

cité

**sciences
et industrie**

LE GRAND RÉCIT DE L'UNIVERS

Enseignants de collège et de lycée



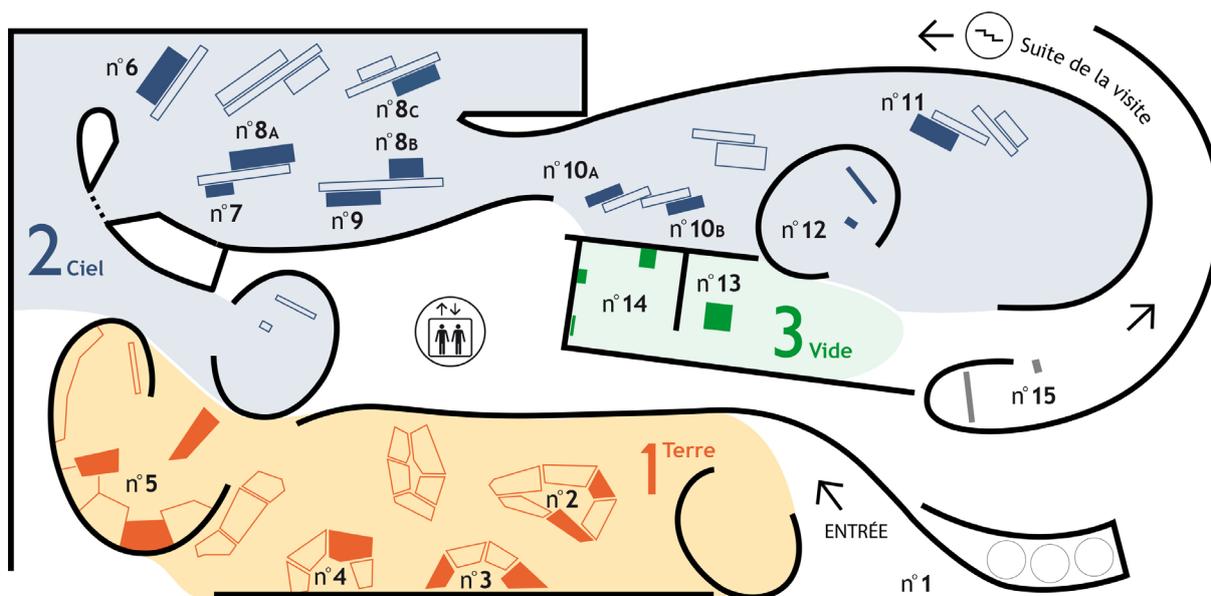
Département Éducation et Formation
educ-formation@universcience.fr

2020

Sommaire

I	L'exposition <i>Le grand récit de l'Univers</i>	
I.1	Situation et plans	3
I.2	Présentation	6
II	Contenu et compléments	
II.1	Premier étage – D'où vient la matière ?	6
II.1.1	L'enquête commence sur Terre...	7
II.1.2	L'enquête se poursuit dans le ciel...	20
II.1.3	Et si la réponse était dans le vide ?	52
II.2	Deuxième étage – Quelles lois physiques pour l'Univers ?	55
II.2.1	La physique classique	55
II.2.2	La physique relativiste	57
II.2.3	La physique quantique	64
II.3	Éditions	68
III	Informations pratiques	69

Photographie de couverture : Émile Luider



Premier niveau : d'où vient la matière ?

n°1 Préambule

1 L'enquête commence sur Terre...

n°2 Les roches volcaniques

n°3 Les roches sédimentaires

n°4 Les méthodes de datation des roches

n°5 Que racontent les météorites ?

2 L'enquête se poursuit dans le ciel...

n°6 Étoiles, les apparences trompeuses

n°7 L'art de ranger les étoiles

n°8A La lumière des étoiles ; 8B Les lumières des matières ; 8C La matière des étoiles

n°9 La lumière infrarouge

n°10A La fuite des galaxies ; 10B Un effet, deux interprétations

n°11 Attention, excès de vitesse

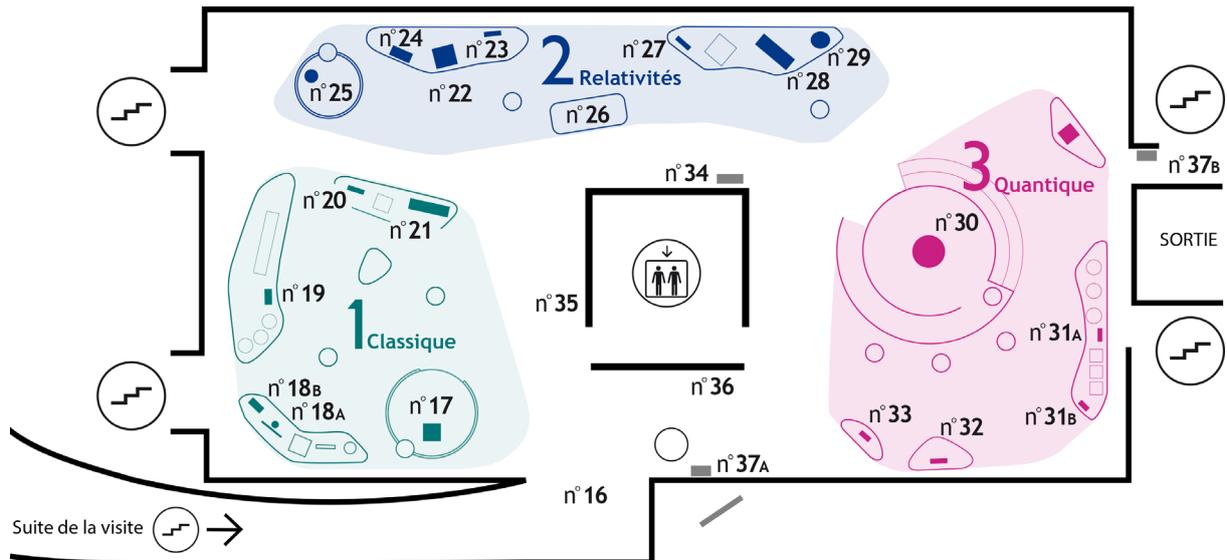
n°12 Au-delà des galaxies ?

3 Et si la réponse était dans le vide ?

n°13 Vide, les apparences trompeuses

n°14 Et si la réponse était dans le vide ?

n°15 Synthèse : Il était une fois la matière



Deuxième niveau : quelles lois physiques pour l'Univers ?

n°16 Présentation du deuxième niveau

1 La physique classique

- n°17 Introduction - Votre corps est matière
- n°18A Mesurer le mètre ; 18B Le temps est absolu
- n°19 Points de vue sur le mouvement
- n°20 Newton et la gravitation
- n°21 Plus jeune dans un miroir

2 La physique relativiste

- n°22 Introduction - La vitesse de la lumière
- n°23 Le temps des muons
- n°24 L'électromagnétisme en question
- n°25 Votre corps est énergie
- n°26 La chute des corps
- n°27 Einstein et la gravitation
- n°28 Mirages gravitationnels
- n°29 Effets relativistes au quotidien

3 La physique quantique

- n°30 Introduction - Votre corps est plein de vide
- n°31A L'expérience de Rutherford ; 31B Explorer l'atome
- n°32 Étrangeté du monde quantique
- n°33 Matière-antimatière

n°34 Univers, particules et expériences
n°35 Un mot, des idées ?
n°36 Cosmogonies, cosmologie ?

Épilogue

n°37A « Le cours des choses », une vidéo de Peter Fischli et David Weiss ; 37B Une œuvre d'art créé par Felice Varini, grand concepteur d'anamorphoses

I.2 Présentation

Le grand récit de l'Univers se présente sous la forme d'une enquête sur l'histoire de la matière, qui entraînera vos élèves de la Terre aux plus lointaines galaxies. Dans une scénographie immersive, ils découvriront l'histoire de la Terre et de l'Univers, le probable scénario de la formation de celui-ci et appréhenderont son expansion depuis plus de 13 milliards d'années.

II Contenu de l'exposition

II.1 1^{er} étage – D'où vient la matière ?

Le premier étage de l'exposition propose une enquête sur Terre, dans le ciel, puis dans le vide.

- 1. Sur Terre.** Les roches racontent une saga tumultueuse. Parfois anodines, elles contiennent pourtant des secrets sur notre histoire. Qu'elles soient volcaniques, sédimentaires ou extraterrestres, l'étude des roches et des volcans nous racontent la Terre.
- 2. Dans le ciel.** Comme nous sommes très loin de pouvoir nous rendre ne serait-ce qu'autour des étoiles les plus proches du Soleil (et encore moins dans d'autres galaxies !), nous étudions la lumière qui nous en parvient. Cette analyse est toutefois riche d'enseignements sur l'histoire du cosmos et l'on découvre, par exemple, qu'il est en expansion.
- 3. Dans le vide.** La dernière partie de cette enquête est un voyage dans le temps. Vous remonterez aux premiers instants de l'Univers, avant même la formation des premiers atomes.

II.1.1 L'enquête commence sur Terre...

✚ Les roches magmatiques

Cette première salle est dédiée à la Terre. C'est là que débute l'enquête sur l'origine de la matière. Les couleurs ocre, les lumières rougeoyantes et les portions de plaques qui accueillent les éléments de présentation évoquent la Terre, son volcanisme et le modèle de la tectonique des plaques.

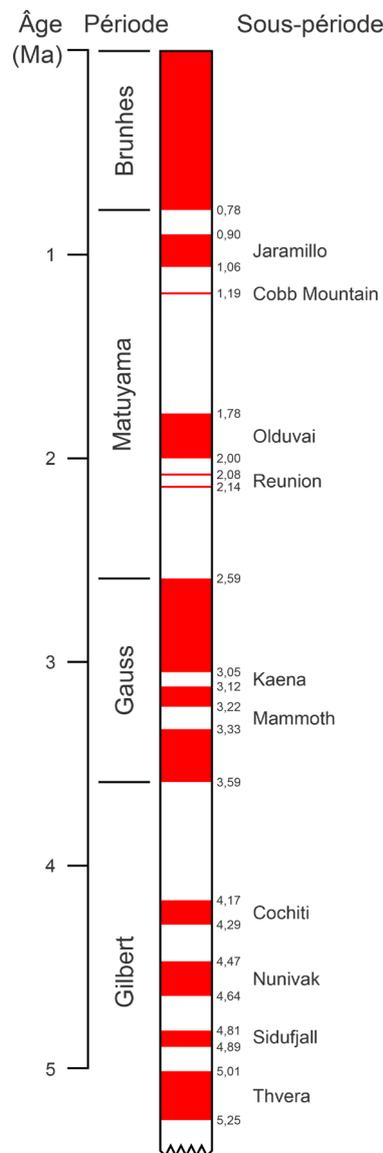


L'étude des roches et des volcans nous permet de comprendre l'histoire de la Terre. Dirigez-vous vers le premier groupe de tables. Vous êtes accueilli par trois roches *magmatiques* d'aspects très différents (élément « Roches, les apparences trompeuses »). Pourtant, ces trois roches (une rhyolite, un granite et une obsidienne) sont composées des mêmes atomes, mobilisent quasiment les mêmes éléments et présentent des minéraux similaires. Leurs différences d'aspect ne font que traduire des vitesses de refroidissement distinctes.

En effet, les roches magmatiques sont produites par le refroidissement et la solidification d'un magma. Si la solidification s'accomplit lentement en profondeur, on parle de roches *plutoniques*. Si elle s'effectue rapidement en surface, on qualifie ces roches de *volcaniques*.

Un granite est une roche plutonique à texture grenue qui constitue l'essentiel de la croûte continentale terrestre. Une rhyolite et une obsidienne sont deux roches volcaniques. La première possède une texture microlithique et la seconde, une texture vitreuse. Ces trois roches proviennent du refroidissement d'un magma riche en silice (SiO_2) et très visqueux.

Sur ce même groupe de tables, vous retrouvez un échantillon de basalte placé devant des boussoles, instruments sensibles au champ magnétique. Cet élément s'appelle « Une roche qui ne perd pas le nord ». Lorsque vous déplacez l'échantillon, les boussoles sont perturbées. Ce basalte a « mémorisé » l'intensité et la direction du champ magnétique lors de sa formation, quand sa température est passée sous le point de Curie et qu'il a été en mesure de conserver une aimantation permanente. Le champ magnétique a une histoire, que l'on retrace grâce à la mémoire de certains basaltes. Certaines roches nous apprennent même que la Terre a connu des inversions pôle Nord-pôle Sud (que l'on appelle *inversion de polarité du champ magnétique*), ont permis de valider l'hypothèse de l'expansion océanique et de connaître l'orientation des plaques tectoniques à différentes époques géologiques. C'est le cas de la roche voisine, « Parole de basalte », trouvée en Inde. Sa mémoire magnétique a permis de retracer son voyage. Touchez-la et elle vous racontera son histoire.



Inversion du champ magnétique terrestre sur les cinq derniers millions d'années. En rouge, on trouve les périodes de même polarité qu'aujourd'hui et en blanc, les périodes de polarité inverse.

Crédit : U.S. Geological Survey [Open-file report 03-187](#).

Les roches sédimentaires

Intéressons-nous maintenant à un type de roche qui va nous raconter l'histoire de la vie sur Terre. Dirigez-vous vers le groupe de tables dédié aux roches sédimentaires, à côté des roches volcaniques que vous venez de quitter.

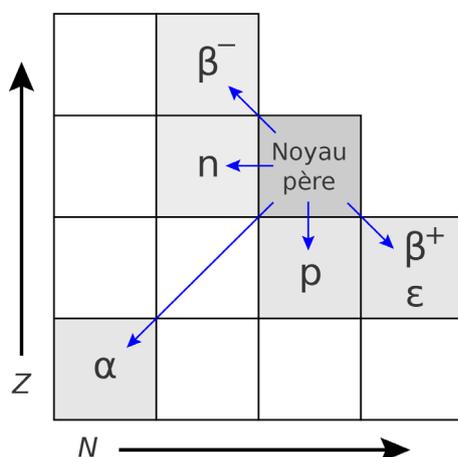
Touchez cette première roche à gauche (« Grès à bilobites »). Vous pouvez sentir sous vos doigts un fond marin datant de 300 millions d'années. Il porte les traces d'un animal disparu, le trilobite. À la différence des roches magmatiques dont nous venons de parler et des roches métamorphiques, qui résultent de la transformation à l'état solide d'autres roches sous l'effet de modifications des paramètres physico-chimiques (pression, température, etc.) du milieu dans lequel elles évoluent, ces roches sont le fruit de la lente accumulation de sédiments marins qui se sont déposés en couches. L'étude de ces restes d'êtres vivants indique qu'ils étaient composés de la même matière que celle qui nous constitue. Donnons-nous maintenant rendez-vous autour d'un autre groupe de tables, à côté des roches sédimentaires, pour comprendre les méthodes de datation des roches.

Les méthodes de datation des roches

Il existe de nombreuses méthodes de datation, par exemple, la comparaison d'échantillons de fossiles ou l'étude des paysages. Mais il faudra attendre le XX^e siècle pour disposer d'une méthode dite « absolue », mettant à profit la radioactivité naturelle de quelques éléments.

Datation absolue par désintégrations radioactives

Certains éléments sont naturellement radioactifs. Instables, ils se désintègrent spontanément. Un élément « parent » se transforme en un élément « fils », qui peut être un nouvel élément, plus léger, ou bien un isotope du parent. Cette réaction de désintégration se produit selon une constante de temps caractéristique, indépendante des facteurs extérieurs. Ainsi, en mesurant la concentration en éléments parents et fils dans une roche, on peut calculer depuis combien de temps la réaction prend place, et donc l'âge absolu de formation des minéraux de cette roche. Pour étudier les roches terrestres, les échantillons lunaires et les météorites, les géologues utilisent principalement les couples uranium/plomb ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$), rubidium/strontium ($^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$) et potassium/argon ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$).



Quelques modes de désintégration radioactive : radioactivités α , β^- et β^+ , par capture électronique ϵ , par émission de neutron n , et émission de proton p . N et Z sont le nombre de neutrons et le nombre de protons des noyaux considérés. Crédit : [Ariel Provost](#).

Soit $N(t)$ le nombre d'atomes radioactifs – on parle de *radionucléides* – d'un élément donné présent dans un échantillon à un instant t . La probabilité de désintégration d'un radionucléide quelconque est indépendante de ce qui s'est passé avant ; aussi, le nombre de désintégrations dN pendant un intervalle de temps dt est proportionnel au nombre N de radionucléides présents et à la durée dt de cet intervalle :

$$dN = -\lambda N dt$$

Le signe (-) vient de ce que N diminue au cours du temps. λ est la *constante radioactive*. C'est une constante positive caractéristique du radionucléide considéré. Elle a la dimension de l'inverse d'un temps. L'intégration de cette équation est immédiate et donne lieu à une loi de décroissance exponentielle.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

où N_0 est le nombre initial de radionucléides non-désintégrés.

La demi-vie T (ou *période radioactive*) est la durée au bout de laquelle le nombre de radionucléides présents dans l'échantillon est réduit de moitié. Pour la calculer théoriquement, il suffit d'écrire que :

$$N(T) = N_0 e^{-\lambda T} = \frac{N_0}{2}$$

On en déduit :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

On peut alors réécrire la loi de décroissance exponentielle sous la forme :

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

D'après cette dernière expression, il ne reste plus que la moitié du nombre de radionucléides initial après une période. Au bout de deux périodes, un quart ; trois périodes, un huitième (soit 12,5 %) ; au bout de dix périodes, moins de 0,1 % et au bout de vingt périodes, moins de 0,0001 %.

Remarque 1

Il arrive qu'un radionucléide se désintègre via deux ou plusieurs modes de désintégration en parallèle. La probabilité de voir un nucléide emprunter un certain mode s'appelle le *rapport de branchement*. Par exemple, l'azote 13 se désintègre en carbone 13 par émission β^+ et par capture électronique ε avec des rapports de branchement respectifs de 0,99818 (99,818 %) et 0,00182 (0,182 %). Le césium 132, lui, se désintègre en xénon 132 par émission β^+ ou par capture électronique ε avec un rapport de branchement de 0,9813 (98,13 %) et en baryum

132 par émission β^- avec un rapport de branchement de 0,0187 (1,87 %). Chacune de ces voies peut être caractérisée par une période radioactive spécifique.

Remarque 2

Les radionucléides résultant de la désintégration d'un radionucléide initial peuvent eux-mêmes être radioactifs, et induire leur propre radioactivité. On parle alors de *chaîne de désintégration*. Certaines incluent plus de dix étapes avant l'obtention d'un isotope enfin stable ! Comment déterminer l'abondance des nucléotides intermédiaires impliqués dans la chaîne ?

Soit $N_1(t)$ l'abondance du premier nucléotide, le premier maillon de notre chaîne. Il se désintègre selon une loi de désintégration radioactive dont la constante est λ_1 .

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$

Le i^e nucléotide est produit par la désintégration du $(i-1)^e$ mais il se désintègre lui-même selon une loi de désintégration radioactive dont la constante est λ_i . Son abondance est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \lambda_{i-1} N_{i-1}(t) - \lambda_i N_i(t)$$

Enfin, le dernier maillon de la chaîne (l'isotope stable), auquel nous donnons l'indice k , est uniquement produit par la désintégration du nucléotide $(k-1)$. Son abondance est donc régie par l'équation :

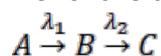
$$\frac{dN_k(t)}{dt} = \lambda_{k-1} N_{k-1}(t)$$

On a affaire à un ensemble d'équations différentielles du premier ordre. La solution analytique d'un tel problème fut fournie par le mathématicien anglais Harry Bateman (1882 – 1946) en 1910. Il montra que l'abondance $N_n(t)$ du n^e nucléide s'exprime par l'équation suivante :

$$N_n(t) = \sum_{i=1}^n \left[N_{i,0} \times \left(\prod_{j=i}^{n-1} \lambda_j \right) \times \left(\sum_{j=i}^n \left(\frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{p=i, p \neq j}^n (\lambda_p - \lambda_j)} \right) \right) \right]$$

L'avantage d'une telle modélisation est qu'il est possible de l'affiner et d'inclure dans l'équation des termes quantifiant un apport externe en nucléide i , des rapports de branchements, etc.

Prenons le cas simple d'une chaîne à trois isotopes, c'est-à-dire pour laquelle on a :



En supposant que les isotopes B et C sont absents au début de l'expérience ($N_{B,0} = N_{C,0} = 0$), l'équation de Bateman donne alors :

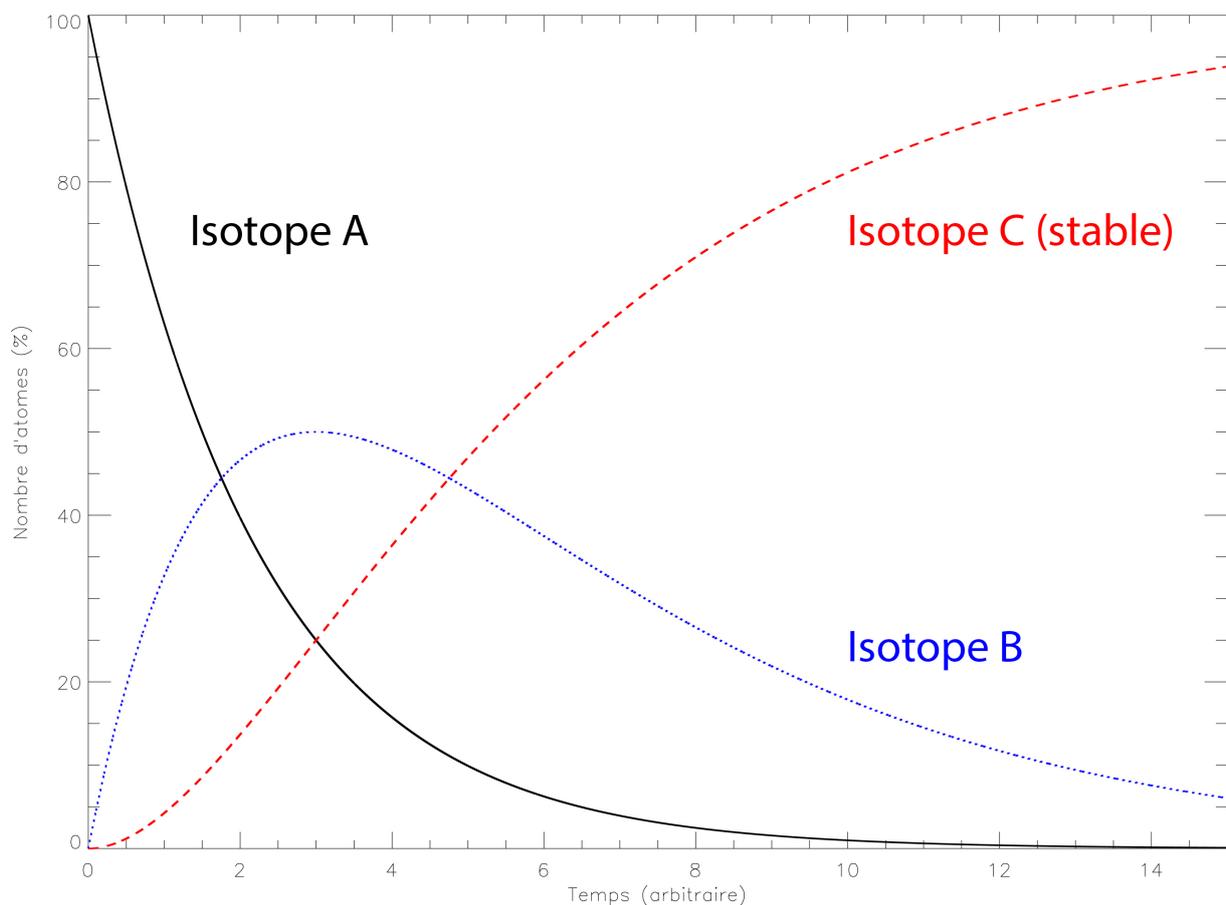
$$N_A(t) = N_{A,0} e^{-\lambda_A t}$$

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A,0} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

$$N_C(t) = \frac{N_{A,0}}{\lambda_B - \lambda_A} (\lambda_B - \lambda_A + \lambda_A e^{-\lambda_B t} - \lambda_B e^{-\lambda_A t})$$

Les formules semblent cohérentes puisque 1) si l'on fait tendre le temps vers l'infini, N_A et N_B tendent vers 0 alors que N_C tend vers $N_{A,0}$ et 2) $N_A(t) + N_B(t) + N_C(t) = N_{A,0}$.

Pour les besoins d'une simulation, imposons à **A** et **B** d'avoir des **demi-vies respectives de 1,5 et 3**. L'unité importe peu ; ce peut être des microsecondes ou des années. Le graphique suivant, limité en abscisse à dix fois le temps de demi-vie de l'isotope A, nous donne l'évolution du nombre de nucléotides en fonction du temps.



Connaître l'abondance théorique des différentes espèces présentes dans un échantillon est intéressant, mais ce n'est pas l'observable à laquelle nous avons directement accès. Lorsque nous faisons une mesure de radioactivité, nous utilisons un détecteur (comme le compteur Geiger) qui dénombre un certain nombre de désintégrations par unité de temps.

En physique nucléaire, l'*activité* caractérise la vitesse d'un matériau radioactif. On la mesure en becquerel, de symbole Bq. Un becquerel équivaut à une désintégration par seconde. Il s'agit d'une unité assez petite, aussi rencontre-t-on encore parfois une unité ancienne, le curie, qui vaut 37 milliards de becquerels. D'autres quantités sont liées à la mesure et à l'effet des radiations :

- l'exposition, qui quantifie, dans milieu rempli d'air soumis à un flux de rayonnements ionisants X ou gamma, la charge électrique produite par les ions de même signe créés par unité de masse. On la mesure en coulomb par kilogramme ;
- la dose absorbée, qui est l'énergie déposée par unité de masse par un rayonnement ionisant. On la mesure en gray, de symbole Gy (1 Gy = 1 J.kg⁻¹) ;
- la dose équivalente, qui mesure l'impact sur les tissus biologiques d'une exposition à un rayonnement ionisant, par exemple à une source de radioactivité. On la définit comme la dose absorbée corrigée d'un facteur de pondération du rayonnement, qui prend en compte la dangerosité relative du rayonnement considéré. Son unité est le sievert, de symbole Sv (1 Sv = J.kg⁻¹).

L'activité A(t) se définit par la formule :

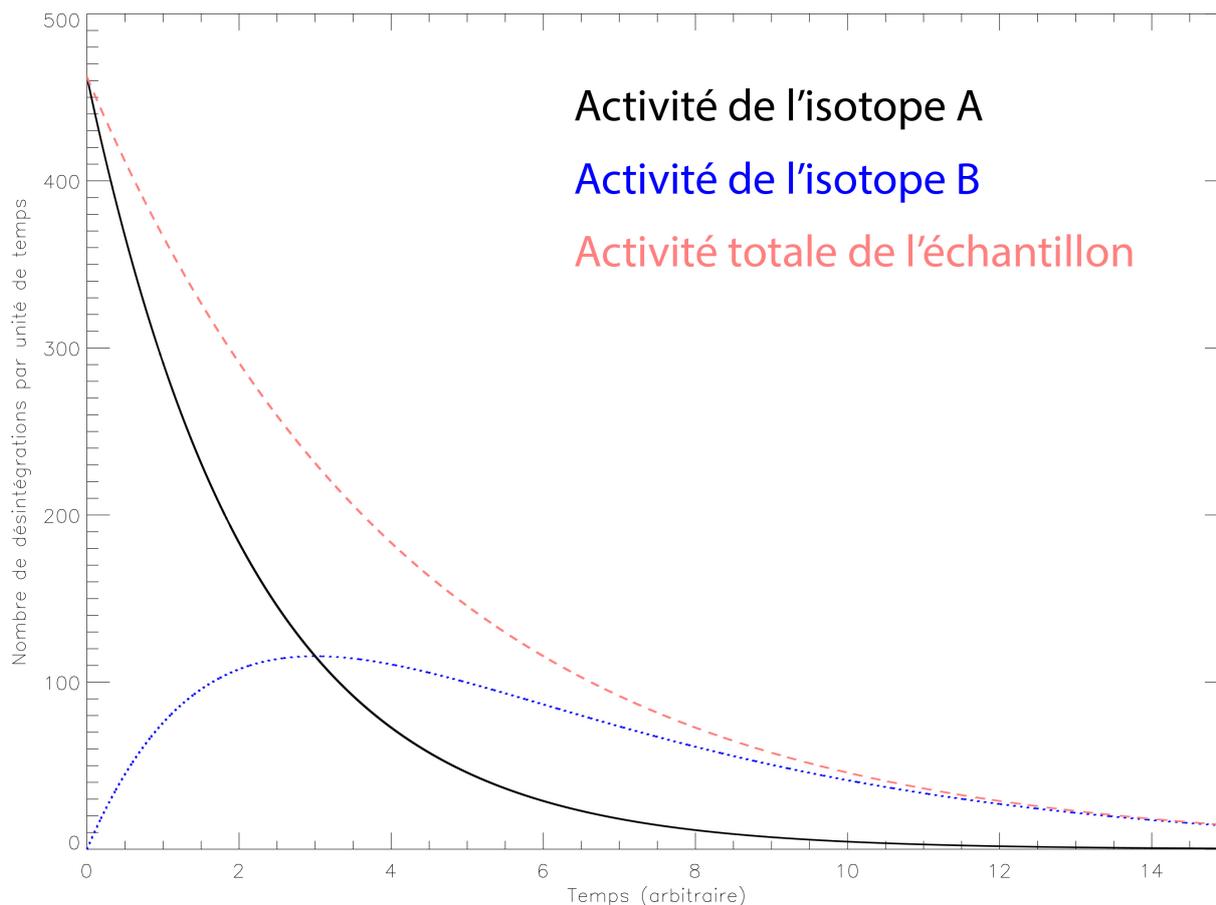
$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$$

Dans le cas de notre chaîne à trois isotopes, on obtient :

$$A_A(t) = \lambda_A N_A(t) = \lambda_A N_{A,0} e^{-\lambda_A t}$$

$$A_B(t) = \lambda_B N_B(t) = \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A,0} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

Bien évidemment, l'activité de l'isotope C est nulle puisqu'il est stable. Le graphique suivant, limité en abscisse à dix fois le temps de demi-vie de l'isotope A, nous donne l'évolution de l'activité de A, de B et la somme de leur activité, en fonction du temps. C'est cette dernière que l'on mesure avec un compteur. On part d'un échantillon contenant 1000 nucléotides du type A.



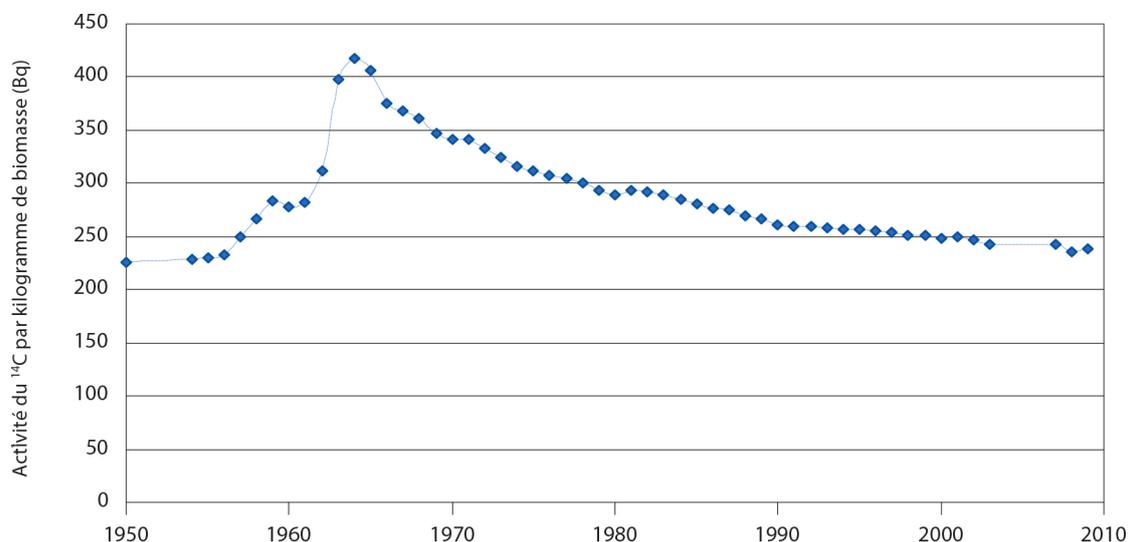
Datation par le carbone 14

Dans l'exposition, vos élèves sont invités à déterminer l'âge, non pas d'une roche, mais d'un échantillon de carbone fossile. Il s'agit de l'élément « Loi de désintégration radioactive », qui expose le principe de la datation par le carbone 14 (ou ^{14}C). La méthode a valu à son inventeur, Willard Frank Libby (1908 – 1980), le prix Nobel de chimie en 1960.

Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone, qui se désintègre en azote 14 par émission β^- . Un gramme de carbone 14 pur présente une activité de 166 GBq. Sa demi-vie vaut $5\,730 \text{ ans} \pm 40 \text{ ans}$. Il est produit en permanence dans la basse stratosphère et la haute troposphère par l'interaction entre les atomes d'azote 14 et les neutrons créés par les rayons cosmiques (des particules très énergétiques parcourant l'espace, composés majoritairement de protons mais aussi de noyaux d'hélium et d'électrons) lors de leur traversée de l'atmosphère. Une fois produit, le carbone 14 se combine rapidement avec l'oxygène pour former du monoxyde de carbone (^{14}CO) et finalement du dioxyde de carbone ($^{14}\text{CO}_2$). Le dioxyde de carbone radioactif ainsi produit diffuse dans l'atmosphère, se dissout dans l'océan et est absorbé par les plantes via la photosynthèse. Les animaux mangent les plantes, et finalement le carbone 14 se retrouve distribué dans toute la biosphère.

Ainsi, sur Terre, le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ est d'environ 1,25 atome de carbone 14 pour 10^{12} atomes de carbone 12. De plus, environ 1 % des atomes de carbone sont sous forme de ^{13}C , un isotope stable. En 2009, l'activité du ^{14}C est proche de 238 Bq par kilogramme de biomasse.

Une activité en baisse depuis le milieu des années 1960... et la signature le 5 août 1963 à Moscou du traité d'interdiction partielle des essais nucléaires, portant sur l'interdiction des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, dans l'espace extra-atmosphérique et sous l'eau.



Évolution de l'activité du carbone 14 par kilogramme de biomasse.
Crédit : IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire).

Un organisme vivant, animal ou végétal, échange du carbone avec son environnement, que ce soit par la respiration ou son régime alimentaire. Le carbone qu'il contient a donc la même proportion de carbone 14 que la biosphère. Lorsqu'il meurt, il cesse d'acquérir du carbone 14 et celui qu'il contient se désintègre peu à peu selon une loi exponentielle. Un échantillon de matière organique issu de cet organisme peut ainsi être daté en mesurant soit son rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ avec un spectromètre de masse, soit son activité à l'aide d'un compteur comme dans l'exposition.

La spectrométrie de masse est une méthode très rapide, qui permet d'atteindre une précision temporelle de 1 % en quelques minutes. Concrètement, on transforme d'abord le carbone de l'échantillon en graphite. On ionise ensuite ce dernier et les ions ainsi créés sont accélérés puis déviés par un aimant. La trajectoire des ions les plus lourds étant moins courbée que celle des ions plus légers, les différents isotopes émergent en faisceaux séparés. Un détecteur de particules enregistre le nombre d'ions dans le faisceau de carbone 14. Les ions de carbone 12 étant trop nombreux pour qu'ils soient comptés individuellement, leur nombre est déterminé en mesurant l'intensité du courant électrique qu'ils produisent grâce à une cavité de Faraday.

Connaissant le nombre d'ions des différents isotopes du carbone, nous sommes en mesure d'estimer l'âge t_0 de l'échantillon par la formule suivante :

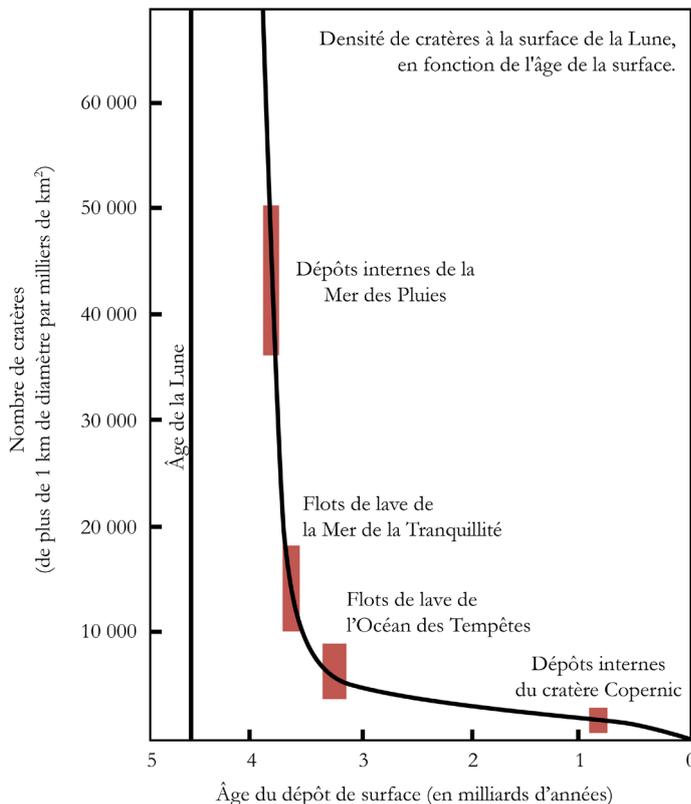
$$t - t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{C_0}{C(t)}$$

où t est l'instant où vous effectuez la mesure, $C(t)$ est le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ mesuré dans l'échantillon en cet instant, C_0 le même rapport à l'instant t_0 de la mort de l'organisme (il vaut environ 10^{-12}) et λ la constante radioactive du carbone 14. Avec une demi-vie de 5730 ans, cette dernière vaut $1,2097 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1}$.

La méthode de datation par le carbone 14 est limitée à quelques dizaines de milliers d'années. En général, l'activité des échantillons plus vieux que 50 000 ans n'est plus mesurable.

Datation relative

Nous avons passé au crible la méthode de datation absolue par désintégrations radioactives. Il est possible de dater plus ou moins grossièrement des corps extraterrestres (planètes et satellites) grâce aux cratères qui constellent leur surface. En effet, les cratères sont de bons indicateurs de l'âge d'une surface planétaire. Depuis les missions *Apollo* et les datations absolues des échantillons lunaires rapportés, on sait que plus une surface présente de cratères d'impact, plus elle est vieille et que plus les cratères sont gros, plus ils sont vieux. On peut ainsi essayer de dater la surface des planètes telluriques et des satellites par étude de leur cratérisation.



D'après *Le système solaire*, Éditions du CNRS.

Toutefois, l'activité géologique et l'érosion rendent les datations hautement incertaines car elles peuvent remodeler profondément les surfaces et effacer les traces du passé. De ce fait, l'étude des cratères ne suffit plus dans le cas de Mars : pour définir la chronologie précise de son histoire, il faudra attendre un retour d'échantillons de pierres martiennes afin de calibrer les datations de manière absolue.

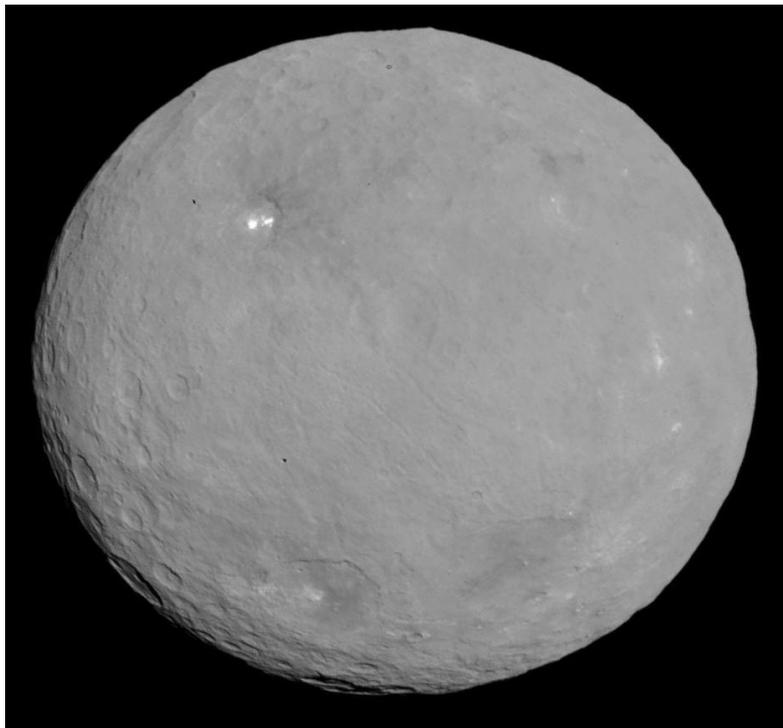
Retour sur Terre... avant le grand départ

Le gneiss disposé sur le groupe de tables n°4 est également connu sous le nom de « doyenne des roches ». Il n'a que... 3,8 milliards d'années. Or, la Terre est âgée d'environ 4,5 milliards d'années. Il n'existe donc aucune roche datant de la formation de notre planète.

Nous ne trouverons pas, sur Terre, l'origine de la matière. Nous devons donc poursuivre notre enquête dans l'espace. Rendez-vous vers le fond de la salle, dans une salle plus petite, dédiée aux roches extraterrestres.

Que racontent les météorites ?

Les astéroïdes sont des petits corps rocheux, descendants lointains des planétoïdes qui ont conduit à la formation des planètes. La grande majorité gravite autour du Soleil dans une ceinture comprise entre les orbites de Mars et de Jupiter. En ce premier quart de XXI^e siècle, plus de 700 000 astéroïdes ont été découverts mais leur nombre réel serait bien plus grand. Leur taille s'étale du mètre à 900 km pour Cérès, les plus petits étant les plus nombreux. La surface des astéroïdes est saturée en cratères d'impact de toutes tailles, ce qui démontre le rôle majeur joué par les chocs tout au long de leur histoire.

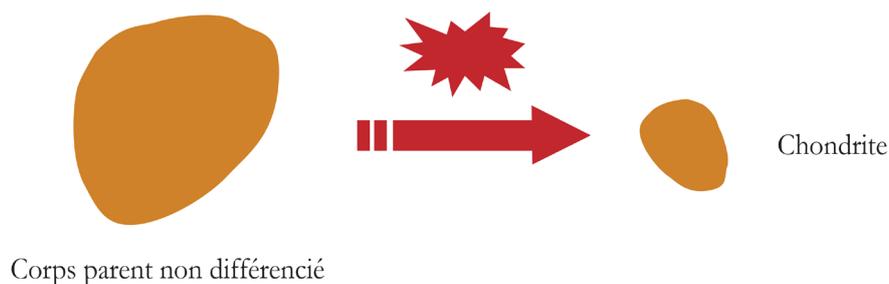
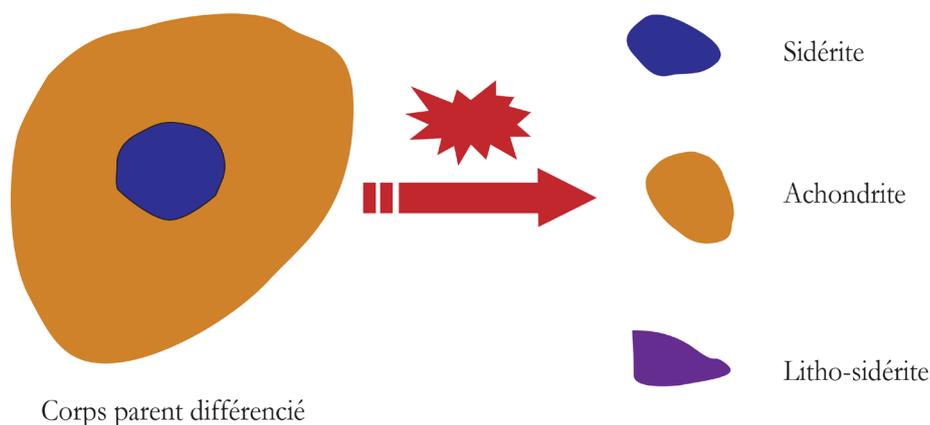


Cérès, le plus gros des astéroïdes, photographié par la sonde américaine *Dawn* en mai 2015. Cérès est suffisamment massif pour être quasiment sphérique.
Crédit : NASA / JPL-Caltech / UCLA / MPS / DLR / IDA.

Peu après la formation du système solaire, les astéroïdes massifs contenaient des quantités importantes d'éléments radioactifs. La chaleur dégagée par la désintégration de ces éléments a fait partiellement fondre leur intérieur. Ainsi, les éléments lourds comme le fer et le nickel ont plongé et se sont concentrés en leur cœur pour former un noyau métallique. Les plus légers sont restés en périphérie et ont formé un manteau silicaté. On dit des astéroïdes massifs qu'ils sont *différenciés*. Les petits astéroïdes et les comètes ne sont pas différenciés : leur structure est homogène.

À l'échelle de millions d'années et sous l'effet de collisions entre eux, les astéroïdes se sont fragmentés en blocs.

La Terre reçoit près de 100 000 tonnes de matière interplanétaire par an. Formée essentiellement de poussières, cette matière contient aussi des corps plus imposants qui, s'ils sont retrouvés sur Terre, prennent le nom de météorites. On pense que la composition des météorites reflète celle des corps parents leur ayant donné naissance. Ainsi, les météorites sidérites seraient issues du noyau d'astéroïdes massifs, les achondrites du manteau et les lithosidérites de la frontière entre noyau et manteau. Les météorites issues des petits astéroïdes et des comètes sont appelées chondrites. Leur structure n'a sans doute pas été modifiée depuis leur formation et leur composition serait semblable à celle de la nébuleuse ayant engendré le système solaire.





À gauche, une sidérite tombée en Argentine et à droite, une chondrite tombée au Maroc.

L'exposition vous propose de toucher une météorite de 80 kg, posée sur le sol. N'est-il pas émouvant de toucher du doigt une roche vieille d'au moins 4,5 milliards d'années ? Regardez maintenant autour de vous. Les câbles symbolisent la chute des météorites sur Terre, auxquels sont accrochées de nombreuses pierres qui ont traversé l'atmosphère pour parvenir jusqu'à nous. Ces pierres extraterrestres sont précieuses car la majorité d'entre elles se consomment en rentrant dans l'atmosphère et disparaissent.

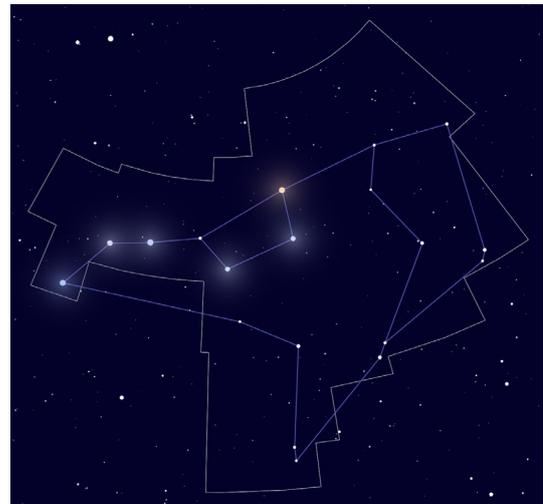
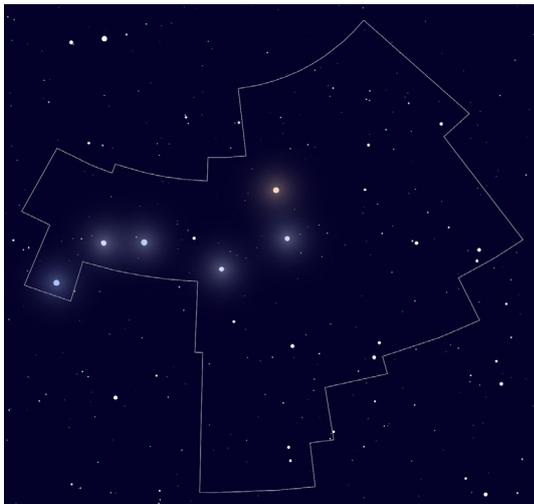
L'ensemble de notre système solaire est donc composé de la même matière. Qu'en est-il des autres étoiles ? L'enquête se poursuit dans le ciel. Prenons rendez-vous dans la salle suivante.



II.1.2 L'enquête se poursuit dans le ciel...

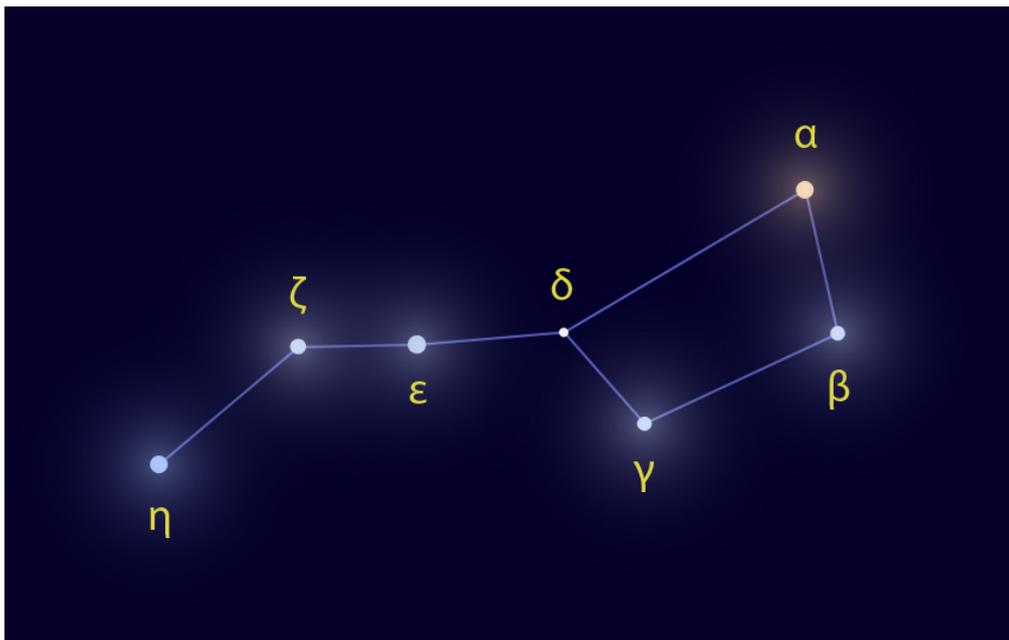
Qu'est-ce qu'une constellation ? C'est une figure empruntée aux mythologies, formée par des étoiles reliées entre elles. Il s'agit d'un choix tout à fait arbitraire et subjectif, les étoiles d'une constellation n'étant généralement pas liées par la gravité ni par une gestation commune.

La Grande Ourse, mise en valeur par l'exposition (élément n°6), est immense : sur les 88 constellations officiellement reconnues par l'Union astronomique internationale depuis 1930, elle occupe la 3^e place en superficie, derrière l'Hydre et la Vierge.



À gauche : la constellation de la Grande Ourse et ses limites, définies par l'Union astronomique internationale en 1930. À droite, une façon possible de relier certaines de ses étoiles, popularisée par l'illustrateur H. A. Rey en 1952. C'est loin d'être la seule...

Sept étoiles parmi les plus brillantes de la Grande Ourse forment une figure remarquable que, dans nos contrées, on appelle la Grande Casserole. Ce type de figure, nommé *astérisme*, n'est pas unique et vous avez déjà certainement entendu parler du « W » de Cassiopée, du Carré de Pégase, du Triangle de l'été, de la Ceinture d'Orion, etc. L'image suivante s'intéresse uniquement aux sept étoiles de la Grande Casserole. Rappelons encore que la Grande Casserole, contrairement à la Grande Ourse, n'a aucune existence officielle ; il s'agit simplement d'une dénomination bien pratique que chacun comprend et utilise.



Les sept étoiles formant la Grande Casserole.

Une lettre grecque minuscule est assignée à chacune des sept étoiles. Une telle désignation fut introduite par l'astronome allemand Johann Bayer (1572 – 1625) dans son *Uranometria* (1603) et ses successeurs l'ont conservée. Habituellement, l'étoile la plus lumineuse d'une constellation se voit attribuer la lettre α ; la deuxième, β , la troisième γ et ainsi de suite. Il y a toutefois presque autant d'exceptions qu'il existe de constellations. Ainsi, **dans la Grande Ourse**, ϵ est l'étoile la plus brillante. Suivent alors α , η , ζ , β , γ . δ , elle, n'arrive qu'en 11^e position !

Pour être tout à fait complet, la désignation de Bayer d'une étoile comporte en fait deux parties :

- une lettre, généralement une lettre grecque minuscule mais parfois une lettre latine minuscule ou majuscule ;
- le génitif du nom latin de la constellation hébergeant l'étoile.

Dans le cas qui nous intéresse, la Grande Ourse se dit Ursa Major, son génitif étant Ursae Majoris. Son étoile la plus brillante s'appelle donc ϵ Ursae Majoris. Il est également possible d'utiliser l'abréviation à trois lettres de la constellation ; la désignation ϵ UMa est donc parfois employée dans la littérature.

La désignation de Bayer n'est sans doute pas ce qu'on peut trouver de plus... romantique, dirons-nous. Sur les quelques milliers d'étoiles visibles à l'œil nu sous un bon ciel, quelques centaines possèdent un nom traditionnel ; étant relativement brillantes, les sept étoiles de la Grande Casserole en sont dotées. Le tableau suivant en propose la correspondance.

Désignation de Bayer	η UMa	ζ UMa	ϵ UMa	δ UMa	γ UMa	β UMa	α UMa
Nom traditionnel	Alkaid	Mizar	Alioth	Megrez	Phecda	Merak	Dubhe

Plus brillant, moins brillant... tout cela est finalement subjectif et imprécis. Comment peut-on quantifier l'éclat d'une étoile ?

Pour quantifier l'éclat apparent d'un astre, on utilise l'échelle des **magnitudes**. Elle s'inspire des travaux d'Hipparque, un grand astronome grec du II^e siècle avant notre ère. Celui-ci classait les étoiles en « grandeur ». Les étoiles les plus brillantes étaient de 1^{re} grandeur. Celles qui l'étaient un peu moins étaient qualifiées de 2^e grandeur etc. Les étoiles de 6^e grandeur étaient à la limite de visibilité. Les astronomes modernes ont repris le système de classement d'Hipparque en y intégrant la transcription mathématique de la perception de l'œil. Le système des magnitudes est beaucoup plus étendu que celui d'Hipparque : des objets très brillants auront une magnitude négative et les magnitudes supérieures à 6 caractériseront les objets nécessitant un instrument d'optique pour être détectés. **Gardez à l'esprit que plus la magnitude d'un astre est élevée, moins il est brillant.** Le tableau suivant recense les magnitudes de quelques astres d'intérêt.

Astre	Magnitude
Le Soleil, vu depuis la Terre	-26,7
Pleine lune	-12,7
Vénus	-4,9 à -3,9
Jupiter	-2,9 à -1,6
Mars	-2,9 à +1,8
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-1,5
Canopus (2 ^e étoile la plus brillante du ciel nocturne)	-0,7
Saturne	-0,5 à 1,3
Véga (étoile principale de la constellation de la Lyre)	0,0
Étoile polaire	2,0
Étoiles les plus faibles visibles à Paris	≈ 3
Uranus	5,3 à 5,9
Limite de l'œil, sous un ciel bien sombre	≈ 6,5
Neptune	7,8 à 7,9
Avec une paire de jumelles de 50 mm de diamètre	≈ 9 – 10
Avec un télescope de 200 mm de diamètre	≈ 13 – 14
Pluton (planète naine)	13,6 à 16,0
Avec un télescope de 600 mm de diamètre et 30 minutes de pose	≈ 22
Avec le télescope spatial <i>Hubble</i> (miroir de 2,4 m de diamètre) et 23 jours de pose	31,5
Avec le futur télescope spatial <i>James Webb</i> (miroir de 6,5 m de diamètre, lancement prévu le 31/10/2021)	≈ 34

Les magnitudes des sept étoiles de la Grande Casserole sont données ici :

Étoile	Alkaid	Mizar	Alioth	Megrez	Phecda	Merak	Dubhe
Magnitude apparente	1,86	2,04	1,77	3,31	2,44	2,37	1,79

Il est, bien sûr, tout à fait impossible ne serait-ce que d'estimer la distance absolue et relative de ces sept étoiles par un examen visuel, aussi attentif soit-il. En l'absence de perspective, elles nous semblent toutes à la même distance, fixées sur une sphère céleste de rayon... sans doute très grand. Alioth est-elle la plus brillante du groupe parce qu'elle est la plus proche ? Megrez est-elle la plus lointaine ? Leur distance se compte-t-elle en milliers, en millions, en milliards de kilomètres ? Ou dans une unité beaucoup plus grande ? Comment mesure-t-on la distance qui nous sépare des étoiles ?

La distance des étoiles proches

Pour estimer la distance des étoiles **proches**, on exploite leur *parallaxe*.

La parallaxe est l'angle dont semble avoir bougé un corps céleste par rapport au fond du ciel, en raison du changement de position de l'observateur. Pour vous familiariser avec cette notion, fermez l'œil gauche et, le bras tendu, cachez un petit élément du décor à l'aide de votre pouce. Fermez maintenant l'œil droit et observez la même scène de l'œil gauche, sans bouger : le petit élément du décor réapparaît ! L'angle dont votre pouce semble avoir bougé est la parallaxe. On peut relier la distance qui sépare votre pouce de vos yeux à cet angle et à l'écartement entre vos deux yeux. Ceci est à la base de la technique de triangulation.

Nos yeux fournissent une base de triangulation bien trop petite pour mesurer la distance des étoiles. Peut-on atteindre la précision suffisante en prenant deux lieux séparés par plusieurs milliers de kilomètres sur Terre ?

La méthode fut employée avec succès en 1672 par les astronomes Jean-Dominique Cassini (1625 – 1712) et Jean Richer (1630 – 1696), non pas pour calculer la distance aux étoiles mais, plus humblement, pour mesurer la distance de la Terre à Mars et, de là, en déduire les dimensions du système solaire. Resté à Paris, Cassini envoya son collaborateur à Cayenne, en Guyane. Les deux observèrent la planète Rouge au même moment. En ces deux lieux, sa position était très légèrement différente par rapport aux étoiles, puisque le point de vue n'était pas le même. Connaissant la distance entre les deux villes, on en déduisit celle qui nous séparait alors de Mars.

Cassini et Richer montrèrent que l'angle dont semblait avoir bougé Mars était d'environ 17''. Il s'agit d'une valeur faible, en tout cas inférieure aux capacités physiologiques de l'œil humain lorsqu'il n'est pas soutenu par un instrument d'optique.

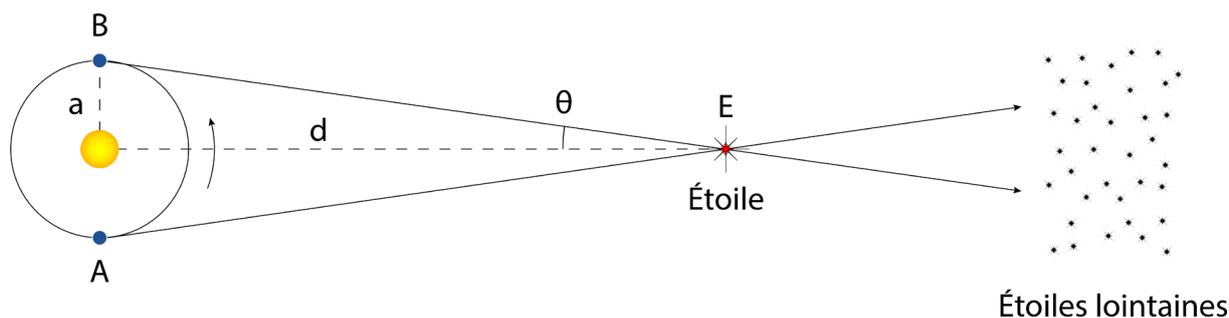
Rappel sur les angles en astronomie

Quelques exemples de tailles et de diamètres apparents.

Dans un degré, il y a 60 minutes d'arc (60') et dans une minute d'arc, on compte 60 secondes d'arc (60''). Le pouvoir de résolution de l'œil humain est d'environ 1'. Cela signifie que deux points séparés par moins de 1' seront vus comme un seul et même point.

Objet observé	Taille apparente
Distance angulaire entre l'extrémité du petit doigt et celle du pouce (bras tendu, main ouverte et doigts écartés)	Environ 20°
Distance angulaire entre l'extrémité du pouce et celle du poing (bras tendu, main fermée et pouce tendu)	Environ 15°
Taille apparente du poing fermé (bras tendu)	Environ 10°
Largeur apparente de l'index (bras tendu)	Environ 1°, soit 60'
Lune	De 29,3' à 33,5'
Soleil	De 31,5' à 32,5'
Vénus (planète)	De 9,5'' à 65'', soit 1' 5''
Pouvoir de séparation de l'œil humain	Environ 1', soit 60''
Jupiter (planète)	De 30,5'' à 50''
Mars (planète)	De 3,5'' à 25,1''
Neptune (planète)	De 2,2'' à 2,4''
Pluton (planète naine)	De 0,06'' à 0,11''
Pouvoir de séparation du télescope spatial <i>Hubble</i>	0,05''
Bételgeuse (étoile supergéante rouge)	0,05''
Sirius (étoile la plus brillante du ciel nocturne)	0,006''
Pouvoir de séparation du SVLBI (interféromètre radio)	0,0001''

La base fournie par le rayon terrestre s'avère donc trop petite pour permettre l'accès aux distances stellaires, la *parallaxe diurne* correspondante étant hors de portée des instruments passés ou actuels. Une fois de plus, voyons plus grand et choisissons l'orbite de la Terre dans sa révolution autour du Soleil comme base de triangulation !



Principe de la parallaxe annuelle. L'étoile dont on veut mesurer la distance est observée à six mois d'intervalle, alors que la Terre, dans son parcours autour du Soleil, se trouve en A puis en B. a est le rayon de l'orbite terrestre, d la distance à l'étoile et θ la parallaxe.

D'après le schéma ci-dessus, on a la relation trigonométrique suivante :

$$\tan(\theta) = \theta = \frac{a}{d}$$

Ce schéma n'est toutefois pas à l'échelle, très loin s'en faut. Dans la réalité, la *parallaxe annuelle* θ est minuscule, **toujours inférieure à 1''**. On peut donc assimiler l'angle θ (exprimé en radian) à sa tangente et l'on obtient la relation :

$$d = \frac{a}{\theta}$$

où a est le rayon de l'orbite terrestre (environ 150 millions de kilomètres) – et plus exactement, une unité astronomique, soit 149 597 870,7 km – et d la distance que l'on cherche.

À la toute fin du XVIII^e siècle, on découvrit que l'étoile double 61 du Cygne présentait un mouvement propre très important : elle se déplace de manière significative (un peu plus de 5''/an, soit près de 10' en un siècle) par rapport au fond des étoiles. Il s'agit en fait de l'étoile la plus rapide visible à l'œil nu. Faisant le pari que cette vitesse ne faisait que traduire sa proximité au Soleil comparée aux autres étoiles et qu'elle constituait donc une cible idéale, l'astronome Friedrich Bessel (1784 – 1846) l'étudia avec la plus extrême minutie et détermina sa parallaxe en 1838.



Le mouvement apparent de l'étoile double 61 du Cygne entre le 20 novembre 2012 (images du haut) et le 24 novembre 2019 (images du bas). Crédit : IndividusObservantis.

À partir de ses observations, Bessel estima la parallaxe du centre de masse de l'étoile double à $0,3136 \pm 0,0136''$. Le résultat obtenu est très bon si l'on se réfère aux dernières données disponibles, celles fournies par la mission spatiale astrométrique *Gaia* (lancée en décembre 2013). Ce satellite européen a permis de contraindre la parallaxe des deux composantes de 61 du Cygne à $(285,9459 \pm 0,1008) \cdot 10^{-3}''$ et $(286,1457 \pm 0,0590) \cdot 10^{-3}''$.

La parallaxe du premier membre, que l'on nomme 16 Cyg A, appartient donc à l'intervalle $[0,2858451'' ; 0,2860467'']$; celle de 16 Cyg B, à l'intervalle $[0,2860867'' ; 0,2862047'']$. Le gain en précision est phénoménal !

Comment passer d'une parallaxe annuelle à une distance ? Reprenons la formule que nous venons d'établir et appliquons-là à la parallaxe obtenue par Bessel :

$$d = \frac{a}{\theta}$$

Comme nous l'avons signalé, il faut convertir θ en radian. Cela se fait en deux étapes. D'abord, on convertit θ en degré en divisant sa valeur par 3600 puisqu'il y a 3600 secondes d'arc dans un degré. Le passage au radian nécessite une division supplémentaire par $180/\pi$ car un cercle complet (360°) équivaut à 2π radians.

Le calcul mène à une parallaxe de $1,520 \cdot 10^{-6}$ rad. L'inverse de cette valeur s'élève à un peu plus de 650 000. Autrement dit, la distance qui nous sépare de 61 du Cygne est plus de 650 000 fois supérieure à la distance qui sépare la Terre du Soleil ! Près de cent mille milliards de kilomètres... L'exprimer dans cette unité n'a plus vraiment de sens. Les astronomes ont donc progressivement introduit un nouvel étalon de longueur, l'**année-lumière** (a.-l.).

On la définit aujourd'hui comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année julienne de 365,25 jours. Sachant que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante fixée en 1983 à 299 792 458 m/s, une année-lumière est exactement égale à : $299\,792,458 \times 86\,400 \times 365,25 = 9\,460\,730\,472\,580,8$ km, soit près de 9461 milliards de kilomètres.

La distance de 61 du Cygne, calculée par Bessel, est alors de 10,40 années-lumière. Dans son article original, l'astronome allemand la plaçait à 10,28 années-lumière car la vitesse de la lumière n'était pas encore déterminée très précisément. L'utilisation des données envoyées par *Gaia* (et c'est un bon exercice !) permet de calculer les distances des deux membres avec leur barre d'erreur.

16 Cyg A : $11,40623 \pm 0,0040$ a.-l.

16 Cyg B : $11,39826 \pm 0,0024$ a.-l.

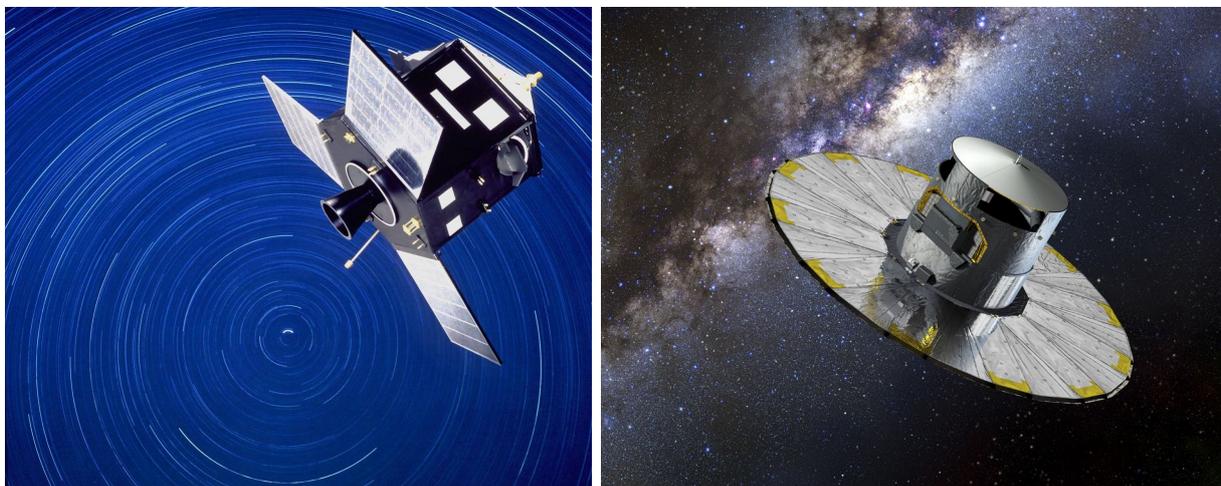
Notons enfin que les astronomes emploient couramment une autre unité de longueur que l'année-lumière, le **parsec** (contraction de « parallaxe-seconde »). Historiquement, le parsec (pc) est défini comme la distance à laquelle une unité astronomique sous-tend un angle d'une seconde d'arc. L'aspect pratique du parsec est qu'il suffit d'inverser la valeur de la parallaxe exprimée en seconde d'arc pour obtenir directement une distance en parsec : avec une parallaxe de $0,5''$, une étoile se trouve à 2 parsecs ; une parallaxe de $0,1''$ la place à 10 parsecs, etc. En 2015, l'Union astronomique internationale a défini le parsec comme valant exactement ($648\,000 / \pi$) unités astronomiques. Cela correspond à 3,2616 années-lumière environ. En astronomie extragalactique et en cosmologie, on utilise souvent le mégaparsec (un million de parsecs, symbole « Mpc ») et le gigaparsec (un milliard de parsecs, symbole « Gpc »).

Ce détour par les techniques de mesure des distances des étoiles proches nous ramène vers la Grande Casserole. Le tableau suivant présente les distances des sept étoiles qui la constituent, calculées à partir des parallaxes mesurées par le prédécesseur de *Gaia*, le satellite européen *Hipparcos* (1989 – 1993). Pourquoi se satisfaire de mesures moins précises et plus anciennes ? Simplement parce que de plus récentes n'existent pas... en effet, *Gaia* ne travaille, pour l'instant, que sur des étoiles de magnitude supérieure à 3 environ.

Étoile	Alkaid	Mizar	Alioth	Megrez	Phecda	Merak	Dubhe
Parallaxe (en 10^{-3} ")	$31,38 \pm 0,24$	$39,36 \pm 0,30$	$39,51 \pm 0,20$	$40,51 \pm 0,15$	$39,21 \pm 0,40$	$40,90 \pm 0,16$	$26,54 \pm 0,48$
Distance (en a.-l.)	$103,9 \pm 0,8$	$82,9 \pm 0,6$	$82,6 \pm 0,4$	$80,5 \pm 0,3$	$83,2 \pm 0,8$	$79,7 \pm 0,3$	$122,9 \pm 2,2$

Les étoiles Mizar, Alioth, Megrez, Phecda et Merak sont situées dans la même région du ciel et à une distance comparable de la Terre. On a, de plus, montré qu'elles possédaient un mouvement propre commun : elles se déplacent de concert dans l'espace. Il s'agit en fait de ce qu'on appelle un *courant stellaire*. Ces étoiles, avec quelques autres dans la Grande Ourse et dans d'autres constellations, partagent des caractéristiques communes comme l'âge (environ 300 millions d'années), la cinématique et la composition chimique. Elles ont très certainement une origine commune.

Alkaid et Dubhe ne font pas partie du courant d'étoiles de la Grande Ourse.



Vue d'artiste des missions *Hipparcos* (pour **H**igh **P**recision **P**ARallax **C**ollecting **S**atellite) à gauche et *Gaia* à droite. Crédit : Agence spatiale européenne (ESA).

La distance des étoiles lointaines

Plus une étoile est lointaine, plus sa parallaxe est petite. Lorsque l'instrument utilisé pour mesurer celle-ci atteint ses limites, la barre d'erreur devient comparable aux mesures. Considérons Deneb, l'étoile la plus brillante de la constellation du Cygne. Grâce au satellite

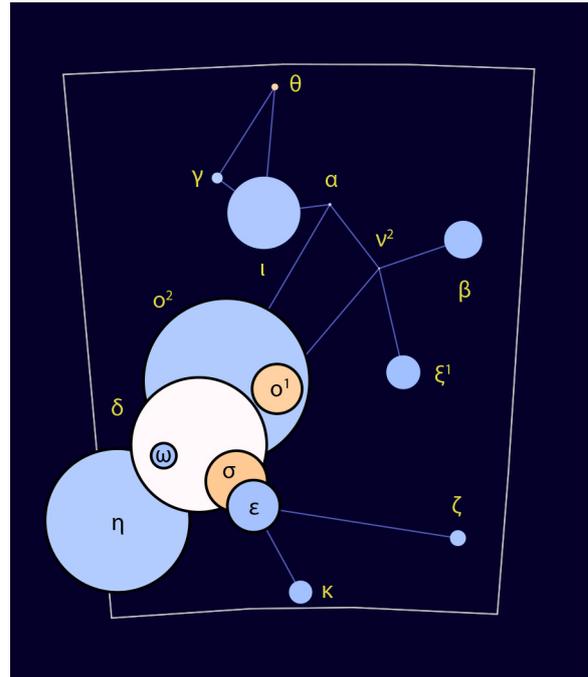
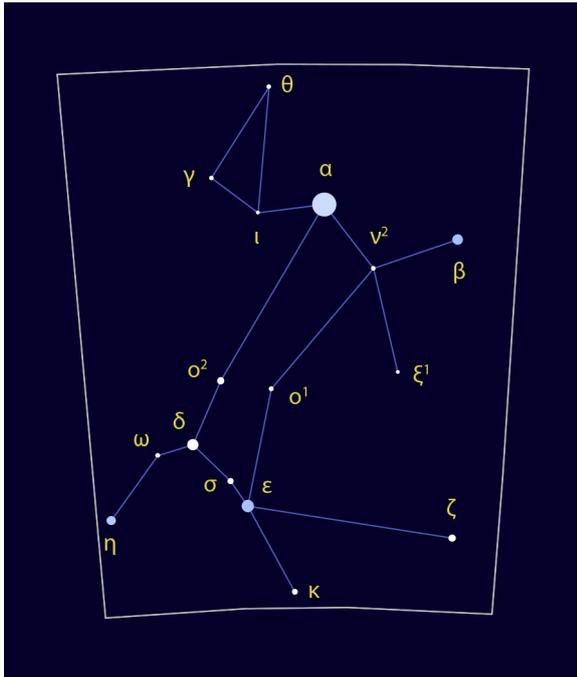
Hipparcos, sa parallaxe a été estimée à $(2,31 \pm 0,32) \cdot 10^{-3}''$. Sa distance est donc comprise entre 1240 et 1640 années-lumière ; l'incertitude est vraiment importante. *Hipparcos* n'est donc capable de donner accès correctement qu'à notre environnement proche, lorsque l'on songe que le diamètre de notre galaxie, la Voie lactée, est proche de 100 000 années-lumière. Les astronomes ont conçu la mission astrométrique *Gaia* pour dépasser *Hipparcos*. Son objectif ? Mesurer les caractéristiques de plus d'un milliard d'objets jusqu'à la magnitude 20. À la fin de la mission, la distance d'une vingtaine de millions d'étoiles aura été déterminée avec une précision meilleure que 1 % et environ 200 millions avec une précision meilleure que 10 %, jusqu'au centre galactique à 30 000 années-lumière de la Terre.

Gaia s'est intéressé à des astres qui étaient hors de portée d'*Hipparcos*, comme WR 25 et WR 42e, deux étoiles particulièrement massives et lumineuses. De leur parallaxe respective de $(0,4763 \pm 0,0329) \cdot 10^{-3}''$ et $(0,1666 \pm 0,0339) \cdot 10^{-3}''$, on déduit des distances de 6880 ± 475 a.-l. et 20420 ± 4160 a.-l.

Même si la collecte et le traitement des données sont toujours en cours (novembre 2020) et que l'on peut légitimement s'attendre à un accroissement de la précision des mesures d'ici peu, on commence à toucher du doigt les limites instrumentales de *Gaia* pour de telles distances.

Comment alors déterminer la distance des astres ne présentant pas ou quasiment pas de parallaxe ?

Revenons à la magnitude introduite plus haut. On lui attribue le qualificatif *apparent* pour bien montrer qu'il s'agit de l'éclat que l'on appréhende avec nos sens... ou des détecteurs. De quoi dépend la magnitude apparente d'un astre ? De sa luminosité propre, « intrinsèque », de sa distance et, éventuellement, de l'extinction de sa lumière due à la présence de gaz et de poussières présents sur la ligne de visée. Pour exprimer la luminosité intrinsèque d'un astre, on a donc inventé le concept de *magnitude absolue*. Elle est définie par la magnitude apparente qu'aurait cet astre s'il était placé à une distance de référence de 10 parsecs en l'absence d'extinction interstellaire. La magnitude absolue du Soleil est 4,8 : s'il était placé à 10 pc, il serait à peine visible à l'œil nu !



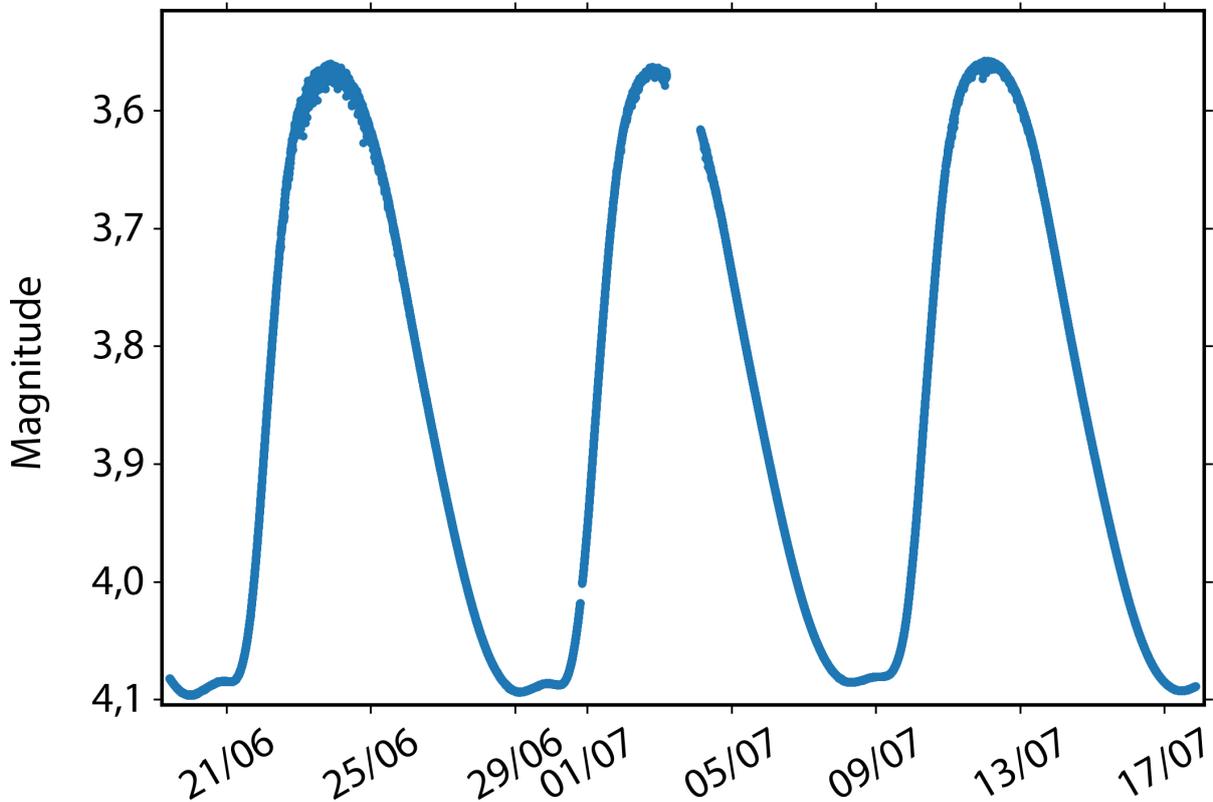
À gauche : la constellation du Grand Chien selon la représentation de Rey. Sirius (α) est l'étoile la plus brillante du ciel nocturne. La surface des disques figurant les étoiles est proportionnelle à leur luminosité. À droite, aspect de la même constellation si toutes ses étoiles étaient situées à 10 pc. On a donc ici une image de leur magnitude absolue et une idée de leur luminosité réelle. On comprend ainsi la raison pour laquelle Sirius est aussi brillante dans notre ciel : sa grande proximité (8,7 a.l.). Au contraire, si η , δ , ι et σ^2 sont peu brillantes, c'est parce qu'elles sont extrêmement lointaines.

On montre que magnitudes apparente m et absolue M sont liées par la relation $m - M = 5 \log_{10} d - 5$.

Considérez une étoile proche dont on a estimé la distance grâce à sa parallaxe. Armé de notre connaissance de sa magnitude apparente, nous en déduisons sa magnitude absolue en utilisant la formule ci-dessus. Soit maintenant une autre étoile, de distance inconnue. Il se trouve que la comparaison du spectre des deux étoiles nous amène à penser qu'elles possèdent les mêmes caractéristiques et donc la même magnitude absolue. Il suffit alors de mesurer la magnitude apparente de la seconde étoile pour en estimer la distance grâce la relation explicitée plus haut. Cette technique fonctionne correctement jusqu'à quelques dizaines de milliers d'années-lumière et porte le nom de *parallaxe spectroscopique*.

Si l'on veut aller plus loin, il faut choisir des astres très brillants, observable à grande distance et dont on sait qu'ils ont tous la même luminosité. Les céphéides constituent une telle famille de *chandelles standards*. Nommées ainsi d'après le prototype δ de Céphée, les céphéides sont des étoiles variables géantes, plus massives que le Soleil et très brillantes. Leur éclat varie de 0,1 à 2 magnitudes selon une période P bien définie. En travaillant sur des étoiles proches dont elle connaissait la distance, Henrietta Leavitt (1868 – 1921) a montré que leur magnitude absolue est une fonction précise de cette période : $M = f(P)$.

On mesure donc la période d'une étoile lointaine qu'on aura reconnue comme céphéide, on en déduit sa magnitude absolue par la relation de Leavitt puis, en la comparant à sa magnitude apparente, sa distance.



Courbe de luminosité de l'étoile κ du Paon enregistrée par le télescope TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) de la NASA en 2019. Kappa du Paon est une céphéide dont la période est de 9,048 jours.

Crédit : d'après [Warrick Ball](#).

Les céphéides sont détectées à présent dans d'autres galaxies que la Voie lactée, jusqu'à des distances proches de 100 millions d'années-lumière.

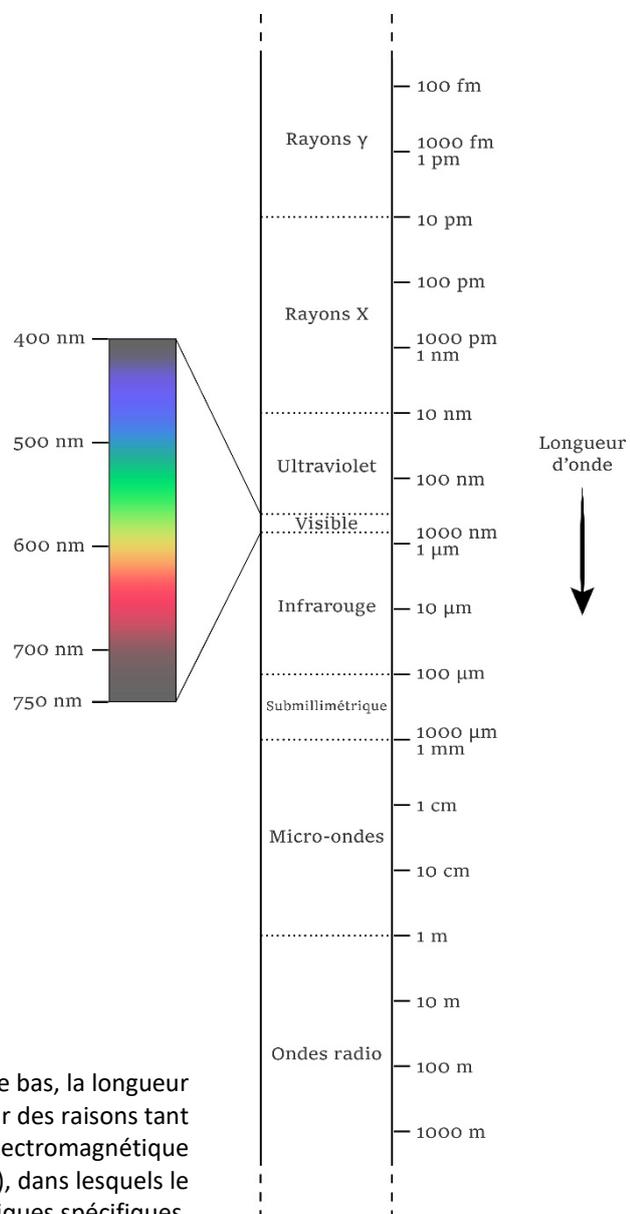
🚦 La distance des galaxies : une mise en bouche

Grâce à des céphéides qu'il a découvertes dans d'autres galaxies, Edwin Hubble (1889 – 1953) est parvenu à montrer que ces galaxies nous fuyaient d'autant plus vite qu'elles étaient lointaines : l'Univers est en expansion. Hubble a montré que leur vitesse de fuite v (mesurée par effet Doppler, effet sur lequel nous reviendrons) est proportionnelle à leur distance d : $v = Hd$ où H est la constante de Hubble estimée aujourd'hui à $70 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$. Pour se faire une idée de la distance d d'une galaxie lointaine, il suffit donc de mesurer sa vitesse de fuite v par effet Doppler et d'appliquer la relation $d = \frac{v}{H}$.

Les messages de la lumière

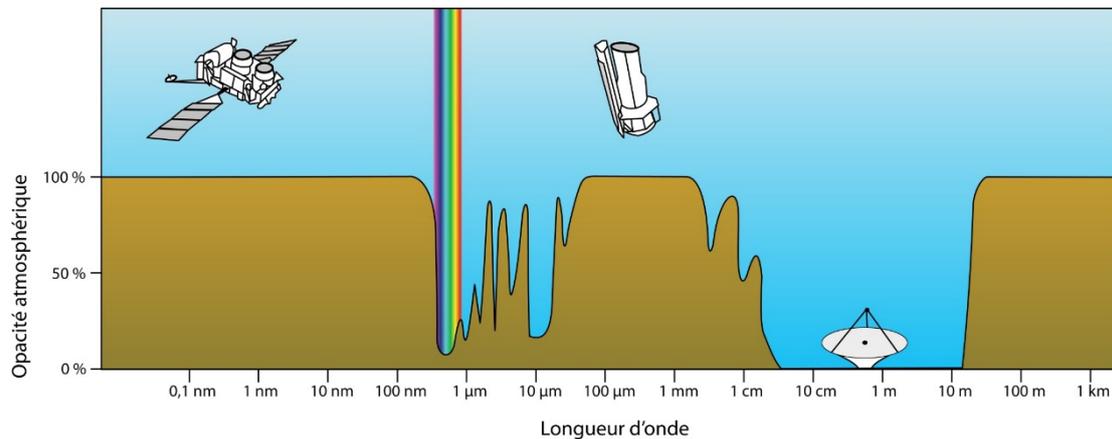
La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique, c'est-à-dire comme la propagation d'une oscillation couplée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Comme toutes les ondes, les rayonnements électromagnétiques sont caractérisés par leur longueur d'onde. Il est très pratique de les classer par longueur d'onde. On obtient alors un spectre électromagnétique.

L'œil n'est sensible qu'à une infime partie du spectre électromagnétique, le spectre visible, qui s'étend d'environ 400 nm (violet extrêmement sombre) à 750 nm (rouge à peine perceptible).



Le spectre électromagnétique. Du haut vers le bas, la longueur d'onde du rayonnement est croissante. Pour des raisons tant historiques que physiques, on divise le spectre électromagnétique en domaines (les rayons X, les infrarouges...), dans lesquels le rayonnement s'étudie par des moyens techniques spécifiques.

Bien heureusement pour la vie, tous les photons émis par les astres n'atteignent pas la surface de notre planète. En effet, l'atmosphère joue le rôle d'un filtre : elle ne laisse pas passer les rayons gamma, les rayons X, une partie des ultraviolets et une partie du rayonnement infrarouge. Il a donc fallu attendre l'avènement du spatial pour exploiter ces domaines riches en information. Au sol, on dispose donc de quelques fenêtres en dehors du visible, situées dans l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio.

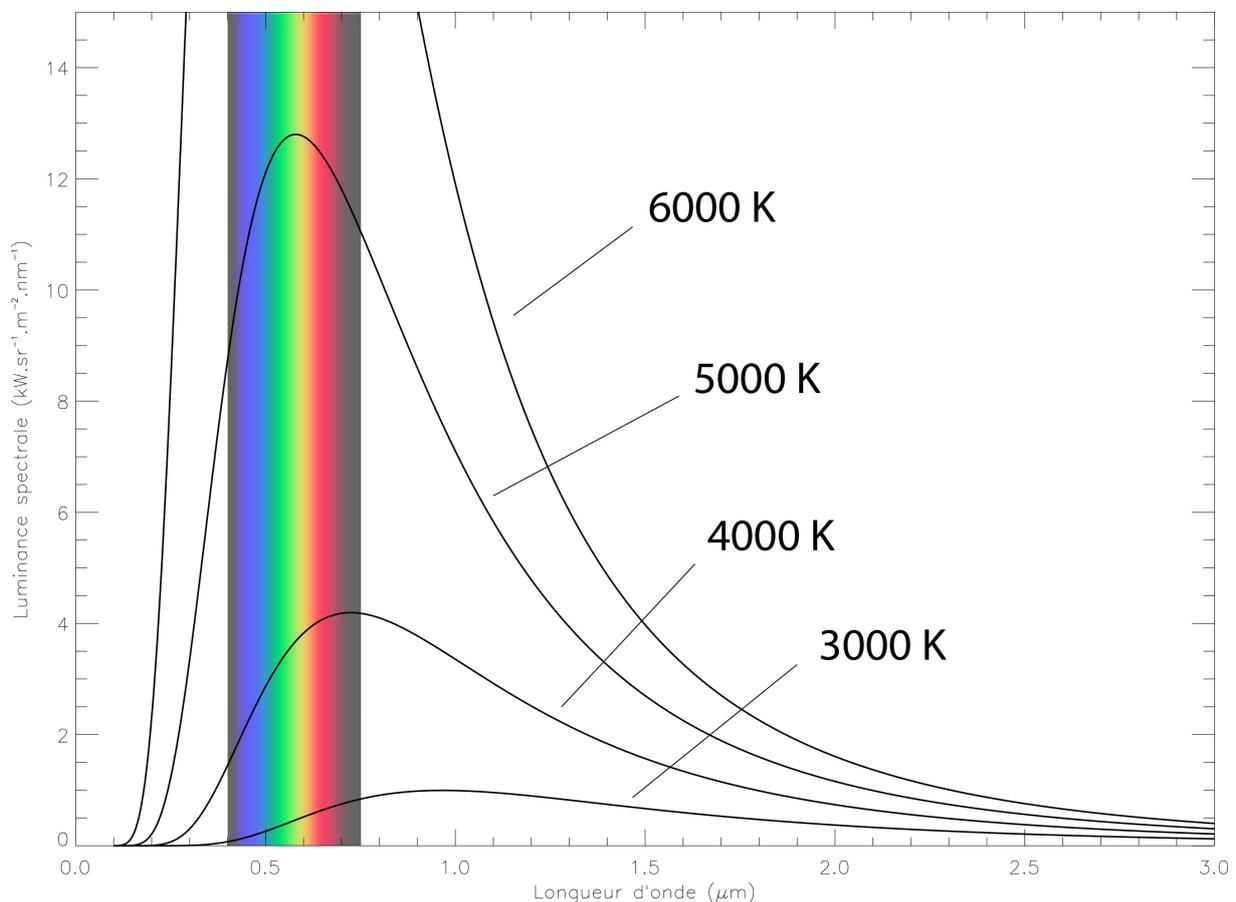


Opacité de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde.
D'après une image de la NASA adaptée par [Mysid](#).

En 1860, Kirchhoff énonce ses trois lois de la spectroscopie qui portent désormais son nom et dont l'application marque l'avènement de l'astrophysique. Ces trois lois peuvent être écrites ainsi :

- un objet chaud incandescent produit un spectre continu ;
 - un gaz produit un spectre de raies de différentes longueurs d'onde dépendant du niveau d'énergie des atomes qu'il contient ;
 - un objet chaud entouré d'un gaz froid produit un spectre présentant des lacunes à certaines longueurs d'onde bien séparées, qui correspondent aux niveaux d'énergie des atomes composant le gaz.
- On comprend immédiatement que la production d'un spectre stellaire ou galactique permet de connaître la présence (ou l'absence) de différentes espèces chimiques dans le gaz qui émet la lumière parvenant au télescope. Au début des années 1960, il fallait à peu près un mois à une équipe de personnes calculatrices pour analyser le spectre d'une étoile. Aujourd'hui, un doctorant effectue la même opération en quinze minutes avec un des logiciels inclus dans son ordinateur portable.
 - Le spectre d'un corps céleste donne également accès au champ magnétique à l'œuvre au lieu d'émission de sa lumière : ses raies spectrales se séparent en plusieurs composantes. C'est l'effet Zeeman, à qui fut attribué le prix Nobel de physique 1902 pour cette découverte.

- L'effet Doppler consiste en un déplacement en longueur d'onde des raies spectrales par rapport aux mêmes raies observées en laboratoire. Le décalage d'une raie vers les petites longueurs d'onde (le bleu) indique que l'astre se rapproche de nous et un décalage vers le rouge, que l'astre s'éloigne. L'effet Doppler est donc très précieux en astronomie car il renseigne sur le mouvement des astres et sur les mouvements de matière à l'intérieur de ces astres.
- La loi de déplacement de Wien relie la température d'un corps à la longueur d'onde où son émission est maximale selon la formule $\lambda_{max} \approx \frac{3000}{T}$ où T est exprimée en kelvin et λ_{max} en micromètre. Une étoile plutôt froide (3 000 K) émet son maximum d'énergie dans l'infrarouge proche, à 1 μm . Le Soleil (près de 6 000 K) vers 0,5 μm (en plein cœur du spectre visible) et une étoile très chaude (30 000 K) dans l'ultraviolet, vers 0,1 μm .



Lorsque la température de surface d'une étoile diminue, l'intensité de son rayonnement diminue également et son pic d'émission se déplace vers les grandes longueurs d'onde.

La loi de Stefan-Boltzmann établit que la puissance rayonnée par l'unité de surface d'un corps est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température. Ainsi, une étoile deux fois plus chaude qu'une autre émet $2^4 = 16$ fois plus d'énergie !

Le Soleil

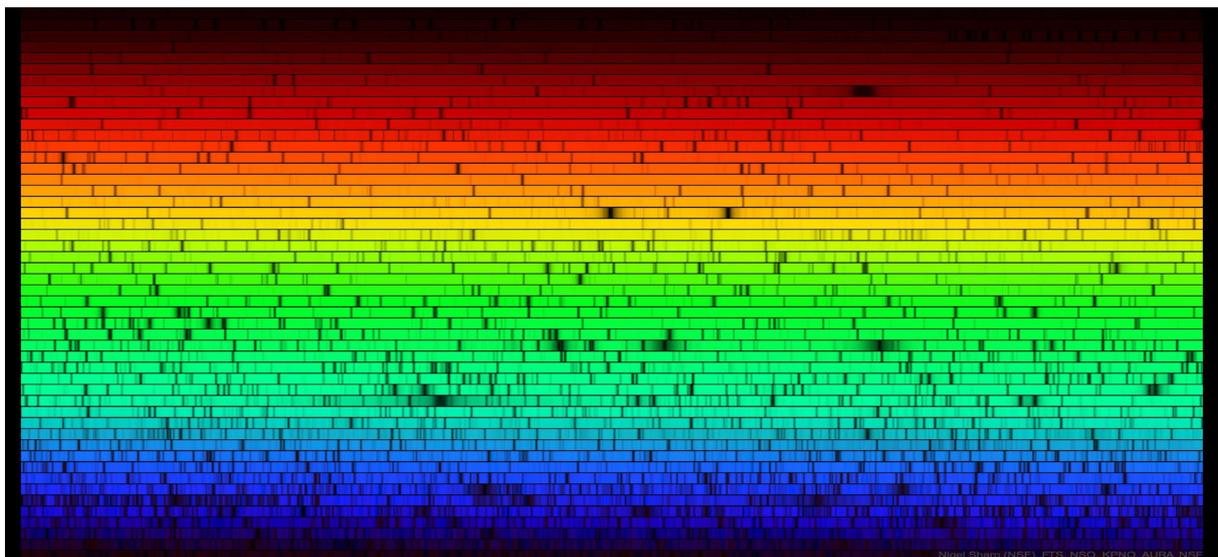
Le Soleil est une étoile tout à fait banale, d'un diamètre de 1 400 000 km et d'une masse équivalente à 330 000 fois celle de la Terre. Il se situe à environ 150 millions de kilomètres de nous. Il est essentiellement composé d'hydrogène (90 %) et d'hélium (10 %) et tourne sur lui-même selon une rotation différentielle : sa période est de 24 jours à l'équateur, 28 jours à une latitude de 30° et 31,5 jours à une latitude de 75°.

Sa surface est parfois constellée de taches. Ce sont des zones où le champ magnétique est intense. Ce champ freine les mouvements de convection qui apportent en surface du matériau chaud venue des zones profondes. Les taches solaires sont donc plus froides que la matière environnante et paraissent sombres par contraste.

Le Soleil perd en permanence de la masse (plus d'un million de tonnes par seconde !) sous la forme d'un vent solaire, constitué de particules chargées comme les protons, les électrons et les noyaux d'atomes d'hélium. Au niveau de l'orbite terrestre, la vitesse du vent solaire est proche de 400 km.s^{-1} .

Le Soleil émet également sporadiquement de la matière lors des éruptions solaires, qui peuvent avoir un impact sur l'atmosphère terrestre, les satellites artificiels et nos réseaux électriques.

Sur Terre, le vent solaire donne naissance aux aurores polaires, ces voiles très colorés dans les ciels nocturnes des régions situées près des pôles magnétiques de notre planète. Elles sont provoquées par l'interaction entre les particules chargées du vent solaire et la haute atmosphère terrestre. L'excitation des molécules, atomes et ions d'azote et d'oxygène sont à l'origine des principales couleurs. L'oxygène émet principalement du vert et du rouge, tandis que l'azote émet du bleu, du rouge et du violet. L'hélium et l'hydrogène produisent des aurores mauves ou bleues.



Le spectre visible du Soleil. Crédit : Nigel Sharp ([NSF](#)), [FTS](#), [NSO](#), [KPNO](#), [AURA](#), [NSF](#).

Classer les étoiles

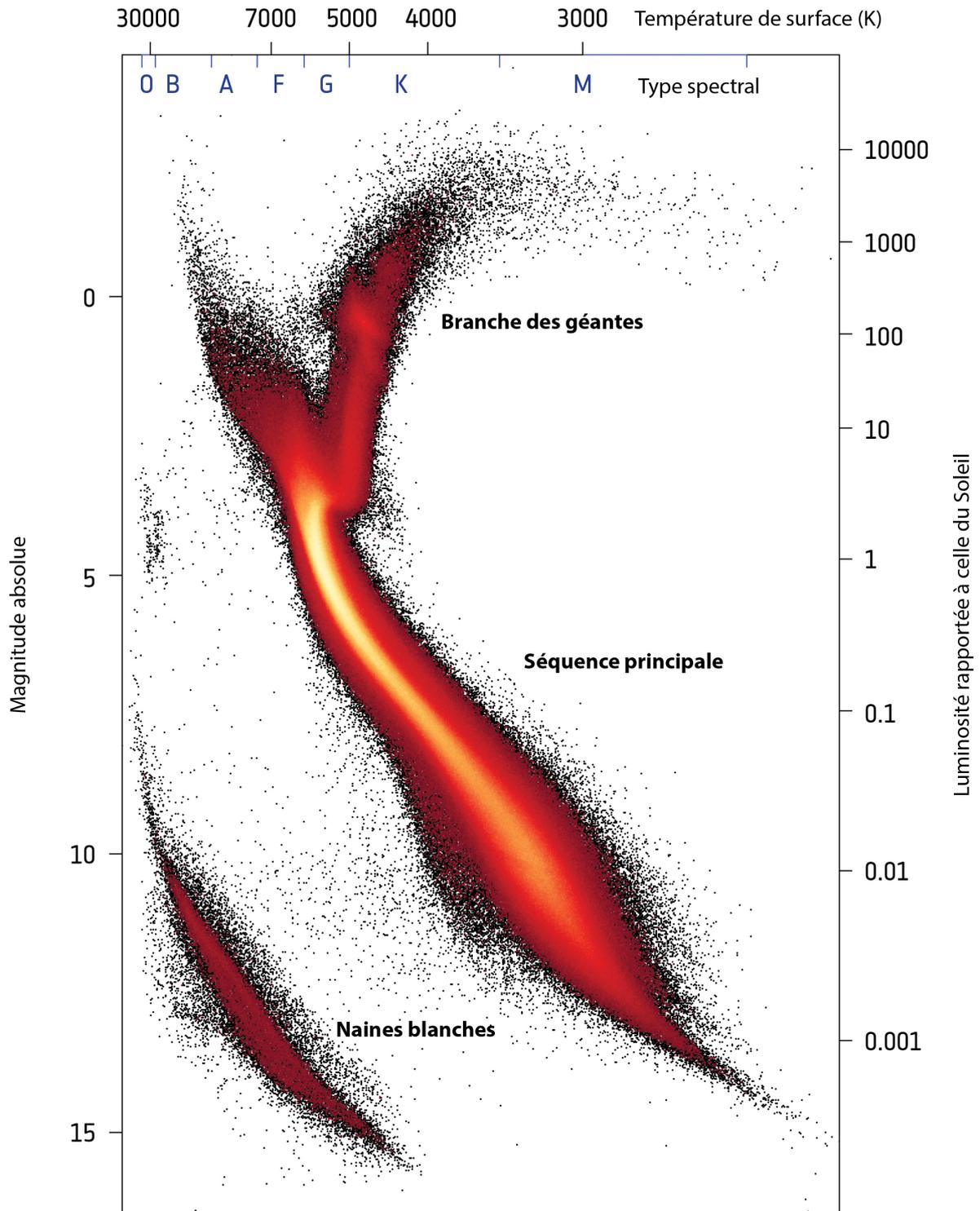
Les étoiles possèdent des caractéristiques qui permettent de les classer. En premier lieu, leur couleur ! En effet, un examen attentif du ciel nocturne vous amènera à conclure que certaines étoiles, parmi les plus brillantes, sont légèrement colorées. Antarès du Scorpion et Bételgeuse d'Orion sont rougeâtres, Arcturus du Bouvier et Aldébaran du Taureau sont orangées alors que Rigel d'Orion et Deneb du Cygne sont légèrement bleutées. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe lié à la loi de Wien, ces différences de couleur ne font que traduire des différences de température de surface.

La classification de Harvard fut créée par Annie Jump Cannon (1863 – 1941) au tournant du XX^e siècle. Elle réarrangea et simplifia le système alphabétique développé par Henri Draper (1837 – 1882) et son système est toujours utilisé aujourd'hui. Les étoiles sont regroupées en type spectral (O, B, A, F, G, K, M) selon les caractéristiques de leur spectre, qui trahissent leur température de surface. Chaque type spectral est subdivisé en dix catégories, allant de 0 pour les étoiles les plus chaudes d'une classe et 9 pour les plus froides. Le Soleil est ainsi une étoile de type G2.

Type spectral	Température (K)	Masse (M _s)	Rayon (R _s)	Luminosité (L _s)	Intensité de la raie d'hydrogène
O	> 30 000	> 16	> 6,6	> 30 000	Faible
B	10 000 – 30 000	2,1 – 16	1,8 – 6,6	25 – 30 000	Moyenne
A	7 500 – 10 000	1,4 – 2,1	1,4 – 1,8	5 – 25	Intense
F	6 000 – 7 500	1,04 – 1,4	1,15 – 1,4	1,5 – 5	Moyenne
G	5 200 – 6000	0,8 – 1,04	0,96 – 1,15	0,6 – 1,5	Faible
K	3 700 – 5 200	0,45 – 0,8	0,7 – 0,96	0,08 – 0,6	Très faible
M	2 400 – 3 700	0,08 – 0,45	< 0,7	< 0,08	Très faible

Les sept types spectraux traditionnels. Les masses, rayons et luminosité sont donnés en fonction de la masse, du rayon et de la luminosité du Soleil. Ils ne s'appliquent qu'aux étoiles adultes, « dans la force de l'âge » et donc situées sur la séquence principale (voir paragraphe suivant).

Le diagramme de Hertzsprung-Russell (ou *diagramme HR*) fut inventé par Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967) et Henry Norris Russell (1877 – 1957) au début du XX^e siècle. Il consiste à placer une grande distribution d'étoiles en fonction de leur couleur (c'est-à-dire leur température de surface) et de leur magnitude absolue. On s'aperçut alors que la plupart d'entre elles se situaient sur une diagonale que l'on appelle *séquence principale*. On a montré plus tard qu'elle est constituée d'étoiles d'âge adulte qui transforment tranquillement leur hydrogène en hélium. Pour ces étoiles dans la force de l'âge, plus elles sont massives, plus elles sont chaudes et brillantes.



Plus de quatre millions d'étoiles situées à moins de cinq mille années-lumière du Soleil sont portées sur ce diagramme. Les données proviennent de la seconde version du catalogue Gaia, diffusé en avril 2018.
 Crédit : ESA / Gaia / DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO.

Quelques astres sortent de cette séquence principale : brillants mais froids, chauds mais peu lumineux. Comment comprendre ce fait ? Deux paramètres influencent la luminosité intrinsèque d'une étoile : sa température T et la surface à travers laquelle elle rayonne (donc son rayon R). On montre que cette luminosité est proportionnelle à T^4 et à R^2 . Certaines étoiles atypiques sont intrinsèquement très lumineuses. Or, leur température de surface T n'excède pas 3 000 K. Aussi, pour être aussi lumineuses, elles doivent posséder un rayon gigantesque. Elle est donc du type « géante » ou « supergéante ». D'autres étoiles atypiques sont très peu lumineuses malgré des températures de surface supérieures à 25 000 K. Leur surface doit donc être toute petite. Il s'agit d'étoiles naines, dont on montre qu'elles doivent avoir une taille comparable à celle de la Terre. Ce sont des « naines blanches ».

On peut aussi classer les étoiles en fonction de leur masse. L'éventail des masses s'étale de 0,1 masse solaire à plus de 100 masses solaires, les plus massives étant les plus rares et les moins massives... les plus fréquentes. En-dessous de 0,1 masse solaire, les pressions et les températures ne sont pas suffisantes pour enclencher des réactions nucléaires et au-dessus de 200 à 300 masses solaires, leur luminosité est si grande que la pression des photons émergeant disloque littéralement l'étoile.

Les plus grandes étoiles connues sont des supergéantes rouges dont le diamètre dépasse le milliard de kilomètres. Si on les mettait à la place du Soleil, elles engloberaient toutes les planètes jusqu'à Jupiter voire Saturne !

Enfin, on peut classer les étoiles en fonction de leur spectre et donc, en partie, en fonction de leur composition chimique dont on montre qu'elle est finalement assez homogène.

Les étoiles et leur fonctionnement

Le Soleil et les étoiles sont d'énormes boules de gaz dont la surface, très chaude, émet de la lumière. Leur vie est un combat permanent, un équilibre entre la gravité qui tend à les faire s'effondrer sur elles-mêmes et la pression des gaz qui résistent à cet effondrement.

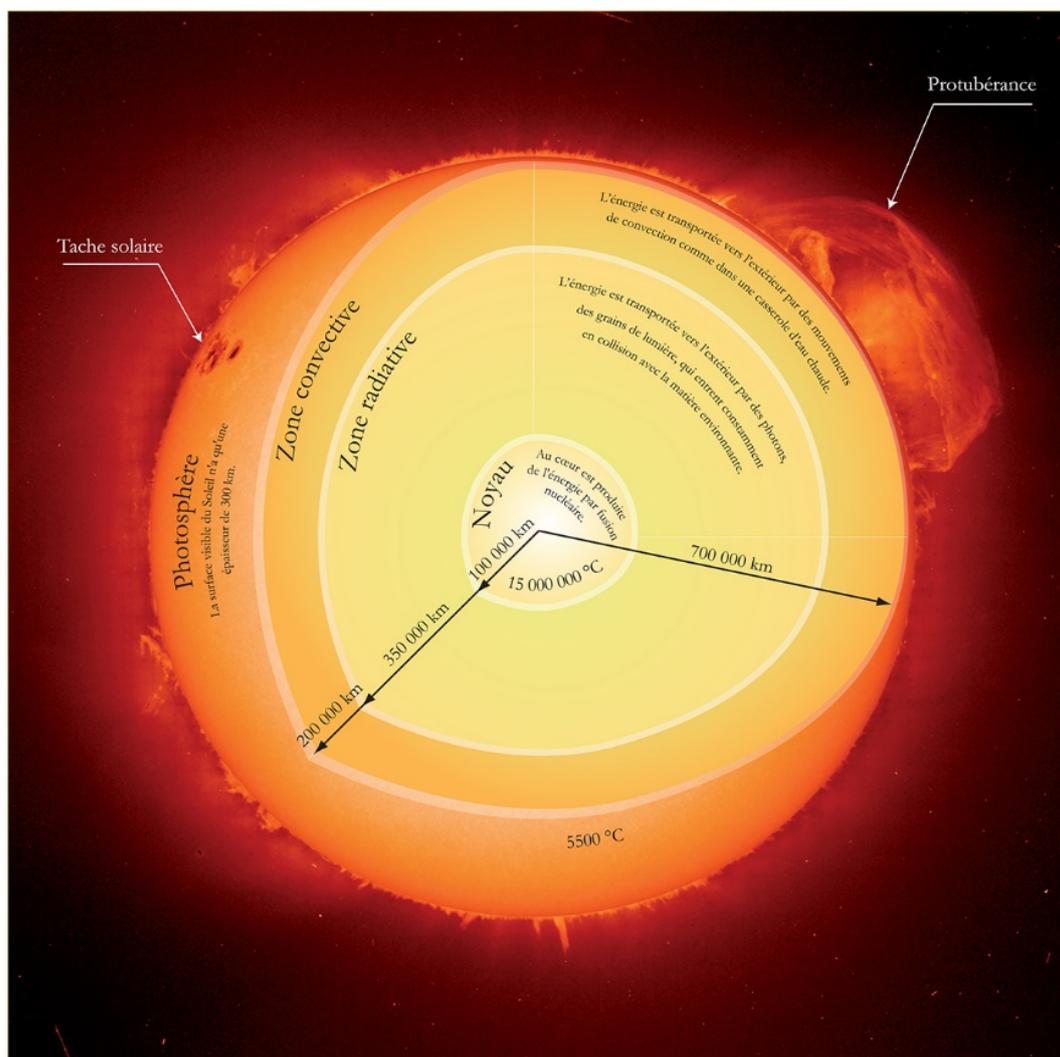
Une étoile brille parce que sa surface est chaude. Au bout de quelques millions d'années, l'étoile devrait s'être suffisamment refroidie pour disparaître à notre regard. Or, notre Soleil a déjà près de 5 milliards d'années. Il possède donc une source d'énergie interne qui lui permet de briller depuis si longtemps. En son cœur, là où les températures et les pressions sont extrêmes, des réactions nucléaires produisent de l'énergie en transformant de l'hydrogène en hélium. Des modèles confortés par diverses observations nous apprennent que l'énergie produite à l'intérieur du Soleil est transportée vers l'extérieur, d'abord par rayonnement, puis par mouvements de convection pour enfin atteindre la surface et s'échapper principalement sous forme de lumière visible.

Rappelons que les trois modes de transfert de la chaleur sont :

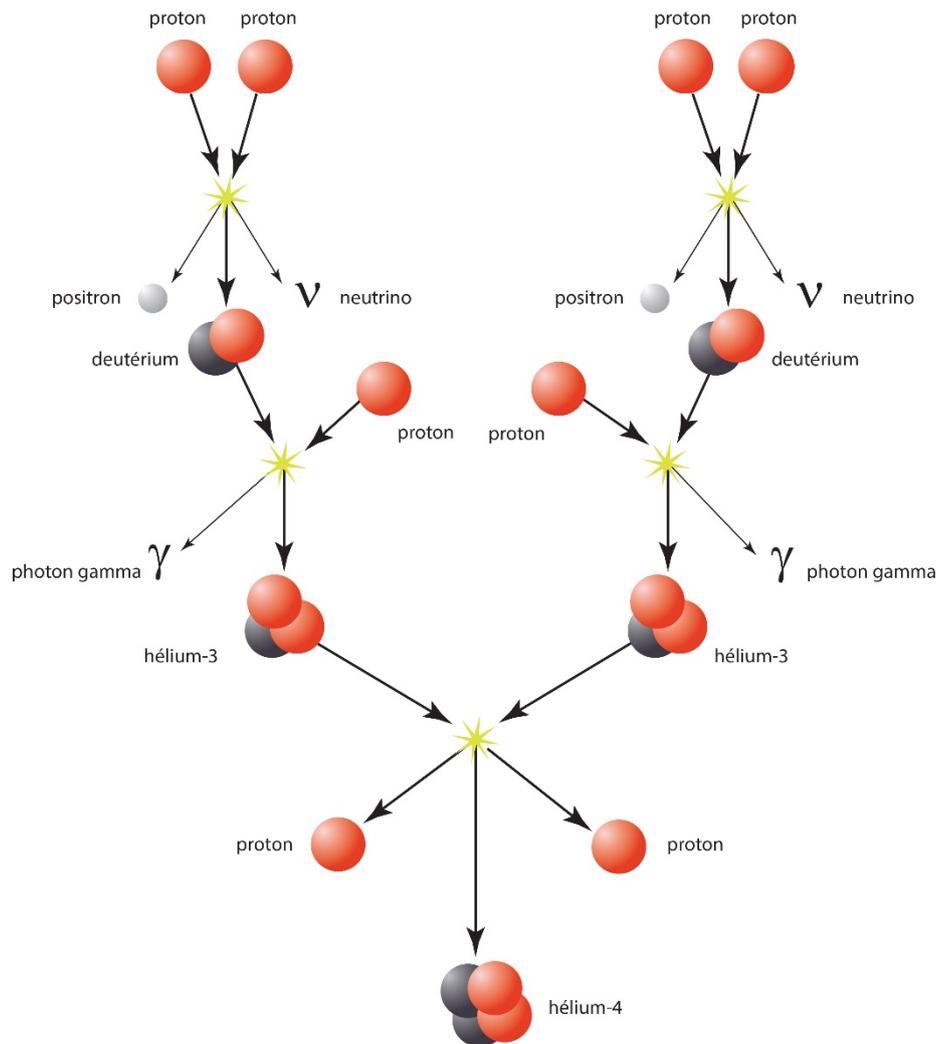
- la **conduction**, provoquée par une différence de température entre deux régions voisines en contact, sans déplacement de matière. Elle concerne donc les solides et les fluides immobilisés ;

- la **convection**, qui s'accompagne de mouvements macroscopiques de matière dans un fluide et à l'interface entre un solide et un fluide ;
- le **rayonnement**, qui peut se réaliser dans le vide.

L'énergie est produite au cœur du Soleil sous la forme de photons gamma, extrêmement énergétiques. Ce cœur est entouré d'une première coquille très dense, appelée zone radiative. Les photons gamma y passent un temps considérable, étant absorbés, réémis, réabsorbés, etc., par la matière environnante. Le transport de l'énergie se fait donc par rayonnement, de proche en proche, de choc en choc. À mesure que l'énergie est transportée par les photons vers l'extérieur, ils se font de moins en moins énergétiques : de photons gamma, ils deviennent photons X puis ultraviolets etc. La faible opacité des couches supérieures facilite les mouvements de matière. Le mode de transport d'énergie change, une zone convective prend le relais jusqu'à la surface. Comme dans une casserole d'eau bouillante, la matière chaude en profondeur monte, puis se refroidissant redescend : la matière est ainsi brassée et l'énergie s'achemine par convection. L'énergie est ainsi transportée du cœur vers la surface qu'elle maintient à une température de 5 500 °C. La lumière est alors libre de s'échapper vers l'espace : le Soleil rayonne.



Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux noyaux d'hydrogène, c'est-à-dire deux protons. Cette fusion donne naissance à un positron, à un neutrino et à un noyau de deutérium, formé d'un proton et d'un neutron. Le deutérium capture un proton pour former un noyau d'hélium 3 et un photon gamma très énergétique. Enfin, deux noyaux d'hélium 3 réagissent pour former un noyau d'hélium 4 et deux protons.



Au final, quatre protons fusionnent pour donner un noyau d'hélium. Or, la masse d'un noyau d'hélium est inférieure à la somme des masses des quatre protons initiaux. Le défaut de masse Δm est transformé en énergie ΔE , selon la célèbre formule d'Einstein $\Delta E = \Delta mc^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide (notez bien qu'Einstein a trouvé cette formule dans un contexte complètement différent et qu'il n'avait pas alors pensé qu'on pouvait l'appliquer aux étoiles !). Ainsi, chaque seconde, le Soleil convertit environ 600 millions de tonnes d'hydrogène en 596 millions de tonnes d'hélium. Quatre millions de tonnes sont converties en énergie.

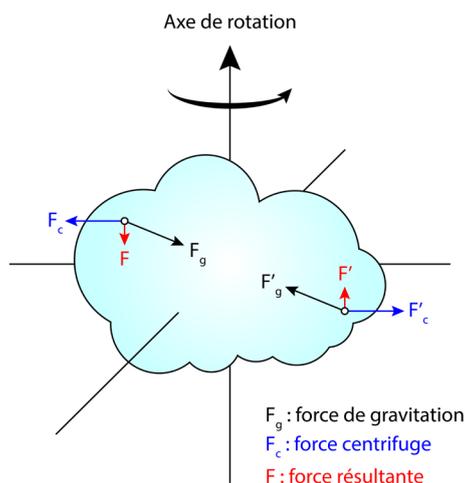
Les neutrinos sont des particules extrêmement légères issues directement des réactions nucléaires. Ils n'interagissent que très peu avec la matière, ce qui rend leur détection particulièrement difficile. L'expérience japonaise Super-Kamiokande – un bassin rempli de 50 000 tonnes d'eau ultra-pure et bardé de capteurs – a permis aux astronomes de détecter des neutrinos solaires, confirmant ainsi que la source d'énergie du Soleil réside bien dans des réactions thermonucléaires.

Pendant une très grande partie de sa vie, les étoiles connaissent une phase de stabilité durant laquelle elles convertissent leur hydrogène central en hélium. Il est assez contre-intuitif de se dire que plus une étoile est massive, plus sa durée de vie sera courte. En effet, malgré des réserves en hydrogène plus importantes, les étoiles massives le consomment à un rythme effréné. Ainsi, une étoile de 60 masses solaires a une durée de vie de 3 millions d'années alors qu'une étoile 10 fois moins massive que la nôtre devrait vivre 1000 milliards d'années !

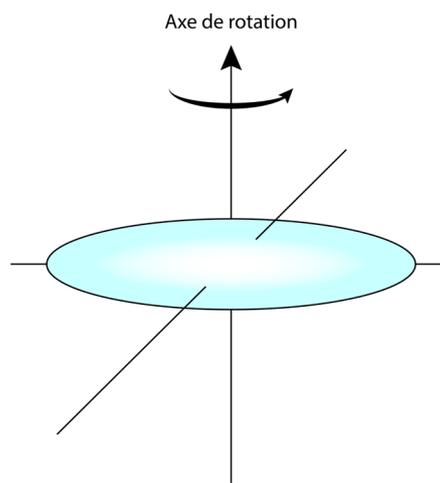
Naissance du Soleil et des planètes...

C'est grâce à l'étude détaillée de tous les corps du système solaire, à l'analyse des météorites et aux simulations numériques que l'on a pu reconstituer un scénario vraisemblable des premiers âges du système solaire. Il serait né il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années, de la contraction sous l'effet de sa propre masse d'un nuage de gaz et de poussières en rotation. En s'effondrant, ce nuage aurait pris la forme d'un disque dont la partie centrale aurait formé le Soleil tandis que les parties extérieures, plus froides et riches en poussières, auraient donné naissance aux planètes et aux satellites. S'il existe encore de nombreuses zones d'ombre dans ce scénario, il est aujourd'hui possible de le confronter à l'observation d'autres systèmes stellaires en formation.

De nombreux nuages de gaz froid existent dans notre Galaxie. Ils sont constitués très majoritairement d'hydrogène et d'hélium. Il y a environ 4,6 milliards d'années, l'un d'eux devient instable, peut-être sous l'effet de l'explosion d'une étoile proche, et s'effondre. Au cours de l'effondrement, la température augmente et le nuage se met à tourner de plus en plus rapidement sur lui-même. Ce mouvement de rotation conduit à l'aplatissement du nuage sous la forme d'un disque de gaz chaud, entourant le proto-Soleil.



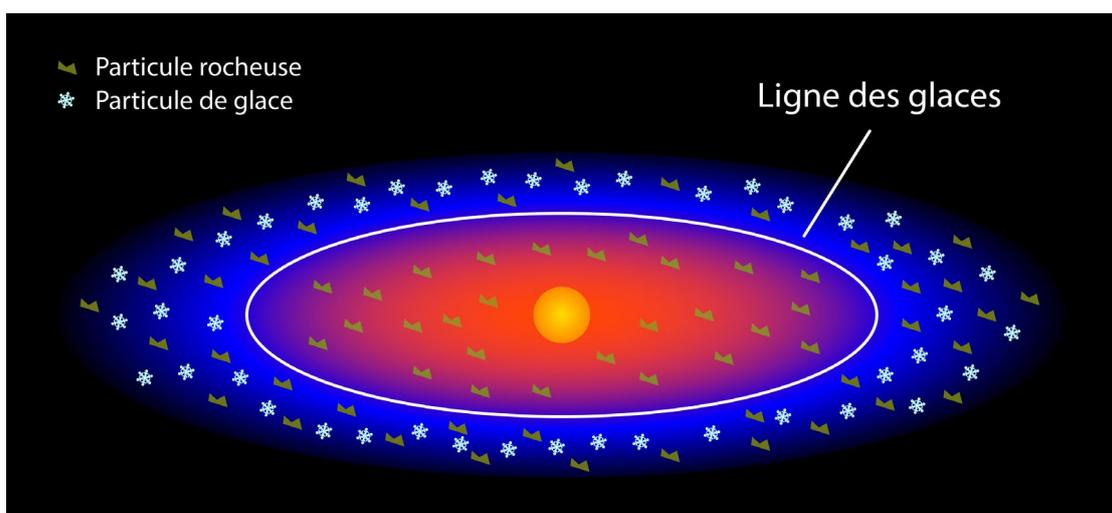
Nuage de gaz



Disque protoplanétaire

Comment la contraction d'un nuage de gaz en rotation soumis à son propre poids conduit à son aplatissement. Chaque particule de ce gaz est soumise à la fois à une force d'origine gravitationnelle due à toutes les autres particules et à une force centrifuge due à la rotation d'ensemble du nuage. La résultante de ces deux forces tend à la faire descendre dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

Après sa formation, le disque protoplanétaire se refroidit lentement, permettant ainsi aux gaz de condenser. Près du proto-Soleil, où la température est élevée, seuls les grains les plus réfractaires comme les éléments silicatés, carbonés ou contenant du fer condensent. Plus loin, au-delà de quatre à cinq unités astronomiques, il fait suffisamment froid pour que des glaces se forment (ligne des glaces). Cela explique la différence de composition chimique entre les planètes telluriques, proches du Soleil, riches en roches ainsi qu'en métaux, et les planètes géantes, riches en éléments volatils comme l'eau, le méthane et l'ammoniac.



Stratification du disque protoplanétaire ayant engendré les planètes du système solaire. Les gaz hydrogène et hélium, qui ne condensent pas, constituent 98 % de la matière de la nébuleuse solaire. En-deçà de la ligne des glaces se forment silicates et métaux mais pas de glaces. Au-delà, elles apparaissent.

L'étape qui mène des premiers grains condensés à des corps de taille kilométrique (les planétésimaux) est encore mal comprise. Soit ce processus se fait progressivement par collage des grains lors de collisions, soit il se déroule beaucoup plus rapidement par instabilité gravitationnelle dans le disque. Une fois les planétésimaux formés, ils continuent à croître par collisions mutuelles, leur propre gravité les maintenant soudés après l'impact. Ainsi se forment des embryons de planètes de taille lunaire. Dans une dernière phase, des collisions se produisent entre les embryons, qui ne laissent finalement qu'un petit nombre de planètes.

Les simulations numériques montrent comment le processus d'accrétion (c'est-à-dire la capture de matière sous l'effet de la gravitation) se fait de manière sélective. Les corps initialement les plus massifs vont avoir tendance à accréter plus facilement ce qu'il y a autour d'eux. L'emballement de ce processus est typique d'un « effet boule de neige », les corps les plus gros croissant de plus en plus vite.

Les simulations numériques suggèrent que, dans le système solaire externe, les embryons planétaires puissent devenir de 10 à 1 000 fois plus massifs que dans le système solaire interne. En effet, loin du Soleil, la zone d'alimentation d'un embryon est à la fois plus étendue et plus riche en matériau solide (présence des glaces) que près de notre étoile. Ainsi, dans le cas de Jupiter, un embryon de roche et de glace d'une quinzaine de masses terrestres se forme en un million d'années. Avec une telle masse, il accrète progressivement une enveloppe de gaz. Quand la masse du gaz devient comparable à celle de l'embryon, l'accrétion du gaz s'emballe de manière violente. L'embryon s'entoure d'une atmosphère très massive et devient une protoplanète géante.

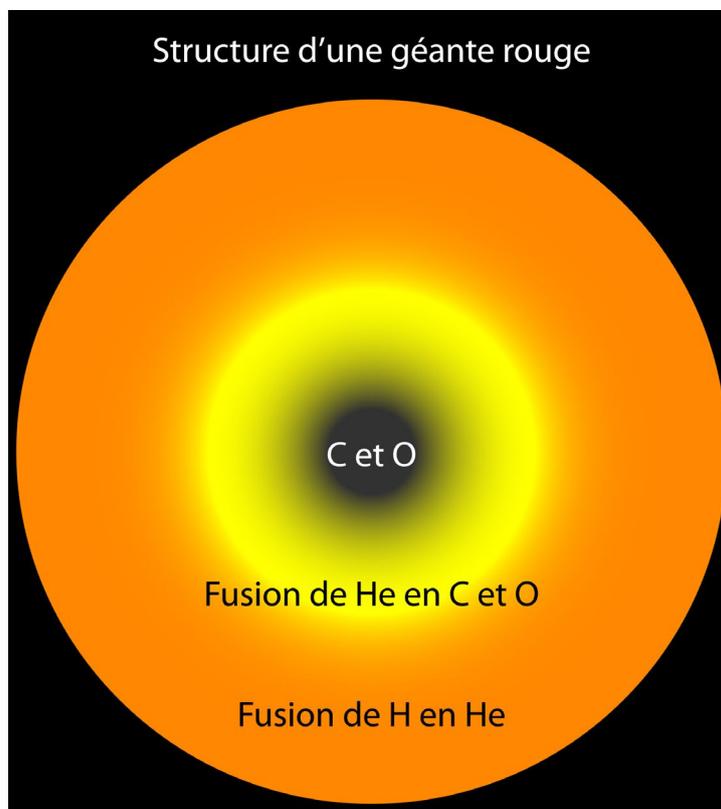
Le déclenchement de réactions nucléaires marque l'accession du Soleil au statut d'étoile. Les observations des disques circumstellaires montrent qu'ils disparaissent en moins de 10 millions d'années, peut-être sous l'action conjointe d'un vent stellaire intense et de la photoévaporation due au rayonnement ultraviolet de l'étoile. La disparition du disque met un terme à la croissance des planètes géantes. Jupiter et Saturne ont alors atteint une masse respective d'environ 300 et 100 masses terrestres. Uranus et Neptune, situées très loin du Soleil, sont beaucoup moins massives (une quinzaine de masses terrestres) et n'ont sans doute pu atteindre la phase d'accrétion violente du gaz avant la dissipation du disque. Les simulations numériques montrent que, près du Soleil, les planètes telluriques atteignent leur taille actuelle en une centaine de millions d'années.

Certains scénarios suggèrent que les planètes géantes ne se soient pas formées à l'endroit où elles se situent aujourd'hui : elles auraient migré jusqu'à leurs positions actuelles. Ainsi, dans le modèle dit de « Nice » (nommé ainsi car il fut initialement développé à l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice. De plus, on peut apprécier le jeu de mots en anglais, « the Nice model »), les planètes géantes auraient été initialement groupées plus près du Soleil. Jupiter se serait ensuite déplacé légèrement vers l'intérieur tandis que la migration des trois autres planètes vers l'extérieur aurait donné lieu à des phénomènes dynamiques violents et chaotiques, créant au passage la ceinture de Kuiper, le réservoir des comètes (nuage de Oort) ainsi que le « grand bombardement tardif », il y a entre 4,1 et 3,8 milliards d'années, ayant par exemple laissé de nombreux cratères d'impact sur la Lune.

... et mort des étoiles

Le destin d'une étoile est entièrement inscrit dans sa masse. Lorsqu'une fraction suffisante du cœur d'hydrogène aura été transformé en hélium, la source d'énergie de l'étoile se tarit, son cœur se contracte et donc se réchauffe pour atteindre 100 millions de degrés. De nouvelles réactions nucléaires se mettent alors en place. En voici les étapes. Deux noyaux d'hélium 4 fusionnent pour former un noyau de béryllium 8. Malgré la durée de vie extrêmement faible de celui-ci, il s'en crée suffisamment pour qu'ils rencontrent et fusionnent avec un noyau d'hélium 4 pour former un noyau de carbone 12 avec dégagement d'énergie. Comme effet secondaire du processus, certains noyaux de carbone 12 peuvent fusionner avec des noyaux d'hélium 4 additionnels en produisant de l'oxygène 16 avec libération d'énergie. Toutes ces phases créent un surplus d'énergie auquel l'étoile s'adapte en grossissant d'un facteur 100 à 200. Sa surface, alors très éloignée de la source de chaleur, refroidit : l'étoile est devenue une géante rouge. Notre Soleil devrait devenir une géante rouge d'ici quelques milliards d'années. Il avalera peut-être la Terre... sur laquelle, de toute façon, il devrait déjà faire plus de 1000 degrés.

Pour des étoiles dont la masse est inférieure à 6 – 8 masses solaires, on obtient au centre un cœur inerte de carbone et d'oxygène, autour une couche d'hélium dont la base se transforme en carbone et en oxygène, et encore au-dessus, une couche d'hydrogène dont la base se transforme en hélium.



Les dernières phases sont encore mal connues. L'étoile semble s'animer de pulsations d'origine thermique et devient le siège d'un vent stellaire très intense qui la dépouille de son atmosphère en quelques millions d'années. Cette dispersion entraîne avec elle les produits de la combustion de l'hélium, dont le carbone, ce qui participe à l'enrichissement chimique de la Galaxie. L'étoile dévoile ainsi des couches internes chaudes : sa température de surface augmente et, au-delà de 30 000 degrés environ, le flux ultraviolet ionise l'enveloppe expulsée. Ce phénomène est à l'origine des nébuleuses planétaires, éphémères et spectaculaires structures gazeuses multicolores. Ces enveloppes se diluent dans l'espace en quelque 100 000 ans. Au cœur de la nébuleuse planétaire, il y a un cadavre inerte et dense de carbone et d'oxygène appelé naine blanche. Un astre de la taille de la Terre mais d'une masse comparable à celle du Soleil ! Un cm^3 de naine blanche a une masse de plusieurs tonnes.



NGC 7293 (ou *nébuleuse de l'hélice*) est une nébuleuse planétaire au centre de laquelle trône une naine blanche. Crédit : NASA / ESA et C.R. O'Dell (Université Vanderbilt, Nashville, Tennessee, États-Unis).

Les étoiles plus massives ne s'arrêtent pas au stade du carbone et de l'oxygène. Leurs températures et pressions centrales permettent la fusion nucléaire de ces éléments en néon 20, puis magnésium 24, silicium 28 et fer 56. Chaque réaction demande des conditions de température et de pression plus importantes que la réaction précédente, l'étoile alterne donc les phases de fusion, d'arrêt des réactions et de contraction du cœur avec réchauffement. Il se forme une structure en pelure d'oignon avec, du centre vers l'extérieur, des zones de réaction du silicium, de l'oxygène, du carbone, de l'hélium et de l'hydrogène. Lorsque l'étoile en arrive au stade ultime et produit du fer (à 5 milliards de degrés !), il n'est plus possible de produire de l'énergie par fusion, le fer étant l'élément le plus stable. À ce moment-là, les réactions de fusion dans le cœur s'arrêtent définitivement, et le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même, devenant un astre très dense et dur. Le reste de l'étoile suit l'effondrement avec retard et rebondit sur le cœur : l'étoile explose, c'est une supernova, qui va conduire à la création d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Il s'agit d'un événement très rare et qui libère une quantité d'énergie phénoménale en un temps très bref, de quelques heures à quelques jours au plus.

La gravité est telle dans une étoile à neutrons que les électrons sont poussés à l'intérieur des noyaux pour former des neutrons. Il s'agit d'un astre de la masse d'une étoile mais de la taille d'une ville comme Paris ! Un cm^3 d'étoile à neutrons possède une masse de plusieurs centaines de millions de tonnes... Un trou noir, lui, est un objet céleste si compact que son champ gravitationnel empêche toute matière ou tout rayonnement de s'en échapper. On les étudie indirectement grâce à l'effet qu'ils impriment sur la matière qui les environne :

- happée par lui, l'augmentation de température due aux frottements font émettre à la matière attirée puis engloutie de grandes quantités de rayonnement énergétique (rayons X ou gamma) que l'on peut capter sur Terre ;
- en appliquant la 3^e loi de Kepler, on peut également avoir accès à la masse centrale invisible autour de laquelle tournent certaines étoiles. On a ainsi découvert des trous noirs de masse stellaire mais aussi des trous noirs supermassifs, de plusieurs millions voire milliards de masses solaires au cœur des galaxies... dont la nôtre !

La structure de l'Univers observable

En cosmologie, on utilise l'expression d'*Univers observable* pour désigner la partie visible de notre Univers. Comme notre Univers a un âge fini, la lumière des objets situés au-delà de l'horizon cosmologique n'a pas eu le temps de parvenir jusqu'à nous et ces objets sont donc invisibles ; néanmoins, l'Univers observable s'agrandit au cours du temps : le rayon de l'Univers visible est ainsi une année-lumière plus grand chaque année... et même plus en tenant compte de l'expansion de l'Univers.

Partons de notre environnement proche, le système solaire, dont le Soleil représente environ 99,86 % de la masse. Exprimées par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière dans le vide (proche de $300\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), les distances moyennes des planètes au Soleil s'étagent de 3,2 minutes-lumière pour Mercure à 4,2 heures-lumière pour Neptune. La limite externe du nuage de Oort, réservoir hypothétique des comètes à longue période, se situerait à 2 ou 3 années-lumière de nous et marquerait la frontière de la zone d'influence gravitationnelle du Soleil. Les étoiles les plus proches du Soleil sont à quelques années-lumière.

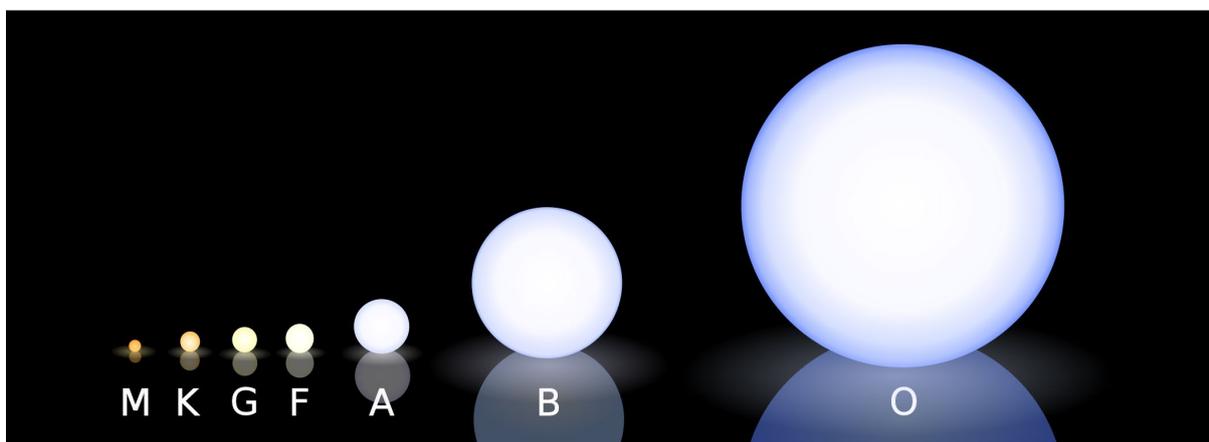
Liste des étoiles et naines brunes situées à moins de 10 années-lumière du Soleil

Système	Nom	Nature	Distance (années-lumière)	Magnitude
Alpha du Centaure	Proxima du Centaure	Naine rouge	4,2441 ± 0,0011	11,09
	Alpha du Centaure A	Naine jaune	4,3650 ± 0,0068	0,01
	Alpha du Centaure B	Naine orange	4,3650 ± 0,0068	1,34
	Etoile de Barnard	Naine rouge	5,9577 ± 0,0032	9,53
Luhman 16	Luhman 16A Luhman 16B	Naine brune Naine brune	6,5029 ± 0,0011	10,7 à 1,25 μm
	WISE 0855-0714	Sous-naine brune	7,26 ± 0,13	25,0 à 1,25 μm
	Wolf 359	Naine rouge	7,856 ± 0,031	13,54
	Lalande 21185	Naine rouge	8,307 ± 0,014	7,47
Sirius	Sirius A	Étoile blanche	8,659 ± 0,010	-1,47
	Sirius B	Naine blanche		8,44
Luyten 726-8	Luyten 726-8 A	Naine rouge	8,791 ± 0,012	12,7
	Luyten 726-8 B	Naine rouge		13,2
	Ross 154	Naine rouge	9,7035 ± 0,0019	10,43

Note : en rouge, les étoiles visibles à l'œil nu. Le cas d'alpha du Centaure est particulier puisque ses composantes A et B, liées par la gravitation, ne sont séparées que de 1,7'' au minimum à 22'' au maximum. Ces valeurs étant inférieures aux capacités de séparation de l'œil, alpha du Centaure est vue sous la forme d'une seule étoile de magnitude -0,27.

Quelques explications sur le tableau de la page précédente : en astronomie, une étoile est dite « naine » quand elle se trouve sur la séquence principale. Ainsi, le Soleil est une étoile de type *naine jaune*. Par ordre décroissant de température de surface, on trouve :

- les étoiles bleues de la séquence principale (type O) ;
- les étoiles bleu-blanc de la séquence principale (type B) ;
- les étoiles blanches de la séquence principale (type A) ;
- les étoiles jaune-blanc de la séquence principale (type F) ;
- les naines jaunes (type G) ;
- les naines orange (type K) ;
- les naines rouges (type M).



Comparaison entre des étoiles de la séquence principale de différent type spectral. Crédit : [Rursus](#).

Attention aux noms trompeurs ! Les naines blanches et les naines brunes désignent des états de l'évolution stellaire complètement différents : les naines blanches sont des résidus compacts d'étoile, de masse solaire, ne produisant plus de réactions nucléaires, de faible luminosité et de température de surface élevée ; les naines brunes sont des astres ayant une constitution et un mode de formation similaires à ceux d'une étoile, mais une masse initiale insuffisante pour entretenir la fusion nucléaire de l'hydrogène. Enfin, une sous-naine brune désigne un objet libre de masse planétaire (masse inférieure à 13 fois celle de Jupiter), qui ne tourne donc pas autour d'une étoile. Certains auteurs préfèrent l'expression « planète flottante ». Un tel corps ne s'est pas formé comme une planète (dans un disque de gaz entourant une proto-étoile), mais comme une étoile, par effondrement d'un nuage de gaz sous l'effet de son propre poids.

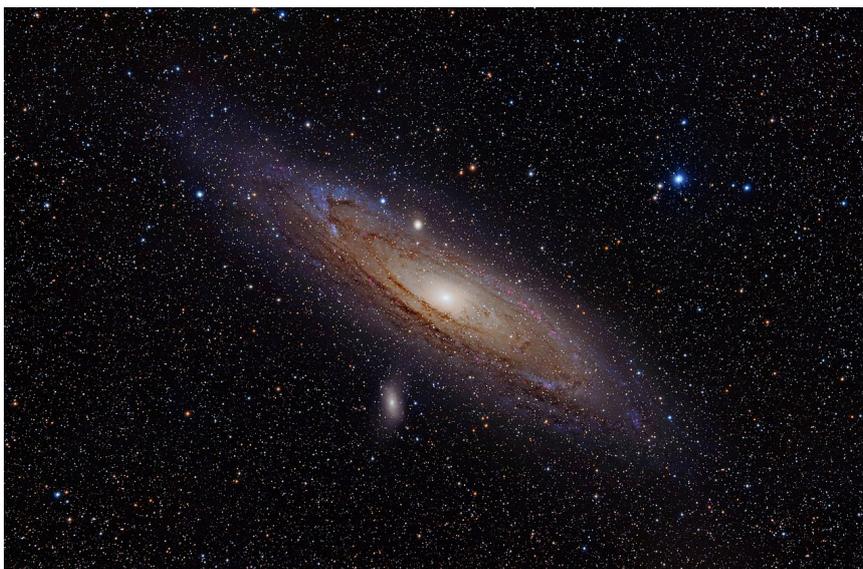
Les étoiles se rassemblent au sein de gigantesques concentrations appelées *galaxies*. Notre galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale barrée qui comprend plus de 200 milliards d'étoiles. Son diamètre s'élève à 100 000 années-lumière. Le Soleil et son petit cortège de planètes sont excentrés, à environ 30 000 années-lumière du centre, où l'on trouverait un trou noir supermassif de 4 millions de masses solaires. Des centaines de milliards de galaxies peuplent l'Univers observable.



La Voie lactée vue depuis l'observatoire de Cerro Paranal au Chili. Crédit : ESO / Y. Beletsky.

La Voie lactée est accompagnée de deux petites galaxies (les Nuages de Magellan) et de quelques galaxies naines. Avec la galaxie d'Andromède (M31) et ses galaxies satellites, elle forme le Groupe local, un amas de galaxies d'une taille proche de 10 millions d'années-lumière et constitué d'une cinquantaine de membres.

La Voie lactée et M31 se rapprochent l'une de l'autre avec une vitesse supérieure à 100 km.s^{-1} . Elles pourraient entrer en collision d'ici 3 à 4 milliards d'années, avec un risque de collisions entre étoiles extrêmement faible, pour former une galaxie elliptique géante.



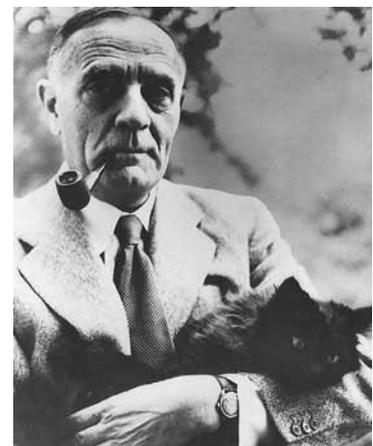
La galaxie d'Andromède est située à environ 2,55 millions d'années-lumière. Crédit : [Adam Evans](#).

Le Groupe local fait partie d'un superamas de galaxies appelé superamas de la Vierge, nommé ainsi car l'amas de la Vierge est en son cœur. Ce superamas possède un diamètre d'environ 200 millions d'années-lumière et regroupe près de 10 000 galaxies réparties dans une centaine d'amas. Les superamas sont les plus grandes structures connues dans l'Univers. L'espace entre eux est quasiment dépourvu de matière. À très grande échelle, notre Univers ressemble à une éponge : de grands vides aux frontières desquels on trouve des filaments ou des murs de galaxies, connectant des nœuds (situés au cœur des superamas) dont on ressent l'attraction gravitationnelle à des centaines de millions d'années-lumière voire plus. Nœuds et filaments constituent le squelette de ce qu'on appelle la toile cosmique.

L'expansion de l'Univers

Des modèles prévoyant l'expansion de l'Univers à partir de la relativité générale sont proposés par Alexandre Friedmann (1888 – 1925) en 1922 puis, de manière indépendante, par le chanoine catholique Georges Lemaître (1894 – 1966) en 1927. De plus, en fondant sa réflexion sur les mesures de vitesses d'éloignement des galaxies de Vesto Slipher (1875 – 1969) et sur la mesure de quelques-unes de leurs distances par Edwin Hubble, Lemaître établit dès 1927 que le rapport distance / vitesse d'éloignement est une constante, qu'il évalue et que l'on a appelé jusqu'en 2018... constante de Hubble. Cruel, non ? Il faut dire que Lemaître a publié ses travaux en français dans un article paru dans les *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, auquel très peu d'astronomes avaient accès.

En 1923, Edwin Hubble (1889 – 1953) eut la chance de pouvoir utiliser le plus grand télescope du monde à son époque, qui venait d'être achevé. Situé sur le Mont Wilson en Californie, le télescope *Hooker* était doté d'un miroir de 2,5 m de diamètre. Grâce à lui, Hubble détecta des étoiles variables de type *céphéides* dans des nébuleuses dont on se demandait si elles appartenaient ou pas à la Voie lactée. Ces étoiles sont très brillantes et donc visibles de très loin. En 1908, Henrietta Leavitt avait démontré que la période de variation de la luminosité d'une céphéide était fonction de sa magnitude absolue. Hubble mesura donc cette période pour les céphéides qu'il a détectées, en déduisit leur magnitude absolue M et grâce à la connaissance de leur magnitude apparente m , en inféra leur distance d en appliquant l'équation déjà vue : $m - M = 5 \log_{10} d - 5$. Les conclusions s'imposèrent d'elles-mêmes : ces céphéides se trouvent bien au-delà de la Voie lactée et les nébuleuses qui les hébergent sont des galaxies semblables à la nôtre.



Edwin Hubble et son chat, Nicolas Copernicus. Cela ne s'invente pas !

Hubble alla plus loin quelques années plus tard. Milton Humason (1891 – 1972) et lui avaient alors à leur disposition la distance d’une vingtaine de galaxies. Combinant leurs mesures avec celle du décalage vers le rouge des mêmes galaxies obtenu par Vesto Slipher quelques années auparavant, ils obtinrent la relation de proportionnalité entre distance et vitesse d’éloignement, dite *loi de Hubble* (et depuis le vote des membres de l’Union astronomique internationale en octobre 2018, *loi de Hubble-Lemaître*). Hubble avait évalué sa constante à $500 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$. On s’est rendu compte depuis que des erreurs dans la calibration des céphéides avaient été commises. La valeur acceptée aujourd’hui se situe entre 65 et 75 $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$.

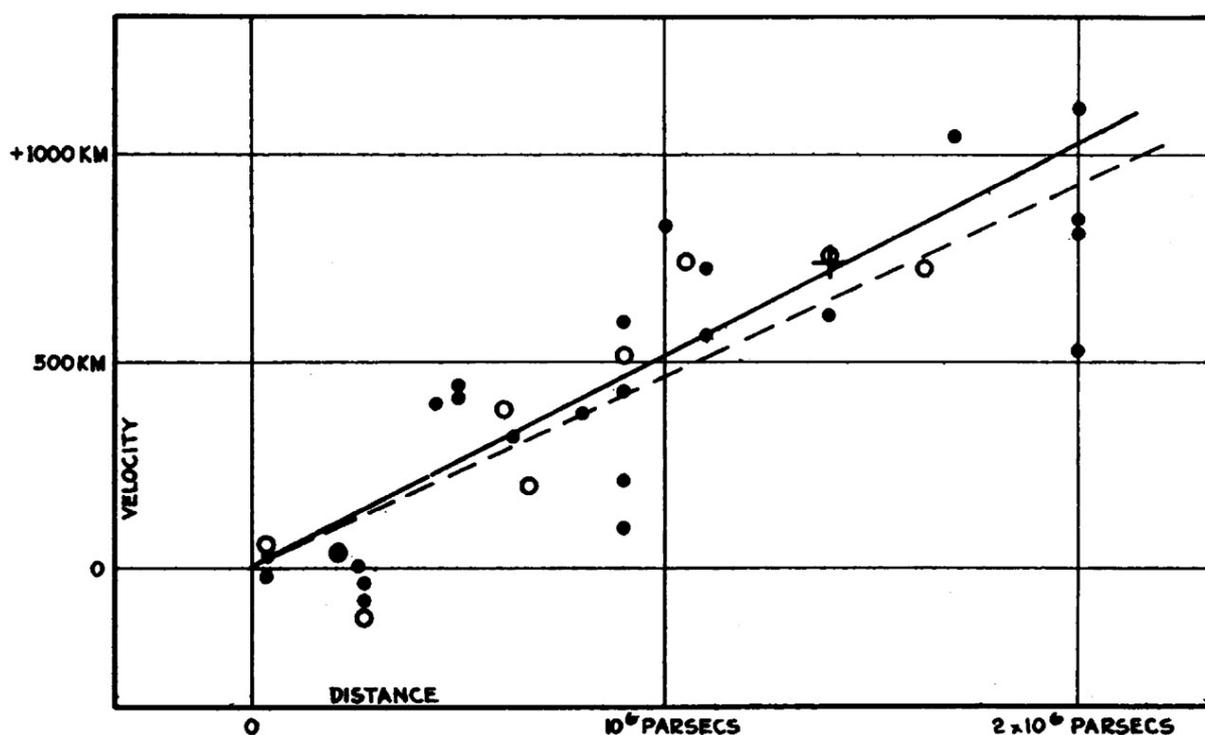


Figure originale de l’article de Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, paru en 1929 dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Il existe une relation linéaire entre la distance des galaxies et la vitesse de récession. Autrement dit, les galaxies s’éloignent à une vitesse approximativement proportionnelle à leur distance.

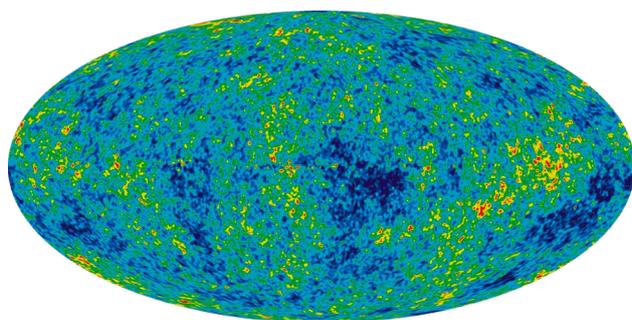
Notez que la relativité générale interprète la fuite des galaxies non pas comme un mouvement des galaxies elles-mêmes mais comme une expansion de l’espace qui les héberge. L’analogie est souvent faite avec des points que l’on dessine sur un ballon gonflable. Lorsque l’on souffle, chaque point a l’impression que les autres points le fuient et ce d’autant plus vite qu’ils sont éloignés. L’expansion ne devient sensible que sur des distances cosmologiques. Ainsi, le système solaire reste uni parce que la gravitation y est plus forte que l’expansion, tout comme les galaxies au sein d’un amas.

II.1.3 Et si la réponse était dans le vide ?

Le Big Bang

Puisque l'Univers est en expansion, on peut raisonnablement penser que, dans un passé très reculé, il a dû être beaucoup plus petit, dense et chaud. Le *Big Bang* désigne cette période où il a débuté son expansion il y a 13,7 milliards d'années.

En raison de la finitude de la vitesse de la lumière, plus on regarde loin dans l'espace, plus on regarde loin dans le passé. Peut-on alors concevoir une observation qui donnerait à voir le Big Bang ? Malheureusement, non. En effet, plus on remonte le temps, plus la densité et l'opacité de la matière augmente. Peu après le Big Bang, l'opacité était telle qu'aucun rayonnement ne pouvait s'extraire de la matière. Ce n'est que lorsque la température de l'Univers est passée sous les 3000 kelvins que les électrons ont pu se combiner aux protons pour former des atomes d'hydrogène, transparents au rayonnement. Les calculs montrent que cela est arrivé 380 000 ans après le Big Bang. Ainsi, la plus vieille image accessible de l'Univers date de cette période. Depuis, l'Univers s'est dilaté en taille d'un facteur 1000 et a vu sa température décroître dans le même rapport. Un corps à 3 K émettra avec son maximum d'énergie à une longueur d'onde proche de 1 mm, dans le domaine des micro-ondes. C'est en 1965 qu'un tel rayonnement (uniforme dans toutes les directions et correspondant à une température de 3 K) – anticipé par le physicien George Gamow dès 1948 – fut détecté par hasard par deux ingénieurs des laboratoires Bell (État du New Jersey), Arno Penzias et Robert Wilson, alors qu'ils testaient un nouveau type d'antenne. Le *fond diffus cosmologique*, comme on l'a baptisé, a été étudié avec des moyens toujours plus perfectionnés depuis l'espace. Les missions dédiées *COBE* (pour **CO**smic **B**ackground **E**xplorer, 1989 – 1993), *WMAP* (pour **W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe, 2001 – 2010) et *Planck* (2009 – 2013) ont précisé nos connaissances sur sa température (2,726 K) et ont permis de montrer que le fond diffus n'est pas parfaitement homogène. En fonction de la direction observée apparaissent de petites fluctuations (des anisotropies) dans le spectre qui reflètent des différences de température et de densité de la matière dans l'Univers au moment de la libération des photons. L'ordre de grandeur de ces variations est très faible ($\frac{1}{10000}$) mais sous l'influence de la gravitation, elles ont constitué les germes de la concentration de la matière dans des points privilégiés, et sont donc directement à l'origine des grandes structures de l'Univers qui apparaissent par la suite.



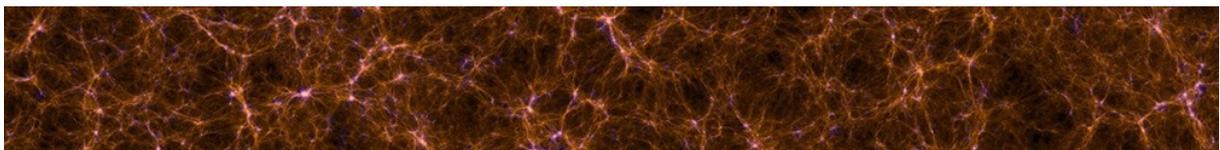
Carte complète du fond diffus cosmologique créée avec les données envoyées par *WMAP*, qui montre les fluctuations ou anisotropies de températures de l'Univers primordial. Les régions bleues sont les plus froides, alors que les rouges sont les plus chaudes. La différence maximale de température est de l'ordre de 0,0001 K. Ces légères fluctuations seraient le reflet de la première variation de densité à l'origine des galaxies et des amas de galaxies. Crédit : NASA / WMAP Science Team.

La théorie du Big Bang repose sur trois piliers. Nous en avons déjà rencontré deux : l'expansion de l'Univers et le fond diffus cosmologique (joliment appelé « l'éclat disparu de la formation des mondes » par un Georges Lemaître au crépuscule de sa vie). Le troisième pilier est l'abondance des éléments légers. L'existence d'énormes quantités d'hélium dans l'Univers actuel, présence que l'on est bien incapable d'expliquer par la seule fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium au sein des étoiles, prouve que celui-ci est passé par une phase où sa température était très élevée (environ un milliard de degrés). De plus, aucun élément plus lourd que le lithium n'a pu être produit car leur synthèse nécessite l'existence de températures élevées sur des durées bien plus longues que les quelques minutes durant lesquelles on a trouvé les conditions nécessaires à leur production.

Les astronomes sont désormais capables d'expliquer assez précisément l'abondance de (presque) tous les éléments chimiques par des processus de nucléosynthèse dont il existe trois types :

- la nucléosynthèse primordiale que nous venons de présenter ;
- la nucléosynthèse stellaire, qui a lieu dans les étoiles et se divise en deux voies :
 - ✓ la nucléosynthèse en phase calme, qui voit les étoiles massives produire en leur cœur par fusion successive de l'hydrogène, de l'hélium, du carbone, du néon et du silicium, la plupart des éléments jusqu'au fer, puis une partie des éléments plus lourds que le fer (processus s). Les étoiles de type solaire s'arrêtent à la fusion du carbone ;
 - ✓ la nucléosynthèse explosive, où les éléments plus lourds que le fer ainsi que des isotopes non produits par le processus s sont créés par capture de neutrons et de protons lors d'explosions d'étoiles massives ;
- la spallation, qui prend place dans le milieu interstellaire lorsqu'un noyau lourd est bombardé par les rayons cosmiques, de haute énergie. Elle conduit à la formation d'éléments légers.

Profitant de l'apport des supercalculateurs modernes, des simulations numériques de plus en plus ambitieuses sont utilisées pour modéliser l'évolution de l'Univers à partir de conditions initiales déduites, entre autres, du fond diffus cosmologique. À partir des grumeaux de surdensité de matière, on parvient à former les structures observées dans l'Univers actuel et ce à différentes échelles, depuis les nœuds, les vides et les filaments décrits plus haut jusqu'aux différents types de galaxies... à condition d'y saupoudrer une bonne pincée de matière noire et d'énergie sombre.



Distribution simulée de la matière sur ordinateur. Crédit : Y. Dubois / Institut d'astrophysique de Paris.

Matière noire et énergie sombre

L'exploitation des données envoyées par le satellite européen *Planck* montre que la densité moyenne d'énergie de l'Univers observable est constituée à 68,3 % d'énergie sombre, à 26,8 % de matière noire et à 4,9 % de matière ordinaire.

En 1933, l'astronome Fritz Zwicky (1898 – 1974) travaillait sur les galaxies de l'amas de la Chevelure de Bérénice, une constellation peu spectaculaire visible toute la nuit au printemps sous nos latitudes. Il souhaitait calculer la masse de l'amas en mesurant les vitesses des galaxies qui le composent. La masse ainsi calculée s'avéra bien supérieure à celle que l'on pouvait déduire en estimant, par leur luminosité, puis en sommant les masses de galaxies individuelles. L'étude de Zwicky tomba dans l'oubli pendant plusieurs décennies mais refit surface dans les années 1970, au moment où l'astronome Vera Rubin (1928 – 2016) étudiait la rotation des galaxies. Les étoiles d'une galaxie spirale – comme la nôtre – tournent autour de son centre à des vitesses qui devraient suivre la 3^e loi de Kepler, c'est-à-dire décroissantes avec la distance à ce centre. Ce n'est pas du tout ce que Rubin observa : la courbe de rotation des galaxies observées est plate à grande distance du centre, au lieu d'être décroissantes. Depuis, de très nombreuses observations relatives à d'autres galaxies et amas de galaxies ont confirmé ce fait curieux. L'explication privilégiée aujourd'hui suppose l'existence d'un gigantesque halo de matière non visible entourant les galaxies et représentant jusqu'à 90 % de leur masse totale : c'est la matière noire. On ne la voit pas, on ne sait pas ce que c'est (défaut de la théorie de la gravitation ? nouvelles particules exotiques ?) mais on détecte ses effets gravitationnels.

L'émergence de la notion d'énergie sombre découle directement de la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers en 1998. En mesurant la distance de supernovæ très lointaines dont la magnitude absolue est supposée connue, deux équipes internationales d'astronomes menées par Saul Perlmutter (Supernova Cosmology Project) et Adam Riess (High-Z supernovae search team) ont montré qu'elles se situaient plus loin qu'attendu en supposant une expansion de l'Univers à taux constant. Pour expliquer ces observations inattendues, on a introduit le concept d'*énergie sombre*, une forme d'énergie hypothétique emplissant l'Univers et dotée d'une pression négative, qui la fait se comporter comme une force gravitationnelle répulsive. Ironie de l'histoire, l'énergie sombre pourrait être directement reliée à la constante introduite par Einstein en 1917 dans son modèle d'Univers statique. Le télescope européen *Euclid*, dont le lancement est prévu vers 2022, tentera de percer le mystère de la nature de l'énergie sombre.

En l'état actuel des connaissances, il semble que l'Univers doive continuer son expansion indéfiniment. Cela pourrait se faire dans le cadre d'une « mort thermique », avec une température moyenne tendant vers le zéro absolu (0 K) et l'extinction des étoiles. Cela pourrait aussi se faire dans des conditions plus violentes (scénario *Big Rip*) si l'énergie sombre possède les caractéristiques adéquates. L'expansion s'emballerait alors et toute matière, quelle que soit sa taille, finirait par se disloquer. L'Univers peut encore nous surprendre...

II.2 2nd étage – Quelles lois physiques pour l'Univers ?

Au second étage de l'exposition, vos élèves découvrent les lois qui régissent l'infiniment grand et l'infiniment petit :

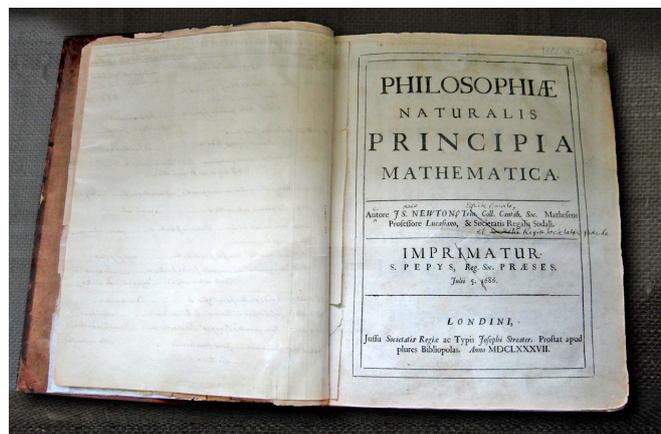
1. Les principes de la physique classique de Newton.
2. Les théories de la relativité restreinte et générale d'Einstein.
3. La mécanique quantique.

II.2.1 La physique classique

Le chef d'œuvre d'Isaac Newton (1642 – 1727), les *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (Principes mathématiques de la philosophie naturelle) a été édité à Londres en juillet 1687 et publié aux frais de l'astronome Edmond Halley. Il s'agit, ni plus, ni moins, de l'un des plus grands recueils scientifiques jamais écrits. En guise d'introduction, Newton propose un ensemble de définitions qui précisent ce qu'il entend par « force », « quantité de mouvement », « force centripète » etc. Le temps de Newton est absolu, « sans relation à rien d'extérieur » et s'écoule uniformément. Son espace est également absolu, « sans relation aux choses externes ». Il « demeure toujours similaire et immobile ». Suivent alors ses trois célèbres lois du mouvement. Les voici dans leur version originale, selon la traduction de la marquise du Châtelet (1706-1749) :

- « tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. » Cette première loi, aussi nommée principe d'inertie, avait déjà été formulée par Descartes dans ses *Principes de la philosophie* en 1644 ;
- « les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice ; et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée. » Cette deuxième loi, appelée également principe fondamental de la dynamique, signifie que l'accélération que subit un corps est proportionnelle à la force qu'on lui imprime ;
- « l'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et dans des directions contraires. »

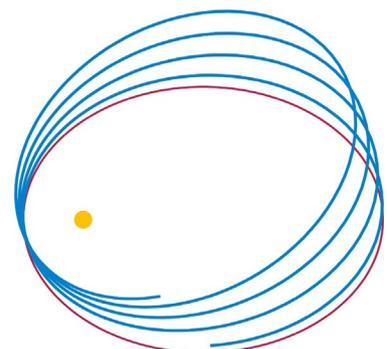
L'exemplaire de Newton, avec ses propres notes en vue de la seconde édition. Ce livre est conservé à la bibliothèque du *Trinity College* à Cambridge. Crédit : [Andrew Dunn](#).



Les *Principia* se composent de trois livres. Le livre I traite du mouvement des corps soumis à une force centrale dans un milieu ne leur opposant aucune résistance. Newton montre que, dans ce cas, toute force centrale implique la deuxième loi de Kepler (celles des aires) et qu'une force en $\frac{1}{r^2}$ impose aux trajectoires des corps d'être des coniques, c'est-à-dire des ellipses, des paraboles ou des hyperboles. Il apporte aussi la preuve qu'un corps à symétrie sphérique attire les autres corps exactement comme si toute sa masse était concentrée en son centre. En fait, toute la mécanique céleste en devenir est incluse dans l'application conjointe des lois du mouvement et de la loi de la gravitation universelle, qui stipule qu'entre deux points A et B distants de r et de masse respective m_A et m_B , il existe une force attractive F dont l'intensité est proportionnelle à la masse des deux corps et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare : $F = G \frac{m_A m_B}{r^2}$ où G est une constante, très petite, appelée constante gravitationnelle. Les trois lois de Kepler se démontrent aisément à partir d'elles. Le livre II examine les situations où le milieu est un fluide qui s'oppose plus ou moins aux mouvements des corps dont il est l'hôte. À cette occasion, Newton étudie la résistance de l'air. Enfin, le livre III expose les nombreuses conséquences de la gravitation universelle. Grâce à elle, Newton est en mesure d'estimer les masses relatives du Soleil, de Jupiter, de Saturne et de la Terre. Il peut ainsi montrer que le véritable « centre du monde », c'est-à-dire le centre de masse du système constitué par le Soleil et les planètes, ne coïncide pas exactement avec le centre du Soleil. Les irrégularités dans le mouvement de la Lune sont expliquées par l'action perturbatrice du Soleil. Les comètes se voient assignées des trajectoires elliptiques ou paraboliques. Newton présente également une théorie des marées océaniques et quantifie les contributions respectives du Soleil et de la Lune. Il identifie l'aplatissement de la Terre aux pôles. La toute première théorie de la précession des équinoxes voit le jour, fondée sur l'attraction de la Lune sur le bourrelet équatorial terrestre.

Pour Newton, la gravitation est donc une force qui agit à distance et de façon instantanée entre des corps massifs. L'idée d'une force sans contact est difficile à accepter pour ses contemporains comme pour lui. Mais « force » est de constater que sa théorie est extrêmement puissante et qu'elle permet de modéliser le mouvement des corps célestes avec une précision stupéfiante. Vers le milieu du XIX^e siècle, on met toutefois en évidence un fait inexplicable dans le comportement de la planète Mercure...

Sous l'influence gravitationnelle des autres planètes du système solaire, l'orbite elliptique de Mercure est perturbée : elle est affectée d'une précession et tourne lentement autour du Soleil comme le montre, de façon exagérée, la figure suivante.



Les observations révèlent que le périhélie de Mercure connaît une précession de $574,10'' \pm 0,65''$ par siècle, soit 1° en un peu plus de 600 ans. Or, les calculs présentés par Le Verrier (le découvreur de la planète Neptune) en 1859 et affinés par le grand astronome Simon Newcomb en 1882 indiquent que la précession du périhélie de Mercure doit avoir, pour valeur théorique, $532,30''$ par siècle. Personne n'était alors capable d'expliquer la différence. La solution sera présentée en 1915 par Einstein.

II.2.2 La physique relativiste

La relativité est l'un des deux grands piliers du XX^e siècle. Elle fait référence à deux théories complémentaires élaborées par l'un des plus célèbres physiciens de l'histoire : Albert Einstein (1879 – 1955).

Pour échafauder sa théorie, Einstein propose deux postulats :

- Le principe de relativité. Les lois physiques s'expriment de manière identique dans tous les référentiels galiléens (ou *inertiels*), c'est-à-dire des référentiels dans lesquels tout corps ponctuel libre est en mouvement de translation rectiligne uniforme ;
- Le principe de l'invariance de la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens.

En partant de ces postulats, Einstein bouleverse nos conceptions de l'espace et du temps. En physique classique, l'espace est dissocié du temps. En physique relativiste, ces quatre dimensions – trois d'espace et une de temps – se retrouvent irrémédiablement couplées dans une nouvelle représentation mathématique, une nouvelle fibre de la réalité que l'on appelle l'espace-temps. La vitesse de la lumière dans le vide c devient un invariant, quelle que soit la vitesse de la source lumineuse ou de l'observateur. Les calculs montrent d'ailleurs qu'elle est la vitesse maximale de déplacement de l'information et qu'elle n'est atteinte que par la lumière ou par toute entité dépourvue de masse. Lorsqu'on a affaire à des vitesses non négligeables devant c , le temps se dilate (relativité de la simultanéité, dilatation des durées) et l'espace se contracte sensiblement. Enfin, l'équivalence de la masse et de l'énergie est donnée par la célèbre formule $E = mc^2$.

Le temps des muons

Le muon est une particule élémentaire similaire à l'électron. Il possède la même charge électrique mais une masse près de 207 plus grande. Découvert en 1937, il s'agit d'une particule instable qui se désintègre spontanément en un électron, un neutrino muonique et un antineutrino électronique selon une loi de décroissance exponentielle dont la période, mesurée en laboratoire, vaut environ $2,2 \mu\text{s}$.

Des muons sont créés naturellement lorsque des rayons cosmiques entrent en collision avec les noyaux des atomes d'azote et d'oxygène de l'atmosphère terrestre, à quelques dizaines de kilomètres d'altitude. Les muons produits ainsi poursuivent généralement leur route dans la même direction que les rayons cosmiques incidents, à une vitesse proche de celle de la lumière. Avec une demi-vie au repos de $2,2 \mu\text{s}$, de tels muons ne devraient parcourir que

deux tiers de kilomètre en moyenne avant de se désintégrer à bonne hauteur. Quasiment aucun ne devrait atteindre le sol. Et pourtant, les muons sont la principale composante du rayonnement cosmique détecté... au niveau de la mer : une dizaine de milliers de muons atteignent ainsi chaque mètre carré de la surface de notre planète chaque minute. Comment résoudre ce paradoxe ?

Avec des vitesses proches c , les muons doivent impérativement être traités dans le cadre relativiste. Si, dans le référentiel propre d'un muon, sa durée de vie moyenne demeure $2,2 \mu\text{s}$, la relativité restreinte nous enseigne que, dans le référentiel lié à la Terre, il voit sa durée de vie dilatée d'un facteur γ bien supérieur à l'unité. γ , appelé le *facteur de Lorentz*, s'écrit :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

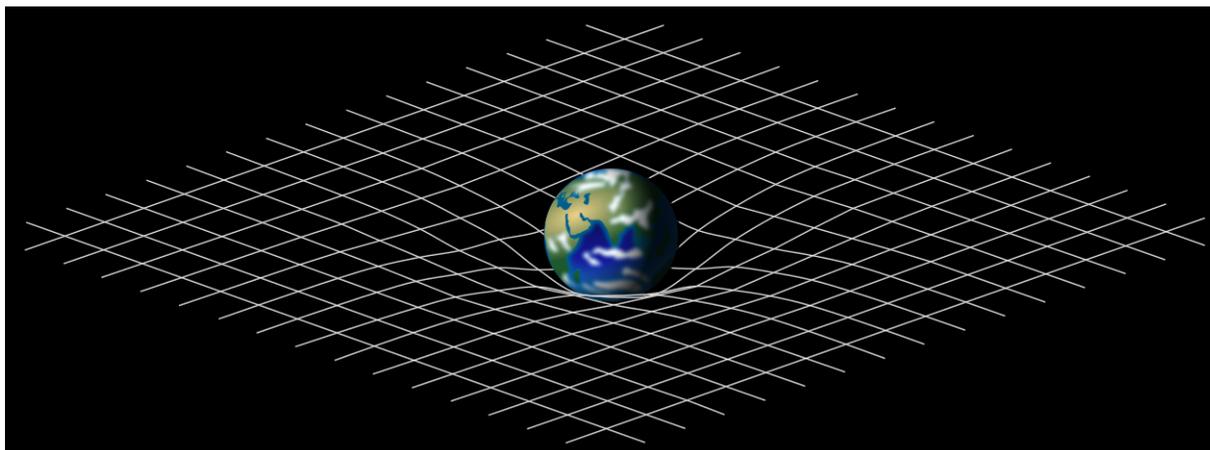
où v est la vitesse du muon. Avec des vitesses typiques de $0,994c$, la durée de vie des muons est donc augmentée d'un facteur proche de 9, leur laissant largement le temps d'atteindre le sol.

La relativité générale

Einstein souhaite étendre sa théorie de la relativité à tous les référentiels, qu'ils soient inertiels ou pas. Il réinterprète le principe d'équivalence selon lequel la *masse inertielle*, qui mesure la résistance d'un corps à l'accélération, est égale à la *masse gravitationnelle*, qui intervient dans le calcul de la force de gravitation créée ou subie par un corps. Einstein affirme que ce principe est valide et que, localement, les effets d'un champ gravitationnel sont indiscernables des effets d'une accélération uniforme du référentiel de l'observateur : les référentiels en chute libre dans un champ de gravité sont, localement, inertiels.

L'idée est qu'une particule libre – elle ne subit aucune interaction de nature non gravitationnelle – suit une géodésique de l'espace-temps, c'est-à-dire une courbe de plus courte distance entre deux points d'un espace-temps. Einstein comprend alors que la géométrie de l'espace-temps est courbe, c'est-à-dire non euclidienne.

La mise en équations de ces idées fut longue, complexe et laborieuse. Einstein put heureusement compter sur l'aide apportée par son ami le mathématicien Marcel Grossmann (1878 – 1936) qui l'initia à la géométrie différentielle, outil qui se révélait indispensable à l'élaboration de sa théorie. Au final, la relativité générale est le *magnum opus* d'Einstein. Il s'agit d'une théorie relativiste de la gravitation qui tend vers celle de Newton aux petites vitesses et aux champs gravitationnels faibles. Toutefois, elle est fondée sur des concepts radicalement différents de ceux de la gravitation newtonienne. La relativité générale énonce que la gravitation n'est pas une force mais la manifestation de la **courbure de l'espace-temps**, courbure elle-même produite par la présence de masse et d'énergie.



La trame de l'espace-temps est déformée par les masses. Crédit : [Mysid](#).

Cette théorie relativiste de la gravitation prédit des effets absents de la théorie newtonienne comme le ralentissement du temps à proximité des corps massifs, l'expansion de l'Univers, les ondes gravitationnelles et les trous noirs. Einstein fut le premier à développer un modèle cosmologique fondé sur la relativité générale. Cependant, convaincu de la staticité de l'Univers, il introduisit une constante qui contrebalance l'attraction des objets les uns pour les autres sous l'effet de la gravité. Ce modèle fut abandonné à la suite de la découverte de l'expansion de l'Univers.

✚ L'équation d'Einstein

Einstein présenta son équation à l'Académie royale des sciences de Prusse le 25 novembre 1915. Elle lie la présence de matière et d'énergie à la courbure de l'espace-temps et s'écrit :

$$G^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu}$$

où $G^{\mu\nu}$ est une matrice 4×4 qui décrit la courbure de l'espace-temps en tout point de l'espace-temps, G la constante gravitationnelle, c la vitesse de la lumière dans le vide et $T^{\mu\nu}$ une matrice 4×4 décrivant la densité et le flux de matière et d'énergie au même point de l'espace-temps.

Cette équation forme, avec l'équation des géodésique utilisée pour calculer les géodésiques dans un espace-temps arbitraire, le cœur de la relativité générale. Si l'on sait comment l'espace-temps est courbé, on peut utiliser l'équation des géodésiques pour calculer comment les corps se déplacent dans cet espace-temps. Si on connaît la densité et les flux de matière et d'énergie dans l'espace-temps, on peut utiliser l'équation d'Einstein pour déterminer la courbure de l'espace-temps.

La précession du périhélie de Mercure

Dans son manuscrit présenté à l'Académie royale des sciences de Prusse, Einstein fournit la solution d'une énigme vieille de près de six décennies : l'anomalie dans la précession du périhélie de Mercure. Diverses théories avaient été avancées pour l'expliquer mais, si elles le résolvaient bien, elles introduisaient des contraintes inacceptables sur des paramètres astronomiques déjà très bien déterminés. Le physicien montre alors que, par rapport à la théorie newtonienne de la gravitation, la relativité générale introduit un excès σ dans la précession du périhélie d'une planète. Exprimé en radian par révolution, il possède l'expression littérale suivante :

$$\sigma = \frac{24\pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}$$

où a est le demi-grand axe de la planète considérée, T sa période de révolution autour du Soleil et e l'excentricité de son orbite. Pour Mercure, on a les données suivantes :

$a = 0,387098$ unité astronomique soit 57 909 050 km ;

$T = 87,9691$ jours

$e = 0,205630$

Une fois ces données exprimées dans les unités du Système international, on obtient $\sigma = 5,01866 \cdot 10^{-7}$ radian par révolution. En multipliant cette valeur par $3600 \times (180 / \pi)$, on obtient σ en seconde d'arc par révolution, soit $0,103517''$ par révolution. Sachant qu'en un siècle, Mercure effectue $100 \times (365,25 / 87,9691) = 415,203$ révolutions, au final, $\sigma = 415,203 \times 0,103517 = 42,98''$ / siècle.

La précession du périhélie de Mercure est donc affectée d'un effet purement relativiste, uniquement explicable par la relativité générale, qui se monte à $43''$ par siècle. Cette toute petite quantité réconciliait enfin observations et théorie. On rapporte même que l'extase intellectuelle ressentie par Einstein à la suite de son combat victorieux sur le problème lui donna des palpitations et le laissa dans un état second pendant plusieurs jours !

Les lentilles gravitationnelles

Un phénomène de lentille gravitationnelle peut se manifester lorsqu'un corps massif comme une galaxie ou un amas de galaxie s'interpose entre l'observateur et une source lumineuse lointaine. En effet, nous avons vu que toute masse courbe l'espace-temps et dévie la lumière passant à proximité.

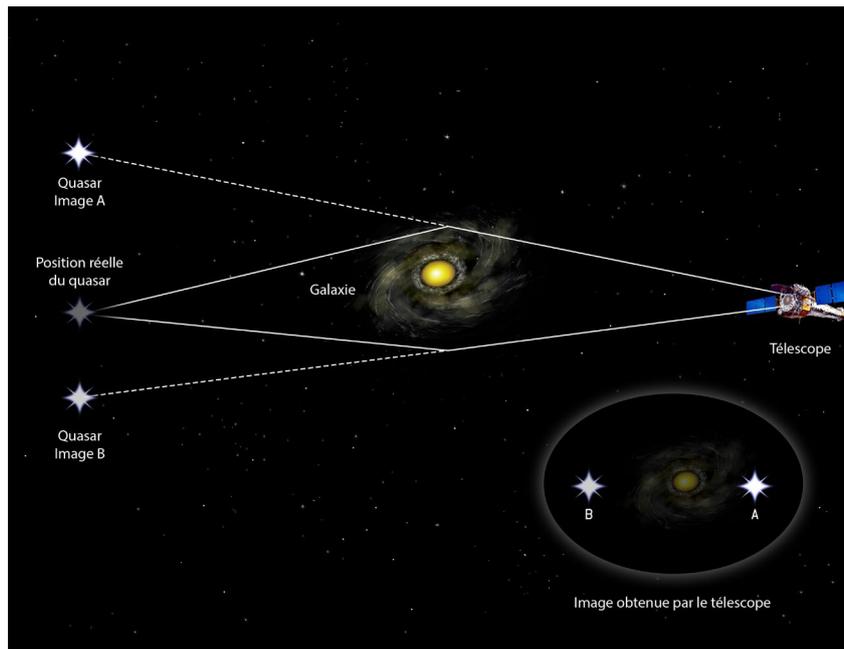
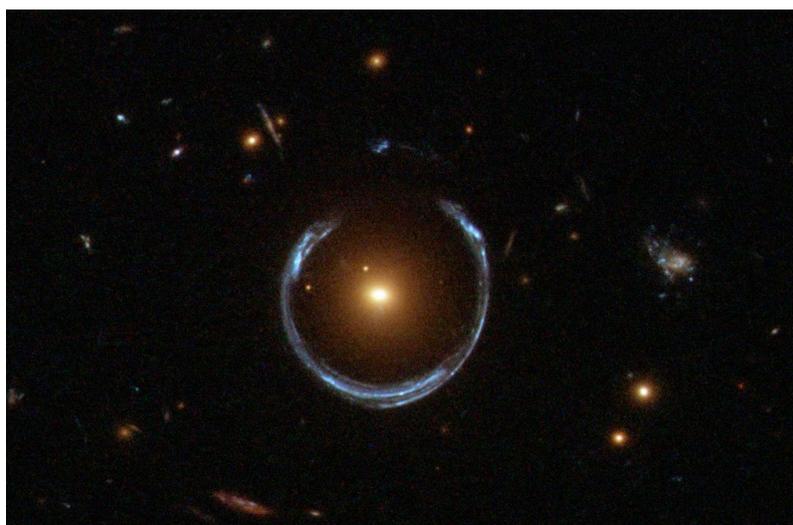


Image d'un quasar (noyau de galaxie extrêmement lumineux) très lointain dédoublée par la présence d'une galaxie plus proche. Crédit : NASA / CXC / M. Weiss.

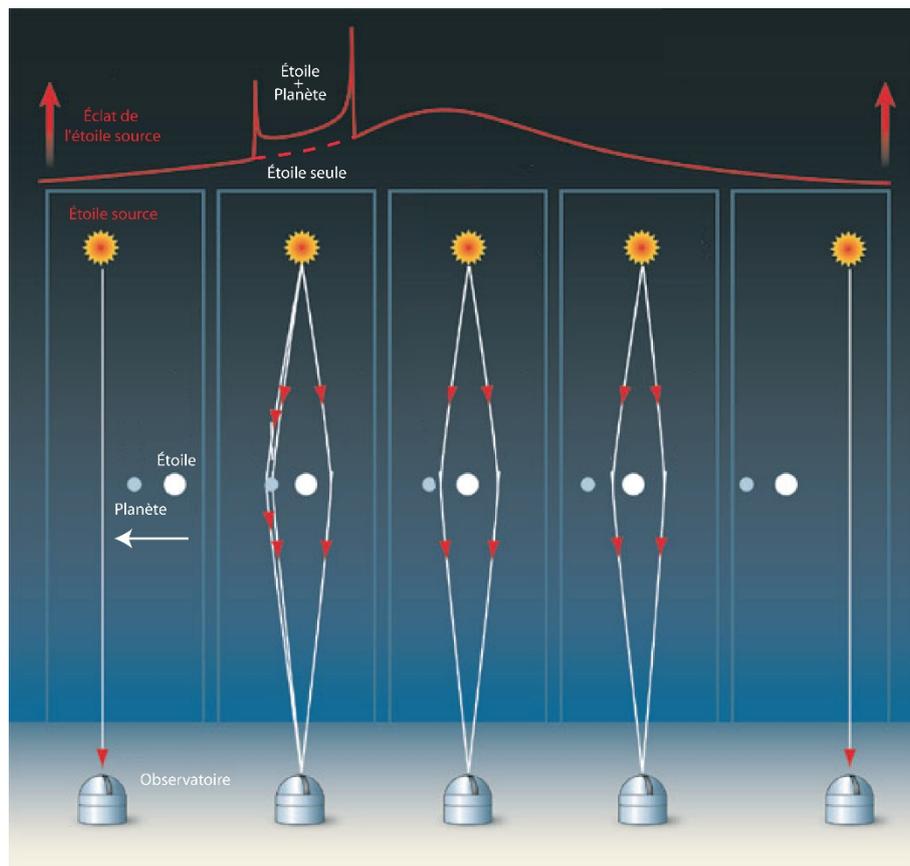
Si la source et l'observateur sont suffisamment éloignés de l'objet gravitant central, la déviation des rayons lumineux par le champ de l'objet peut former deux images de la source, l'une étant due aux rayons passant au-dessus et l'autre à ceux passant en dessous du corps gravitant. Si, par hasard, la source se trouve juste derrière un corps sphérique, l'observateur voit la source comme un anneau entourant le corps.



Un anneau d'Einstein en forme de fer à cheval capturé par le télescope spatial *Hubble*. La gravité d'une galaxie rougeâtre a déformé l'image d'une galaxie bleue située bien plus loin derrière elle. La plupart du temps, une telle déviation de la lumière se traduit par deux images distinctes de la galaxie d'arrière-plan. Toutefois, l'alignement est ici si parfait que l'image de la galaxie d'arrière-plan ébauche la forme d'un cercle parfait. Crédit : ESA / Hubble et NASA.

La distorsion imposée par une lentille gravitationnelle affecte aussi la luminosité des images en l'augmentant. Les astronomes ont mis à profit ce coup de pouce de la nature pour détecter des objets trop peu lumineux pour être observés autrement.

À une plus petite échelle, une étoile proche et sa planète peuvent aussi agir comme des lentilles lorsqu'elles s'alignent avec une étoile distante : elles focalisent sa lumière. Depuis la Terre, on mesure une augmentation de la luminosité de l'étoile distante, due au passage de l'étoile au premier plan, suivie ou précédée par des pics de luminosité dus à la planète. Ce phénomène de *microlentille gravitationnelle* a permis la découverte de plusieurs exoplanètes et la détermination de leur masse.



🚦 Des effets relativistes au quotidien : la géolocalisation par GPS

La radionavigation par satellites nous est désormais très familière. Son objectif est de connaître avec précision la position d'un objet (navire, avion, automobile, piéton) dans l'espace, au voisinage de la Terre. Son fonctionnement est basé sur la réception, par cet objet, muni d'un récepteur portable, des signaux électromagnétiques émis par des satellites en orbite circulaire à 20 000 km d'altitude environ. Le système GPS (pour **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) est un dispositif conçu par l'armée américaine dans les années 1990, à des fins militaires. Depuis 1995, une version du GPS à performances limitées a été rendue accessible à la communauté internationale.

La bonne marche du GPS nécessite impérativement la prise en compte de la relativité sinon la navigation souffrirait d'approximations intolérables. Deux effets relativistes principaux, aux répercussions contraires, sont à examiner :

- L'horloge d'un satellite se déplaçant à grande vitesse (de 13 000 à 15 000 km.h⁻¹ pour les systèmes européen Galileo, chinois Beidou, américain GPS et russe GLONASS) est ralentie par rapport à une horloge restée au sol ;
- L'horloge d'un satellite est d'autant plus ralentie qu'il est plongé profondément dans le champ gravitationnel de la Terre, autrement dit qu'il gravite à basse altitude.

Prenons un satellite typique du système américain GPS, tournant autour de la Terre selon une orbite pratiquement circulaire à 20 200 km d'altitude.

▪ **Résolution du problème relativiste apporté par la grande vitesse du satellite**

Sa vitesse v est donnée par l'expression :

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{r}}$$

où G est la constante gravitationnelle, M_T la masse de la Terre et r la distance séparant le satellite du centre de la Terre, c'est-à-dire la somme de son altitude et du rayon R_T de notre planète : $r = h + R_T$.

En fait, le produit GM_T est connu avec une précision bien supérieure que celle associée à chacun des deux facteurs G et M_T . Aussi allons-nous utiliser directement sa valeur.

Avec $GM_T = 3,9860 \cdot 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ et $r = 20\,200 + 6\,371 = 26\,571 \text{ km}$, il vient $v \approx 3,87 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le facteur de Lorentz nous donne alors le retard relatif de l'horloge du satellite par rapport à la nôtre, restée sur Terre.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 1 + 8,3456 \cdot 10^{-11}$$

→ Sur une journée, l'horloge embarquée à bord du satellite accusera donc un retard de $8,3456 \cdot 10^{-11} \times 86\,400 = 7,2 \text{ } \mu\text{s}$.

▪ **Résolution du problème relativiste apporté par la non-uniformité du champ gravitationnel**

La relativité générale nous enseigne que l'avance relative de l'horloge du satellite par rapport à celles restées au sol s'exprime sous la forme :

$$\frac{GM_T}{c^2} \left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{r} \right) = \frac{GM_T}{c^2} \left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_T + h} \right)$$

L'application numérique donne $5,2922 \cdot 10^{-10}$.

→ Sur une journée, l'horloge embarquée à bord du satellite accusera donc une avance de $5,2922 \cdot 10^{-10} \times 86\,400 = 45,7 \mu\text{s}$.

La somme des deux corrections nous indique que l'horloge d'un satellite GPS avance de 38,5 μs par jour par rapport à nos horloges restées au sol. C'est peu mais, comme la lumière se déplace très vite, cela correspond à une dérive journalière de 11,5 km ! Le décalage temporel dû aux effets relativistes est, bien sûr, pris en compte dans les horloges atomiques des satellites. Les utilisateurs ordinaires du GPS, bien qu'ils n'aient pas besoin d'en être conscients, sont ainsi devenus dépendants de la conception d'Einstein de l'espace et du temps.

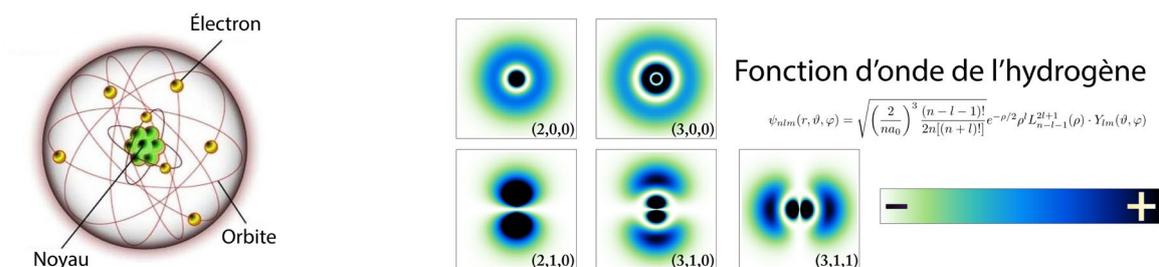
II.2.3 La physique quantique

🚦 L'expérience de Rutherford ; explorer l'atome

Nous avons découvert, au fil du temps, que la matière est constituée de molécules ; que ces molécules sont constituées d'atomes ; qu'à l'intérieur des atomes, nous avons des électrons et au centre, nous avons un noyau qui est lui-même constitué de protons et de neutrons. Et au cœur de ces derniers, nous avons des quarks. Pour arriver à ce long cheminement, il a fallu avancer pas à pas.

La première expérience historique sur le sujet est l'expérience de Rutherford. Une vidéo lui est dédiée. À l'époque de la découverte des électrons, chargés négativement, on imagine l'atome comme une petite sphère chargée positivement dans laquelle baignent des électrons. L'expérience de Rutherford a prouvé que les électrons tournaient en réalité autour d'un noyau extrêmement petit, extrêmement dense, chargé positivement. On est arrivé à un système dit « gravitationnel » avec des objets qui tournent autour d'un centre, comme les planètes qui tournent autour du Soleil.

Une seconde vidéo, « Explorer l'atome », permet de comprendre comment on est passé d'un modèle où les électrons gravitent sur des orbites autour d'un noyau à un modèle beaucoup plus complexe mais beaucoup plus juste, où chaque électron est délocalisé, occupant tout l'espace qui lui est alloué.



L'atome, du modèle simple (à gauche) aux densités de probabilité (à droite).

Étrangeté du monde quantique

L'élément nommé « Étrangeté du monde quantique » est un jeu interactif. Vos élèves vont pouvoir tester leurs connaissances à plusieurs et se rendre compte que les lois de cette physique sont très différentes de la physique classique qui nous gouverne.

Le monde de la physique quantique est le monde de l'infiniment petit (même si des effets purement quantiques peuvent se manifester à notre échelle comme le magnétisme des aimants, la superfluidité ou les supraconducteurs), un monde que nous ne pouvons pas percevoir avec nos sens. Nous allons donc être confrontés à un univers qui va nous paraître totalement illogique, contraire au bon sens, perturbant, faux, et pourtant, ce monde étrange de la physique quantique existe bel et bien.

En physique quantique, vous pouvez vous retrouver avec des objets qui sont partout à la fois, et non localisés en un point. Vous pouvez côtoyer des objets, par exemple, une « balle quantique », qui serait intégralement bleue et intégralement rouge en même temps. Nous ne parlons pas du violet (ce serait un mélange des deux couleurs), ni de marbrures rouges et de marbrures bleues. Non ! Nous parlons d'objets qui peuvent être un objet et un autre en même temps, une balle rouge et une balle bleue par exemple.

Matière – antimatière

Vous voici face à l'élément « Matière-antimatière »... Avant de quitter le monde de la physique quantique, tissons le lien entre cette physique et la relativité restreinte. Lorsque l'on prend des objets infiniment petits (la physique quantique) et que l'on prend des objets extrêmement rapides (la relativité restreinte), on se retrouve avec un nouveau type de physique qui couple forcément ces deux théories. C'est la physique des particules.

L'un des points de départ de cette nouvelle physique, nous la devons à un mathématicien et physicien britannique nommé Paul Dirac (1902 – 1984). Sa célèbre « équation de Dirac » modélise le comportement d'objets quantiques extrêmement rapides. Lorsque Dirac écrivit son équation, un terme apparut qui ne fut d'abord pas compris. En effet, l'équation de Dirac ne donne que le carré de certaines grandeurs. Il existe donc deux solutions : la première correspond au comportement des particules connues et la seconde, à particules inconnues, de charge électrique opposée. C'était la première apparition de ce que l'on appellera plus tard l'*antimatière*...

L'antimatière fait rêver beaucoup d'auteurs de science-fiction. Mais elle n'est pas aussi exotique qu'elle y paraît. En ce moment même, la radioactivité naturelle émise par votre corps génère de l'antimatière, en toute petite quantité, pendant un bref laps de temps. Matière plus antimatière s'annihilent et donnent de l'énergie. Cela signifie que le peu d'antimatière qui est créée de manière naturelle autour de vous, ou qui provient de l'espace, s'annihile et disparaît totalement dès qu'elle rencontre de la matière.

Avec cet élément interactif, vos élèves vont pouvoir jouer avec la matière, jouer avec l'antimatière, et comprendre les mécanismes qui les gouvernent.

Univers, particules et expériences

Intéressons-nous maintenant au carrefour de toutes les physiques que nous venons de découvrir. Au centre de cet espace, un grand cube noir permet de faire le lien entre la relativité et la physique quantique.

Les physiciens ont recensé quatre interactions fondamentales :

- l'interaction forte, d'une portée d'environ 10^{-15} m soit la taille d'un noyau atomique, dont elle assure la cohésion malgré la répulsion coulombienne des particules de même charge électrique. Les gluons, de masse nulle, sont les porteurs de l'interaction forte ;
- l'interaction faible, responsable de la désintégration radioactive de particules subatomiques, d'une portée d'environ 10^{-17} m. Elle est causée par l'échange de particules massives, les bosons W^+ , W^- et Z^0 ;
- l'interaction électromagnétique, de portée infinie, est transportée par les photons. Elle peut être attractive ou répulsive selon le signe des charges électriques. Cent fois moins puissante que l'interaction forte, elle est à l'origine des phénomènes quotidiens comme la lumière, l'électricité, le magnétisme, la chimie, etc.
- l'interaction gravitationnelle, toujours attractive et de portée infinie. C'est la plus faible de toutes les interactions (10^{38} fois plus faible que l'interaction forte) mais elle est toujours attractive – il n'existe pas de masse négative – et elle ne peut être neutralisée comme les forces électromagnétiques. C'est elle qui domine la structuration des grandes structures de l'Univers. Le vecteur de la gravitation est toujours inconnu. Une particule encore non détectée, le graviton, de masse nulle, pourrait être ce vecteur.

L'interaction gravitationnelle est décrite par la relativité générale. Les trois autres interactions – faible, forte et électromagnétisme – peuvent être décrites par un modèle appelé *modèle standard de la physique des particules*. Il relie la relativité restreinte à la physique quantique.

En se plaçant devant la partie du cube située face à l'îlot consacré à la relativité générale, vos élèves découvriront un pupitre nommé « Univers, particules et expérience » sur lequel toute la physique des particules est étalée et rangée en plusieurs catégories. Pianotant sur la particule de leur choix au nom plus ou moins exotique, ils découvriront comment elle fut mise en évidence et quel est son rôle dans l'Univers.

Le tableau de la page suivante recense les particules **élémentaires** connues. On trouve les trois générations de fermions (des particules qui ne peuvent occuper simultanément un même état quantique), les bosons de jauge (vecteurs des interactions, ils ne sont pas sujets au principe d'exclusion qui touche les fermions) et le boson de Higgs, responsable de la masse de toutes les particules et détecté en 2012 au CERN. Les fermions sont constitués deux familles : les quarks, sensibles à l'interaction forte et les leptons, qui ne le sont pas.

La 1^{re} génération de fermions contient les quarks up, le quark down, l'électron et le neutrino électronique. La 2^e, le quark charm, le quark strange, le muon et le neutrino muonique et la 3^e, le quark top, le quark bottom, le tau et le neutrino tauique.

Masse →	≈ 2,2 MeV/c ²	≈ 1,275 GeV/c ²	≈ 172,76 GeV/c ²	0	≈ 125,18 GeV/c ²
Charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
Spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	≈ 4,7 MeV/c ²	≈ 95 MeV/c ²	≈ 4,18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	91,19 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z⁰ boson Z ⁰	
LEPTONS	Non nulle	Non nulle	Non nulle	80,38 GeV/c ²	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W[±] boson W [±]	
				BOSONS DE JAUGE	

Les particules élémentaires connues. Leur masse, quand elle n'est pas nulle, n'est pas exprimées en kg mais en MeV/c² ou en GeV/c², comme il est d'usage chez les physiciens des particules. En effet, d'après la relation E=mc², masse et énergie sont équivalentes au facteur de proportionnalité c² près. L'équivalente en masse de 1 MeV/c² est 1,783.10⁻³⁰ kg. La masse d'un électron vaut alors 511 keV/c² = 0,511 MeV/c², celle d'un proton 938 MeV/c² = 0,938 GeV/c² et celle d'un neutron 940 MeV/c² = 0,940 GeV/c².

Un mot, des idées ?

Sur la face du cube située devant l'îlot dédié à la physique classique, vous trouverez des cartels vous donnant différentes définitions du vide.

On imagine souvent que le vide, c'est lorsqu'il n'y a plus de matière. Mais, prenons une portion d'espace ; enlevons les atomes, les molécules, que reste-t-il ? Il reste encore la lumière, les champs magnétiques et des particules que vous ne pouvez percevoir avec vos yeux. Or, Albert Einstein nous a dit que l'énergie est équivalente à la matière. Cela signifie qu'il faut enlever, en plus de la matière, toute l'énergie qui s'y trouve. À la fin, il ne restera que le niveau fondamental de l'énergie.

Toutefois, ce niveau « 0 » de l'énergie, référentiel local absolu, n'est pas statique ; il est fluctuant. Il s'agit de petites variations extrêmement rapides engendrant des couples de particules et antiparticules virtuelles qui ne survivent qu'un très bref instant. En effet, d'après le principe d'indétermination d'Heisenberg, il est possible d'emprunter de l'énergie au vide pendant un temps très court. La durée de vie des particules ainsi créées est d'autant plus faible que leur masse est grande. Cette interprétation quantique du vide, qui semble violer la conservation de l'énergie, a des conséquences sur notre compréhension de l'origine de l'Univers et pourrait même être responsable de son expansion accélérée.

En lisant les cartels qui sont devant eux, vos élèves vont comprendre comment notre compréhension du vide s'est affinée au fil du temps.

Cosmogonies, cosmologie ?

Sur la face du cube située devant le grand escalier par lequel vous êtes peut-être monté jusqu'à cet étage, vous découvrez plusieurs interprétations et images décrivant les cosmologies. Autrement dit, la description de l'Univers telle que les gens l'ont imaginé à travers les siècles, les civilisations et les religions.

À l'extrême droite, vous avez la partie consacrée à la physique moderne. Toute la cosmologie moderne s'est créée au siècle dernier. Au début, les cosmologistes ont eu beaucoup de difficultés à se faire une place dans la physique. La cosmologie était une science spéculative mais elle est aujourd'hui une science de haute précision.

II.3 Éditions

Bénédicte Leclercq, Laurent Jolivet, Étienne Klein, Marc Lachièze-Rey et Roland Lehoucq, **Le grand récit de l'Univers**, éd. Le Pommier / Cité des sciences et de l'industrie, 2007.

Présentation de l'éditeur : « Comment s'est formée la matière ? Celle qui constitue notre corps ? Celle que nous foulons ? Et celle des étoiles ? Début 2008, la Cité des sciences et de l'industrie ouvre une nouvelle exposition permanente sur la matière et l'Univers qui tient compte des dernières avancées scientifiques. L'ouvrage *Le Grand Récit de l'Univers* accompagnera cette nouvelle exposition. Le livre et la Cité partagent la même ambition : répondre à la double exigence de la rigueur du discours scientifique et de l'intelligibilité pour tous les publics. Les deux se veulent surprenants, précis et poétiques, pour faire rêver et nourrir la curiosité sur l'origine du monde. Cette enquête sur la matière qui constitue les objets de l'Univers débute aujourd'hui et sur la Terre, puis se déroule dans les étoiles, les galaxies et dans le vide extragalactique. Elle convie ainsi à un voyage dans l'espace (Terre, étoiles) et dans le temps (d'aujourd'hui à il y a 14 milliards d'années), pour aboutir à un stade de l'Univers où la matière n'existait pas encore. En annexes, un lexique revisite des mots qui semblent familiers, comme matière, lumière, espace, temps, force et mouvement. Les questions de science contemporaine sont aussi abordées par les quatre commissaires de l'exposition : Laurent Jolivet, Roland Lehoucq, Marc Lachièze-Rey et Étienne Klein. »

III Informations pratiques

Adresse

Cité des sciences et de l'industrie
30 avenue Corentin-Cariou
75019 Paris
www.cite-sciences.fr

Accès

Métro : Porte de la Villette (Ligne 7)
Bus : 71, 139, 150, 152, 249
Tramway : Porte de la Villette (Ligne 3b)

Horaires d'ouverture

Du mardi au samedi de 10 h à 18 h, le dimanche de 10 h à 19 h.
Fermeture le lundi ainsi que les jours fériés suivants : 1^{er} janvier, 1^{er} mai et 25 décembre.

Élémentaire : 1 gratuité pour 12 entrées payantes

Secondaire : 1 gratuité pour 15 entrées payantes

Tarifs groupe, prix par participant (en vigueur au 1^{er} septembre 2020)

4,50 € (2,50 € pour les établissements en réseau d'éducation prioritaire)

Tout billet acheté donne droit à une entrée au sous-marin *Argonaute* (dans la limite des places disponibles) + un accès aux ateliers et au Planétarium sur réservation.

Réservation groupes

Sur internet (devis en ligne)

<http://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/votre-sortie-scolaire/infos-pratiques-et-reservation/devis-en-ligne/>



resagroupescite@universcience.fr



01 40 05 12 12



01 40 05 81 90



Cité des sciences et de l'industrie
Service groupes
30 avenue Corentin-Cariou
75930 Paris Cedex 19