

POINT DE VUE

Des épicycles à la matière noire

G. Paturel, Observatoire de Lyon

Nous partirons des conceptions imaginées par les premiers astronomes pour terminer par celles d'aujourd'hui. Nous trouverons dans ce parallèle quelques similitudes, propres à stimuler l'imagination des hommes, chercheurs de métier ou simples curieux de la chose scientifique.

Il est remarquable que plusieurs siècles avant le début de notre ère, des savants aient pu bâtir une vision de notre univers. Certes, les limites de l'univers de cette époque n'étaient pas les mêmes qu'aujourd'hui. Pour simplifier, il y avait la Terre, la Lune, le Soleil, les planètes, sortes d'astres errants, et les étoiles. Nous verrons que l'univers connu aujourd'hui est bien plus grand et qu'il est riche d'une multitude d'astres divers.

Les astres furent utilisés d'abord pour établir des calendriers dont les plus anciens remontent à environ 1500 ans avant notre ère.

De fait, les Chinois, les Babyloniens, les Égyptiens avaient une bonne connaissance du ciel.

Naturellement, il fut reconnu très tôt que tous les astres tournent (ou semblent tourner) autour de nous en une journée. Il suffit d'observer le ciel pendant quelques heures pour se convaincre que le ciel tourne. Est-ce réellement le cas ? Nous découvrirons que la nature passe son temps à nous entraîner sur des fausses pistes. Le Soleil aussi semble suivre ce mouvement. La Lune elle-même obéit à cette rotation. Résumons les observations faites plusieurs siècles avant notre ère :

- 1) L'ensemble du ciel fait un tour en un temps que l'on appelle un jour. Ce temps est actuellement divisé en 24 heures régulières (ce qui n'a pas toujours été le cas)
- 2) La Lune se déplace par rapport aux étoiles en faisant un circuit complet autour de la Terre en une trentaine de jours.
- 3) Le Soleil se déplace également par rapport aux étoiles. Ceci se constate en observant les étoiles visibles au lever ou au coucher du Soleil, ce que les anciens appelaient les levers ou couchers héliaques. Ce sont des étoiles différentes tout au long de l'année. Le Soleil se déplace dans un plan, l'écliptique, et il parcourt un tour complet en 365 jours mais avec un mouvement plus ou moins rapide selon les saisons. On retrouve ainsi les trois unités fondamentales de temps : le jour, le mois et

l'année. Mais une autre constatation allait permettre de construire une première description du monde :

4) Les planètes ont un mouvement superposé à la rotation générale. Elles se déplacent par rapport aux étoiles, mais le mouvement est complexe (*planète* signifie "qui erre"). Cette constatation est facile à faire en observant plusieurs nuits de suite une planète brillante comme Jupiter, Vénus ou Mars.



Fig.1. Le mouvement erratique de la planète Mars.

Il se trouve que les mouvements des corps cités se font tous dans des plans assez peu différents les uns des autres. Un premier modèle simple consiste à imaginer la Terre au centre de l'Univers et l'ensemble des astres tournant autour, presque dans le même plan. Mais des problèmes se posaient : Comment expliquer le mouvement irrégulier du Soleil ? Comment expliquer le mouvement rétrograde de Mars et des autres planètes ?

Premier modèle du monde

Hipparque (150 av. JC) montra que la vitesse irrégulière du Soleil pouvait s'expliquer en décentrant la Terre ou en imaginant que le Soleil tournait sur un petit cercle (un cercle épicycle) dont le centre tournait autour de la Terre sur un grand cercle (cercle déférent). Les deux conceptions permettaient d'obtenir le même résultat en ajustant soit le décentrement de la Terre, soit les rayons de ces cercles épicycles et déférents ainsi que les vitesses de rotation sur ces cercles. Hipparque préférait considérer le décentrage de la Terre, plus simple (figure 2).

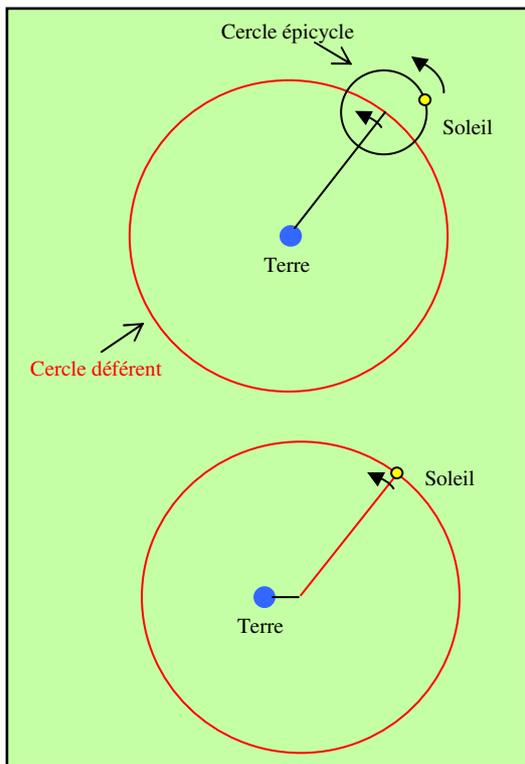


Fig.2. Hipparque propose deux méthodes pour expliquer les anomalies du mouvement du Soleil

On voit apparaître l'argument de "simplicité" comme méthode de sélection entre deux modèles équivalents vis-à-vis de l'expérience. Ce principe subsiste actuellement sous le nom de principe du rasoir d'Occam.

Mais Claude Ptolémée, dans les années 140, c'est-à-dire près de trois cents ans après Hipparque préféra appliquer la méthode des épicycles et des déférents. Dans une vision plus unitaire, il l'appliqua non seulement au Soleil mais à tous les astres du système solaire. Chaque planète avait son propre cercle épicycle et son propre cercle déférent. En ajustant les vitesses et les rayons il pouvait reproduire les déplacements des planètes, y compris leur mouvement rétrograde.

Cependant, ce modèle ne rendait pas compte de petites anomalies que la précision des observations permettait de déceler. Ptolémée parvint à représenter encore plus précisément les mouvements, y compris ceux du Soleil, en ajoutant le décentrement de la Terre. Il fallut encore ajouter un ingrédient au modèle : le mouvement de déplacement du centre de l'épicycle devait être régulier, non par rapport au centre du cercle déférent mais par rapport à un autre centre, le point équant (figure 3). Bref, le modèle est devenu très précis mais extrêmement complexe. La nature était-elle ainsi ?

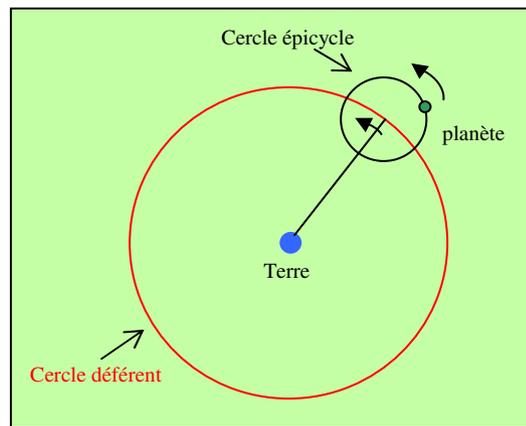


Fig.3. Explication du mouvement rétrograde des planètes par les cercles épicycles.

Le modèle de Ptolémée permettait de prédire avec une précision remarquable les positions des planètes et du Soleil. Les observations confirmaient les prédictions. La description de Ptolémée était donc bonne, mais d'une grande complexité mathématique. Ce modèle sera le modèle unique (ce qu'on appellerait aujourd'hui le "modèle standard") jusqu'à ce qu'un chanoine Polonais, inspiré par des écrits des grecs anciens, imagina un autre modèle.

Ce chanoine s'appelait Nicolas Copernic. Il naquit en Pologne en 1473. Son modèle était d'une grande simplicité. C'est le Soleil qui occupait le centre du monde et non plus la Terre. La Terre était alors une planète comme les autres et toutes tournaient autour du Soleil. Avec cette description Copernic pouvait prédire toutes les positions des planètes.

Le mouvement rétrograde d'une planète était le simple reflet de la trajectoire circulaire de la Terre.

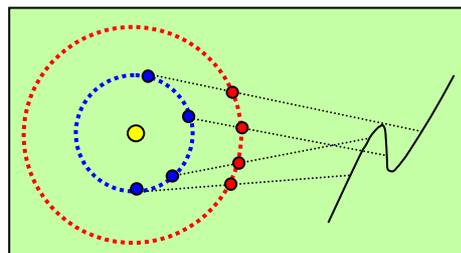


Fig.4. Mouvement rétrograde des planètes dans la vision de Nicolas Copernic.

Cependant, en considérant des trajectoires circulaires les prédictions étaient moins bonnes que celles de Ptolémée. Les détracteurs avaient beau jeu de dire que ce modèle était faux, puisque non conforme aux observations précises. Copernic proposait-il un modèle simpliste parce qu'il ne comprenait pas le modèle complexe de Ptolémée ? Peu nombreux, en effet, étaient les savants capables de maîtriser les calculs du modèle de Ptolémée.

On connaît la suite de l'histoire. Johannes Kepler (1571-1630), une centaine d'années après Copernic reprit le modèle héliocentrique. Grâce aux mesures les plus précises du moment, il montra que les trajectoires n'étaient pas des cercles mais des ellipses. Certes, chaque ellipse était définie par plusieurs paramètres (demi grand axe, excentricité, orientation du grand axe) pour donner encore un modèle complexe, mais un modèle unificateur, où chaque planète obéissait aux mêmes lois, les lois de Kepler. Isaac Newton (1643-1727) montra ensuite que la loi d'Attraction Universelle permettait de retrouver toutes ces lois de Kepler. Tout s'expliquait par la gravitation. Les quelques anomalies restantes furent levées quand Albert Einstein (1879-1955) montra que la force d'attraction universelle de Newton pouvait se représenter par une déformation de l'espace-temps, espace dans lequel le temps est intimement lié à l'espace via la vitesse de la lumière, posée comme vitesse universelle et comme limite de toutes les vitesses. Ainsi est-on arrivé au modèle actuel où la théorie d'Einstein (théorie de la Relativité Générale) explique tout... ou presque.

Modèle moderne du monde

La Relativité Générale n'a jamais été prise en défaut. Quelques anomalies subsistent dans certains phénomènes astronomiques. Mais des ingrédients subtils ont été proposés pour rendre ces anomalies compatibles avec la Relativité Générale. L'ensemble constitue le modèle standard que nous allons résumer.

Ce modèle standard s'applique à tout l'Univers, tel que les astronomes le connaissent aujourd'hui. Les étoiles ne sont plus sur une sphère mystérieuse ("la sphère des fixes") mais elles se rassemblent en immenses agglomérations, les galaxies. Notre Soleil accompagné de son cortège de planètes est une étoile particulière d'une agglomération particulière, la Voie Lactée, notre Galaxie. Les étoiles que nous voyons dans le ciel sont les étoiles de notre Voie Lactée. Avec les très gros télescopes on distingue les étoiles individuelles des galaxies les plus proches. L'univers est donc peuplé de milliards de galaxies, chacune d'elles contenant des milliards d'étoiles. Les galaxies elles-mêmes se rassemblent en énormes structures, amas ou filaments de galaxies.

La théorie de la Relativité Générale laisse prévoir que l'Univers de galaxies n'est pas statique, il se dilate, ce que l'observation confirme. Cette expansion laisse prévoir que l'Univers doit avoir un début. A cette époque ancienne (15 Milliards d'années environ), il était très dense et très chaud. Le rayonnement de cette période chaude est encore

visible, l'observation l'a également confirmé. Bref, "*tous les événements s'enchaînent dans le meilleur des mondes possibles*". Quelles sont donc les anomalies qui ont nécessité l'addition des ingrédients subtils dont nous parlions plus haut ?

L'astronome Fritz Zwicky (1898-1974) mesura la masse d'un amas de galaxies par deux méthodes différentes. Tout d'abord par la dynamique. L'agitation des galaxies au sein d'un amas conduit à la valeur de la masse de cet amas, via le théorème du viriel. La seconde méthode consiste simplement à compter les galaxies de l'amas, d'estimer la masse totale en assignant à chaque galaxie une masse donnée, selon sa luminosité. Certes, on ne s'attend pas à trouver un accord parfait mais c'est un désaccord énorme qui est constaté. L'amas a une masse dix fois supérieure à la masse visible. Il y aurait donc de la *masse cachée* ! Une mise en évidence récente de cette masse cachée (qu'on appelle aussi *masse manquante*) provient de la déflexion de la lumière qu'engendre la masse des amas de galaxies en déformant les images des galaxies lointaines situées derrière eux. Les galaxies apparaissent sous forme d'arcs.

Une autre preuve de cette matière cachée fut trouvée par l'étude de la rotation des galaxies. Les galaxies ne tournent pas selon les lois de Kepler, en particulier loin du centre, là où on s'attend à trouver une diminution de la vitesse de rotation, comme pour les planètes tournant autour du Soleil. Une présence de masse cachée permet d'expliquer cette anomalie. Il a donc fallu ajouter un ingrédient au modèle standard : une mystérieuse matière noire que les astronomes et physiciens essaient de détecter, sans succès pour l'instant. Le plus surprenant est que, selon les estimations, la matière noire nécessaire représenterait plus de 80% de la matière totale de notre univers.

Mais ce n'est pas tout. L'expansion de l'univers est décrite par une loi simple entre le décalage des longueurs d'onde et la distance, la loi dite de Hubble. Plus une galaxie est lointaine, plus les longueurs d'onde de sa lumière sont décalées vers les grandes longueurs d'onde. C'est ce qu'on appelle le *redshift*. En attribuant ce décalage à la vitesse d'expansion on trouve ainsi que les galaxies se fuient mutuellement selon une loi simple : la vitesse est proportionnelle à la distance. Les prédictions laissaient plutôt attendre un ralentissement de cette expansion. Mais, contre toute attente, l'observation a montré que l'expansion s'accélérait. D'où l'univers tire-t-il son énergie pour accélérer son mouvement de dilatation ? Là encore un nouvel ingrédient a dû être inventé pour expliquer l'observation. On l'a appelé *l'énergie noire*. On sait que matière et

énergie sont une seule et même chose. En cumulant la matière noire et énergie noire, la matière ordinaire ne représenterait que 5% de l'énergie totale de notre Univers.

Cette façon de réagir devant un fait expérimental inexplicable n'a rien d'anormal. Il est raisonnable de maintenir la meilleure théorie cosmologique du moment (à savoir la théorie de la Relativité Générale) en imaginant des ingrédients nouveaux pour expliquer les observations. Le jour où les ingrédients en question sont découverts, la théorie s'en trouve confortée. Mais, si ce n'est pas le cas, il faut se poser la question de savoir quelles sont les limites de la théorie actuelle. Il faut alors éventuellement englober la théorie ancienne dans une théorie plus large, qui redonnera la théorie ancienne dans son domaine d'application spécifique. Il n'y a pas de route déductive menant de la théorie ancienne à la théorie nouvelle. Il faut nécessairement introduire une hypothèse qui paraîtra sans doute comme absurde aux yeux des tenants du cadre ancien. Seule l'expérience et la simplicité logique valideront la nouvelle théorie. S'il n'y a pas de route pour trouver la nouvelle théorie, l'histoire des sciences peut nous aider à voir comment s'y prendre pour trouver l'hypothèse nouvelle. Comme le suggérait Poincaré, dès 1904, la généralisation de quelques grands principes devrait nous guider. Principe de conservation de l'énergie⁹, principe de relativité, principe d'équivalence, etc... autant de principes qui ont bien résisté au couperet de l'expérience. Ne faut-il pas en généraliser certains d'entre eux, comme l'a magnifiquement fait Albert Einstein avec le Principe de Relativité de Galilée.

Une autre approche peut nous guider dans cette recherche : l'analyse de résultats expérimentaux inexplicables que l'on préfère glisser sous le tapis, faute de trouver aisément un ingrédient à ajouter au modèle. On considère alors que ces résultats ne sont pas sûrs ou qu'ils sont fortuits. Par exemple, plusieurs sondes spatiales situées très loin dans le système solaire montrent une accélération anormale (dite "anomalie Pioneer"), très faible mais bien observée sur plus de sept ans. Cette accélération anormale n'est-elle pas aussi le reflet d'un problème réel de notre description.

Bien sûr, il y a parfois des coïncidences ou des erreurs de mesure qui peuvent conduire sur de fausses pistes, mais le devoir du chercheur n'est-il pas d'explorer toutes les voies, même les plus périlleuses ?

⁹ En Relativité Générale, il n'y a pas de conservation globale de l'énergie, il n'y a qu'une conservation locale.

La matière noire et l'énergie noire ne sont-elles pas les cercles épicycles et déferents du modèle standard cosmologique. Personnellement je suis enclin à le penser. L'Univers a clairement un problème avec l'énergie : la matière noire est un manque de masse donc d'énergie. L'énergie noire mystérieuse en est aussi le signe. De plus, l'inflation primordiale nécessaire pour expliquer, entre autre, l'uniformité du rayonnement fossile de l'univers, réclame, elle aussi, une source d'énergie (on l'a comparée à une énergie latente de changement d'état). Des considérations très générales faites par Emmy Noether (1882-1935) ont montré que la loi de conservation de l'énergie est liée à l'uniformité du temps. N'est-ce pas notre définition du temps à l'échelle cosmique qui pose problème ? Il semble possible de trouver plusieurs définitions du temps (voir S. Hawking : "*Une brève histoire du temps*"). Laquelle de ces définitions est la bonne ? Ne faut-il pas inventer un nouveau principe pour unifier ces définitions.

Certains chercheurs ont essayé des pistes audacieuses. Par exemple une variation séculaire de la vitesse de la lumière. Mais cette hypothèse remet en question l'utilisation d'un espace courbe de Riemann, donc de la forme géométrique de la Relativité Générale¹⁰. Une autre voie a été de considérer qu'il n'y avait pas de longueur absolue, ni d'intervalle de temps absolu. C'est de là qu'est né le principe d'invariance d'échelle. Toutes ces tentatives se sont heurtées à des arguments contraires qu'il faudrait analyser. Bref ! Il y a peut-être une idée neuve à trouver, mais laquelle ?

La route est encore longue avant d'avoir une théorie générale qui englobe toutes les expériences connues, d'autant que pour expliquer tout l'univers, depuis les objets microscopiques jusqu'aux objets astronomiques, nous avons aujourd'hui deux théories distinctes : la Mécanique Quantique et la Relativité Générale, qui ont des formalismes très différents, mais qui contiennent, toute deux, un formidable pouvoir explicatif.

Cette quête d'une théorie ultime n'aura sans doute pas de fin, car plus la science progresse, plus les expériences sont précises et plus il y a de choses nouvelles à expliquer. L'ennui ne menace pas les gens curieux !

¹⁰ Dans ses livres de vulgarisation Einstein affirme qu'en Relativité Générale on est obligé de considérer une vitesse de la lumière variable. Ce point de vue n'est pas admis aujourd'hui, ou, plus exactement, c'est la vitesse dans l'espace euclidien local (tangent) qui est variable.