

**VOYAGE  
DANS  
L'ESPACE**

Épisode

80

---

**NOTRE PLACE DANS L'UNIVERS :  
2500 ANS D'HISTOIRE**

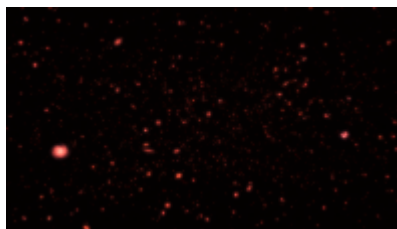
---

**Sur les épaules de géants**

## Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur et Mathieu Rancourt produisent un balado consacré à l'exploration de l'espace. Intitulé *Voyage dans l'espace*, il est diffusé sur la plateforme soundcloud.com. Chaque épisode vous fait parcourir une dimension particulière, qu'il s'agisse de l'exploration d'une planète, de la recherche de vie dans l'Univers ou de l'aventure des astronautes et de ceux et celles qui rêvent d'espace.

### En couverture



Le soir, lorsqu'on regarde le firmament, que voit-on au juste?

Pour la plupart des balados, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Il peut s'agir d'une conversation entre Mathieu, l'animateur de *Voyage dans l'espace*, et Claude, le passionné d'espace, ou d'une entrevue avec un spécialiste (souvent un astronome). Ils publient ces exposés sous forme de fascicules, comme celui-ci.

Notez que le balado diffusé s'inspire librement des questions/réponses préparées à cet effet. Le texte qui suit n'est pas un verbatim de l'émission, mais plutôt une autre version; le balado et ce fascicule se complètent l'un et l'autre.

Tous les fascicules sont offerts aux abonnés du balado *Voyage dans l'espace*, abonnement au coût de 5\$/mois, via la plateforme patreon.com.

**Mathieu Rancourt** est géographe et professionnel de recherche. **Claude Lafleur** est journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis plus de 50 ans les péripéties de l'exploration spatiale.

#### L'équipe de *Voyage dans l'espace*:

**Claude Lafleur, contenu**

**Mathieu Rancourt, animation**

**Florent Meunier, montage**

**Laurent Runigo, médias sociaux**

[Les balados](#) ; [Abonnement](#) ; [Courriel](#).

[Facebook](#) ; [YouTube](#) ; [Instagram](#).

#### L'équipe des fascicules:

Rédaction: Claude Lafleur

Couverture: Florent Meunier

Illustrations: Jean-René Roy et autres sources.

© Copyright, Claude Lafleur, 2022

ISBN 978-2-925106-51-7 (pdf)

ISBN 978-2-925106-52-4 (kindle)

Dépôt légal:

Bibliothèque nationale du Québec, 2022

Bibliothèque nationale du Canada, 2022



Photo: Alan Dyer

De tout temps, nous sommes émerveillés par ce qu'on voit la nuit au firmament. Il nous a cependant fallu des millénaires pour comprendre la nature de ce qu'on y trouve.

## Notre place dans l'Univers 2500 ans d'histoire

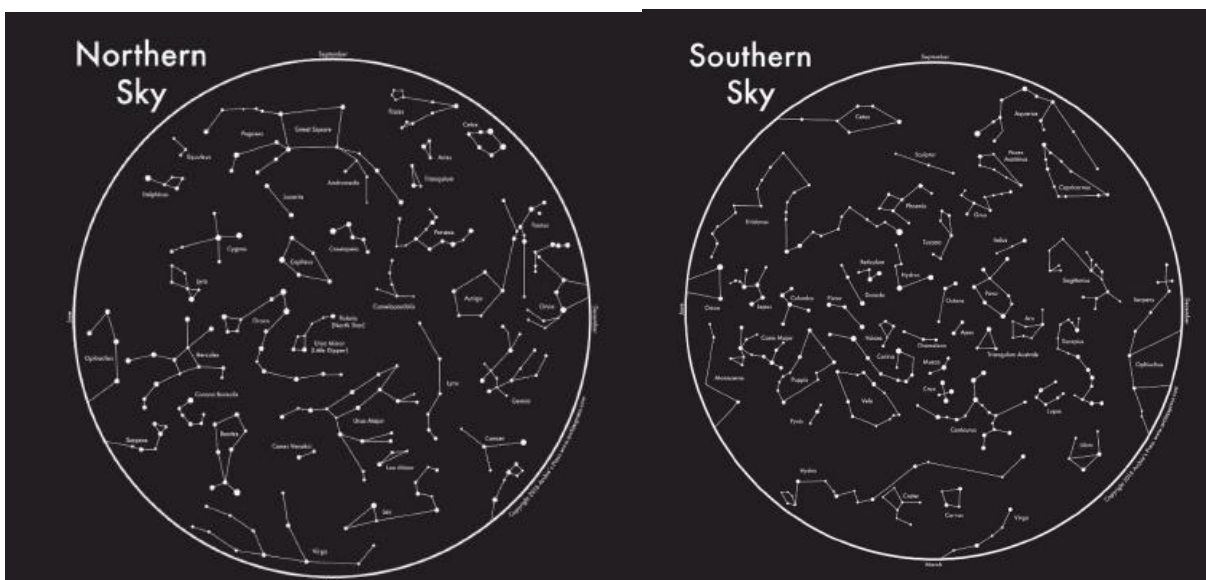
[Écoutez](#) le balado *Notre place dans l'Univers*, diffusé le 6 février 2022. Entrevue avec l'astronome Jean-René Roy, colligé par Claude Lafleur.

**Durant des millénaires, nous avons contemplé soir après soir le firmament en se demandant ce qu'on y voyait. La nature humaine étant ce qu'elle est, on cherche sans cesse à identifier ce qu'on voit et à comprendre le monde qui nous entoure.**

La première chose qu'on a vue, ce fut un firmament peuplé de milliers de minuscules points lumineux. La grande majorité semble fixe, mais quelques-uns semblent se déplacer. Surtout, chaque matin, on voyait un soleil se lever à l'horizon est et se coucher le soir sous l'horizon ouest. De même, on voyait assez régulièrement une lune se lever le soir à l'est et se coucher le matin à l'ouest. Étrangement, cette

lune change de forme, prenant parfois les allures de croissant, de demi-cercle sinon même de cercle plein, pour aussi être parfois absente du firmament. Bizarre, puisqu'aucun autre astre ne se comporte de la sorte.

C'est ainsi que durant des millénaires, on a cru que chaque matin, un nouveau soleil se levait, pour mourir en fin de journée. De même pour l'astre des nuits. On



Les 88 constellations visibles depuis l'hémisphère Nord et depuis l'hémisphère Sud.

n'avait pas idée qu'il pouvait s'agir des mêmes objets célestes qui réapparaissent d'un jour à l'autre.

### Au centre de l'Univers

On observait aussi que tout tourne autour de nous, que si les milliers de petits points lumineux apparaissent fixes les uns par rapport aux autres, tous se déplacent uniformément d'est en ouest. Ensuite, on a imaginé qu'ils forment des figures géométriques qu'on a un jour transformées en dessins complexes qu'on a appelés *constellations*. On a ainsi conçu plusieurs dizaines de constellations auxquelles on a donné des noms évocateurs: Taureau, Vierge, Lyre, etc. (Parmi le grand nombre de constellations imaginées au fil des millénaires, on n'en a finalement retenues que 88.) Celles-ci nous sont extrêmement utiles puisqu'elles servent à nous repérer dans le firmament.

Ces points de repère nous ont aussi permis de découvrir qu'il y a une demi-douzaine de petits points lumineux, un peu plus étincelants que les autres, qui sem-

blent se balader à leur gré dans le firmament. On les a appelés planètes, du mot grec signifiant justement astres errants. Puis, on leur a attribué la personnalité de divinités: Mars, le dieu de la guerre, Vénus, la déesse de l'amour, Mercure, le messager des dieux, Jupiter, le roi des dieux et Saturne, le dieu de l'agriculture (l'activité la plus vitale chez les premières civilisations).

En observant le firmament, on constate aisément que tout tourne autour de nous. C'est dire qu'à l'évidence, nous occupons le centre de l'Univers. D'où l'idée que nous serions au centre des préoccupations des dieux, ceux-ci gravitant autour de nous!

À partir de là, l'une de nos grandes préoccupations a été de prévoir ce qui se passe dans les cieux. Peut-on interpréter les déplacements des dieux? (D'où l'invention de l'astrologie.) Peut-on prévoir l'avenir, notamment l'évolution de la Lune de mois en mois ainsi que le cycle des saisons?

Nous rendant compte que nous dépendons de ce qui se passe là-haut – notamment pour la météo, le climat et les saisons – l’interprétation de ce qui se passe au firmament est devenue une très grande préoccupation. (D’où l’invention des mythologies et des religions.) C’est ainsi que des «savants» (astrologues et religieux) ont entrepris de scruter les cieux afin d’en tirer quelques interprétations.

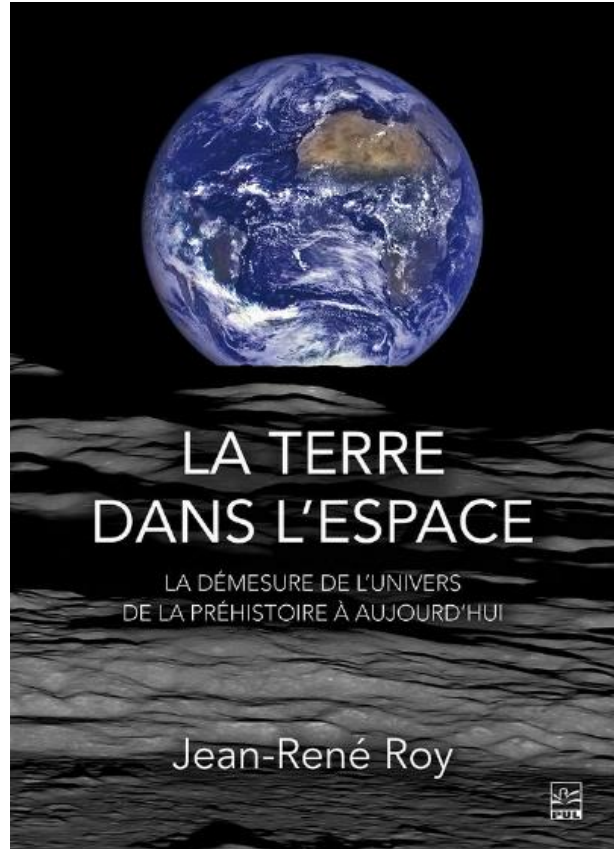
### Et si l’Univers était une mécanique?

On constate ainsi que nos lointains ancêtres ne différaient en rien de nous puisque, comme nous, ils désiraient savoir et comprendre le monde autour d’eux.

Cependant, il y a environ 2500 ans, certains penseurs grecs ont commencé à se questionner: se pourrait-il que le firmament soit une mécanique, une sorte de machine, dont on pourrait établir le fonctionnement? Et si la Terre était une île flottant dans les cieux? Et si les sources qui éclairent nos jours et nos nuits étaient en réalité des objets lumineux qui revenaient d’une journée à l’autre?

C’est ainsi que Ptolémée, 150 ans avant notre ère, fut l’un des premiers à tenter de comprendre le fonctionnement des planètes. Il a fini par conclure que tout tourne autour d’une Terre immobile, que la nuit, le Soleil passe «en-dessous» de la Terre, et que la Lune fait de même durant la journée. Il s’agit de la conception *géocentrique* de l’Univers (géo = Terre) prônée par Aristote et par Ptolémée et qui s’est imposée durant plus de 1500 ans.

C’est cette quête audacieuse – de l’idée qu’on se fait de l’Univers et de la place qu’on s’y attribue – qu’explore Jean-René Roy dans son plus récent ouvrage, *La Terre dans l’espace*. Il y retrace le parcours que l’humanité a dû faire pour



*La Terre dans l'espace* publié au PUL en 2021.

parvenir à cerner la place que nous occupons réellement dans l’espace.

Cet astrophysicien publiant un livre par année, c’est la quatrième fois que nous l’accueillons à *Voyage dans l’espace*. En effet, nous avons d’abord parlé avec lui du rôle central que joue la photographie en astronomie (balado 40, L’astronomie par l’image). Nous avons aussi présenté Georges Lemaître: le père du Big Bang (balado 58) ainsi que démystifié avec lui la Matière et énergie «noires» (balado 44).

Rappelons que M. Roy est professeur retraité au Département de physique de l’Université Laval. Il a aussi œuvré à l’Observatoire Gemini à Hawaii et au Chili ainsi qu’au prestigieux *Space Telescope Science Institute* de Baltimore. Et comme nous l’avons relaté, il est l’auteur de plusieurs ouvrages en français et en anglais.



Copernic, Kepler, Galilée, Newton, Darwin, Einstein, Hubble et Lemaître : les «géants» à qui nous devons de connaître la place que nous occupons dans l'Univers.

## 1 – Sur les épaules de géants

Nous, nous savons que nous habitons une planète – un immense astre rocheux – qui gravite autour du Soleil, comme les autres planètes du Système solaire. Nous savons aussi que le Soleil est une étoile parmi des milliards d'autres qui forment notre galaxie, la Voie lactée. Et celle-ci n'est que l'une des milliards de galaxies qui constituent l'Univers.

Nous, nous savons tout cela! Mais ce qu'on sait moins, c'est qu'il nous a fallu des millénaires pour prendre conscience de notre place dans l'Univers. C'est même une connaissance très récente puisqu'elle ne remonte qu'à quelques siècles tout au plus. Il nous est d'ailleurs très difficile, et très dérangeant, d'accepter l'idée que nous habitons une planète quelconque perdue dans l'immensité de l'Univers, puisque pendant si longtemps, on s'est cru au centre de tout.

Voilà le cheminement que raconte Jean-René Roy dans son plus récent livre: *La Terre dans l'espace*. Ce livre est très riche, contenant abondance d'informations, d'explications et d'illustrations. Tout en expliquant quantité de notions d'astronomie, l'auteur retrace l'histoire de la construction de la connaissance; comment à partir d'idées que l'Univers devait être quelque chose de magique et d'incompréhensible nous sommes arrivés à nos connaissances scientifiques actuelles.

**Mais pour commencer, parlons du livre: Jean-René, présentez-nous votre livre dans vos mots.**



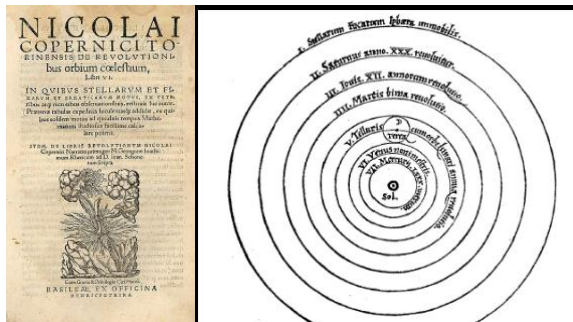
L'astrophysicien Jean-René Roy.

C'est toujours un retour vers le passé que je trouve intéressant à faire. D'ailleurs, comme vous l'avez bien résumé, Claude, c'est la thématique de nous situer dans l'Univers. Et j'en ai profité – en me jouant un tour à moi-même et aux lecteurs – pour raconter toute l'histoire de l'astronomie (en tout cas, une grande partie) en utilisant ce fil conducteur. Mais bien sûr, cela n'a pas été la démarche des astronomes à travers le temps, aucun d'entre eux ne se levait un bon matin en se disant: «Aujourd'hui, je vais établir où la Terre se trouve dans l'espace»!

Souvent, c'est par rebondissements dans ce qu'on a trouvé presque par hasard

(ou parfois avec intention) que, petit à petit, on a situé la Terre dans l'espace. D'ailleurs, cette première démarche s'est faite il y a très longtemps, il y a plus de 2500 ans.

Ce faisant, j'avais deux objectifs, à commencer par celui que j'appelle: «rétablir la mémoire». Il est en effet courant de nos jours de présenter les choses comme si on les avait découvertes récemment, ou qu'avant la NASA, il n'y avait rien! Je veux donc rétablir la mémoire. Et ce que j'adore faire aussi, c'est de déconstruire certains mythes.



Dans son livre *Les révolutions des orbes célestes* publié en 1543, Nicolas Copernic a l'audace de placer le Soleil au centre de tout.

Par exemple, on rapporte que Copernic a imaginé le concept de l'héliocentrisme [l'idée que le Soleil serait au centre de tout, plutôt que la Terre]. Il n'a cependant pas été le premier, comme on le rappelle assez bien. Mais Copernic n'a pas émis ses hypothèses pour la première fois dans son fameux grand traité *Les révolutions des orbes célestes* de 1543. Il n'est pas arrivé comme ça, de nulle part, puisqu'il était le disciple de ceux qui l'ont précédé, dont entre autres des gens comme Regiomontanus et George Peurbach. Il s'agit de chercheurs allemands, de l'Université de Vienne et de Nuremberg, qui eux-mêmes étaient dans la filiation de certains penseurs médiévaux, et

de chercheurs arabes et persans [comme nous le verrons].

**La connaissance, c'est quelque chose qui se construit, tel un édifice auquel on ajoute des étages...**

.. Et de continuité avec des pauses car, parfois, on défait des étages.

Cette allusion à la construction d'un édifice, je l'adore, Claude, puisque souvent, on avance des hypothèses un peu comme on élève des échafaudages, pour mettre en place les différents étages. Mais lorsque les choses sont en place, on enlève l'hypothèse qui constitue l'échafaudage. C'est-à-dire que l'hypothèse, l'échafaudage, a été nécessaire mais ce n'est pas la structure permanente... (J'aime beaucoup cette idée d'échafaudage en science, une idée que je suis en train de développer.)

En résumé: la science est une continuité, toute découverte reposant sur ce qui s'est fait précédemment. C'est donc ce qui tisse mon récit, parce que c'est un récit, presque un roman, que je propose aux lecteurs.

**Votre livre nous montre effectivement l'échafaudage qui nous a menés jusqu'à la conception de l'Univers tel que nous le concevons à présent.**

Et aussi: comment on en est arrivé au moment où c'était le temps d'enlever l'échafaudage: Ptolémée a fait son temps, et on n'a plus besoin de cet échafaudage puisqu'on peut désormais tout faire en montant par les escaliers ou en prenant les ascenseurs! Scientifiquement, mettons-nous cela dans la tête que c'est comme cela qu'on avance, puisqu'il faut d'abord passer par l'étape des échafaudages, celle des hypothèses.

## A qui s'adresse votre livre?

En premier lieu: à moi! Je dois en effet toujours me convaincre que j'ai un récit à raconter, un récit qui se tient, qui est logique. Ensuite, mon premier filtre, c'est ma conjointe, Hélène, qui doit toujours approuver... Puis, j'utilise d'autres lecteurs, dont de grands historiens; je teste les idées et vérifie certains faits plus obscurs puisque je ne suis pas historien; je suis un astrophysicien de terrain qui s'intéresse beaucoup à l'histoire.

J'espère enfin que mon livre intéressera tous les gens qui ont cette curiosité par rapport à l'Univers. J'écris dans un style qui est pour les étudiants de cégep, les étudiants universitaires, mes collègues scientifiques...

D'ailleurs, l'une des plus belles remarques que je reçois parfois, c'est lorsque l'un de mes collègues, spécialiste d'une discipline, m'écrit: «Ce livre m'a appris beaucoup de choses...» Voilà qui reconforte le non-expert historien que je suis!

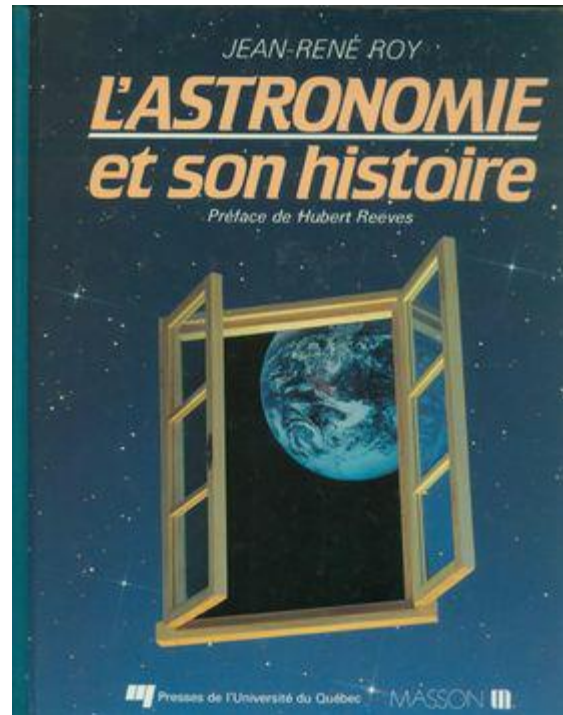
## Comme quoi, nous avons toujours quelque chose à apprendre....

Toujours!

## Comment est née l'idée d'écrire ce livre?

Ah, là, j'ai triché! J'avais écrit, il y a 40 ans *L'Astronomie et son histoire* qui a servi de texte de base à beaucoup de cours d'introduction à l'astronomie. Durant des décennies, on m'a souvent demandé: à quand une deuxième édition?

Mais ça ne m'intéressait guère de faire la réédition... d'un livre de près de 700 pages! Toutefois, l'année dernière, je brassais beaucoup d'idées et j'avais accumulé beaucoup de matériel. D'ailleurs,



j'ai désormais accès à beaucoup de documents précieux; en contactant les archivistes des grandes bibliothèques du monde, on a maintenant accès à des choses extraordinaires.

J'ai donc entrepris de faire une «nouvelle édition», mais cela a donné un ouvrage complètement transformé. Il s'agit d'une révision à fond, avec les connaissances que j'ai acquises ces derniers quarante ans. En fait, j'ai repris certains éléments de *L'Astronomie et son histoire*, mais en y intégrant encore plus les éléments d'histoire... C'est dans ce sens-là que je dis que j'ai un peu triché, en partant de quelque chose que j'ai déjà fait pour en faire finalement quelque chose de tout nouveau.

Ajoutons que j'ai trouvé énormément de plaisir à refaire ce récit en partant de mon livre d'il y a quarante ans, car j'ai découvert avec étonnement à quel point ce livre était à point pour l'époque. (Notons que *L'Astronomie et son histoire* est toujours disponible, en version électronique.)

## 2 – L’astronomie de l’Antiquité

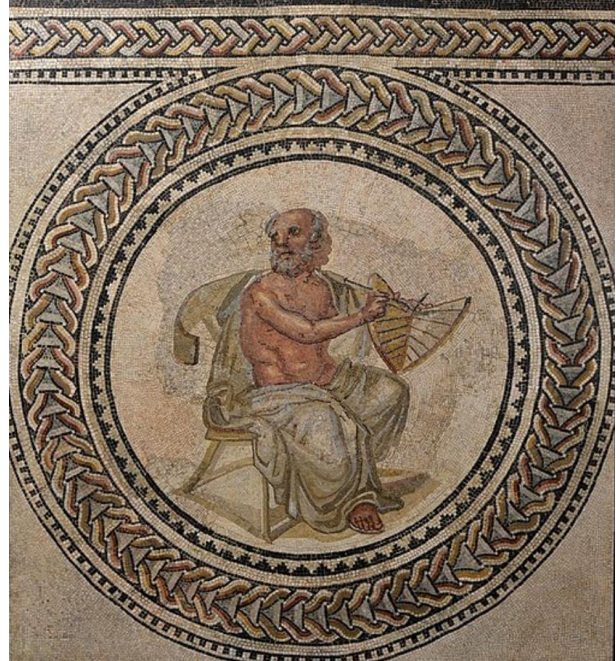
Dans votre livre, vous nous dites que, selon votre compréhension de l’histoire, la pensée scientifique serait née il y a environ 2600 ans, lorsque des philosophes grecs se sont mis à imaginer que l’Univers était possiblement une mécanique et non pas quelque chose d’incompréhensible, de surnaturel ou de magique. On pourrait donc possiblement expliquer l’Univers, songeaient-ils. Comment est apparue cette pensée, il y a quelques 2600 ans?

Nous le savons grâce aux quelques écrits qui nous sont parvenus de l’Antiquité. La première chose que vous signalez, c’est la naissance de la pensée scientifique – un terme utilisé par le physicien et théoricien Carlo Rovelli. Il s’agit de l’école de Millet, fondée au 6<sup>e</sup> siècle avant notre ère dans une ville qui se trouve à présent en Turquie (et que ma conjointe et moi avons visitée en 1989). C’était un centre culturel de la Grèce antique très important où trois penseurs œuvraient en même temps: Thalès, Anaximandre et Anaximène.

Celui que je mets le plus en évidence dans mon livre, c’est Anaximandre de Millet, qui serait né en l’an 610 avant notre ère et décédé en 546 (approximativement).

Avant lui, certaines mythologies (entre autres chez les Égyptiens) racontaient que le Soleil disparaissait dans la mer chaque soir et qu’un nouveau Soleil apparaissait chaque matin. Quant aux Grecs, on leur attribue l’idée que la Terre est une sorte de table sur le dos d’un éléphant – mais c’est là une image qui ne correspond pas véritablement à celle que les Grecs avaient réellement.

Mais voilà qu’Anaximandre émet l’idée que le Soleil se couche à l’ouest pour réapparaître à l’est le lendemain. Et même chose pour la Lune et pour les étoiles. Il aurait eu cette idée par une observation aussi simple que celle que font les jeunes enfants parvenus à un certain stade de leur développement.



Il y a 2600 ans, le philosophe grec Anaximandre de Millet a émis l’idée que le Soleil et la Lune qu’on observe d’un jour à l’autre étaient en fait toujours les mêmes objets célestes.

En effet, pour un très jeune enfant, lorsqu’une personne disparaît de sa vue, elle cesse d’exister! Si donc, dans une pièce, vous pouvez entrer d’un côté pour en ressortir de l’autre, à un moment donné, l’enfant va finir par réaliser que vous êtes toujours la même personne.

Anaximandre s’est donc dit: «Je vois les constellations qui descendent et se couchent derrière l’horizon, et les mêmes constellations qui réapparaissent de l’autre côté. Cela signifie qu’il y a de l’espace à l’arrière, donc que les choses passent derrière la Terre. La Terre flotte

donc dans l'espace et les astres tournent autour d'elle, ils virevoltent autour de nous.»

**C'est une idée qui faisait plein de sens et qui s'est longtemps imposée à nous: tout tourne autour de nous.**

En même temps, les penseurs de ce qu'on appellera plus tard l'*école de Millet* (même si ce n'était pas une école à proprement parlé) ont énoncé pour la première fois l'idée qu'il devrait être possible d'*expliquer* quantité de phénomènes – la foudre, les tremblements de Terre, etc. – par des causes naturelles plutôt que par des forces magiques et surnaturelles.

Je pense donc qu'il est exact d'attribuer, comme Carlo Rovelli le fait, le début de la pensée scientifique au 6<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Peut-être qu'éventuellement retrouverons-nous des écrits qui feront remonter encore plus tôt la naissance de la pensée scientifique... Mais pour le moment, nous possédons des tablettes cunéiformes qui nous rapportent des observations sur toutes sortes de choses, mais la compréhension – entre autres du fait que la Terre flotte dans l'espace – semble venir de l'époque de l'école de Millet.

Citons enfin Karl Popper, l'un des plus grands philosophes du 20<sup>e</sup> siècle, qui considère que la proposition d'Anaximandre est «l'une des idées les plus audacieuses, révolutionnaires et porteuses de toute l'histoire de la pensée humaine.» C'est tout dire!

**Autrement dit, avant Anaximandre, on pensait que les astres mourraient le soir et naissaient le matin, que c'était des objets sans cesse nouveaux.**

En fait, on ne sait pas trop ce qu'on pensait auparavant [étant donné la rareté

des écrits]. Mais d'après les récits mythologiques, il semble qu'on pensait qu'il y avait la Terre et un certain espace (le firmament et l'atmosphère), mais on ne faisait pas de distinction, c'est-à-dire que l'espace, c'était la Terre et la Terre, c'était l'espace. J'y reviens d'ailleurs beaucoup dans mon livre, dans des rappels en début de chapitre: comment on est parvenu à casser cette image, d'abord par une proposition, qu'il a fallu démontrer par la suite. (Ce qui viendra beaucoup plus tard.)

## **La Terre, au centre d'un oignon?**

**Entre-temps, les Grecs développent une conception de l'Univers à l'effet que la Terre serait au centre et entourée de sphères, un peu à la manière des pelures d'oignon et sur lesquelles seraient fixés les différentes planètes, la Lune, le Soleil et les étoiles. Donc, une première vision de l'espace en une série de sphères enchevêtrées comme des poupées russes.**

Oui. Ce sont des sphères concentriques. Le premier à avoir émis cette idée est Eudoxe de Cnide. Il a vécu presque deux cent ans après Anaximandre, de 408 à 355 avant notre ère. C'est lui qui a proposé l'idée qu'on peut imaginer l'Univers comme un ensemble de sphères concentriques au centre desquelles se trouve la Terre.

**Nous sommes au cœur de l'oignon.**

C'est cela! Mais il faut faire attention à ne pas trop donner un sens littéral au concept de sphères d'Eudoxe. Celui-ci se serait plutôt dit: «Je vais me donner un *moyen* de calculer la position des astres

dans un an, deux ans... sinon même la semaine prochaine.» Il a donc commencé par ce jeu de sphères qui tournaient toutes dans le même sens mais pas à la même vitesse. C'était une idée extraordinaire: la première machine à calculer qu'on ait conçue.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum.



Le concept de l'Univers imaginé par Eudoxe: la Terre au cœur d'un système complexe.

Autrement dit, pour Eudoxe, le concept de sphères était avant tout une façon de parvenir à calculer la position des astres évoluant au firmament, sans pour autant affirmer qu'elles existaient réellement. Les Grecs cherchaient avant tout une façon concrète de comprendre le fonctionnement de l'Univers, sans pour autant affirmer que les astres étaient fixés à de véritables sphères.

C'est là un bel exemple d'échafaudage dont parle Jean-René et qui nous permettra éventuellement de construire l'un des étages de l'édifice de la connaissance scientifique.

Eudoxe a réussi en quelque sorte à expliquer pas mal de choses. Il pouvait expliquer certains mouvements, entre autres le fait que, parfois, le déplacement de la planète Mars semble aller vers l'est – ce qu'on appelle la rétrogradation. Sauf que, parce que les sphères étaient concentriques, il ne pouvait pas expliquer le fait que la brillance des planètes varie. Il a cependant mis la table pour un «système de calcul».

Les observateurs du firmament ont longtemps été mystifiés par le fait que si, d'ordinaire, la planète Mars traverse le ciel d'est en ouest (comme tout le reste), il arrive parfois qu'elle semble «reculer» pour un temps, avant de reprendre sa course normale.

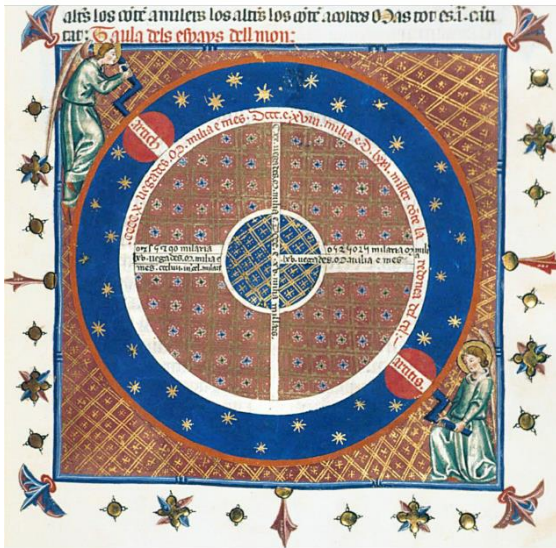
Ils observaient également que les planètes semblent à certains moments plus brillantes qu'en d'autres temps.

On sait à présent que ces deux phénomènes sont dus au fait que les planètes gravitent autour du Soleil avec des vitesses différentielles et donc que leur distance varie par rapport à nous.

**Est-ce que dans son esprit, ces sphères sont imaginaires où existaient-elles vraiment? S'agissait-il de véritables sphères où, sur chacune desquelles, on aurait fixé la Lune, le Soleil, Mars, etc.?**

Grande question! Je pense que, jusqu'à un certain point, il s'agissait plutôt d'un système de calcul. Évidemment, plus tard, on verra des tableaux dans certains manuscrits [du Moyen âge] où les sphères sont dessinées de toute beauté, avec des anges qui manipulent des manivelles! Car, avec la Chrétienté, il fallait quelqu'un pour faire marcher le tout! Il y avait donc les Chérubins et les Séraphins en charge

du trafic céleste. On les voit avec des manivelles et c'est de toute beauté! J'appelle cela de la «vulgarisation» pour expliquer aux gens comment ça pouvait marcher, qu'il y avait quelque chose de précis dans la mécanique céleste.



Une belle vision «chrétienne» de l'Univers.

Mais retenons surtout qu'Eudoxe a été le premier à proposer un moyen d'expliquer par des causes naturelles la mécanique céleste que nous utilisons maintenant pour lancer des satellites. Bien sûr, son système de sphères nous paraît primitif, mais si on se reporte à son époque, c'était une avancée audacieuse.

## L'harmonie des sphères

Une autre avancée intéressante, c'est un concept que les Grecs ont inventé et qui résonne aujourd'hui encore: l'harmonie des sphères. Il s'agissait de relier mathématiques et musique. De quoi s'agissait-il au juste?

Cette idée vient de Pythagore, qui a vécu entre Anaximandre et Eudoxe, entre 575 et 495 ans avant notre ère. Il s'agit d'un penseur plus mystique que ceux-ci. Il

a énoncé la notion qu'il y aurait une sorte d'organisation des sphères, un peu comme les cordes d'un instrument de musique, et que ces sphères, en tournant, créeraient des sons. Il s'agirait de sons tonitruants que nous n'entendrions cependant pas puisqu'on est né avec eux. Nous les avons toujours entendus, un bruit de fond.

Dans son livre *La Terre dans l'espace*, Jean-René précise:

L'aspect le plus caractéristique de l'univers pythagoricien est sans doute la doctrine de l'harmonie des sphères.

Cette idée constitue un effort d'envergure pour déceler dans la nature des structures mathématiques menant à une théorie des planètes basée sur une analogie entre les distances planétaires et les intervalles musicaux. Les pythagoriciens établissaient des rapports entre les mathématiques et la musique.

Aristote rapporte que les pythagoriciens supposaient que les mouvements des sphères produisaient des notes puissantes, dont le ton dépendait de la vitesse des sphères; ces vitesses étaient à leur tour conditionnées par la distance de leur centre. Les sphères extérieures étaient les plus rapides et produisaient les notes les plus élevées; l'ensemble créait une harmonie.

Notre inaptitude à entendre cette musique céleste s'expliquait par le fait que, depuis notre naissance, nous avons été habitués à ce son uniforme qui ne nous préoccupe plus.

Cette vision pythagoricienne primitive a profondément marqué le développement ultérieur de l'astronomie en établissant le principe du mouvement circulaire uniforme.

Et ce qui est curieux, c'est que cette idée a perduré jusqu'à Johannes Kepler qui en parle dans son livre *L'harmonie des mondes* dans lequel il énonce ses fameuses lois. Kepler avait cet aspect mystique: alors qu'il recherchait une compréhension mathématique de l'Univers, il avait aussi ce besoin d'avoir un ordre encore plus élevé des choses.

Mais cette idée a disparu avec Newton. Celui-ci a pris les trois précieuses lois de Kepler – qui constituent un apport extraordinaire à la science – tout en envoyant promener toute notion de la musique des sphères célestes!

Pourtant, cette idée demeure aujourd'hui encore dans l'esprit collectif de création. Des artistes vont même jusqu'à l'utiliser dans des compositions musicales et je pense qu'il y a encore des gens qui y croient encore un peu...

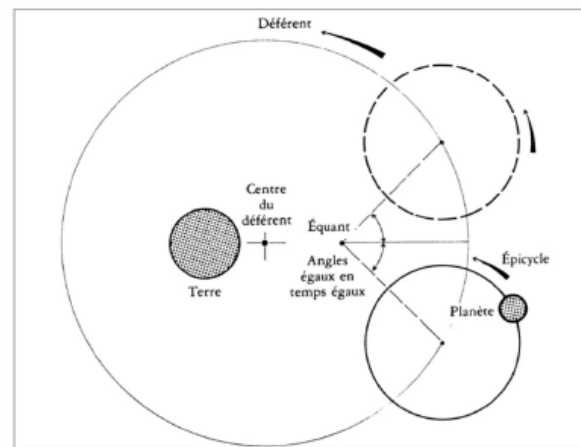
## Les épicycles, déférents, et équants de Claude Ptolémée

Dans son livre *La Terre dans l'espace*, Jean-René nous introduit aux travaux d'un personnage hors du commun, Claude Ptolémée, qui vécut entre l'an 100 et 168 de notre ère. Celui-ci a conçu le modèle de l'Univers qui restera accepté durant plus de mille ans! (Qui dit mieux?)

L'œuvre astronomique la plus importante et la plus durable de l'Antiquité reste celle de Claude Ptolémée d'Alexandrie...

La réputation de Ptolémée vient surtout de son modèle géométrique d'un système planétaire géocentrique: une représentation complexe du mouvement des planètes, qui prédisait leurs

positions et leurs mouvements avec une précision jamais atteinte jusque-là...



Pour expliquer le mouvement parfois «erratique» de certaines planètes, Ptolémée a imaginé qu'elles se déplaçaient dans un petit cercle en suivant leur ronde autour de la Terre.

La pierre d'achoppement de toute théorie planétaire géocentrique demeurerait l'observation d'arrêts et de rétrogradations vers l'ouest, dans le mouvement normal vers l'est des planètes Mars, Jupiter et Saturne...

Ptolémée réussit à trouver une excellente solution, qui allait être acceptée avec assez peu de contestation pendant près de 1400 ans. Pour expliquer la rétrogradation des planètes, il supposa que chacune se déplaçait sur la circonférence d'un petit cercle mobile appelé épicycle; le centre de l'épicycle tournait autour de la Terre sur un grand cercle appelé déférent.

Quand la planète était à l'extérieur du déférent, elle allait dans la même direction que le centre de l'épicycle vu de la Terre, c'est-à-dire vers l'est. Lorsque la planète était à l'intérieur du déférent, elle rétrogradait et allait donc vers l'ouest.

Pour reproduire les observations, Ptolémée dut choisir une combinaison appropriée de distances et de vitesses

pour chaque astre; la rétrogradation arrivait alors au bon moment avec la durée correcte...

De plus, pour reproduire les mouvements des planètes avec une précision comparable à celle des observations d'alors, il faisait se déplacer le centre de l'épicycle à une vitesse angulaire constante autour d'un point appelé équant;

ce dernier ne correspondait ni au centre de la Terre ni au centre du déferent, mais était situé à l'opposé du centre de la Terre par rapport au centre du déferent.

Tout cela paraît bien compliqué, et l'est en effet.

### 3 – L'astronomie du Moyen âge

Faisons un autre saut, d'environ mille ans... Vous parlez dans votre livre de l'astronomie arabe, des apports que les Arabes ont faits à l'astronomie.

Nous l'avons oublié de nos jours mais il y a environ mille ans, ce sont eux qui possédaient la science, qui possédaient le savoir. Les Arabes étaient en avance sur à peu près tout le monde. D'ailleurs, les chiffres que nous utilisons, ce sont les chiffres arabes, et non pas romains. C'est dire qu'il y a mille ans, les Arabes possédaient des connaissances astronomiques fort importantes.

Première petite chose: corrigeons la notion de «chiffres arabes». En réalité, il s'agit des chiffres indiens. Ce sont en fait les Arabes qui ont récupéré les chiffres indiens pour nous les transmettre. C'est une petite chose que je trouve toujours amusante à relever...

Distinguons ensuite deux mondes: le monde arabe et le monde persan. Il y a des astronomes persans qui ne sont pas arabes. Et ceux et celles qui résident de nos jours dans la partie de l'Asie centrale – Iran, Turkménistan, Tadjikistan, Kirghizistan... – habitent un monde qui a sa propre histoire. Et c'est un monde qui a toujours été en contact avec le monde grec; le savoir grec a donc pénétré l'Asie centrale alors que par la suite, il y a eu d'extraordinaires savants arabes et persans qui y ont ajouté leurs propres savoirs.

Ainsi, la science arabe – qui inclut par extension la science persane – s'est développée en parallèle et indépendamment durant la montée du Christianisme en Europe. Il y a cependant eu une brisure, surtout suite à la prise de Constantinople...

Tracé	Système d'écriture	Caractères									
Occidental/Magreb/Andalous	Arabe/Latin	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Arabe	Arabe oriental (hors persan et ourdou)	٠	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩
	Persan	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
	Ourdou	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Indien	Bengalais	০	১	২	৩	৪	৫	৬	৭	৮	৯
	Devanagari	०	१	२	३	४	५	६	७	८	९
	Gujarati	૦	૧	૨	૩	૪	૫	૬	૭	૮	૯
	Gurmukhi	੦	੧	੨	੩	੪	੫	੬	੭	੮	੯

Wikipédia nous donne ici une idée de l'origine de nos chiffres «arabes» qui proviennent en fait de l'Inde.

C'est ainsi qu'au 11<sup>e</sup> siècle, le savoir arabe couvre toutes les disciplines grâce à trois grands personnages. Plus tôt, j'ai mentionné l'école de Millet (avec Anaximandre, Anaximène et Thalès); de même, on pourrait dire qu'il y a une nouvelle grande école,

arabo-persane celle-là, comprenant Avicenne pour la médecine, Al Haytham pour l'optique et la physique ainsi que le grand al-Biruni.

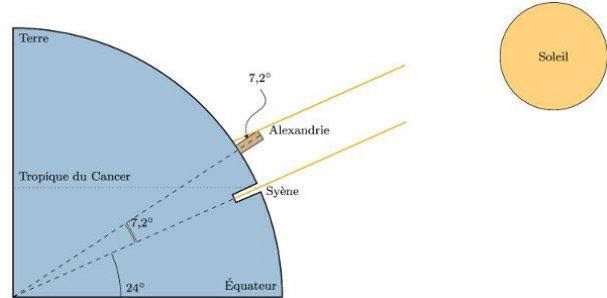


Abū l-Rayḥān Muḥammad ibn Aḥmad al-Bīrūnī (973 à ±1050)

Ce dernier est un *savant universel* qui a fait énormément d'avancées et au sujet duquel on a beaucoup plus d'écrits qu'à propos des Grecs de l'Antiquité. Entre autres, le grand historien belge George Sarton, qui a rédigé une Introduction à l'histoire des sciences d'environ 4000 pages – une *introduction!* – a baptisé le 11<sup>e</sup> siècle, celui d'al-Biruni.

C'est un bel exemple de la science arabe puisqu'al-Biruni a entre autres déterminé le diamètre de la Terre à l'aide d'une méthode extraordinairement simple.

On sait qu'Ératosthène, au 3<sup>e</sup> siècle avant notre ère, était parvenu à évaluer la taille de la Terre au moyen d'une expérience ingénieuse. Au moment du solstice d'été, il a mesuré l'ombre projeté par un stylet lorsqu'il se trouve à Alexandrie, mesure qu'il a comparée à celle d'un stylet planté dans une ville située 600 km plus au sud. Cette dernière se trouvant à l'équateur, le Soleil du midi ne projetait qu'une petite ombre. Ces deux mesures



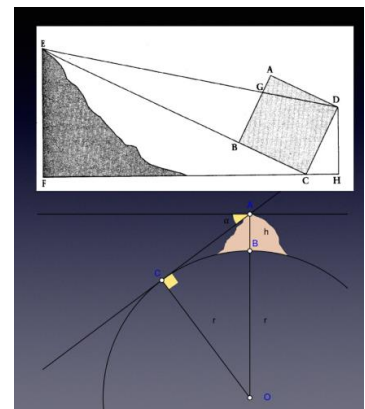
L'ombre que projette le Soleil, selon qu'on soit plus ou moins proche de l'équateur n'est pas la même, ce qui a permis à l'astucieux Ératosthène d'évaluer la taille de la Terre.

ont permis à Ératosthène d'établir la circonférence de la Terre à 40 000 kilomètres.

Or, nous savons aujourd'hui que le périmètre équatorial de la Terre est de 40 075 kilomètres. C'est dire que les calculs d'Ératosthène étaient formidablement proches de la valeur exacte.

Mais 1300 ans plus tard, al-Biruni propose une méthode de triangulation qu'on utilise constamment de nos jours. Je la résume puisque cette méthode pourrait être appliquée par des profs d'école secondaire avec leurs élèves.

Vous commencez par mesurer l'angle que fait la hauteur d'une montagne de votre entourage par rapport à l'horizon. Puis, connaissant la distance à laquelle vous vous trouvez de cette montagne, vous vous rendez au sommet de celle-ci, d'où vous mesurez l'angle que fait



La méthode d'al-Biruni.

l'horizon par rapport à l'horizontal au sommet de la montagne. Il s'agit d'un petit angle.

C'est de cette façon qu'al-Biruni a établi la mesure la plus précise de la circonférence de la Terre qu'on a utilisée jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle. Sa méthode est d'une simplicité remarquable.

D'ailleurs, j'aimerais réaliser l'expérience avec des jeunes, en prenant la hauteur du mont Ste-Anne, dans la région de Québec, puis de nous y rendre afin d'utiliser le fleuve St-Laurent comme base pour l'angle avec l'horizon.

**Mais ça doit être difficile de mesurer précisément un si petit angle...**

... qui n'est pas très grand, en effet. D'ailleurs, les Arabes avaient développé de nouveaux outils de mesure. Et, autant ne connaît-on presque rien des outils d'observation des Grecs, autant on peut grâce aux instruments qu'ont développés les Arabes et les Perses déduire ce qu'utilisaient les Grecs. Ce sont des instruments de mesure qui ont été grandement améliorés par les savants arabes et persans.

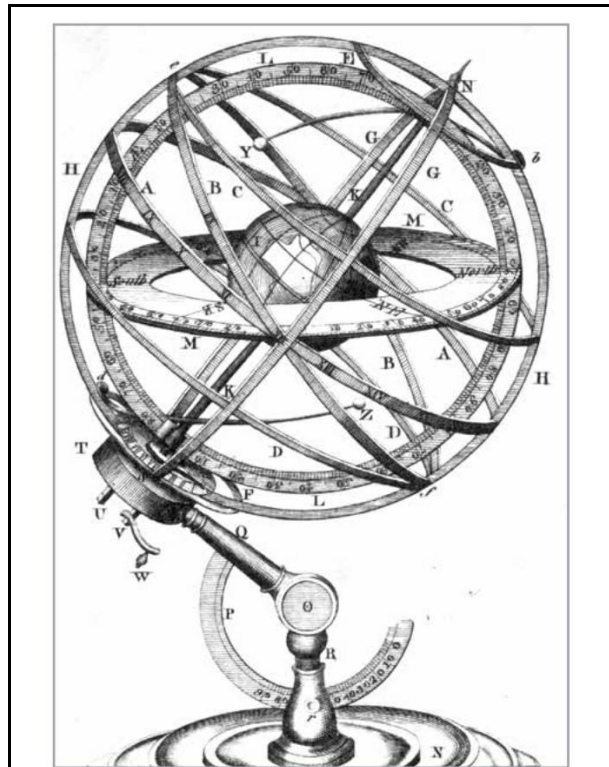
## L'astrolabe, l'ancêtre de nos cellulaires

**Les Arabes ont entre autres inventé un outil dont on connaît tous le nom mais dont on ignore de quoi il s'agit: l'astrolabe. C'est un instrument fort important en astronomie, mais de quoi s'agit-il et à quoi servait un astrolabe?**

Il s'agissait de prendre les sphères géocentriques d'Eudoxe pour en faire un instrument de mesure portable. Certains astrolabes, qu'on retrouvait dans tous les observatoires, pouvaient être très gros. Certains observatoires historiques, comme

celui de Beijing, ont encore ces astrolabes construits par les Jésuites.

Un astrolabe peut prendre la forme d'une sphère, mais la forme la plus simple est plate; il s'agit d'un disque avec des mesures et des cadrans qui indiquent la position de certaines étoiles de référence, sinon même montrer la Lune, les planètes, etc.



Exemple d'astrolabe sphérique.

Dans son livre, Jean-René explique:

Un astrolabe consiste en un assemblage de bracelets et de cercles gradués qui reproduisent les mouvements et les trajectoires des astres dans le ciel...

Ce genre de calculateur analogique permettait non seulement de déterminer l'heure, mais aussi de résoudre des problèmes d'astronomie sphérique et de géodésie.

Les quelque 1500 exemplaires d'astrolabes, datant de 1000 à 1700,

qu'on retrouve dans les musées du monde sont le témoignage de leur utilité. Pour la première fois depuis Ptolémée, l'astrolabe permettait de déterminer numériquement la position des astres, forçant une connaissance exacte des mouvements planétaires.

Pour l'époque, il s'agissait de haute technologie. Aujourd'hui, c'est un peu comme nos téléphones cellulaires qu'on peut pointer vers le ciel et qui nous donnent le nom des étoiles et des constellations; un astrolabe, avec ses systèmes de pointage, c'est un peu la même chose.

**C'est l'ancêtre de nos cellulaires!**

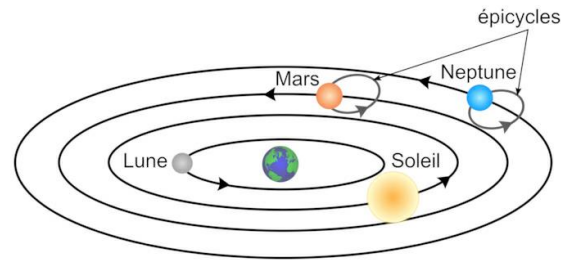
Oui, sauf qu'il fallait savoir comment s'en servir, alors qu'il ne nous est pas nécessaire de savoir comment fonctionne notre téléphone. L'astrolabe était un outil pour se positionner et mesurer la position des astres. C'était aussi un cadran qui nous permettait de déterminer l'heure, surtout celle durant la nuit [alors qu'on ne peut pas se baser sur la position du Soleil dans le ciel, comme on le faisait couramment autrefois].

D'ailleurs, un cadran solaire est la forme la plus simple d'un astrolabe.

## Le Soleil, centre de l'Univers

Si nous faisons un autre bond dans le temps...

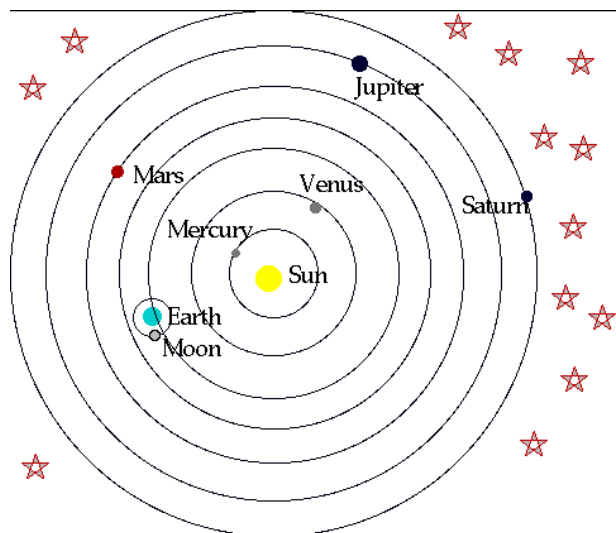
Il y a environ 2500 ans, les Grecs avaient décrété que la Terre occupe le centre de l'Univers et que tout tourne autour d'elle – donc une vision *géocentrique* de l'Univers, une vision qui a marqué notre conception de l'Univers puisque durant deux mille ans, elle s'est imposée comme étant le modèle.



Durant 2000 ans, on se considérait au centre de l'Univers, un beau modèle très rassurant pour les humains que nous sommes!

**C'était même un modèle incontestable, puisque toute personne qui osait s'attaquer à celui-ci risquait de périr sur les bûchers de la Chrétienté.**

Mais au début des années 1500, Nicolas Copernic remet en cause ce système géocentrique en disant que le Soleil étant plus gros que la Terre, logiquement tout devait tourner autour de lui. C'est donc Copernic qui a un peu replacé les choses sur la base qu'il est plus probable que le Soleil soit le centre de l'Univers.



Le modèle héliocentrique de Copernic: plus logique que le Soleil soit le centre de l'Univers.

Oui. Cependant, l'idée que nous ne sommes pas le centre de l'Univers est très ancienne; elle date d'Aristarque de Samos,

qui a vécu de 310 à 230 avant notre ère. Il est le premier à avoir proposé un système héliocentrique [hélios = Soleil]. D'ailleurs, Copernic le mentionne dans son grand ouvrage.

Un autre penseur grec que Copernic mentionne est Philolaos de Crotona. Celui-ci a proposé que ce soit plutôt la Terre qui tourne sur elle-même, et non pas tout le firmament autour de nous. Ce serait plus simple, pensait-il.

Néanmoins, le concept du *géocentrisme* s'est imposé durant deux mille ans. Cependant, au Moyen âge, et même dès le 11<sup>e</sup> siècle, al-Biruni avait déjà proposé l'hypothèse que la Terre pourrait tourner sur elle-même et que, dans ce cas, on observerait exactement les mêmes phénomènes. Al-Biruni le dit spécifiquement: ce serait en fait plus simple si nous, nous tournions plutôt que de faire tourner tout le reste.

## Qui tourne autour de qui?

**Est-ce l'Univers qui tourne autour de la Terre ou la Terre qui tourne sur elle-même?!**

Voilà! Et dans les deux cas, on observe exactement la même affaire! C'est-à-dire qu'on ne peut pas déterminer qui tourne autour de qui aussi simplement qu'on le pense.

Assez étonnamment, certains penseurs et philosophes de la Chrétienté, comme Guillaume d'Ockham, qui a vécu au 14<sup>e</sup> siècle, et Jean Buridan, un philosophe du 13<sup>e</sup> siècle, ont énoncé la même chose: les phénomènes qu'on observe sont identiques, que ce soit nous qui tournions ou qu'on fasse tourner tout le reste. Cependant, la grande objection à cette idée était qu'on n'avait aucun moyen de démontrer lequel était en mouvement.

Ce n'est que James Bradley, au 18<sup>e</sup> siècle qui, au moyen d'un télescope, a réussi à démontrer que, du fait que les positions apparentes des étoiles sont légèrement différentes d'une saison à l'autre, c'est par conséquent la Terre qui tourne sur elle-même plutôt que tout l'Univers! Ce fut la première preuve que la Terre était en mouvement. Mais personne avant lui ne pouvait le prouver. Vous-mêmes, je vous mets au défi de me démontrer que c'est la Terre qui tourne sur elle-même et qu'elle tourne autour du Soleil. Vous en serez incapable (sans instrument)!

## Le rasoir d'Ockham

Voilà un exemple intéressant qui oppose croyance et raison.

Devant l'impossibilité de déterminer si c'est la Terre qui tourne sur elle-même ou tout l'Univers autour de nous, le simple bon sens voudrait que ce devrait être la Terre qui soit en mouvement.

Cependant, puisque nous croyons depuis des millénaires que nous sommes au centre de l'Univers (et des préoccupations divines), on peut difficilement accepter une telle idée.

Pourtant, dès le 14<sup>e</sup> siècle, Guillaume d'Ockham avait proposé une logique toute simple: lorsque nous sommes confrontés à deux explications ou à deux théories qui expliquent aussi bien un phénomène quelconque, il propose de choisir la plus simple des deux.

Ainsi, pour expliquer le déplacement de tous les corps célestes, il est certainement plus simple de supposer que c'est la Terre qui tourne sur elle-même... plutôt que tout l'Univers.

Cette simple logique, qui peut s'appliquer dans maints aspects de nos vies, s'appelle le *rasoir d'Ockham*.

Le problème que nous avons, lorsque nous observons le ciel, c'est qu'il est évident que tout tourne autour de nous. C'est l'évidence même! Je prends d'ailleurs souvent cet exemple pour démontrer que ce n'est pas parce que nous, nous voyons quelque chose, que c'est bien là la réalité. Nous avons beau savoir que c'est nous qui tournons, ce n'est pourtant pas ce que nous voyons.

## Quand Copernic s'en prend à Ptolémée!

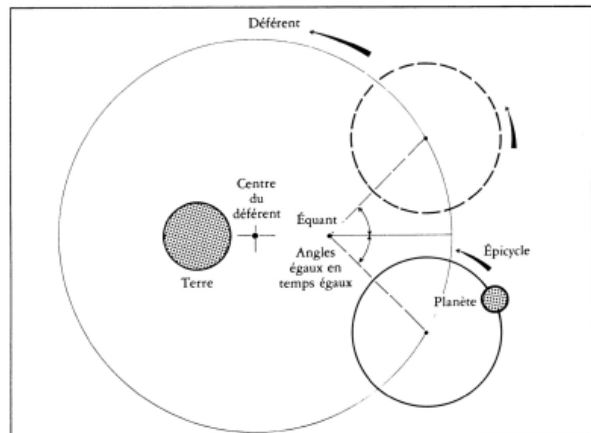
Mais revenons à Copernic: que nous a-t-il apporté?

Copernic est celui qui, au 16<sup>e</sup> siècle, confronte l'hypothèse qui était incontestable: «Il y a quelque chose dans ma logique que je n'accepte pas, se dit-il. Je puis tout expliquer et même encore mieux que ce que faisait Ptolémée avec son système d'épicycles, de déférents et d'équants.»

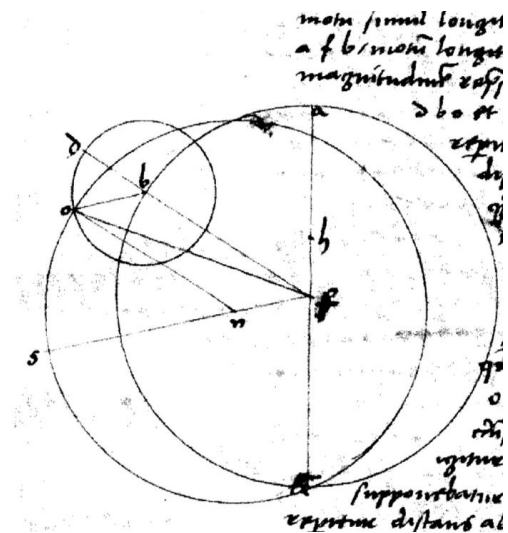
Rappelons-nous que, selon Ptolémée, tout tourne autour de la Terre en décrivant des cercles *parfaits*. Mais pour rendre compte de certains mouvements «erratiques» des planètes, il a dû ajouter l'idée que celles-ci se déplacent également selon de petits cercles (épicycles) tout en circulant en même temps autour de la Terre.

Mais la conception de Copernic reste fidèle à l'Antiquité puisqu'il n'utilise que des cercles parfaits. Il va par contre suivre une proposition qu'avait faite Regiomontanus. Cet astronome allemand du 15<sup>e</sup> siècle avait démontré qu'on pouvait

avoir un système différent de celui de Ptolémée en mettant les planètes sur des cercles mais où la Terre n'occupe pas le centre de ce système. Il a donc *excentré* les planètes.



La conception de Ptolémée (ci-dessus) comparée à celle de Johan Mueller (alias Regiomontanus), ci-dessous.



Copernic pousse cette idée un peu plus loin en imaginant que tout tourne autour du Soleil, selon des cercles où la Terre n'est pas au centre. (Elle demeure néanmoins le centre de l'Univers.)

C'est une proposition audacieuse puisqu'il s'agit d'un modèle de l'Univers différent de celui de Ptolémée [alors un dogme imposé par l'Église catholique].

Mais Copernic utilise également des épicycles, des déférents et des équants.

Voilà qui pose la question: qu'a-t-on gagné ... outre la précision des prévisions de la position des planètes qui est meilleure au temps de Copernic qu'à celui de Ptolémée?

Autrement dit, le système de Copernic est plus précis, il décrit mieux le déplacement des planètes mais c'est un système encore complexe (avec épicycles, déférents et équants).

De fait, les astronomes ne parviennent toujours pas à expliquer facilement les mouvements de «recul temporaire» observables au firmament par Mars, Jupiter et Saturne.

Surtout, ils sont mystifiés par le fait qu'ils observent que la vitesse de déplacement des planètes varie tout au long de leur course annuelle. Ils ne parviennent vraiment pas à expliquer ces variations de vitesse cycliques.

C'est alors qu'on arrive à un géant: Johannes Kepler!

## Kepler trouve enfin la solution

Dans un article rédigé par Jean-René et publié dans Le Devoir du 11 décembre 2021, il explique:

Éclipsé par Nicolas Copernic et Galileo Galilei, Kepler est parfois perçu comme un acteur secondaire dont le travail servit à Isaac Newton dans l'élaboration de la théorie de la gravitation universelle. Or, Kepler mérite d'être au panthéon des géants qui ont transformé

notre vision de l'univers et établi les fondements de la science contemporaine.

Qu'a donc fait Kepler? Il s'est dit: «Moi, j'arrête d'imaginer l'Univers à partir de modèles.» Il s'associe plutôt à Tycho Brahe, avec qui il sera en relation durant seulement une année et demie.

De poursuivre Jean-René dans *Le Devoir*:

Tycho Brahe, mathématicien impérial... est très impressionné par les talents du jeune [Kepler] et l'invite à venir chez lui à Prague.

Kepler fut témoin des dernières heures de Tycho. Ce dernier décéda soudainement en 1601 à 54 ans...

Peu avant sa mort, Brahe avait confié à Kepler la tâche de calculer l'orbite de Mars à partir des observations qu'il avait faites et qu'il avait jalousement gardées pour lui jusqu'alors.

Kepler crut que quelques semaines lui seraient suffisantes [mais] il lui fallut plus de six ans de labeur pour aboutir à ses deux premières lois du mouvement planétaire, et presque 10 ans pour établir la troisième.



Johannes Kepler (1571-1630) et Tycho Brahe (1546-1601), deux géants quelque peu «oubliés».

Juste préciser que Tycho Brahe avait accumulé énormément d'observations extrêmement précises; il possédait donc une importante banque de données dont s'est servi Kepler.

Disons aussi que la résolution de l'œil est d'environ une minute d'arc; la Lune mesurant environ 30 minutes d'arc, l'œil pouvant voir des détails d'un trentième de cela.

En mathématiques, on divise un cercle en 360 degrés et chaque degré en 60 minutes d'arc. Lorsqu'on regarde devant soi, on a une vision d'environ  $180^\circ$ , tandis que lorsqu'on fixe la Lune, celle-ci apparaît n'occuper que 30 minutes d'arc (donc  $\frac{1}{2}$  degré) de notre champ de vision.

Mais si vous cumulez plusieurs observations à 1 minute d'arc et que vous en faites la moyenne, vous obtiendrez alors une précision supérieure à une minute d'arc. C'est ce qu'a réussi à obtenir Tycho Brahe.

Il avait donc accumulé quantité de positions des planètes très précises, et en particulier celle de Mars.

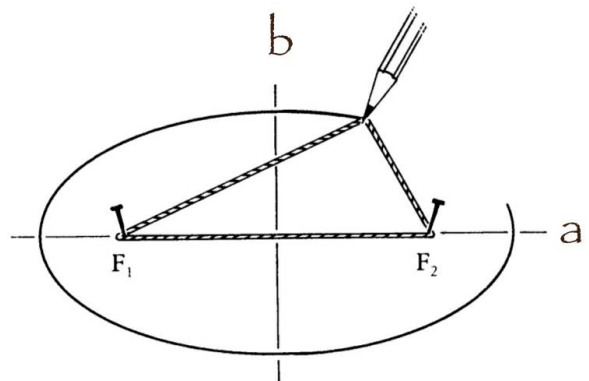
Ainsi, à partir des données de Tycho Brahe, Kepler se dit qu'il allait trouver la solution pour expliquer ce qu'on observe. «Je vais analyser ces données afin de reconstruire l'orbite de Mars», s'est-il dit.

Ce fut une aventure extraordinaire. Pour y parvenir, il s'est imaginé être sur Mars pour voir la position des étoiles vues depuis cette planète. Le récit de cette recherche est extraordinairement bien reconstitué dans le livre d'Arthur Koestler *Les somnambules (The Sleepwalkers)* – même si l'auteur est un peu biaisé, un peu

enthousiaste. Mais si vous voulez parcourir l'histoire que j'évoque, c'est une belle façon de le faire.

Kepler excelle en mathématiques, il possède très bien les notions de géométrie. Il va donc essayer différentes formes géométriques, en commençant par des cercles parfaits. Il voit alors qu'il peut reconstituer quelque chose qui a du sens si la planète circule que sur une portion d'un cercle...

«Je vais ensuite essayer une forme ovale, un cercle en forme d'œuf...» Puis il en vient à considérer l'ellipse, une forme géométrique dont le cercle n'est qu'un cas particulier où la planète occupe un centre qu'on appelle le «foyer». Mais une ellipse possède deux centres, deux foyers.



Une ellipse a deux «centres», deux foyers.

Dans son livre *La Terre dans l'espace*, Jean-René explique:

Il fallut cependant à Kepler des années de travail acharné pour trouver une solution étonnamment simple aux mouvements planétaires... [Car c'est] avec une conviction presque fanatique que Kepler consacra la majeure partie

de sa vie à donner une explication mathématique d'ensemble au mouvement des planètes.

Kepler avait en effet découvert que tous les plans des orbites planétaires passaient par le Soleil, et non par le centre de l'orbite terrestre, comme le pensait Copernic.

Il lui fallait à tout prix franchir de plus une étape conceptuelle majeure: il devait rejeter impitoyablement le mouvement circulaire uniforme et s'affranchir de préjugés millénaires: les mouvements des astres divins et parfaits n'étaient pas... circulaires ni uniformes!

Après un essai infructueux d'orbites ayant la forme d'un œuf, Kepler arriva, après plusieurs années d'un travail de forcené, à décrire l'orbite de Mars à l'aide d'une figure géométrique étonnamment simple: l'ellipse.

En 1609, il publiait dans *Astronomica Nova ses Commentaires sur le mouvement de Mars*. Il y énonçait ses deux premières lois du mouvement planétaire:

- Les planètes se déplacent autour du Soleil sur des orbites ayant la forme d'ellipses; le Soleil occupe l'un des foyers.
- Le rayon vecteur, reliant une planète au Soleil, balaie des aires égales dans des temps égaux.

L'ellipse n'est ni plus ni moins qu'un cercle aplati....

Nous savons donc depuis Kepler que les planètes voyagent sur des orbites elliptiques à des vitesses variables.

Ce qu'il a trouvé, c'est que tous les mouvements – ceux de la Terre, de Vénus, de Mercure autour du Soleil, et de la Lune autour de la Terre – pouvaient être reconstruits à partir d'ellipses. C'est là la

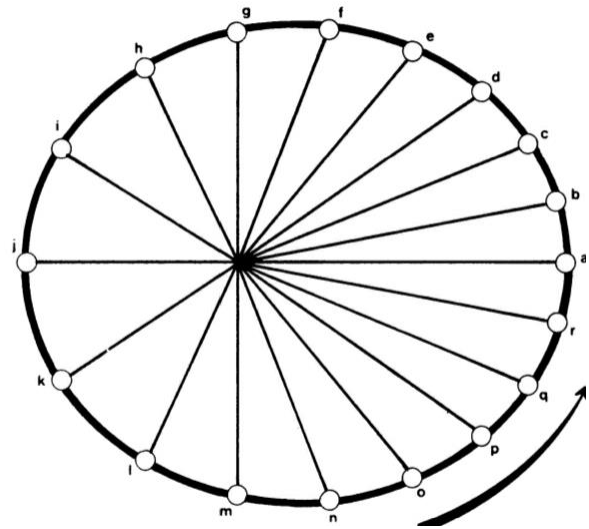
découverte extraordinaire que Kepler a mis des années à faire.

Désormais, plus question d'épicycle, de déférents et d'équants – d'une machinerie infernale conçue par Ptolémée (mais qui marchait néanmoins) pour prédire les positions des astres des années d'avance.

Kepler nous amène donc une véritable révolution qu'il va synthétiser en trois lois:

Premièrement, les planètes ont des trajectoires qui correspondent à des ellipses autour d'un foyer qui correspond à la position du Soleil.

Deuxièmement, en circulant selon une ellipse, vous allez à un moment donné vous trouvez plus proche du foyer, vous évoluez alors plus rapidement que lorsque vous vous trouvez plus loin du foyer.



Dans ce croquis, Kepler illustre le fait que lorsque vous vous trouvez plus proche du foyer de l'ellipse (à gauche), vous circulez plus rapidement que lorsque vous vous en trouvez éloignés (à droite). D'où le fait, repéré depuis longtemps par les astronomes, que la vitesse des planètes varie tout au long de leurs parcours autour du Soleil.

Puis, il va plus loin avec sa troisième loi qui établit une relation entre la distance moyenne du foyer et le temps que met la planète à faire le tour complet de son ellipse. Cette relation est que le cube de la

distance moyenne est proportionnel à la durée de la révolution au carré.

C'est la fameuse troisième loi qui a été du bonbon pour Newton puisqu'elle lui a permis d'énoncer sa loi sur la gravitation universelle.

Autant la cassure avec l'Antiquité – ou plutôt une sorte de bond –, aurait été faite par Copernic, autant Kepler nous apporte ce qu'on appelle à présent la mécanique céleste.

Incidentement, le 27 décembre 2021 marquait le 450<sup>e</sup> anniversaire de la nais-

sance de Kepler. Généralement, lorsqu'il y a un 450<sup>e</sup>, on ne le souligne guère. Mais j'ai été un des seuls auteurs à le souligner! Celui que j'appelle le géant oublié, né en 1571 et décédé en 1630. [Pour l'occasion, *Le Devoir* a publié le texte déjà cité.]

**Nous voyons donc que la science se construit à partir des connaissances accumulées, chacune reposant sur les épaules de ses prédécesseurs, parfois même sur les épaules de géants.**

### 1<sup>ère</sup> Loi de Kepler

*Les planètes tournent autour du Soleil en suivant des orbites en forme d'ellipse dont le Soleil occupe un des foyers.*

F et F' : les deux foyers de l'ellipse. Le Soleil est en F.

C : Centre géométrique de l'ellipse

P : Périhélie

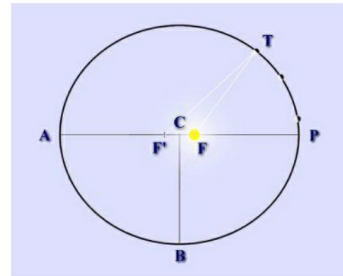
A : Aphélie

T : Terre *comme exemple*

Deux grandeurs définissent la forme de l'ellipse :

son demi-grand axe : AC ou CP = **a**

et son excentricité : **e** = CF / a



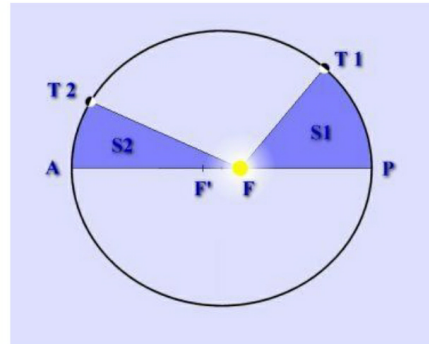
### 2<sup>ème</sup> loi de Kepler

*Les aires balayées par le rayon vecteur d'une planète sont proportionnelles au temps.*

Le rayon vecteur est le segment de droite qui relie la planète au Soleil, sa longueur est variable.

Les deux triangles curvilignes F-P-T1 et F-T2-A ont la même surface, soit S1 = S2.

**La 2<sup>ème</sup> loi de Kepler** implique que ces **surfaces**, étant **égales** entre elles, ont été balayées en des **temps égaux**. La planète a donc mis le même temps pour aller de P à T1 que pour aller de T2 à A.



### 3<sup>ème</sup> loi de Kepler

*Pour toutes les orbites planétaires (satellites) le rapport du carré des périodes de révolution (T en s) au cube du demi-grand-axe de l'orbite (a en m) est constant.*

$$\boxed{\frac{T^2}{a^3} = K} \quad \text{avec} \quad K = \frac{4\pi^2}{GM}$$

K étant une constante dépendant de la constante de gravitation universelle  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  et de la masse de l'astre central M autour duquel tournent les planètes ou satellites.

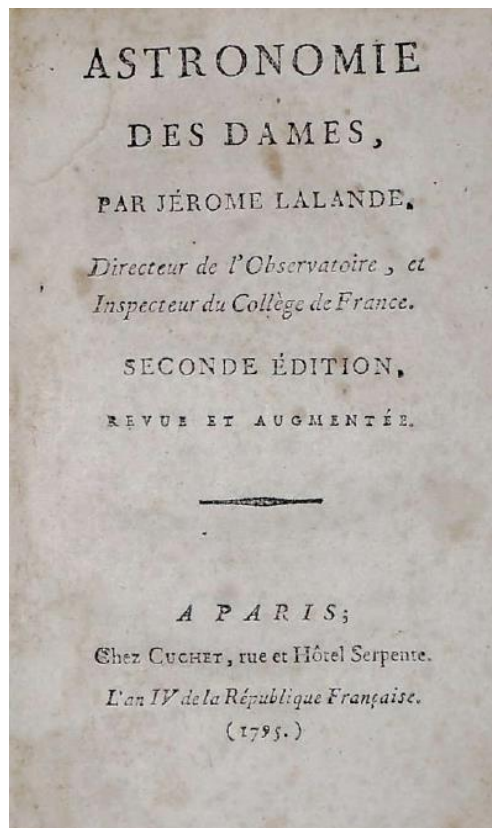
## 4 – Place aux femmes

Un autre aspect abordé dans votre livre et qui est très intéressant, c'est le rôle des femmes. Comme nous le constatons un peu partout, l'histoire étant rédigée par des hommes, on parle d'eux en négligeant souvent le rôle des femmes. Je pense que ces dernières décennies, on fait de plus en plus ressortir la contribution des femmes puisqu'il y en a eu beaucoup qui ont joué des rôles importants en astronomie, comme vous le relatez dans votre livre. Faisons un tour d'horizon de certaines d'entre-elles, car il y en a plusieurs...

Voilà qui me permet d'annoncer mon prochain livre! Celui-ci s'intitulera *L'Astronomie des Dames*, mais ce n'est pas moi qui l'ai rédigé. Il a été écrit par Jérôme Lalande en 1797. Je vais faire un peu comme j'ai fait avec mon livre Georges Lemaître, La naissance du big bang. Je vais republier ce livre tout en le commentant. Entre autres, je vais présenter des portraits de femmes astronomes en détail, en allant bien plus loin de ce que j'ai fait dans *La Terre dans l'espace*.

Il est évident que s'il y a en astronomie «des géants», il y a aussi «des géantes». Et encore plus chez les femmes que chez les hommes, il y a des oubliées. Car, même si la science était faite davantage par des individus, ou quelques individus organisés dans le cadre d'institutions, beaucoup de femmes ont travaillé en astronomie [au côté des hommes].

Et oui, les femmes ont occupé de l'espace mais elles n'ont «émergé», je dirais,



*L'astronomie des Dames*, de Jérôme Lalande, publié en 1797.

qu'aux environs du 18<sup>e</sup> siècle. C'est ce que rapporte Jérôme Lalande dans son livre, un petit traité d'astronomie remarquable. Il s'agit en effet d'un livre précurseur qui demeure d'une véracité et d'une authenticité extraordinaire. Dans ce traité, Lalande se limite à décrire l'astronomie de la fin du 18<sup>e</sup> siècle telle qu'on la connaissait. Il traite surtout des planètes, de la mécanique, de Newton, de Kepler... tout y est! La seule chose que j'ai eue à «changer», ce fut de convertir les unités de mesure – les toises, les pouces... – en kilomètres et en mètres. Mais les valeurs telles que rapportées dans *Astronomie des Dames* sont bonnes.

L'une des femmes dont il parle et qui a été l'une de ses amantes et grande collaboratrice, c'est Louise du Pierry. Le petit traité *Astronomie des Dames* servait à l'enseignement de l'astronomie, un cours que donnait justement Mme du Pierry à la Sorbonne.

Est-ce que le rôle des femmes était de faire les calculs, de faire le gros travail ardu pendant que les hommes récoltaient les lauriers?

C'est un peu méchant, Claude! Mais il y a un peu de cela. D'ailleurs, c'est intéressant parce qu'on a appelé, jusqu'au début du 20<sup>e</sup> siècle, les femmes qui se consacraient à faire les calculs des *calculatrices*, sinon même un terme que j'adore: on les appelait des *logarithmières*, puisqu'elles savaient manier les logarithmes.

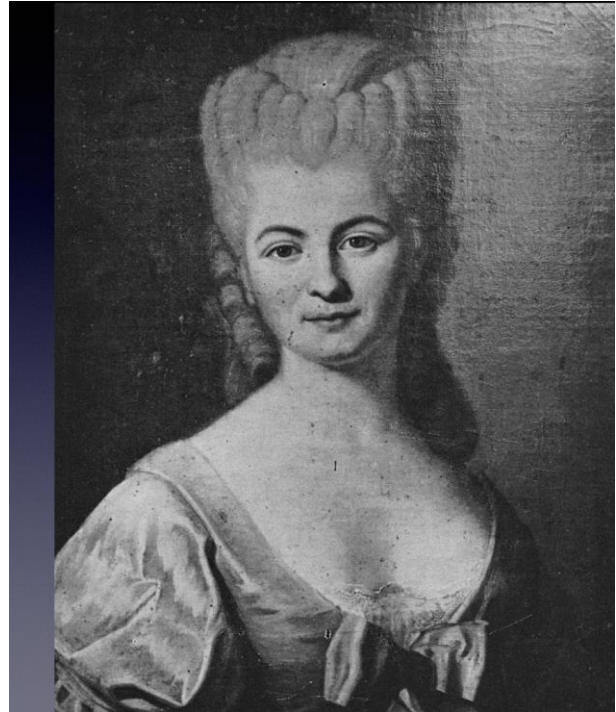
L'époque mise de l'avant dans *L'Astronomie des Dames* se situe juste avant le siècle des Lumières qu'on associe à Voltaire, Diderot, D'Alembert, etc. Il s'agit d'une période où les femmes ont été intégrées comme logarithmières et calculatrices.

On pourrait dire que ces tâches équivalaient aujourd'hui à ce qu'on appelle des attachés de recherche ou des assistants de recherche. De nos jours, nos assistants et assistantes de recherche se retrouvent souvent co-auteurs de nos publications.

Lalande a été l'un des premiers à mettre de l'avant et à reconnaître le travail des calculatrices comme du Pierry et, surtout, Nicole-Reine Lepaute. Celle-ci a d'ailleurs joué un rôle central dans le calcul du retour de la fameuse comète de Halley en 1759. Ce qu'elle a fait, c'est vraiment quelque chose de remarquable.

### **La comète de Halley «en retard» d'une année**

À l'époque, on savait que les comètes, même si on ignorait leur nature, étaient de masse très faible. On savait donc que, lorsqu'elles passent dans les parages des grosses planètes Jupiter et Saturne, que



Nicole-Reine Lepaute (1746-1830), l'une des grandes et patientes «calculatrices».

leur orbite allait être altérée. Donc, pour prédire le moment où la comète de Halley allait revenir dans nos parages, il fallait tenir compte de l'attraction que ces planètes allaient exercer sur elle.

Nicole-Reine Lepaute a donc fait les calculs avec [Alexis Claude Clairaut](#) et Jérôme Lalande afin de déterminer avec plus de précision la date du retour (au printemps 1759). Or, leurs calculs donnaient un temps de retour d'un an plus tard que si on ne tenait pas compte de l'influence de Jupiter et de Saturne. Il s'agissait de calculs très difficiles qu'a réalisés Nicole-Reine Lepaute.

C'est là un bel exemple de femme qui a travaillé comme logarithmière en plus d'avoir été rédactrice en chef de ce qu'on appelait *Connaissance du temps*, c'est-à-dire le grand almanach qui donnait les positions des astres et dont se servaient les marins et les astronomes.

Dans son livre, Jean-René ajoute:

Parmi les grands noms [de l'astronomie du 18<sup>e</sup> siècle], on trouve Alexis Claude Clairaut (1713-1765), entré à l'Académie des sciences à 18 ans, qui élaborait une théorie de la forme de la Terre et, avec Jérôme Lalande et Nicole-Reine Lepeaute, calcula l'orbite de la comète Halley en tenant compte des perturbations produites par les attractions de Jupiter et de Saturne. Émilie du Châtelet (1706-1749) fit une traduction en français de la 3<sup>e</sup> édition (1731) des *Principes* de Newton. ...

Les femmes ont donc joué des rôles importants mais ce ne sera qu'au 20<sup>e</sup> siècle qu'elles deviendront, je dirais, «maîtres» de leurs propres recherches. Sauf qu'au siècle des Lumières, Nicole-Reine Lepaute et Louise du Pierry étaient auteures de leurs propres publications. Il y a donc émergence des femmes en astronomie, mais c'était problématique, car ce n'était pas très accepté par les hommes, et non plus par les femmes. Il y avait une certaine jalousie... comme j'en parlerai dans mon prochain livre.

### **La formidable découverte d'Henrietta Leavitt**

**J'aimerais en terminant parler de l'une des femmes qui a joué un rôle considérable en astronomie, que l'on connaît puisqu'elle n'a pas été ignorée de son vivant, et à qui vous dédiez votre livre: Henrietta Leavitt. Quel rôle important a-t-elle joué en astronomie?**

C'est intéressant puisqu'Henrietta Leavitt illustre bien l'arrivée des femmes sur la scène, et pas juste dans les coulisses.

Elle sera l'auteure de ses publications, même sous un directeur comme Edward Pickering du Harvard College Observatory. Pickering sera le second auteur.



Henrietta Leavitt (1868-1921), qui a trouvé le moyen de mesurer les distances dans l'Univers.

**C'était il y a un siècle ou un peu plus.**

Exactement, en 1907 et 1909...

Ce qui arrive à la fin de 19<sup>e</sup> siècle, c'est la photographie. Et avec elle arrive l'abondance des données, la photographie astronomique générant massivement des données. On s'est donc mis à photographier en abondance le ciel, puisque la photo nous permet de voir des objets que l'œil ne peut percevoir.

On crée donc au Harvard College Observatory un groupe de femmes calculatrices, car on se disait alors, et je cite: «Ces femmes sont plus fiables que les hommes». (Admettons aussi qu'on les payait moins.)

C'était donc une main-d'œuvre extraordinaire et c'est de la sorte qu'au début du 20<sup>e</sup> siècle, 47 femmes ont travaillé au Harvard College comme calculatrices, dont Henrietta Swan Leavitt.

Mme Leavitt s'est mise à l'analyse des plaques photographiques afin d'évaluer la brillance des étoiles, et en particulier ce qu'on appelle les étoiles variables. Il y a en effet plusieurs types d'étoiles dont l'éclat varie, généralement par pulsations. Il y a une catégorie d'étoiles toute particulière et qu'on appelle les céphéides...

Il s'agit d'étoiles géantes, quatre à quinze fois plus massives que le Soleil et de cent à trente mille fois plus lumineuses. Or, l'éclat de ces étoiles varie selon une période bien définie, comprise entre 1 et 135 jours.

En étudiant attentivement nos deux petites galaxies voisines, les Nuages de Magellan, Henrietta Leavitt a reconstitué ce qu'on appelle la *courbe de lumière*, c'est-à-dire la variation de l'intensité des étoiles en fonction du temps. (Ce que moi aussi j'ai fait comme étudiant.)

Non seulement a-t-elle repéré des étoiles dont la brillance varie, mais elle a mesuré cette variation en fonction du temps. Or, elle a découvert chez les céphéides l'existence d'une relation entre la période et l'intensité de leur luminosité: plus la période était longue, plus elle correspondait à une forte brillance de l'étoile. Cette relation est particulièrement intéressante dans le cas des céphéides puisque ce sont des étoiles extrêmement brillantes qu'on peut donc voir à très grande distance.

C'est ainsi que les céphéides sont devenues le moyen pour les astronomes de calculer les distances dans l'Univers.

En effet, les travaux d'Henrietta Leavitt ont permis d'établir que plus une céphéide est lumineuse, plus sa période de variation d'éclat est longue. C'est dire que du moment qu'on connaît la période de variation de luminosité d'une céphéide, on peut déterminer l'éclat propre à cette étoile, indépendamment de la distance à laquelle on l'observe.

Bien sûr, plus une étoile est loin de nous, moins elle nous paraît brillante. C'est ainsi qu'en connaissant sa luminosité propre, on peut en déduire la distance à laquelle cette étoile se trouve.

Cette relation qu'a découverte Henrietta Leavitt a ensuite servi à Edwin Hubble en 1923-1924 pour déterminer la distance nous séparant de la grande «nébuleuse» d'Andromède.

En fait, ce que cherchait avant tout Hubble, c'était des novæ (des étoiles qui explosent). Mais tout d'un coup, il a repéré une céphéide [dans Andromède]. Et c'est en mesurant la luminosité de ces étoiles qu'il a déduit une distance de 600 000 années-lumière. (On sait à présent qu'Andromède se trouve plutôt à 2,5 millions d'années-lumière.)



Longtemps perçue comme une simple «tache» dans le ciel, la nébuleuse Andromède est en fait une galaxie... deux fois plus vastes que la nôtre.

Mme Leavitt nous a donc donné la règle pour mesurer l'Univers! Une règle si importante que, dans les années 1990, le télescope spatial Hubble a mené une recherche pour la grande équipe de l'astronome canadienne Wendy Friedman, de l'Université de Chicago, en utilisant ces balises découvertes par Henrietta Swan Leavitt au début du 20<sup>e</sup> siècle.

C'est une histoire intéressante parce que Mme Leavitt est décédée en 1921, donc il y a cent ans, et on en a parlé. Elle le mérite d'ailleurs!

Vers 1925, quelqu'un a approché l'Académie des sciences de Suède pour proposer la candidature de Mme Leavitt au prix Nobel. Mais il a alors appris que celle-ci était décédée du cancer depuis quatre ans. (Or, il faut être vivant pour recevoir un prix Nobel.) Mais voilà qui démontre l'importance qu'on accordait déjà à son travail.

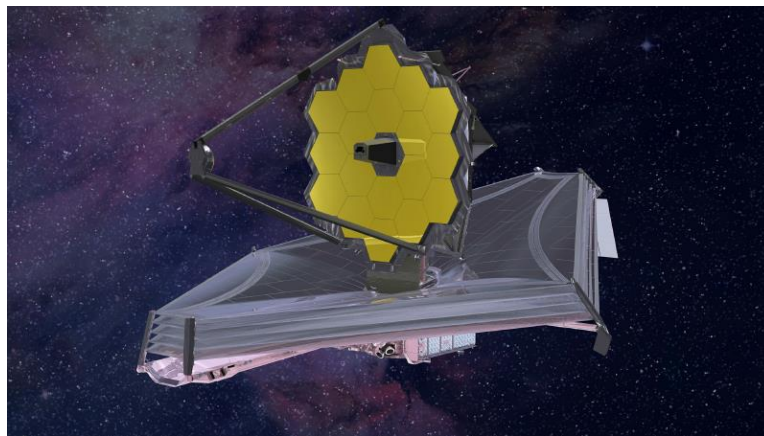
En effet, un bond spectaculaire venait d'être fait par Edwin Hubble: la détermination de la distance de ce qu'on appelait à l'époque des nébuleuses mais qui sont en réalité des galaxies fort distantes de nous. Hubble et ses collègues ont observé des céphéides dans des galaxies de plus en plus lointaines. Et ces observations ont servi en 1927 à Georges Lemaître, dont on

a raconté l'histoire [dans le [balado 58](#)] pour découvrir la loi d'expansion de l'Univers.

**C'est intéressant. Il y a presque une question de malchance: Henrietta Leavitt aurait dû recevoir un prix Nobel mais elle était décédée, alors qu'Edwin Hubble rêvait d'en obtenir un, mais n'a reçu finalement que l'ultime hommage qui est celui d'être associé au plus célèbre de tous les télescopes. Tout le monde connaît son nom à cause du télescope Hubble. Ces astronomes sont finalement reconnus, même s'ils n'ont pas obtenu de prix Nobel.**

**Nous venons de faire un beau tour d'horizon, me semble-t-il. J'espère qu'on retiendra que la science est un édifice qui se construit à l'aide d'échafaudages de théories. Mais une fois que la connaissance est acquise, c'est alors un édifice qu'on peut parcourir par l'entremise d'escaliers et d'ascenseurs. Et souvenons-nous que la science est toujours en construction, ce qui crée parfois une certaine confusion.**

Et pour poursuivre l'idée, j'aimerais que dans 500 ans, être l'auteur de *La Terre dans l'espace* et faire ainsi un retour sur 3000 ans d'histoire!



Et maintenant que le télescope Webb est en place, notre quête se poursuivra avec un autre puissant moyen.

# Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

# Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*

<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 26</p> <p>ALEXEI LEONOV</p>  <p>Le cosmonaute aux sept vies</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 27</p> <p>PARLONS DE... CAPSULES SPATIALES</p>  <p>Pourquoi sommes-nous revenus à l'ère des capsules?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 28</p> <p>TRING, LA FACILITÉ DÉCOUVERTE DE LA VIE SUR MARS</p>  <p>Qu'est-ce qu'il y a sur Mars et pourquoi est-ce si étrange?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 29</p> <p>LA GRANDE PEUR DE 1910</p>  <p>Quand le passé est garant de l'avenir</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 30</p> <p>VIOLANS D'EXPLORATION: LES ASTÉROÏDES</p>  <p>Et petits astères, qu'il nous respectent tout le temps!</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 31</p> <p>DES IDÉES PAS COMME LES AUTRES...</p>  <p>Qu'est-ce que ça veut dire, être un pionnier? Et se réaliser, pas toujours!</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 32</p> <p>PRELUDES À APOLLO 11</p>  <p>La grande Fête de la course à la Lune</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 33</p> <p>APOLLO 11 DANS LES CONGRÈS DE L'HISTOIRE</p>  <p>Et qu'il n'y ait jamais d'après...</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 34</p> <p>NOTRE UNIVERS: BEAUX, MYSTÉRIEUX... SPOUSALARIAT!</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même au-delà!</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 35</p> <p>NOTRE UNIVERS: BEAUX, MYSTÉRIEUX... SPOUSALARIAT!</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même au-delà!</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 36</p> <p>LES SURPRISES DE L'ÉTÉ 2019</p>  <p>Des idées pour les astronautes de l'espace</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 37</p> <p>POURQUOI MARS...</p>  <p>... nous obsède-t-elle autant?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 38</p> <p>OU EN SERONS-NOUS EN 2040?</p>  <p>Comment vivre à la frontière des sciences au Québec</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 39</p> <p>L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE</p>  <p>Avec un grand télescope spatialisé</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 40</p> <p>LA LUNE. CETTE INCONNUE</p>  <p>Et c'est tout, c'est à son sujet... Mais non.</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 41</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>1<sup>re</sup> partie: le Grand Tour</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 42</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>2<sup>e</sup> partie: destination Jupiter et Saturne</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 43</p> <p>LA VERTÈBRE DE FERRE: HÉRÈSIS DE L'UNIVERS</p>  <p>Le fil de l'univers est-il une illusion à déconstruire?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 44</p> <p>ET SI ÇA C'ÉTAIT PASÉ AUTREMENT...</p>  <p>Pourquoi, la course à l'espace spatiale prend-elle fin?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 45</p> <p>ETÉ 2020: À L'ÉCHART DE LA PLANÈTE MARS</p>  <p>À la recherche d'eau et de vie</p>
<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 46</p> <p>DE NOUVELLES PLANÈTES INCROYABLES</p>  <p>Une diversité à n'en plus finir...</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 47</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>3<sup>e</sup> partie: aux confins du système solaire</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 48</p> <p>LES GALAXIES: AUX FRONTIÈRES DE LA COSMOLOGIE</p>  <p>Comment se fait-il que nous existions?</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 49</p> <p>LE SYSTÈME SOLAIRE N'EST PLUS CE QU'IL ÉTAIT</p>  <p>2<sup>ème</sup> partie: Notre univers spatialisé...</p>	<p><b>VOYAGE DANS L'ESPACE</b> Episode 50</p> <p>LE MÉTIER D'ASTRONAUTE</p>  <p>1<sup>ère</sup> partie: au Québec à l'échelle internationale Claude Lafleur Chapitre 3: Les multiples chemins vers l'espace</p>

Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

## Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.