

Numéro 89

Février - Mars 2020

[www.albireo78.com](http://www.albireo78.com)

Albireo<sup>78</sup>

# L'ALBIREOSCOPE

***L'âge de la Terre***

***le nombre Pi***

***les céphéides (I)***

***Arnaud***

# en couverture



## M16, « Les piliers de la création »

*Arnaud*

**Instrument** : T300, T355

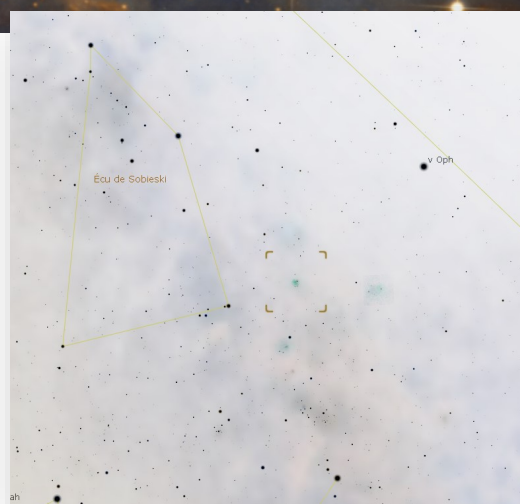
**Acquisitions** : SHO

**Total** : 22h

**Date** : septembre 2019

**Lieu** : France, Chili

Nébuleuse éclairée par un amas d'étoiles jeunes, bleues, âgées de seulement quelques millions d'années. Au centre de M16 on trouve les "piliers de la création" : une magnifique architecture en colonnes. Des piliers de gaz et de poussières longs de 3 al à l'intérieur desquels se forment des étoiles.



# Sommaire

4



## L'âge de la Terre

*Michel*

Comment il a progressivement évolué dans l'histoire...

26

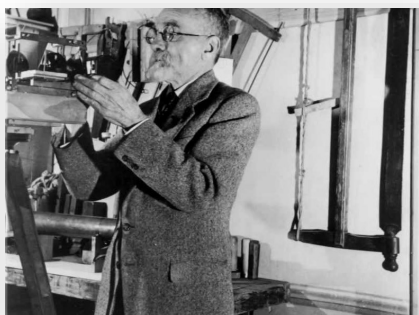
## le nombre Pi

*Michel*

Un nombre étonnant qui apparaît parfois là où on ne l'attend pas...

3,141592653589793238462643383279502884197169399375105  
82097494459230781640628620899862803482534211706798214  
80865132823066470938446095505822317253594081284811174  
50284102701938521105559644622948954930381964428810975  
66593344612847564823378671627120190914564856692346  
034861045432664821339360751491412737245870066063155  
88174881520920962829254091715364367892590360011330530  
54882046652138414695194151160943305727036575959195309  
21861173819326117931051185480744623799627495673518857  
52724891227938183011949129833673362440656643086021...

30



## C'est arrivé ce jour-là...

*lionel*

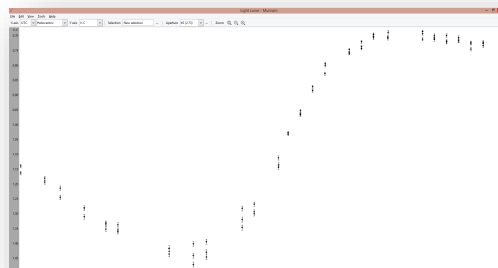
Des évènements en relation avec le monde de l'astronomie qui se sont déroulés en février 1999, 1969, etc.

42

## les céphéides (I)

*lionel*

Des étoiles importantes pour la mesure des distances dans l'univers. Les amateurs aussi peuvent les étudier...



48



## Du côté de chez Sadr...

*lionel*

Les dernières images et les travaux les plus récents avec nos instruments pilotés à distance...



# L'âge de la Terre...

*Comment l'avons nous déterminé ?*

La TERRE photographiée par l'équipage d'Apollo 17 en 1972 (photo NASA).

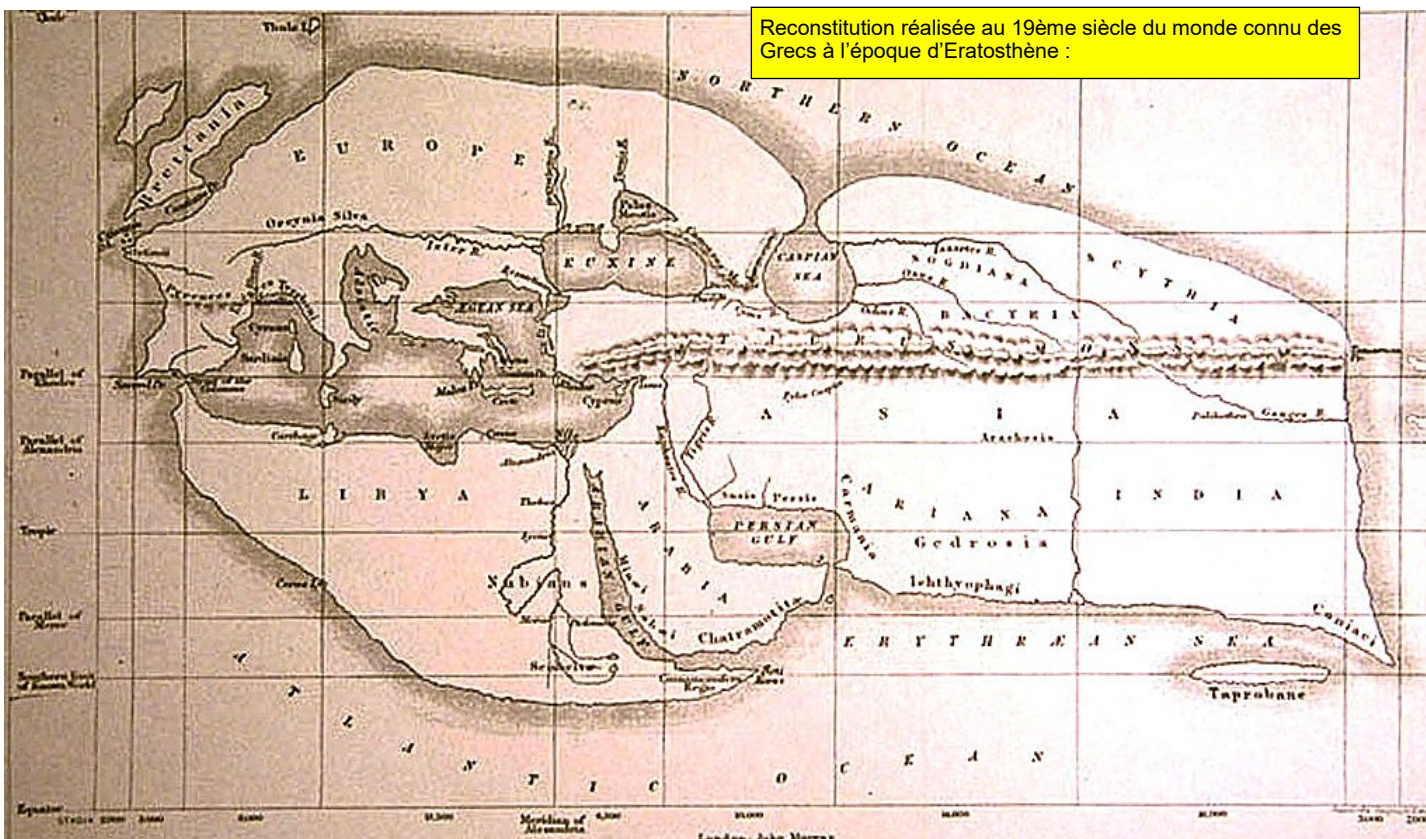
L'âge de la Terre... voilà bien une préoccupation du monde occidental depuis l'Antiquité avec notre culture judéo chrétienne : Dieu a créé le Monde, et puisque le Monde a été créé, il a débuté à un certain moment, et il a donc un âge. Notons qu'ailleurs, en Orient, ou en Extrême-Orient, les religions sont basées sur des cycles comme les crues du Nil pour les égyptiens, et en conséquence, pas d'âge mais des durées, et ainsi, probablement pas d'interrogation sur ce point.

Evaluer, voire calculer l'âge de la Terre, n'a pas été chose facile et ce n'est que bien tardivement, au XXème siècle que les choses se sont vraiment éclaircies, dans les années 1960, donc c'est vraiment tout récent à l'échelle des temps géologiques. L'affaire a donné lieu à un grand débat qui s'est étiré de l'Antiquité à nos jours, mais peut-être que Néandertal, avant Homo sapiens, se posait déjà la question en regardant les étoiles le soir, avant de se coucher. Un débat où l'objet principal n'est pas un problème de mathématique mais un problème de géologie, mais où la Mathématique s'est invitée en fournissant le pivot de l'argument controversé...

La Mathématique est un outil fondamental de la connaissance du monde, même davantage ; un outil qui permet de changer la représentation du monde et c'est arrivé plusieurs fois dans l'histoire de l'humanité : un bouleversement de la représentation du monde basé sur des progrès conceptuels mathématiques ; l'un des plus spectaculaires est celui réalisé par Ératosthène, voilà plus de 2000 ans où il ne s'agissait pas moins que de mesurer la Terre. A cette époque-là, les Grecs n'avaient exploré qu'une petite partie du monde et on aurait pu penser que c'était légitime de penser à une Terre infinie. Non seulement ils savaient que



**Ératosthène**, né à Cyrène en 284 avant J.C. et mort à Alexandrie en 192 avant J.C.. Mathématicien, géographe et astronome grec.



la Terre était ronde, mais ils avaient compris comment la mesurer, avec un peu d'astuce et d'observations. Ératosthène a calculé la circonférence de la Terre sans quitter Alexandrie car il savait qu'à midi local, lors du solstice d'été à Syène (l'Assouan moderne de l'Égypte), le soleil était directement au-dessus ; en effet, le Soleil éclairait totalement le fond d'un puits vertical à ce moment et ce

lieu-là. Une curiosité qui semble banale pour la plupart des gens mais qui l'a sans doute intrigué et fait réfléchir sur le pourquoi de ce phénomène. Eratosthène s'est sans doute dit : « avec ça, je vais mesurer la Terre ! ». Il a mesuré l'angle d'élévation du Soleil à midi à Alexandrie en utilisant une tige verticale, connue sous le nom de gnomon, et en mesurant la lon-

gueur de son ombre sur le sol. On sait bien que lorsque le Soleil est au plus haut, l'ombre sera la plus courte, et quand le Soleil descend vers l'horizon, l'ombre s'allonge progressivement. Et de manière précise, en comparant la longueur de l'ombre avec la longueur du bâton, on va pouvoir calculer l'angle que forme le rayon du Soleil avec la verticale à Alexandrie quand on sait qu'à ce moment-là, les rayons du Soleil frappent Syène à la verticale. En utilisant la longueur de la tige et la longueur de l'ombre, comme les jambes d'un triangle, il a calculé l'angle des rayons du soleil. Cela s'est avéré être d'environ  $7^\circ$ , soit 1/50ème de la circonférence d'un cercle. Prenant la Terre comme sphérique et connaissant à la fois la distance et la direction de Syène, il a conclu que la circonférence de la Terre était cinquante fois cette distance.

La connaissance de la taille de l'Égypte par Eratosthène a été fondée sur le travail de plusieurs générations de voyages d'arpentage effectués par les « arpenteurs professionnels » de l'époque. Les comptables pharaoniques ont donné une distance entre Syène et Alexandrie de 5 000 stades (un chiffre qui a été vérifié chaque année). Certains historiens affirment que la distance a été corroborée en se renseignant sur le temps qu'il a fallu pour se rendre de Syène à Alexandrie à dos de chameau. Certains prétendent qu'Eratosthène a utilisé le stade olympique de 176,4 m (579 pieds), ce qui impliquerait une circonférence de 44 100 km, une erreur de 10 %, mais le stade italien de 184,8 m (606 pieds) est devenu (300 ans plus tard), la valeur la plus communément acceptée pour la longueur du stade, ce qui implique une circonférence de 46 100 km, soit une erreur de 15 %. Il a fait cinq hypothèses importantes (dont aucune n'est parfaitement exacte) :

- Que la distance entre Alexandrie et Syène était de 5000 stades,
- Qu'Alexandrie est situé au nord de Syène,
- Que Syène est sur le tropique du cancer,
- Que la Terre est une sphère parfaite,
- Que les rayons lumineux du Soleil sont parallèles.

Eratosthène a ensuite arrondi le résultat à une valeur finale de 700 stades par degré, ce qui implique une circonférence de 252 000 stades, probablement pour des raisons de simplicité de calcul car ce plus grand nombre est également divisible par 60. Dans une publication du 3 juillet 2012, Anthony Abreu décrit le calcul d'Eratosthène avec des données plus précises : le résultat était 40 074 km, ce qui est différent de 66 km (0,16 %) de la circonférence polaire actuellement acceptée de la Terre.

Sans montre, comment a-t-il synchronisé les événements ? C'est sans doute la question que vous vous posez. Mais les Grecs avaient déjà une très bonne connaissance du temps ;

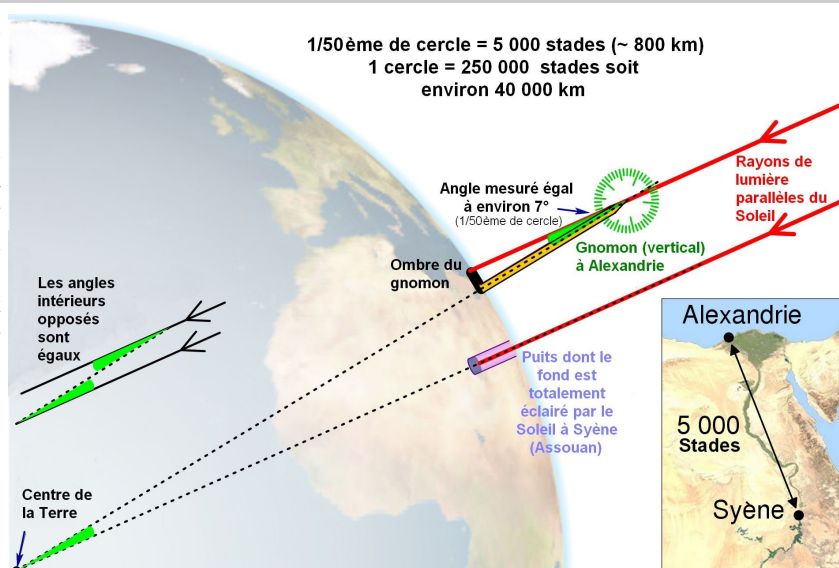


Illustration montrant une partie du globe avec le continent africain. Les rayons du Soleil frappent le sol à Syène et à Alexandrie de manière parallèle. L'angle du rayon de soleil et du gnomon (pôle vertical) est montré à Alexandrie, et cela permet à Eratosthène de faire les bonnes estimations de rayon et de circonférence de la Terre à quelques pour cents près..

il y avait des clepsydres, des cadrans solaires précis, et même des mécanismes d'horlogerie sophistiqués comme la machine d'Anticythère dont on a retrouvé des vestiges dans une épave en mer Méditerranée, près de l'île grecque d'Anticythère. De plus, c'était aussi l'époque où un certain Archimède faisait des travaux scientifiques remarquables. Ce temps marquait une période qui était faste pour les sciences, mais beaucoup de travaux de référence se sont perdus dans les oubliettes du temps ou par des cataclysmes divers.

La preuve ?

Certains diffusent encore aujourd'hui sur internet que la Terre est plate !

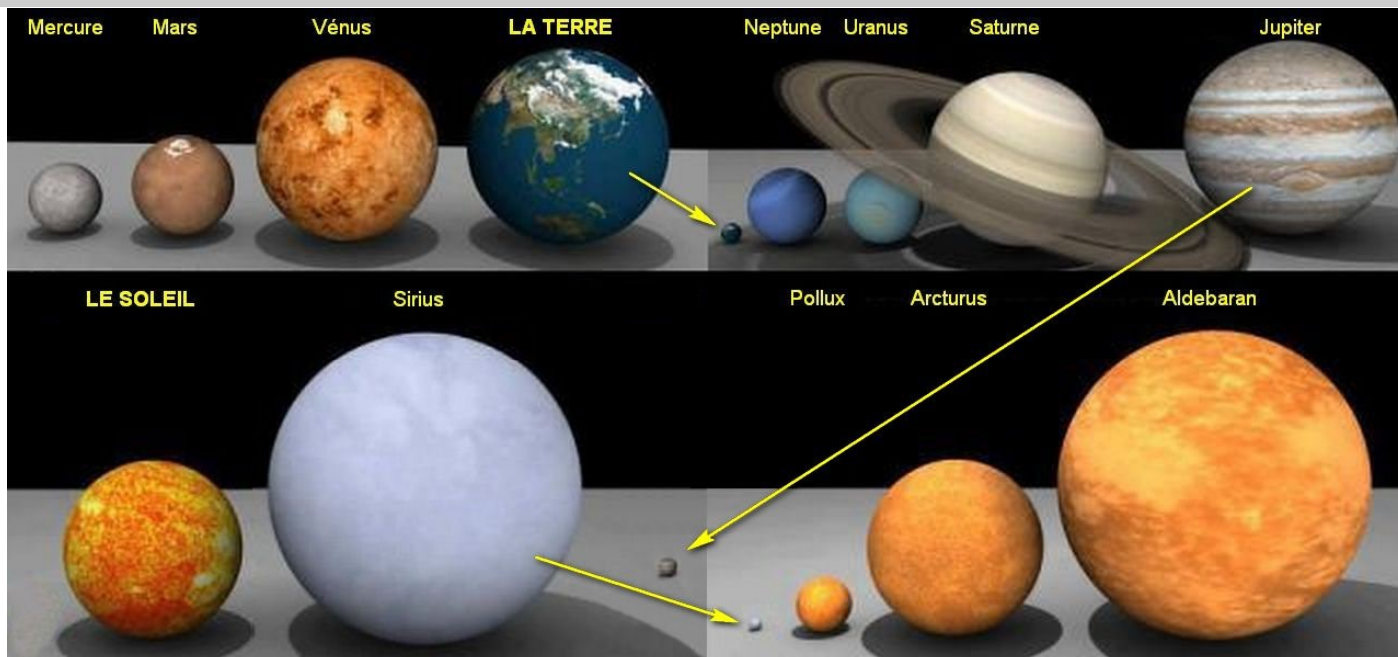
Mais passons sur ces débilés du 21ème siècle pour revenir à notre histoire...

Eratosthène était l'une des figures savantes les plus éminentes de son temps et il a produit des œuvres couvrant un vaste domaine de connaissances ; il a écrit sur de nombreux sujets : géographie, mathématiques, philosophie, chronologie, critique littéraire, grammaire,



**Archimède** : né en 287 avant J.C., mort en 212 avant J.C. (Syracuse, Sicile). Ingénieur, mathématicien, physicien, astronome et inventeur.

La médaille Fields, chère aux mathématiciens, montre le portrait d'Archimède sur une des ses faces.



## Comparaison de la taille des planètes du système solaire par rapport au Soleil, et quelques autres « petites » étoiles...

poésie et même de vieilles comédies. Malheureusement, il ne reste que des fragments de ses œuvres après la destruction de la Bibliothèque d'Alexandrie.



La machine d'Anticythère

La Terre vue par Ératosthène, en terme de géographie, était très imparfaite, très incomplète mais la représentation mathématique de la sphère était très

bonne (Archimède a bien travaillé sur le sujet en arrivant à déterminer Pi [3,1416...] avec une bonne précision, en inventant si l'on peut dire, le calcul intégral) et cela amène à un point sur lequel on ne peut jamais trop insister : la Mathématique permet d'aller au-delà de l'intuition ; quelque chose qui semble infini, vous allez le mesurer mathématiquement, et quelque chose d'infiniment petit, aussi. En effet, dans notre univers, des tas de choses dépassent l'intuition comme des distances inouïes, la Terre qui nous semble gigantesque, elle semble incommensurable, mais, un jour, on arrive quand même à la mesurer, 40 000 km de circonférence, ou encore la taille des planètes du système solaire et au-delà ; la Terre est toute petite, face à Jupiter, lui-même tout petit face au Soleil, petit face à Sirius petit face à... etc.. Face à Aldebaran, la Terre n'est plus visible du tout. Ce qui est remarquable quand on voit de tels écarts de grandeur, c'est que tous ces astres à des distances incroyables, avec des dimensions énormes se représentent mathématiquement comme la Terre dans les équations. Les grands mystères de l'Univers sont ainsi bien compris à coup de formules et de concepts, et ce de manière universelle. Dans ces condi-

tions, il est normal qu'on se soit tourné vers les mathématiciens, vers les astronomes pour répondre à des questions qui semblaient complètement en dehors de notre intuition, par exemple : quel est l'âge de la Terre ? Que deviendra le Système Solaire ? Que deviendra la Galaxie ? Et ainsi de suite. Sur ces questions, et à différentes époques, ont été mis à contribution beaucoup de scientifiques... une grande œuvre collective, avec les mathématiques, la physique, la chimie, l'astronomie etc., à l'honneur.

Ainsi donc, après cette période faste, nous avons peu de traces de réflexions menées sur l'âge de la Terre... Au moyen-âge, la Terre était réputée n'avoir que quelques milliers d'années suite à des siècles d'obscurantisme et de vétos religieux. Rappelons nous que Giordano Bruno, né en 1548, est mort brûlé vif sur le *Campo de' Fiori* le 17 février 1600 à cause de ses « libertés » de penser et de ses positions théologiques hérétiques... le Pape Clément VIII n'était pas content.



James Ussher par Sir Peter Lely. Irlandais né en 1581 à Dublin et mort à Reigate (Angleterre) en 1656. C'était un calviniste convaincu.

Cependant, c'est James Ussher (1581-1656), qui n'est pas un scientifique,

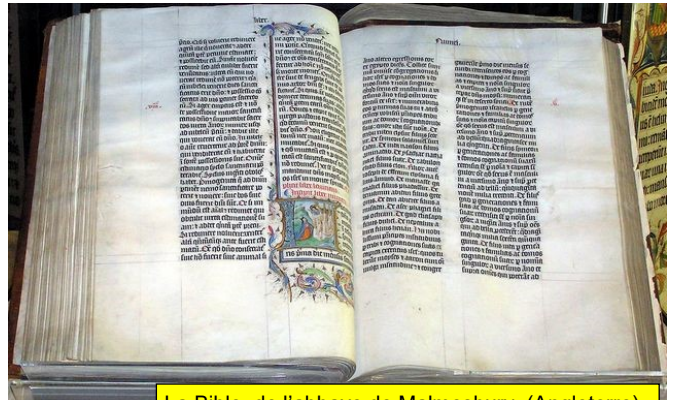
mais le chef de l'Eglise anglicane irlandaise au milieu du 17ème siècle, qui va s'attacher à définir l'âge de la Terre. Entre 1650 et 1654, Ussher va publier sa grande œuvre : « *Les annales de l'ancien testament retracées depuis l'origine du monde* », ce qui, traduit, veut dire : l'histoire du monde depuis l'origine de la Terre. Qui dit origine, dit âge. Pour réaliser ses savants calculs, Ussher utilise la seule source d'information qui lui semble suffisamment fiable : la Bible. Or, cela est plus compliqué qu'il n'y paraît ; la Bible n'est pas toujours bien compréhensible, utilise beaucoup de métaphores, et les versions du document sont nombreuses, avec plusieurs langues utilisées. C'est donc un grand travail de compilation, et de comparaison d'histoires pour rétablir l'Histoire... Certaines des chronologies établies par ses soins font cependant encore autorité de nos jours. Son but principal, un des sujets qui lui tenait à cœur, était d'établir la date de La Création. Ussher, après des études minutieuses, trouve que la Terre a été créée en 4004 avant J. C., le soir du 23 octobre.

4004 avant J. C. : voilà un résultat qui peut sans aucun doute nous faire sourire ; a priori, on apprend aujourd'hui dès l'école primaire, sinon au collège, que la Terre est âgée d'un peu plus de 4 milliards d'années. Un résultat qui est donc loin de la vérité, avec un grand facteur, mais le premier chiffre est bon ! Il manque seulement quelques zéros, six en l'occurrence pour obtenir un meilleur résultat. Ussher est toutefois intelligent, et le travail accompli est remarquable ; c'est un chef religieux très respecté qui a fait ce qu'il pouvait avec les postulats dont il est parti : la solution est dans la Bible.

Notons que le milieu du 18ème siècle est une période de grands progrès conceptuels (le siècle des Lumières). C'est à cette époque ou peu avant, que Newton, Leibnitz créent le calcul différentiel, une révolution scientifique, et comprennent aussi qu'on peut obtenir des prédictions sur l'état d'un système physique en résolvant des équations différentielles ; c'est un progrès que, plus tard, Albert Einstein qualifiera comme le plus grand dans l'histoire des sciences réalisé par un seul individu. Une période de l'histoire où on se préoccupe de mieux comprendre le monde. Et pour aller plus loin, nous avançons quelque peu pour parler d'un deuxième protagoniste de cette histoire : Georges-Louis Leclerc de Buffon. Cet homme est administrateur du jardin du Roi (qui deviendra le Muséum

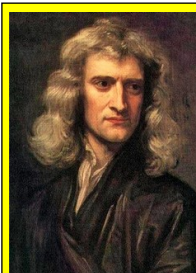
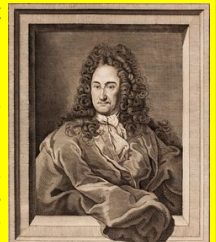


**Georges Louis Leclerc, Comte de Buffon**  
Naturaliste et mathématicien français  
bourguignon, né en 1707 et mort à Paris en 1788.



La Bible de l'abbaye de Malmesbury (Angleterre). Elle a été écrite en latin en 1407, en Belgique.

**Gottfried Wilhelm Leibniz** (1646-1716) est d'origine allemande, et l'un des logiciens, mathématiciens et philosophes naturels les plus importants du siècle des Lumières. En tant que représentant de la tradition rationaliste du XVIIème siècle, la réalisation la plus importante de Leibniz a été de concevoir les idées du calcul différentiel et intégral, indépendamment des développements contemporains d'Isaac Newton. Les travaux mathématiques ont toujours favorisé la notation de Leibniz comme expression conventionnelle du calcul. Ce n'est qu'au XXème siècle que la loi de continuité de Leibniz et la loi transcendantale d'homogénéité ont trouvé une implémentation mathématique (au moyen d'une analyse non standard). Il est devenu l'un des inventeurs les plus prolifiques dans le domaine des calculatrices mécaniques. Tout en travaillant sur l'ajout de multiplication et de division automatiques à la calculatrice de Pascal, il a été le premier à décrire une calculatrice à moulinet en 1685 et a inventé la roue de Leibniz, utilisée dans l'arithmomètre, la première calculatrice mécanique produite en série. Il a également affiné le système de nombres binaires, qui est le fondement de tous les ordinateurs numériques. Leibniz a apporté d'importantes contributions à la physique et à la technologie, et a anticipé des notions qui ont fait surface beaucoup plus tard en philosophie, théorie des probabilités, biologie, médecine, géologie, psychologie, linguistique et informatique. Il a écrit en plusieurs langues, mais principalement en latin, français et allemand.



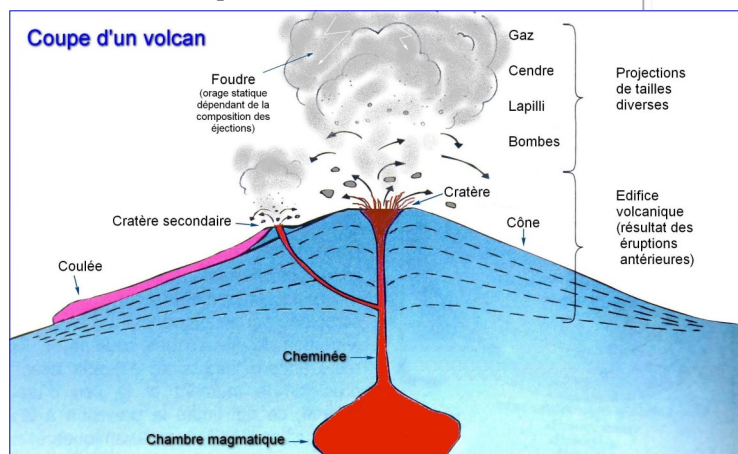
**Isaac Newton** (1642 - 1727) était un mathématicien, physicien, astronome, théologien et auteur anglais qui est largement reconnu comme l'un des scientifiques les plus influents de tous les temps et comme une figure clé de la révolution scientifique. Son livre *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Principes mathématiques de la philosophie naturelle), publié pour la première fois en 1687, a jeté les bases de la mécanique classique. Newton a également apporté des contributions fondamentales à l'optique et partage le mérite de Gottfried Wilhelm Leibniz pour le développement du calcul infinitésimal. Newton a formulé les lois du mouvement et de la gravitation universelle qui ont formé le point de vue scientifique dominant jusqu'à ce qu'elle soit remplacée par la théorie de la relativité d'Albert Einstein. Newton a utilisé sa description mathématique de la gravité pour prouver les lois de Kepler du mouvement planétaire, tenir compte des marées, des trajectoires des comètes, de la précession des équinoxes et autres phénomènes, éliminant le doute sur l'héliocentrisme du système solaire. Il a démontré que le mouvement des objets sur Terre et des corps célestes pouvait être expliqué par les mêmes principes. Newton a construit le premier télescope réfléchissant pratique et a développé une théorie sophistiquée de la couleur basée sur l'observation qu'un prisme sépare la lumière blanche dans les couleurs du spectre visible. Ses travaux sur la lumière ont été rassemblés dans son livre très influent *Opticks*, publié en 1704. Il a également formulé une loi empirique du refroidissement, fait le premier calcul théorique de la vitesse du son et introduit la notion de fluide newtonien. En plus de ses travaux sur le calcul, en tant que mathématicien, Newton a contribué à l'étude des séries de puissances, généralisé le théorème binomial aux exposants non entiers, développé une méthode pour approximer les racines d'une fonction et classé la plupart des courbes planes cubiques.



d'histoire naturelle par décret de la convention en 1793). Buffon a joué un rôle déterminant dans la transformation du Jardin du Roi en un important centre de recherche et musée. Il écrit et parle bien : « *C'est par des expériences fines, raisonnées et suivies que l'on force la nature à découvrir son secret ; toutes les autres méthodes n'ont jamais réussi* ». Malheureusement pour lui, la réputation de Buffon en tant que styliste littéraire a également donné des munitions à ses détracteurs comme le mathématicien Jean le Rond d'Alembert, qui, par exemple, l'a appelé « *le grand marchand de phrases* ». Buffon, sûr de lui, décide de faire ses recherches sur l'âge de la Terre dans « *le livre de la nature* » et non dans « *le livre sacré* ». Son livre « *les époques de la nature* » (1778) aborde le sujet. Les grands scientifiques et philosophes du 18<sup>ème</sup> siècle parient déjà sur une Terre ferrique avec un cœur en fusion et refroidissant depuis sa création. Pourquoi avait-on cette idée à cette époque, dès Leibnitz même, que la Terre avait un cœur en fu-



Le volcan Taal s'est réveillé début janvier 2020. Il fait partie des nombreux volcans actifs des Philippines dénombrés sur la carte ci-dessous :



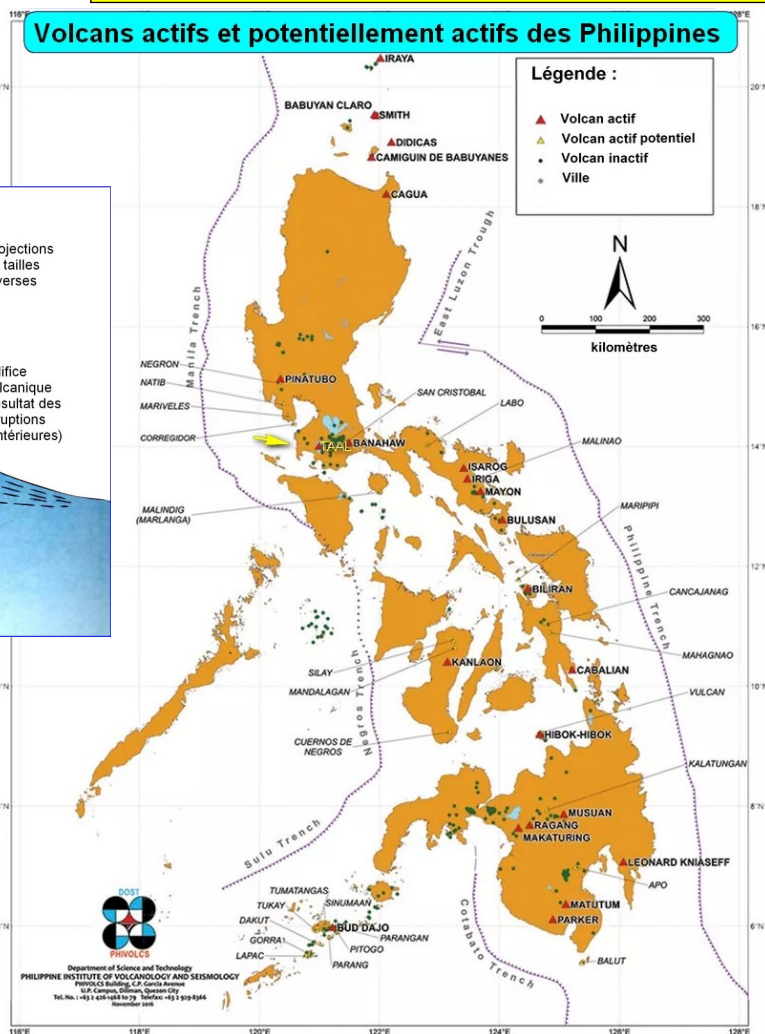
Le volcan est un bon ramonneur de cheminée... parfait pour connaître la nature de ce qui se cache dessous.

sion ? Personne n'était allé au centre de la Terre... mais les volcans étaient sans aucun doute le premier indice : quand on voit le magma, la lave qui sort de terre, extrêmement chaude, qui vient des profondeurs... dessous, c'est forcément la chaleur infernale !

Mais les volcans ne sont pas tous au même endroit. Il y aurait donc des endroits chauds et d'autres pas dans la Terre. Qui est en mesure de répondre à cela ?

Le centre de la Terre n'a toujours pas été atteint par l'homme mais il y a des cas de figure où l'homme a quelque peu progressé sous terre comme avec les mines souterraines, pour extraire du charbon ou du minerai de fer par exemple. L'extraction du charbon dans les mines au 19<sup>ème</sup> siècle, a informé des conditions difficiles de ce travail, avec des chaleurs étouffantes : + 3 degrés tous les 100 mètres ; la température devient vite insupportable et c'est à peu près la même augmentation partout sur le globe où l'homme a creusé, ce qui semble confirmer que plus on va

vers le centre, et plus c'est chaud. Autre constat : quand le pain sort du four, sa croûte est durcie et va refroidir rapidement mais l'intérieur reste mou et chaud, chose constatée si l'on coupe le pain tout de suite. Ainsi, l'extérieur refroidit plus vite que l'intérieur : la Terre au début est une grande boule en fusion, puis elle refroidit, mais plus vite à l'extérieur ; son cœur reste très chaud mais continue à se refroidir. Buffon connaissait l'âge de la Terre prônée par l'Eglise mais avait des doutes. Il avait compté des varves (terme de géologie qui désigne des lamines saisonnières) dans son coin de Bourgogne et

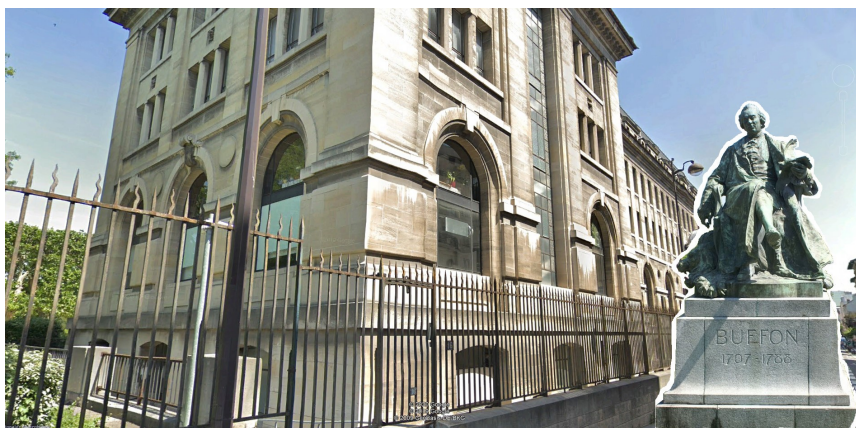


le résultat lui indiquait que la Terre avait plus de 10 000 ans ; en bon savant, avec l'idée de cette boule de fer en fusion qui se refroidit, il décide alors de choisir une voie plus expérimentale. Et en partant de ce modèle, Buffon se dit que bien que la Terre soit trop grosse pour y mener des expériences, si c'est comme une boule de fer, il suffit d'expérimenter avec un objet compréhensible et accessible. Il fabrique donc des modèles réduits de la Terre : des boulets chauffés autant que possible, et qui vont refroidir progressivement à température ambiante, en suivant un protocole opératoire rigoureux. Par « chance », il possède des forges en Bourgogne et fait donc fabriquer une dizaine de boules de 1/2 à 6 pouces. Mais à cette époque, point de thermomètres ou de caméras infrarouge précises ; on mesure à l'œil selon la couleur et ce n'est pas par hasard que les expressions « chauffé au rouge » ou « chauffé à blanc » s'entendent ; de plus, Buffon n'hésitera pas à solliciter de jolies jeunes femmes, qui ont la peau douce et sensible, pour juger finement les températures « au toucher » (de la précision... pas autre chose). Les essais portent donc sur différentes grosseurs de boules jusqu'à obtenir une certaine confiance dans le résultat des « mesures », pour déterminer une loi d'échelle : en fonction de la taille, voilà le temps qu'il faut pour se refroidir. A priori, cela semble malin et le résultat donné pour une boule comme la Terre est de 75 000 ans. Tout de même un zéro de gagné... mais le chemin est encore long pour la vérité. En fait, il y a des choses étranges dans le document écrit par Buffon :

*« En supposant, comme tous les phénomènes paraissent l'indiquer, que le Terre ait été autrefois dans un état de liquéfaction par le feu, il est démontré par nos expériences que si le globe était composé entièrement de fer ou de matière ferrugineuse, il ne se serait consolidé jusqu'au centre qu'en 4 026 ans, refroidi jusqu'au point de pouvoir le toucher sans se brûler qu'en 46 991 ans, refroidi au point de la température actuelle qu'en 100 696 ans... ».*

Une telle réponse à un problème actuel de physique ferait sursauter le professeur qui le compterait comme faux, sans même regarder le résultat ; parce que ces résultats, tels qu'énoncés par Buffon sont beaucoup trop précis. Un résultat ne doit pas se donner avec plus de précision qu'on ne le puisse garantir, à savoir les chiffres significatifs. Avec ses expériences et ses procédés pour le moins approximatifs, s'il avait un seul chiffre significatif, ce serait déjà bien mais il en donne six ! Grosse faute professionnelle... et cette façon de procéder n'est pas claire : trop de précision pour impressionner ? Pour faire semblant qu'on s'appuie sur une méthode infail- lible, alors que c'est bancal ? A vrai dire, en privé, Buffon pensait que la Terre était vieille de plusieurs millions d'années. Alors pourquoi énoncer des résultats qu'il sa-

vait faux ? Pour des questions religieuses ; la date officielle de la création de la Terre pour l'Eglise est - 4 004 avant J.C., et il n'est pas encore question, dans les années 1770, d'écrire que la Terre est là depuis plusieurs millions d'années. Déjà, 75 000 ans, cela fait beaucoup mais bon, on peut tenter d'expliquer que l'expérience reste une expérience et que les résultats se discutent... Le texte de Buffon est celui d'un homme qui ne peut écrire ce qu'il pense vraiment mais il est le premier à avoir émis l'hypothèse que ce problème peut être abordé sous un angle scientifique, un angle d'expérience physique.



**La statue de Buffon au Jardin des plantes, superposée sur la rue Buffon qui jouxte le Museum d'histoire naturelle (12<sup>ème</sup> arr. Paris).**

Les forges de M. Buffon situées à Montbard ont employé pas mal d'ouvriers dont ceux qui ont réalisé ces grilles. Buffon se les a commandées pour le jardin du Roi, et elles entourent aujourd'hui le jardin des plantes. Voilà de quoi assurer le salaire de bons ouvriers mais pas seulement... non ?

Le canal de Bourgogne coule à côté des forges qui hélas, devenues non rentables, furent fermées avant son inauguration, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Le canal figurait bien pourtant sur les plans des bâtiments des forges... On a frisé le délit d'initié.

**Nota :** sa première publication de l'âge de la Terre en 1779 dans « *les époques de la nature* » indique 25 000 ans ; un blasphème pour l'Eglise et il est menacé d'emprisonnement et va se réfugier sur ses terres natales. Retour à Paris : 50 000 ans, donc retour en Bourgogne. A nouveau, retour à Paris avec ces 75 000 ans et fuite encore. La dernière phrase de son livre est « *...plus on étendra le temps et plus nous approcherons de la vérité et de la réalité de l'emploi qu'en fait la nature* ». Mais sa chronologie officielle, il l'explique en disant « *Néanmoins, il faut raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence* ». Belle pirouette car à quelques années près, c'était la guilotine qui le raccourcissait.

Buffon, mort en 1788, a été nommé par le roi Louis XV intendant du jardin du roi à 31 ans, et le resta pendant un demi siècle.

L'affaire pourrait s'arrêter là, mais la soif de connaissance est gravée dans nos gènes, et quelques temps plus tard, Joseph Fourier s'occupera du problème. C'est un grand scientifique, dans la lignée des scientifiques de la révolution française mais aussi un homme politique (préfet), et il sera le fondateur de l'analyse harmonique qui est utilisée encore maintenant tous les jours, ne serait-ce qu'en écoutant de la musique avec des baladeurs MP3. Joseph Fourier est aussi pionnier de l'usage des équations aux dérivées partielles ; l'usage de ces équations



### Jean-Baptiste Joseph Fourier

Né le 21 mars 1768 à Auxerre, Bourgogne, Royaume de France. Décédé le 16 mai 1830 (à 62 ans) Paris, Royaume de France.

Scientifique et homme politique français.

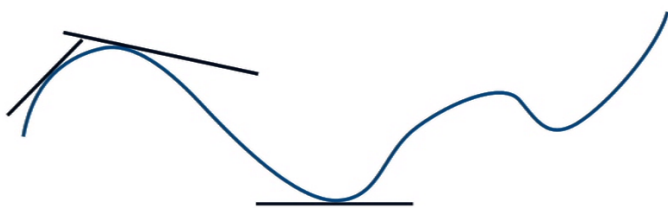
Il est devenu orphelin à l'âge de neuf ans. Fourier a été recommandé à l'évêque d'Auxerre et, grâce à cette introduction, il a été formé par l'Ordre bénédictin du couvent de Saint-Marc. Les commissions du corps scientifique de l'armée étaient réservées à ceux de bonne naissance, et étant ainsi inéligible, il accepta un cours militaire de mathématiques. Il a pris une part importante dans son propre district dans la promotion de la Révolution française, siégeant au Comité révolutionnaire local. Il a été emprisonné brièvement pendant la Terreur mais, en 1795, a été nommé à l'École Normale et a ensuite succédé à Joseph-Louis Lagrange à l'École Polytechnique.

Fourier accompagne Napoléon Bonaparte dans son expédition égyptienne en 1798, comme conseiller scientifique, et il est nommé secrétaire de l'Institut d'Égypte. Coupé de la France par la flotte britannique, il organise les ateliers sur lesquels l'armée française doit compter pour ses munitions de guerre. Il a également contribué à plusieurs articles mathématiques à l'Institut égyptien (également appelé l'Institut du Caire) que Napoléon a fondé au Caire, en vue d'affaiblir l'influence britannique en Orient. Après les victoires britanniques et la capitulation des Français sous le général Menou en 1801, Fourier rentre en France où il pensait reprendre son poste universitaire de professeur à l'École polytechnique mais Napoléon le nomme préfet du département de l'Isère à Grenoble, où il a supervisé la construction de routes et d'autres projets. C'est à Grenoble qu'il commence à expérimenter la propagation de la chaleur. Il a présenté son article sur la propagation de la chaleur dans les corps solides à l'Institut de Paris le 21 décembre 1807.

Son nom est l'un des 72 noms inscrits sur la Tour Eiffel.

tions va d'ailleurs être un pilier central dans la résolution de notre problème d'âge de la Terre.

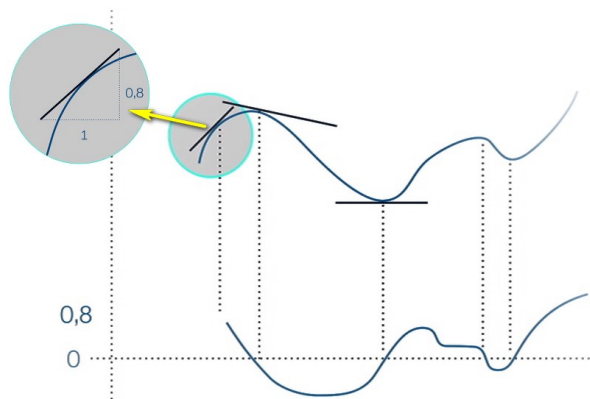
Qu'est-ce qu'une dérivée ? Imaginez une fonction qui dépend d'un paramètre ou d'un signal qui varie dans le temps... ça augmente, puis ça diminue... et vous voulez mesurer à quelle vitesse cela se fait. La courbe est compliquée mais on peut l'approcher par des formes



simples comme des successions de droites tangentes à ce graphe, qui le frôlent en un point en l'épousant aussi près qu'il est possible.

Si la fonction augmente, la pente sera positive, et si elle décroît, la pente sera négative, et sa valeur plus ou

moins grande selon la façon dont évolue la fonction. Cela donne par exemple : 0,8 si on avance d'1 cm vers la droite en montant de 0,8 cm sur cette droite tangente. La valeur 0,8 est la dérivée au point qui nous intéresse :



A chaque point de la courbe, on regarde la pente de la tangente et on reporte la valeur trouvée qui devient la courbe dérivée. La courbe dérivée est précieuse et nous renseigne sur la variation de la fonction. Il est possible de continuer ainsi en traçant la courbe de la dérivée de la courbe dérivée précédente : la dérivée seconde.

Un physicien pensera ainsi à la vitesse comme étant la dérivée des changements de position d'un mobile, et à l'accélération comme la dérivée seconde, qu'on ressent comme une force sur notre corps, telle la gravité.

Et les dérivées partielles ? Dans la vraie vie, un signal ne dépend pas d'une variable, mais de plein de variables ! Prenez la température  $T$  de l'atmosphère, elle dépend du temps, elle peut augmenter si on attend quelques minutes, mais elle dépend aussi de l'espace, de la latitude, de la longitude et de l'altitude en augmentant ou en baissant ; nous pouvons donc nous intéresser aux tendances en fonction de tous ces paramètres, et les dérivées partielles sont ces pentes, ces tendances. Ici, la fonction  $T$  représente la variation de température :

$T(t,x,y,z)$  : température en fonction de  
 $t =$  temps et  $x, y, z =$  position

$$\frac{\partial T}{\partial t} \text{ pente par rapport à } t \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \text{ pente par rapport à } x$$

(1) qu'on exprime en disant d rond de grand  $T$  (température) sur d rond de petit  $t$  (temps) égal à la variation de la température par rapport au temps.

Le crédo des équations aux dérivées partielles est une des découvertes les plus importantes de toute l'histoire des sciences. Avec des équations qui lient les pentes, donnent les tendances par rapport aux différentes variables, il est possible de modéliser les phénomènes physiques : la température de demain sur Paris est un problème d'équations aux dérivées partielles, tout comme le flot d'un torrent, l'évolution d'un atome, la croissance d'un cancer ou d'un embryon qui peuvent ainsi être modélisés ; une approche puissante et parmi ces équations aux dérivées partielles, certaines sont plus ou moins célèbres. Une des premières à être étudiée dans un cours spécifique est l'équation de la chaleur, un des chefs-d'œuvre de Joseph Fourier : une équation qui porte sur la température, dans un mémoire que Fourier écrit sur les variations de chaleur au sein des métaux, un sujet qui lui tient à cœur. Et c'est la première fois où l'on se lance dans la représentation mathématique des variations de chaleur. La température, c'est l'inconnue, qui dépend du temps, et de la position :

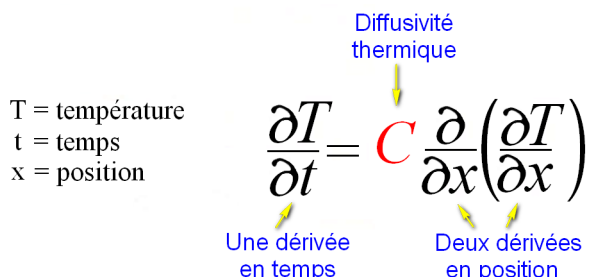
En physique et en mathématiques, l'équation de la chaleur est une équation différentielle partielle qui décrit comment la distribution d'une certaine quantité (comme la chaleur) évolue au fil du temps

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

dans un milieu solide, car elle s'écoule spontanément des endroits où elle est plus élevée vers des endroits où elle est plus basse. C'est un cas particulier de l'équation de diffusion.

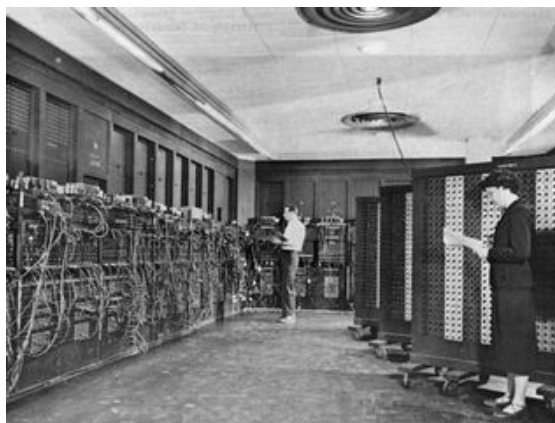
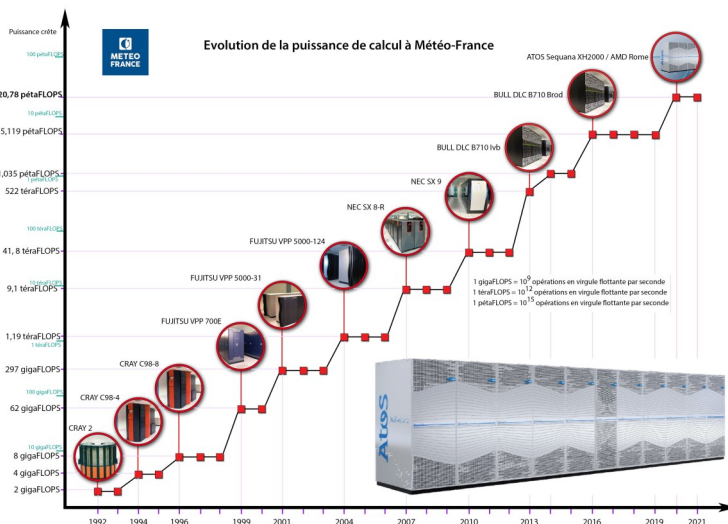
Cette équation a été développée et résolue pour la première fois par Joseph Fourier en 1822 pour décrire le flux de chaleur. Cependant, elle est d'une importance fondamentale dans divers domaines scientifiques :

Par exemple, en théorie des probabilités, l'équation de la chaleur est liée à l'étude des marches aléatoires et du mouvement brownien, via l'équation de Fokker – Planck.



A gauche, la variation de la température par rapport au temps, et à droite, la variation de la variation de la température par rapport à la position. A gauche, une dérivée toute simple et à droite une dérivée seconde (à gauche par rapport au temps et à droite par rapport à l'espace) et entre les deux un coefficient multiplicatif : la diffusivité thermique qui va dépendre du matériau (par exemple, dans un bloc de fer la température ne varie peut-être pas aussi vite que dans un bloc de cuivre). Le nombre de variables de position pourra varier selon que l'on souhaite représenter une tige, une plaque ou un lingot de métal (x ; x et y ; x, y et z). La solution doit servir à prédire les variations de température de l'échantillon et, par extension, permettre de prédire comment la température va varier dans la sphère terrestre.

De nos jours, cette résolution d'équations aux dérivées partielles est un sujet qui occupe des milliers de personnes à travers le monde, et cela se fait grâce à des ordinateurs de plus en plus puissants comme représenté ici chez Météo-France :



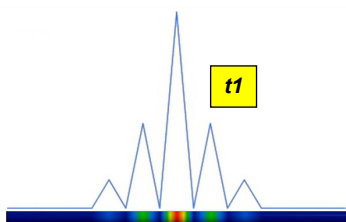
L'ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) a été conçu en 1946, un peu avant la découverte du transistor par Shockley, Brattain et Bardeen.  
Composé de 19 000 tubes, il pèse 30 tonnes et consomme 140 kW. Son horloge est de 100 kHz et il réalise 330 multiplications par seconde ! Un « must » pour l'époque.

**Le BullSequana XH2000 de chez ATOS**  
Météo-France engage le renouvellement de son système de calcul intensif qui sera opérationnel en octobre 2020. La plateforme retenue Sequana XH2000 développée par Bull, filiale d'ATOS, est fabriquée à Angers.  
Le **flop** signifie : opération à virgule flottante (i.e. sur des nombres réels).  
1 petaFLOPS = 10<sup>15</sup> opérations par seconde.

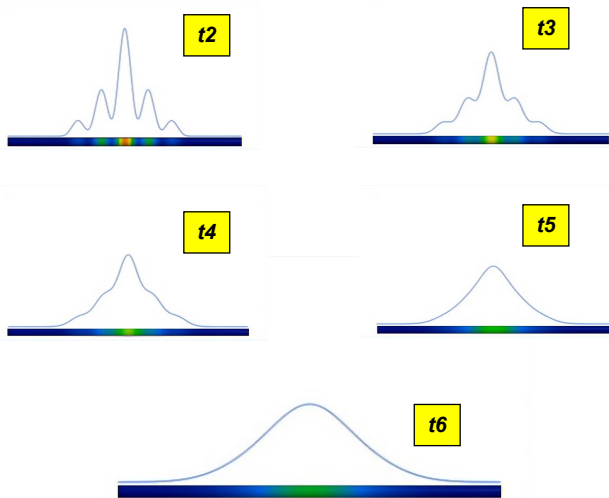
Toutefois, l'ordinateur ne comprend pas la dérivée... ce n'est pas dans ses cordes mais en revanche, les nombres grands ou petits, c'est son domaine. On triche en remplaçant la dérivée (la tangente à la courbe en un point), par un accroissement infinitésimal, un taux de variation évalué sur un très petit intervalle de temps, et c'est le domaine de la simulation numérique ou comment traduire une équation aux dérivées partielles dans un langage compréhensible par un ordinateur.

Voici ce qu'on obtient de la distribution de la température dans une barre de métal :

Un code couleur nous renseigne sur la répartition des températures, en rouge c'est chaud, en bleu c'est froid avec les valeurs intermédiaires colorées du bleu au rouge.



Comment cela va-t-il se refroidir ? Quelle est l'évolution au cours du temps des profils de température ?

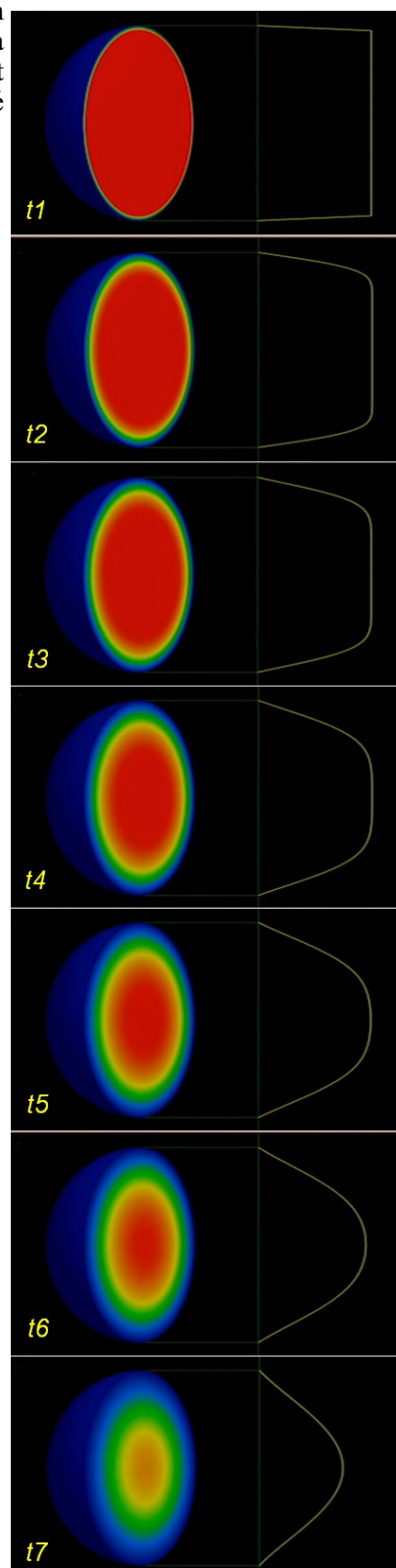
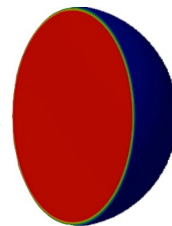


Comme on le voit, le refroidissement n'est pas du tout uniforme au départ (t1... t2), de grosses variations au début, des irrégularités mais qui vont s'atténuer ; globalement, la température diminue avec des endroits où ça remonte (t3...t4), mais l'évolution ralentit progressivement (t5...t6). Beaucoup de choses à dire et c'est l'enjeu de ces équations : au début, des pointes, qui s'amortissent rapidement, comme de l'érosion (le pouvoir régularisant de l'équation de la chaleur) ; des vallées viennent rencontrer des bosses, 4 à 5 bosses au départ puis une seule qui devient une forme qui semble familière pour certains : une courbe en cloche, la fameuse courbe de Gauss.

Une bonne représentation pour une barre de métal mais qu'en est-il de la Terre ?

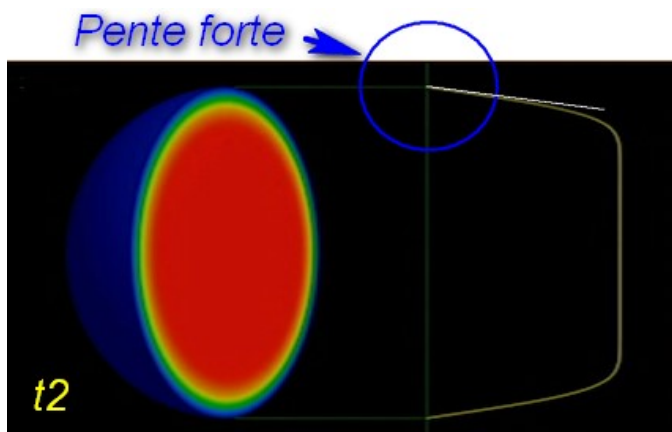
Voici la Terre selon Fourier :

au départ, une boule bien chaude, toute rouge mais avec l'extérieur bleu, déjà froid (représentée selon notre code couleur précédent). Ci-dessous, le profil des températures est à droite, et donne la température en fonction de la profondeur et du temps passé de t1 à t7 :

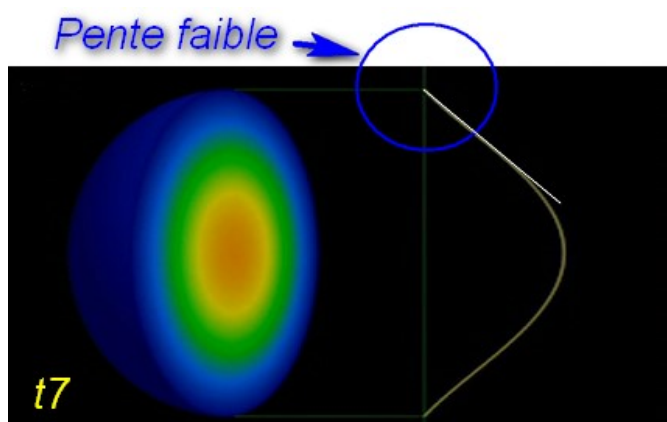


C'est comme avec la barre de fer : même phénomène de variation rapide au début, puis lente vers la fin. Et, comme on l'espérait, le cœur est resté chaud et cela correspond à ce que l'on constatait avec le pain sorti du four.

Cependant, il n'est pas possible d'aller au centre de la Terre pour comparer avec le modèle et savoir si le profil de température correspond. Mais il y a quand même une chose susceptible d'être observée : la pente de la courbe des variations de température. Au début, la pente est très forte :



Puis, elle devient rapidement plus faible en approchant la verticale (valeur dans le référentiel) :



Ainsi, de la surface vers la profondeur, on passe rapidement du froid au chaud, et à la fin, lorsque la pente est basse, le phénomène se ralentit en passant lentement du froid au chaud. Cette tangente nous indique la vitesse de variation de la température, la vitesse à laquelle la température augmente quand on descend dans les profondeurs.

Cette vitesse est appelée le gradient géothermique.

Il n'est pas possible, physiquement, d'aller mesurer la température profondément mais cette pente, on peut la mesurer près de la surface et la comparer avec le modèle ; si l'augmentation de la température est très rapide quand on descend, cela veut dire que la Terre est jeune, et inversement si la pente mesurée est faible.

Voilà l'idée de Fourier... qui reste à mettre en équation. Cependant, Fourier ne disposait pas d'ordinateur, mais il était malin ! Il comprend que dans certains cas, il est possible de résoudre l'équation exactement.

Pour cela, Il faut faire des hypothèses :

1. La courbure de la Terre est négligeable (bien que la Terre soit ronde, il montre que ça ne change pas grand-chose).
2. Pas de source de chaleur. Pas de feu qui brûlerait à l'intérieur de la Terre.
3. La Terre est comme une masse sphérique homogène (sans doute une grosse simplification mais globalement, ce sont des roches ferriques).
4. A l'origine, la température était uniforme (notée  $T_0$  à l'origine du temps  $t=0$ ), a priori la température de fusion du fer.
5. A la surface de la Terre, la température  $T_e$  varie peu (il y a un million d'années, la température ambiante était en gros celle d'aujourd'hui, et c'était comme ça depuis le début ou presque).

Reste donc à mettre cela en équation, en ayant pour objectif d'obtenir le taux d'augmentation de  $T$  en surface, et le gradient, en fonction des paramètres  $T_0$  (température à l'origine), et  $T_e$  (température en surface à la profondeur  $z=0$ ) qui sont fournis.

C'est le travail des mathématiciens de faire correspondre les équations mathématiques aux hypothèses physiques. Une formule nous prédit ainsi exactement le gradient en fonction du temps :

$$\Gamma = \frac{T_0 - T_e}{\sqrt{\pi C t}}$$

Annotations de la formule :

- $T_0$  : température initiale
- $T_e$  : température ambiante
- $\pi$  : pi
- $C$  : diffusivité thermique
- $t$  : temps

Le gradient va dépendre de la température de fusion du fer moins la température finale, divisé par racine de... Que vient pi là dedans ? Eh bien, c'est comme ça en physique, pi intervient partout ! Archimède s'en est aperçu avant nous. Divisé donc par racine de pi multiplié par le coefficient de diffusion thermique  $C$  (vu préalablement) et le temps  $t$ . Et ce qui nous intéresse, c'est le temps  $t$  et nous obtenons donc :

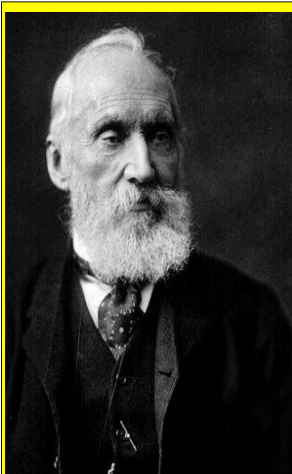
$$t = \frac{1}{\pi C} \left( \frac{T_0 - T_e}{\Gamma} \right)^2$$

Voilà, vous avez la réponse... Fourier a dit « on trouverait ainsi un grand nombre de siècles » ; c'est l'âge de la Terre selon Fourier. Pour Cédric Villani, qui a reçu la médaille Fields (ce n'est pas rien) : « Fourier s'est dit : bon, là vraiment j'ai été fort, j'ai suivi un très bon raisonnement, j'ai résolu l'équation de la chaleur, c'est ça, j'en suis fier... peut-être quelque chose qui m'a échappé mais si, maintenant, je

*donne une valeur et que la valeur est fausse... les gens ne se souviendront que de la valeur, et on oubliera tout le beau raisonnement que j'ai fait avec les équations aux dérivées partielles. Je vais en rester là, car je sais que mon raisonnement est le bon ».*

L'histoire Fourier s'arrête ici. Mais un nouvel héros va intervenir. Non, ce n'est pas Zorro !

Il s'agit de William Thomson plus connu sous le nom de lord Kelvin, grand physicien et aussi inventeur car il aimait bricoler, et en tant qu'ingénieur, il n'hésitait pas à mettre la main à la pâte.



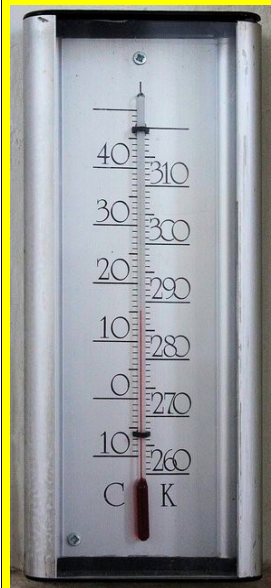
**William Thomson**, 1er baron Kelvin, était un physicien et ingénieur mathématicien irlandais-écossais (de l'Ulster Scots) né à Belfast en 1824, décédé en 1907.

À l'Université de Glasgow, il fit un travail important dans l'analyse mathématique de l'électricité et la formulation des première et deuxième lois de la thermodynamique. Il a également eu une carrière d'ingénieur et d'inventeur en télégraphie électrique, ce qui l'a propulsé aux yeux du public et a assuré sa richesse, sa renommée et son honneur. Pour son travail sur le projet télégraphique transatlantique, il fut fait chevalier en 1866 par la reine Victoria, devenant Sir William Thomson. Il avait de vastes intérêts maritimes et il était surtout connu pour son travail sur la boussole de navigateur, qui avait auparavant une fiabilité limitée. Les températures

absolues sont indiquées en unités kelvin en son honneur.

Il a été le premier scientifique britannique à être élevé à la Chambre des lords. Le titre fait référence à la rivière Kelvin, qui coule près de son laboratoire à l'Université de Glasgow.

Comme de nombreux scientifiques, Thomson a commis des erreurs :



Lorsque la découverte des rayons X par Röntgen a été annoncée à la fin de 1895, lord Kelvin était entièrement sceptique et considérait l'annonce comme un canular.

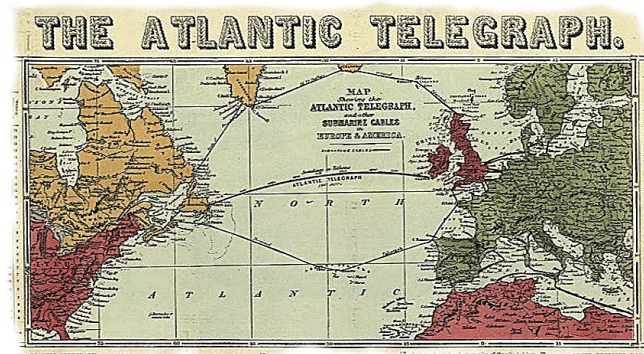
En 1896, il a refusé une invitation à rejoindre la Société aéronautique, écrivant que *"je n'ai pas la plus petite molécule de foi en navigation aérienne autre que la montgolfière ou d'attendre de bons résultats de l'un des essais dont nous entendons parler."*

En 1898, Kelvin a prédit qu'il ne restait que 400 ans d'approvisionnement en oxygène sur la planète, en raison du taux de combustion des combustibles. Dans son calcul, Kelvin a supposé que la photosynthèse était la seule source d'oxygène libre mais il ne connaissait sans doute pas toutes les composantes du cycle de l'oxygène.

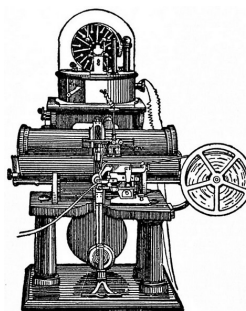
← **Un thermomètre peu courant**  
(gradués en degrés Celsius et kelvin)

Ainsi donc, Lord Kelvin nous a laissé le *galvanomètre de Kelvin*, l'*analyseur harmonique* réalisé avec son frère, qui décompose automatiquement un signal dans les différentes fréquences de Fourier, le *théorème de Kelvin* qui s'applique en mécanique des fluides et des concepts aussi fondamentaux que l'énergie cinétique. L'expertise de Kelvin a été essentielle dans une des

grandes aventures technologiques de l'époque moderne : le premier câble de communication transatlantique, autorisant la transmission de messages télégraphiques entre l'ancien et le nouveau monde ; sans l'expertise de Kelvin dans les équations



aux dérivées partielles, l'expédition n'aurait pas réussi et c'est cet épisode qui va rendre Kelvin riche et célèbre ; pour les expéditions suivantes, il mettra au point un enregistreur télégraphique.



L'enregistreur télégraphique de lord Kelvin (breveté en 1867).

De grandes difficultés attendaient les poseurs du 1er câble transatlantique en 1858. De plus, l'absence de répéteurs ne permettait pas une transmission à haut débit : 0,1 mot par minute. Le premier message pris 17 heures pour sa transmission et ce n'est pas avant le XXème siècle que la vitesse de transmission atteint les 120 mots par minute, et Londres est devenu un centre mondial de communication.

Grâce aux avancées technologiques, le premier câble transatlantique avec répéteur fut le TAT-1 mis en service en 1956.

En 2018, une étude de l'*American Economic Review* a montré que le télégraphe transatlantique a contribué aux échanges et réduit les prix, et le gain est estimé à 8 % des valeurs exportées.

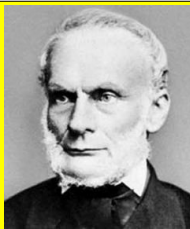


Autre exemple, sa contribution à la mécanique des fluides mais son chef d'œuvre est l'effet Joule-Thomson qui est à la base du fonctionnement du réfrigérateur : des connaissances théoriques pour obtenir du froid qui vont changer le mode de vie des gens. Les aficionados des frigos ont d'ailleurs une marque qui se nomme Kelvinator... l'arme ultime pour faire du froid, mais qui n'a pas résisté au temps (c'est désormais une marque de commerce d'Electrolux, firme suédoise).

Kelvin est un des premiers à s'attaquer à la thermodynamique : la science des énergies et des variations de chaleur, à tel point que l'on a attribué à Kelvin l'honneur extraordinaire de nommer une unité de température par son nom : le kelvin (le zéro absolu :  $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$ ). La mesure des températures en physique se fait selon l'échelle kelvin.

Mais revenons à la Terre qui passionne Kelvin avec ce problème d'âge, et en 1842, peu de temps après Fourier, il reprend le raisonnement, le calcul et la discussion ; il vérifie toutes les hypothèses de Fourier, ses formules, discute, argumente et, cette fois, il espère bien conclure. La thermodynamique était née, et le physicien allemand Rudolph Clausius (1822-1888) avait découvert la notion d'irréversibilité et donc l'impossibilité de tout retour vers le passé, et l'entropie en était sa jauge ; depuis la création de l'Univers, l'énergie est constante, et l'entropie tend vers un maximum et cela donnait un sens à l'histoire mais la géologie avait du mal à en tenir compte. On extrapolait encore les températures dans les mines à des valeurs démentielles pour aboutir à des 200 000 degrés au centre de la Terre bien que Fourier soulignait déjà la diminution du gradient géothermique en profondeur ; on supposait encore que la Terre était un immense océan de lave surmontée d'une croûte mince d'une cinquantaine de kilomètres. Mais, pour un physicien, la Terre devait être considérée comme une machine thermique ; comme Carnot l'avait expliqué, un travail mécanique peut être produit grâce aux différences de température et les volcans en seraient une illustration, mais la chaleur ne peut que diminuer et donc la Terre sera condamnée au repos éternel.

**Rudolf Clausius** (né en Pologne en 1822, mort à Bonn en 1888) est un physicien et mathématicien allemand considéré pour ses contributions importantes à la thermodynamique (seconde loi de la thermodynamique). C'est lui qui inventa le concept d'entropie en 1865.



**Charles Lyell** (1797 – 1875), est un géologue britannique qui a popularisé « l'uniformitarisme » de James Hutton. Ses *Principes de géologie* sont publiés en plusieurs volumes, sous-titrés : « *An attempt to explain the former changes of the Earth's surface by reference to causes now in operation* - Une tentative d'expliquer les changements de la surface de la terre par des causes opérantes actuellement ». La Terre a été façonnée lentement sur une très longue période de temps par des forces toujours existantes. Il n'a jamais totalement accepté la sélection naturelle comme le moteur de l'évolution mais était un ami proche de Darwin.



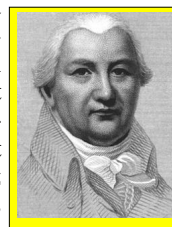
Les explications de Lyell (1797-1875) qui supposait un mouvement perpétuel, grâce à un artificier divin, depuis la nuit des temps (donc une Terre très vieille) ne peuvent qu'irriter Kelvin qui va lutter contre « l'uniformitarisme » : le présent est la clé du passé... l'évolution de la Terre résulte de changements lents et cumulés.

À la lecture du texte de Kelvin, on sent que l'affaire lui tenait à cœur, et une certaine emphase se dégage, un grand lyrisme qui

parle du grand poème mathématique de Fourier : « *le but de la présente contribution est d'estimer, à partir de l'accroissement de la température de la Terre vers les profondeurs, la date initiale de ce concistentior status qui, d'après la théorie de Leibnitz est le début de tous les temps géologiques* » (*Donec quiescentibus causis atque aequilibratis, constentior emergeret status rerum : les causes perturbatrices ayant été épuisées et équilibrées, un état stable s'est enfin produit*).

Après tout ça, il donne la solution : entre 40 et 200 millions d'années. Faut-il se féliciter ou se désoler ? Il y a du progrès, il y a beaucoup de zéros mais nous ne sommes pas encore à l'échelle du milliard, mais on s'en approche. Un grand progrès salué par ses pairs ? Non, car cette estimation de Kelvin allait poser plein de soucis ; soucis d'autant plus graves que, malheureusement, Kelvin corrobore son estimation avec d'autres méthodes de calcul : une basée sur l'âge du Soleil, l'autre basée sur l'étude des marées. Par exemple, en comptant très large, il affirme : « *Il semble ainsi des plus probables que le Soleil n'a pas illuminé la Terre pendant 100 millions d'années, et certain qu'il ne l'a pas fait pendant 500 millions. Quant à l'avenir, nous disons, avec une égale certitude, que les hôtes de la Terre ne pourront pas continuer à jouir de la lumière et de la chaleur essentielles à leur existence beaucoup plus longtemps encore, à moins que le grand arsenal de la Création ne ménage des ressources inconnues de nous* ». Kelvin ménage ainsi ses arrières avec des marges sur ses résultats et cette idée de « ressources encore inconnues ». Mais il n'hésitera pas à clamer que la Terre est essentiellement solide, avec « *une rigidité effective au moins aussi grande que celle de l'acier* » car sinon, la croûte terrestre serait ballotée au grès des marées et cela ne collerait plus avec les théories de Fourier (pour Kelvin, la cristallisation produit des roches denses qui s'enfoncent dans les profondeurs, plus denses que les laves des volcans et cela chauffe suffisamment la lave qui conserve ainsi une température uniforme ; la cristallisation s'achèvera à la surface du globe ; c'est pareil pour le Soleil, mais comme il est plus gros, il est encore fluide pour un certain temps). Démontrer la rigidité de la Terre était pour Kelvin un élément essentiel de sa théorie pour établir l'âge de la Terre.

Cependant, la géologie avait subi des bouleversements considérables dans les décennies qui précédaient les calculs de Kelvin ; la théorie gradualiste de Hutton (1726-1797) et Lyell (1797-1875) s'était imposée chez les géologues et supposait de



**James Hutton** (1726 - 1797), intéressé aux mathématiques et à la chimie (collaboration fructueuse avec James Davie), était un géologue écossais connu pour sa formulation de « l'uniformitarisme ». Il est considéré comme un des pères de la géologie moderne.

très, très lents changements, ce qui laissait penser que la Terre existait depuis toujours (*No vestige of a beginning, no prospect of an end* : pas de trace d'un commencement et rien n'indique une fin) ; alors quand Kelvin arrive en annonçant son modeste 200 millions d'années, ils sont embêtés, mais... les géologues arrivent à s'adapter : il suffit de refaire une chronologie de la Terre depuis les origines en tenant compte de cette nouvelle estimation. Kelvin est une autorité incontestée en physique.

C'était sans compter sur des nouveaux venus, des scienti-

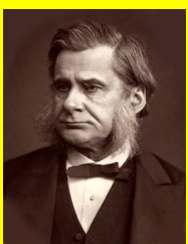


fiques d'une autre catégorie : les évolutionnistes. La théorie de l'évolution va être un autre grand bouleversement scientifique du siècle. Charles Darwin, un naturaliste britannique suppose que les espèces se transforment lentement les unes dans les autres, donc cela a besoin de beaucoup de temps. Darwin comprend bien que l'estimation de Kelvin est trop faible pour sa théorie ; va donc se dérouler un grand match avec à gauche lord Kelvin, meilleur physicien du monde avec des traités qui font référence, et à droite Sir Charles Darwin, le scientifique le plus sulfureux de son temps et l'un des auteurs de la théorie la plus révolutionnaire du 19ème siècle, avec des points de vue contradictoires et inconciliables. Mais qui va gagner ?

En 1893, Kelvin reprend ses estimations en tenant compte des progrès qui ont été réalisés depuis et cette fois trouve 24 millions d'années. Alors là, c'est embêtant... on arrête de jouer, les géologues n'en peuvent plus ; arrive un épisode de l'histoire où cela devient la bataille rangée entre scientifiques de diverses obédiences et des théories qui s'affrontent ; c'est une crise scientifique majeure. Le débat va bien au-delà des adversaires scientifiques avec cette citation de Mark Twain (écrivain 1835-1910) : « *Comme lord Kelvin est la plus haute autorité scientifique vivante, je pense que nous devons nous incliner et accepter ses vues* ». On ne sait pas vraiment si cela est à prendre au 1er, 2ème ou 3ème degré mais cela montre que le débat faisait fureur.

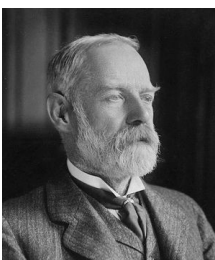
**Thomas Henry Huxley** (1825 - 1895) était un biologiste et anthropologue anglais spécialisé en anatomie comparée.

Connu comme le "Bulldog" de Darwin pour son plaidoyer de la théorie de l'évolution de Charles Darwin, Huxley a été lent à accepter certaines des idées de Darwin, comme le gradualisme, et il était indécis quant à la sélection naturelle, mais malgré cela, il était de tout cœur dans son soutien public à Darwin.



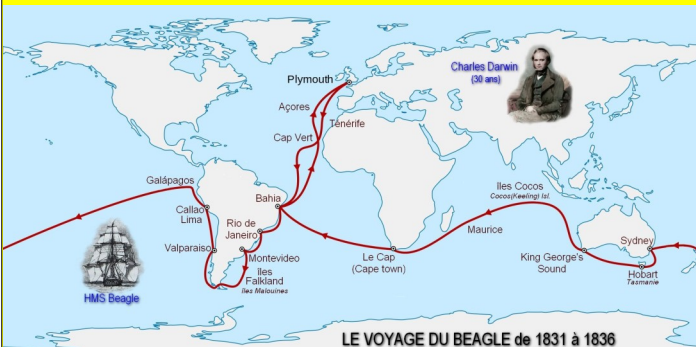
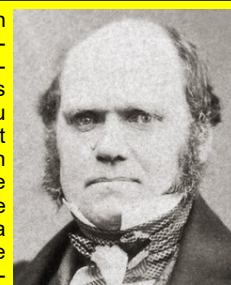
Pour Thomas Henry Huxley, biologiste britannique disciple de Darwin qui parle de la Mathématique, car bien sûr, au cœur de la dispute il y avait une équation mathématique, l'équation de la chaleur : « *la Mathématique peut se comparer à un moulin d'une facture exquise, qui peut moudre de la matière à n'importe quel degré de finesse ; cependant, ce que l'on en tire dépend de ce que l'on*

*y a mis ; et de même que le meilleur moulin du monde n'extraira pas de la farine de blé de cosses de petits pois, ainsi des pages de formules ne fourniront pas un résultat fiable à partir de données imprécises* ». De nos jours, un acronyme résume cela : le principe GIGO (Garbage In... Garbage Out !); d'une belle machine avec des postulats que vous utilisez qui sont bons pour la poubelle, ne sortira que des conclusions qui seront, elles aussi, bonnes pour la poubelle. D'autres scientifiques s'y sont mis, avec plein de différentes méthodes basées sur un peu n'importe quoi, y compris une théorie proposée par le 5ème enfant de Charles Darwin : George Darwin, astronome britannique, avec des détails plus ou moins comparables à la version de Kelvin avec lequel il avait travaillé dans les années 1860 (travaux sur les marées). Plus de 15 années de discussions qui vont même lasser l'Eglise qui va abandonner la chaire... ce qui montre que l'Eglise peut parfois évoluer.



**George Howard Darwin** (1845 - 1912). Astronome anglais. Un cratère martien porte son nom (Darwin crater)

**Charles Robert Darwin** (1809 - 1882) était un naturaliste, géologue et biologiste anglais, connu pour ses contributions à la science de l'évolution. Sa proposition selon laquelle toutes les espèces de la vie sont descendues au fil du temps des ancêtres communs est maintenant largement acceptée et considérée comme un concept fondamental en science. Dans une publication conjointe avec Alfred Russel Wallace (qui avait bien failli le devancer), il a présenté sa théorie scientifique selon laquelle ce modèle de ramification de l'évolution résultait d'un processus qu'il a appelé sélection naturelle, dans lequel la lutte pour l'existence a un effet similaire à la sélection artificielle impliquée dans l'élevage sélectif. Darwin a publié sa théorie de l'évolution avec des preuves convaincantes dans son livre de 1859 sur l'origine des espèces. Dans les années 1870, la communauté scientifique et la majorité du public instruit avaient accepté l'évolution comme un fait. Cependant, beaucoup préféraient des explications concurrentes qui ne donnaient qu'un rôle mineur à la sélection naturelle, et ce n'est qu'avec l'émergence de la synthèse évolutive moderne des années 1930 aux années 1950 qu'un large consensus s'est développé dans lequel la sélection naturelle était le mécanisme de base de l'évolution. Son voyage de cinq ans sur le HMS Beagle (1831-1836) l'a établi comme un éminent géologue dont les observations et les théories ont soutenu la conception de Charles Lyell du changement géologique progressif, et la publication de son journal du voyage l'a rendu célèbre en tant qu'auteur populaire.



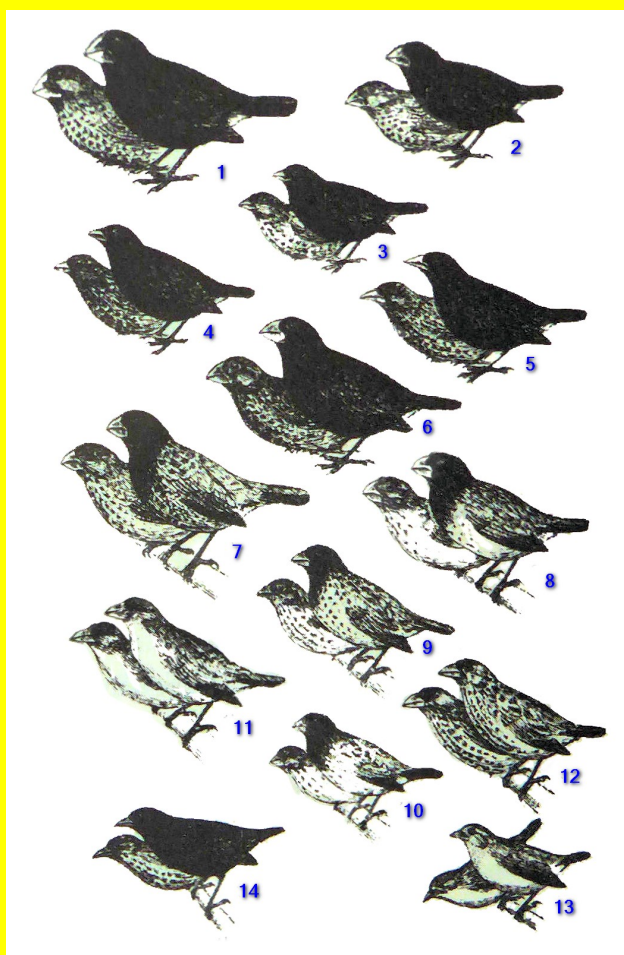
**Darwin, le touriste accidentel** par Graeme Donald (extraits) : le HMS Beagle doubla le cap Horn le 16 septembre 1835, et arriva aux îles Galapagos. C'est là, comme beaucoup l'imaginent et comme les documentaires télévisés voudraient nous le faire croire, que Darwin aurait eu une illumination et forgé la théorie de l'Évolution, de toutes pièces. Il se serait inspiré de signes présentés par la faune locale qui, isolée de toute influence extérieure et régie uniquement par les impératifs de son environnement confiné, avait développé des formes uniques. Rien ne pourrait être plus éloigné de la réalité. Darwin, toujours créationniste, était plus intéressé par les données et les échantillons géologiques et négligea passablement ce qu'il avait sous les yeux au cours de ce séjour extrêmement court dans ces îles. Dans une lettre à sa sœur, il en fait l'éloge : « *...rien ne vaut la géologie ; le plaisir des premiers jours de chasse à la perdrix ou de l'ouverture de la chasse ne peut être comparé à la découverte d'un beau groupe d'ossements fossiles qui racontent leur histoire du passé, dans une langue quasi vivante* » ; bel éloge de la géologie de la part d'un chasseur tel que Darwin, mais il est de notoriété publique qu'il passa à peine dix-neuf jours à terre sur les cinq courtes semaines où le HMS Beagle fut à l'ancre dans ces eaux. En résumé, Darwin n'apprit rien du tout pendant cette brève visite aux Galapagos... Ce n'est que plus tard, et avec l'aide de ceux qui avaient étiqueté les échantillons et noté les îles d'où ils venaient, qu'il put mettre les pièces du puzzle en ordre. Le premier soin de Darwin à son retour fut de présenter ses chers échantillons de roche à la Société de géologie de Londres lors de sa réunion du 4 janvier 1837. Ses échantillons ornithologiques mal catalogués et identifiés furent transmis à l'ornithologue John Gould (1804-1881). Celui-ci, à la réunion suivante de la Société, le 10 janvier, déclara que les oiseaux que Darwin avait pris pour des merles, des becs croisés, des roitelets et des pinsons étaient en fait tous des pinsons et qu'ils tuaient en outre une série de pinsons assez unique pour former « un groupe entièrement nouveau comportant douze espèces ». La vérité fut donc établie par Gould et non par Darwin qui, comprenant soudain que la catégorisation insulaire était d'une importance primordiale, se hâta de quêmander, emprunter ou voler les échantillons spéci-

fiques collectés par le capitaine Fitzroy et un certain Syms Covington (1816-1861), domestique de Darwin pendant toute l'expédition. Gould suggéra également que le petit nandou que Darwin avait failli dévorer pour son dernier dîner de Noël en mer, trois semaines auparavant, était en fait une autre nouvelle espèce. Il n'avait heureusement pas pris le même chemin que les carapaces de tortues, sans doute uniques mais jetées en mer après avoir été mangées...

#### LA FIN DU VOYAGE

Loin d'être le fruit d'une illumination aux Galápagos, les idées de Darwin suivirent un long et lent processus de mutation et d'évolution. Il fut soutenu dans cette démarche par son épouse paisible et forte, Emma Wedgwood (1808-1896), qui était sa cousine germaine. Leurs liens de parenté causaient un souci permanent à Darwin, car ils allaient à l'encontre de ses sombres divagations sur la reproduction sélective de la race humaine ; il était la proie de crises de culpabilité à chaque fois qu'un de leurs enfants tombait malade, craignant que ce ne fût le premier signe d'une faiblesse inhérente à cette consanguinité. Quant au capitaine Fitzroy, il respecta la tradition familiale et fit ce qu'il voulait éviter en engageant Darwin pour le voyage : par un beau samedi matin ensoleillé, le 30 avril 1865, il s'enferma tranquillement dans son cabinet de toilette et se trancha la gorge avec un rasoir.

Les fameux pinsons de Darwin :



Mâle (plumage foncé) et femelle de chaque espèce : 1, 2, 3, Géospize à grand, moyen et petit bec (*Geospiza magnirostris*, *G. fortis* et *G. fuliginosa*) ; 4, pinson vampire (*G. nebulosa*, [anciennement *difficilis*]) ; 5 et 6, Géospize des cactus et Géospize à bec conique (*G. scandens* et *G. conirostris*) ; 7, Géospize crassirostre ou pinson végétarien (*Platyspiza crassirostris*) ; 8, 9 et 10, Géospize psittacin, Géospize modeste et Géospize minuscule (*Camarhynchus psittacula*, *C. pauper* et *C. parvulus*) ; 11, Géospize pique-bois (*C. pallidus*) ; 12, Géospize des mangroves (*C. heliobates*) ; 13, Géospize olive (*Certhidea olivacea*) ; 14, Spizin de Cocos (*Pinaroloxias inornata*)

Mais dans le débat, William Thomson (lord Kelvin), argumente aussi mal qu'on peut ; c'est un modèle, et cela montre bien qu'il faut rester humble, et on a beau être le plus grand scientifique du monde, vous pouvez vous « planter » lamentablement dans un débat. Il utilise un mot qu'il faut manier avec grande précaution en science : impossible. William Thomson (Kelvin) dit : « *il est impossible qu'une hypothèse de conditions d'ensoleillement et de tempêtes égales pendant un million d'années soit complètement vraie* » ; ensuite, il injurie ses adversaires : « *il faut admettre que beaucoup de géologues de l'école uniformitaire ont argumenté de manière particulièrement fallacieuse contre l'hypothèse de conditions violentes dans le passé* ». Et puis, il va donner son avis sur quelque chose qui n'est pas sa spécialité, en l'occurrence l'évolution des espèces : « *j'ai toujours pensé que l'hypothèse (de la sélection naturelle) ne contient pas la vraie théorie de l'évolution, si évolution il y a eu, en biologie* ». On commence à comprendre... Kelvin était profondément religieux, et aimait bien le récit de la Création ; certes, le moment initial de la Création échappe à la science, mais la puissance du scientifique vient justement du fait qu'il sait placer des limites strictes à la recherche. Il peut alors déchiffrer l'histoire de la Terre... et du Soleil. Ce n'est pas le seul exemple de grands scientifiques aveuglés par leurs convictions religieuses et cela lui aurait bien plu de pouvoir récuser la théorie de l'évolution sur la base d'une équation mathématique, argument réputé irréfutable...

On admet maintenant que toutes les convictions religieuses sont compatibles avec la science, à condition que la science n'essaie pas de donner son point de vue à la religion, et que la religion fasse de même vis-à-vis de la science :

#### INDEPENDANCE !

Dans le cas de Thomson, cela s'est mal terminé, ce qui lui vaut en particulier d'être brandi comme un étendard par un mouvement anti-scientifique avec cette citation anglaise de Kelvin : « *Overpoweringly strong proofs of intelligent and benevolent design lie all around us* » (2), qui a été récupérée par le mouvement de l'« *Intelligent Design* » qui pense que l'évolution des espèces a été télé-guidée pour aboutir à l'espèce humaine (c'est une conviction religieuse qui est ainsi défendue ; mais ce n'est pas une conviction scientifique, et vous ne pouvez pas l'étudier scientifiquement et ce n'est pas quelque chose qui doit être enseigné en classe aux élèves).

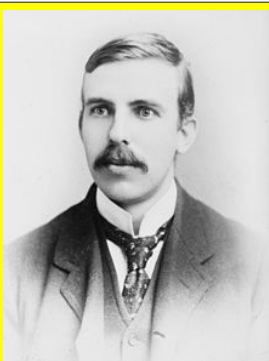
(2) Des preuves extrêmement fortes d'une conception intelligente et bienveillante nous entourent.

De l'autre côté, Darwin a l'avantage de très bien argumenter : « *En ce qui concerne le fait que le temps écoulé depuis la consolidation de notre planète a été insuffisant pour la quantité de changement organique que je suppose, et cette objection soutenue par Sir William Thomson, est sans doute l'une des plus graves avancées jusqu'ici, je peux seulement dire, d'abord, que nous ne sa-*

*vons pas à quel rythme les espèces changent [...] et ensuite que de nombreux philosophes ne sont pas encore prêts à admettre que nous en savons assez sur la constitution de l'univers et l'intérieur du globe terrestre pour réfléchir avec sûreté sur son temps d'existence passée* ». Ce qui revient à dire : attention ! Nous avons fait beaucoup d'hypothèses sur ce calcul ; est-ce qu'on sait si elles sont vraies ? Est-ce qu'on sait vraiment ce qui se passe dans la Terre ? Cet appel à la prudence est très raisonnable. Mais laissons là Darwin pour passer à la suite de l'histoire. En effet le siècle se terminait dans une atmosphère nimbée d'incertitudes, avec un Kelvin qui donnait quelques millions d'années en plus d'une main, mais les reprenait de l'autre main avec sa certitude que le Soleil n'avait pas brillé plus de 20 millions d'années.

Et, l'homme qui va réconcilier tout le monde, c'est Ernest Rutherford, un néo-zélandais, père de la physique nucléaire, qui est un physicien de grande classe, et qui a mis en évidence l'existence des noyaux dans les atomes au début du 20ème siècle (cf. numéro 88 de l'Albiréoscope). Il sera un des pionniers d'un nouveau champ de la physique : la radioactivité, au même titre que Pierre et Marie Curie, Henri Becquerel et d'autres.

**Ernest Rutherford** (1871 - 1937), était un physicien britannique né en Nouvelle-Zélande qui est considéré comme le père de la physique nucléaire.



Les travaux de Rutherford sont reconnus en 1903 par la Royal Society, qui lui décerne la Médaille Rumford en 1904. Il résume le résultat de ses recherches dans un livre intitulé *Radioactivité* en 1904, où il explique que la radioactivité n'est influencée ni par les conditions extérieures de pression et de température, ni par les réactions chimiques, et qu'elle produit un dégagement de chaleur très supérieur à celui d'une réaction chimique. Il explique également que de nouveaux éléments sont produits, ayant des caractéristiques chimiques différentes, tandis que les éléments radioactifs disparaissent. Avec Frederick Soddy, il estime que le dégagement d'énergie dû aux désintégrations nucléaires est de 20 000 à 100 000 fois plus important que celui qui résulterait d'une réaction chimique. Il émet également l'idée qu'une telle énergie pourrait expliquer l'énergie dégagée par le Soleil. Avec Rutt, il estime que si la Terre conserve une température constante (en tous les cas pour ce qui est de son noyau), c'est sans doute dû aux réactions de désintégration qui se produisent en son sein.

Il a obtenu le prix Nobel de chimie, décerné en 1908 « pour ses recherches sur la désintégration des éléments et la chimie des substances radioactives », pour lequel il a été le premier lauréat du prix Nobel canadien et océanien.

C'est en 1911 qu'il fait sa plus grande contribution à la science en découvrant le noyau atomique. Il avait observé à Montréal qu'en bombardant une fine feuille de mica avec des particules alpha, on obtenait une déflexion de ces particules. Geiger et Marsden, refaisant de façon plus poussée ces expériences en utilisant une feuille d'or, avaient constaté que certaines particules alpha étaient déviées de plus de 90 degrés. Rutherford émet alors l'hypothèse qu'au centre de l'atome devait se trouver un « noyau » contenant presque toute la masse et toute la charge positive de l'atome, les électrons déterminant en fait la taille de l'atome.

En 1997, l'élément chimique 104 est baptisé *rutherfordium* en son honneur.

Qui dit radioactivité, dit nouvelle source d'énergie, donc nouvelle source de chaleur. Rutherford expliquera ainsi que la radioactivité apporte de la chaleur en plus et donc modifie l'équation que vous devez utiliser pour l'équation de la chaleur dans le globe. Nouvelle théorie... oui, mais nouvelles réticences des scientifiques : pas facile de les faire changer d'avis. Mais Rutherford va essayer de gagner Kelvin à sa cause (c'est ce que dit l'histoire) dans une séance de l'académie des sciences : « *j'entrai dans la pièce qui était plongée dans une semi-obscrité, et remarquai bientôt lord Kelvin dans l'assistance ; je me rendis compte que j'allais avoir quelques difficultés avec la dernière partie de mon intervention concernant l'âge de la Terre, où mes vues étaient en contradiction avec les siennes. A mon grand soulagement, il s'endormit profondément, mais au moment où j'abordai le point important, je vis le vieil oiseau se redresser sur son siège, ouvrir un œil et me lancer un regard torve ! (pas l'air commode, lord Kelvin, même sur son portrait) Une inspiration me vint alors, et je déclarai que lord Kelvin avait limité l'âge de la Terre à condition qu'aucune source nouvelle de chaleur ne soit découverte. Cette formulation prophétique désigne justement ce que nous examinons ce soir, le radium ! Et là, merveille ! Le visage du vieux bonhomme s'épanouit en un large sourire* ». Autrement dit, c'est le conseil : si vous voulez faire adopter un point de vue contre un opposant, débrouillez-vous pour dire qu'un élément nouveau était prédit par votre opposant, et qu'il était comme un prophète. Voilà une histoire qui semble plausible ; en plus, la radioactivité va permettre plus tard de mesurer précisément l'âge de la Terre par le jeu de la désintégration radioactive.

**Les datations radio chronologiques** ont été expérimentées au 20ème siècle, notamment celle avec le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ), un isotope du carbone retrouvé dans la matière organique dont on souhaite connaître l'âge. Cette méthode convient pour des âges absolus de quelques centaines d'années à 50 000 ans maximum. La technique a été mise au point par Willard Libby (1908-1980), qui avait d'ailleurs construit le premier compteur Geiger-Muller aux U.S., et il ne la dévoile qu'en 1947. En 1951, deux fragments de sarcophages égyptiens dont on connaît l'âge, a priori 4600 ans, par des documents historiques, sont testés. La première datation sur un échantillon donne  $3\,979 \pm 350$  ans... parfait ; la méthode semble donner satisfaction. Heureusement, car le deuxième échantillon donne un très mauvais résultat : bizarre, mais après vérification, c'était un faux. Un coup de chance sinon la méthode prenait quelques plombs dans l'aile...

Ainsi aurait manqué la radioactivité dans l'explication de Kelvin, et on a pu croire à cette explication pendant un moment mais finalement, on s'est rendu compte que ce n'était pas la bonne. Non seulement pas la bonne mais, déjà une dizaine d'années avant Rutherford, quelqu'un avait compris où était la faute dans le raisonnement de Kelvin. John Perry avait compris mais personne ne l'avait écouté... Ce physicien et ingénieur irlandais avait suggéré que l'intérieur de la Terre devait être considéré comme un liquide donc propice à la convection pour les échanges thermiques. En 1895, il avait écrit un papier qui remettait en cause les résultats de Kelvin, dont il était pourtant un fervent

admirateur. Perry lui écrit : « la vraie base de votre calcul est votre supposition que la terre solide ne peut pas modifier sa forme... même en 1 000 millions d'années, sous l'action de forces tendant constamment à modifier sa forme, et pourtant nous voyons la fermeture progressive de passages dans une mine, et nous savons que les rides et les défauts et autres changements de forme se produisent toujours

**John Perry**  
(1850-1920)



Ingénieur irlandais qui a travaillé avec Kelvin, son mentor ; il a donc hésité à le mettre dans l'embarras. Dans ses calculs, il considère que la Terre a une croûte de 50 km d'épaisseur soumise à conduction thermique, qui surmonte un manteau fluide avec convection. Avec cette structure, les gradients thermiques de surface sont compatibles avec un âge de quelques milliards d'années.

La chaleur circule mieux en profondeur qu'en surface, et le raisonnement était juste...

dans la terre sous l'action de forces prolongées. Je sais que la roche solide n'est pas comme la cire du cordonnier, mais un milliard d'années est un long temps, et les forces sont grandes ». Kelvin a rejeté l'idée car il n'y avait pour lui aucune preuve de déformation de la croûte terrestre par les marées.

L'échec de la communauté scientifique à accepter un intérieur fluide de la Terre a bridé les idées en géologie jusqu'à ce que le concept soit ravivé par les partisans de la dérive des continents. Toutefois, dans les années 1960, des modèles géophysiques étaient encore en cours de construction sur la base que la Terre était solide.

Cela dit, la Terre possède tout de même une source de chaleur interne, la radioactivité, mais qui n'explique donc pas tout, même si notre planète possède ce moyen de conserver sa chaleur. Rutherford avait travaillé sur ce sujet de l'âge de la Terre en mesurant les produits père et fils de la désintégration de corps radioactifs et c'est pourquoi il présentait ses résultats, 500 millions d'années pour la Terre, à la prestigieuse et british Royal Society en 1904, devant un Kelvin assoupi. Rutherford n'avait pas bouleversé par trop le résultat initial de Kelvin, car il avait lui aussi oublié un ingrédient important : la convection du manteau. On estime aujourd'hui que la radioactivité interne de la Terre représente à peu près  $2 \times 10^{13}$  watts, et, d'après les calculs, l'estimation de Kelvin en serait peu affectée.

Précédemment, nous avons vu l'évolution de la chaleur dans une barre de fer, puis dans une boule de fer, donc du solide mais dans un liquide cela se passe autrement, ou dans une pièce chauffée avec un gros radiateur. Si l'on regarde l'évolution de la chaleur, ce n'est pas l'équation de la chaleur qui devra être utilisée. Comme le disait Fourier dès 1824 : « dans l'océan et les lacs, les

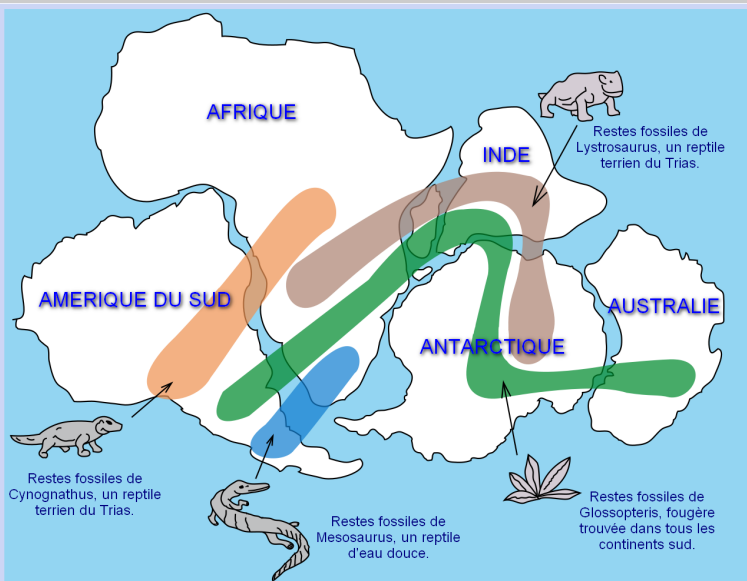
molécules les plus froides, ou plutôt celles dont la densité est la plus grande, se dirigent continuellement vers les régions inférieures, et les mouvements de chaleur dus à cette cause sont beaucoup plus rapides que ceux qui s'accomplissent dans les masses solides en vertu de la faculté conductrice ». Une explication imagée de cette différence : à la place d'atomes qui sont agités par la chaleur, imaginez qu'on ait affaire à des individus dans une grande pièce ; l'agitation correspond à la chaleur ; comment transférer de la chaleur, à savoir de l'agitation ? D'abord, on attache tous les individus au sol par les pieds, et seuls les bras sont libres ; ceux qui sont très agités vont cogner contre leurs voisins, qui, de proche en proche, vont transmettre l'agitation mais cela va prendre du temps. Si au contraire dans la pièce les gens sont libres de courir, ceux qui sont très agités vont le faire dans tous les sens et communiquer cette agitation au loin, et rapidement dans la pièce aux autres personnes, et cela s'appelle la convection ; les atomes et les molécules chaudes bougent très vite. Perry avait donc suggéré que c'est cela qui se passe dans la Terre : la convection. Fourier savait déjà cela en 1824. Pourquoi Kelvin n'a pas appliqué ce principe, ne s'est pas demandé si la Terre était soumise à un régime de convection ? En fait, il s'est posé la question mais a écarté ce scénario en montrant que la Terre était comme de la roche solide, comme du fer ; la Terre, c'était solide et ça ne se discutait pas. En effet, la roche solide, n'est pas imaginée comme un fluide... sauf que les ordres de grandeur sortent complètement de notre intuition. Comme disait Perry : « Je sais que la roche solide n'est pas de la cire de cordonnier, mais un milliard d'années est une longue durée, et les forces sont considérables ». Sur une longue échelle de temps, les propriétés physiques des matériaux sont différentes : une goutte d'eau qui tombe sur une pierre ne la change pas mais si cela dure mille ans, la pierre est creusée... Pour Perry, l'intérieur de la Terre est de la roche solide mais sur un milliard d'années, avec des forces énormes, cela va la déformer comme un fluide. Voilà quelque chose difficile à se représenter, cela dépasse l'entendement mais c'est typiquement un problème à aborder en mathématique : la simple intuition doit être confiée aux formules.

**Il ne faut pas appliquer une physique simple mais appliquer un modèle physique réaliste et adéquat.**

Perry a discuté alors des hypothèses et proposé un âge de 2 à 3 milliards d'années, et pour la première fois on obtient le bon nombre de zéros pour l'âge de la Terre, à partir d'un raisonnement construit, un raisonnement scientifique. Mais personne ne l'a entendu, ou n'avait voulu l'entendre.

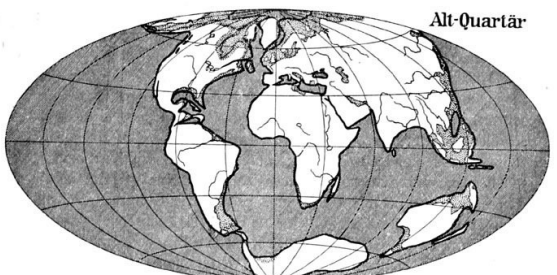
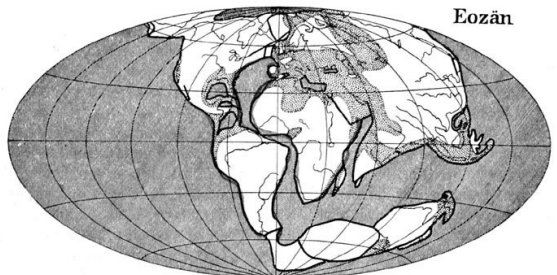
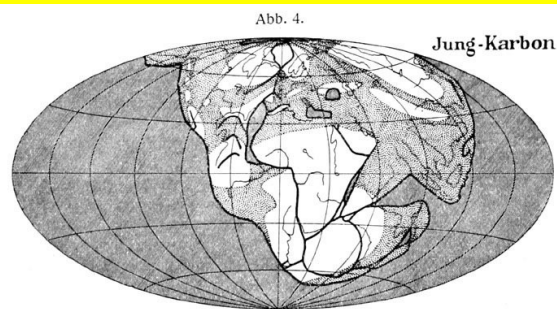
Croire à une Terre solide a persisté jusqu'en 1960 malgré quelques dissidents comme Perry et Wegener.

**Alfred Wegener**, photographié ici lors d'une expédition polaire en 1912, est né en 1880 à Berlin et mort en novembre 1930 au Groenland lors de la fin tragique d'une expédition, près de la base Eismitte. C'était un astronome et climatologue allemand, principalement connu pour sa théorie de la « dérive des continents » proposée en 1912 puis publiée en 1915. D'abord astronome, il s'est intéressé à plusieurs sujets connexes comme la météorologie et la géologie. Il a fait de nombreuses expéditions au Groenland pour étudier la météorologie des régions polaires. Hélas, sa renommée, en tant que géologue, est venue bien après sa mort.

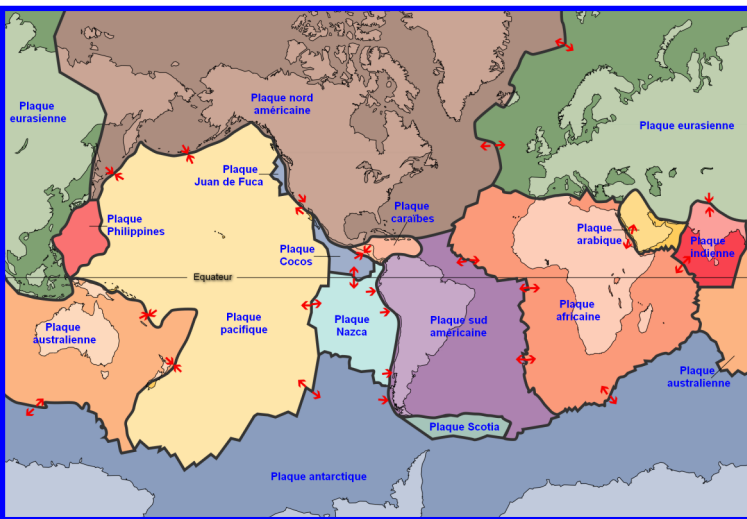


**Les continents se déplacent... des arguments :**

On retrouve aujourd'hui les mêmes fossiles d'animaux et de plantes du domaine continental dans des zones très éloignées et séparées par des océans profonds. Pas de doute, ces zones devaient être contiguës il y a bien longtemps.



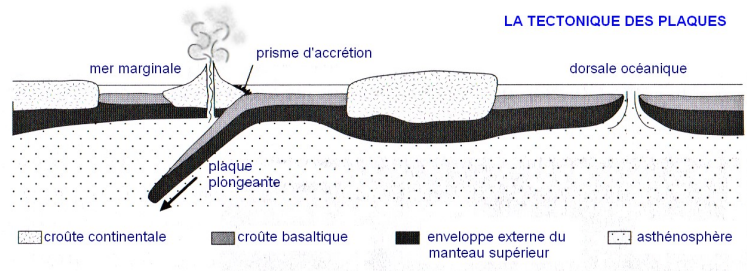
Rekonstruktionen der Erdkarte nach der Verschiebungstheorie für drei Zeiten.  
Schraffiert: Tiefsee; punktiert: Flachsee; heutige Konturen und Flüsse nur zum Erkennen. Gradnetz willkürlich (das heutige von Afrika).



**Les plaques tectoniques du monde (carte du milieu du XXème siècle).**

« Le monde et sa construction » : une carte originale réalisée par Alfred Wegener qui montre la Pangée et les continents qui se séparent progressivement

Wegener (1880-1930) est le premier à élaborer une conception mobiliste globale, fondée sur le déplacement horizontal des continents (la dérive des continents), qu'il exposa dans un livre paru en 1915. Les reconstitutions des mouvements continentaux supposés lui suggèrent l'existence d'un super continent originel qu'il va nommer Pangée ("réunion de toutes les terres") et qui se serait fragmenté pour donner nos continents actuels. Hélas, Wegener n'était pas considéré comme un véritable géologue et d'autres objections, plus sérieuses, concernaient les méca-



nismes de cette dérive des continents. Wegener pensait que les blocs continentaux glissaient sur les matériaux des fonds océaniques sous l'action des forces liées à la rotation terrestre mais cela semblait impossible pour les géologues. Le modèle a donc été oublié jusqu'à dans les années 1950, où est

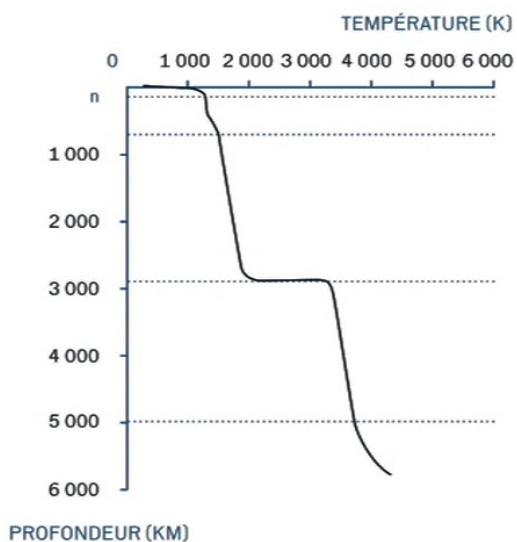
apparu le modèle de la tectonique des plaques, depuis démontré et vérifié avec les mesures satellitaires et qui indiquent par exemple que l'Europe et l'Amérique s'écartent d'environ 4 cm par an.

La dérive des continents intéresse peu de monde, y compris les politiques ou les militaires à moins que... cela amène quelques terres au dessus de la mer ou agrandisse les côtes existantes : 200 milles marins qui s'étendent au pourtour d'un nouveau territoire et accordés par une autorité internationale, cela fait tout de suite saliver.

La Terre, une boule métallique ?  
On sait maintenant que non.

Quand on regarde à l'intérieur de la Terre, ce n'est pas du tout homogène : une graine solide, vous avez un cœur, le manteau (genre liquide) et la croûte, partie supérieure du manteau, très fine et qui est, elle, du genre solide. Et ça ne ressemble pas du tout à la masse homogène supposée par Fourier et Kelvin.

La représentation de la Terre, et la courbe de température telle qu'elle est évaluée maintenant, et qui est graduée comme il se doit en kelvins :

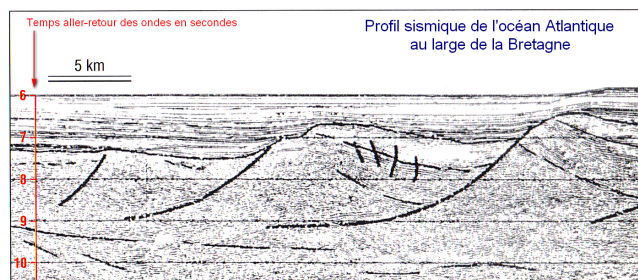


En examinant ce profil : rien à voir avec ce qui avait été imaginé et vu précédemment.

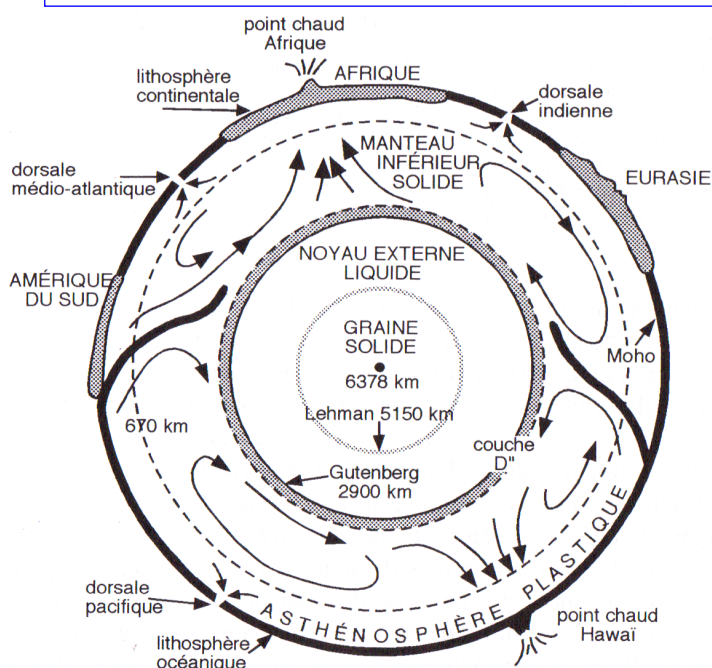
Une partie du manteau est soumise à la convection et donc de température assez faible, relativement homogène ; en revanche, dans la croûte, il n'y a pas de convection, c'est solide dans cette partie supérieure du manteau qui montre un gradient très fort, donc une variation de température énorme ; **le gradient très fort n'est pas la marque d'une Terre jeune mais d'une croûte mince.**

Sous la croûte, ce n'est plus homogène.

La connaissance de l'intérieur de la Terre échappe encore aujourd'hui à l'observation réelle. On l'a vu, les volcans peuvent nous renseigner sur le type des roches sous-jacentes mais seulement près de la surface. Le forage le plus profond réalisé par l'homme est celui de la presqu'île de Kola, en Russie qui fait 12 km de profondeur, mais il est bien petit face aux 6 378 km de rayon de notre Terre. Cependant, les données de sismologie sont en mesure de mettre en évidence des



discontinuités majeures, par l'examen des variations de propagation des ondes sismiques. De plus, en laboratoire, des expérimentations sur la transformation de



phase à haute pression et haute température des minéraux en provenance des volcans (ramonage) fournissent des éléments sur les couches les plus externes. Le scientifique en est réduit aux conjectures pour les parties les plus profondes... Selon les données actuelles, la Terre peut être décomposée selon ces structures :

**La croûte terrestre** : est limitée par la discontinuité de Mohorovicic (Moho), entre 6 et 9 km sous les océans, et environ 30 km sous les continents. La croûte océanique est plus légère que la croûte continentale.

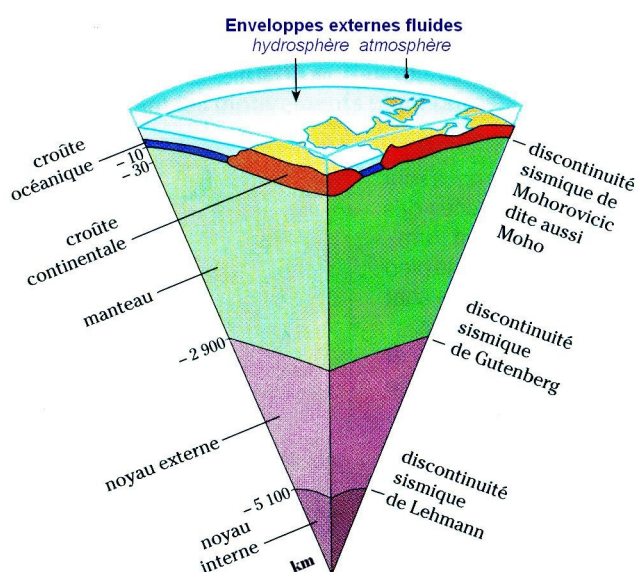
**Le manteau** : une enveloppe épaisse d'environ

2 900 km, jusqu'à la discontinuité de Gutenberg. Le manteau constitue les 2/3 en masse de la Terre. Sa partie externe forme la **lithosphère** d'épaisseur nulle au niveau des dorsales océaniques, et jusque 200 km sous les continents ; sa partie interne forme l'**asthénosphère** qui est plastique.

L'interface manteau-noyau, à 2 900 km de profondeur, est marqué par une **couche « D »** évaluée entre 100 et 200 km d'épaisseur (sans doute une différenciation chimique).

**Le noyau** : représente 30 % de la masse de la Terre et 16 % de son volume, a priori constitué essentiellement de fer et le nickel, et quelques éléments plus légers à l'extérieur comme le soufre. Le champ magnétique de la Terre est considéré comme y prenant naissance avec les mouvements convectifs de sa partie externe qui est liquide.

**La discontinuité de Lehman** : à 5 150 km, est une zone de transition où le fer cristallise ; cela forme la **graine**, qui est solide.



La vision cohérente de notre Terre a mis des siècles pour émerger. Beaucoup de personnes impliquées dans l'histoire (pas toutes citées... par manque de place, et aussi parce qu'elles ont été discrètes, ou n'ont rien apporté de plus significatif) ; elles ont bien travaillé avec les moyens du bord, et avec la technologie, la science de l'époque mais aussi sont restés des hommes/femmes avec leurs faiblesses, encore actuelles d'ailleurs ; les chiffres ne sont que les outils de la science mais dans certaines situations, si les chiffres vont dans le bon sens, ils sont solides, et faux si c'est le contraire. La science ne doit pas se laisser influencer par l'impression ou le ressenti ni, aujourd'hui, par les réseaux sociaux et les médias. Il en est du réchauffement climatique où les vrais experts en climatologie sont oubliés.

## EPILOGUE

Vous allez dire « *on ne sait toujours pas l'âge de la Terre* »... effectivement, pas de réponse précise jusque maintenant mais nous y venons. Le 20ème siècle a été marqué par les grands progrès liés à la cosmologie, et à la détermination de l'âge de l'univers et celui de la formation du Système Solaire.

Un nuage originel de gaz et de poussières va subir une contraction gravitationnelle, avec une différence de température entre bordure froide et centre chaud qui va devenir le Soleil. Les cristaux se regroupent en ensembles de plus en plus importants... des grains... des planétésimaux de dimensions kilométriques, puis des planètes dans une phase qui va durer une dizaine de millions d'années. Puis c'est la différenciation où les éléments les plus volumineux (gros astéroïdes, planètes) collisionnent et portés à haute température, fondent et se différencient. La Lune serait d'ailleurs le résultat d'une collision de la Terre avec un autre corps de la taille de Mars. Ensuite, pendant un milliard d'années, la queue d'accrétion va engendrer des bombardements plus ou moins intenses ; une phase de bombardement par micrométéorites semble s'être déroulée entre 4 450 et 4350 millions d'années. La Terre, dite primitive s'est ainsi formée par ces chutes de corps de diverses tailles dont l'impact au sol apportait de l'énergie et échauffait la Terre, le volcanisme résultant dégazant le manteau supérieur. La surface était alors essentiellement des péridotites fondues (silicates de fer et de magnésium) sur 500 km de profondeur qui se solidifient ensuite, mais le fer, quant à lui, percole vers le fond en restant liquide. On estime, d'après les données géochimiques (couple hafnium/tungstène) que la formation du noyau liquide a dû être terminée en moins de 60 millions d'années. Le noyau va refroidir lentement, et cela continue encore. Sa cristallisation donne la graine, et l'énergie libérée est à l'origine du champ magnétique terrestre en engendrant des turbulences dans la partie liquide supérieure.

**L'âge de la Terre** est aujourd'hui donné avec une précision de moins d'un demi-million d'années :

**4,5685 ± 0,0004 milliards d'années**

Impressionnant ce résultat, non ?

Eh oui, l'âge de la Terre a été donnée arbitrairement, par convention, (comme la valeur de l'U.A., unité astronomique définissant la distance de la Terre au Soleil). La référence qui a été choisie est l'âge des « inclusions aluminocalciques de la météorite d'Allende qui correspondraient aux plus vieux solides formés dans la nébuleuse solaire, au début de l'effondrement du nuage moléculaire ».

Ce n'est donc pas précisément l'âge de la Terre, voire du Système Solaire mais... comment situer le début ?

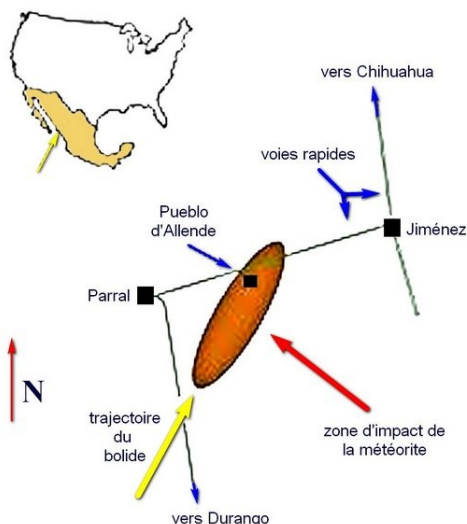
Ce que l'on date est une météorite tombée le 8 février 1969 dans l'état de Chihuahua au Mexique : la météorite d'Allende est la plus grande chondrite carbonée jamais trouvée sur Terre. La boule de feu a été vue à 1 h 05 le 8 février 1969, tombant sur l'État mexicain de Chihuahua.

Après sa désintégration dans l'atmosphère, une recherche approfondie des morceaux a été menée et plus de deux tonnes de météorites ont été récupérées. La disponibilité de grandes quantités d'échantillons

de la classe des chondrites scientifiquement importantes a permis de nombreuses recherches par de nombreux scientifiques ; elle est souvent décrite comme « la météorite la mieux étudiée de l'histoire ». La météorite d'Allende possède de grandes inclusions riches en calcium-aluminium, qui sont parmi les objets les plus anciens formés dans le système solaire.

Les chondrites carbonées représentent environ 4 % de toutes les météorites tombant de l'espace. Avant 1969, la classe des chondrites carbonées était connue d'un petit nombre de météorites inhabituelles comme celle d'Orgueil, au sud de Montauban, tombée le 14 mai 1864. Des météorites similaires à Allende étaient connues, mais beaucoup étaient petites et mal étudiées.

Allende est tombée au début de 1969, quelques mois seulement avant que le programme Apollo ne retourne les premières roches lunaires. Ce fut une période de grande excitation et d'énergie parmi les scientifiques. Le domaine attire de nombreux et nouveaux travailleurs et les laboratoires sont en cours d'amélioration. En conséquence, la communauté scientifique était immédiatement prête à étudier la nouvelle météorite. Un certain nombre de musées ont lancé des expéditions au Mexique pour collecter des échantillons et, ensemble, ils ont collecté des centaines de kilogrammes de matériaux avec les CAI (inclusions aluminocalciques). Les CAI ont des milliards d'années et aident à déterminer l'âge du système solaire. Les CAI avaient des compositions isotopiques très inhabituelles, beaucoup étant distinctes de la Terre, de la Lune et d'autres météorites pour une grande variété d'isotopes. Ces « anomalies isotopiques » contiennent des preuves de processus qui se sont produits dans d'autres étoiles avant la formation du système solaire.



Allende contient des chondres et des CAI qui sont estimés à 4,567 milliards d'années, la plus ancienne matière connue (d'autres chondrites carbonées en contiennent également). Ce matériau a 30 millions d'années de plus que la Terre et 287 millions d'années de plus que la plus ancienne roche connue sur Terre ; ainsi, la météorite d'Allende a révélé des informations sur les conditions prévalant au début de la formation du système solaire, qui a généré la Terre ensuite. Les chondrites carbonées, dont Allende, sont les météorites les plus primitives et contiennent la matière connue la plus primitive. Ils ont subi le moins de mélange et de refusion depuis les premiers stades de la formation du système solaire. Pour cette raison, leur âge est souvent considéré comme « l'âge du système solaire ».

La découverte au California Institute of Technology en 1977 de nouvelles formes des éléments calcium, baryum et néodyme dans la météorite était censée montrer que ces éléments provenaient d'une source extérieure aux premiers nuages de gaz et de poussière qui formaient le système solaire. Cela soutient la théorie selon laquelle les ondes de choc d'une supernova - l'explosion d'une étoile vieillissante - peuvent avoir déclenché la formation du système solaire ou contribué à sa formation.



Coupe d'un morceau en provenance de la météorite d'Allende exposée à L'université de l'état d'Arizona.

Comme preuve supplémentaire, le Caltech (en Californie) a déclaré que la météorite contenait de l'aluminium 26, une forme rare d'aluminium. Cela agit comme une « horloge » sur la météorite, datant l'explosion de la supernova à moins de 2 millions d'années avant la formation du système solaire. Des études ultérieures ont trouvé des rapports isotopiques de krypton, de xénon, d'azote et de certains autres éléments dont les formes sont également inconnues dans le système solaire. La conclusion, à partir de nombreuses études avec des résultats similaires, est qu'il y avait beaucoup de substances dans le disque pré-solaire qui ont été introduites sous forme de « poussière » fine d'étoiles proches, y compris les novas, les supernovas et les géantes rouges. Ces taches persistent à ce jour dans des météorites comme Allende et sont connues sous le nom de grains pré-solaires.

Quant à la date d'apparition de la vie sur Terre, c'est une autre histoire : 2,8 à 3,9 milliards d'années... grande imprécision, et c'est pourtant plus récent !



## La NASA détermine qu'un cratère de météorite australien est le plus ancien connu.

La Terre est couverte d'environ 190 grands cratères météoritiques recensés, mais les scientifiques ne connaissent l'âge que de quelques-uns. Récemment, un scientifique de la NASA a analysé l'âge du cratère de météores de Yarrabubba en Australie et l'a trouvé vieux de 2,229 milliards d'années, ce qui en fait maintenant le plus ancien cratère actuellement connu (ce qui ne veut pas dire qu'on s'est trompé sur l'âge de la Terre vu précédemment : l'érosion, la tectonique des plaques nous dissimulent progressivement bien des choses).



« C'est 200 millions d'années de plus que le cratère connu le plus ancien, qui était le cratère de plus de 200 kilomètres du dôme Vredefort en Afrique du Sud » a déclaré Timmons Erickson, chercheur à la division Astromaterials Research and Exploration Science, (ARES), du centre Johnson Space Center de la NASA. Erickson a fait la découverte en menant une équipe qui comprenait Christopher Kirkland, Nicholas Timms et Aaron Cavosie de Curtin University en Australie et Thomas Davison de l'Imperial College à Londres. Les chercheurs ont récemment annoncé leur découverte dans Nature Communications.

Les scientifiques sont intéressés à dater l'âge des débris de chutes de météorites parce que ces impacts ont probablement joué un rôle important dans le développement environnemental et l'histoire de notre planète. Par exemple, de nombreuses personnes connaissent la théorie selon laquelle les dinosaures auraient été anéantis par une réaction climatique en chaîne, déclenchée par un astéroïde qui a frappé la péninsule du Yucatan au Mexique il y a 66 millions d'années, ce qui n'est d'ailleurs qu'en partie vrai car on sait maintenant qu'ils déclinaient déjà depuis belle lurette (les théropodes dont faisait partie le T.rex, sont aujourd'hui nos oiseaux : changement de nom seulement ; et les crocodiles de l'époque n'avaient pas été affectés). « Les scientifiques se demandent comment les impacts des météorites

pourraient être liés à la formation des continents. Nous aimerions également savoir quand la fréquence des impacts de météorites a diminué au point où la vie pourrait émerger et prospérer », a déclaré Erickson. « Ce sont toutes de grandes questions dans le domaine de la science ».

La structure d'impact de Yarrabubba étudiée par Erickson est située dans une partie très reculée de l'Australie occidentale. On pense que le cratère d'origine avait 70 kilomètres de diamètre, bien que « son reste » aujourd'hui ne soit que de 20 kilomètres. Le site est si ancien qu'aujourd'hui il ne ressemble plus au cratère d'impact typique qui aurait un bord clairement visible et un cratère profond. Au lieu de cela, les caractéristiques qui définissaient autrefois Yarrabubba ont été usées par le vent, la pluie et d'autres forces naturelles, ne laissant que des affleurements rocheux envahis par des dépôts et la végétation et quelques crêtes.

L'état de Yarrabubba signifie que les scientifiques ne peuvent pas utiliser l'approche la plus courante pour dater les cratères. En effet, de nombreux cratères comportent généralement ce qu'on appelle une « feuille de fusion », qui est une couche supérieure de roche facile à atteindre, qui a été chauffée au point de fondre puis s'est cristallisée au moment de l'impact. Cette roche peut être utilisée pour dater l'événement, mais c'est une zone qui est une des premières à être altérée, comme dans le cas de Yarrabubba. Alors, comment les scientifiques peuvent-ils déterminer l'âge d'un ancien cratère météoritique si altéré par le temps ?

Erickson a recherché des roches qui montraient les traces



Cristal de zircon utilisé pour dater l'impact Yarrabubba.

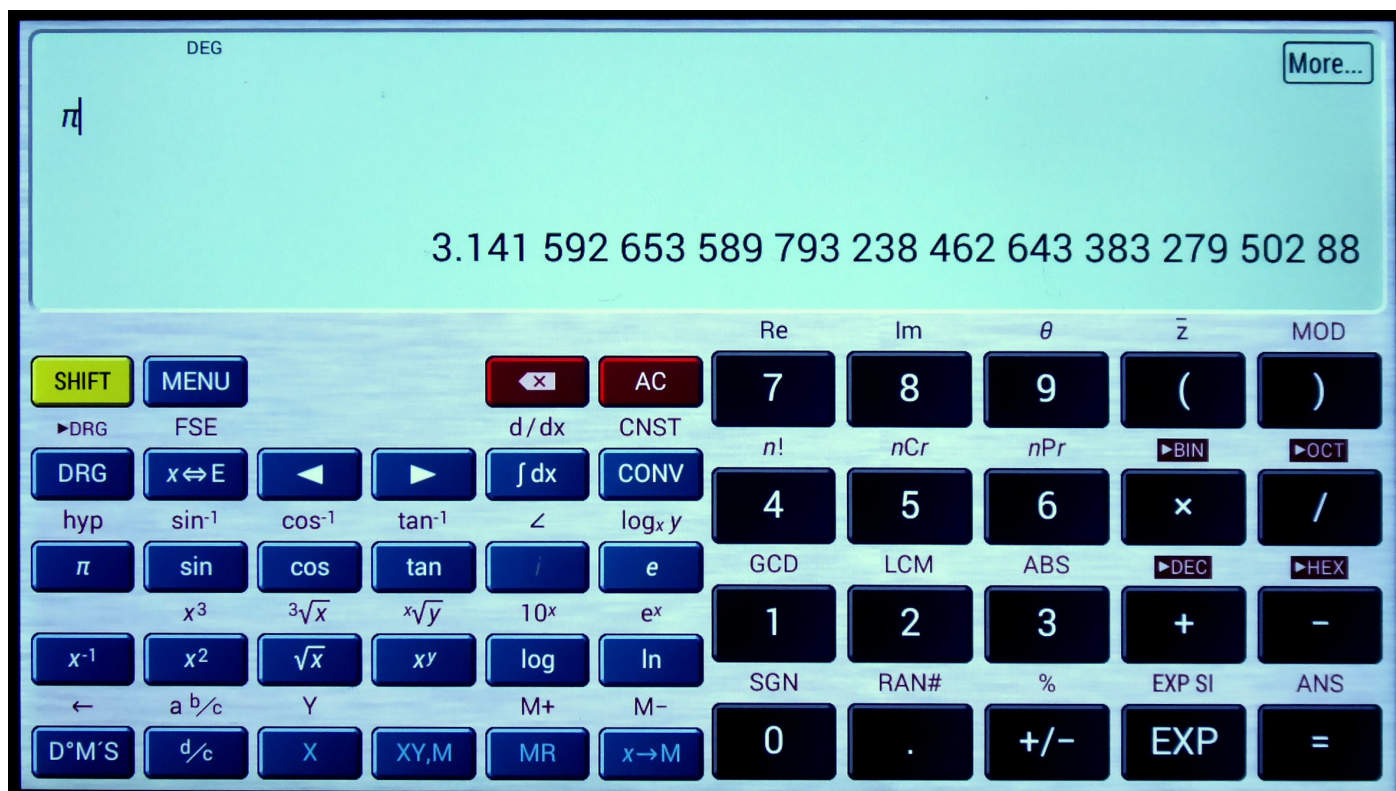
caractéristiques du choc et de la chaleur d'une arrivée brutale d'un bolide sur le sol. Il a notamment recueilli des échantillons de roche contenant deux minéraux : le zircon et la monazite. Ces minéraux sont des cristaux qui contiennent de l'uranium et du plomb, dont le rapport peut être mesuré pour déterminer l'âge de la roche. Erickson et l'équipe de recherche ont utilisé un microscope électronique à l'Université Curtin pour observer les cristaux fondus sous l'impact des météorites. Les scientifiques ont ensuite mesuré l'uranium et le plomb dans ces cristaux pour calculer leur âge : 2,229 milliards d'années.

Le moment de l'impact de Yarrabubba coïncide avec la formation de certaines des premières calottes glaciaires et glaciers de la Terre ; a priori, il ne les a donc pas fait fondre... Ouf, mais on a eu chaud !

3,141592653589793238462643383279502884197169399375105  
 82097494459230781640628620899862803482534211706798214  
 80865132823066470938446095505822317253594081284811174  
 50284102701938521105559644622948954930381964428810975  
 66593344612847564823378678315527120190914564856692346  
 03486104543266482133936077692491412737245870066063155  
 88174881520920962829254091715364367892590360011330530  
 54882046652138414695194151160943305727036575959195309  
 21861173819326117931051185480744623799627495673518857  
 52724891227938183011949129833673362440656643086021...

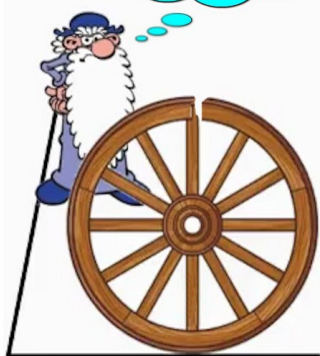
# $\pi$

Voilà un nombre dont l'histoire est bien aussi longue que la suite des décimales qui le compose !



La première fois que le nombre  $\pi$  a été évalué, c'était du côté de la géométrie, et il y a de cela bien longtemps. Les égyptiens en faisaient déjà mention dans quelques papyrus retrouvés et déchiffrés. Il ne s'appelait pas encore pi à l'époque car ce sont les Grecs qui l'ont baptisé et l'habitude ne s'est pas perdue jusqu'à nos jours. C'est sans aucun doute autour d'une figure géométrique simple et belle comme le cercle, facile à tracer avec une corde et un piquet, que les anciens ont laissé leur neurones vagabonder pour aboutir à ce que les Grecs ont nommé  $\pi$ , après

*J'ai voulu faire des économies en prenant la valeur 3 et voilà le résultat !*



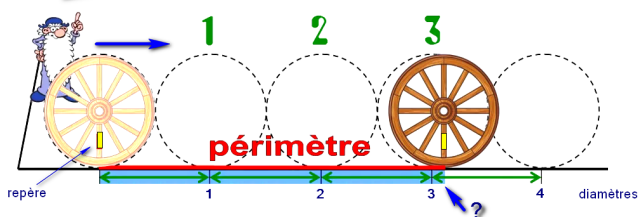
avoir trouvé le facteur multiplicatif adéquat pour déterminer la circonférence du cercle. La roue, bien pratique pour transporter des objets, est un cercle ; ceux qui la fabriquaient devaient sans doute calculer la taille des morceaux de bois qui la composaient pour aboutir à la forme idéale avec économie.

En étudiant un cercle, on peut se poser différentes questions, et en particulier

mesurer certaines des longueurs du cercle comme son diamètre, ligne droite qui traverse le cercle en son centre, ou mesurer le tour du cercle, sa circonférence, son périmètre. Très vite, des mathématiciens se sont posés la question : « Comment peut-on calculer la circonférence d'un cercle à partir de son diamètre ? », ou en d'autres termes : combien de fois le tour d'un cercle est plus long que son diamètre. La première trace des géomètres qui se sont posé cette question date d'il y a environ 4000 ans !

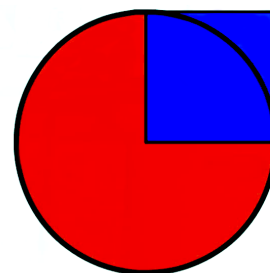
Au début, certains ont peut-être pensé que la réponse était égale à 3 : le périmètre serait toujours égal à 3 fois le diamètre mais rapidement, on a dû s'apercevoir que c'était un peu plus : 3,1... 3,2. Ils se sont penchés sur cette question et à force d'opiniâtreté, ont trouvé des valeurs de plus en plus précises jusque 3,141592 ; un nombre qui



**Périmètre = 3,141592654...diamètres**  
 $P = \pi \times D$



devenait de plus en plus fascinant, au point que les mathématiciens lui ont donné comme nom la première lettre du mot périmètre mais écrit en grec ancien :  $\pi$ . Au 18ème siècle, siècle des lumières, les mathématiciens montrent

que ce nombre à un développement décimal infini, donc qu'il possède une infinité de chiffres après la virgule ; ça ne s'arrête jamais. L'affaire pourrait en rester là : le nombre permet de calculer la circonférence d'un cercle d'après son diamètre. Mais au-delà de la question de la circonférence, les mathématiciens se sont également posé la question de la surface du cercle : quelle est l'aire d'un disque ? Quand on parle de surfaces, les plus simples à étudier sont les carrés ou les rectangles ; l'aire d'un rectangle est égale à sa largeur  $\times$  par sa longueur. Les mathématiciens de l'Antiquité se sont alors demandé si l'on trace un carré dont le côté est égal au rayon du cercle, combien de fois l'aire du disque



 =   $\times$  3...?

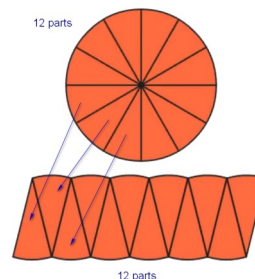
est plus grande que l'aire du carré ? Ils ont trouvé quelque chose comme la valeur 3, et en fouillant un peu plus 3,1... 3,14... Encore  $\pi$  ! Aussi précises que soient les mesures réalisées, les géomètres grecs se rendaient compte que les deux nombres qui servaient à calculer la circonférence et la surface semblaient être identiques.



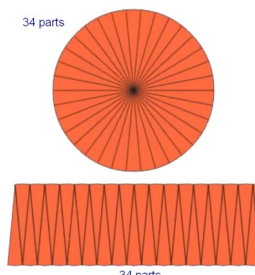
Archimède par Domenico Fetti

N'est-ce pas seulement une approximation ? Peut être qu'ils sont égaux à 2 ou 3 chiffres après la virgule seulement. Comment en être sûr ? C'est là qu'intervient l'un des plus grands savants de l'antiquité : Archimède. Sa méthode géniale consiste à imaginer la découpe du disque en un certain nombre de parts, et ces parts, on les sépare et on les place comme ci-dessous, les unes à côté des autres en opposition :

Avec les parts découpées du disque, on fabrique une nouvelle figure qui a exactement la même surface que le disque initial. Et plus on découpe des parts finement, plus la figure formée ressemble à un rectangle, dont on sait mesurer facilement la surface  $S = \text{longueur} \times \text{largeur}$ .

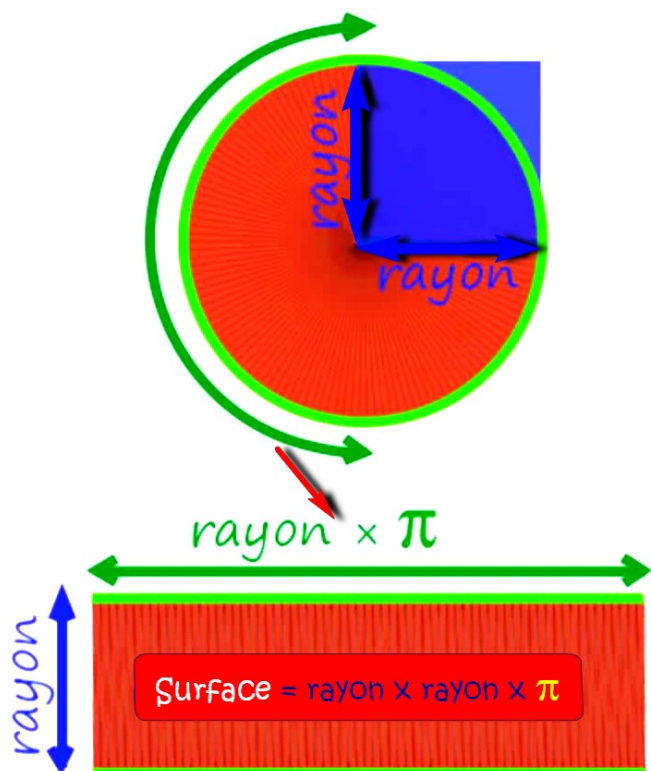


La largeur, par construction, est égale au rayon du disque, et la longueur, qui est la somme des bases des triangles, vaut la moitié de la circonférence du disque connue comme valant :



$\pi \times \text{diamètre du disque}$   
 (périmètre =  $\pi \times D$ )

Ainsi donc, si l'on découpe le disque en une infinité de parts (difficile à faire mais on se l'imagine facilement... une expérience de pensée dirait Einstein), nous allons aboutir à un agglomérat de fines tranches du disque qui formera un beau rectangle de largeur = rayon du disque, et dont la longueur vaut la moitié du périmètre ( $\pi \times D$ ) du disque déjà connu, soit  $(\pi \times D) / 2$ . Somme toute, Archimède avait résolu une « intégrale » pour connaître la surface du disque.



L'aire du rectangle vaut donc  $\pi \times R \times R$  que l'on écrira de manière plus simple :

$$\text{Surface d'un cercle} = \pi R^2$$

La surface d'un disque est exactement  $\pi \times$  la surface du carré dont le côté est égal au rayon du disque. Les deux nombres voisins de 3,1 pour la surface et la circonférence sont les mêmes : c'est  $\pi$ . Pi venait de faire ses premiers pas dans les mathématiques, dans la géométrie, celle du cercle. Restant dans le domaine de la géométrie,  $\pi$  intervient dans les aires des ellipses, mais aussi, dans la troisième dimension avec la sphère, la surface et volume des boules. Un peu plus loin,  $\pi$  s'est vu impliqué dans de nombreux domaines et la liste exhaustive serait trop longue mais voici quelques exemples :

Au 18ème Siècle, Buffon propose une expérience de probabilité qui se présente de la manière suivante : prenez une surface plane avec des bandes parallèles équidistantes qui sont dessinées. Prenez une aiguille dont la longueur est égale à la largeur des bandes et jetez là au

hasard sur la surface ; deux cas de figure possibles :

- l'aiguille est intégralement à l'intérieur des bandes,
- l'aiguille se retrouve à cheval sur deux bandes,

Quelle est la probabilité que l'aiguille se retrouve à cheval sur deux bandes ?

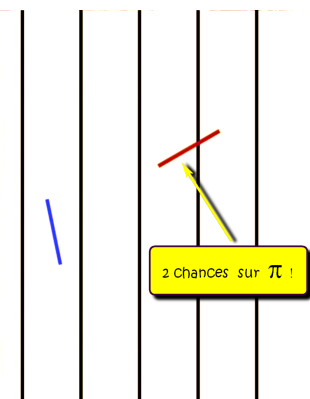
Après plusieurs essais, on estime l'affaire à deux chances sur 3 mais en augmentant les essais on s'approche de plus en plus de :  
2 chances sur 3,14...

Quel rapport avec  $\pi$  ?

Eh bien, le résultat est :

2 chances sur  $\pi$

Buffon a réussi à prouver que ce résultat était le bon.



L'équation de la chaleur par Fourier :

$$\Gamma = \frac{T_0 - T_e}{\sqrt{\pi C t}}$$

température initiale  $T_0$       température ambiante  $T_e$   
 $\pi$       diffusivité thermique  $C$       temps  $t$

*PI s'est aussi immiscé là !*

Regardons maintenant cette suite de fractions et additionnons les progressivement :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{1 \times 1} = 1 \\ \frac{1}{2 \times 2} = 0,25 \\ \frac{1}{3 \times 3} = 0,111... \\ \frac{1}{4 \times 4} = 0,0625 \\ \frac{1}{5 \times 5} = 0,04 \\ \dots \\ \frac{1}{100 \times 100} = 0,0001 \\ \dots \end{array} \right\} \begin{array}{l} 1,25 \\ 1,36 \\ 1,42 \\ 1,64... \end{array}$$

La somme se rapproche de plus en plus d'une valeur limite voisine de 1,64. Ou encore :

$$(\pi \times \pi) / 6$$

PI au carré divisé par 6, une des valeurs de la fonction zêta ( $\zeta$ ) de Riemann...

*L'hypothèse de Riemann : un des grands problèmes qui occupe les mathématiciens aujourd'hui.*

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = 1 + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \frac{1}{4^s} + \dots$$

$$\zeta(2) = 1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots = \frac{\pi^2}{6} \approx 1,644\ 934$$



La NASA est souvent interrogée par des étudiants désireux de savoir quel est le nombre de décimales de  $\pi$  dont ont besoin les scientifiques pour calculer la bonne trajectoire des sondes spatiales envoyées dans l'espace.  $3,14$  paraît un peu faible, mais est-il nécessaire d'ajouter les 35 décimales derrière le 3 qui sont affichées sur ma calculatrice ?

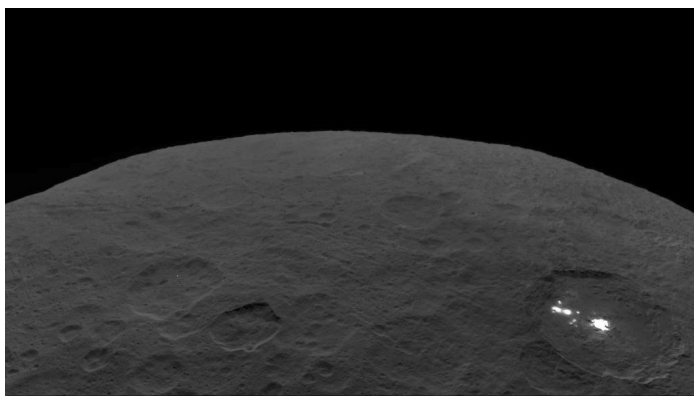
$3,14159265358979323846264338327950288$



Marc Raymann

Marc Rayman travaille au JPL ; il a été directeur et ingénieur en chef de la mission Dawn lancée en 2007 à destination de CERES, une planète naine de la ceinture d'astéroïdes et qui gravite donc entre Mars et Jupiter.

Cette mission Dawn a permis de découvrir des tas de choses intéressantes sur ce corps céleste, une belle moisson de données scientifiques, mais qui s'est terminée, non pas pour une cause d'orbite mal calculée, mais par manque de carburant : l'hydrazine, nécessaire à l'orientation de l'engin et au maintien des antennes de communication vers la Terre (NASA Deep Space Network) était épuisé ; son propulseur principal était ionique (xénon). La mission Dawn s'est terminée officiellement le 1er novembre 2018, avec une de ces dernières images de CERES prise en septembre :



Cerès et la région brillante du cratère Occator. Cette vue face au sud, a été capturée le 1er septembre 2018 à une altitude de 3 370 km.

Marc Rayman a été un de ceux qui ont répondu à la question relative aux décimales de  $\pi$ .

Sa réponse :

« Pour commencer, laissez-moi répondre directement à votre question. Pour les calculs de plus haute précision du JPL, qui concernent la navigation interplanétaire, nous utilisons  $3,141592653589793$ . Examinons cela de plus près pour comprendre pourquoi nous n'utilisons pas plus de décimales. Je pense que nous pouvons même constater qu'il n'existe aucun calcul physiquement réaliste permettant aux scientifiques d'inclure autant de chiffres décimaux que vous le présentez ».

Nous avons la réponse... et il complémente son argu-



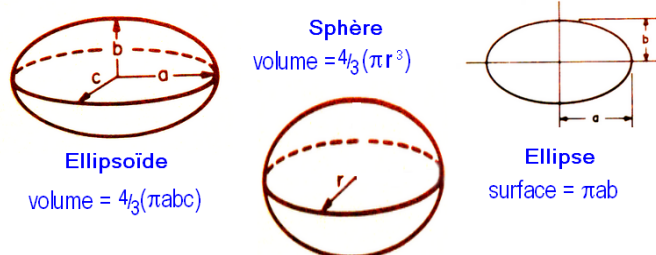
La sonde Dawn arrivant près de CERES (photo d'artiste)

ment en donnant l'exemple de la sonde Voyager 1 qui se ballade actuellement bien loin de la Terre, au-delà de Pluton, aux confins du Système Solaire.

« Le vaisseau spatial le plus éloigné de la Terre est Voyager 1. Il se trouve à environ 20 milliards de kilomètres. Supposons que nous avons un cercle de rayon exactement égal à cette taille (ou 40 milliards de kilomètres de diamètre) et que nous voulons calculer la circonférence, qui est  $\pi$  fois le rayon multiplié par 2. Utiliser  $\pi$  arrondi à la quinzième décimale, comme indiqué ci-dessus, cela représente un peu plus de 125 milliards de kilomètres. Nous n'avons pas besoin de nous préoccuper ici de la valeur exacte de la valeur (vous pouvez la multiplier si vous le souhaitez), mais plutôt de savoir quelle est l'erreur de la valeur en n'utilisant pas plus de chiffres de  $\pi$ . En d'autres termes, en coupant  $\pi$  à la quinzième décimale, nous calculerions une circonférence pour ce cercle qui est très légèrement décalée. Il s'avère que notre circonférence calculée du cercle de 40 milliards de kilomètres de diamètre serait fautive de 6,35 cm. Pensez-y. Nous avons un cercle de plus de 125 milliards de kilomètres et notre calcul de cette distance serait peut-être inférieur à la longueur de votre doigt ».

Voilà, vous savez tout sur  $\pi$ , ou  $\pi\rho\epsilon\sigma\theta\upsilon\epsilon$ .

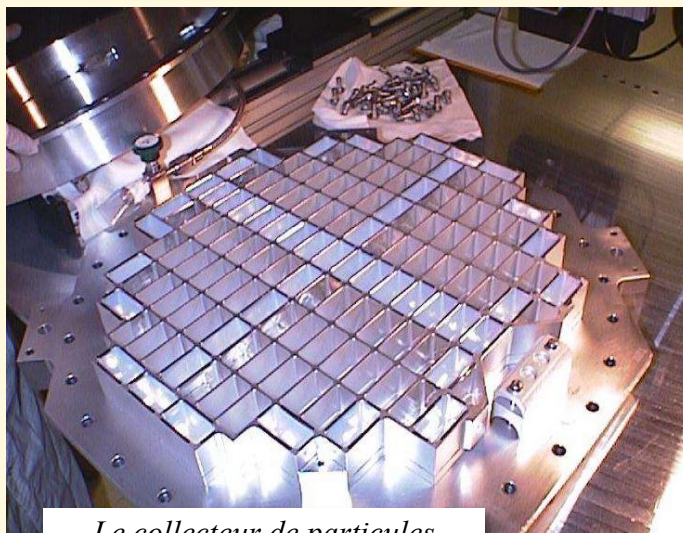
Il s'invite partout, mais, en ce qui me concerne, j'ai mémorisé :  $3,141592654$  comme approximation de la valeur de  $\pi$ , mais n'oubliez surtout pas qu'une mesure est toujours entachée d'erreur, et cette erreur, il faut savoir la déterminer, du moins l'évaluer, en plus ou en moins, du résultat du calcul.



# C'est arrivé ce jour-là...

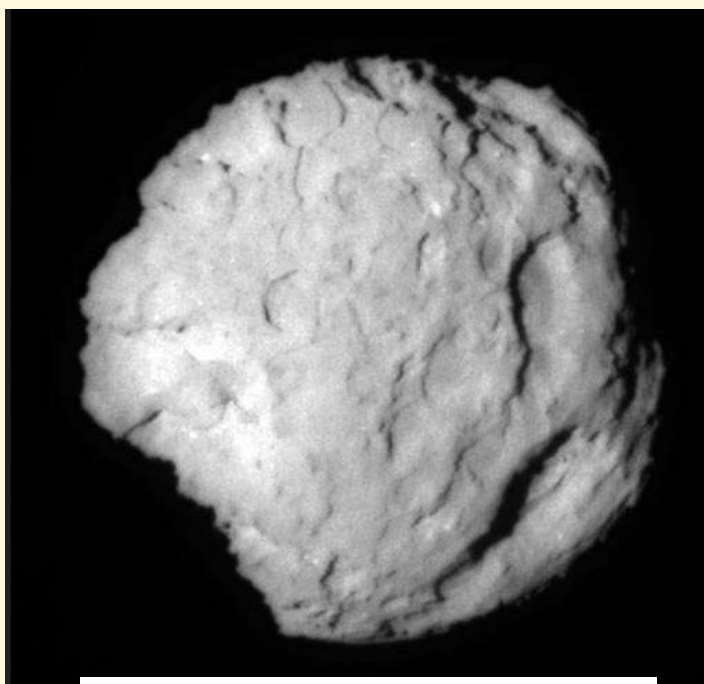
## Février 1999, il y a 21 ans

La sonde Stardust est lancée le 7 février 1999 par une fusée Delta 2 depuis Cap Canaveral. Son objectif : recueillir des échantillons de la comète Wild-2 et les ramener sur Terre, une première depuis les missions lunaires du programme Apollo. Après de nombreuses corrections d'orbite, avec son moteur ionique ou par assistance gravitationnelle notamment celle de la Terre, la sonde survole l'astéroïde 5535 Anne Frank à une distance de 3000 km. Le 2 janvier 2004, Stardust rejoint la comète sur une trajectoire parallèle qui lui permet un survol à faible vitesse. Avec une vitesse relative de seulement 6,1 km/s, qui lui permet de suivre la comète pendant plusieurs semaines, la sonde Stardust a tout son temps pour prendre des photos et collecter des échantillons. Elle dispose pour cela d'une grille, une sorte de raquette de tennis avec 132 alvéoles garnies d'un gel qui devraient piéger les particules éjectées par la comète. La sonde n'est qu'à 300 km du noyau de la comète, et Wild-2 est encore



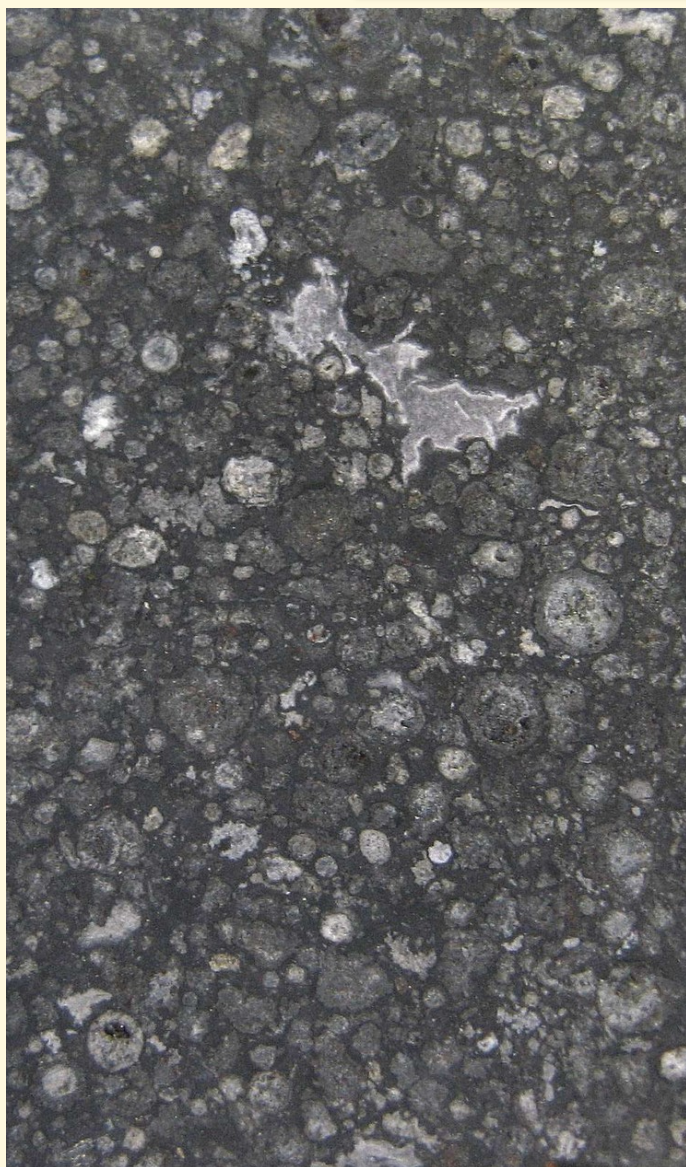
*Le collecteur de particules*

proche de son périhélie à 278 millions de km du Soleil, son noyau est donc toujours très actif. La trajectoire de Stardust l'amène à repasser à proximité de la Terre le 15 janvier 2006 à seulement 125 km. Une capsule contenant les prélèvements est larguée. Après une rentrée atmosphérique à 12,8 km/s, battant ainsi le précédent record détenu par Apollo 4 qui était de 11,14 km/s, la sonde se pose dans le désert de l'Utah. Plus de 10 000 particules d'une taille supérieure au micron issues de la queue de la comète Wild-2 sont découvertes dans le gel. La plupart a été en partie détruite ou altérée en pénétrant dans le gel à grande vitesse. Ce qui reste exploitable montre des matériaux issus de la nébuleuse proto-solaire. Depuis la formation du système solaire, ils ont été fortement brassés et on trouve aussi bien de l'olivine, synthétisée sous des températures élevées (1026 °C) donc près du Soleil, que des matériaux organiques très volatiles qui n'ont pu exister qu'au-delà de l'orbite de Jupiter. La diversité des particules confirme l'hypothèse d'un brassage important qui aurait transféré des minéraux synthétisés dans les parties les plus centrales du système solaire vers l'extérieur où ils auraient par la suite été inclus dans les poussières contenues dans les comètes.



*Vue rapproché de la comète 81/P Wild-2*

## Février 1969, il y a 51 ans



Le 8 février 1969, une météorite, une chondrite carbonée, est tombée au Mexique près du village de Allende dont le bureau de poste a été manqué de peu par un des gros fragments. Les chondres qu'elle contient sont des inclusions qui constituent les plus anciens fragments de roche connus. Ce sont des petites billes presque exclusivement composées de silicates formés par condensation des poussières lors de la formation du système solaire. La météorite Allende est, à bien des égards, exceptionnelle : c'est la plus grosse des météorites carbonées tombée sur Terre avec près de 2 tonnes (réparties en fragments de 1 g à 110 kg), et elle est

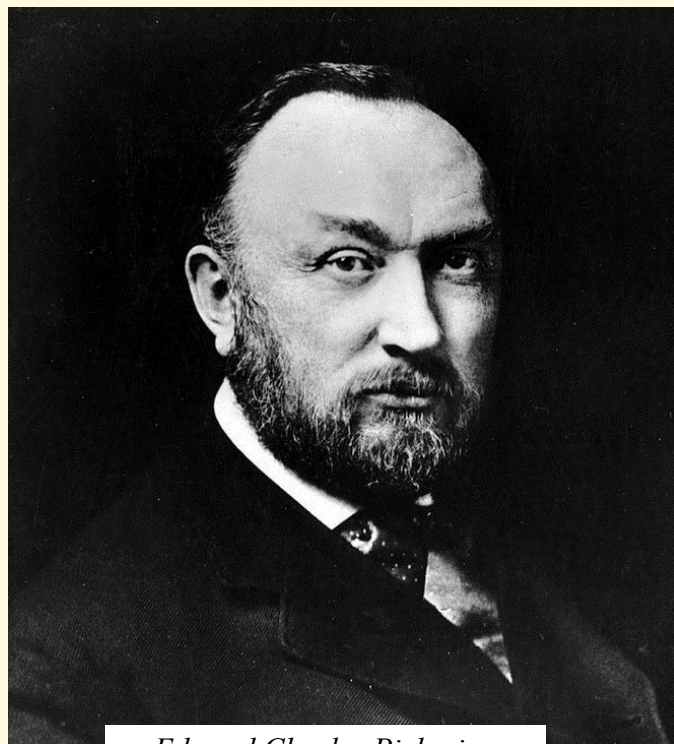
considérée par les cosmochimistes comme une véritable « pierre de Rosette » de la planétologie tant elle a fourni d'informations sur la formation du système solaire. Allende est la météorite la plus étudiée de l'histoire, sa chute coïncide avec le programme Apollo et, à seulement quelques mois du lancement d'Apollo 11 et du retour de roches lunaires sur Terre, les laboratoires d'analyses sont prêts à révéler les secrets de la météorite. On y trouve des inclusions minérales riches en calcium et en aluminium âgées de plusieurs milliards d'années, mais leur composition isotopique est différente de celle des roches terrestres, lunaires et de la majorité de celles des autres météorites : cette différence met en évidence des processus qui se sont déroulés dans des étoiles avant même la formation du système solaire. L'âge des chondres est estimé à 4,567 milliards d'années, soit plus vieux de 30 millions d'années que la formation de la Terre. Une forme rare d'aluminium qui agit comme une horloge montre qu'une supernova a explosé 2 millions d'années avant la formation du système solaire. Une étude de 2011 indique que la porosité de la météorite était de 70 à 80 % avant d'être comprimée par l'onde de choc de la supernova. Ce scénario du « Little Bang » et des turbulences qu'il a provoquées dans le disque protoplanétaire est une clé pour amorcer la formation des planètes.



*Fragment de la météorite Allende*

## Février 1919, il y a 101 ans

Edward Charles Pickering est né le 19 juillet 1846 à Boston dans le Massachusetts. Il fait des études scientifiques à Harvard puis enseigne la physique au MIT, l'Institut de Technologie du Massachusetts. Il a par la suite été nommé directeur de l'observatoire de l'université de Harvard jusqu'à sa mort, le 3 février 1919. Il a permis des avancées remarquables dans l'étude des spectres stellaires à partir de photographies du ciel. Il a recruté pas moins de 80 femmes pour travailler avec lui au dépouillement et au classement des données. Ces femmes étaient parfois appelées « les calculatrices » mais le plus souvent, elles étaient désignées à l'époque par la communauté scientifique en tant que « Harem de Pickering ». Elles ont observé, classé, catalogué des quantités d'étoiles, par leur luminosité et leur spectre. Williamina Fleming, Annie Canon, Antonia Maury et Henrietta Leavitt sont les plus connues. Elles ont contribué au classement des étoiles à partir de leur composition chimique ou à l'étude d'étoiles variables comme les céphéides qui ont ouvert une



*Edward Charles Pickering  
(1846 - 1919)*



nouvelle voie en astronomie : la cosmologie. En 1882, il développe une nouvelle méthode d'étude du spectre d'étoiles binaires et découvre alors la première étoile binaire spectroscopique. En 1896, il publie les observations de raies spectrales de l'étoile  $\zeta$  (dzêta) Puppis. Une série de raies d'absorption, la série de Pickering, qu'il attribue d'abord à l'hydrogène en 1897 et qui sera finalement identifiée par Niels Bohr à celles de l'hélium ionisé en 1915. On doit à Edward Pickering, la renommée de l'observatoire de Harvard.



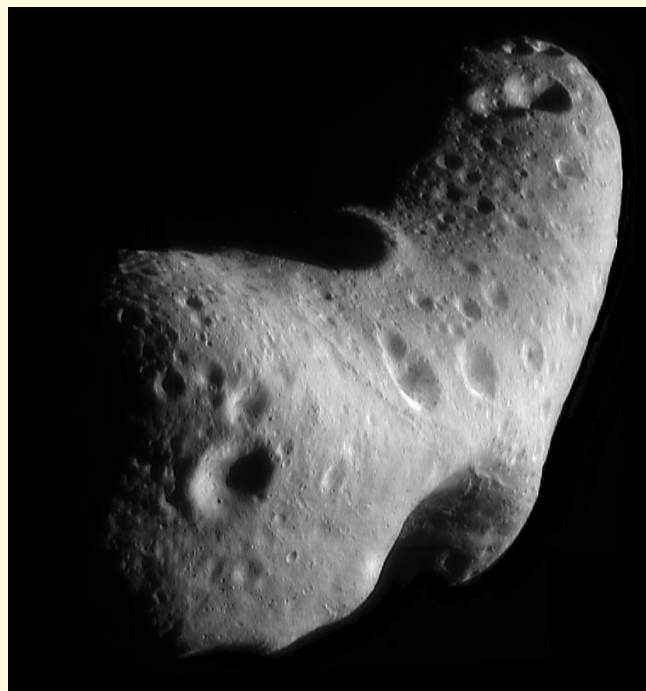
## Février 1889, il y a 131 ans



Auguste Charlois  
(1864 - 1910)

Auguste Honoré Charlois est un astronome français né le 24 novembre 1864 dans le Var. Il a travaillé à l'observatoire de Nice où il a découvert 101 astéroïdes. Sa première découverte est celle de (267) Tirza en 1887, (283) Emma est sa 5<sup>e</sup> découverte le 8 février 1889. Jusqu'en 1891, la

détection des petites planètes, comme on les appelait à l'époque, s'effectue de manière visuelle, l'œil à l'oculaire. A partir de 1891, avec l'avènement de l'astrophotographie, à l'initiative de Max Wolf, le taux de détection des astéroïdes augmente notablement. Dans la nuit du 13 août 1898, il découvre l'astéroïde (433) Eros, la même nuit que Carl Gustav Witt qui annonce la découverte le premier. Cet astéroïde est devenu l'objectif d'une petite sonde de la NASA. Le 12 février 2001, la sonde NEAR Shoemaker se pose sur Eros pour y effectuer des analyses chimiques. Jusqu'au 28 février, NEAR a analysé la composition chi-



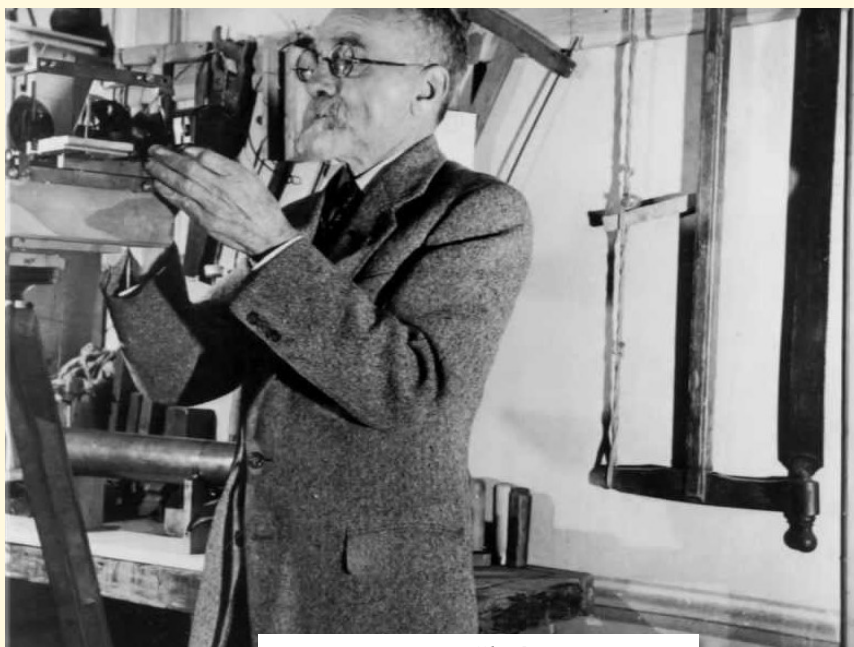
mique du sol grâce à un spectromètre à rayons gamma, inefficace depuis l'orbite car sa portée avait été assez largement surestimée. Le 26 mars 1910, à l'âge de 46 ans, Auguste Charlois est tué par le frère de sa première femme qui lui en voulait de s'être remarié. L'astéroïde (1510) Charlois porte son nom.



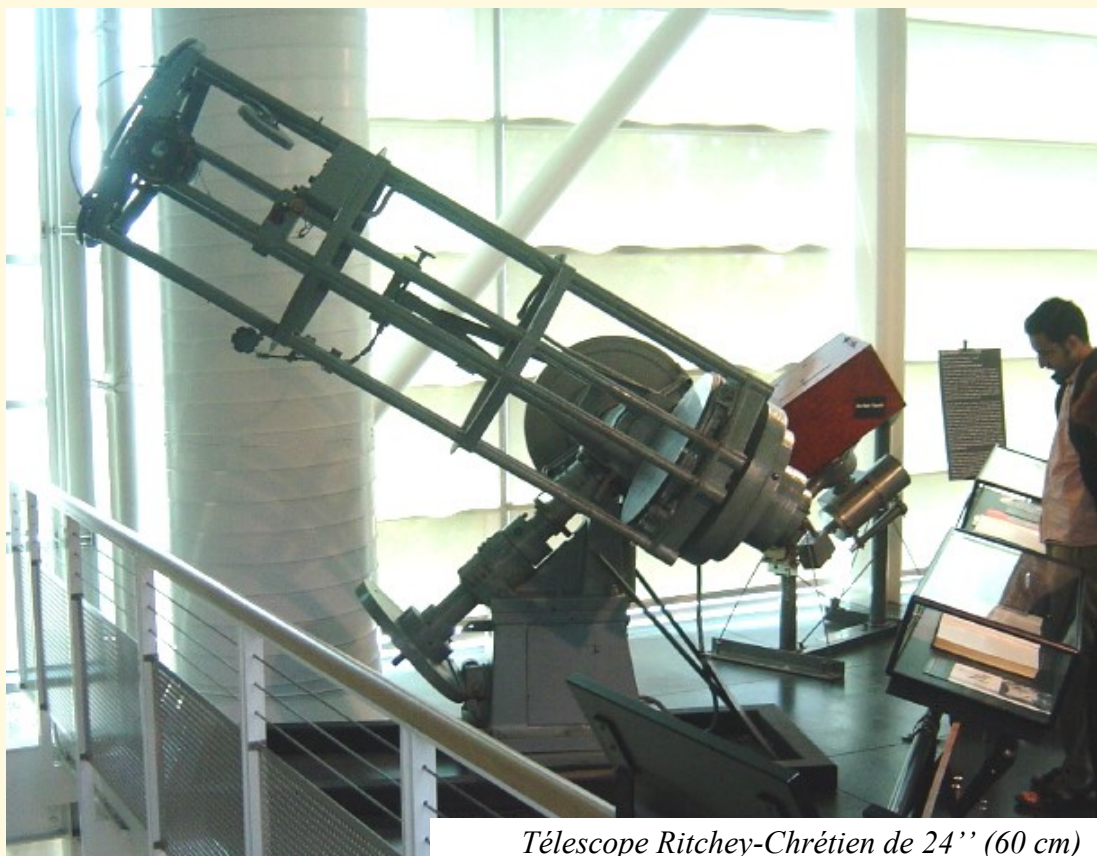
Petit Equatorial, dit « coupole Charlois », Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

## Février 1879, il y a 141 ans

Henri Chrétien est né le 1<sup>er</sup> février 1879 à Paris. Il était astronome, ingénieur-opticien, professeur et inventeur français. Il était disciple de Camille Flammarion, puis assistant d'Henri Deslandres à l'observatoire de Meudon de 1902 à 1906. En 1906, il est nommé astronome-adjoint à l'observatoire de Nice ; il est chargé de créer un service d'astrophysique, obtient des photographies de spectres stellaires et conçoit un spectrohéliographe. Durant la première guerre mondiale, il travaille à l'élaboration d'instruments d'optique. En 1917, il invente le catadioptré. Après la guerre, il participe à la création de l'Institut d'optique théorique et appliquée : SupOptique. En 1922, il conçoit un nou-



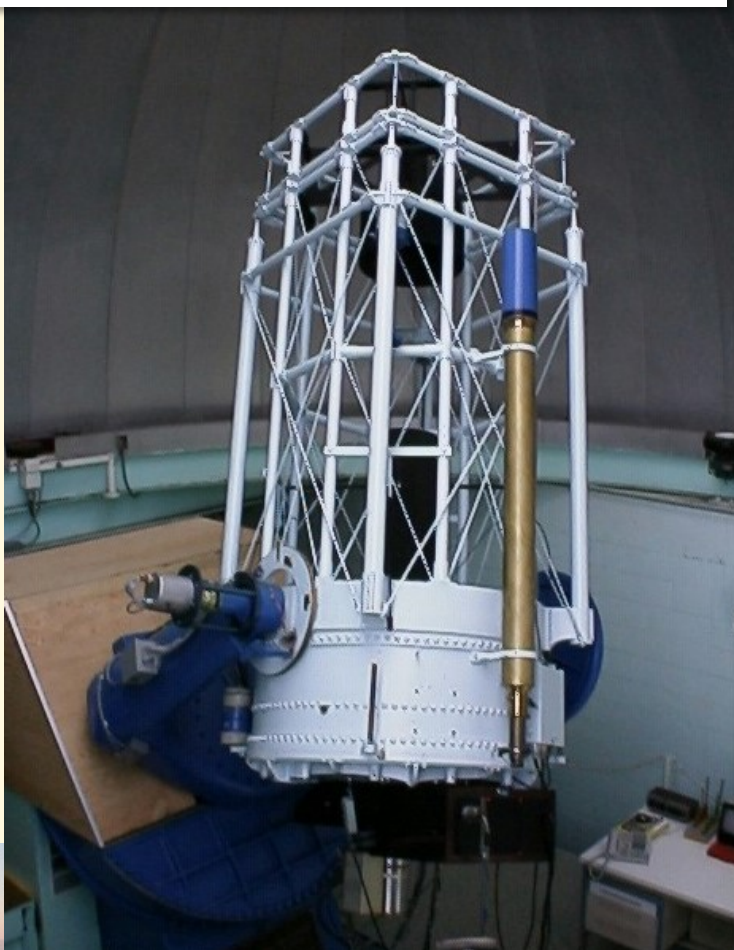
*Henri Chrétien  
(1879 - 1956)*



*Télescope Ritchey-Chrétien de 24'' (60 cm)*

veau type de télescope basée sur une configuration optique à miroirs hyperboliques. La réalisation est confiée à George Willis Ritchey en 1927. Ce télescope devient célèbre sous le nom de Ritchey-Chrétien. Le premier télescope Ritchey-Chrétien voit le jour en 1927, c'est un télescope de 60 cm de diamètre, le second, de 1,02 m est toujours opérationnel à l'observatoire de Flagstaff en Arizona. Cette combinaison optique a été retenue pour le télescope spatial Hubble et la plupart des grands télescopes actuels comme les VLT de 8,20 m au Chili. En 1952, les représentants de la 20th Century Fox rachètent les droits d'un de ses instruments et le premier film est tourné en cinémascope en 1953, un procédé directement issu de son invention. Henri Chrétien reçoit un Oscar pour son invention lors de la 26<sup>e</sup> cérémonie des Oscars en 1954. Il meurt à Washington le 6 février 1956. Un astéroïde porte son nom, un bâtiment à l'observatoire de Nice également.

*Télescope Ritchey-Chrétien de 40'' (102 cm)*



*VLT, télescopes de 8,20 m au Chili*



# Les galaxies à noyau actif

*Jean-Louis*

L'apparition d'instruments toujours plus performants dans les différents domaines de longueurs d'onde a entraîné des découvertes. A chaque domaine spectral correspond un type de galaxies étranges. Ces galaxies ont été désignées d'après le nom de leur découvreur : Seyfert, Markarian... ou d'après leurs propriétés : galaxies à grumeaux, galaxies à flambées d'étoiles, galaxies à noyau actif (AGN, en anglais).

Comme suite et complément à l'article de Jean-Louis dans le numéro précédent, cet article décrit les galaxies à noyau actif.

Elles sont caractérisées par les éléments suivants :

- la présence en leur centre d'un noyau compact, d'aspect stellaire ou quasi-stellaire, émettant une énergie importante ( $> 10^{43}$  erg/s)
- une émission, au moins en partie, d'énergie d'origine non thermique
- la présence dans leur spectre de raies d'émission
- une grande variabilité dans toutes les gammes d'énergie : du domaine radio à celui des rayons X et gamma

Le trou noir domine une région compacte produisant un spectre continu, il est au centre d'un disque mince en rotation. Un puissant jet relativiste est émis par la région centrale, perpendiculairement au disque. Le disque est lui-même entouré d'un tore de poussière optiquement obscur.

Proches du disque, des nuages de gaz en mouvement de rotation produisent des raies d'émission larges, ce sont les régions BLR (Broad Line Region). Elles sont visibles uniquement suivant un angle de visée proche de la direction du jet.

Un peu plus éloignés, d'autres nuages de gaz produisent des raies d'émission étroites, régions NLR (Narrow Line Region). Les différents types d'AGN se caractérisent en fonction de l'angle formé entre le tore et l'angle de visée, suivant que l'objet central est visible, Seyfert 1, masqué partiellement ou en totalité, Seyfert 2.

**Seyfert 1** : galaxies spirales ou elliptiques possédant :

- un noyau d'apparence stellaire
- des raies d'émission permises larges
- des raies d'émission de haute excitation, étroites

**Seyfert 2** :

- raies étroites uniquement dans les régions NLR alors que les régions BLR et le noyau central sont masqués par le tore de poussières.

### Calcul de la masse du trou noir

Les AGN sont, en général, trop éloignées et trop lumineuses pour pouvoir mesurer la dynamique des étoiles dans le bulbe de la galaxie et ainsi évaluer la masse du trou noir central. La vitesse de rotation du gaz photo-ionisé par le disque d'accrétion autour du trou noir produit, par effet Doppler, un élargissement des raies d'émission. Due à la forte accélération gravitationnelle, la vitesse ainsi mesurée est liée à la masse du trou noir (BH : black hole). Considérant que nous sommes suffisamment éloignés du trou noir pour suivre les lois de la théorie de Newton, en appliquant le théorème du viriel à la sphère de gaz en mouvement dans un état d'équilibre ; l'énergie potentielle de gravitation de la sphère de gaz est égale à deux fois son énergie

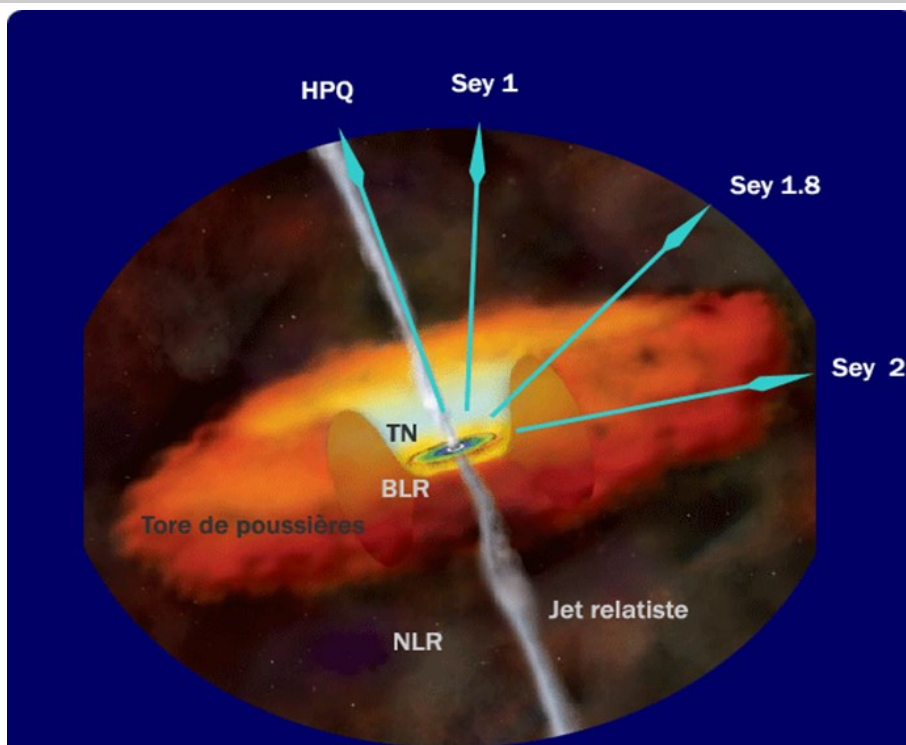


Figure 1 : le disque d'accrétion autour du trou noir supermassif obscurci par un tore de poussières

<http://www.astronomie-amateur.fr/QuasarsNatureClassification.html>

cinétique :

$$G \cdot [m_{\text{gaz}} \cdot M_{\text{BH}}] / R_{\text{BLR}} = m_{\text{gaz}} \cdot \Delta V^2$$

$$M_{\text{BH}} = (R_{\text{BLR}} \cdot \Delta V^2) / G \quad [1]$$

Une technique directe appelée « reverberation mapping » (RM) [1] mesure le délai entre le sursaut d'énergie de la source centrale et sa réverbération par photo-ionisation dans les régions BLR où il se traduit par l'accroissement des raies d'émission et en particulier H $\beta$ . Ce délai se mesure en jours-lumière, il s'exprime en fonction du rayon de rotation  $R_{\text{BLR}}$  de l'enveloppe de gaz, cependant sa détermination nécessite de longues observations pour le mesurer.

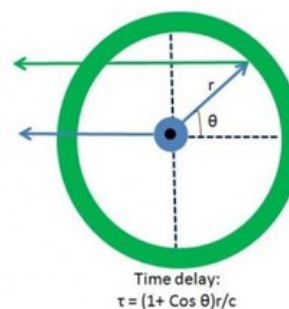


Figure 2 : le disque d'accrétion est en bleu et les régions BLR en vert. Le délai en temps est la différence entre la lumière qui arrive directement du centre et celle émise par photo-ionisation depuis les BRL.

En raison du peu de jours disponibles, nous avons employé une technique alternative indirecte mais rapide, basée sur des mesures photométriques qui expriment la relation entre le rayon  $R_{\text{BLR}}$  et la luminosité de l'AGN. A partir de la mesure du flux du continuum par la fente photométrique à  $5100 \text{ \AA}$   $L_{5100}$ , on calcule la luminosité  $\lambda L_{5100} = D^2 \cdot 4\pi \cdot \lambda \cdot \text{flux}_{L_{5100}}$  (D étant la distance de l'AGN). On peut ainsi par une formule empirique déduite de multiples observations calculer le rayon.

$$R_{\text{BLR}}(\text{H}\beta) = 538(\lambda L_{5100}/10^{46})^{0,65} \text{ (jour-lumière)} \quad [2]$$

Les régions BLR sont en rotation ce qui, par effet Doppler, produit un élargissement  $\Delta\lambda$  des raies H $\beta$  mesuré par sa largeur à mi-hauteur FWHM. La vitesse de rotation FWHM(H $\beta$ ) est donc :

$$\text{FWHM}(\text{H}\beta) = c \cdot \Delta\lambda / \lambda \text{ (km.s}^{-1}) \quad [1]$$

(avec c : la vitesse de la lumière)

Avec ces deux paramètres nous pouvons calculer la masse du trou noir ( $M_{\text{BH}}$ )

La formule de la masse du trou noir devient alors :

$$M_{\text{BH}} = f \cdot R_{\text{BLR}} \cdot \text{FWHM}(\text{H}\beta)^2 / G \quad [2]$$

$M_{\text{BH}}$  en kg

f facteur d'échelle lié à la géométrie  $\sim 1$

$R_{\text{BLR}}$  en m

FWHM(H $\beta$ ) largeur de la raie d'émission H $\beta$  en m.s $^{-1}$

G constante de gravitationnelle  $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ .

La masse du trou noir peut aussi s'exprimer directement en masse Solaire  $M_s$  :

$$M_{\text{BH}} = 5,26 \times 10^6 M_s (\lambda L_{5100}/10^{44})^{0,65} (\text{FWHM}(\text{H}\beta)/10^3)^2 \quad [2]$$

Ainsi le calcul de la masse du trou noir associe les propriétés ondulatoires de la lumière par la spectroscopie pour la détermination de la vitesse de rotation du gaz FWHM(H $\beta$ ) avec les propriétés corpusculaires par la photométrie pour mesurer la luminosité et atteindre ainsi le rayon de rotation  $R_{\text{BLR}}$ .

### Mesures Photométriques

Afin de mesurer le flux de lumière du continuum à  $5100 \text{ \AA}$ , nous avons utilisé une méthode qui, grâce à la fente photométrique de l'Alpy600, associe fente étroite et fente large [3]. La fente large garantit que la totalité du flux de l'étoile a été prise en compte pour la mesure. La fente étroite assure la précision des résultats spectroscopiques. Pour chaque AGN nous avons pris avec les deux fentes les spectres d'une étoile de référence de magnitude connue proche de notre cible ce qui nous a permis de calibrer en flux la réponse du système. Le spectre de l'AGN en fente large capte tout le flux, en fente étroite il donne ainsi avec précision la valeur du flux total du continuum à  $5100 \text{ \AA}$  :  $L_{5100}$  nécessaire au calcul de la masse du trou noir. Au flux total on retranche le flux propre à la galaxie trouvé dans la littérature.

AGN	Type	Magnitude	Etoile de référence	Type	Magnitude
NGC 7469	Seyfert 1	12,3	HD217186	A1V	6,33
Mrk 335	Seyfert 1	14,2	HD1048	A1pSi	6,24
Mrk 590	Seyfert 1	13,9	HD15004	A0III	6,33
NGC 1275	Seyfert 2	14,1	HD21038	A0V	6,51
CTA 102	Quasar	17-12	HD214203	A1III	6,4

AGN	$\lambda$ (H $\beta$ ) (4861 Å)	z (mesuré)	z (NASA/ IPAC)	FWHM (H $\beta$ ) (Å)	FWHM (H $\beta$ ) (km.s <sup>-1</sup> )	Vit.rad. (km.s <sup>-1</sup> )	Vit.rad. NASA/ IPAC	Distance (a.l. 10 <sup>6</sup> )	Distance NASA/ IPAC
NGC 7469	4940	<b>0.01618</b>	0.016317	24.4	<b>1503</b>	4851	4892	<b>226</b>	228
Mrk 335	4987	<b>0.02585</b>	0.025785	18.7	<b>1154</b>	7750	7730	<b>345</b>	344
Mrk 590	N/A	N/A	0.026385	0	0	N/A	7910	N/A	368
NGC 1275	4947	<b>0.01762</b>	0.017559	19.0	<b>1172</b>	5283	5264	<b>246</b>	245
CTA 102	N/A	N/A	1.036	0	0	N/A	>30000	N/A	(8000)

AGN	Flux $L_{5100}^{\text{total}}$ erg.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> Å	Flux $L_{5100}$ galaxie.[6] erg.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> Å	Flux $L_{5100}$ AGN erg.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> Å	$\lambda L_{5100}$ erg.s	$R_{\text{BLR}}$ jour- lumière	Log( $M_{\text{BH}}$ ) $M_{\text{s}}$	Log( $M_{\text{BH}}$ ) $M_{\text{s}}$ Ref. [4-5]	$M_{\text{BH}}$ $M_{\text{s}}$	$M_{\text{BH}}$ $M_{\text{s}}$ Ref. [4-5]
NGC 7469	2,05 10 <sup>-14</sup>	9,00 10 <sup>-15</sup>	1,15 10 <sup>-14</sup>	3,43 10 <sup>43</sup>	<b>13,4</b>	<b>6,77</b>	6,84	<b>5,9 10<sup>6</sup></b>	6,9 10 <sup>6</sup>
Mrk 335	7,17 10 <sup>-15</sup>	1,56 10 <sup>-15</sup>	5,61 10 <sup>-15</sup>	4,30 10 <sup>43</sup>	<b>15,6</b>	<b>6,61</b>	6,69	<b>4,1 10<sup>6</sup></b>	4,9 10 <sup>6</sup>
NGC 1275	2,02 10 <sup>-14</sup>	1,0 10 <sup>-15**</sup>	1,92 10 <sup>-14</sup> *	6,80 10 <sup>43*</sup>	<b>29,1 *</b>	<b>8,32 *</b>	8,53	<b>2,1 10<sup>8*</sup></b>	3,4 10 <sup>8</sup>

\* Calcul AGN Seyfert 2

\*\* estimé

Calculs, suivant les formules adaptées aux AGN de type Seyfert 2 [7]

$$\text{Log}(M_{\text{BH}}) = 8,32 \quad (8,53 \text{ écart } 2,4\%)$$

$$\text{Log}(R_{\text{BLR}}/\text{light-days}) = 1,555 + 0,542 \text{Log}(\lambda L_{5100}/10^{44}) \quad M_{\text{BH}} = 2,1 \times 10^8 M_{\text{s}} \quad (3,4)$$

$$\text{où } \lambda L_{5100} = 0,68 \times 10^{44} \text{ erg.s}^{-1} \Rightarrow R_{\text{BLR}} = 29,1 \text{ ld}$$

$$\text{FWHM}(H\beta) = 1,07 \times 10^3 (\text{FWHM}(H\alpha)/10^3)^{1,03}$$

$$\text{où } \text{FWHM}(H\alpha) = 1,117 \text{ km.s}^{-1}$$

$$\text{on trouve donc } \text{FWHM}(H\beta) = 1199 \text{ km.s}^{-1}$$

La masse du trou noir se calcule ainsi :

$$M_{\text{BH}} = \xi (R_{\text{BLR}} \text{FWHM}(H\beta))^2 / G$$

$$\text{où } \xi = 1,075 \text{ (facteur de géométrie)}$$

## Références

[1] B.M. Peterson Space Science Reviews, Volume 183, 09/2014 Measuring the Masses of Supermassive Black Holes.

<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~peterson/Docs/petersonISSI.pdf>

[2] Mejia-Restrepo & Trakhtenbrot 2016 Active galactic nuclei at  $z \sim 1,5$ : II Black Hole Mass es-

timation by means of broad emission lines MNRAS Vol 460, July 2016

<https://academic.oup.com/mnras/article/460/1/187/2608848>

[3] Christian Buil

[http://www.astrosurf.com/buil/calibration2/absolute\\_calibration\\_en.htm](http://www.astrosurf.com/buil/calibration2/absolute_calibration_en.htm)

[4] Jong-Hak Woo C. Megan Urry ApJ 544 November 2002 Tableau 3

<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/342878/pdf>

[5] R.J. Wilman et al. The nature of the molecular gas system in the core of NGC 1275 MNRAS Vol. 359

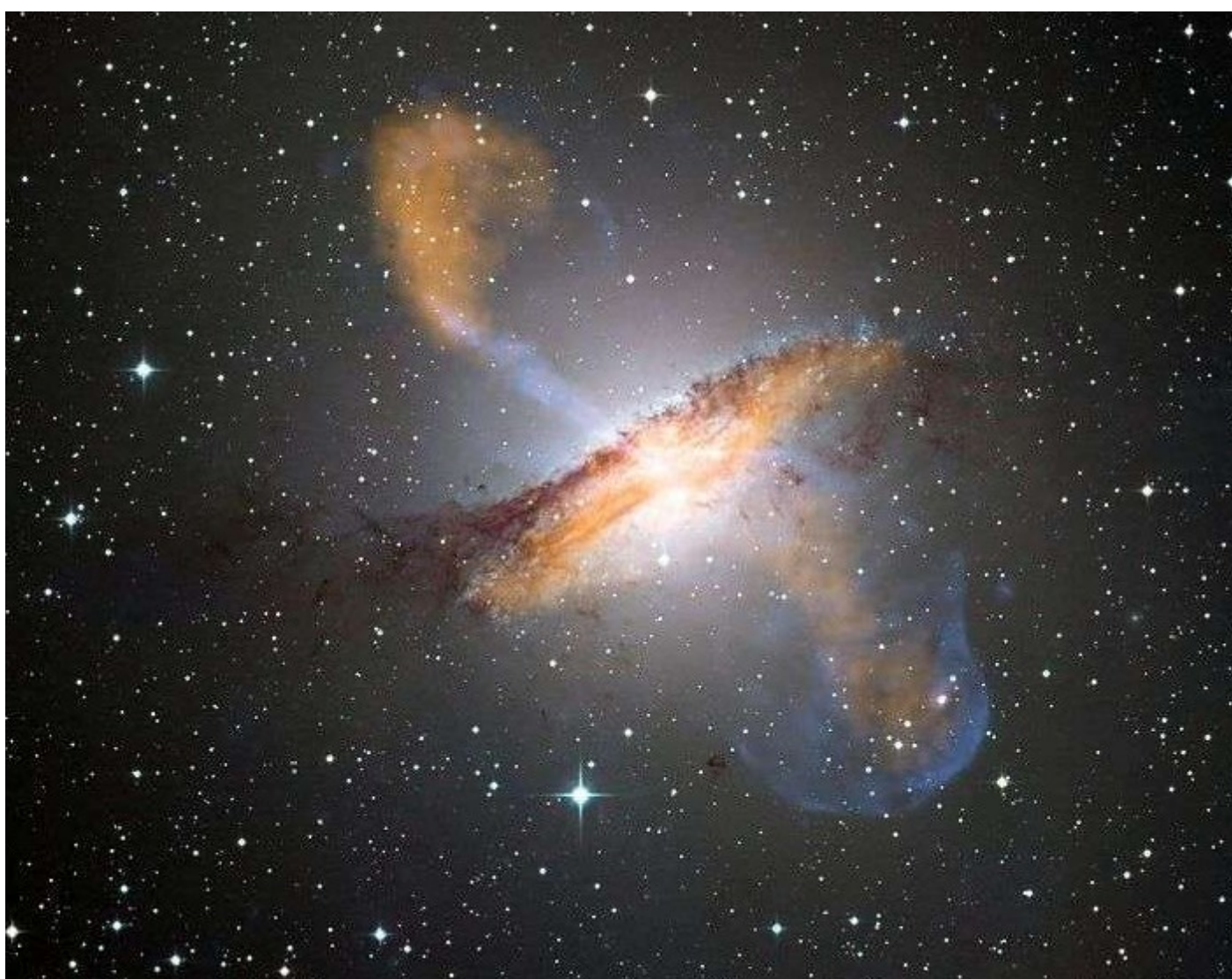
February 2005

<https://academic.oup.com/mnras/article/359/2/755/988746>

[6] M.C. Bentz et al ApJ 767 April 2013 Tableau 12 <https://arxiv.org/pdf/1303.1742.pdf>

[7] Dayla Baron & Brice Ménard Black hole mass estimation for Active Galactic Nuclei from a new angle MNRAS Vol 487, August 2019

<https://arxiv.org/pdf/1903.01996.pdf>



Une image de Centaurus A, révélant les jets émis par le très actif trou noir central de la galaxie. Ceci est une image composite obtenue avec trois différents instruments, fonctionnant à différentes longueurs d'onde. Les données submillimétriques à 870 microns de l'instrument Laboc sur Apex sont montrées en orange. Les données aux rayons X de Chandra sont montrées en bleu. Les données de lumière visible du *Wide Field Imager* (WFI) du télescope MPG-Eso de 2,2 mètres situé à La Silla, au Chili, montrent les étoiles et la ligne de poussières caractéristique de la galaxie quasiment en couleurs « réelles ». © Eso, Nasa





JEFF GRAPHY

« Sapin Polaris », photo prise par Jean-François à Cernay-la-ville

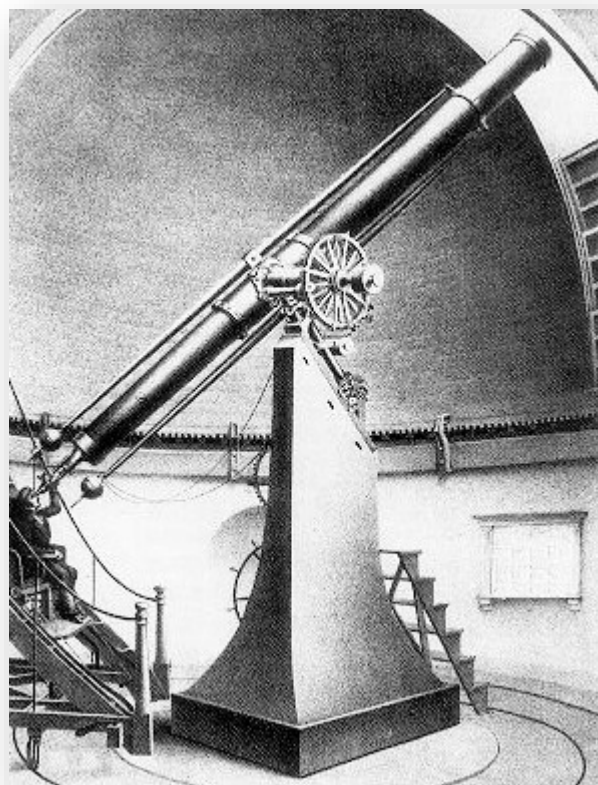
# Les céphéïdes (1)

*Lionel*

L'étude des étoiles, la mesure de leur éclat et leur classement est intimement liée à l'astronome américain Edward Pickering et son équipe de femmes : le harem de Pickering.

Edward Pickering obtient sa thèse à l'observatoire de Harvard dont il devient directeur en 1876. Mais à l'époque, l'observatoire est peu renommé et il a besoin d'un projet phare pour qu'on le remarque. Le manque de renommée va de paire avec le manque de fonds, Edward Pickering ne peut donc pas engager d'astronomes : il décide d'engager des femmes et pour l'argent, il démarcha de riches veuves. Avec les fonds collectés, il va même pouvoir acheter 3 lunettes. Pour Pickering, les femmes « *sont capables de réaliser autant de bon travail routinier que les hommes qui ont des salaires importants. Pour le même montant, trois à quatre fois plus d'assistantes peuvent être employées.* »

Il n'hésite donc pas et recrute 80 femmes. A cette époque, les plaques photographiques révèlent de nombreuses étoiles et il faut trouver un système de classement à la fois photométrique (l'intensité lumineuse) et spectroscopique (la composition).



C'est **Williamina Fleming** qui, la première, a l'idée d'un classement alphabétique pour les étoiles. En étudiant les spectres et, en particulier, l'intensité de la raie de l'hydrogène, elle classe les étoiles des types A (la plus forte signature en hydrogène) à Q (la plus faible).



Williamina Fleming  
(1857 - 1911)

**Antonia Maury**, reprend et enrichit le classement de Williamina Fleming. Pour Edward Pickering son travail n'est pas assez innovant. Elle n'obtient pas d'avancement, et finit même par être renvoyée. C'est Ejnar Hertzsprung qui constate que le système de classement d'Antonia Maury fonctionne parfaitement bien pour les étoiles de type géantes rouges. Il parvient même à convaincre l'UAI (l'Union Astronomique Internationale) d'adopter le système de classement d'Antonia Maury.



Antonia Maury  
(1866 - 1952)

**Annie Cannon** réutilise les lettres d'Antonia Maury, elle les réarrange, supprime certaines classes inutiles et arrive au système actuel. Ce nouveau classement ne modifie rien pour les étoiles, celles qui étaient de type A y restent. Pour Edward Pickering, c'est acceptable, d'autant plus que Annie Cannon est capable de classer 3 étoiles par minute. En 10 ans, elle va classer 350 000 étoiles. Cet énorme travail réalisé par une seule et même personne assure une certaine homogénéité pour le classement, d'ailleurs ses assistants lui ont parfois donné à étudier des étoiles déjà classées, juste pour voir si tout est vraiment homogène et reproductible. Au bout de 27 ans de travail, à 75 ans, Annie



Annie Cannon  
(1863 - 1941)

Cannon obtient officiellement le titre d'astronome, elle est même la première femme à l'avoir. Les astronomes disposent alors d'un immense catalogue de spectres stellaires mais on ne sait toujours pas à quoi cela correspond.

C'est **Cécilia Payne Gaposchkin** qui trouve l'explication : l'ordre O,B,A,F,G,K,M range les étoiles par ordre de températures décroissantes, des plus chaudes de type O (30 000°C en surface) aux moins chaudes, les plus rouges de type M (3000 °C). D'après ses calculs, 90% des étoiles sont composées pratiquement exclusivement d'hydrogène. Henri Russel, une sommité à l'époque dira : « c'est n'importe quoi ! ». Elle pourra malgré tout publier ses résultats mais en disant en conclusion que ce n'est pas possible...



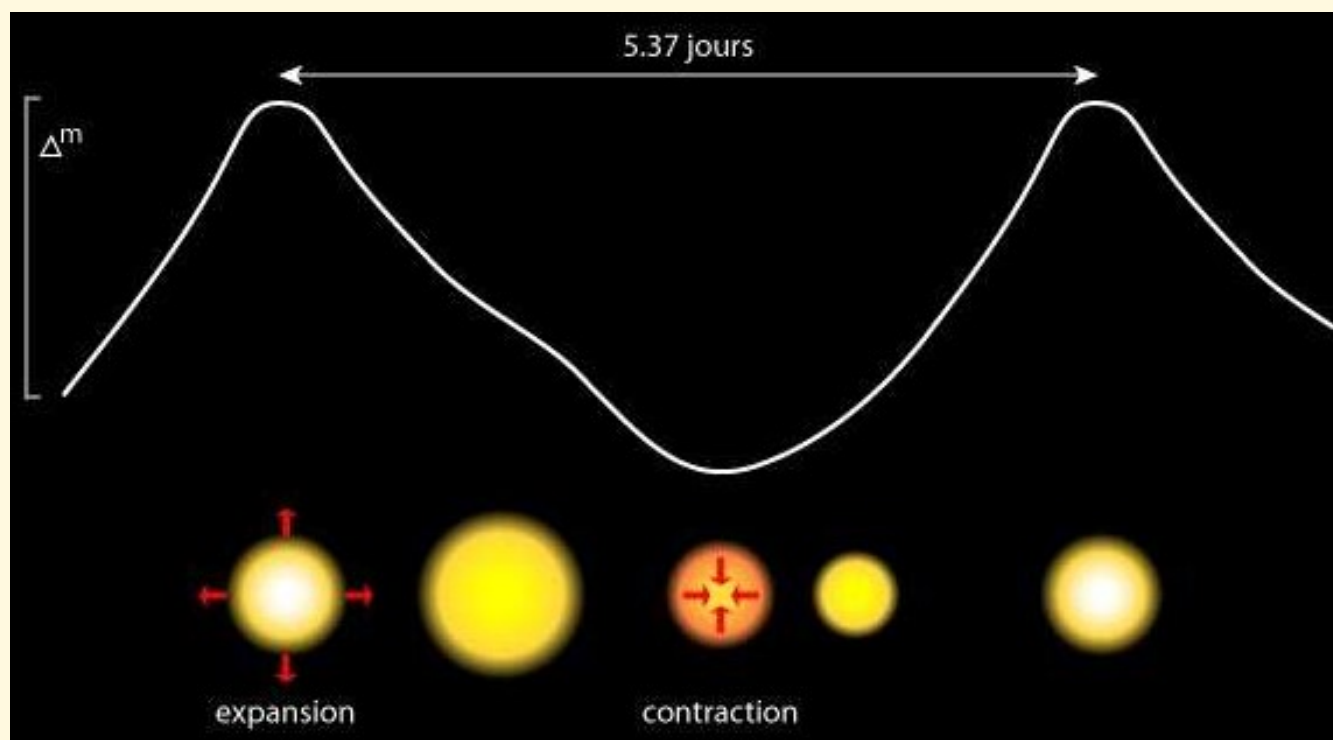
Cécilia Payne  
(1900 - 1979)

10 ans plus tard, les astronomes vont changer d'avis et un certain Henri Russel dira finalement que 90% des étoiles sont composées d'hydrogène, mais il oubliera de faire référence à ce qu'avait dit Cécilia Payne 10 ans plus tôt... Parallèlement aux femmes qui classent les étoiles en fonction de leur spectre, il y a celles qui les classent en fonction de leur éclat : c'est la photométrie.

**Henrietta Leavitt** s'intéresse tout particulièrement à un groupe d'étoiles situées dans le Petit Nuage de Magellan dans les constellations du Toucan et de l'Hydre mâle à 199 000 al de la Terre. Ces Etoiles sont arrivées à un stade de leur existence où elles deviennent instables. Ces instabilités se traduisent par des variations d'éclat : ce sont des étoiles variables. Parmi les étoiles variables, certaines sont des variables irrégulières, en revanche, d'autres suivent un cycle régulier de variation d'éclat. C'est le cas des variables qu'étudie Henrietta Leavitt, et l'étoile qui fait référence



Henrietta Leavitt  
(1868 - 1921)



## Les Céphéides

Dans la plus grande partie de sa vie, l'étoile fusionne les atomes d'hydrogène en atomes d'hélium. Le Soleil se trouve dans cette phase depuis près de 5 milliards d'années, et, avec les réserves d'hydrogène dont il dispose, il restera encore 5 milliards d'années dans cette phase. Lorsque les réserves d'hydrogène s'épuisent, les étoiles entrent dans une phase d'instabilité avant d'enclencher de manière stable la fusion de l'hélium. Pour les étoiles dont les masses sont comprises entre 3 et 15 masses solaires, les oscillations sont du type Céphéides. Le passage par la phase de Céphéide ne dure que 1 million d'années. Seules 1000 Céphéides sont répertoriées dans notre Galaxie. Entre 20 000 et 35 000 sont suspectées. Parmi les 6 000 étoiles visibles à l'œil nu, 40 sont des Céphéides et la plus célèbre de toutes est l'étoile polaire à 431 al de la Terre.

pour ces variables est l'étoile delta ( $\delta$ ) dans la constellation de Céphée, découverte par John Goodricke en 1784, d'où leur nom générique de céphéides. Leurs variations d'éclat se traduisent par des variations de magnitude sur les photos prises du Petit Nuage de Magellan. La magnitude d'une étoile dépend de l'éclat intrinsèque de l'étoile et de la distance à laquelle on l'observe. Les céphéides qu'observe Henrietta Leavitt ont des magnitudes comprises entre 11,6 et 16,9, ce qui, à 199 000 al en font des étoiles particulièrement brillantes. A la même distance, le Soleil n'aurait qu'une magnitude 23,6, soit 63 000 moins lumineux que la plus brillante des céphéides. Les céphéides sont donc des étoiles particulièrement lumineuses qui peuvent être observées aussi loin que dans les galaxies satellites de la Voie Lactée que sont les Nuages de Magellan, et même plus loin encore...

Avec nos moyens d'astronomes amateurs, il est aujourd'hui possible de faire le même

genre de relevés qu'Henrietta Leavitt, il y a plus d'un siècle.

Gilles a utilisé les installations de l'observatoire Sadr au Chili pour photographier les étoiles du Petit Nuage de Magellan. Mais pour reproduire les étapes du travail d'Henrietta Leavitt, il faut suivre une procédure rigoureuse.

### Recherches et préparation

A partir de la circulaire de l'Université d'Harvard, on peut retrouver les 25 céphéides suivies par Henrietta Leavitt.

HARVARD COLLEGE OBSERVATORY.

CIRCULAR 173.

PERIODS OF 25 VARIABLE STARS IN THE SMALL MAGELLANIC CLOUD.

TABLE I.  
PERIODS OF VARIABLE STARS IN THE SMALL MAGELLANIC CLOUD.

H.	Max.	Min.	Epoch.	Period.	Res. M.	Res. m.	H.	Max.	Min.	Epoch.	Period.	Res. M.	Res. m.
1505	14.8	16.1	<i>d.</i> 0.02	<i>d.</i> 1.25336	-0.6	-0.5	1400	14.1	14.8	<i>d.</i> 4.0	<i>d.</i> 6.650	+0.2	-0.3
1436	14.8	16.4	0.02	1.6637	-0.3	+0.1	1355	14.0	14.8	4.8	7.483	+0.2	-0.2
1446	14.8	16.4	1.38	1.7620	-0.3	+0.1	1374	13.9	15.2	6.0	8.397	+0.2	-0.3
1506	15.1	16.3	1.08	1.87502	+0.1	+0.1	818	13.8	14.7	4.0	10.336	0.0	0.0
1413	14.7	15.6	0.35	2.17352	-0.2	-0.5	1610	13.4	14.6	11.0	11.645	0.0	0.0
1460	14.4	15.7	0.00	2.913	-0.3	-0.1	1365	13.8	14.8	9.6	12.417	+0.4	+0.2
1422	14.7	15.9	0.6	3.501	+0.2	+0.2	1351	13.4	14.4	4.0	13.08	+0.1	-0.1
842	14.6	16.1	2.61	4.2897	+0.3	+0.6	827	13.4	14.3	11.6	13.47	+0.1	-0.2
1425	14.3	15.3	2.8	4.547	0.0	-0.1	822	13.0	14.6	13.0	16.75	-0.1	+0.3
1742	14.3	15.5	0.95	4.9866	+0.1	+0.2	823	12.2	14.1	2.9	31.94	-0.3	+0.4
1646	14.4	15.4	4.30	5.311	+0.3	+0.1	824	11.4	12.8	4.	65.8	-0.4	-0.2
1649	14.3	15.2	5.05	5.323	+0.2	-0.1	821	11.2	12.1	97.	127.0	-0.1	-0.4
1492	13.8	14.8	0.6	6.2926	-0.2	-0.4							

Le logiciel Simbad nous permet d'accéder à leurs coordonnées pour le pointage des instruments : télescope Newton 355 mm ou lunette 127 mm. C'est Gilles

qui consacre une bonne partie de ses nuits à surveiller et mesurer les magnitudes des céphéides du Petit Nuage de Magellan.

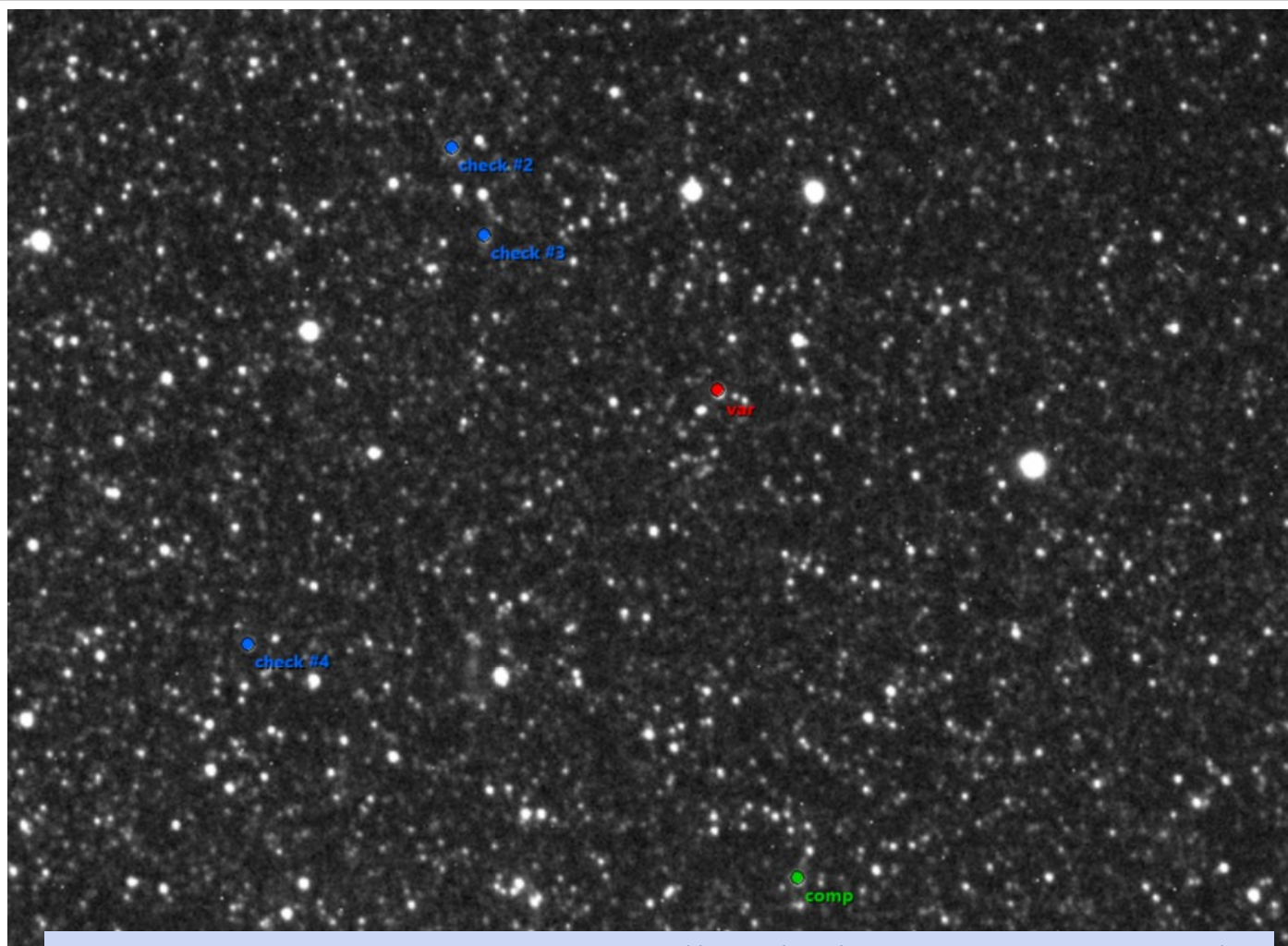
Show 100 entries

Search:

N	Identifler	typed ident	Otype	ICRS (J2000) RA	ICRS (J2000) DEC	Mag U	Mag B	Mag V	Mag R	Mag I	Sp type	#ref 1850 - 2019	#notes
1	SV* HV 1505	SV* HV 1505	cC*	00 50 58.1111986843	-72 04 26.410000593			16.927		16.467	~	4	0
2	SV* HV 1446	SV* HV 1446	cC*	00 48 33.0216948548	-72 25 09.701688208	16.16	17.28	16.72		16.52	~	5	0
3	SV* HV 1460	SV* HV 1460	cC*	00 49 17.7866219982	-72 01 47.720083638			16.148		15.513	~	4	0
4	SV* HV 1425	SV* HV 1425	cC*	00 46 50.4388677245	-72 32 35.964659083			15.940		15.253	~	11	0
5	SV* HV 1742	SV* HV 1742	cC*	00 57 40.2804690184	-72 32 44.231621712		16.453	15.832		15.054	~	2	0
6	SV* HV 1646	SV* HV 1646	cC*	00 55 21.0299126942	-72 40 30.283806895		16.099	15.652		14.950	~	2	0
7	SV* HV 1646	SV* HV 1646	cC*	00 55 21.0299126942	-72 40 30.283806895		16.099	15.652		14.950	~	2	0
8	SV* HV 1649	SV* HV 1649	cC*	00 55 22.7185490202	-72 42 15.420682906		16.221	15.736		15.033	~	2	0
9	SV* HV 1492	SV* HV 1492	cC*	00 50 25.7322838633	-72 27 42.885748385			15.214		14.580	~	13	0
10	SV* HV 1400	SV* HV 1400	cC*	00 45 26.7359385178	-72 27 11.155411500		16.04	15.467		14.705	~	12	0
11	SV* HV 1355	SV* HV 1355	cC*	00 41 24.0245070231	-73 21 40.498987283		15.02	15.121		14.455	~	5	0
12	SV* HV 1374	SV* HV 1374	cC*	00 43 05.1890075619	-73 33 59.565869902		15.992	15.309		14.536	~	2	0
13	SV* HV 818	SV* HV 818	cC*	00 40 23.6474997448	-73 40 24.779459001		15.477	14.952		14.184	~	10	0
14	SV* HV 1610	SV* HV 1610	cC*	00 54 28.7990878716	-72 24 39.305450157		15.29	14.659		13.917	~	15	0
15	SV* HV 1365	SV* HV 1365	cC*	00 41 49.0804221683	-73 43 42.179739346		15.672	15.080		14.221	~	40	0
16	SV* HV 1351	SV* HV 1351	cC*	00 41 03.8662972065	-73 31 39.780752145		15.350	14.755		13.945	~	13	0
17	SV* HV 827	SV* HV 827	cC*	00 49 42.7865589994	-72 29 45.044801526			14.425		13.690	~	19	0
18	SV* HV 822	SV* HV 822	cC*	00 41 55.4775921384	-73 32 23.609186717		14.39	14.524		13.618	~	25	0
19	SV* BV 1405	SV* HV 824	cC*	00 46 53.1110749320	-72 42 51.737002042			12.41		11.421	G0Iab	56	0
20	V* BZ Tuc	SV* HV 821	cC*	00 41 43.4484060953	-73 43 23.886984060		12.52	11.68		10.911	F8Ib	65	0

Showing 1 to 20 of 20 entries

Previous 1 Next



Sur cette image brute, on veut mesurer la magnitude de l'étoile désignée par un point rouge. On se sert d'une étoile de référence que l'on choisit et indiquée par un point vert. Les étoiles pointées en bleu servent à vérifier que l'étoile de référence choisie n'est pas elle-même variable.

### Les acquisitions

Les temps de poses s'étagent entre 1 min pour les céphéides les plus brillantes à 20 min pour les plus faibles. Le bon temps de pose est un compromis entre le fait de voir suffisamment d'étoiles qui serviront de référence pour les mesures d'éclat et ne surtout pas saturer la céphéide étudiée au risque ne plus pouvoir déterminer sa magnitude.

### La réduction des données

Les images brutes font apparaître un grand nombre d'étoiles. L'image n'est pas faite pour son côté esthétique mais pour les informations qu'on peut en tirer. C'est ce qu'on appelle réduire les données : elles sont brutes et inexploitées sur les images, on ne cherche à mesurer que la magnitude d'une seule étoile, c'est-à-

dire obtenir un seul et unique nombre.

Avec le logiciel Muniwin, il est possible de mesurer la magnitude d'une étoile particulière en fonction des magnitudes d'autres étoiles choisies comme références.

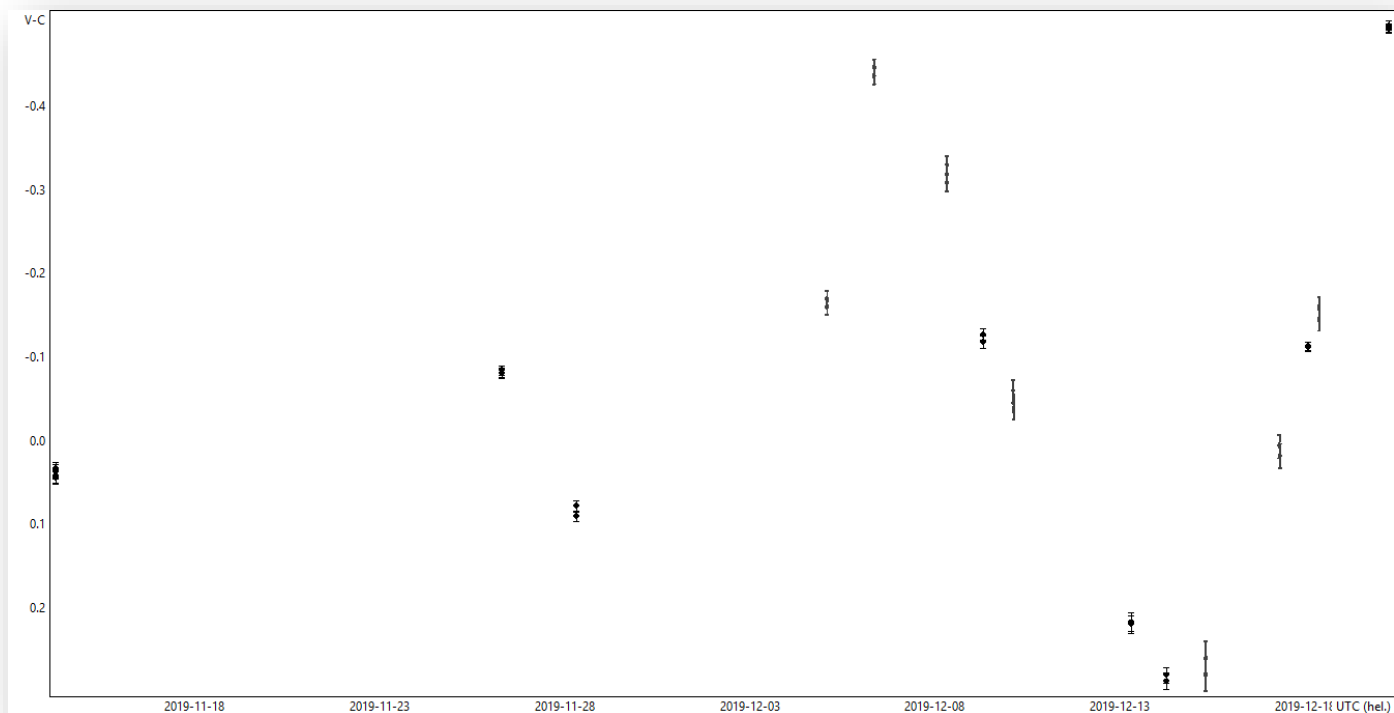
En répétant l'opération sur des images acquises à des dates différentes, il est possible de mettre en évidence l'aspect variable de l'étoile.

La première étape dans l'étude des céphéides est donc réussie : nous sommes capables de mettre en évidence les variations d'éclat de certaines étoiles du Petit Nuage de Magellan. Dans le prochain article, nous mettrons en évidence une relation entre la période de variation d'éclat et la luminosité de la céphéide, comme l'avait fait Henrietta Leavitt en 1912.

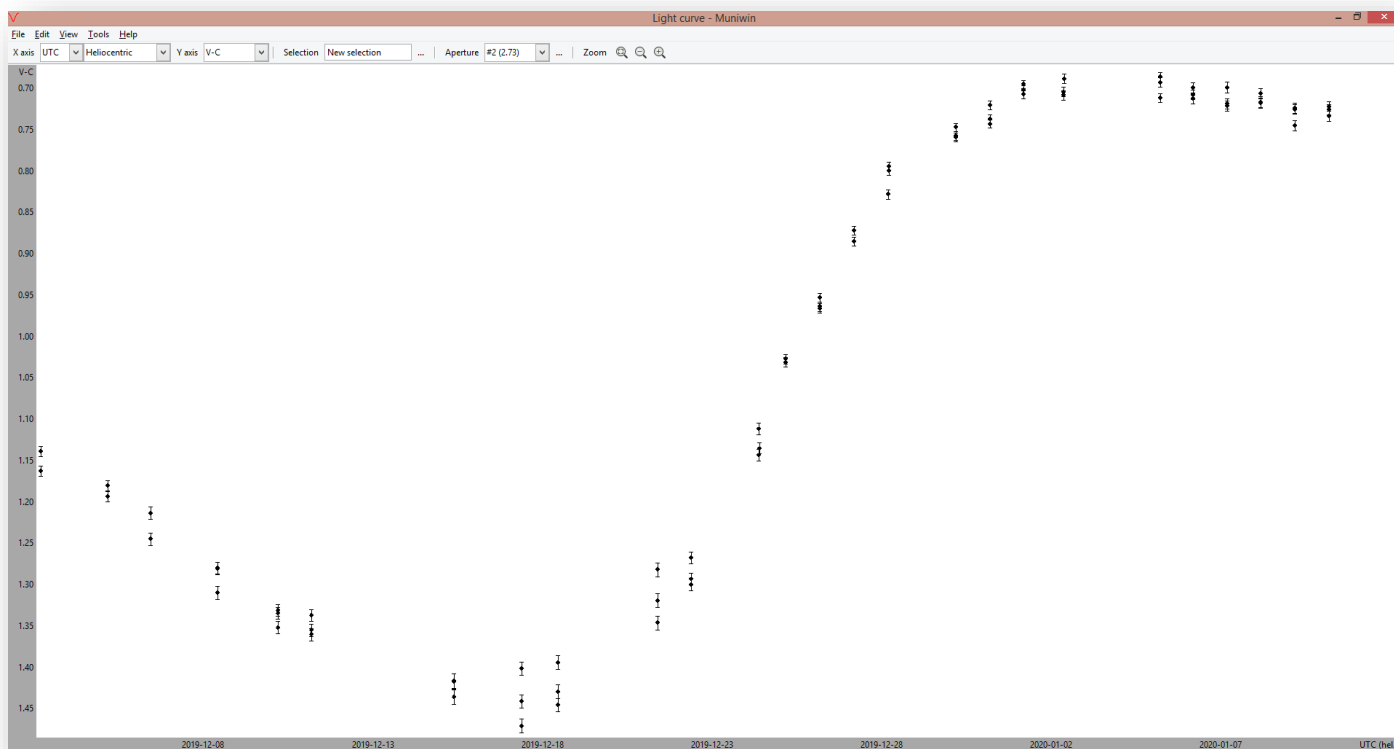
**OBAFGKM** : c'est la classification des étoiles de la plus chaude (O), à la moins chaude (M).

Pour s'en souvenir : « Oh Be A Fine Girl, Kiss Me », c'est la version masculine.

Il y a aussi la version féminine : « Oh Be A Fine Guy, Kiss Me ». Le résultat revient toujours un peu au même...



Variations de luminosité de SV-HV827. n°827 dans le document d'Edward Pickering, sa magnitude évolue entre 13,4 et 14,3 sur une période de 13,47 jours. Mesures obtenues avec le télescope 355 et la lunette 127.



Variations de luminosité de SV-HV824. Les amateurs sont donc effectivement capables de mettre en évidence les variations de luminosité des céphéides, les mêmes céphéides que celles étudiées par Henrietta Leavitt situées dans le Petit Nuage de Magellan situé à près de 200 000 al de la Voie Lactée, mais en 1912, elle ne savait pas encore...

# du côté de chez Sadr



## La course à la résolution...

Pour obtenir des images de plus en plus détaillées, c'est-à-dire, avec une meilleure résolution, plusieurs options s'offrent à nous :

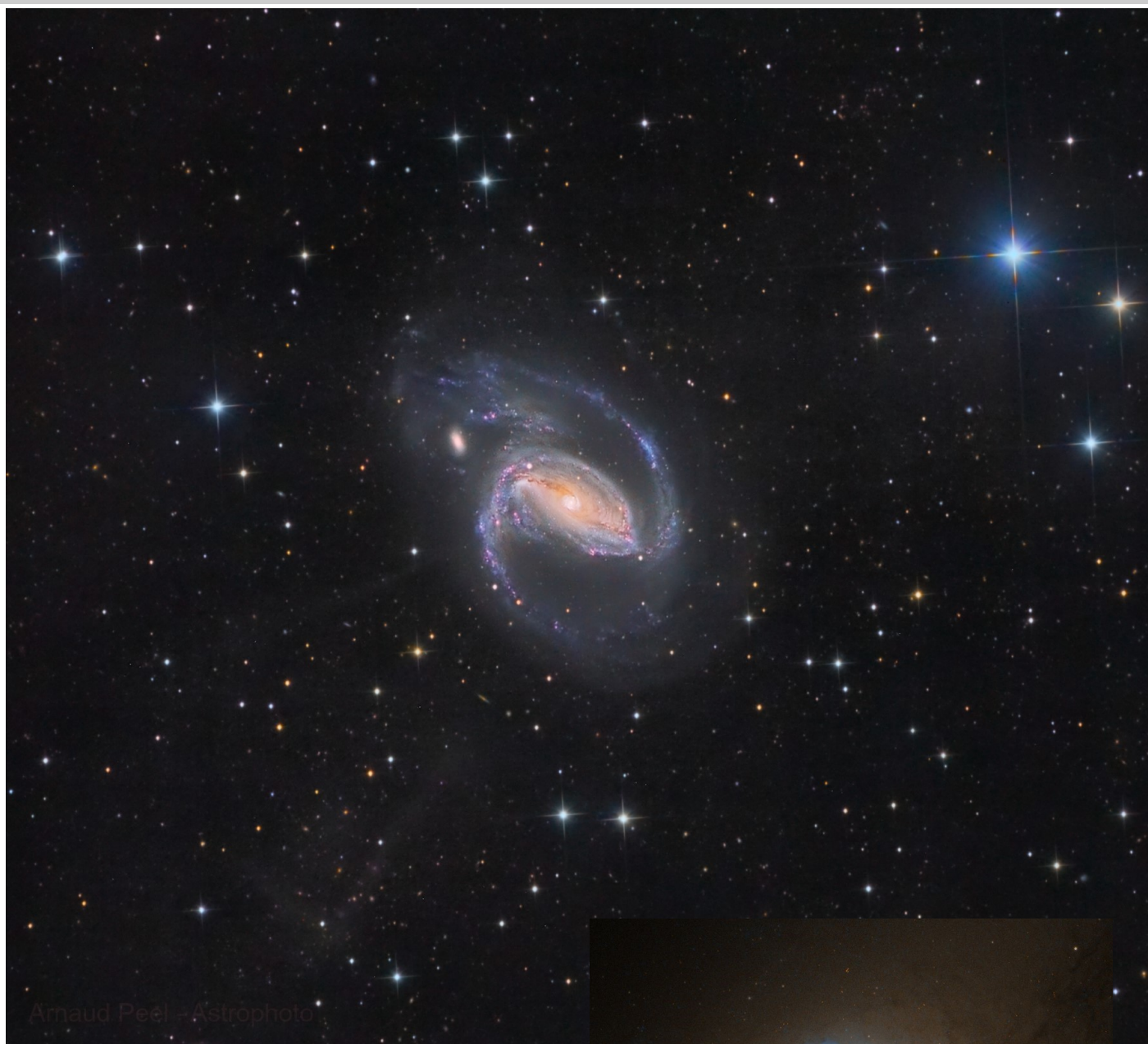
- changer la monture pour du matériel haut de gamme en limitant les imprécisions dans la mécanique afin de compenser au mieux la rotation de la Terre.
- choisir un logiciel d'autoguidage qui permet de mieux suivre l'étoile guide, en l'occurrence nous testons un logiciel qui ne se contente pas de suivre les mouvements d'une étoile, mais ceux de toutes les étoiles dans le champ du capteur. Les calculs effectués sur l'en-

semble des étoiles permettent d'atteindre une bien meilleure précision dans l'autoguidage.

- remplacer la caméra par une autre avec des pixels plus petits. La résolution des pixels est d'office meilleure, les détails sont plus petits, le champ de l'image aussi. Changer la caméra agit comme un zoom, notamment dans les galaxies.

La monture, est évidemment l'option la plus onéreuse, les discussions vont bon train au sein de l'association Observatoire Sadr pour faire évoluer le matériel et les logiciels et franchir un cap supplémentaire dans la qualité des images réalisées.





Arnaud Peel - Astrophoto

## NGC 1097

*Arnaud*

**Constellation** : le Fourneau

**Instrument** : T355 mm

**Acquisitions** : Ha, L, RVB

**Pose totale** : 6,6 h

**Date** : Janvier 2020

Cette grande galaxie spirale mesure plus de 158 000 al de diamètre. Ses déformations sont dues aux interactions avec ses voisines. Elle abrite en son centre un trou noir dont la masse est estimée à 140 millions de masses solaires. Autour du trou noir, un anneau de formations d'étoiles dont le diamètre est égal à 5000 al.



*L'anneau central vu par le télescope spatial Hubble*



## NGC 1566

*Arnaud*

**Constellation :** La Dorade

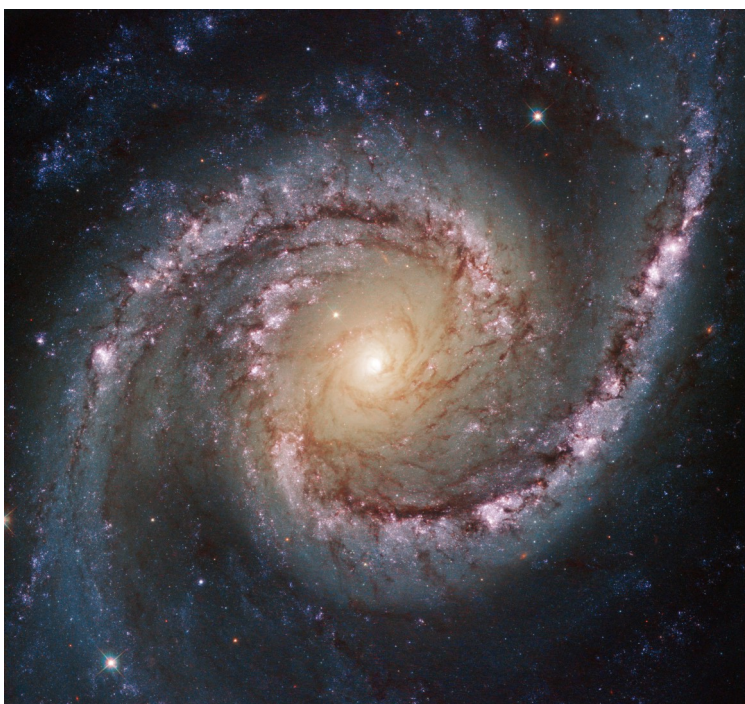
**Instrument :** Newton 355

**Date :** janvier 2020

**Image :** HaLRVB, 5,6 h

NGC 1566 est une galaxie spirale intermédiaire. Elle a été découverte par l'astronome australien James Dunlop en 1885. NGC 1566 est une galaxie spirale intermédiaire, ce qui signifie qu'elle n'a pas de région d'étoiles bien définie en forme de barre en son centre - comme les spirales barrées – et ce n'est pas tout à fait une spirale non barrée....

Le noyau, petit mais extrêmement brillant de NGC 1566 est clairement visible sur cette image, signe révélateur de son appartenance à la classe des galaxies Seyfert. Les centres de ces galaxies sont très actifs et lumineux, émettant de fortes rafales de rayonnement et potentiellement abritant des trous noirs supermassifs qui représentent plusieurs millions de fois la masse du Soleil.



*NGC1566 par Hubble*



Arnaud Peel - Astrophot

## NGC2442

*Arnaud*

**Constellation :** le Poisson Volant

**Instrument :** Newton 355

**Date :** janvier 2020

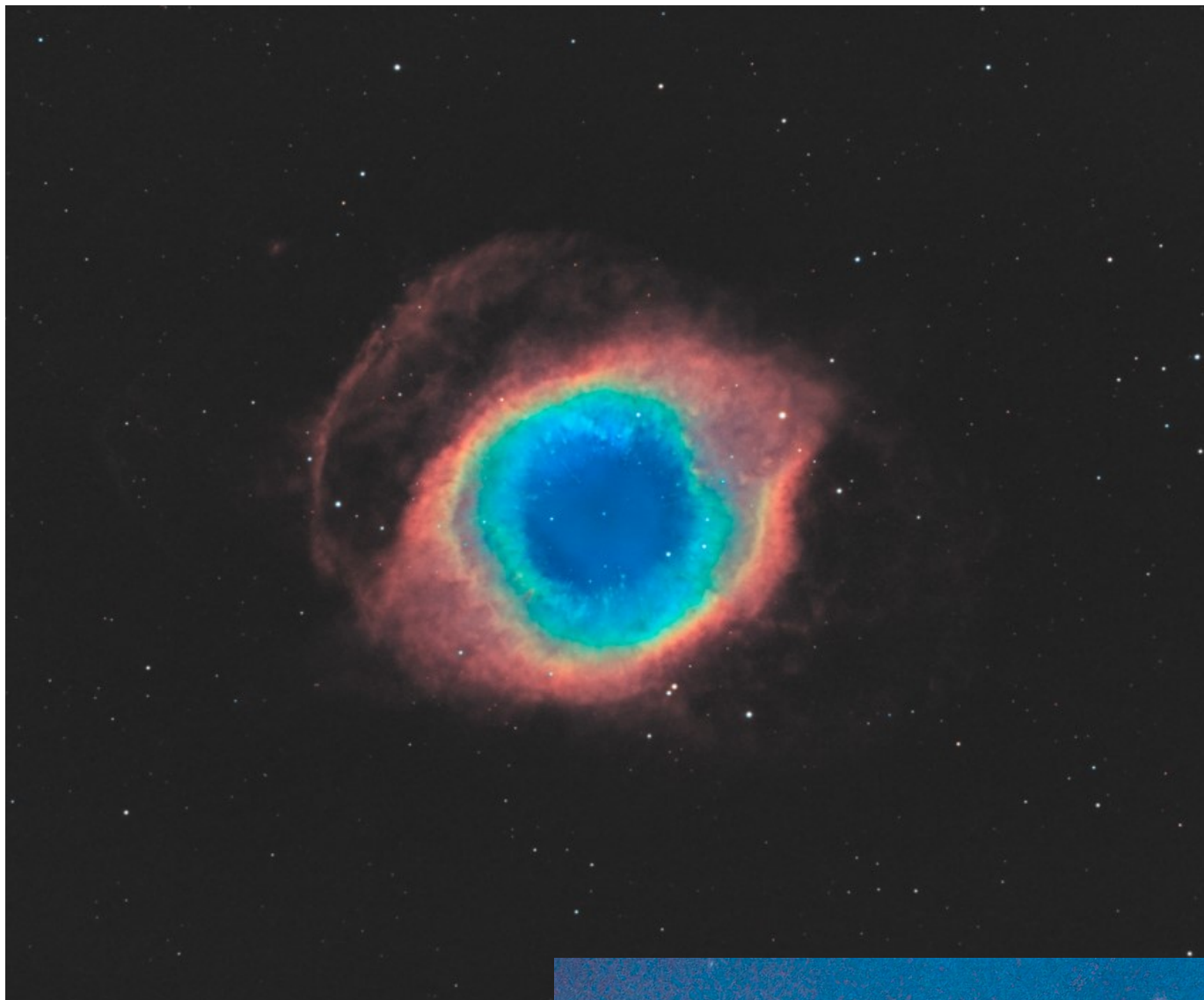
**Image :** LRVB, 9,8 h

NGC 2442 est une galaxie spirale intermédiaire située dans la constellation du Poisson Volant communément appelée la galaxie du **crochet** mais aussi parfois décrite comme **le Cobra** et **la souris**. Elle a été découverte par l'astronome britannique John Herschel en 1834. Herschel a enregistré deux fois cette galaxie la même nuit, ce qui explique l'autre inscription (NGC 2443) dans le catalogue de John Dreyer. Herschel a peut-être observé les parties sud et nord du NGC 2442 et a conclu qu'il s'agissait de deux galaxies.

Selon le site "Un Atlas de l'Univers" de Richard Powel, NGC 2442 est le membre principal d'un petit groupe de galaxies qui porte son nom. Le groupe de NGC 2442 comprend les galaxies NGC 2397 et NGC 2434 et NGC 24427. Ce groupe est également mentionné dans un article de A.M. Garcia a publié en 1993, mais ce dernier y a ajouté la galaxie PGC 20690. La classe de luminosité du NGC 2442 est II-III et il a une large ligne H $\alpha$ . La galaxie de la souris est une "petite" PGC 21457.



*NGC2442 par Hubble*

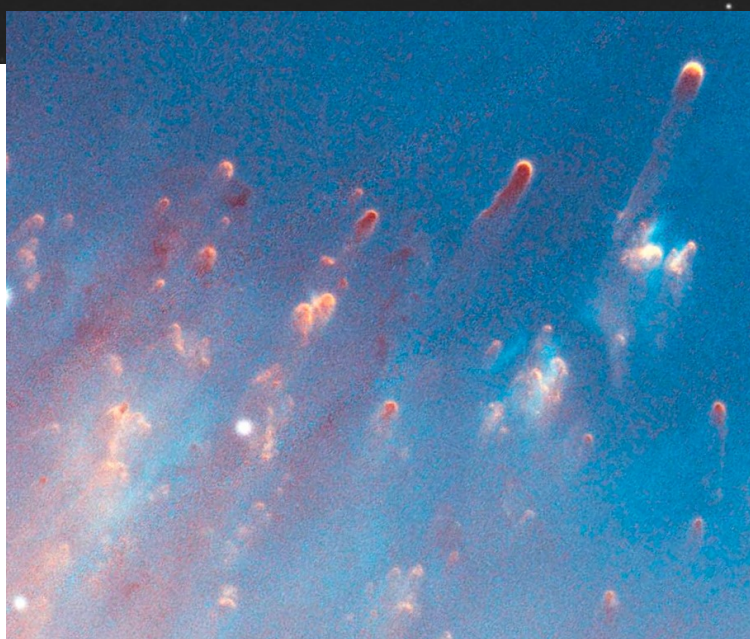


## NGC7293

*Julien  
Sadr Espagne*

**Constellation :** Verseau  
**Instrument :** Lunette 120

C'est une magnifique nébuleuse planétaire située à 650 al dans la constellation Verseau. Les parties externes de l'étoile centrale s'étendent à la vitesse de 31 km/s dans l'espace. L'âge de la nébuleuse est évalué à 11 000 ans. La nébuleuse a maintenant un diamètre de 2,5 al. L'étoile centrale est devenue une naine blanche. Elle rayonne encore suffisamment pour exciter la nébuleuse. Les vents stellaires créent des nodules de forme cométaire, chacun ayant la taille de notre système solaire.



*Détails de nodules cométaires par Hubble*



**M77 et NGC 1055,**  
*Julien, Jean-Paul*  
*Sadr Espagne*

**Constellation :** la Baleine

**Instrument :** lunette 120

**Image :** LRVB, 8 h

**M77** (ou NGC 1068) est une galaxie spirale située dans la constellation de la Baleine à environ 34,5 millions d'années-lumière de la Voie lactée. Elle a été découverte par l'astronome français Pierre Méchain en 1780.



*NGC 1055, ESO*

**NGC 1055** est une galaxie spirale barrée vue par la tranche et située dans la constellation de la Baleine à environ 45 millions d'années-lumière de la Voie lactée. Elle a été découverte par l'astronome germano-britannique William Herschel en 1783. Son bulbe proéminent est traversé par une large et sombre bande de poussière.



# Galerie

29.01.2020 n°2757

La Soleil

Jean-Paul

Tache n°2957



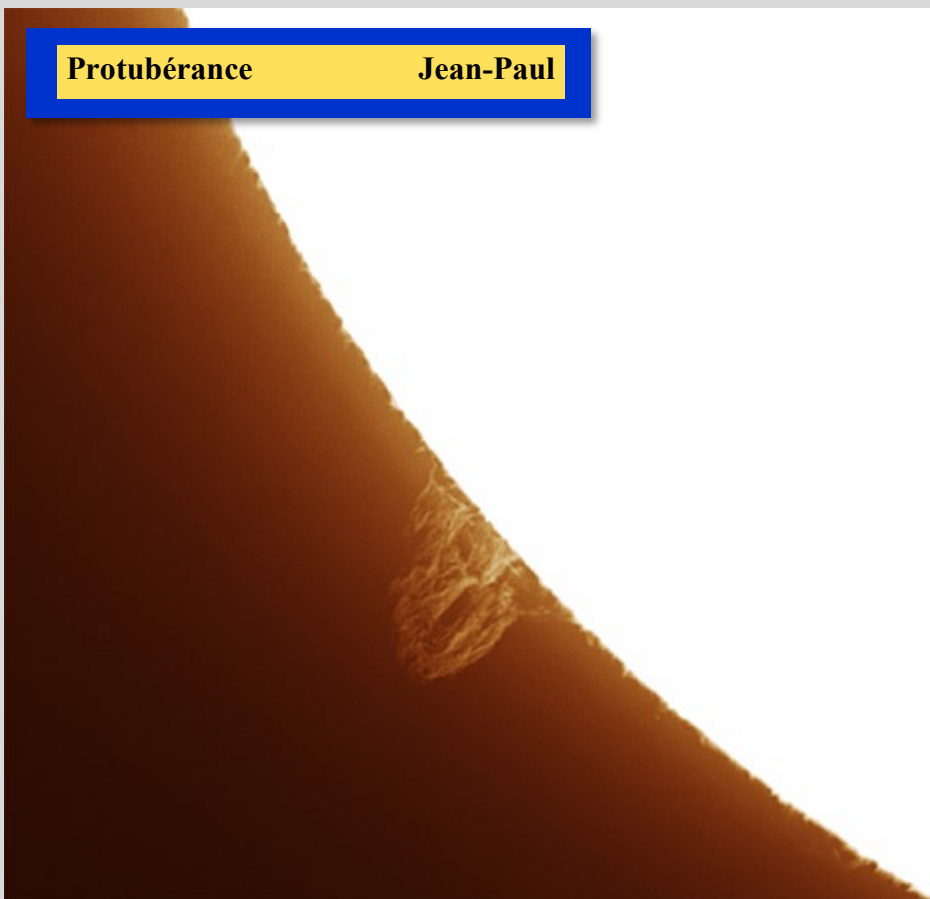
Jean-Paul\_2020@Desgrees.com

Protubérance

Jean-Paul

Jean-Paul\_2020@Desgrees.com

07.02.2020 11h00



IC 434,

Jean-Louis



**Albireo78**  
saison 2019-2020



1st - LOCAL WINNER



ASTROPHOTOGRAPHY AWARDS  
(Le prix du public, France)

albireo78.com

2 réunions par mois

**Des présentations**

Des actus astro  
Des exposés

**Des ateliers astro**

Niveau 1 pour utiliser et maîtriser son instrument  
Niveau 2 pour se lancer en astrophotographie  
Niveau 3 pour faire de la « science »  
Niveau Astrophysique

**Débutants ou plus confirmés pour 35€ / an**



**75 membres**

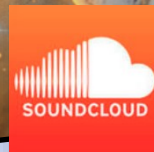


**Observations**

Gratuites et pour tous à Poigny-la-Forêt

**Newsletter**

169 abonnés



**« En route vers les étoiles »**

Notre émission radio  
15 saisons, 156 émissions,  
488 chroniques scientifiques

**Soundcloud**

234abonnés



**SADR**

Notre observatoire en remote  
www.sadr.fr

**DSO**

Deep Sky Objects  
Browser

6th Place



ASTROPHOTOGRAPHY AWARDS  
(Audience Awards, All Europe)

albireo78.com



**L'Albireoscope**

48 abonnés

www.albireo78.com