

Revue de l'Association Astronomique de Franche-Comté



# LE POINT ASTRO

N° 72 \* Juin 2018



ISSN 1168-1195

LE NUMERO : 8,00 €



LE POINT ASTRO – JUIN 2018 – N°72

**Rubriques**

Editorial	2
Illustration de couverture	2
Nouvelles diverses, jeux, citations	2

**Articles**

<b>Les Etoiles à Neutron</b>	<b>6</b>
<i>Par Raphael Melior</i>	
<b>Le pavillon des sept étoiles en Belgique</b>	<b>14</b>
<i>Par François Blateyron</i>	
<b>La Genèse des « lois de Kepler »</b>	<b>17</b>
<i>Par François Puel</i>	
<b>La photographie de « filé d'étoiles circumpolaire »</b>	<b>23</b>
<i>Par François Blateyron</i>	
<b>Le champ magnétique terrestre</b>	<b>25</b>
<i>Par Fred. Deschamps</i>	
<b>Gaia, la mission spatiale qui dévoile la Voie Lactée en trois dimensions</b>	<b>35</b>
<i>Par Céline Reylé</i>	

SOMMAIRE

---

Illustration de Couverture  
**Le pavillon qui recèle les secrets du ciel**  
(origine Internet)  
(Voir note en page 2 & article p.14)

Direction de la Publication : Alain Heurtel ; Secrétariat & Rédaction : Alain Heurtel  
Réalisation technique : Alain Heurtel ; Annick Hugel  
Association Astronomique de Franche-Comté – 34 Avenue de l'Observatoire – 25000 Besançon  
Maquette de couverture : Irène CHARTIER



# EDITORIAL



Année peu favorable pour les éclipses ; je vous recommande toutefois l'éclipse totale de Lune le 27 juillet prochain qui aura lieu au moment même du lever de la Lune et du coucher du Soleil : une bonne occasion de voir la forme de la Terre « de profil » et la montrer aux partisans d'une Terre plate. On remarquera quand même aussi la position géographique des deux éclipses partielles de Soleil qui encadre celle de Lune : Antarctique le 13 juillet et Arctique le 11 août : on comprend bien les mouvements de la Lune, « trop basse en juillet, l'ombre frôle le Pôle Sud, trop haute en août, elle frôle

le Pôle Nord

Autre événement susceptible d'être intéressant pour la fin d'année : la comète 46P/Wirtanen, celle-là même que Rosetta aurait dû visiter, devrait atteindre la magnitude 3,4 début décembre.

Et en attendant, bonnes vacances et bonne lecture...

A.H.

## ILLUSTRATION DE COUVERTURE

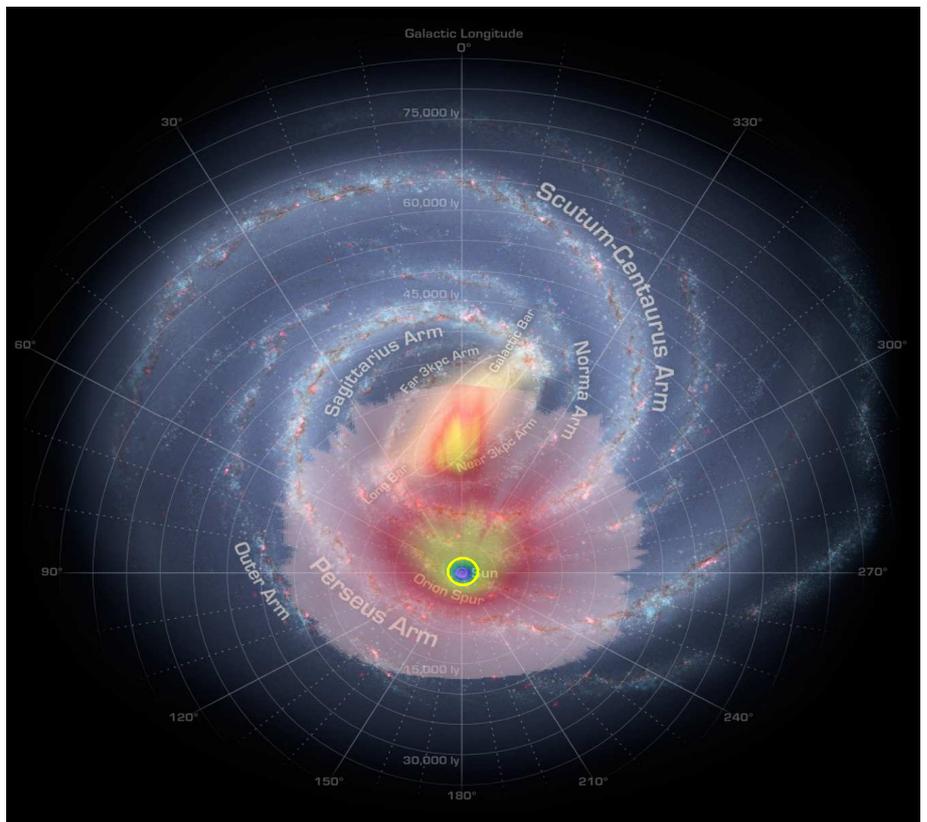
Le Pavillon des sept étoiles, vue d'ensemble depuis le chemin d'accès : voyez l'article de F.Blateyron en page 14

## NOUVELLES DIVERSES :

### Gaia surveille la Galaxie

Vue d'artiste de la Voie Lactée (NASA, JPL/Caltech) sur laquelle est superposée la zone observée par Hipparcos (rond jaune) et la zone sondée par Gaia (en fausses couleurs, d'après une simulation faite à partir du modèle de la Galaxie de Besançon)

(Cf article de Céline Reylé p.35)



## DeepSkyStacker passe au 64 bits avec la version 4.1

Le logiciel DeepSkyStacker vient récemment d'être porté en 64 bits et en Open Source. Il est désormais en version 4.1. La bonne nouvelle est apparue sur les forums en mars dernier et a été propagée par les amateurs qui attendaient une nouvelle version depuis 2014 ! Au programme, pas encore de nouvelles fonctions, mais un transfert en Open Source avec une nouvelle équipe de développeurs, ce qui promet des nouveautés pour bientôt. Le développeur historique, un français, Luc Coiffier, reste à la supervision mais il n'est plus le seul développeur.

DeepSkyStacker 3.3.4 avait fait l'objet d'un article complet dans le Point Astro en 2017, et a été utilisé lors du stage Astrophoto en mars, avec démonstration d'empilement de photos et séries de « darks » et « d'offsets ».

La nouvelle version de DeepSkyStacker est beaucoup plus rapide, gère plus de mémoire, notamment pour les options « drizzle », et charge les formats RAW des tous derniers modèles d'appareils photo.

Ce logiciel est gratuit et relativement facile à utiliser. La version 4.1 peut être téléchargée sur <http://deepskystacker.free.fr/french/index.html>

A noter qu'un autre logiciel d'empilement, SIRIL, lui aussi développé en Open Source par des français, est régulièrement mis à jour avec de nouvelles fonctions. SIRIL est prévu au programme de la troisième séance du stage AstroPhoto. Un article complet suivra dans le prochain numéro du Point Astro.

*François Blateyron*



## Jeux astronomiques

### Réponses au jeu du n° 71 : Encore des charades

#### Etoiles & Constellations

- |   |  |
|---|--|
| Mon premier est l'arme qui assassine mon troisième            | Arc, parce que Arc tue Russe                                   |
| Mon second est ce que fait mon premier à mon troisième        | Tu, parce que Arc tue Russe                                    |
| Mon troisième est un slave victime de mon premier             | Rus, parce que Arc tue Russe                                   |
| Mon tout est le gardien d'un gros animal nordique             | Arcturus, le gardien de l'Ourse                                |
| Mon premier établit un revenu régulier                        | Ca parce que Ca fait Ine & Ine est rente (caféine & inhérente) |
| Mon second réfuta une accusation                              | Pri parce que Pri vaut té & Té nia                             |
| Mon troisième me fatigue                                      | Corne parce que Corne m'use                                    |
| Mon tout est une chèvre qui se termine en queue de poisson... | Capricorne   |
| Mon premier peut réparer un squelette                         | Sa parce que sa sert d'os                                      |
| Mon second prépare du cuir                                    | Gi parce que gi tanne  |
| Mon troisième peut coucher plusieurs personnes                | Terre parce que terre a des lits (Terre Adélie)                |
| Mon tout est un Centaure qui attaque un dangereux Scorpion    | Sagittaire   |

## Jeux du n° 72 : 1 - Charades

De pire en pire...

Mon premier encourage le torero

Mon second a des parasites :

Mon troisième craint l'humidité

Mon quatrième réalise un tableau

Mon tout forme une lettre près de Céphée

Mon premier rit de lui-même

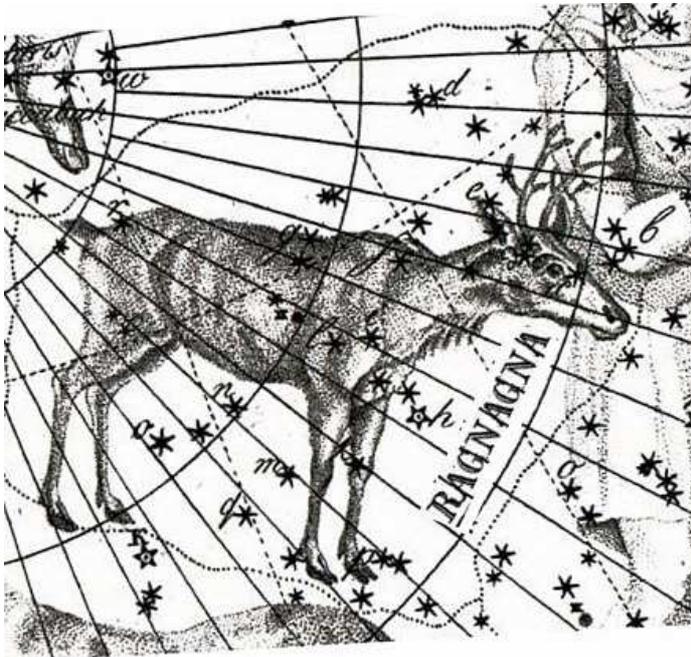
Mon second marcha de ci de là

Mon troisième est un rongeur humoristique

Mon quatrième marque mon âge

Mon tout est épouse de son voisin et mère de sa voisine

## Jeux du n° 72 : 2 – Constellation mystère



Saurez-vous reconnaître cette constellation créée en 1736 par l'astronome français Pierre Charles Le Monnier et dont le nom a été subtilement modifié... ?

## Réponse au Second Jeu du n° 71 : jeu des 7 erreurs

Dans l'image ci-dessus trouvez les 7 erreurs. :

- 1/ il n'y a que 6 erreurs à trouver
- 2/ L'image est à l'envers, Françoise S. était à gauche du bâtiment
- 3/ le Doubs n'a jamais atteint le parc de l'observatoire
- 4/ la Lune n'apparaît jamais au nord.
- 5/ Elle n'est jamais aussi grosse
- 6/ elle n'est jamais en « barque » sous nos latitudes
- 7/ la partie éclairée tourne le dos au Soleil

(Composition F.Blateyron sur une idée & maquette de A.Heurtel)



## Citations :

Lune solitaire  
Abandonnée à la nuit  
Qui donc vous regarde  
Sôseki (1867-1916)

Seul regardant  
La lune qui s'enfonce  
Derrière les montagnes  
Santoka (1882-1940)

Saurez-vous retrouver le titre et l'auteur ? :

Question du n°71

Autour de nous, les étoiles continuaient leur marche silencieuse, dociles comme un grand troupeau ; et par moments je me figurais qu'une de ces étoiles, la plus fine, la plus brillante, ayant perdu sa route, était venue se poser sur mon épaule pour dormir...

☞ Alphonse Daudet, *Lettres de mon moulin*, Les étoiles

Question du n°72 : Saurez-vous retrouver le titre et l'auteur ?

La lune était sereine et jouait sur les flots. -  
La fenêtre enfin libre est ouverte à la brise,  
La sultane regarde, et la mer qui se brise,  
Là-bas, d'un flot d'argent brode les noirs îlots.

## DIJGBATS :

Il y avait longtemps ! Petite rappel : il s'agit de lire un texte caché dans le dessin...

**P  
LEIA  
DESPL  
IADESPL  
ADESPL  
IADES**

**TUROORUT**



# LES ETOILES A NEUTRONS

Par Raphaël Melior

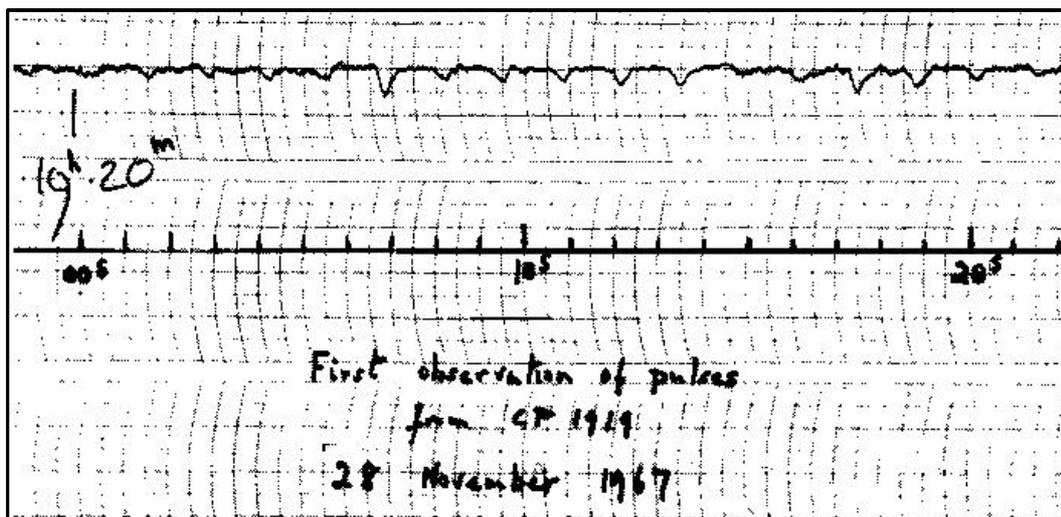
## DECOUVERTE DES PULSARS

La première théorie prévoyant la présence d'astres compacts constitués principalement de neutrons et formés suite à une supernova a été proposée en 1934 par Walter Baade et Fritz Zwicky. Ces astres ne restaient que théoriques pendant de nombreuses années. La radioastronomie était alors à ces tous débuts.

En 1965 un objet émettant une quantité importante d'ondes radios est détecté dans la nébuleuse du Crabe. Ce sera le premier pulsar à être détecté mais la nature de l'objet ne sera expliquée qu'en 1968. Il faut aussi préciser que seul la position et la puissance moyenne d'émission est étudiée. Les pulsations qui caractérisent ce type d'astre ne sont pas détecté car le temps d'intégration est trop important et gomme les variations rapides.

Des 1962 une source de rayons X est découverte par une fusée d'observation. Au début on ne sait pas trop ce que c'est, juste que cela ne vient ni de la Terre ni de la Lune. La source est située près du centre galactique mais ce n'est pas le centre lui-même. On nomme la source « Scorpius X-1 ». En 1967 Iosif Shklovsky fait le rapprochement avec les étoiles à neutrons théorisés avant.

Fin 1967, Jocelyn Bell Burnell et Antony Hewish, radioastronomes, découvrent un objet curieux. Il s'agit d'un objet qui émet des ondes radio mais pas de manière continue. La périodicité de son signal est de 1,3373s et chaque pulsation dure 0,04s. Étant donné la constance parfaite de la période l'idée que le signal serait dû à une intelligence extraterrestre a été envisagée. L'objet a temporairement été nommé LGM-1 pour « Little Green Man 1 ». Assez vite toutefois la vraie nature de l'objet fut découvert : il s'agit d'une étoile à neutrons, le même type d'objet que dans la nébuleuse du Crabe et que Scorpius X-1.



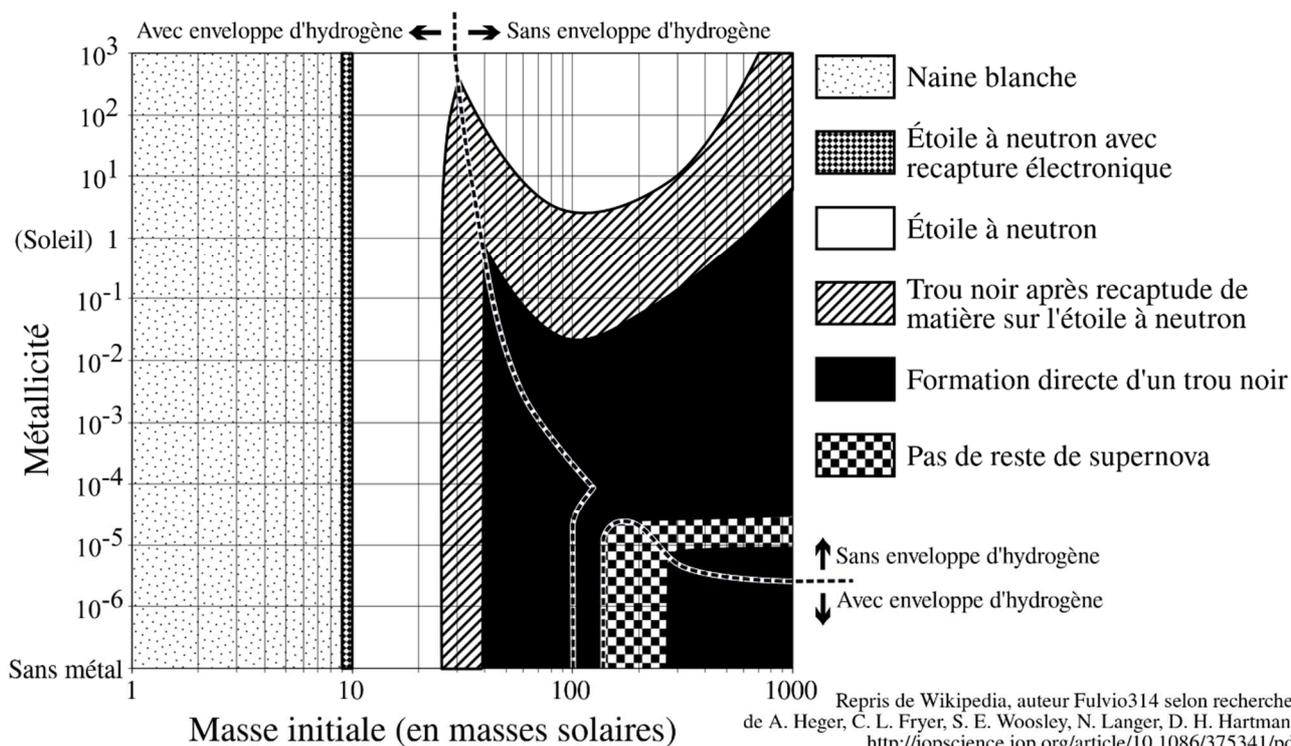
Un pulsar est donc une étoile à neutrons dont la rotation fait qu'elle émet des ondes radios selon une période rapide et très stable.

# FORMATION DES ÉTOILES À NEUTRONS

La formation des étoiles à neutrons se produit dans les supernovas. Les étoiles classiques passent leur existence à transmuter des atomes légers en atomes plus massifs par fusion nucléaire. La pression fournie par la réaction permet à l'étoile de ne pas s'effondrer sur elle-même.

Dans le cas d'une étoile de plus de 8 masses solaires l'élément le plus lourd qu'elle peut synthétiser de cette manière est le fer. Le fer est un élément très stable, au-delà la réaction consomme de l'énergie au lieu d'en produire. Le fer s'accumule et au-delà d'une limite de masse appelée limite de Chandrasekhar (1,4 masses solaires) le noyau de l'étoile s'effondre et forme une étoile à neutron. La matière environnante s'effondre alors sur le noyau devenu minuscule et sous l'effet de la pression provoque l'explosion des couches externes de l'étoile.

Selon la masse et la métallicité (taux d'éléments plus lourd que l'hélium) de l'étoile, la supernova peut soit se transformer en étoile à neutrons soit en trou noir.



La rotation très rapide de cette étoile vient du fait que le moment angulaire de l'étoile d'origine est conservé. L'étoile immense (millions de km) se retrouvant dans un très petit volume (quelques km) la vitesse de rotation devient très élevée. Un pulsar classique est en général une période de rotation entre 0,1 et 5 secondes.

# CARACTERISTIQUES COMMUNES

## TAILLE, MASSE, DENSITE ET TEMPERATURE

Une étoile à neutrons est un astre très compact : leur masse peut aller de 1,1 à potentiellement jusqu'à 3 masses solaires. Toutefois la plupart des étoiles à neutrons ont une masse légèrement supérieure à la limite de Chandrasekhar soit 1,4 masses solaires. Le plus massif, est PSR J0348+0432 à une masse de 2,01 masses solaires.

Les étoiles à neutrons sont très petites. Il est difficile d'en calculer le rayon mais il est en général estimé à une dizaine de kilomètres. Leur densité est donc extrêmement élevée : de l'ordre de  $4 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ . Un cube d'étoile à neutrons de seulement un millimètre de côté à une masse équivalente à 38 tours Eiffel.

## COMPOSITION

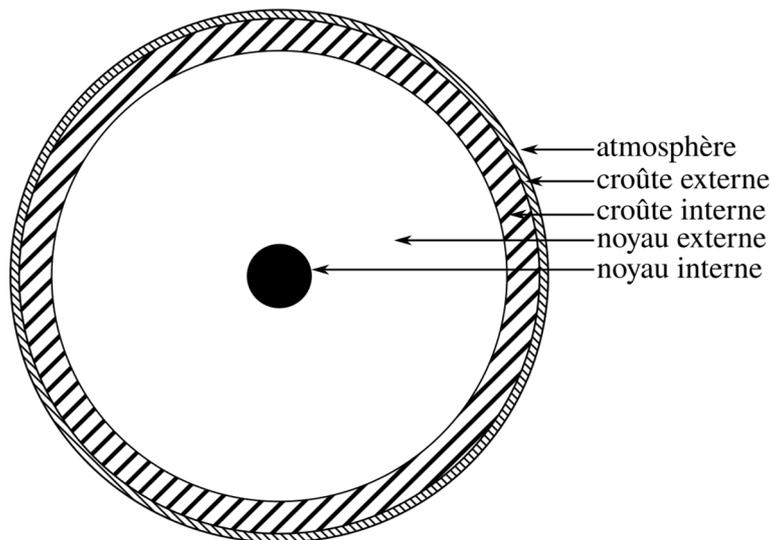
La pression due à la masse de l'étoile est extrêmement élevée. Au centre de l'étoile, dans le noyau interne, la densité dépasse les  $3 \times 10^{15} \text{ g/cm}^3$ . À une telle densité l'état de la matière est inconnu. Il s'agit vraisemblablement d'un agglomérat de quarks c'est à dire les constituants des protons et neutrons. Leur organisation est toutefois inconnue, restent t'ils à l'état de quarks « up » et « down » où s'assemblent t'ils pour former d'autres types de nucléons ?

Le noyau externe est mieux expliqué. Il s'agirait d'une accumulation de neutrons ainsi qu'une bien plus faible quantité de protons et électrons voire d'autres particules élémentaires. Les protons sont très rares car ils fusionnent avec les électrons pour former des neutrons. La densité est de  $1,7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ . Cette région est la plus importante avec une épaisseur de l'ordre de 75 % du rayon de l'étoile.

Dans la croûte interne la densité est de  $4,3 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$ , bien plus faible que les couches inférieures. Cela autorise la présence de noyaux atomiques. Ce sont toutefois des noyaux particulièrement riches en neutrons car les protons restent rares. En plus de ces noyaux se trouvent des neutrons libres (non attachés à un noyau) ainsi que des électrons.

La croûte externe est constituée de la même matière que les naines blanches : des noyaux atomiques voire d'atomes très fortement ionisés. Ils ont généralement un nombre de neutrons particulièrement élevés par rapport à la normale. Ces atomes seraient radioactifs dans une situation normale mais sont ici gardés stables par la pression.

L'étoile à neutrons dispose d'une « atmosphère » ou « océan » extrêmement fin. Cette atmosphère se comporterait comme un liquide. La surface de l'étoile est très lisse, ses plus grandes irrégularités ne peuvent dépasser les quelques millimètres sur toute sa surface à cause de la gravitation qui tend à faire s'affaisser la moindre aspérité.



Épaisseur des différentes couches à l'échelle.  
L'atmosphère n'est pas représentée car trop fine.

## UN ATOME GEANT ?

Avec une telle densité on est tenté de voir l'étoile à neutrons ou tout du moins ses couches internes comme un énorme noyau atomique. Toutefois il existe une différence importante : les noyaux des atomes sont maintenus en l'état par la force nucléaire forte. Cette force n'a qu'une très faible portée, de l'ordre de  $10^{-15}$  m. C'est tout à fait en accord avec la taille d'un noyau atomique normal mais ne correspond absolument pas à la taille d'une étoile à neutrons qui est, elle, maintenue par la force gravitationnelle.

## CHAMP MAGNETIQUE

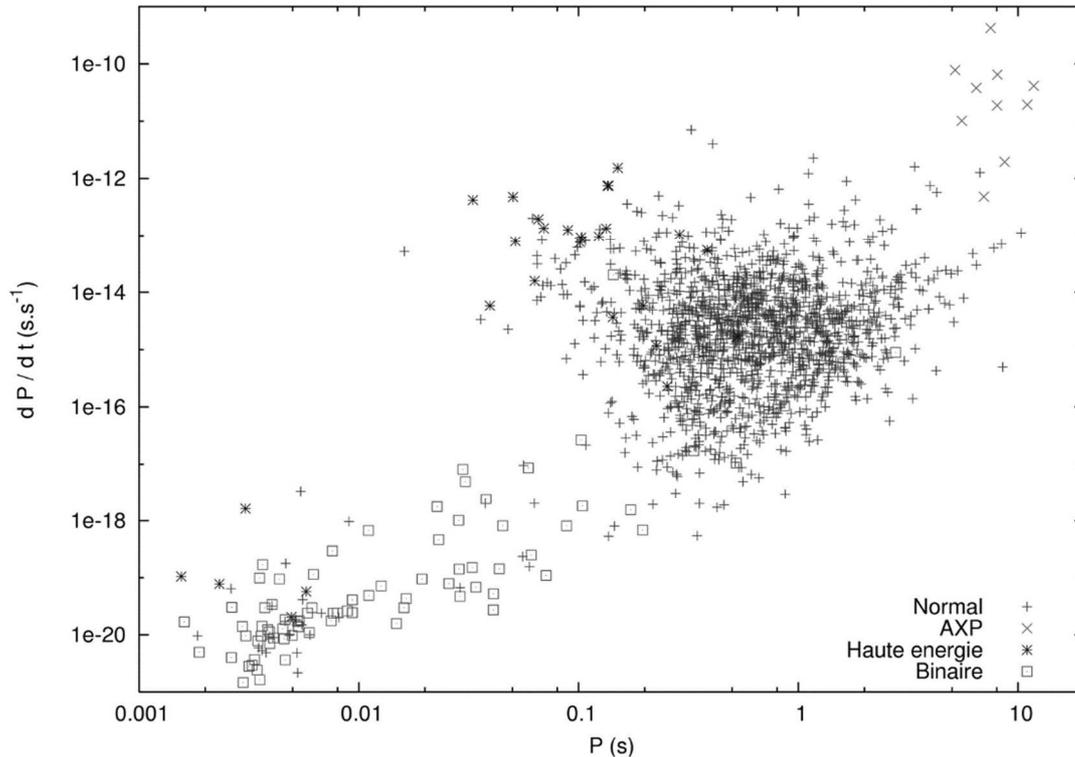
Les étoiles à neutrons se caractérisent par un champ magnétique particulièrement intense. À la surface de l'étoile ce champ est compris entre  $10^4$  et  $10^{11}$  tesla (soit de  $10^8$  à  $10^{15}$  gauss). Ces intensités sont donc comprises entre 100 millions et un million de milliard de fois l'intensité du champ magnétique terrestre !

Lorsque l'intensité est supérieure à  $10^8$  T l'étoile à neutrons est de type magnetar.

L'origine de ce champ magnétique est encore mal comprise. D'après certaines théories ce serait le flux magnétique de l'étoile d'origine qui serait transmis à l'étoile à neutrons lors de sa formation et serait donc bien plus concentré en raison de sa taille bien plus faible. Ceci n'expliquerait toutefois qu'une toute petite partie de l'intensité de l'étoile.

## ROTATION

Les étoiles à neutrons sont en rotation rapide en raison de la conservation du moment angulaire comme précisé dans la partie sur leur formation. Cela donne une période de rotation entre 0,1 et 5 secondes avec la plupart entre 0,3 et 2s.



Représentation de la période de rotation d'étoiles à neutrons (axe horizontal) et leur ralentissement (axe vertical) selon leurs différents types.

Toute fois ces périodes peuvent varier pour différentes raisons :

- Un ralentissement progressif : la présence d'un champ magnétique finit par freiner la rotation de l'étoile. Ce ralentissement est très lent et constant. Il finit par freiner l'étoile suffisamment pour qu'elle arrête d'émettre des ondes radio.
- Il a été déjà détecté des ralentissements assez brutaux dans des magnétars (étoiles à neutrons avec un fort champ magnétique). Le phénomène n'est pas encore expliqué. Cela s'accompagne d'une augmentation de l'émission de rayons X.
- La vitesse d'une étoile à neutrons peut augmenter sous l'effet d'une interaction avec un autre astre qui, s'il fournit de la matière à l'étoile à neutrons lui donne une forme d'ellipsoïde aplati et augmente, parfois très fortement, la vitesse de rotation. Une étoile à neutrons accélérée de la sorte peut avoir une période de rotation entre 0,1 et 0,001s seulement. La plus rapide, XTE J1739-285, fait 1122 rotations par seconde (période de 0,00089s).
- La présence de « tremblement d'étoile » peut également faire accélérer une étoile. Cela touche notamment les étoiles ayant une forme d'ellipsoïde aplati qui deviennent à cette occasion plus sphérique. Le diamètre à l'équateur diminuant légèrement et en raison de la conservation du moment angulaire cela l'accélère légèrement.

# TYPES D'ÉTOILES A NEUTRONS

## LES ÉTOILES A NEUTRONS ISOLEES

### Les pulsars radio

Les pulsars radio sont les types d'étoiles à neutrons les plus détectés. Elles émettent des pulsations régulières d'ondes radio, leur période de rotation est supérieure à 0,1s.

Certaines ont des irrégularités dans la puissance d'émission des ondes radio ou n'émettent que de manière sporadique. Cela pourrait être dû à de petits astres (astéroïdes, planètes) en orbite autour du pulsar bloquent le faisceau d'ondes. Cela peut aussi être de vieilles étoiles à neutrons dont le ralentissement atteint le point où les émissions radio commencent à s'arrêter.

### Les Magnetars

Les Magnetars sont, comme leur nom l'indique, des étoiles à neutrons avec un très fort champ magnétique : de  $10^8$  à  $10^{11}$  tesla. Pour comparaison le champ magnétique terrestre est de  $50 \times 10^{-6}$  T. À moins de 1000 km de ce genre d'étoile le champ magnétique est si fort qu'il distord les nuages électroniques des atomes modifiant leurs propriétés chimiques. Leur période de rotation est en général longue : de 5 à 12 secondes.

Certains magnétars ont pour caractéristique d'émettre de façon irrégulière une très grande quantité de rayons gamma mous. Ces étoiles sont nommées « Sursauteur gamma mou » ou « Soft gamma repeater ».

### Les étoiles à neutrons sans émission radio

Les étoiles à neutrons n'émettent des ondes radio que dans certaines directions. Si on n'est pas dans le faisceau on ne remarque rien. Elles sont détectées pour leur émission dans les rayons X ou gamma. Cela pourrait aussi être des étoiles dites « à quarks ».

L'origine de ce rayonnement X est due à la température extrême de l'étoile. En effet la température de ces astres peut atteindre plusieurs dizaines de millions de degrés : ils brillent notamment dans les rayons X mous.

### Les pulsars X anormaux

Il existe des pulsars X dits « anormaux » possédant une vitesse de rotation nettement plus lente que les autres (de 5 à 12 secondes) et qui émettent une quantité de rayons X nettement

supérieure à ce qui peut être actuellement expliqué. Ces pulsars X anormaux sont rares : on en compte environ une dizaine.

## Les étoiles à neutrons à accréation

Même si les étoiles à neutrons émettent habituellement des rayons X les cas d'émissions les plus importants se produisent dans le cas d'étoiles binaires avec une étoile à neutrons et une étoile classique. En effet beaucoup d'étoiles sont dans un système multiple. Lorsque la première évolue en étoile à neutrons elle interagit avec la ou les autres.

L'effondrement de gaz de l'étoile classique vers l'étoile à neutrons entraîne la formation d'un disque d'accréation en rotation pouvant atteindre des vitesses proches de celles de la lumière. La matière ainsi accélérée se met à émettre des rayons X.

Ce phénomène d'accréation accélère la rotation de l'étoile à neutrons qui est alors susceptible de devenir un pulsar milliseconde.

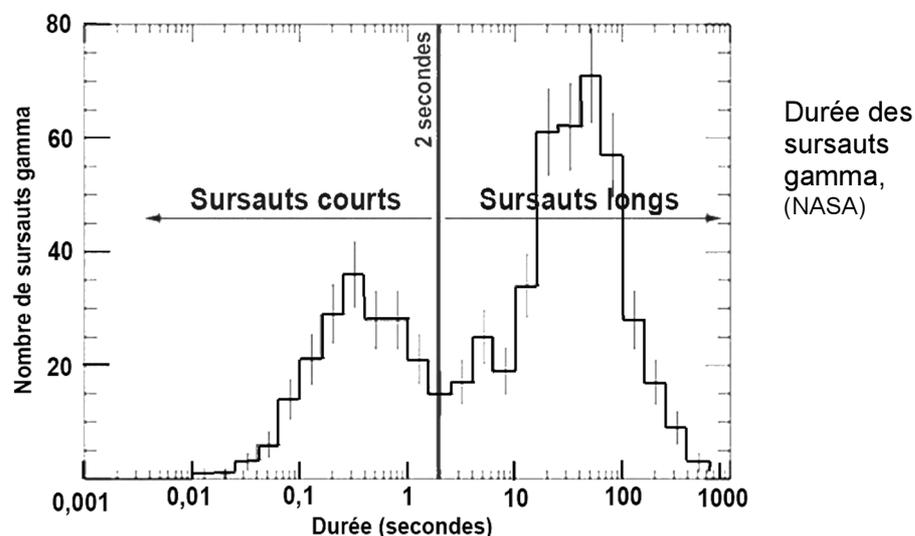
Parmi les étoiles à neutrons en système multiple on trouve aussi les sursauteurs X qui émettent de puissants pics de rayonnement X. Ils apparaissent en quelques secondes puis reviennent à la normale progressivement. Parfois plusieurs éruptions d'affilée ont lieu.

## Doubles étoiles à neutrons

Naturellement il existe aussi des systèmes composés de deux étoiles à neutrons.

Lorsque deux étoiles à neutrons entrent en collision ils fusionnent pour donner une étoile à neutrons plus massive ou à un trou noir. Ce faisant ils émettent une quantité phénoménale d'énergie sous forme de rayonnement de haute énergie notamment des rayons gamma d'où le nom du phénomène : sursaut gamma.

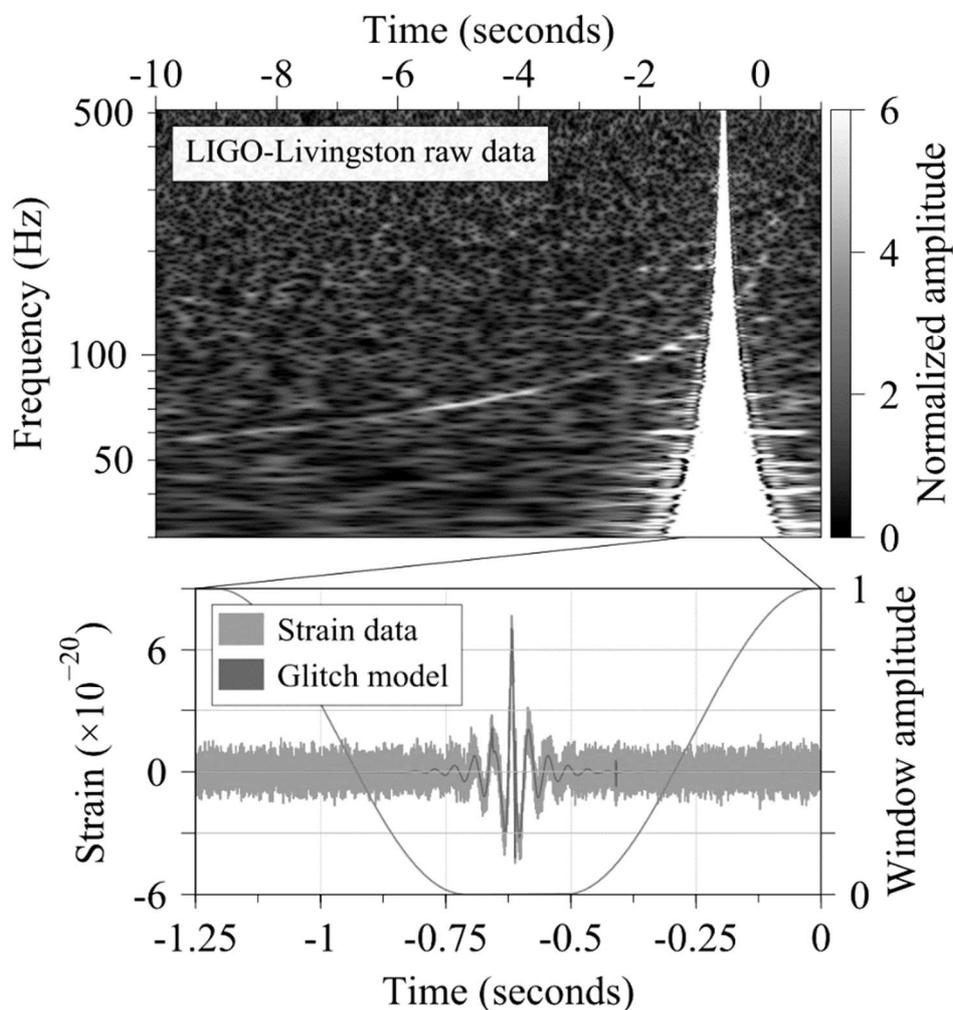
Le phénomène est très bref : moins de 2 secondes si l'objet résultant est un trou noir. Lorsque l'astre résultant est étoile à neutrons le phénomène dure généralement dans les 10s à 2 minutes. Le phénomène est rare mais vu les énergies en jeu on les détecte facilement même si il se trouve très loin. En moyenne un d'entre eux est détecté chaque jour.



C'est ce phénomène, observé régulièrement en rayonnement Gamma qui a pour la première fois été observé via les ondes gravitationnelles le 17 août 2017 par les instruments LIGO et Virgo. GW170817, dont le signal a duré en tout 100s est la fusion de deux astres de masse totale d'environ 2,8 masses solaires. L'astre formé par la collision fait 2,74 masses solaires, le reste étant transformé en énergie via l'équivalence entre la masse et l'énergie ( $E=mc^2$ ) notamment en ondes gravitationnelles.

Ce n'est pas la première observation d'ondes gravitationnelles mais cet événement a été le premier à être observé la fois en ondes gravitationnelles et en ondes électromagnétiques qui plus est dans tout le spectre : du gamma au ondes radios en passant par la lumière visible.

GW170817 a eu lieu dans la galaxie NGC 4993, à 130 millions d'années-lumière de nous. L'astre formé étant à la limite entre la masse d'une étoile à neutrons et un trou noir sa nature précise n'est pas connue.



GW170817 (ondes gravitationnelles) observés par LIGO. Ici, le passage de quelques secondes où le signal est maximal. Remarquez, avant le pic dû à la fusion, le signal qui monte en fréquence : c'est les deux étoiles à neutrons en rotation de plus en plus rapide en raison de leur rapprochement progressif.



# LE PAVILLON DES SEPT ÉTOILES

D'ENGHIEN, BELGIQUE

*François Blateyron*

« Le pavillon et le bois des Sept Étoiles sont une réalisation exemplaire de l'esprit baroque et humaniste. Face à notre science analytique, cette œuvre témoigne d'une synthèse bouleversante des disciplines multiples : astronomie, géométrie, théologie, mythologie, architecture, botanique, hydraulique... »

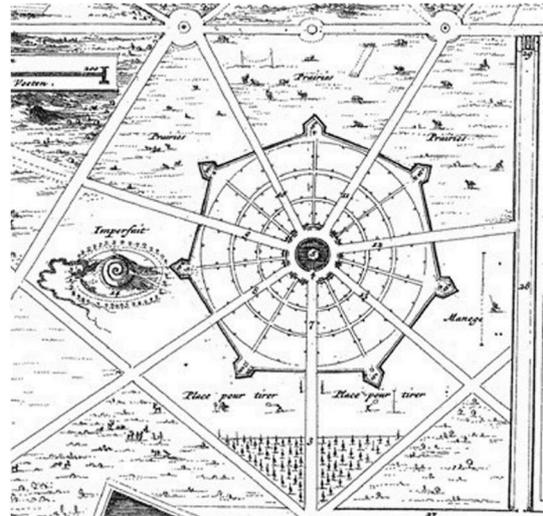
La commune d'Enghien est située au sud-ouest de Bruxelles dans la province du Hainaut, à la limite de la Wallonie et de la Flandre. Fondée au 11<sup>e</sup> siècle, elle fut la baronnie des seigneurs d'Enghien au 13<sup>e</sup> siècle, puis résidence de la maison du Luxembourg. La famille d'Arenberg acheta la seigneurie d'Enghien à Henri IV et y fonda un parc ambitieux à partir de 1630. Il fallut près de 35 ans pour terminer le parc avec son dessin sophistiqué, ses plantations complexes, son jardin géométrique, ses plans d'eau et ses fontaines, et surtout un pavillon heptagonal installé au sommet d'une butte, au centre d'un réseau d'allées, qui cache de nombreux secrets en lien avec l'astronomie. Bien que longtemps appelé le temple d'Hercule, le pavillon des sept étoiles est en réalité un hommage au temple de Vénus sur l'île de Cythère décrit dans le *Songe de Polyphile*.

Il faut comprendre qu'à cette époque l'Église imposait son autorité sur l'Europe avec l'Inquisition en contrôlant tout ce qui s'écrivait et ce qui se disait, y compris et surtout dans les sciences, pour ne pas voir le Dogme contesté. Quelques décennies avant la création du parc, Copernic avait écrit son traité sur l'héliocentrisme en 1513, le diffusant au compte-goutte et sous le manteau en Europe, avant de le voir publié en 1543. Giordano Bruno fit beaucoup pour populariser ce traité en y ajoutant des provocations de son cru contre l'église, ce qui lui valut d'être emprisonné en 1592 avant d'être condamné au bûcher en 1600. Galilée commença de son côté à observer le ciel avec sa lunette vers 1609 mais dû se renier devant le tribunal ecclésiastique en 1633. Ce contexte de terreur poussa Charles de Bruxelles, comte d'Arenberg et concepteur en 1650 du pavillon des sept étoiles à cacher subtilement des éléments astronomiques dans son architecture.

Ces secrets ont été en partie redécouverts récemment par deux architectes en charge de la restauration du parc et du pavillon, André Dupont et Jean-Louis Vanden Eynde. Ce dernier en a présenté une synthèse lors de la réunion de la Commission des cadrans solaires de la SAF à Strasbourg en mai 2017.

Le pavillon des sept étoiles fait référence aux sept astres errants visibles à l'œil nu depuis l'antiquité : les cinq planètes principales (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne), la Lune et le Soleil. L'heptagone du pavillon s'inscrit dans un cercle de quatre mètres de diamètre, au centre d'un bassin de vingt mètres de diamètre. Chaque côté du pavillon fait face à une grande allée

rayonnante bordée d'arbres. A l'opposé d'une face se trouve une colonne double à travers laquelle on voit une petite allée. Le tout forme un heptagone géant de 124 mètres de rayon, avec 7 grandes allées et 7 petites allées, reliées entre elles par des allées intermédiaires circulaires. À l'extrémité de chaque grande allée se trouvait à l'origine une statue de divinité associée à l'une des sept étoiles. Ces statues sont aujourd'hui disparues.



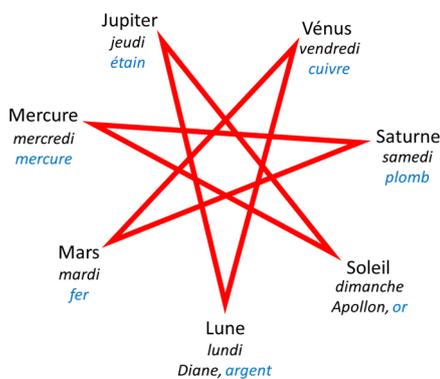
Tycho Brahé professait que les sept étoiles étaient dans le ciel ce que les sept métaux étaient dans la terre et que les sept organes étaient dans notre

corps.

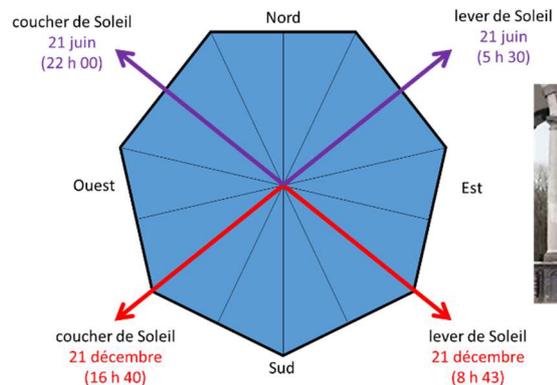
L'alchimie a longtemps côtoyé l'astrologie et l'astronomie.

Ces éléments étaient fréquemment représentés sous la forme d'une étoile à sept branches, étoile formée quand on relie un sommet sur trois dans un heptagone.

On retrouve les sept jours de la semaine associés aux sept divinités elles-mêmes associées à un astre.



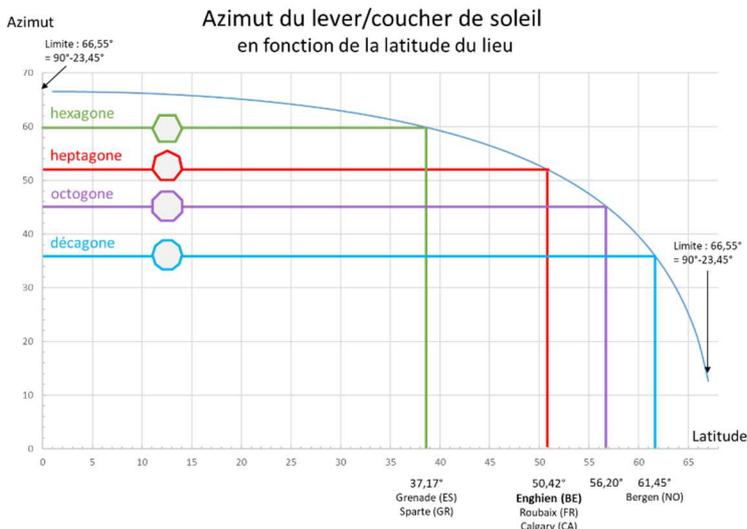
L'intérêt du chiffre sept ne s'arrête pas aux sept jours de la semaine. Quand on divise la circonférence de  $360^\circ$  par 7, on obtient des secteurs de  $51,43^\circ$ . À la latitude du pavillon,  $50^\circ 41' 15''$  Nord, il se trouve que le Soleil se lève lors du solstice d'hiver à un azimut de  $51,08^\circ$  Est et se couche à  $51,08^\circ$  Ouest. En se tenant au centre du pavillon le jour du solstice, on voit donc le Soleil se lever à travers les deux colonnes d'un angle du pavillon, au bout d'une petite allée.



Lors du solstice d'été, le Soleil se lève cette fois à  $128,54^\circ$  Est, ce qui correspond au centre d'une face, et donc le Soleil se lève au bout d'une grande allée bordée d'arbres.

Le pavillon est en quelque sorte un cadran solaire.

Cette caractéristique n'est possible qu'à cette latitude précise. On peut d'ailleurs s'amuser à calculer les azimuts de lever de Soleil pour des polygones variés et calculer les latitudes correspondantes pour voir



dans quelle ville il serait possible d'installer un pavillon similaire.

Un hexagone donne un azimut de 60° et une latitude de 37,17°, soit la latitude du sud de l'Espagne ou de la Grèce.

Un octogone donne un azimut de 45° et une latitude de 56,20°, c'est-à-dire le nord de l'Europe, où l'on ne trouve déjà plus beaucoup de villes notables.

Le décagone nous amène à plus de 61° où l'on ne trouve que la ville de Bergen en Norvège

Sur le coin Sud du pavillon, les deux pierres supportant les colonnes sont légèrement espacées, formant une rainure laissant passer un trait de lumière sur le sol lorsque le Soleil passe au méridien local. Lorsque le Soleil est au plus bas, lors du solstice d'hiver, ce trait de lumière atteint exactement le centre du pavillon à midi. On pourrait d'ailleurs imaginer graduer un calendrier sur le sol à la manière d'une méridienne au sol. Toujours est-il que cela démontre que les dimensions du pavillon ont été calculées en fonction de la hauteur du Soleil.

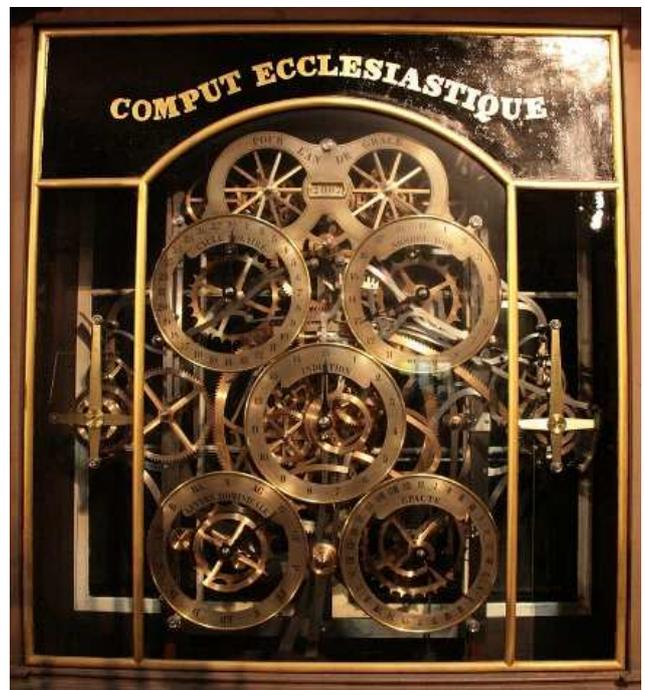
Le pavillon est installé au centre d'un bassin rempli d'eau, que l'on appelle un « rond d'eau », relié au reste par un pont. Le tour du bassin est formé de 28 pilastres et de 27 rampes à balustres auxquelles s'ajoutent les 6 rampes du pont. Chaque rampe comporte 16 balustres sauf les deux rampes les plus proches du pavillon qui en comportent 18. On compte donc au total  $27 \times 16 + 4 \times 16 + 2 \times 18 = 532$  balustres. Ce nombre correspond au « Comput ecclésiastique » qui sert à calculer la date de Pâques et qui est formé du comput solaire et du comput lunaire.

Le comput lunaire permet de retrouver la pleine Lune à la même date du calendrier. Il correspond à 19 ans. Pour le calculer, il faut trouver le plus grand multiple entier entre la révolution lunaire (de 29 jours 12 heures 44 minutes et 2,806 secondes) et la révolution terrestre (de 365 jours 5 heures 48 minutes et 45 secondes). On tombe sur 19 ans et exactement 235 lunaisons.

Le comput solaire permet de retrouver le même jour de la semaine à la même date. En raison des années bissextiles tous les 4 ans, il faut que le nombre d'années soit à la fois multiple de 7 (jours de la semaines) et de 4 (années dans un cycle bissextile), ce qui donne 28 ans.

En multipliant 19 par 28, on obtient 532 ans, soit le nombre de balustres autour du pavillon. On retrouve aussi les 28 pilastres comptant le comput solaire. Le comput ecclésiastique est une table donnant les dates de Pâques chaque année sur une durée de 532 ans, permettant de recommencer au début une fois arrivé à la fin. Cette propriété est connue depuis près de 3000 ans. C'est ce qu'on retrouve aussi sur les horloges astronomiques, comme celle de Strasbourg ou celle de Besançon.

Pour mémoire, la date de Pâques est donnée par le premier dimanche suivant la première pleine Lune de printemps. Cette date se situe au plus tôt 22 mars et au plus tard le 25 avril.



Le parc d'Enghien est aujourd'hui un superbe lieu de promenade et de visite. Un ambitieux programme de restauration doit lui redonner son prestige d'antan, notamment par des plantations d'arbres et d'arbustes respectant les prescriptions de Charles de Bruxelles. L'exploration des symboles astronomiques ne fait que commencer et nul doute que d'autres éléments seront découverts à l'avenir.

# La Genèse des « lois de Kepler »

Par François Puel

## 1<sup>RE</sup> PARTIE : RECHERCHE DE L'HARMONIE

Rappelons les trois « lois de Kepler » :

1e loi : Les planètes décrivent des orbites elliptiques dont le Soleil occupe un foyer.

2e loi ou loi des aires : Le rayon vecteur reliant le centre du Soleil à la planète balaye des aires proportionnelles au temps. (Ça va donc plus vite près du Soleil et plus lentement quand la planète en est loin.)

3e loi : Les carrés des périodes des révolutions sont proportionnels aux cubes des grands axes.

On présente souvent ces "lois" comme un des fondements de la théorie de la gravitation de Newton. Pourtant il n'est pas sûr que Newton les ait connues sous cette forme, et Kepler lui-même, les a-t-il jamais présentées toutes ensemble dans cet ordre ?

Dans cet article, on présentera les idées plus ou moins "fumeuses" (de notre point de vue) ou mystiques qui ont guidé Kepler. Dans un second, on étudiera ses méthodes considérées maintenant comme plus rationnelles et scientifiques. (En fait, ces deux attitudes sont intimement mêlées)

### Qui était Kepler ?

Nous nous limiterons dans cette courte biographie à ce qui se rapporte à l'astronomie du système solaire.

Johannes Kepler (1571-1630) est un astronome, plus théoricien qu'observateur, né en 1571 dans une petite ville de Souabe. Lors de ses études à l'Université de Tübingen, il sera l'élève de Michael Mästlin qui enseignait l'astronomie de Ptolémée, mais qui était convaincu de la vérité du système de Copernic. Il se prépare à une carrière de pasteur luthérien, mais il accepte en 1594 un poste de professeur de mathématiques à l'école protestante de Graz (Autriche du sud).

A Graz, le peu d'élèves présents à ses cours lui laisse le loisir de se consacrer à la recherche théorique en astronomie.

En 1596, la publication du ... *Mysterium Cosmographicum*... (MC) le fait connaître du monde savant, et en 1600 il part pour Prague où il devient assistant du "Mathématicien Impérial" Tycho-Brahe. Il recevra le même titre après la mort de celui-ci et le gardera jusqu'au décès de l'empereur Rodolphe II en 1612.

Tycho-Brahe l'avait chargé de l'étude du mouvement de la planète Mars qui, avec son excentricité importante, résistait à toutes les modélisations avec des cercles. Kepler pensait trouver la solution en 8 jours, il lui faudra 8 ans. Il en rend compte dans ... *Astronomia Nova*... (AN) en 1609. (A noter que c'est la "2<sup>e</sup> loi" ou "loi des aires" qu'il découvre en premier en 1602).

Quant à la "3<sup>e</sup> loi" reliant les distances au Soleil aux périodes, il ne l'obtiendra qu'en 1618 et en rendra compte en 1619 dans ... *Harmonices Mundi* ... (HM).

Et ce n'est qu'en 1622 dans ... *Epitome Astronomiae Copernicae* ... qu'il généralise à toutes les planètes son modèle (1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> loi) initialement décrit pour le cas de Mars.

Entre temps Kepler a publié d'autres travaux en mathématiques, en optique, en astronomie, (sans compter ses prévisions astrologiques).

Kepler décède à Ratisbonne en 1630 au service du général Wallenstein après avoir réussi en 1629 à faire imprimer ses ...*Tabulae Rudolphinae* ..., éphémérides basées sur ses théories et sur les observations accumulées par Tycho-Brahe. Ces éphémérides, très précises seront utilisées pendant plus d'un siècle par les astronomes et les navigateurs.

## Les motivations de la recherche de Kepler

La fascination de Kepler pour l'astronomie remonte à son enfance, à 6 ans sa mère l'avait mené sur un lieu élevé pour mieux observer une comète, plus tard il avait assisté avec son père à une éclipse de Lune et il l'avait vue devenir rouge.

S'étant préparé à devenir pasteur, il connaissait le psaume 18 (19) « *Les cieux proclament la gloire de Dieu ...* », et il désirait célébrer l'harmonie (beauté, ordre, régularité rationnelle) de l'œuvre de Dieu.

Dès qu'il a connu, grâce à Mästlin, le système de Copernic, il a été enthousiasmé et s'est senti le devoir de le défendre, le faire connaître, voir même l'améliorer.

Il ne cherche pas seulement un modèle qui colle bien avec les observations, mais il s'attache à la question "pourquoi ?".

*Et il y avait trois choses particulièrement dont je cherchais avec obstination pourquoi elles étaient ainsi et non pas autrement, à savoir : le nombre, la grandeur et le mouvement des orbes. (MC)*

Ces questions peuvent se reformuler ainsi :

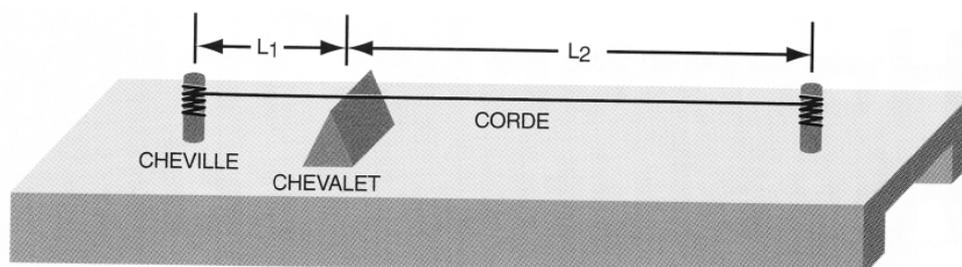
- Pourquoi existe-t-il un tel nombre (égal à six dans le modèle de Copernic) de planètes ?
- Pourquoi sont-elles disposées aux distances au Soleil observées ?
- Pourquoi se déplacent-elles avec les vitesses observées ?

*Ce qui me poussait à m'attaquer à ce problème, c'est la belle harmonie des choses immuables ... (MC)*

## Qu'est-ce que l'harmonie pour Kepler ?

La notion d'harmonie remonte au moins à Pythagore qui aurait remarqué le rapport entre la longueur d'une corde et la hauteur de la note émise par la vibration.

Cette théorie est obtenue en utilisant l'exemple d'un instrument monocorde, instrument de musique constitué d'une caisse de résonance et d'une corde unique séparée en deux parties par un chevalet mobile. En fonction de l'endroit où l'on place le chevalet, on obtient une longueur de corde de chaque côté. En pinçant la corde de chaque côté, on obtient une note plus grave du côté du segment le plus long, plus aigu du côté du segment le plus court.



Et on peut préciser ; comme on ne savait pas mesurer les fréquences des sons, on ne s'intéressera qu'aux intervalles musicaux que l'on peut détecter à l'oreille.

Soient  $L_1$  et  $L_2$  ces 2 segments.

On peut pincer ces 2 segments simultanément (on a un accord) ou alternativement.  
 Pythagore aurait remarqué que l'accord ou l'intervalle n'était agréable (consonnant) que lorsque les longueurs des 2 segments étaient dans un rapport simple.

Si  $L_1 = L_2$  les 2 notes sont les mêmes, c'est l'unisson qui est un accord parfait.

Si  $L_1 = \frac{1}{2} L_2$  la note émise par  $L_1$  est à l'octave de celle émise par  $L_2$ .

Si  $L_1 = \frac{2}{3} L_2$  on a la quinte.

Avec le rapport  $3/4$ , on a la quarte, avec  $4/5$  on a la tierce majeure, etc.

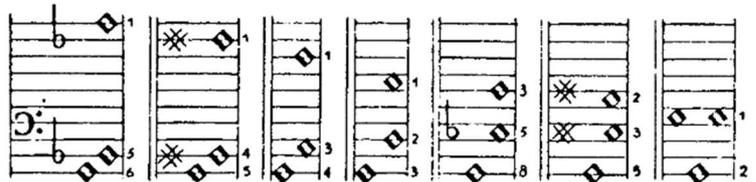
Ainsi, la question des intervalles musicaux est ramenée à une question de fractions, ce qui est conforme à l'opinion de Pythagore que « Tout est Nombre ».

Et on comprend que la musique était enseignée au Moyen-Age dans le cadre des disciplines mathématiques du Quadrivium : arithmétique, musique, géométrie, astronomie.

On pouvait donc (comme Beethoven) être un spécialiste de la musique bien que sourd comme un pot !

Ces fractions appliquées au cercle donnent des arcs, et des angles.

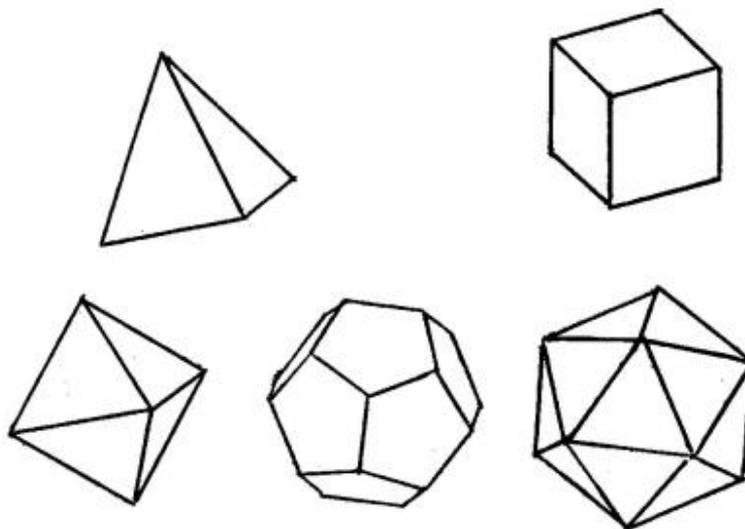
C'est ainsi que Kepler utilise ces notations musicales pour décrire les "aspects", angles entre les planètes dans le zodiaque à un instant donné, et aussi les polygones réguliers inscrits dans un cercle.



N'admettant que 5 "accords parfaits", il les met aussi en rapport avec les 5 "solides platoniciens" et il construit un modèle du système solaire avec un emboîtement de sphères et de solides platoniciens.

## Qu'est-ce que ces "solides platoniciens" ?

Les solides de Platon sont des polyèdres réguliers (solides formés par un certain nombre de faces qui sont des polygones réguliers tous égaux entre eux) convexes c.a.d. sans de pointes ni rentrants (parties creuses).



On sait depuis l'antiquité (Euclide, Livre XIII) qu'il n'y en a que 5.

- Le tétraèdre régulier (pyramide) constitué de 4 faces en triangle équilatéral,
- L'hexaèdre régulier (cube) constitué de 6 faces carrées,
- L'octaèdre régulier constitué de 8 faces en triangle équilatéral,
- Le dodécaèdre régulier constitué de 12 faces pentagonales égales,
- L'icosaèdre constitué de 20 faces en triangle équilatéral,

On a une propriété importante : Ces polyèdres admettent une sphère inscrite tangente aux faces et une sphère circonscrite passant par les sommets. Et ces 2 sphères sont concentriques.

On a 6 planètes donc 5 intervalles séparant leurs "orbés" (sphères contenant leurs orbites).

Kepler a donc imaginé de placer l'orbe de Mercure comme sphère intérieure d'un solide, ce solide séparant l'orbe de cette planète de celui de la planète suivante Vénus qui coïncide avec la sphère supérieure du même solide et avec la sphère inférieure d'un autre solide, etc.

Notons  $r$  le rayon de la sphère intérieure et  $R$  le rayon de la sphère extérieure.

Avec  $p$  le nombre de côtés bordant chaque face et  $q$  le nombre de faces se rencontrant à chaque sommet (ou le nombre d'arêtes se rencontrant à chaque sommet), nous aurons :

$$R/r = \tan \pi/p \tan \pi/q$$

Polyèdre	$p$	$\pi/p$	$q$	$\pi/q$	$R/r$
Tétraèdre	3	60°	3	60°	3
Cube	4	45°	3	60°	1,732
Octaèdre	3	60°	4	45°	1,732
Dodécaèdre	5	36°	3	60°	1,258
Icosaèdre	3	60°	5	36°	1,258

Rappelons les valeurs des distances en U.A. des planètes au Soleil trouvées par Copernic

	Copernicus	True Value
Mercury	0·3763	0·3871
Venus	0·7193	0·7233
Earth	1·0000	1·0000
Mars	1·5198	1·5237
Jupiter	5·2192	5·2028
Saturn	9·1743	9·5389

Calculons le rapport de la distance d'une planète au Soleil avec celle de la planète immédiatement inférieure.

<i>Mercury</i>	<i>Venus</i>	<i>Terre</i>	<i>Mars</i>	<i>Jupiter</i>	<i>Saturne</i>
0,38	0,72	1,00	1,52	5,22	9,17
1,895	1,389	1,52	3,434	1,757	

Après plusieurs essais, Kepler plaça l'octaèdre entre les sphères (orbés) de Mercure et de Vénus (rapport de 1,732 au lieu de 1,894), l'icosaèdre entre celles de Vénus et de la Terre (1,258 au lieu de 1,388), le dodécaèdre entre celle de la Terre et de Mars (1,258 au lieu de 1,52), le tétraèdre entre celles de de Mars et de Jupiter (3 au lieu de 3,434), le cube entre celles de Jupiter et de Saturne (1,732 au lieu de 1,757).

Ces rapports géométriques sont toujours inférieurs aux rapports déduits des mesures.  
Cela nous ferait des distances au Soleil

- pour Mercure 0,46 UA au lieu de 0,38
- pour Vénus 0,79 UA au lieu de 0,72
- pour la Terre 1,00 UA (par définition)
- pour Mars 1,26 UA au lieu de 1,52
- pour Jupiter 3,77 UA au lieu de 5,22
- pour Saturne 6,54 UA au lieu de 9,17.

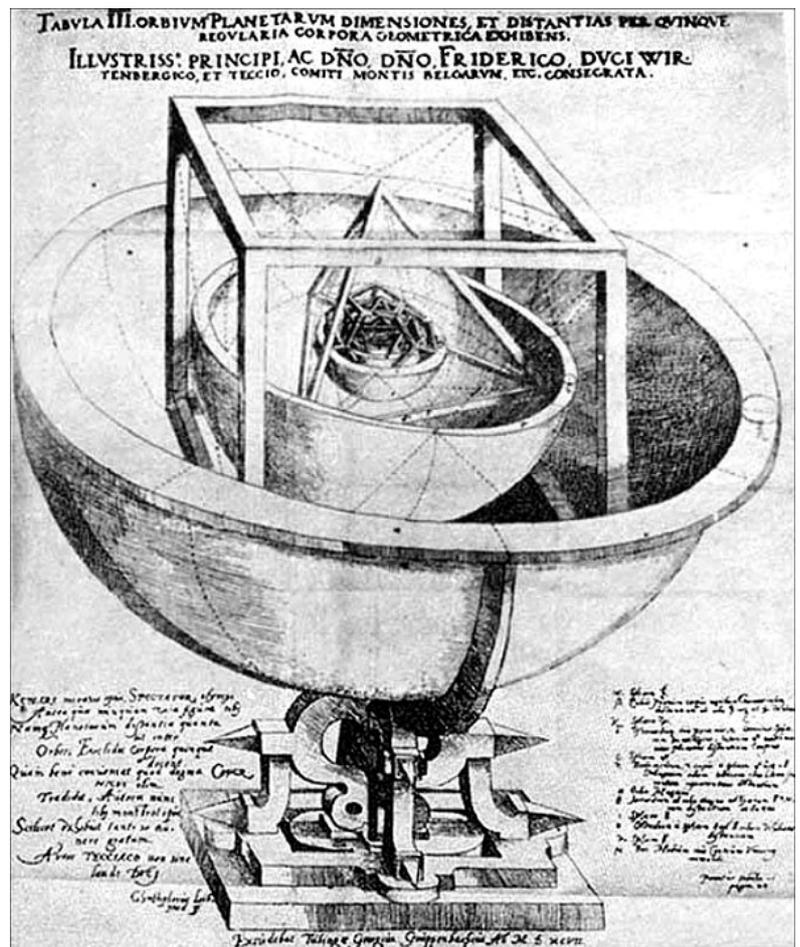
Les écarts avec les valeurs observées augmentent très nettement avec les distances à la Terre.

Pour remédier à cette imprécision, Kepler transforme les "sphères" contenant l'orbite des planètes en "coquilles sphériques" dont l'épaisseur correspond à "l'excentricité" de la trajectoire de la planète.

Noter l'épaisseur des "orbes" héliocentriques des planètes

(Rappelons qu'avant la découverte que les trajectoires des planètes sont des ellipses, cette excentricité représentait le rayon d'un petit cercle "épicycle" ou le décentrement du cercle "excentrique". Pour les définitions des termes "épicycle" et "excentrique", voir Puel, 2017).

Cet essai pour sauver son modèle des solides platoniciens, auquel il restera attaché jusqu'à la fin, "colle" à peu près aux observations pour les orbes des planètes voisines de la Terre, Vénus et Mars, mais pour Mercure, Jupiter et Saturne ça ne marche pas du tout (MC chap. XIV-XIX, Laure Manueddu) ce qui fait que, dans un premier temps, il a mis en doute les valeurs de Copernic avant de s'en excuser 25 ans plus tard.



Plus tard, Kepler qui s'intéresse aux vitesses angulaires des planètes autour du Soleil, représente le rapport des vitesses au périhélie et à l'apogée par un intervalle musical, de même pour le rapport de la vitesse moyenne d'une planète à la suivante. Il peut ainsi proposer les éléments d'une partition pour le système solaire (HM).



L'harmonie des sphères planétaires.

Notons encore un point où la recherche de l'harmonie a pu jouer un rôle dans l'élaboration de la 3e loi de Kepler qui peut s'énoncer ainsi : soit  $a$  le demi-grand axe d'une planète du système solaire exprimé en unités astronomiques (U.A.) et  $T$  sa période de révolution exprimée en années, on aura

$$a = T^{\frac{2}{3}}$$

Certains historiens pensent que Kepler, cherchant une loi de puissance après avoir essayé la puissance 1 puis la puissance 2, aurait obtenu par tâtonnement l'exposant  $2/3$  ; mais d'autres, dont Alexandre Koyré, estiment qu'il a choisi pour des raisons d'harmonie cette fraction correspondant à la quinte, base du système musical, quitte à la vérifier ensuite à partir des observations de Tycho-Brahe.

### Références :

Danjon, André : *Astronomie Générale*, J. & R. Sennac, Paris, 1952, rééd. Librairie Albert Blanchard 1986

Dreyer, J.L.E. : *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, 1906, rééd. Dover, 1953.

Kepler, Jean : *Le Secret du Monde*, trad. par A. Segonds du *Mysterium Cosmographicum...*, les Belles Lettres 1984, rééd. Gallimard 1993.

Koestler, Arthur : *Les Somnambules*, Le livre de Poche, Paris, 1973.

Koyré, Alexandre : *La Révolution Astronomique Copernic, Kepler, Borelli*, coll. L'âne d'or, Les Belles Lettres, Paris, 2016.

Kuhn, Thomas : *La Révolution Copernicienne*, Trad. A. Hayli, Fayard, 1973, rééd. Le Livre de Poche, La Flèche, 1992.

Lombardi, Anna Maria : *Kepler, le Musicien du Ciel*, Belin - Pour la Science, Paris, 2001.

Manueddu, Laure ; *Etude de la démarche qui mena Kepler à ses trois lois* (Travail de maturité réalisé au Lycée Denis-de-Rougemont sous la direction de Eduardo Principi), in Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences, n° 36, Sept. 2008.

Puel, François : *Les Distances des Planètes au Soleil et le Système de Copernic*, in Le Point Astro n° 71 revue de l'Association Astronomique de Franche-Comté, Décembre 2017, pp 19-25.

*Quatrième Centenaire de la Naissance de Johannes Kepler*, Société Astronomique de France, 1973.

*Kepler*, Les Cahiers de Science et Vie, Hors-Série n° 21, Juin 1994.

Wikipedia, *Solides de Platon*

# La photographie de « filé d'étoiles circumpolaires »

Par François Blateyron

Photographier un filé d'étoiles est très simple pour l'amateur débutant et permet de réaliser des photographies spectaculaires, pour peu que l'on prenne soin de la composition de l'image et du premier plan. Le matériel nécessaire est des plus communs : un appareil photo numérique doté de la pose M (manuel) ou mieux de la pose B (bulb), d'un objectif à grand champ, d'un pied photo et si possible d'un intervallo-mètre.

Le plus important pour obtenir une belle photo est de choisir le premier plan : un bâtiment, un arbre, une montagne, que l'on mettra dans le champ tout en visant le pôle céleste. La prise de vue ne se fera pas en une seule fois (il faudrait poser 1 heure ou plus et la photo serait surexposée) mais on effectuera une série de photos de 30 secondes à 1 minute de pose, sur une durée d'au moins une heure, idéalement deux à trois heures. C'est là que l'intervallomètre se révèle précieux car il permet de programmer l'appareil placé en pose B, par exemple pour une série de 240 poses de 30 secondes afin d'obtenir un filé sur deux heures. On veillera à soigner la mise au point (si possible en zoomant une étoile sur l'écran de l'appareil) et à fermer l'objectif de 1 à 2 diaphragmes. Par exemple, sur un objectif qui ouvre à f/1.8, on fermera à f/2.5. Fermer le diaphragme permet de garantir la finesse des étoiles, mais il ne faut pas trop fermer sous peine de ne pas avoir d'étoiles du tout ! Si le temps est humide, il faudra prévoir un pare-buée ou une résistance chauffante autour de l'objectif.

Une fois la séquence lancée, on peut rentrer au chaud (en hiver) ou bien profiter du ciel aux jumelles allongé sur une chaise longue (en été). ☺

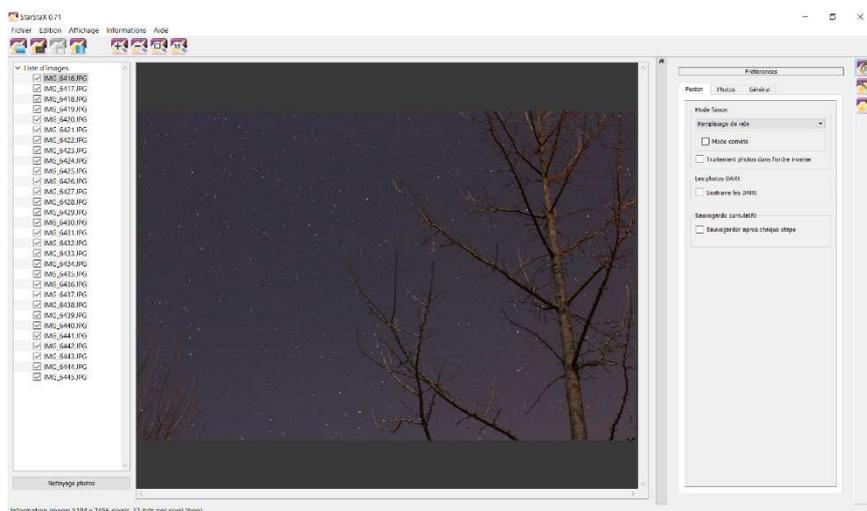
Il faut ensuite traiter les 240 photos afin de composer le filé. Ma suggestion est de télécharger le petit logiciel gratuit **StarStaX**, disponible en français pour Windows, MacOS et Linux.

À télécharger sur le site : <https://www.markus-enzweiler.de/StarStaX/StarStaX.html>

Charger les photos depuis le menu **Fichier > Ouvrir photos...** ou bien faire un glisser-déposer des fichiers sur la zone de gauche de l'interface.

Le logiciel montre la photo sélectionnée au centre.

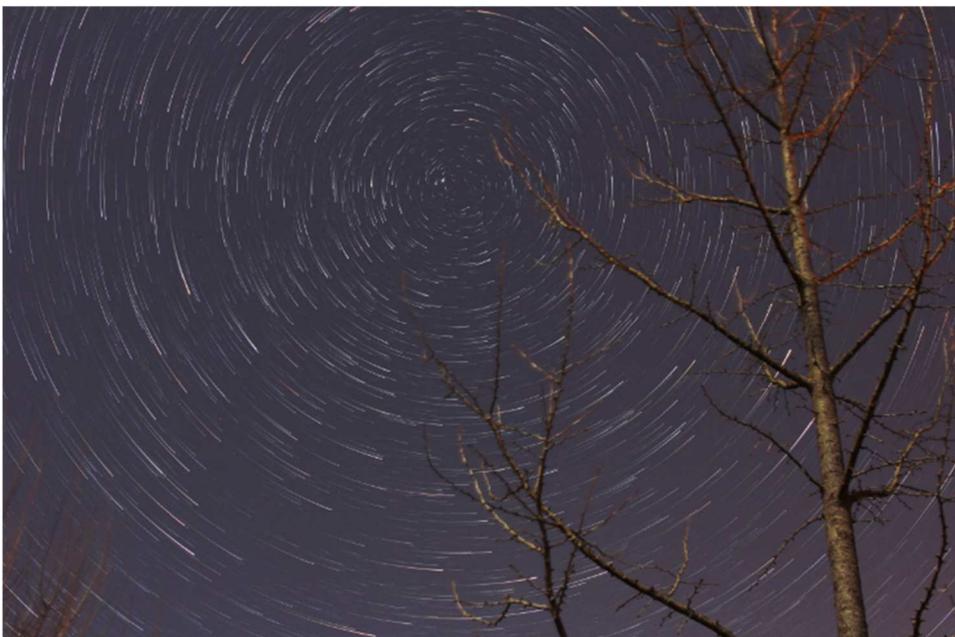
A droite de l'interface, trois onglets exposent les options du logiciel. Dans l'onglet **Fusion**, une liste déroulante permet de choisir le mode de composition de l'image finale. Choisir **Remplissage de vide** pour commencer.



Les autres options par défaut conviennent bien pour un premier essai. On peut donc lancer le traitement depuis le menu **Edition > Lancer le traitement**. On voit alors l'image se construire au fur et à mesure à l'écran. Cependant, la prévisualisation du résultat par le logiciel est dégradée par rapport à la réalité, donc une fois le traitement terminé il faut enregistrer l'image puis l'afficher depuis l'explorateur de fichier.



*Composition de 30 poses de 2 minutes, prises à 800 ISO avec un objectif de 30 mm ouvert à f/5.6 sur un Canon 60d.*



*Même composition que ci-dessus, mais en activant l'option **Mode comète** dans l'onglet **Fusion**.*

La durée d'exposition de chaque image, la sensibilité ISO et l'ouverture de l'objectif joueront sur la luminosité du fond du ciel. Certaines options du logiciel permettent de corriger un peu le fond du ciel. Et bien-sûr, l'image finale peut être retouchée sous PhotoShop, Paint.net ou GIMP.

Au-delà du filé d'étoile centré sur le pôle céleste, on peut aussi en faire en visant un autre point du ciel, avec un très grand angle ou un téléobjectif, en visant une constellation reconnaissable (Orion ou la Grande Ourse), les variantes sont nombreuses. Le résultat dépendra toujours de la composition et du premier plan, donc au final de l'œil du photographe.

# LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Par Fred. DESCHAMPS

## UN PEU D'HISTOIRE ...

Depuis quelques années, l'étude du champ magnétique revient au goût du jour suite à des mesures faites en 1995 et à des simulations plus ou moins riches en enseignements, mais aussi plus ou moins inquiétantes. L'étude du champ magnétique (appelé géomagnétisme pour le magnétisme terrestre) n'est pourtant pas si récente. L'histoire du magnétisme a débuté il y a plus de 3000 ans. On ne sait ni où ni quand il a été découvert, cependant quatre pistes restent envisageables : en Égypte, en Amérique centrale, en Chine et enfin en Grèce.

Cette histoire repose sur deux phénomènes d'attractions incompris et confondus durant l'antiquité. Un morceau de fer pouvait être attiré par la pierre d'aimant et de la paille être attirée par un morceau d'ambre frotté. L'observation du magnétisme repose principalement sur la découverte de pierres qui pouvaient attirer le fer. Ces pierres ont été trouvées dans la région de Magnésie en Asie mineure d'où le phénomène tira finalement son nom.

- On pense que les égyptiens connaissaient peut-être certaines propriétés du magnétisme car ils ont laissé des objets dans des tombes vieilles de 4000 ans.
- Les chinois ont écrit le premier livre sur le magnétisme vers 700 av JC.
- Pour ce qui est des Grecs, on attribue à Aristote ce qu'on pourrait appeler la première « discussion scientifique » sur le magnétisme avec Thalès de Milet, qui a vécu entre 625 et 545 av. J.-C. Thalès attribue une âme à l'aimant puisque celui-ci a la propriété de faire mouvoir des objets.

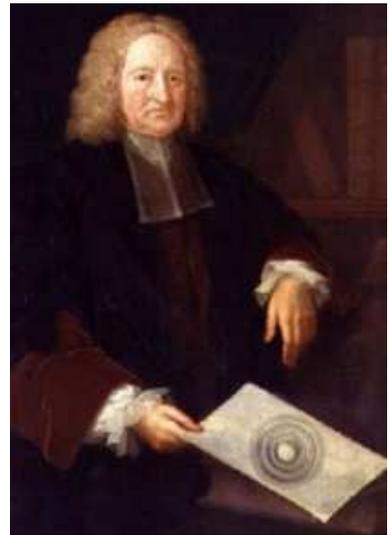


Presque 2000 ans plus tard, en 1600, **William Gilbert** édite un traité cohérent sur le magnétisme. C'est le premier livre de physique expérimentale publié en Angleterre, il fait le bilan de près de vingt années d'expériences sur le magnétisme des aimants naturels et artificiels et sur les boussoles. Il développe une théorie d'ensemble du magnétisme terrestre et remarque qu'il y aurait des règles d'attraction et de répulsion des aimants par leurs pôles.

Fondant son hypothèse sur des expériences précises, il propose d'assimiler la Terre à un aimant et conclut que cela est la raison pour laquelle la boussole indique le nord (jusqu'alors, on pensait que c'était l'étoile polaire, ou une grande île magnétique au pôle Nord qui attirait la boussole). Il façonne un gros aimant en forme de boule, la terrella, qui lui sert de modèle réduit de la terre. Les orientations que prend une petite aiguille aimantée à sa surface correspondent à celles que l'on peut

observer sur le globe terrestre.

**Edmund Halley** émit en 1692 l'idée que la Terre était constituée d'une coquille creuse d'environ 800 km d'épaisseur, de deux coquilles concentriques intérieures, et d'un noyau central, ayant respectivement les diamètres approximatifs des planètes Vénus, Mars et Mercure. Ces coquilles seraient séparées par une couche atmosphérique, chacune d'elles aurait ses propres pôles magnétiques, et elles tourneraient à des vitesses différentes. Halley a proposé ce modèle pour expliquer des anomalies dans l'affichage des boussoles. Il émit l'hypothèse de l'existence d'une atmosphère lumineuse à l'intérieur de la Terre, celle-ci produisant les aurores boréales en s'échappant à l'extérieur. Il émit également l'hypothèse que les mondes intérieurs pourraient être habités. Ces hypothèses sont à rattacher aux nombreuses théories de la Terre creuse.



En 1821, après la découverte du phénomène de l'électromagnétisme par le chimiste danois Ørsted, **Faraday** inverse l'expérience du danois en construisant deux appareils pour produire ce qu'il appelle une *rotation électromagnétique* : lorsqu'un câble électrique, trempant dans un bain de mercure au milieu duquel est placé un aimant statique, est traversé par un courant électrique, le câble se met alors à tourner autour de l'aimant. Par ce mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, Faraday fait la démonstration du moteur électrique.

Dix ans plus tard, en 1831, il commence une longue série d'expériences. Le 29 août 1831 il découvre l'induction électromagnétique. Ces expériences forment la base de la technologie électromagnétique moderne. Dans son travail sur le courant continu, Faraday démontre que la charge se situe seulement à l'extérieur d'un conducteur chargé, et que celle-ci n'a aucun effet sur ce qui peut être situé à l'intérieur : c'est l'effet de "blindage", utilisé dans la cage de Faraday.

1801 est l'année de la découverte de l'astéroïde Cérès par Piazzi, qui ne put observer l'astre qu'un mois avant qu'il ne disparaisse derrière le soleil. **Gauss**, informé de la nouvelle, cherche à déterminer la trajectoire de Cérès et met au point à ce dessein la méthode des moindres carrés\*. L'astéroïde est retrouvé au lieu précis prédit par Gauss en décembre. La Théorie des mouvements des corps célestes est née.

Avec Weber, ils vont étudier pendant 6 ans le magnétisme terrestre. Ils mesurent l'intensité, la déclinaison et l'inclinaison de la force magnétique à l'aide du magnétomètre, conçu pour l'occasion par Gauss. Ceci leur permet en particulier de formuler deux théorèmes essentiels en électromagnétisme : il n'existe pas de monopôle magnétique; le flux d'un champ électrique à travers une surface fermée est proportionnel à la charge électrique totale contenue à l'intérieur de la surface. En leur honneur, le Gauss est aujourd'hui une unité d'induction magnétique et le Weber une unité du flux d'induction magnétique.

**James Clerk Maxwell**, Physicien et mathématicien écossais. Pour certains ses apports en physique sont aussi importants que ceux de Newton et Einstein. La plus grande partie de la vie scientifique de Maxwell a été consacrée à l'électricité. Sa plus grande contribution est le développement et la formulation mathématiques des travaux précédents sur l'électricité et le magnétisme réalisés par Michael Faraday et André-Marie Ampère notamment. Il en tire un ensemble de vingt équations différentielles à vingt variables, plus tard réduites à quatre. Ces équations, désormais connues sous le nom d'équations de Maxwell, sont présentées la première fois à la Royal Society en 1864 et décrivent le comportement et les relations du champ électromagnétique ainsi que son interaction avec la matière. L'équation d'onde

électromagnétique de Maxwell prévoit l'existence d'une onde associée aux oscillations des champs électrique et magnétique et se déplaçant dans le vide à une vitesse facilement accessible expérimentalement. Avec les moyens de l'époque Maxwell obtient une célérité de 310 740 000 m/s. Dans son article de 1864, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (en), Maxwell écrit :

*« L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme. »*

Cette prévision s'est révélée correcte et la relation entre lumière et électromagnétisme est considérée comme une des plus grandes découvertes du XIX<sup>e</sup> siècle dans le domaine de la physique.

À ce moment Maxwell pense que la propagation de la lumière nécessite un milieu pour support des ondes : l'éther. Avec le temps l'existence d'un tel milieu, remplissant tout l'espace et apparemment indétectable par des moyens mécaniques, posera de plus en plus de problèmes pour être mise en accord avec les expériences telles que celle Michelson et Morley. De plus, cela semble imposer un référentiel absolu dans lesquelles les équations sont valides, mais impose également à celles-ci de prendre une expression différente pour un observateur en mouvement. C'est cette dernière difficulté qui amènera Albert Einstein à formuler sa théorie de la relativité restreinte pour laquelle l'existence de l'éther n'est plus nécessaire.

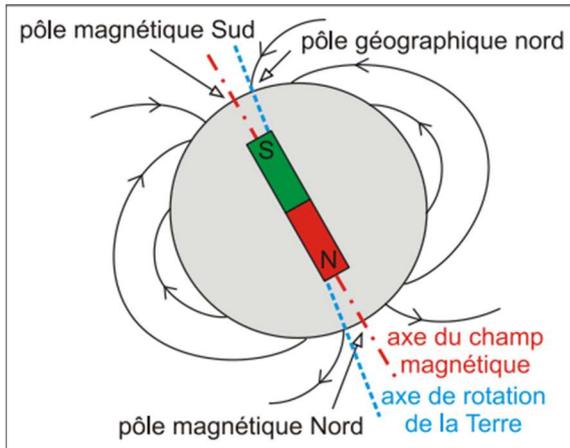
## QU'EST-CE QU'UN CHAMP MAGNETIQUE ?

Il existe 4 forces qui agissent sur notre univers :

- **Force nucléaire forte** : c'est celle qui cimente les nucléons dans les noyaux. C'est elle aussi qui associe les quarks 3 par 3 à l'intérieur des nucléons et donne naissance à l'énergie nucléaire. 1 gramme de carburant nucléaire = 1 tonne de dynamite. Elle agit sur une distance de 10-13 cm, elle est 100 fois plus forte que la force électromagnétique et n'agit que sur des particules massives comme le proton et le neutron d'un poids de 10-24 grammes. La masse d'un proton est égale à 1836 fois la masse de l'électron.
- **Force gravitationnelle** : Découverte au XVII<sup>e</sup> siècle par Isaac Newton, cette force attractive agit sur toutes masses. La plus faible des quatre forces de la nature, mais aussi celle qui a la plus grande portée, elle agit sur l'ensemble de l'univers, elle est la colle du cosmos. L'intensité de cette force dépend de la masse de l'objet. Ce n'est qu'à l'échelle astronomique que la gravité se fait vraiment sentir, dans d'énormes masses comme celle de la Terre (6x10<sup>27</sup> grammes), du Soleil (10<sup>33</sup> grammes), d'une galaxie (10<sup>44</sup> grammes), d'un amas de galaxies (10<sup>47</sup> grammes) ou de l'univers tout entier.
- **Force nucléaire faible** : C'est elle qui permet aux neutrons de se transformer en protons et vice versa quand les conditions s'y prêtent. Lors de la radioactivité bêta, un neutron se désintègre en donnant naissance à un proton; un électron et un antineutrino sont alors émis. Elle n'agit pas sur les particules immortelles comme l'électron, le photon et le neutrino. Bien que plus forte que la gravité, elle est 1000 fois plus faible que la force électromagnétique. Elle n'a d'influence que sur une distance de 10-16 cm. C'est en 1896, par hasard que le physicien français Henri Becquerel découvrit ce processus de désintégration, sur une plaque photographique.
- **Force électromagnétique** : Cette force, bien supérieure à la force de gravité, n'agit que sur les particules chargées, soit positivement comme les protons, soit négativement comme les électrons. Elle forme les atomes en attachant les électrons aux noyaux, mais elle ne s'arrête pas là. Elle soude les atomes en les obligeant à partager leurs électrons pour

former les molécules. Elle pousse encore les molécules à se combiner à leur tour en de longues chaînes, la plus haute expression de ces chaînes est l'ADN qui permet la vie.

Le magnétisme désigne l'ensemble des phénomènes qui ont lieu à l'intérieur et autour de matériaux aimantés. Cette aimantation peut être naturelle ou le résultat d'un champ d'induction (électrique ou magnétique)



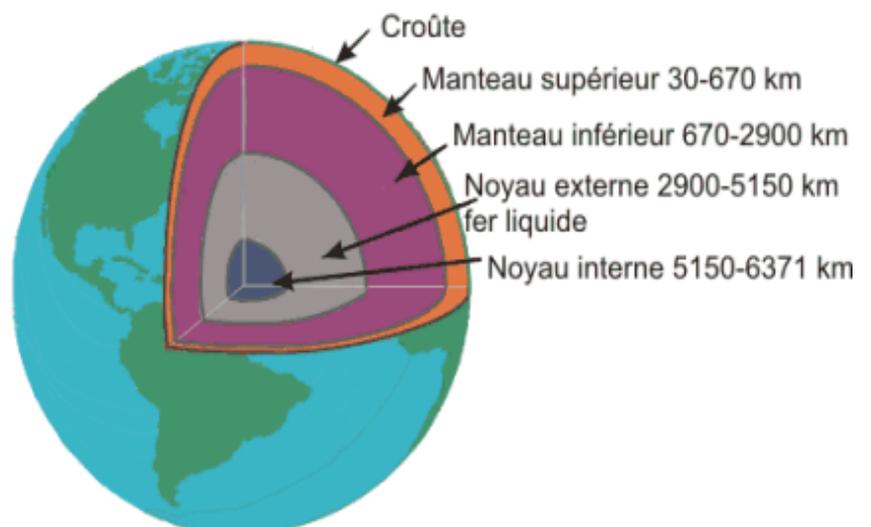
Un champ magnétique est produit par un courant électrique qui traverse un conducteur électrique, la terre agirait comme un dipôle magnétique, ou encore comme un aimant droit. Les lignes de forces magnétiques établissent tout autour de la planète un champ magnétique terrestre. C'est la raison pour laquelle l'aiguille d'une boussole s'aligne automatiquement selon les lignes de force, dans une direction nord-sud.

## ORIGINE DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Bien que le champ magnétique de la Terre s'apparente à celui produit par un aimant droit, cette analogie ne permet pas d'expliquer son origine. En fait c'est un peu plus compliqué. Premièrement, un aimant permanent ne pourrait résister aux températures qui règnent dans le noyau terrestre (4800°). Deuxièmement, nous savons que le champ géomagnétique existait déjà il y a 3,45 milliards d'années avec une intensité de 50 à 70% de celle de nos jours. Troisièmement, on ne peut pas, non plus, attribuer l'existence du champ géomagnétique actuel à un seul événement qui se serait produit dans le passé lointain. Le champ magnétique décroît et l'on peut démontrer qu'en l'absence d'un mécanisme qui le régènerait continuellement, il aurait disparu 15 000 ans après son apparition.

On a proposé plusieurs mécanismes pour expliquer la production du champ magnétique, mais le seul qui ait été retenu propose que la source du champ géomagnétique soit analogue à une dynamo, un dispositif permettant de transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour comprendre comment cette dynamo planétaire fonctionne, nous devons comprendre les conditions physiques qui règnent à l'intérieur de la Terre.

La Terre est formée de couches : une mince croûte externe, un manteau silicaté, un noyau externe et un noyau interne. La pression et la température augmentent avec la profondeur. à la frontière entre le noyau et le manteau, la température s'élève à près de 4 800°; il y fait suffisamment chaud pour que le noyau externe soit liquide. En contrepartie, le noyau interne est



solide à cause de la pression plus élevée. Le noyau est principalement composé de fer et d'une petite proportion d'éléments plus légers.

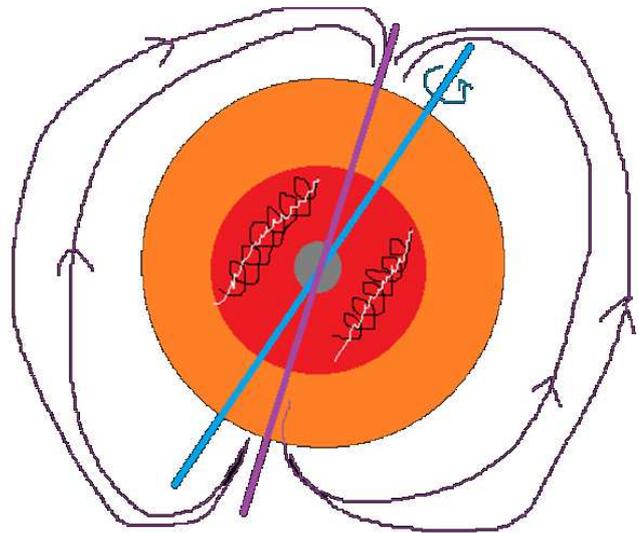
Le noyau externe est constamment en mouvement à cause de la rotation terrestre et de la convection.

Imaginez que le schéma à droite soit la terre, on retrouve :

- La croûte
- Le noyau externe ferreux liquide
- Le noyau interne fer solide

Les mouvements de convection qui se produisent dans le noyau liquide. Ils sont dû à la rotation de la terre.

Le noyau liquide étant du fer, il est conducteur. Les mouvements créent un courant électrique intense associé à un champ magnétique initial qui va à son tour créer un champ magnétique plus fort. On a une sorte de dynamo perpétuelle qui fonctionnera tant qu'il y aura de la chaleur pour conserver l'état liquide du noyau externe et de l'énergie (rotation ou champ magnétique initial) pour créer un nouveau champ magnétique.



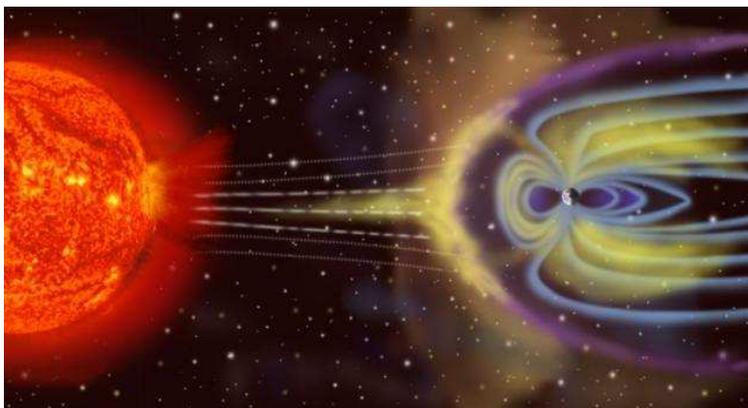
Vous remarquerez que le champ magnétique sort par le pôle sud géographique et entre par le pôle nord géographique. Les pôles magnétiques étant l'inverse.

Pour résumer :

- Champ magnétique initial (inter planétaire et vent solaire)**
- + chaleur (énergie)**
- + fluide liquide conducteur**
- + mouvements du noyau externe (rotation de la terre + convection)**
- + effet dynamo auto-excitée**
- nouvelle production d'un champ magnétique**



## LA MAGNETOSPHERE



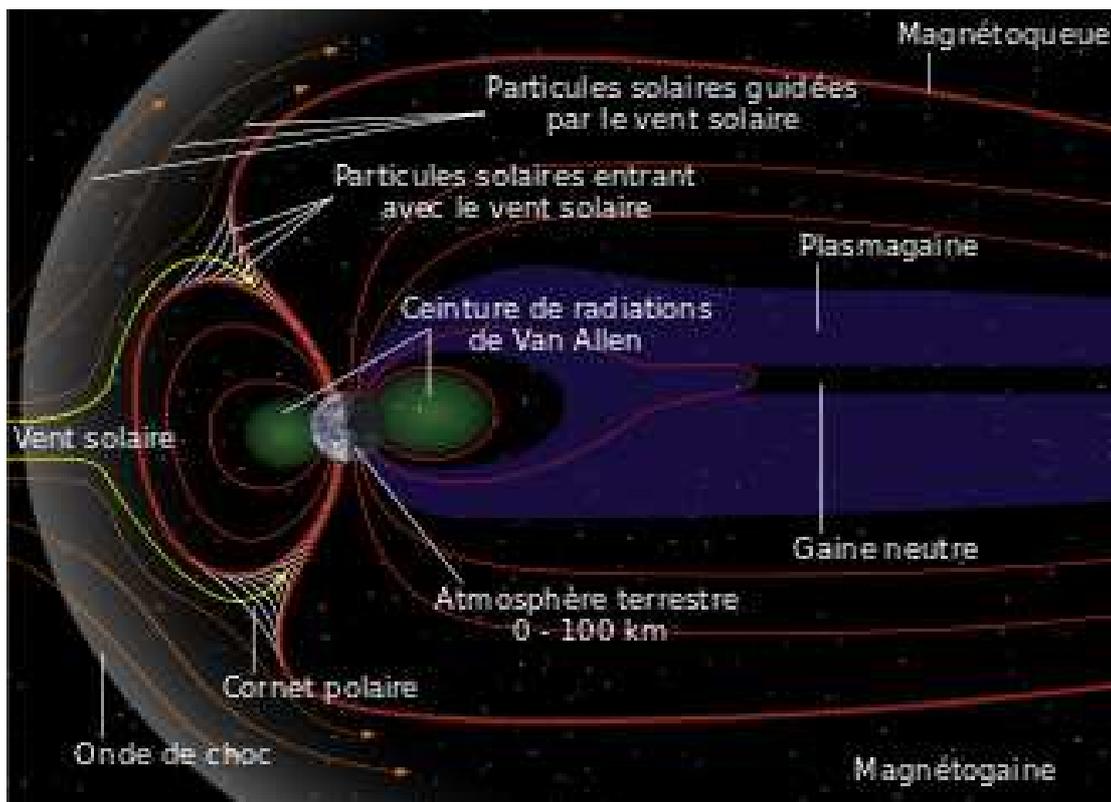
Le champ magnétique de la terre est un véritable bouclier. Sans lui, il n'y aurait probablement pas de vie sur terre car il nous protège du vent solaire qui contient des particules très énergétiques mais cette protection n'est pas totale, des particules arrivent quand même à se frayer un chemin au niveau des pôles. En rentrant dans l'atmosphère, elles produisent alors de magnifiques aurores boréales.

La magnétosphère de la Terre a été découverte en 1958 par la sonde Explorer 1 durant les recherches de l'année géophysique internationale (IGY, International Geophysical Year). Auparavant, les scientifiques savaient que des courants électriques s'écoulaient dans l'espace, parce que les éruptions solaires provoquaient parfois des perturbations magnétiques. En août et septembre 1958, le Projet Argus a testé une théorie sur la formation de cloches de radiation pouvant être utilisée à la guerre.

En 1959 Thomas Gold proposa le terme de « magnétosphère », quand il écrivit :

« La région au-dessus de l'ionosphère dans laquelle le flux magnétique de la Terre a un contrôle dominant sur les gaz et particules chargés rapides est connue pour s'étendre sur une distance de 10 fois le rayon terrestre ; son nom approprié pourrait être magnétosphère.

» — Thomas Gold, Journal Geophysical Results LXIV. 1219/1



Le Soleil se trouve loin sur la gauche. Le vent solaire est représenté par trois flèches parallèles mais, en réalité, il s'écoule de part et d'autre de la magnétosphère, la limite entre celle-ci et le milieu interplanétaire étant la magnétopause (repère Mp) qui se trouve à environ 60 000 km de la Terre (nota : la figure n'est pas à l'échelle). En avant de la magnétopause se trouve la surface de choc (repère S), lieu où le plasma solaire est fortement ralenti avant de s'écouler dans la magnétogaine (repère Mg), zone de turbulence comprise entre la surface de choc et la magnétopause. Dans les régions polaires, du côté du Soleil (côté jour), se trouvent les cornets polaires (repère Cp). Les cornets polaires agissent comme des entonnoirs dans lesquels les particules électrisées du vent solaire peuvent pénétrer et provoquer l'apparition d'aurores polaires. Les aurores, boréales dans l'hémisphère nord, australes dans l'Antarctique, se forment dans les zones aurorales nord et sud : l'ionosphère (repère Za).

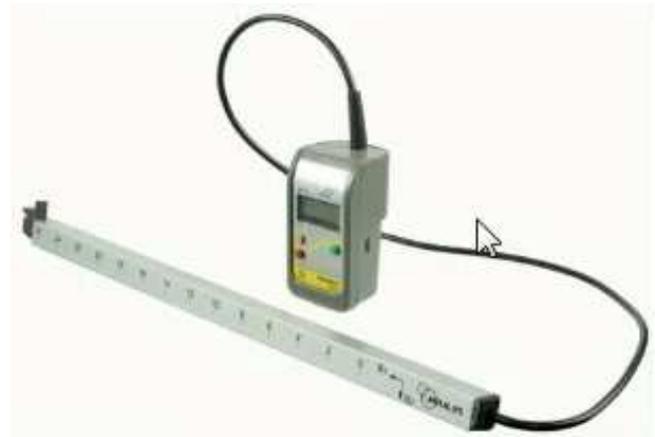
Du côté nuit, les lignes de champ ne se referment pas et constituent la queue avec le feuillet neutre et la couche de plasma. La queue s'étire à plus de 400 000 km dans la direction opposée au Soleil.

# LE PALEOMAGNETISME

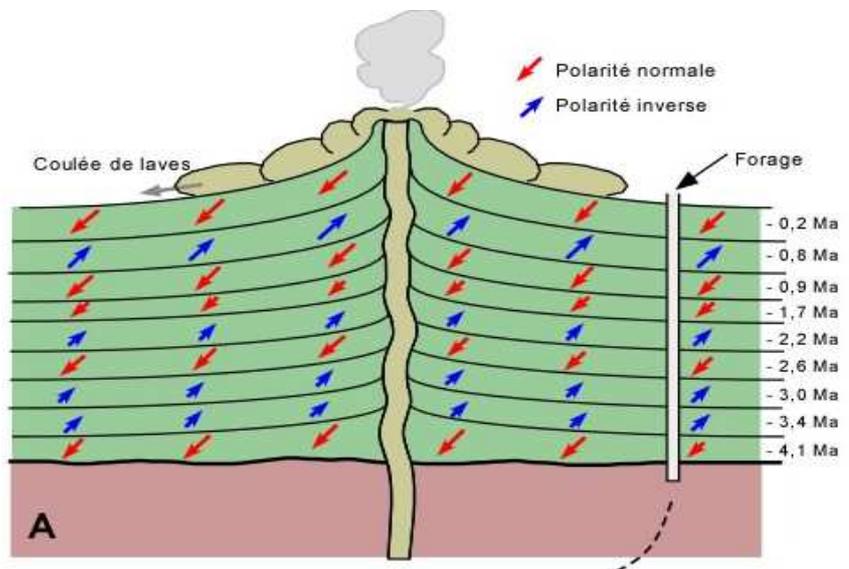
Le physicien napolitain Macedonio Melloni (1853) découvre que chaque roche volcanique possède sa propre aimantation. Il formule l'hypothèse que cette aimantation a été acquise lors du refroidissement de la lave qui enregistre le champ magnétique terrestre de l'époque. Les laves possèdent donc une "mémoire magnétique". Deux chercheurs français, Brunhes (1906) et Mercanton (1910 à 1930), confortent la découverte de Melloni en y apportant les fondements théoriques. Il a cependant fallu attendre l'après-guerre pour voir une utilisation intensive de cette "mémoire magnétique".

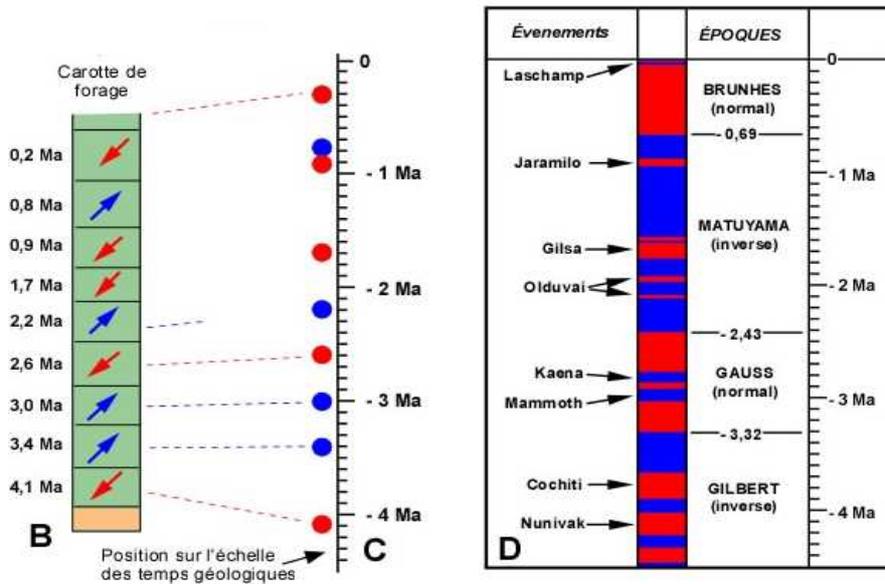


C'est une percée technologique qui a lancé toute l'histoire. En 1952, le physicien anglais Patrick Blackett, prix Nobel en 1948, invente, au cours de recherches sur les relations entre le magnétisme terrestre et la rotation de la terre, le magnétomètre astatique, capable de mesurer des champs magnétiques extrêmement faibles. En 1959, avec ses collaborateurs Keith Runcorn et Ted Irving, il utilise l'appareil pour mesurer la mémoire magnétique des roches ; c'est la naissance d'une discipline qu'on appelle aujourd'hui le paléomagnétisme.

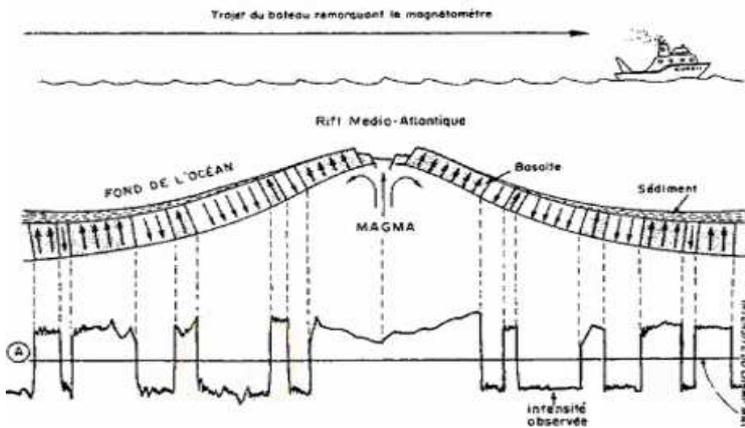


Des mesures faites par carottage dans les couches des éruptions des volcans nous a montré que certaines couches avaient une polarité différente des autres. Ces recherches nous a permis de prouver que le champ magnétique avait changé de sens en fonction du temps, environ tous les 250000 ans.





## DES ANOMALIES MAGNETIQUES SUR LE GLOBE

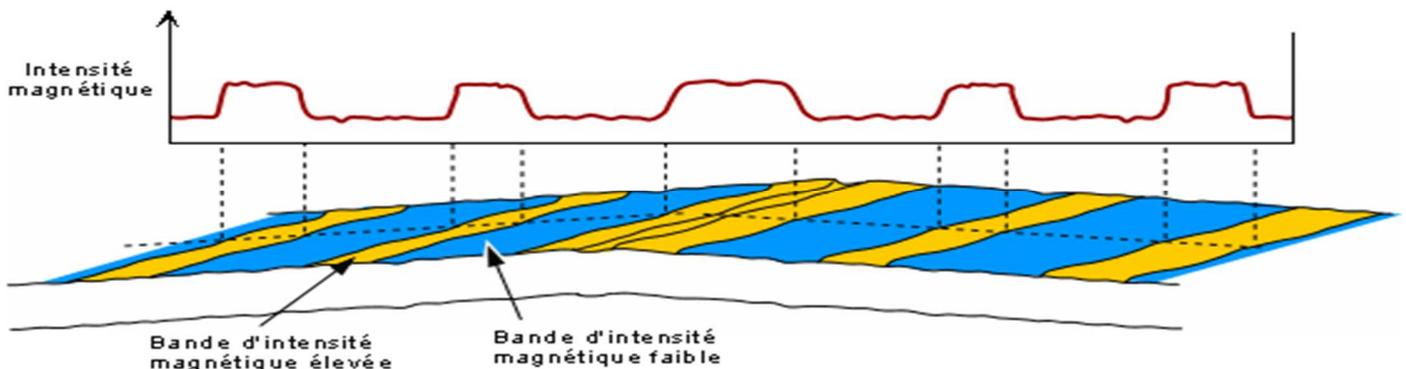


Lors de nombreuses études et principalement lors de l'étude de la tectonique des plaques et des fond océaniques, on s'est rendu compte qu'il y avait quelque chose d'étrange au niveau magnétique au fond des océans. Des inversions.

Pour arriver à montrer ces anomalies, on a accroché derrière des bateaux des magnétomètres qui ont mesuré l'intensité magnétique du fond des océans.

L'étude de l'intensité du champ magnétique nous permet de savoir si le champ magnétique mesuré était le même que celui de nos jours ou s'il était inversé.

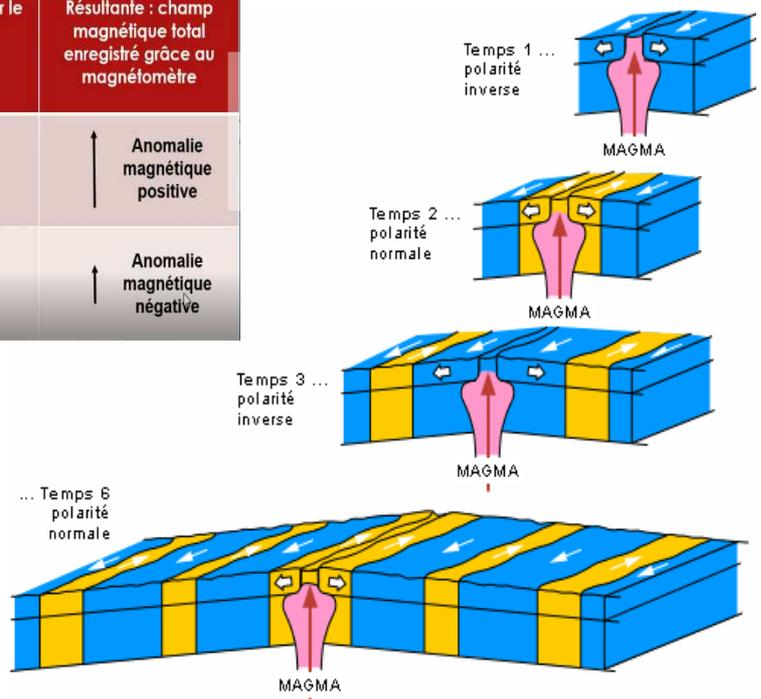
En effet, lors des mesures, si la somme d'un champ fossilisé et du champ magnétique actuel donnent un champ magnétique plus fort que celui actuel, on aura à faire à un champ fossilisé de même sens que celui actuel alors qu'un champ fossilisé inversé ajouté à un champ actuel donnera un champ plus faible.



	Champ magnétique actuel mesuré : période normale (Nord magnétique environ Sud géographique)	Champ fossilisé par le basalte lors du refroidissement	Résultante : champ magnétique total enregistré grâce au magnétomètre
Période normale lors de la formation du basalte	↑	↑	↑ Anomalie magnétique positive
Période inverse lors de la formation d'un basalte	↑	↓	↑ Anomalie magnétique négative

Le fond des océans a été formé par des éruptions successives de volcans. Comme indiqué dans le schéma ci-contre, le magma en remontant a écarté les plaques et a formé différentes bandes au fond de l'océan.

La lave perd son magnétisme lorsqu'elle est liquide. Elle est à nouveau magnétisée par le champ magnétique terrestre du lieu au lors du refroidissement. Chaque bande a ainsi pu mémoriser le champ magnétique ambiant lorsqu'il s'est refroidi.



Cette méthode d'analyse du champ magnétique est utilisée dans le domaine du paléomagnétisme en étudiant par exemple les amphores ou la vaisselle en terre cuite. Comme la lave, elle capte le magnétisme courant lorsqu'elle est cuite et le conserve par la suite.

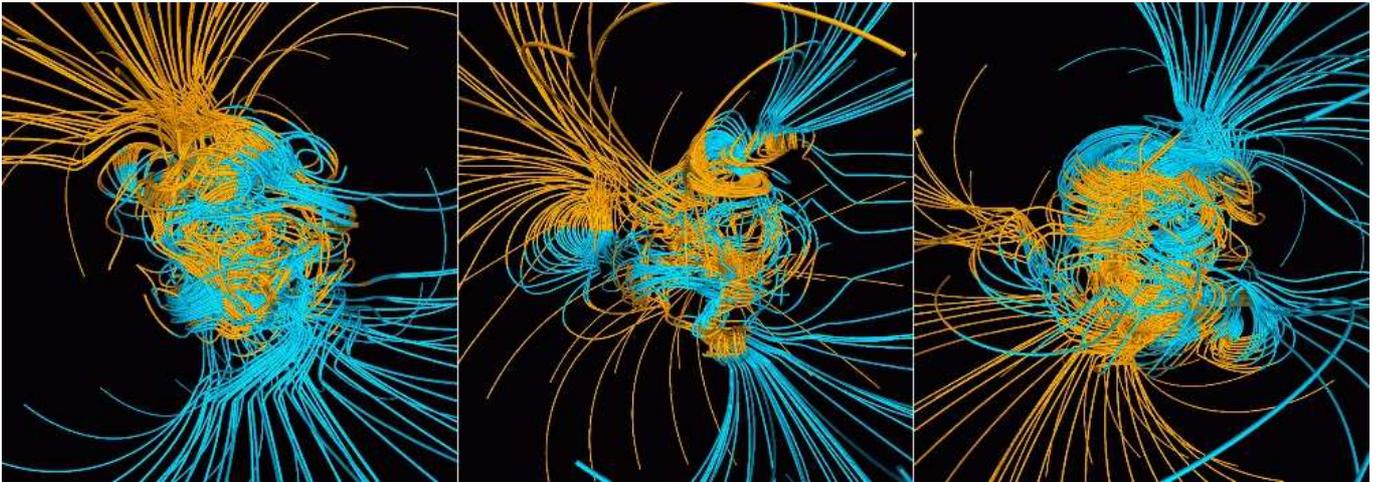
## DECROISSANCE DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Depuis de nombreuses années, on étudie et enregistre des informations concernant l'orientation du champ magnétique terrestre. 300 années de recule nous ont permis de faire ressortir des indications fortes quant à l'évolution plus ou moins proche du champ magnétique actuel.

Depuis plusieurs siècles, la marine est obsédée par les variations du champ magnétique qui jouent sur la position du pôle nord magnétique. Savoir où est le pôle nord magnétique et quel est le décalage entre le pôle nord magnétique et le pôle nord géographique est vital pour un marin qui souhaite se déplacer au travers des océans. Ils ont ainsi répertorié dans les livres de bord de la marine royale la position du nord indiqué par leur boussole en fonction de l'endroit où ils se situaient et ont constaté qu'il y avait des anomalies à certains endroits du globe.

Ainsi, dans l'atlantique sud, on observe un changement brutal de champ magnétique dû à des anomalies magnétiques qui semblent s'amplifier. A priori, les lignes de champ magnétique, au lieu de sortir de la terre y entrent. Ce phénomène nous amène à nous demander si le champ magnétique terrestre va bientôt s'inverser ou si le phénomène d'inversion n'a pas déjà commencé. La dernière inversion des pôles s'est produite il y a 780 000 ans, en quelque sorte, nous serions en retard avec

notre prochain rendez-vous mais on sait que depuis 1840, notre champ magnétique a perdu 10% de son intensité ...



Dans pareil cas, le champ magnétique cesse progressivement d'être dipolaire. A la surface de la terre apparaissent plusieurs pole magnétiques nord et plusieurs pôles magnétiques sud qui vont bouger de manière très compliquée jusqu'à ce que le champ magnétique reprenne son intensité normale. Tous les pole magnétiques nord vont migrer vers le sud et tous les pole magnétiques sud vont migrer vers le nord pour reformer un champ bipolaire Nord-sud.

## POUR CONCLURE

Il me semble aujourd'hui évident que ce phénomène a déjà commencé. Combien de temps l'inversion prendra-t-elle pour être en place. Que se passera-t-il pendant cette période où le champ magnétique sera tellement faible qu'il ne protégera plus la terre des radiations du soleil ? Y aura-t-il plus de cancer, de mutations génétiques sources de nouvelles espèces ? Deviendrons-nous comme Mars, qui suite à la perte de son champ magnétique a perdu son atmosphère, son eau ? Arriverons-nous à nous préparer à un tel phénomène ? Est-ce que les dinosaures pourraient avoir disparu suite à une telle inversion il y a 68 Ma ?

Dans le fond, il reste étonnant qu'en physique fondamentale, personne ne sache aujourd'hui pourquoi l'aiguille de la boussole indique le nord, pourquoi la Terre dispose d'un champ magnétique. On a des idées sur le comment mais aucune sur le pourquoi des choses en géophysique et astrophysique.

L'étude du champ géomagnétique est très complexe et commence seulement à livrer ses secrets.

# *Gaia, La mission spatiale qui dévoile La Voie Lactée en trois dimensions*

*Par Céline Reylé<sup>1</sup>*

Positions en 3D et vitesses de plus d'un milliard d'étoiles : le 25 avril 2018 l'Agence Spatiale Européenne rend public le deuxième catalogue du satellite Gaia. Ces données apportent des contributions importantes à l'astrophysique et à la physique fondamentale et contiennent des informations fondamentales pour notre compréhension de l'Univers. sur des échelles allant du système solaire à la cosmologie. Une révolution du savoir est en cours...

## **La Voie Lactée, galaxie de référence**

Notre Voie Lactée est une galaxie spirale, typique de celles qui peuplent l'Univers. Comme toutes les galaxies, elle s'est formée très tôt après le Big Bang, à partir de fluctuations de densité de l'Univers qui s'amplifient sous l'effet de la gravitation pour donner naissance aux étoiles et galaxies. Ce processus à grande échelle est décrit par la cosmologie standard, qui est dominée par la mystérieuse énergie sombre, une propriété non encore comprise qui accélère l'expansion de l'Univers contre la gravitation, et la non moins inconnue matière noire froide. Le modèle cosmologique inclut également une toute petite fraction de baryons (5%), qui constituent tout ce que nous pouvons décrire par la physique moderne. A l'échelle des galaxies la physique de la matière baryonique devient importante, la formation des étoiles dans le gaz interstellaire, l'évolution des abondances des éléments chimiques, les apports énergétiques liés aux explosions de supernovae et aux trous noirs super massifs, et beaucoup de physique microscopique complexe. De plus, dans une galaxie telle que la Voie Lactée, les instabilités dynamiques génèrent des perturbations gravitationnelles en forme de spirale et de barre qui peuvent éloigner les étoiles de leurs lieux de naissance. Comprendre cet ensemble de processus physiques, en fonction du temps et de l'espace, est un défi pour l'astrophysique moderne.

C'est ici que la Voie Lactée entre en jeu pour nous aider à relever ce défi : ses constituants — disque mince et jeune, disque épais et vieux, bulbe et barre, bras spiraux, ancien halo étendu, petites galaxies satellites — sont les seules parties de l'Univers assez proches pour une analyse détaillée. C'est ici également que l'on peut s'attendre à la découverte d'une nouvelle physique, sachant que nous ne comprenons pas l'essentiel de ce que nous observons.

## **Une moisson de données pour l'archéologie galactique**

L'observation la plus basique du ciel consiste en la mesure du nombre d'étoiles en fonction de leur position et de leur luminosité. Ces comptages montrent que la Voie Lactée est un disque aplati, le Soleil étant situé à l'intérieur de ce disque, plutôt vers le bord externe. Une étude plus détaillée nécessite cependant la mesure des distances, qui ne peuvent être déduites avec précision que de la parallaxe, le déplacement apparent d'une étoile provoqué par le mouvement de l'observateur sur la Terre qui tourne autour du Soleil durant l'année. Cette information dévoile la structure tridimensionnelle de la Galaxie. Lorsque ces observations sont répétées dans le temps, le mouvement intrinsèque que de l'étoile projeté sur la voûte, appelé « mouvement propre », peut être mesuré.

---

<sup>1</sup> Astronome, Observatoire des Sciences de l'Univers de Bourgogne Franche-Comté

L'obtention du spectre de l'étoile fournit enfin la composante de la vitesse sur la ligne de visée, par effet Doppler. Ces six dimensions (la position de l'étoile dans l'espace et les 3 composantes de sa vitesse) permettent d'étudier la structure de la Voie Lactée, et son évolution à travers le mouvement des étoiles.

La spectroscopie peut en outre fournir des informations sur les propriétés des étoiles et les abondances élémentaires chimiques. Les éléments chimiques peuvent être classés en un petit nombre de familles, définies par le processus qui les a créés : le Big Bang (hydrogène et hélium), les réactions nucléaires au cœur des étoiles (carbone, oxygène, fer...), et la spallation des rayons cosmiques (lithium, bore, béryllium). Ainsi la chimie ajoute une information liée à l'époque et au lieu de la formation d'une étoile. Ceci est l'ensemble d'observations potentiellement disponibles pour aborder les études archéologiques de notre Galaxie.

## La mesure de la parallaxe : un défi majeur

Il y a cependant une difficulté technique à surpasser. Les distances des étoiles sont très grandes, et les parallaxes sont très petites (la parallaxe est une mesure d'angle inversement proportionnelle à la distance), si bien que les étoiles ont été décrites comme des astres fixes à travers la majeure partie de l'histoire. Les premières mesures de parallaxe dans la fin des années 1830 confirment la distance très grande mais finie des étoiles et marquent un tournant dans notre conception de la nature des étoiles et de la place que nous occupons dans l'Univers.

L'étoile la plus proche du Système solaire, Proxima du Centaure, située à 4 années-lumière, a une parallaxe de 0,2 millièmes de degré d'arc. Seule une précision de parallaxe proche du milliardième de degré d'arc ( $10^{-9}$  degré) permet de déterminer des distances jusqu'au centre de la Voie Lactée, situé à 30 000 années-lumière. Sur Terre, la précision atteinte est de  $0,3 \times 10^{-5}$  degré, fortement limitée par les effets de distorsion atmosphérique, et la parallaxe n'est mesurable que pour quelques milliers d'étoiles voisines du Soleil. Et bien que tout se déplace dans l'Univers à une très grande vitesse (le Soleil tourne autour de la Voie Lactée à  $230 \text{ km s}^{-1}$ ), il est difficile de mesurer précisément les mouvements propres des étoiles. Ainsi, l'astrométrie depuis l'espace devient incontournable.

## L'astrométrie spatiale, d'Hipparcos à Gaia

Le succès d'une telle mission a été démontré par le satellite Hipparcos de l'Agence Spatiale Européenne, lancé en 1989. Capable de mesurer des angles 100 fois plus petits que depuis le sol, il livre en 1997 un catalogue avec les distances de 120 000 étoiles brillantes. Ce succès a conduit immédiatement à une proposition pour une mission beaucoup plus ambitieuse, qui s'appuie sur les avancées technologiques dans la conception d'engins spatiaux de précision et dans les détecteurs grand format à haut rendement : celui de Gaia possède un million de pixels, le plus grand encore dans l'espace. La promesse de Gaia, mesurer les distances et mouvements propres de plus d'un milliard d'étoiles, avec une précision encore 100 fois meilleure qu'Hipparcos, mène à l'adoption de la mission par l'Agence Spatiale Européenne en 2000.

Tandis qu'Hipparcos avait un programme d'objets à observer établi à l'avance, Gaia fournit un relevé complet et non biaisé, jusqu'à la 20<sup>ème</sup> magnitude. Elle fournit les distributions 3D détaillées et les mouvements spatiaux de toutes ces étoiles. La précision de la mesure est sans précédent (Gaia serait capable de mesurer la taille d'une hypothétique pièce de 1 euro déposée à la surface de la Lune). Cela permet à notre Galaxie d'être cartographiée, pour la première fois, en trois dimensions. Quelque 10 millions d'étoiles seront mesurées avec une précision de distance supérieure à 1%; quelque 100 millions à mieux que 10%. Gaia collecte également des données

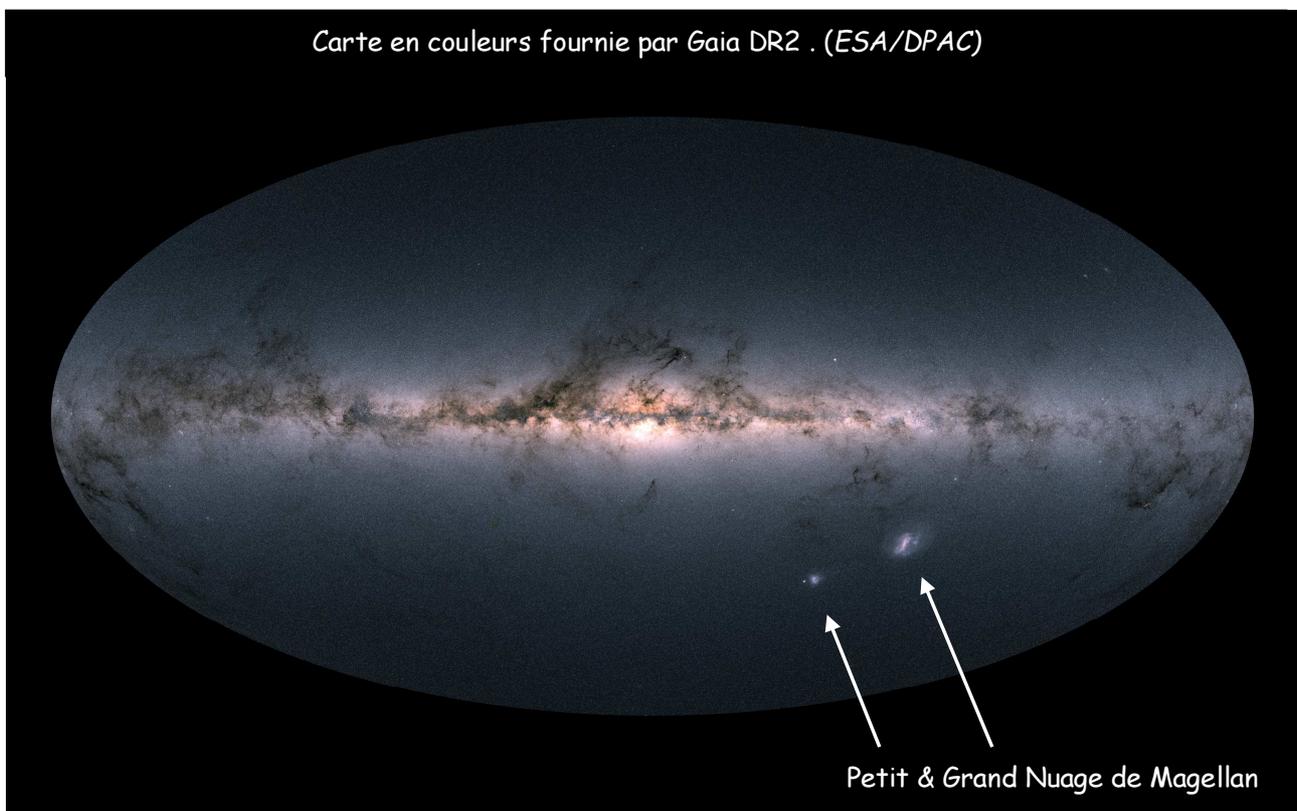
spectroscopiques, permettant de mesurer les vitesses radiales, et des données photométriques mesurant la brillance et la couleur des étoiles grâce à deux spectrophotomètres, l'un rouge, l'autre bleu. Cet ensemble de données, de plus en plus précises au fur et à mesure que la période d'observation augmente, révélera progressivement la carte tridimensionnelle et en mouvement de l'ensemble de notre Voie Lactée et de ses galaxies voisines, ainsi que les propriétés physiques de chaque étoile, comme la luminosité, la température et la composition chimique.

Conçue et construite par un consortium d'industries largement européennes, Gaia continue la tradition de pionnier en astrométrie de l'Europe, en s'appuyant sur l'expertise acquise avec Hipparcos, la première mission d'astrométrie spatiale. Lancée par une fusée Soyouz-Fregat depuis le centre de Kourou, en Guyane, le 19 décembre 2013, elle s'est dirigée vers le point de Lagrange<sup>1</sup> L2 du système Soleil-Terre, à quelque 150 millions de km de la Terre. Après la mise en service en orbite, les opérations scientifiques complètes ont débuté le 25 juillet 2014. La tâche, considérable et complexe, de traitement des données et de préparation de leur publication a été confiée au consortium de chercheurs et d'ingénieurs, appelé Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC), dont fait partie l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Besançon.

## Le cap du milliard d'étoiles franchi

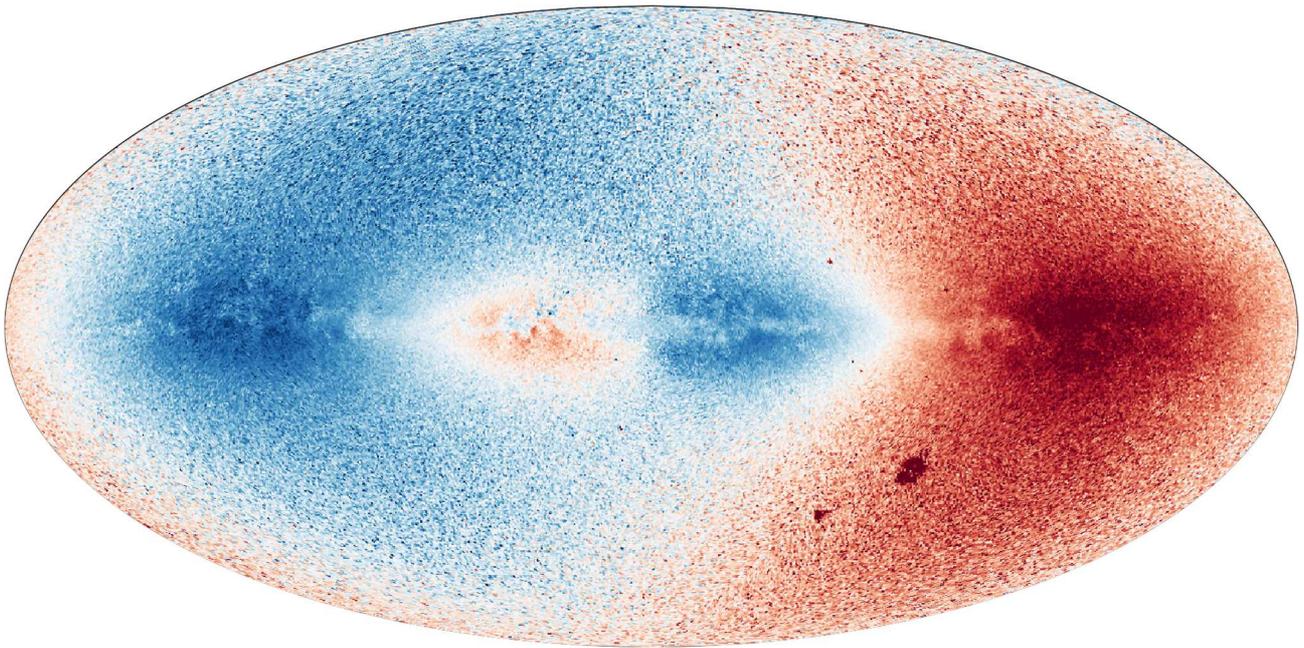
Un traitement et une analyse sophistiquée des 14 premiers mois de données ont déjà permis de construire le premier catalogue Gaia : Gaia DR1 (data release 1), publié le 14 septembre 2016, très exactement 1000 jours après le lancement. Cette première diffusion de données contient les positions de plus d'un milliard d'étoiles ainsi que les distances et les mouvements propres d'un « petit » sous-ensemble de deux millions d'étoiles brillantes. Elle a déjà généré des centaines de publications scientifiques.

Carte en couleurs fournie par Gaia DR2 . (ESA/DPAC)



<sup>1</sup> NDLR : voir schéma des Points de Lagrange en fin d'article.

Le catalogue intermédiaire suivant, Gaia DR2, basé sur les 22 premiers mois d'observations, est publié le 25 avril 2018. Ce deuxième Catalogue Gaia marque une étape majeure car il contient les positions, parallaxes et mouvements propres, ainsi que les luminosités et une mesure de la couleur de chaque étoile pour plus d'un milliard d'étoiles. Autre avancée essentielle : cette deuxième version du catalogue Gaia comprend aussi des vitesses radiales pour plus de sept millions d'étoiles ce qui permet de calculer la vitesse spatiale des étoiles et de voir leurs mouvements en 3D dans la Galaxie. Enfin, Gaia DR2 donne aussi des estimations de la température pour environ 160 millions d'étoiles ; des courbes de lumière pour plus d'un demi-million d'étoiles variables, et l'orbite de plus de 14 000 objets du système solaire, principalement des astéroïdes.



Carte dynamique de la Voie Lactée, obtenue grâce à la mesure des vitesses sur la ligne de visée (par effet Doppler) pour plus de 7 millions d'étoiles. En rouge, les étoiles s'éloignent du Soleil, en bleu, elles s'en rapprochent. On voit le mouvement de rotation d'ensemble de la Galaxie, vu depuis le Soleil : on notera ainsi que les étoiles plus proches du centre vont plus vite que lui et les étoiles plus éloignées, moins vite. (ESA/DPAC)

Les catalogues suivants seront de plus en plus précis pour de plus en plus d'objets et contiendront de plus en plus d'informations. Les précisions ultimes pour la mission nominale ne seront atteintes qu'après un traitement informatique complexe utilisant l'ensemble des premières 5 années d'observation qui seront effectuées par Gaia. C'est pour cette raison que les résultats de la mission nominale ne seront pas disponibles avant 2022. Très attendus par les chercheurs du monde entier pour son formidable potentiel scientifique, ces catalogues représentent des étapes fondamentales pour l'astrophysique.

## Une révolution pour l'astrophysique

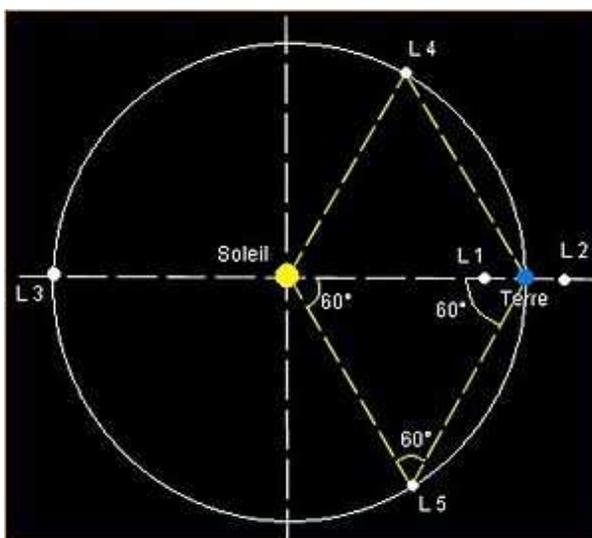
La récolte scientifique résultante de Gaia est d'une étendue et d'une implication presque inconcevables. La vocation première de Gaia est l'étude de la Voie Lactée à travers la mesure des positions, distances, mouvements et propriétés physiques des étoiles avec une précision inégalée. Gaia apporte une moisson inédite d'informations sur notre Galaxie permettant ainsi une étude détaillée de sa structure en trois dimensions, de sa cinématique, de son origine et de son évolution.

Gaia fournira des informations détaillées sur l'évolution stellaire et la formation d'étoiles dans notre galaxie, clarifiera l'origine et l'histoire de la formation de notre Galaxie. Les résultats de Gaia permettent d'identifier précisément les reliques de débris d'accrétion de petites galaxies satellites et de sonder la distribution de la matière noire.



Détection d'exoplanètes. Comme pour toutes les étoiles, il y a deux composantes principales à ce mouvement : un chemin linéaire à travers le ciel causé par le mouvement propre de l'étoile à travers la Galaxie, et une série d'oscillations, provoquées par le mouvement de la Terre autour du Soleil. Chaque oscillation correspond à une année (tireté blanc). De plus, la présence d'une planète en orbite autour de l'étoile perturbe son mouvement, et cette perturbation (en brun) se reflète dans le trajet de l'étoile à travers le ciel. (ESA)

Cette enquête exhaustive inclut naturellement des étoiles exotiques ou dans des phases d'évolution de très courte durée, qui restent à découvrir, ainsi que plusieurs milliers de naines brunes, de naines blanches et des planètes extrasolaires. Les études du système solaire recevront une impulsion massive grâce à l'observation de centaines de milliers de petits corps du Système Solaire, en particulier des astéroïdes géocroiseurs. Enfin, au-delà de la Voie lactée, des milliers de supernovae extragalactiques seront découvertes, des quasars et de nombreuses galaxies lointaines sont observés et apporteront une contribution majeure à la détermination de l'échelle des distances extragalactiques ainsi qu'à la physique fondamentale.



### Les points de Lagrange

A proximité de deux masses en orbite mutuelle (ex : Soleil-Terre) on relève 5 points remarquables présentant une certaine stabilité :

- L1 & L2 de part et d'autre de la plus petite masse (distance à la Terre : environ  $1,5 \cdot 10^6$  km)
- L3 symétrique de la plus petite des deux masses
- L4 & L5 à  $60^\circ$  de part et d'autre de la petite sur son orbite

L1 & L2 sont instables : il n'y a donc pas de corps naturel en ces points mais un engin spatial peut s'y maintenir avec une dépense d'énergie minimum. L1 est idéal pour l'observation permanent du Soleil (ex : SOHO). L2 en « éclipse » solaire permanente est au contraire favorable aux observations du ciel profond avec des instruments à basse température (Ex : Gaia, JWST)

L4 & L5 orbitalement stables voient au contraire la présence de petits corps comme les fameux astéroïdes Troyens à proximité de Jupiter. On connaît un « Troyen » pour la Terre : l'astéroïde 2010 TK7 en L4.