués jusque-là. Ces espaces sans étoiles sont alors des nébuleuses qui absorbent la lumière, la totalité ou une partie du spectre lumineux (généralement les longueurs d'onde courtes). La découverte de l'absorption interstellaire permet de résoudre les nombreuses difficultés des astronomes : l'intensité lumineuse des objets lointains est altérée et les calculs de distances faussés ; des régions entières de la Voie lactée sont inaccessibles. Shapley comprend que son estimation de la taille de la Voie lactée est surestimée d'un facteur 3 ! Un consensus se dégage vers 1935 : la Galaxie mesure 100 000 AL de diamètre et le soleil se situe à 30 000 AL de son centre. Sa forme spiralée sera mise en évidence dans les décennies suivantes en utilisant les ondes radio, capables de traverser les nébuleuses sombres, pour chercher les atomes d'hydrogène.

Au moment où Einstein publie ses articles sur la relativité (1905-1915), les scientifiques ont une vision de l'univers proche de celle que nous connaissons. Les théories d'Einstein vont modifier la compréhension de l'univers, notamment dans le domaine de la cosmologie (la formation de l'univers et ses lois).

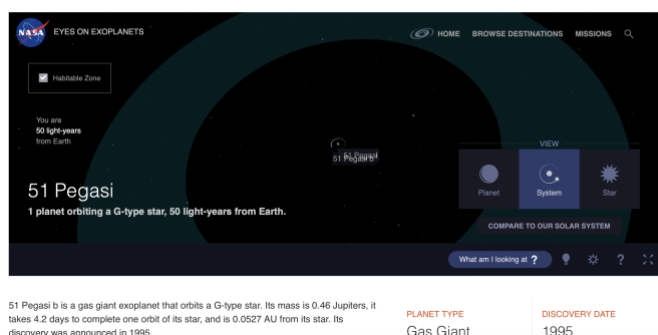
3. Bilan : retour sur les exoplanètes et le principe anthropique

Diapo 30

La pluralité des mondes occupe une place significative dans la culture contemporaine, elle est aussi très présente en astrophysique et dans les sciences de la vie.

EXOPLANET CATALOG

51 Pegasi b



Elle a retrouvé une nouvelle vigueur avec la découverte des exoplanètes. Car, avec la détection de la première exoplanète en 1995, on a pu rendre « réel » ce qui n'était que spéculation depuis le 17^e s. : l'existence de planètes autour d'étoiles en dehors du système solaire. Surtout, est posée la question de la possibilité de la vie ailleurs ou de l'unicité de la vie sur Terre. Cette question avait été occultée à la fin du XX^e s. lorsque les explorations spatiales avaient montré qu'il n'y avait pas de « vie » ailleurs ! La découverte des exoplanètes permet de re-tester les hypothèses d'une vie ailleurs.

Mais c'est un vrai choc. Les premières exoplanètes découvertes contredisent les modèles de formation des étoiles et des systèmes planétaires élaborés à partir de l'étude du seul système solaire. 51 Peg B, la première exoplanète découverte est de la taille de Jupiter (mais plus légère) et tourne autour de son étoile en un peu plus de 4 jours. Jamais, auparavant on aurait pu penser qu'une planète gazeuse puisse se trouver aussi près de son étoile ! Leur découverte introduit des doutes dans la compréhension de la mécanique des systèmes planétaires : les planètes migrent, les systèmes sont dynamiques, instables et présentent une grande diversité de configurations.

Diapo 31

La première exoplanète proche est Proxima centauri B découverte en 2016. Elle a une taille comparable à celle de la Terre mais est beaucoup plus proche de son étoile car elle en fait le tour en 11 jours. Surtout cette planète tourne autour de l'une des étoiles d'un groupe comprenant 3 astres. Proxima est une naine rouge, la moins brillante des 3, elle serait accompagnée de 3 exoplanètes (b,c,d).

La quête de la vie ailleurs amène les chercheurs à déterminer des zones d'habitabilité (liée à la nature de l'étoile) et à chercher des « Terres-jumelles ». Mais, partir de l'exemple de la Terre et chercher un « indice de similarité avec la Terre », réduit la probabilité d'en trouver ! En 2023, alors que 5500 exoplanètes ont été identifiées, aucune planète ne peut prétendre avec certitude être une Terre-jumelle, même s'il existe quelques candidates au statut de d'« exoplanète potentiellement habitable » (dont Trappist 1-d qui a l'indice de similarité avec la Terre le plus élevé). De nombreux chercheurs s'interrogent sur la démarche, celle de chercher de la vie par analogie avec celle sur Terre. N'est-on pas en train de revenir au principe anthropique, c'est-à-dire à vouloir observer des choses qui doivent être compatibles avec les conditions nécessaires à notre présence ? On préfère donc aujourd'hui parler de diversité des mondes, plutôt que de pluralité des mondes (comme le nôtre).

Diapo 32

De plus, cette recherche questionne notre propre histoire, notamment celle de la formation de notre système solaire et de l'apparition de la vie sur Terre. Pour cette quête, « Terre-jumelle » et « Soleil-jumeau » sont les principales cibles. Des astronomes s'intéressent en particulier aux étoiles qui se sont formées en même temps que le Soleil et qui ont pu créer avec lui un amas ouvert. Ces étoiles sont probablement semblables à celui-ci et pourraient

posséder des planètes. Une étoile est suspectée d'être l'une d'elles, il s'agit de HD186302 dans la constellation du Paon. Elle est du type spectral G et se situe à 180 AL du Soleil. Une hypothèse prévoit qu'à son origine le Soleil appartenait à un système binaire dont les deux composantes se sont séparées. Son intérêt est d'expliquer le nombre d'objets du nuage d'Oort (distance 1 à 2 A-L), seule la force gravitationnelle de deux étoiles serait capable de maintenir autant d'objets puis de les disperser sous le coup de la séparation et de la pérégrination des étoiles. Or le nuage d'Oort est considéré comme le « réservoir des comètes », des objets qui ont des orbites très elliptiques, trajectoires qui peuvent s'expliquer par l'influence gravitationnelle des étoiles qui sont passées à proximité... Et ces comètes sont de plus en plus considérées comme ayant apporté l'eau et la vie sur Terre.

Diapo 33

Finalement on se retrouve ainsi dans une position proche des philosophes de l'Antiquité.

La pluralité des mondes est devenue « réalité ». Mais cette réalité est complexe, diverse, questionne davantage et éloigne la perspective de tenir un discours global.

Nous n'avons toujours pas de connaissance globale de l'univers, nos savoirs étant limités, fragmentés et séparés.

Le principe anthropique est toujours présent car nous étudions l'ailleurs à travers le prisme de la réalité qui a entraîné notre présence. Mais face à l'incapacité à comprendre la réalité, les deux postures restent les mêmes : affirmer l'unicité (la Terre est unique) ou concevoir la diversité des mondes possibles.

AVANT	AUJOURD'HUI
L'évolution de l'Univers a pour finalité l'homme. Dieu a créé l'Univers et en est le moteur. Ce qui conduit à ...	Volonté d'observer des réalités ailleurs qui doivent être compatibles avec notre propre présence. Ce qui conduit à ...
La Terre et l'homme au centre de l'Univers	Une vie intelligente cherchant à comprendre l'Univers uniquement sur Terre
Mais n'empêche pas de penser : La pluralité des mondes car la puissance de Dieu est infinie	Mais n'empêche pas de penser : La diversité des mondes et des formes de vie (intelligente ?) La pluralité des univers (?)

Sources principales :

Séguin, Villeneuve, *Astronomie et Astrophysique, Cinq grandes idées pour explorer et comprendre l'Univers*, De Boeck Université, 2002

Arnaud Cassan, *Galilée à la plage, l'astronomie dans un transat*, Dunod, 2020

Jacques Fantino, La pluralité des mondes entre science et théologie, Revue des sciences religieuses, 2002, https://www.persee.fr/doc/rscir_0035-2217_2002_num_76_3_3629

Guédon Jean-Jacques, Ciel d'Aunis
guedon-jean.jacques@orange.fr