

# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 142 - Juin 2013 7 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 142 - été 2013



ISSN 0758-234X

## Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

### Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker  
Lucienne Gouguenheim  
Georges Paturel

### Bureau du CLEA pour 2011

**Présidente** : Cécile Ferrari  
**Trésorière** : Roseline Jamet  
**Trésorière adjointe** : Sylvie Thiault  
**Secrétaire** : Jean-Luc Fouquet  
**Secrétaire adjoint** : Christian Larcher

### Responsables des groupes

**Vie associative** : Jean-Michel Vienney

**Cahiers Clairaut** : Christian Larcher

**Productions Pédagogiques** : Pierre Causeret

**Communication** : Charles-Henri Eyraud

**École d'Été d'Astronomie** : Danièle Imbault

**Responsables du site** :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud

Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Francis Berthomieu, Élodie Blandin, Nathalie Cartier, Anne-Marie Castagnos, Pierre Causeret, Cécile Ferrari, Olivier Gayraud, Gilbert Greillat, Jean-Jacques Hillairet, Roseline Jamet, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Magnien, Philippe Malburet, Georges Paturel, Jean-Claude Pecker, Frédéric Pitout, Cécile Poujol, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Christiane Vilain.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 142, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

### Image de couverture :

*Photo : Fabien Causeret 1/5000 s 400 ISO*

On dit que Newton, en voyant tomber une pomme d'un arbre, s'est demandé pourquoi la Lune, visible alors dans le ciel, ne tombait pas. Et que la théorie de la gravitation universelle vient de cette simple observation. L'histoire de la pomme a été rapportée après la mort de Newton par William Stukeley, contemporain et biographe de Newton, mais il est fort possible qu'elle ait été inventée ou enjolivée.



# Les Cahiers Clairaut

## Été 2013 n° 142

### Éditorial

Le 13 mai 1713, il y a 300 ans, naissait Alexis Clairaut. J-C Pecker nous convie, dans ce numéro, à découvrir Clairaut « père de l'optique moderne ». Il nous montre comment, en suivant une méthode systématique, que l'on pourrait qualifier de nos jours d'investigation, il parvint à fabriquer des objectifs achromatiques pour équiper les lunettes astronomiques. Il conjugue ainsi aspect historique et démarche scientifique.

Lors de l'apparition, au printemps 1978, du premier numéro des Cahiers Clairaut, l'équipe de rédaction justifiait le choix du titre de notre revue en indiquant que : « ce jeune mathématicien génial, entré à 18 ans à l'Académie des Sciences, eut tôt fait d'y défendre les idées de Newton contre les tenants attardés de la physique des tourbillons ».

Dans l'article de Cécile Poujol, vous verrez comment Voltaire combattait, comme Clairaut les idées de Descartes..

À la même époque, mais de l'autre côté de la Manche les théories de Newton sur la gravitation permettaient de rendre compte non seulement de la forme de la Terre mais également du « mouvement de chute » de la Lune. Comme le dira Paul Valéry bien plus tard, « Il fallait être Newton pour apercevoir la Lune tomber sur la Terre quand chacun voit bien qu'elle ne tombe pas » !

Depuis Newton, les scientifiques ont déployé des trésors d'ingéniosité pour déterminer la valeur de la constante de gravitation G avec précision, comme vous le verrez dans l'article de G. Paturel.

Les élèves ont toujours des difficultés à concevoir l'impesanteur ; O. Gayraud analyse leurs conceptions initiales et propose une façon de les aider à s'approprier une théorie scientifique plus pertinente. La notion d'impesanteur est ensuite détaillée avec en particulier des propositions d'expériences.

Enfin, de façon très opportune, C. Vilain présente une réflexion sur la validité des principes physiques en s'appuyant sur les travaux d'Henri Poincaré qui compare la science à un « animal qui mue, brise sa carapace trop étroite et s'en fait une plus jeune ».

Par ailleurs, nous arrivons au maximum d'activité théorique du Soleil (cycle 24). Nous devrions donc assister à de magnifiques aurores boréales. Pour mieux comprendre le mécanisme de ce phénomène vous découvrirez une étude passionnante de F. Pitou qui nous explique le mécanisme de couplage entre le vent solaire et la magnétosphère. Il détaille le phénomène complexe mais nettement mieux connu de « reconnexion magnétique ».

Christian Larcher, pour l'équipe.

### Histoire

#### Clairaut opticien

Jean-Claude Pecker p 2

### Article de fond

#### L'exploration de Mercure : le paradoxe de l'humidité

Cécile Ferrari p 5

### Thème : LA GRAVITATION

#### Texte de Newton

p 8

### Avec nos élèves

#### Conceptions initiales sur l'impesanteur

Olivier Gayraud p 9

### Article de fond

#### Qu'est-ce que l'impesanteur

Christian Larcher p 11

### Histoire

#### Voltaire au cœur d'une controverse du XVIII<sup>e</sup> siècle : des tourbillons de Descartes à la gravitation de Newton.

Cécile Poujol p 15

### Le coin des petits curieux

#### Comment se fait-il que les hommes qui sont de l'autre côté de la Terre ne tombent pas ?

Jean Ripert p 21

### Article de fond

#### Mesure de la constante de gravitation

Georges Paturel p 23

### Article de fond

#### La relation Soleil-Terre : plasma et reconnexion magnétique

Frédéric Pitout p 28

### Ciel d'été

Pierre Causeret p 33

### Histoire

#### « Nos principes physiques sont-ils vrais ? » : Poincaré

Christiane Vilain p 34

### Colloque lexis Clairaut

p 36

### Lecture pour la marquise

Et si le temps n'existait pas p 37

Pierre Magnien

Observatoire de Paris p 38

Georges Paturel

### Témoignage

Élodie Blandin p 39

### Vie de l'association

Stage Bordeaux

Roseline Jamet p 40

## CLAIRAUT L'OPTICIEN

Jean-Claude Pecker, astrophysicien, membre de l'Académie des sciences,  
président d'honneur du CLEA

À travers les Cahiers Clairaut, le CLEA continue à fêter le tricentenaire de la naissance d'Alexis Clairaut.

Dans une précédente livraison des *Cahiers Clairaut* (CC141, p 2), nous avons retracé les grandes lignes de la vie de l'homme protéiforme que fut Alexis Clairaut. Sa contribution à l'optique des objectifs achromatiques est considérable. Elle tient dans trois mémoires (*Histoire et Mémoires de l'Académie des sciences*, 1756, p.380-437, 1757, p. 524-550, 1762, p. 578-631). La justification de ses travaux est claire ; il l'exprime au début de son premier mémoire: « *Tout le monde sait que les télescopes Newtoniens ont, à même longueur, un avantage immense sur les Lunettes d'approche ordinaires; on sait de plus, pour peu que l'on ait de connoissance dans l'Optique, que cet avantage vient de ce que le miroir de métal qui sert d'objectif aux premiers réunit dans le même foyer les rayons de toutes les couleurs qui composent les faisceaux de lumière, pendant que dans les autres l'objectif qui est de verre & agit par réfraction, donne un foyer particulier pour chacune de ces couleurs* ». Autrement dit, une optique ordinaire est « chromatique », l'indice de réfraction du verre étant différent d'une « couleur » (une « longueur d'onde », dirait-on aujourd'hui) à l'autre. Le violet, le bleu sont plus déviés que le jaune, que le rouge... La figure 1 illustre cette propriété. C'est donc à la recherche de l'« achromatisme » que va s'intéresser Clairaut pendant quelques années, non sans s'être tenu au courant des recherches effectuées dans le même but par d'autres chercheurs européens.

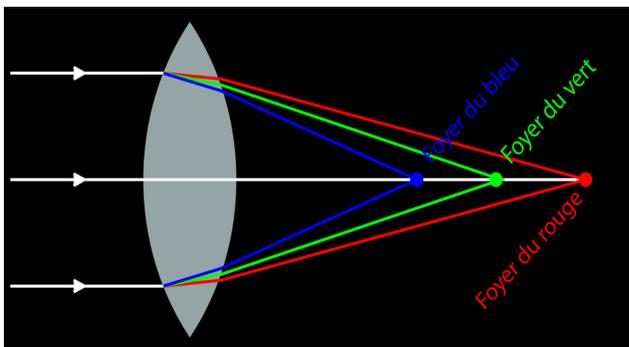
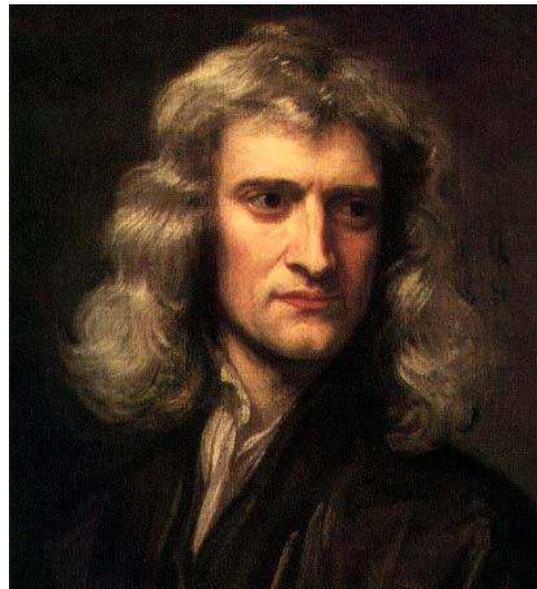


Fig.1. Chromatisme d'une lentille

### Les pionniers : Newton, Hall, Euler, Dollond, Klingersterna

Les années 1750-1760 ont vu le développement, en plusieurs lieux européens, des efforts vers l'achromatisme des optiques. Il semble que ce soit Chester Moore Hall (1703-1771) juriste britannique qui ait inventé les premières lentilles achromatiques en 1729 ou 1733, et qui les ait utilisées pour fabriquer la première lunette astronomique sans aberrations chromatiques. Nous n'en savons guère plus.



Newton

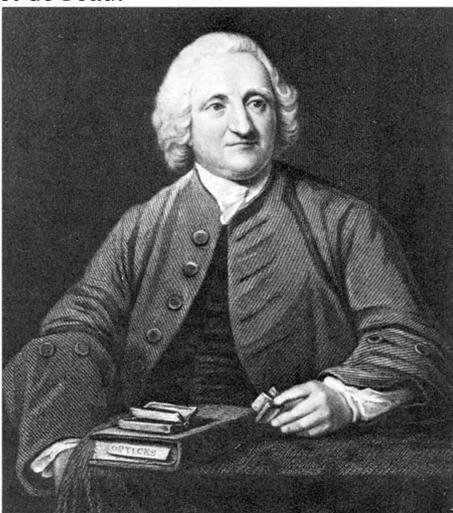
Newton avait bien mis en évidence l'inégale réfrangibilité des rayons de différentes couleurs. Dans le cadre de la théorie newtonienne qui admet que les faisceaux de lumière sont constitués de "grains de lumière", Clairaut s'avance d'ailleurs dans une réflexion qu'il appelle « métaphysique » (nous dirions sans doute plutôt « phénoménologique ») ; et il associe la déviation des rayons lumineux par la traversée du verre à l'attraction exercée par la matière sur ces grains. Il attribue à la différente réfrangibilité des différentes couleurs au

fait que cette attraction dépend de la vitesse des grains, et que cette vitesse n'est pas la même pour différentes couleurs. Une telle conception, dont nous savons qu'elle est erronée, ne joue cependant aucun rôle dans les travaux quantitatifs qu'entreprendra Clairaut par la suite.



*Euler*

Dès 1747, le mathématicien suisse Leonhard Euler (1707-1783) imagina de fabriquer des objectifs avec deux matières différemment réfringentes, avec l'espoir qu'elles pourraient se compenser mutuellement. Il envisageait des combinaisons formées de deux lentilles de verre non accolées, et contenant de l'eau entre elles. Les calculs d'Euler fournissent une solution mathématique de qualité, mais non réaliste, compte tenu des indices de réfraction réels des verres et de l'eau.



*Dollond*

L'opticien érudit anglais John Dollond (1706-1781) de Londres, où son fils Peter allait installer en 1750 des ateliers d'optique, se mit alors à réfléchir à ces questions. Dès la parution du mémoire d'Euler, il s'était rendu compte que les courbures calculées par

Euler pour ses lentilles n'étaient guère réalistes. Il substitua aux lois de la réfraction supputées par Euler celles qu'Isaac Newton (1643-1727) avait établies par la mesure. Mais cela ne permettait d'aboutir à un achromatisme parfait qu'à l'infini !

Le débat entre Euler et Dollond se poursuivit, ce dernier opposant les expériences de Newton aux calculs d'Euler. Clairaut, ayant examiné les éléments de la dispute, se range du côté de Dollond pour la valeur des indices de réfraction, mais reste admiratif de l'approche analytique d'Euler.



*Klingenstierna*

En 1755, un astronome suédois de l'Université d'Upsal aujourd'hui Uppsala), Samuel Klingenstierna (1698-1765) fait communiquer ses résultats<sup>1</sup> à Dollond comme à Clairaut, et montre clairement que les expériences de Dollond étaient à refaire.

Ce que fit Dollond illico.

Il commença par construire des prismes d'eau à inclinaison variable, constitués de deux plaques de verre, enfermant de l'eau ; lorsqu'elles sont accolées à un prisme de verre, une telle combinaison permet de voir des images dont l'irisation dépend de l'angle du prisme d'eau. Mais en construisant des objectifs à partir de cette idée, il se heurta aux mêmes difficultés que celles qu'il avait reprochées à Euler. Dollond cependant savait qu'il existe des verres dont les propriétés réfringentes étaient très différentes de celles des verres « ordinaires » qu'il utilisait. Ainsi utilisa-t-il deux verres, le « crystal d'Angleterre » ou « flintglass » (aujourd'hui, nous disons simplement le « flint »), dont la réfrangibilité dans le rouge diffère le plus de celle du violet, et le

<sup>1</sup> Via un savant voyageur suédois du nom de Ferner.

« crown glass » (ou « crown »), un verre verdâtre, qui donne la moindre différence de réfrangibilité. Il expérimenta avec des prismes de flint et de crown accolés, jusqu'à trouver une combinaison quasiment achromatique ; puis en associant une lentille de « crystal » concave à une lentille convexe de verre commun, ou de crown. Mais la courbure des lentilles était trop forte et les aberrations géométriques étaient encore insupportables. Et c'est à ce point que l'intervention de Clairaut l'analyste fut décisive.

## La méthode de Clairaut

Clairaut commence par une expérimentation systématique, en utilisant des verres différents et des prismes d'angles variés, afin de déterminer, pour chaque « couleur », les indices de réfraction. Et c'est ensuite une série d'équations, où ces indices serviront de coefficients, et où les inconnues seront d'abord les angles des prismes à associer. Dans un second temps, les inconnues seront les courbures des deux lentilles à associer, donc la distance focale de chacune d'elles pour chaque couleur, soit quatre inconnues. Lorsque l'on impose aux deux lentilles d'être précisément accolées, la courbure des deux faces accolées des deux lentilles doit être la même, et il y a donc seulement 3 inconnues. Le fait de se donner une distance focale pour une couleur « moyenne », le jaune par exemple, donne une équation. Le fait d'imposer au système d'avoir pour deux autres couleurs (violet et rouge) cette même distance focale, fournit les deux autres équations, et l'on peut en principe résoudre le système. Cela assurera un chromatisme approximatif. Il faut accepter que, pour le bleu, le vert et l'orange le système aura des foyers différents, - mais peu différents - si bien que l'irisation des images sera presque parfaitement supprimée.

Clairaut appliquera les lois de Descartes, alors bien connues et acceptées.<sup>2</sup> Il suppose d'abord que l'angle d'incidence sur chacune des surfaces traversées par la lumière soit « petit » autrement dit que l'on travaille au voisinage de l'axe optique du système optique envisagé, si bien que les lois de Descartes, où interviennent les sinus de ces petits angles, en deviennent faciles à appliquer, en raison des approximations de bonne qualité alors possibles.

Grâce à un exercice systématique, utilisant divers couples de verres, tantôt le verre commun avant le flint, tantôt l'inverse, Clairaut propose donc, comme

<sup>2</sup>  $\sin(\alpha_{\lambda 1}) = n_{\lambda} \sin(\alpha_{\lambda 2})$ , où  $\alpha_{\lambda 1}$  représente l'angle d'incidence,  $\alpha_{\lambda 2}$  l'angle d'émergence dans le second milieu, et  $n_{\lambda}$  l'indice de réfraction pour la couleur de longueur d'onde  $\lambda$ .

en se jouant, plusieurs combinaisons achromatiques possibles; et surtout il montre comment il est possible d'en construire d'autres.

Dans une ultime étape, Clairaut résout les équations lorsqu'on se trouve loin de l'axe optique du système, lorsque l'angle d'incidence est élevé, et lorsqu'on utilise non plus deux mais trois lentilles. Ce qui est admirable lorsqu'on lit les trois gros mémoires de Clairaut c'est la façon dont, ayant assuré lui-même la détermination expérimentale des indices de réfraction, il a su tout ramener à des problèmes de géométrie qu'il s'est ingénié à résoudre par des méthodes analytiques. Cette méthode très complète fait de Clairaut le père de l'optique d'aujourd'hui.

## Après Clairaut

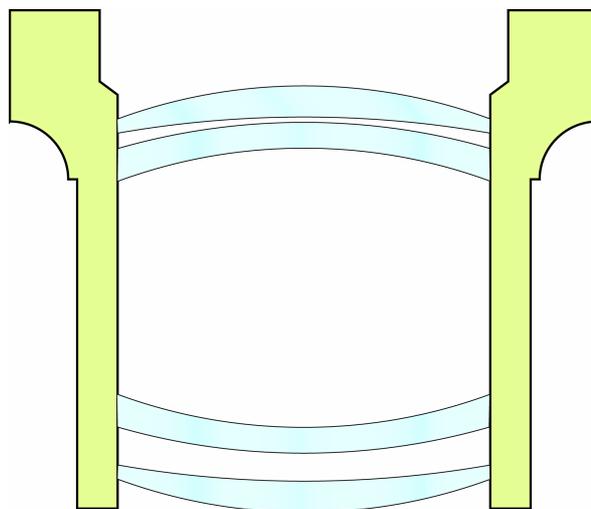


Fig.2. Objectif achromatique de Clark.<sup>3</sup>

Clark proposa en 1889 deux doublets symétriques dans lesquels les deux lentilles sont bien séparées. En général la lentille convergente est en crown et la divergente en flint.

La descendance de Clairaut est donc innombrable. Les fabricants de lunettes astronomiques comme ceux des objectifs utilisés en photographie et en cinématographie, n'utilisent plus seulement deux ou trois verres, crown, « verre ordinaire », et flint, mais plusieurs, quatre, cinq, plus, pour encore améliorer l'achromatisme. Les aberrations géométriques sont aussi corrigées, et l'optique d'aujourd'hui a une qualité que l'on n'espérait pas au temps de Clairaut. Il n'en reste pas moins que c'est son travail de pionnier qui a permis les superbes optiques modernes. ■

<sup>3</sup> Cette figure est inspirée de l'ouvrage "Conception et construction de télescopes et astrographes amateurs", De Boeck publ., Bruxelles, 2012, sous la direction de Charles Rydel, dont le chapitre 3 décrit de nombreux objectifs achromatiques ou "achromats".

# ARTICLE DE FOND

## L'exploration de Mercure : le paradoxe de l'humidité

Cécile Ferrari, université Paris Diderot

*Cet article lève le voile sur un aspect apparemment paradoxal : comment une planète aussi proche du Soleil que Mercure peut-elle contenir de la glace d'eau ? Dans le cadre scolaire nous avons la une belle illustration de la démarche scientifique.*

La sonde MESSENGER (acronyme pour Mercury Surface, Space ENvironment, GEOchemistry and Ranging) de la NASA a été mise en orbite autour de Mercure le 18 mars 2011 après sept ans de voyage. Autant que la sonde CASSINI pour rejoindre Saturne à plus d'un milliard de kilomètres de nous. Étonnant pour cette planète voisine, pourtant dix fois plus proche.

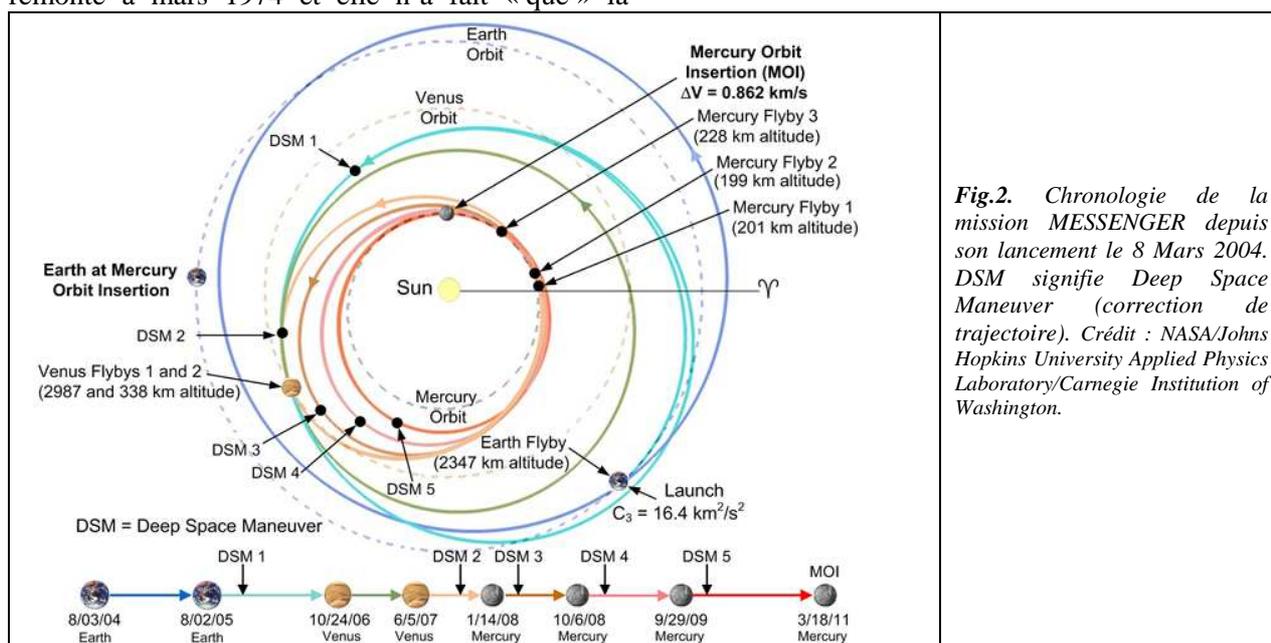


**Fig.1.** Vue d'artiste de la sonde MESSENGER survolant le cratère Calvino, coloré en orange. L'image de la planète, aux couleurs exagérées ici, a été obtenue lors du survol de 2008. Crédit : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

La dernière mission vers Mercure, Mariner 10, remonte à mars 1974 et elle n'a fait « que » la

survoler à trois reprises. MESSENGER est la première sonde mise en orbite autour de Mercure. Aller sur Mercure n'est en effet pas une sinécure.

Une sonde envoyée depuis la Terre, qui tourne à une vitesse de 30 km/s autour du Soleil, doit gagner énormément de vitesse pour rattraper Mercure, qui elle avance à près de 50 km/s de moyenne. Juste échappée de l'attraction terrestre et satellite du Soleil, elle doit pouvoir « rattraper » Mercure dans sa course folle, le long d'une trajectoire propice à sa capture (figure 2). Une telle accélération a réclamé pour MESSENGER un survol de la Terre, deux survols de Vénus (2006-2007) et trois survols de Mercure (2008-2009). Trois années d'approche donc, pour prendre la bonne vitesse et le bon angle d'arrivée et assurer la capture. Ici pas d'aérofreinage possible, mais beaucoup de carburant pour le freinage, 600 kg d'hydrazine et tétraoxyde d'azote, plus de la moitié de la masse de la sonde. L'exploration très limitée alors de la planète témoigne de la difficulté à réaliser cette satellisation. La mise en orbite n'est pas la seule difficulté à surmonter pour le succès d'une telle mission. La sonde MESSENGER est aussi une nouvelle perle technologique.



**Fig.2.** Chronologie de la mission MESSENGER depuis son lancement le 8 Mars 2004. DSM signifie Deep Space Maneuver (correction de trajectoire). Crédit : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

La température augmente à cette distance du Soleil... Pour embarquer tout le carburant nécessaire, elle a été construite en graphite composite afin de minimiser sa masse structurelle et sa charge utile. Par ailleurs, elle s'abrite derrière un bouclier thermique de céramique très réfléchissante et de Kapton pour s'isoler de températures maximales de l'ordre de 400 °C et pour travailler à 20 °C sans pour autant rôtir sous le rayonnement de la planète située sous elle. Tout est conçu pour évacuer la chaleur à tout endroit de la sonde. Au cours d'une orbite de 12 h, le temps passé à basse altitude sera limité à 25 min.

Ce n'est donc pas par manque d'intérêt scientifique que le terrain a été abandonné pendant des décennies. La sonde embarque toute une batterie d'instruments pour répondre aux grandes questions scientifiques : que nous apprend Mercure sur la formation des planètes telluriques ? Quel est le scénario le plus plausible de sa formation ? Au vu de sa surface très cratérisée, Mercure a très vraisemblablement préservé un enregistrement plus complet des premières étapes de la formation de sa croûte alors que Vénus, la Terre et Mars ont à l'évidence subi une altération et un resurfaçage importants depuis. Programme scientifique : comprendre la masse volumique étonnante de Mercure (5,4 g/cm<sup>3</sup>), effectuer la cartographie géologique globale de la planète et comprendre son histoire géologique, observer le champ magnétique de la planète et comprendre pourquoi les planètes telluriques sont si différentes à cet égard, caractériser l'exosphère, déterminer la nature du matériau brillant observé par radar aux pôles de Mercure et déterminer la stabilité éventuelle de la glace d'eau à l'ombre permanente des cratères polaires.

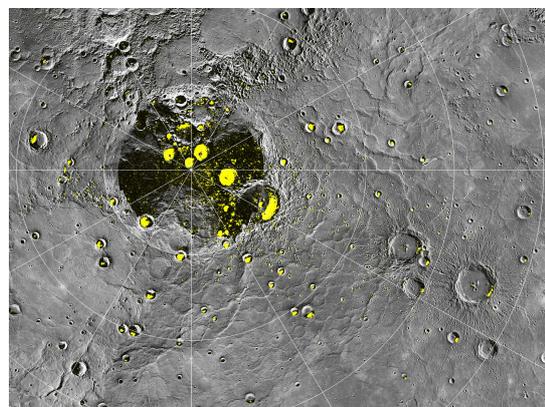
En effet, il y a vingt ans, on a découvert aux pôles Nord et Sud de Mercure la présence de taches très réfléchissantes des impulsions radar envoyées par les antennes radio de Goldstone (Californie), du Very Large Array (Nouveau Mexique) et d'Arecibo (Porto-Rico). À l'aube des années 2000, l'amélioration de ces techniques d'observation permet de résoudre des détails de l'ordre du kilomètre dans ces régions (figure 3). On constate que les zones de haute réflectivité radar sont situées à des latitudes supérieures à 70° N. Cette haute réflectivité, caractéristique des satellites glacés de Jupiter et de la calotte polaire martienne Sud, a alors été interprétée comme l'évidence de la présence de glace d'eau aux pôles de Mercure. Une surprise évidemment pour une planète si proche du Soleil et donc apparemment trop chaude pour maintenir de l'eau à l'état de glace.

En effet, un calcul simple de bilan d'énergie peut aider déjà à estimer une température moyenne attendue à la surface de Mercure, dite température d'équilibre. La puissance solaire totale reçue par m<sup>2</sup> à la distance de Mercure est :

$F_D = L_S / 4\pi D^2 = 8\,950 \text{ W/m}^2$  où  $D = 0,39 \text{ UA}$ , i.e.  $0,39 \times 150 \times 10^9 \text{ m}$  et la luminosité solaire :

$L_S = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}$ , sachant que l'orbite de Mercure est très excentrique ( $e = 0,206$ ), sa distance au Soleil variant entre 0,30 et 0,47 UA. Si tout ce flux absorbé par la surface apparente de la planète de rayon  $R$  vue par le Soleil (c'est-à-dire  $\pi R^2$ ), est réémis par toute la surface ( $4\pi R^2$ ) alors la température d'équilibre  $T$  de la surface ainsi définie est  $T = (F_D / 4\pi)^{1/4} = 446 \text{ K}$ , i.e. 173 °C suivant le bilan d'énergie et la loi de Stefan :

$\pi R^2 F_D = 4\pi R^2 \sigma T^4$  où  $\sigma$  est la constante de Stefan.



**Fig.3.** La meilleure image à haute résolution de la région polaire Nord de Mercure faite par le radiotélescope d'Arecibo superposée en jaune à une mosaïque d'images noir et blanc faites par la caméra grand angle WAC-MDIS (Mercury Dual Imaging System) de la sonde MESSENGER. Les taches radar brillantes (jaune) correspondent aux zones à l'ombre vives dans les images (noir), ce qui est compatible avec la présence éventuelle de glace d'eau dans les zones d'ombre permanente au pôle. La mosaïque d'images est représentée en projection stéréographique avec un cercle tous les 5° de latitude (environ 213 km) et un secteur de longitude tous les 30°. Le 0° de longitude est dans la direction du bas de l'image. (Crédit : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington).

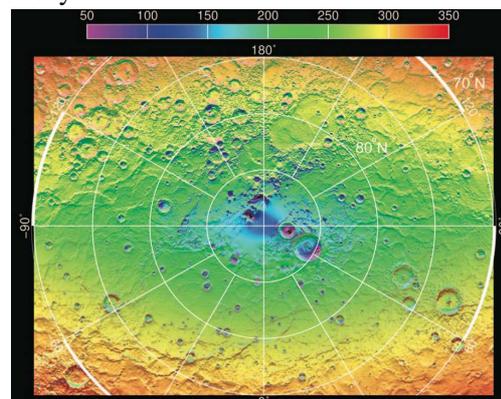
À cette température, la glace d'eau ne peut évidemment pas être stable. Plus exactement, son taux d'évaporation est trop fort pour qu'elle puisse rester à la surface. Mercure ne possédant qu'une exosphère, c'est-à-dire une atmosphère extrêmement ténue dont la pression vaut environ  $P = 10^{-14}$  atm, la glace d'eau ne peut être stable à sa surface que pour des températures de l'ordre de 100-110 K, i.e. -173 à -163 °C. Stable signifie ici présente sur des échelles de temps comparables à l'âge du Système Solaire. Nous préférons en effet faire l'hypothèse qu'elle est là depuis longtemps et non juste au moment où nous sommes en mesure de la détecter pour éviter une vision trop anthropocentrique

du phénomène. À une température donnée, la vapeur d'eau et la glace d'eau sont à l'équilibre à une pression appelée pression de vapeur. Le taux d'évaporation est directement proportionnel à cette pression et inversement proportionnel à la température. De fait c'est une grandeur extrêmement sensible à la température et elle peut varier d'un facteur 1 million (6 ordres de grandeur) lorsque la température varie de 100 K à 120 K (de -173 °C à -153 °C). Les calculs thermodynamiques montrent que l'on peut évaporer un mètre d'épaisseur de glace d'eau en 1 milliard d'années si la température est de 110 K. On en évapore 1 km d'épaisseur dans le même temps si la température augmente seulement de 10 K ! Avec cet éclairage, on comprend mieux d'ailleurs la fonte accélérée de nos propres calottes polaires avec quelques dixièmes de degré d'augmentation de température moyenne. Un apport plus récent de glace doit pouvoir, si tel est le cas, compenser en quantité ou en régularité cette évaporation. Il est aussi envisageable qu'une glace délivrée ici il y a longtemps soit à l'abri sous une couche de poussière de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur et puisse ainsi être stable à l'échelle de milliards d'années dans des zones un peu plus tempérées. La source d'eau est effectivement très probablement exogène, d'origine cométaire. Il n'est en effet pas envisageable que l'eau ait été agglomérée sur place dans la nébuleuse au moment de la formation de la planète, du fait de la trop forte température ambiante.

Peut-on trouver à la surface de Mercure des températures de l'ordre de 100 K ? Tout dépend de l'élévation locale du Soleil. À l'équateur sûrement pas, aux latitudes septentrionales peut-être. Les fonds de cratères situés aux pôles et référencés comme très réfléchissants aux ondes radar, ont de fortes chances de ne jamais voir un rayon de Soleil. En effet, étant donnée la faible inclinaison de l'axe de rotation de Mercure par rapport au plan de son orbite, quelles que soient les saisons, et sa stabilité attendue sur quelques milliards d'années, l'éclairage du Soleil y est rasant. Il n'existe hélas pas de mesures détaillées de la température de la surface de Mercure qui nous permettent de faire la corrélation directe entre d'éventuelles très basses températures aux pôles et les zones réfléchissantes au radar. La seule manière d'appréhender les températures possibles est de les calculer. Les observations avec les caméras donnent les conditions d'illumination annuelles et les mesures altimétriques laser fournissent une topographie des terrains cratérisés qui détaille la forme des cratères. Seul un modèle thermique supposant la composition et la structure du régolithe recouvrant ces terrains est alors apte à estimer, à partir de ces observations, la température dans les cratères en prenant en compte leur latitude, leur diamètre et leur forme.

Un tel modèle a récemment permis de calculer au pôle

Nord de Mercure les températures maximales annuelles et les moyennes annuelles (figure 4). Il prédit qu'en dessous de 83° de latitude Nord, la glace d'eau n'est stable que si elle est enfouie sous une couche de 10 cm de poussière de régolithe non glacé. À plus hautes latitudes, les grands cratères d'impact sont suffisamment froids pour maintenir en surface de la glace d'eau. La grande majorité des endroits où la température moyenne annuelle est de moins de 100 K est brillante en radar alors que lorsqu'elle dépasse 100 K, on n'y trouve pas de dépôt brillant en radar. Ceci suggère donc bien que les taches radar sont dues à la présence d'une espèce volatile qui n'est pas stable au-dessus de 100 K, donc très probablement de la glace d'eau. C'est le cas des grands cratères Kandinsky ou Prokofiev.



**Figure 4** – Carte de température moyenne biannuelle du pôle Nord de Mercure calculée par Paige et collaborateurs (DOI : 10.1126/science.1231106) à partir des cartes topologiques de l'altimètre laser MLA et des conditions d'illumination déterminées par les caméras MDIS embarqués sur la sonde MESSENGER. C'est la température à 2 cm de profondeur, considérée comme une bonne approximation de la température constante sous la surface. Les couleurs codent la température en kelvin. On reconnaît le plus gros cratère de la région, nommé Prokofiev, à 86° de latitude Nord, et son voisin nommé Kandinsky.

Cependant il a été aussi montré que les spots radar pouvaient aussi être associés à des terrains plus sombres que la réflectance moyenne de la surface. Ces dépôts sombres seraient dus à des dépôts organiques plus réfractaires que la glace d'eau, directement déposés là, en même temps que l'eau, dans un même processus ou bien formés in situ par une synthèse organique à basse température. Cette couverture permettrait de protéger la glace d'eau en profondeur sous une couche de matériau organique plus chaude, localement suffisamment fine pour rester transparente aux ondes radar. Cette interprétation pointerait directement les comètes comme source de ces dépôts polaires.

La baisse de température aux pôles est donc propice au maintien d'une humidité séculaire, empreinte mesurable du possible apport d'eau cométaire sur les planètes telluriques. Paradoxalement sur la planète la plus proche du Soleil. ■

# THÈME : LA GRAVITATION

40

## PRINCIPES MATHÉMATIQUES

Comment M. Newton est parvenu à découvrir que la force attractive de la terre suit la même proportion.

Tous les corps qui tombent ici-bas parcourent, selon la progression découverte par *Galilée*, des espaces qui sont comme les quarrés des tems employés à tomber.

On connoît la distance moyenne de la Lune à la terre qui est de 60 demi diamètres de la terre en nombres ronds, & tous les corps d'ici-bas sont censés à un demi diamètre du centre de la terre; donc si la même force fait tomber les corps & circuler la Lune dans son orbite, & si cette force décroît comme le quarré de la distance, elle doit agir 3600 fois plus sur les corps placés à la surface de la terre que sur la Lune, puisque la Lune est 60 fois plus éloignée qu'eux du centre de la terre; on connoît l'orbe de la Lune puisqu'on connoît à présent la mesure de la terre, on sçait que la Lune employe 27 jours 7 heures 43' à parcourir cet orbe, on connoît par conséquent l'arc qu'elle parcourt en une minute; or par le Cor. 9. de la Prop. 4. on voit que l'arc décrit en un tems donné par un corps qui tourne d'un mouvement uniforme & avec une force centripète donnée dans un cercle est moyen proportionnel entre le diamètre de ce cercle & la ligne dont ce corps est descendu vers le centre dans le même tems.

Il est vrai que la Lune ne décrit pas exactement un cercle autour de la terre, mais on peut le supposer dans le cas dont il s'agit sans erreur sensible, & cette supposition faite, on trouve alors que la ligne qui exprime la quantité dont la Lune est tombée vers la terre en une minute par la force centripète est de quinze pieds en nombres ronds.

Or la Lune, selon la progression de *Galilée*, parcoureroit dans le lieu où elle est, 3600 fois moins d'espace en une seconde qu'en une minute, & les corps qui sont à la surface de la terre parcourent, selon les expériences des pendules qu'on doit à M. *Hughens*, 15 pieds environ en une seconde, c'est-à-dire, 3600 fois plus d'espace que la Lune, donc la force qui les fait tomber agit 3600 fois plus sur eux que sur la Lune, ce qui est précisément la proportion des quarrés de leurs distances.

On

Une page clef des « Principes mathématiques de la philosophie naturelle »  
Par Isaac Newton – commentaires de madame du Châtelet

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Conceptions initiales sur l'impesanteur

Olivier Gayrard

*Comment expliquer l'impesanteur à des élèves ? Olivier Gayrard propose de commencer par recueillir leurs hypothèses avant d'expérimenter. Avec des résultats parfois surprenants...*

L'expérience quotidienne de toute personne ayant les deux pieds au sol met en évidence l'existence d'une force qui fait chuter tout objet vers le bas. C'est le poids de cet objet. Chose merveilleuse, les astronautes<sup>4</sup>, dans leurs laboratoires spatiaux, ou directement dans l'espace, flottent. Nous avons réfléchi, avec des élèves de 5<sup>e</sup> et de 4<sup>e</sup> n'ayant pas suivi de cours de mécanique, à cet étrange phénomène.

### Les hypothèses

J'ai proposé aux élèves deux photographies. La première (figure 1) a été prise durant la mission STS-127. Nous voyons l'astronaute de l'Agence Spatiale Canadienne, Julie Payette, qui flotte dans le laboratoire Columbus de l'ESA. La seconde (figure 2), présente Dave Williams, un autre astronaute de l'ASC, en sortie extravéhiculaire.

Dans les deux cas, le questionnement de départ était : « Pourquoi semble-t-elle (il) flotter ? »

Le tableau 1 présente les hypothèses rédigées par les élèves.



Fig.1. L'astronaute canadienne Julie Payette.

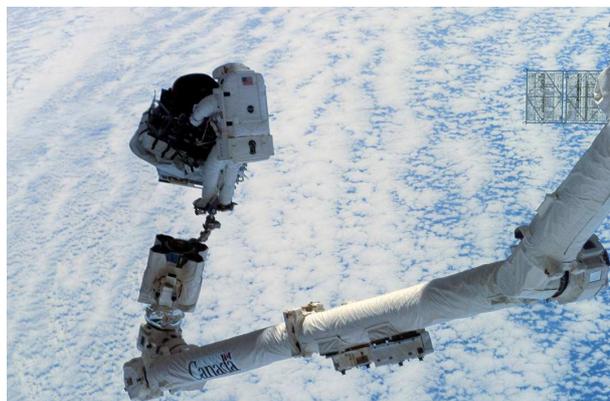


Fig.2. L'astronaute Dave William en sortie dans l'espace

Hyp 1	Il y a de l'apesanteur, ou grâce à l'apesanteur, ou être en apesanteur.	10
Hyp 2	Il n'y a pas ou plus de force de gravité ou pas de gravité, ou pas de centre de gravité, ou en dehors du centre de gravité, ou pas de gravitation terrestre.	29
Hyp 3	Il y a de l'anti-gravité ou gravité inversée.	2
Hyp 4	Il n'est plus dans l'atmosphère, ou l'air, ou l'ozone, ou le dioxygène, ou plus de pression (hypothèse essentiellement apparue avec la diapositive D <sub>2</sub> ).	15
Hyp 5	Car il y a de l'air, ou un gaz, ou de l'atmosphère, ou une pression (hypothèse essentiellement apparue avec la diapositive D <sub>1</sub> ).	9
Hyp 6	Dans l'espace il y a de la gravité ou de la gravitation.	9
Hyp 7	Il n'y a pas d'apesanteur.	2
Hyp 8	Ils sont trop loin.	4
Hyp 9	Le poids diminue ou ils pèsent moins.	3
Hyp 10	Sans hypothèse.	7
Hyp 11	Hypothèses absconses ou trop confuses : air qu'il y a dans l'hélium, ...	5

Tableau 1. Les hypothèses. La dernière colonne représente le nombre d'élèves ayant formulé ce type de réponse.

La discussion avec les élèves qui ont proposé l'hypothèse H1 indique que l'apesanteur est vue

<sup>4</sup> On parle d'astronautes américains, de cosmonautes russes, de spatonautes français et même de taïkonautes chinois pour le même métier, celui d'aller dans l'espace. Plusieurs de ces termes sont utilisés indifféremment ici.

aussi bien comme une force permettant au corps de flotter, ce qui est faux, que comme une absence de pesanteur, le préfixe a- étant privatif. En s'en tenant à cette dernière interprétation, rappelons que la force de gravitation est à portée infinie. Aussi nul lieu ne peut en toute rigueur échapper à la pesanteur. En l'occurrence, le terme de micro-gravité serait plus judicieux.

Ceux ayant suggéré l'hypothèse H2 sont bien conscients d'une force de gravité qui cloue au sol et supposent son extinction à l'altitude de nos stations. On peut néanmoins calculer que l'accélération de la pesanteur terrestre  $g$  diminue de 1 % quand on s'élève de 32 km. À l'altitude où gravitent nos stations, soit 300 km,  $g$  est voisin de  $0,9 g_0$ , où  $g_0$  est la valeur au niveau de la mer. Cette hypothèse est invalidée.

L'hypothèse H3 est un concept de science-fiction. L'hypothèse H4 est apparue avec la diapositive D<sub>2</sub>. L'atmosphère est perçue comme ce qui maintient au sol. En dehors de celle-ci, la voltige serait la règle. Une expérience avec une cloche à vide, bien que procurant un vide tout relatif, met à mal cette conception.

L'hypothèse H5 s'est manifestée avec la diapositive D<sub>1</sub>. L'idée est sensiblement la même que précédemment. Le corps de Julie Payette étant dans une capsule remplie d'air, elle-même enveloppée de vide, la pression exercée par l'air sur son corps la maintiendrait en équilibre. Dans la cloche à vide, une petite boule transparente avec un personnage à l'intérieur invalide cette hypothèse.

Les élèves ont joué le jeu, et presque tous ont écrit une hypothèse. Parfois un seul mot. Les hypothèses H6 et H7, tout en se rapprochant de la vérité pour H6, doivent être ainsi prises en compte. Remarquons que ce vocabulaire, même s'il est souvent improprement utilisé ou conceptualisé, n'est pas hors sujet. Ce qui est en soit déjà positif.

En effet, quelques hypothèses, classées H11, sont hors de propos, comme l'existence d'aimants dans le vaisseau, ou bien inintelligibles.

Les hypothèses H8 et H9 sont à rapprocher de ce qui a déjà été dit à propos de H2.

## Une expérience

L'équivalence entre la chute libre et l'impesanteur n'est pas apparue dans les hypothèses. Aussi, j'ai directement proposé l'expérience suivante :

« Nous sommes maintenant sur Terre. Dans un cadre de bois (de masse 206 g), un cosmonaute de plastique (de masse 6 g) pend par un fil de canne à pêche. Ce fil est lui-même attaché à un second fil reliant les extrémités supérieures du cadre en bois ».

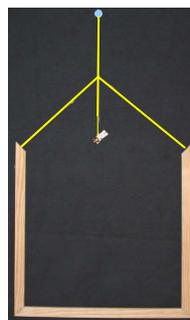


Fig.3. Dispositif de départ de l'expérience.

Les fils sont repassés en jaune. Le dispositif pend par la punaise bleue.

Que va-t-il se passer si on lâche l'ensemble ?

Sur la figure 3, nous voyons le dispositif soulevé tel qu'il a été présenté aux élèves. Ils ont été invités à répondre à la question suivante : « Que se passera-t-il lorsque le dispositif sera lâché ? » Les trois diapositives de la figure 4 ont été projetées.

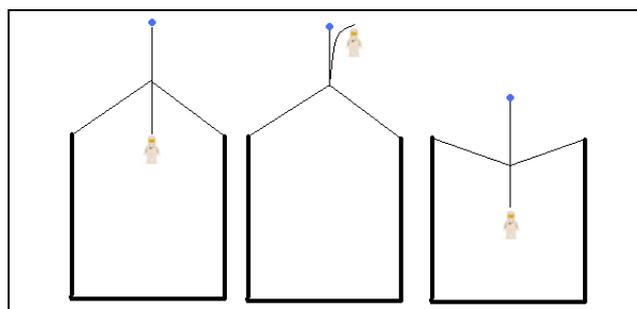


Fig.4abc. Trois réponses possibles à la chute libre du dispositif.

Les réponses sont présentées dans le tableau 2.

<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Rien ne change (figure 4a)	13 %
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Le cosmonaute passe au-dessus (figure 4b)	51 %
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Le cosmonaute passe au-dessous (figure 4c)	36 %

Tableau 2 : comment chute le cosmonaute ?

Les élèves ayant fait le choix de la figure b n'avaient aucun doute. Le cosmonaute s'échappe par le haut de son cadre. La différence de masse est toujours invoquée, et assurément, un astronaute de plomb dans un cadre de balsa aurait produit une solution inverse. Plusieurs élèves supposent un glissement du cosmonaute vers l'intérieur du cadre car ce dernier, disent-ils, tire dans ce sens. Ils sont peu à envisager la chute libre telle que Galilée l'énonça au début du XVII<sup>e</sup> siècle.

### L'impesanteur expliquée à des collégiens

Imaginons que le cadre de bois soit les parois du vaisseau de notre cosmonaute, et accompagnons-le dans sa chute. En d'autres termes, pendons un second passager qui nous représentera. Que voyons-nous de notre entourage proche ? Rien ne s'échappe du cadre, comme nous pourrions le voir sur la figure 5. Donc notre compagnon de voyage reste par rapport à la cabine, et à nous-mêmes, immobile. Nous flottons ! Si je glisse sous ses pieds un pese-personne, la balance indiquera qu'il ne pèse rien !

La sensation de pesanteur n'existe plus. Nous tombons tous, ni plus vite, ni moins vite que les objets qui nous entourent. Remarquons que la gravité, elle, n'a pas disparu. Bien au contraire, elle est la cause de notre mouvement. Voici la singularité de l'impesanteur. N'étant soumis qu'au champ de gravitation, dans notre mouvement de chute libre, nous avons l'illusion que ce champ n'existe pas !

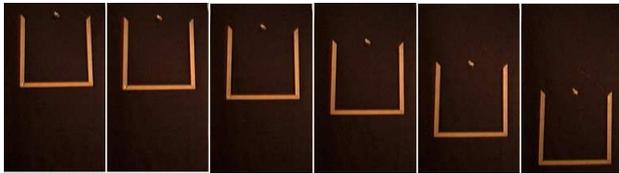


Fig.5. L'expérience filmée de la chute libre du cosmonaute ; une image tous les 1/30 s, vitesse d'obturation 250 ms.

### Et à des lycéens, sur Terre ...

Pour étudier le mouvement d'un objet, nous devons disposer d'un système de référence. Nous sommes en tant qu'observateurs, liés à un repère terrestre. Nous admettrons ce référentiel galiléen. Pour simplifier, supposons que notre cadre chute dans un puits où règne le vide. Sur la distance parcourue, nous considérons l'accélération de la pesanteur constante. Un repère lié au cadre a un mouvement accéléré par rapport à la Terre: ce référentiel n'est pas galiléen. Quelles forces s'exercent sur notre astronaute, le vaisseau étant pris comme référence ? D'une part, la force de gravitation, et d'autre part

une force inertielle, égale et opposée. Cette dernière n'est pas à proprement parler une force ; elle n'existe que dans le référentiel lié au vaisseau. Notre passager est donc soumis à un ensemble de forces dont la somme est nulle. Dans notre référentiel terrestre, c'est-à-dire inertielle, n'agit que la force de gravitation, qui fait chuter cadre et cosmonaute sans distinction. Le cosmonaute dans son vaisseau n'éprouve aucun mouvement : il flotte. De mon point de vue terrestre, il est en chute libre.

### ... puis dans un satellite.

Le mouvement du satellite sera décrit dans un référentiel géocentrique  $R_g$ , supposé galiléen. Supposons de plus la trajectoire du satellite circulaire, que le cosmonaute occupe le centre d'inertie de son vaisseau, que le mouvement du satellite soit repéré par un repère  $R_s$  lié au satellite lui-même, et que ce dernier soit immobile par rapport à son référentiel. Alors, il ne s'exerce sur le spationaute que deux forces, la gravitation terrestre,  $\vec{F}_g = -G \times \frac{M_t \times M_s}{OS^3} \times \vec{OS}$ , et une force inertielle,  $\vec{F}_{in} = M_s \times \omega^2 \times \vec{OS}$ ,  $R_s$  n'étant pas galiléen. (O est le centre de la Terre et S le spationaute).

Les conclusions du paragraphe précédent peuvent être réitérées, en entendant par chute libre un mouvement régi par la seule gravité. ■

## ARTICLE DE FOND

# Qu'est-ce que l'impesanteur ?

Christian Larcher

Après les conceptions initiales, Christian Larcher nous propose de revenir sur ce qu'est l'impesanteur.

Dans la théorie de Newton, tous les corps matériels s'attirent mutuellement. Grâce à cette interaction, nous pouvons « garder les pieds sur Terre ». Cette force appelée poids est dirigée vers le centre de la Terre, elle nous permet de nous déplacer à sa surface et d'en faire le tour si on le souhaite. Chacun perçoit l'effet de son poids parce que celui-ci est contrecarré en permanence par les obstacles qui s'opposent à son action. Il s'agit le plus souvent de l'action du sol ou du siège sur lequel on est assis dans un véhicule (voiture, train, avion).

Il n'est pas possible, près de la Terre, de supprimer le poids mais on peut en estomper ses effets si on se met en situation de se soumettre à sa seule action :

si rien ne s'oppose au poids, on ne perçoit plus la pesanteur, on est en impesanteur.

Le terme impesanteur est différent du terme « apesanteur ». Dans le terme « apesanteur » le a est privatif, il indique l'absence de toute gravité. Il s'agit d'une vue de l'esprit car, près d'un astre, il est impossible de supprimer son influence gravitationnelle. Avec le terme impesanteur on veut dire que l'effet de la pesanteur est annulé, mais le poids est toujours présent. Vu de la Terre, on est en "chute libre".

Dans une première partie, nous allons présenter trois cas d'impesanteur, qui permettent de faire des mesures :

- dans un ascenseur qui chute verticalement (en négligeant l'action de l'air qui créerait des frottements) ;
- dans un satellite artificiel sur une trajectoire circulaire régie par les seules lois de la pesanteur, c'est à dire moteur arrêté sans action de freinage aérodynamique ;
- dans un « Airbus zéro-g » qui suit une trajectoire balistique (parabole), du fait de sa vitesse initiale et de son poids.

Dans les trois cas il s'agit bien de « chute libre », comme nous allons le préciser ci-dessous, car la seule force qui se manifeste est celle due à la gravité, mais ils diffèrent par la forme de la trajectoire, verticale, circulaire ou parabolique dans le référentiel, supposé galiléen, lié à la Terre.

Dans une seconde partie, nous présenterons une simulation d'impesanteur en labo.

## L'impesanteur

### En « chute libre » verticale dans un ascenseur

Albert Einstein fut le premier, à l'aide d'expérience de pensée, à percevoir clairement que, si vous êtes dans un ascenseur dont le câble de traction se rompt brutalement, vous tombez en même temps que la cabine « en chute libre » (à condition de négliger l'action de l'air). Avant que l'action ne se termine mal, vous auriez pendant quelques secondes l'impression de « flotter » dans la cabine... La sensation serait brève !

Mais il ne s'agit pas seulement d'une sensation, les objets aussi sont en impesanteur ! On peut filmer des expériences durant le temps de chute libre d'un dispositif tombant du haut d'une tour. Si on accroche un objet pesant à un dynamomètre durant la chute, celui-ci indique zéro car le poids de l'objet est compensé par une force d'inertie (voir plus loin) ; son poids apparent est nul.

#### La chute est-elle rigoureusement verticale ?

La réponse est non, il existe une très légère « déviation vers l'est » résultant de la rotation de la Terre. Cette déviation est de l'ordre du cm pour 100 m de chute. Pour en savoir plus, consulter les Cahiers Clairaut n° 130 (juin 2010) p. 31.

#### La chute est-elle vraiment une chute libre ?

Elle serait vraiment libre s'il n'y avait pas l'action exercée par l'air. D'où une question posée jadis aux candidats du bac :

On dit parfois qu'un parachutiste qui saute d'un avion sans ouvrir son parachute est en « chute libre » que pensez-vous de cette affirmation ?

La réponse attendue faisait intervenir la résistance de l'air et l'atteinte d'une vitesse limite quand cette résistance compense exactement le poids du parachutiste et de son parachute.

### En « chute libre » dans un satellite

Que ce soit la Lune, satellite naturel de la Terre, ou un satellite artificiel, comme la station spatiale internationale ISS qui tourne autour de la Terre depuis 1998, ces objets gravitent autour de la Terre sans avoir recours à un quelconque dispositif propulsif. Leur seul moteur **c'est la gravitation universelle** qui, en permanence, « les fait tomber sur la Terre ». Comment cela se fait-il ?

Un objet lancé tangentiellement à la surface terrestre à la vitesse  $v$ , s'il n'était soumis à aucune force, parcourrait en ligne droite une distance  $D$  en une seconde ; il s'écarterait alors du sol d'une distance  $a$  pendant ce temps. Mais il est soumis à la pesanteur. Un corps en chute libre sans vitesse initiale par rapport au sol, parcourt 5 m verticalement vers le centre de la Terre en une seconde ( $1/2 gt^2$ ) pour la valeur de  $g$  au niveau du sol. L'objet lancé s'écarte donc du sol du fait de sa vitesse initiale mais tombe du fait de son poids. Les deux effets peuvent se compenser de telle sorte que cet objet reste constamment à la même distance du sol ; il est alors "satellisé".

Le calcul montre que pour que cet écart au sol "a" soit compensé exactement par la chute il faut que la distance parcourue en ligne droite en une seconde soit  $D = 8$  km. On peut le démontrer en utilisant le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle TAB dessiné sur la figure 1.

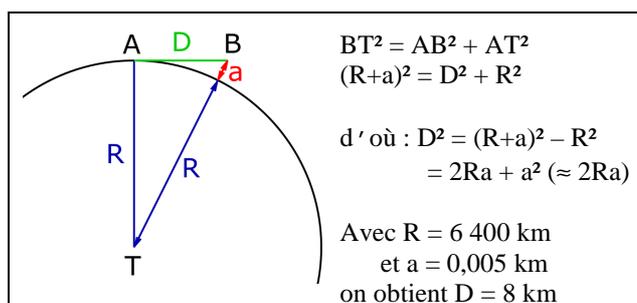


Fig.1. Calcul de la distance de chute en 1 seconde d'un objet satellisé autour de la Terre.

Les satellites ne sont bien sûr pas lancés au ras du sol, mais assez haut pour éviter ou minimiser la résistance de l'air. La vitesse de satellisation est alors un peu inférieure à 8 km/s car le poids est moindre. Par exemple la station spatiale internationale ISS évolue à une altitude d'environ 350 km. Sa vitesse linéaire est de 27 700 km/h soit 7,7 km/s.

Dans les satellites, les astronautes ne perçoivent pas l'effet de leur poids, ils flottent dans la cabine, de

façon plus durable que dans l'ascenseur, de même que les objets qui les entourent. Vu de la Terre, satellite, astronautes et objets « tombent » sur la Terre, à la même vitesse.

#### Impesanteur imparfaite dans les satellites

En pratique, les cosmonautes ne sont pas soumis à une impesanteur parfaite. Il existe des accélérations parasites qui proviennent de très légères forces de frottement atmosphérique, sans compter un mouvement de rotation du véhicule spatial qui tourne sur lui-même.

#### Le mouvement de la Terre : une « chute libre » continue vers le Soleil

La Terre, dans son mouvement autour du Soleil, « tombe » en permanence sous l'effet de l'attraction gravitationnelle du Soleil. Alors pourquoi les terriens ne flottent-ils pas comme les astronautes dans leur capsule ?

La différence provient de ce que la Terre crée elle aussi un champ de gravitation. La capsule ISS est en chute libre vers la Terre mais elle n'exerce qu'une force d'attraction négligeable sur les astronautes du fait de sa faible masse.

#### En « chute libre » dans un avion Airbus A300 ZÉRO-G

Quand vous tapez dans un ballon de foot, vous lui communiquez une vitesse initiale et il décrit dans l'air une courbe nommée parabole sous l'effet du seul poids. Si l'on suppose que de petits objets se trouvent à l'intérieur du ballon, ils sont en état d'impesanteur par rapport au ballon.

La situation est similaire pour les passagers de l'Airbus A300 ZÉRO-G. Cet appareil spécialement conçu par le CNES effectue 30 paraboles à chaque vol en ré-accélérant entre chaque « chute » pour obtenir à nouveau une vitesse initiale vers le haut et entamer la parabole suivante. Les passagers sont donc en "chute libre" pendant une vingtaine de secondes. On dit qu'ils sont en situation d'impesanteur, ils flottent dans l'avion.

Comme l'avion évolue dans l'atmosphère, il y a toujours une certaine résistance due à l'air. Le pilote de l'avion ne coupe pas les moteurs, il les utilise pour contrer la résistance de l'air et rester dans les conditions de la « chute libre ». Il peut aussi faire en sorte d'annuler partiellement l'effet de la pesanteur pour simuler la gravitation qui existe sur Mars ou sur la Lune.

Depuis le 4 décembre 2012 la société Novespace organise trois vols par an ouverts au grand public. Vous pourrez vous envoyer en l'air en vous allégeant d'environ 6 000 €. Précisons que pour ce

prix vous effectuerez un vol d'une durée de 2 h 30 comprenant 15 paraboles soit cinq minutes d'impesanteur cumulées. La première parabole simule la gravité martienne avec 0,38 g pendant 30 secondes. Deux paraboles simulent la pesanteur lunaire avec 0,16 g pendant 25 secondes et enfin douze paraboles vous mettront en impesanteur (vous aurez l'impression de ne subir que 1 % de la pesanteur sur Terre !) durant 22 secondes. Vous aurez droit à un diplôme officiel. Le premier vol en impesanteur a eu lieu le 15 mars 2013 depuis l'aéroport de Bordeaux-Mérignac.

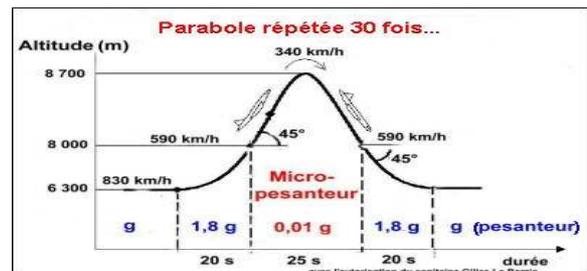


Fig.2. Les étapes d'une parabole.

#### Une question de référentiel

Dans les trois cas précédents, les objets et les personnes embarquées sont en chute libre vis de l'extérieur, mais en impesanteur car ils "flottent" les uns par rapport aux autres.

De façon plus précise :

- **pour un observateur terrestre**, tous ces objets, voyageurs inclus, tombent « en chute » libre sous l'action de la seule force de pesanteur, avec la même vitesse quelle que soit leur masse. Le référentiel terrestre est dans ce cas considéré comme galiléen ou inertiel ;

- **pour les objets et les personnes embarquées, ils sont en état d'impesanteur**. Tout se passe pour eux comme si ils n'étaient soumis à aucune force alors même qu'ils sont toujours soumis à l'action de la pesanteur. Pour continuer à utiliser les lois de la mécanique newtonienne (conditions d'équilibre dynamique), on est amené à introduire des forces d'inertie qui compensent exactement le poids de chaque objet. Ces forces sont particulières car elles dépendent du système de repère ou référentiel utilisé et, pour cette raison, on les appelle parfois « pseudo-forces ».

Sur Terre, lorsqu'une voiture accélère, freine ou encore prend un virage, les objets et passagers sont projetés vers l'arrière, vers l'avant ou vers le côté extérieur au virage par rapport au véhicule du fait des forces d'inertie.

Ces forces d'inertie existent (on peut les mesurer) dans un référentiel lié au mobile, qu'on appelle

référentiel non galiléen, mais elles n'existent pas dans un référentiel extérieur supposé galiléen.

### Référentiel galiléen

On dit qu'un système est galiléen ou "inertiel" lorsque le principe d'inertie énoncé dans la première loi de Newton y est vérifié : un corps sur lequel la résultante des forces appliquées est nulle est en mouvement rectiligne uniforme (ou au repos) c'est à dire que sa vitesse est constante en direction et en norme (ou nulle).

Dans un référentiel lié à l'ascenseur, le satellite ou l'avion, les objets sont immobiles alors qu'ils sont soumis à la force de gravitation. Pour continuer à utiliser les lois de Newton, on introduit une force d'inertie qui compense le poids de telle sorte que la résultante des forces appliquées soit nulle. Le principe d'inertie est alors vérifié.

## Simulation d'impesanteur

On peut aussi obtenir d'une manière statique des situations **similaires à celles de l'impesanteur**, en appliquant des forces qui s'opposent à celles de gravitation.

En état d'impesanteur, un objet "flotte" par rapport à un véhicule, la force d'inertie équilibre le poids, dans le référentiel lié à ce véhicule. Nous venons de voir quelques cas où l'on peut obtenir cet état soit brièvement, en "chute libre" verticale ou en trajectoire parabolique, soit de façon plus durable dans un satellite.

Une façon de **simuler** l'apesanteur est d'opposer à la pesanteur une force autre que l'inertie. Par exemple la poussée d'Archimède dans le cas d'un liquide qui flotte dans un autre liquide. Les causes sont différentes mais les effets sont identiques comme on peut le percevoir avec l'expérience suivante.

Rappelons-nous tout d'abord la stupéfaction du capitaine Haddock, dans les aventures de Tintin « *On a marché sur la Lune* » p. 5, lorsqu'il voit son whisky se mettre en boule : « *un honnête whisky ne se comporte pas de cette façon !* »

Voici une expérience facile à réaliser qui **simule** le phénomène de la boule de whisky du capitaine Haddock. Cette expérience n'est pas récente elle fut étudiée par le physicien Belge Joseph Plateau (1801- 1883).

Marie Curie l'utilisait avec ses enfants et ceux de quelques grands scientifiques français de l'époque (Jean Perrin, Paul Langevin) qui avaient décidé de s'occuper eux-mêmes de la formation scientifique de leurs enfants. En avance sur leur temps, ces scientifiques souhaitaient que leurs enfants apprennent les phénomènes physiques en réalisant eux-mêmes des expériences. On a retrouvé les notes de cours prises par l'un de ces enfants (Isabelle Chavannes) qui était à l'époque la plus âgée (elle

avait 13 ans). Ces notes ont fait l'objet d'une publication intitulée « **Leçons de Marie Curie** » Éditions EDP Sciences 2003. Dans la leçon numéro 9 (p. 106) on trouve le passage suivant :

*« Nous allons faire maintenant une très jolie expérience. Voici deux verres. Dans l'un, il y a de l'eau et de l'huile : l'huile flotte parce qu'elle est moins dense que l'eau. Dans l'autre, il y a de l'huile et de l'alcool. L'huile est au fond parce qu'elle est plus dense que l'alcool. Puisque l'huile nage sur l'eau et qu'elle se noie dans l'alcool, on peut faire un mélange d'eau et d'alcool, tel que l'huile ne se noie ni ne flotte. Vous verrez que l'huile prendra la forme d'une boule et que ce sera très joli. Il faut tâtonner. Si l'huile monte, c'est que nous avons mis trop d'eau dans notre mélange ; si elle se noie et va vers le fond du vase, c'est que nous avons mis trop d'alcool. Chaque enfant arrive à former une belle boule jaune or qui se tient suspendue au milieu du liquide ».*

Le matériel nécessaire est donc des plus simples, de l'huile d'olive, de l'alcool et un peu d'eau. Lorsque les quantités d'eau et d'alcool sont adéquates, on obtient une belle boule jaune au milieu du mélange eau-alcool. Le liquide immergé a subi les mêmes effets que le whisky du capitaine Haddock !

Le liquide est en équilibre statique ; il est soumis à la force de gravité comme n'importe quel autre corps et à la poussée d'Archimède mais également à des forces de surface (force de tension superficielle). Sous l'effet de ces forces le liquide se comporte comme s'il était couvert par une membrane élastique tendue uniformément et qui agirait tangentiellement à sa surface. L'action de ces forces tend à donner à celle-ci une aire minimale. Pour un volume donné, c'est la sphère qui offre la surface la plus faible. Vous pouvez le vérifier en effectuant les rapports surface/volume de quelques solides géométriques simples. La boule immergée est en équilibre sous l'effet de deux forces qui se compensent exactement : son poids et la poussée d'Archimède qui est la résultante des forces de pression qui s'exercent sur le liquide immergé.



Pour l'entraînement des astronautes, avec leur scaphandre, on utilise la poussée d'Archimède en piscine non pas pour simuler l'impesanteur mais pour simuler une gravitation plus faible que sur Terre en compensant partiellement le poids. Cela les habitue aussi à faire des mouvements lents nécessaires dans l'espace... ■

## Voltaire au cœur d'une controverse du XVIII<sup>e</sup> siècle des tourbillons de Descartes à la gravitation de Newton.

Cécile Poujol

*Des controverses particulièrement vives traversèrent le XVIII<sup>e</sup> siècle. Quelle est la véritable forme de la Terre ? Est-elle allongée aux pôles selon son axe de rotation comme l'affirmaient les cartésiens ou au contraire aplatie comme l'affirmait Newton ? En d'autres termes avait-elle la forme d'un citron ou d'une orange ? L'espace est-il complètement vide comme le pensait Newton ou formé d'immenses tourbillons de « matière subtile » comme l'indiquait Descartes. Voltaire lui choisit nettement son camp.*

Le XVIII<sup>e</sup> siècle français a été le théâtre d'une controverse qui a partagé la communauté scientifique en deux clans, et cela jusqu'au milieu du siècle, jusqu'en 1758 exactement : d'une part les partisans de Descartes et de la représentation du monde qu'il a donnée dans le troisième tome de ses *Principia philosophiae (Principes de la philosophie)*, d'autre part les partisans de Newton, et parmi eux un homme de lettres : Voltaire. La controverse s'éteint définitivement en 1758, date à laquelle la théorie de Newton s'est trouvée confirmée à deux reprises. La première confirmation de la validité de celle-ci correspond à la publication d'un livre, écrit par Maupertuis et par Bouguer au retour de leurs expéditions respectives en Laponie et au Pérou : *La figure de la Terre*, qui établit que notre planète est bien aplatie aux pôles conformément aux hypothèses de Newton ; la deuxième confirmation se manifeste avec le retour d'une comète devenue célèbre depuis : celle de Halley, du nom de l'astronome qui a fait publier l'œuvre de Newton qu'il connaît par cœur, et qui avait annoncé la date approximative du retour de la comète de 1758 ; or c'est en s'appuyant sur les travaux de Newton qu'il a pu faire cette prédiction. Désormais, Newton et la gravitation ont réussi à s'imposer, y compris en France, pays de Descartes qui était plutôt hostile aux théories du savant anglais. Cela aura pris un certain temps...

### **Descartes et les fondements philosophiques de sa représentation de l'univers.**

René Descartes (1596-1650) est un philosophe qui a cherché à unifier les connaissances et surtout refonder la philosophie en examinant les savoirs de son temps à l'aide de la raison et d'un doute systématique ; il entendait expurger la philosophie, ainsi que les sciences, des croyances erronées selon lui, de l'irrationnel, pour ensuite pouvoir les reconstruire sur des bases mathématiques et

rationnelles : c'est le projet qu'il expose dans le *Discours de la méthode*, sorte d'autobiographie intellectuelle : « pour toutes les opinions que j'avais reçues jusques alors en ma créance, je ne pouvais mieux faire que d'entreprendre, une bonne fois, de les en ôter, afin d'y en remettre par après, ou d'autres meilleures, ou bien les mêmes, lorsque je les aurais ajustées au niveau de la raison » ; il s'agit pour lui « de distinguer le vrai d'avec le faux », et ensuite d'organiser les connaissances de sorte que l'« on garde toujours l'ordre qu'il faut pour les déduire les unes des autres ». C'est ce rejet de l'irrationnel et de tout ce qui pourrait ressembler à de l'occulte qui va motiver ses choix philosophiques, et justifier les principes de sa représentation du monde.

### **Descartes rejette le vide et l'action à distance.**

Tout d'abord, Descartes reprend les catégories traditionnelles, héritées d'Aristote, pour étudier ce qui est ; son premier principe est, comme l'a démontré Alexandre Koyré dans *Pierre Gassendi, sa vie et son oeuvre* (1955), au chapitre « Gassendi et la science de son temps », le rejet de la notion de vide, que Descartes assimile, à tort, au néant. Son deuxième principe est de diviser l'être en substances et en attributs, c'est-à-dire que tout ce qui est soit existe pleinement, soit arrive par accident. Dans ce contexte, « l'espace vide n'étant ni substance, ni accident ne peut être rien d'autre que du néant, et le néant, ne pouvant de toute évidence posséder d'attributs, ne peut être le sujet de mesures ».

Comme le vide n'est pas une catégorie envisageable par Descartes, celui-ci identifie la matière physique avec l'étendue géométrique, la matière avec l'espace ; ou, pour reformuler cela encore autrement, pour Descartes, le monde n'est constitué que d'étendue et de mouvement. Selon Alexandre

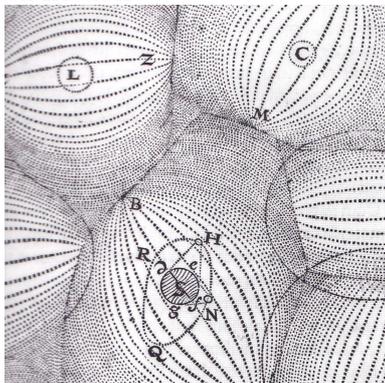
Koyré, cette réduction de l'espace à la matière est le résultat d'une « géométrisation à outrance », qui s'inscrit cependant dans la continuité de la révolution scientifique du XVII<sup>e</sup> siècle, inaugurée par Galilée, et qui consistait à mathématiser le réel. Le texte de Koyré est consacré à Gassendi, considéré comme le savant rival de Descartes par leurs contemporains ; Gassendi postule l'existence du vide en renouant avec l'atomisme de l'Antiquité grecque (celui d'Hippocrate, de Leucippe et d'Épicure), et certaines de ses idées seront exploitées par d'autres ultérieurement et avec succès, en particulier Newton lorsqu'il développera sa conception corpusculaire de la lumière. La postérité n'a pourtant pas vraiment retenu le nom de Gassendi, alors que son travail contenait les germes de la science future.

Le dernier principe cartésien, pour le domaine qui nous intéresse, est le refus de l'action à distance, ce qui exclut bien entendu l'existence d'une force comme la gravitation. Descartes rejette la gravité mise en avant par Galilée, son contemporain. Pour Descartes, accepter quelque chose comme la gravitation, ce serait pactiser avec l'occulte et retomber dans l'irrationnel qu'il a banni des sciences.

### Description de l'univers selon Descartes : tourbillons, melon et citron !

Descartes expose sa conception de l'univers dans *Les principes de la philosophie (Principia philosophiae)*, publiés en 1644, et dont le titre initial, en latin, sera repris en guise de réponse par Newton en 1687, avec : *Philosophiae naturalis principia mathematica*, qui ajoute la notion de science de la nature, c'est-à-dire qui est vérifiée par les observations et les calculs.

Le système de Descartes, quant à lui, est tiré par une méthode inductive, donc strictement intellectuelle, des principes déjà énoncés, à savoir que le monde est plein et en mouvement : il est formé de tourbillons contigus, qui sont nécessairement en contact et en friction.



Les tourbillons de Descartes BNF

Cela s'oppose à une conception qui laisse place au vide, et qui autorise les actions à distance.

Dans le système cartésien, l'on ne peut distinguer, si ce n'est par un artifice de la pensée, les corps du lieu qu'ils occupent : ils sont eux-mêmes l'espace. Cela va à l'encontre de notre manière d'envisager le mouvement depuis Newton, qui veut que l'espace et le temps constituent un référentiel absolu, dans lequel s'inscrivent les mouvements.

Par ailleurs, dans cet univers, « tout mouvement est une impulsion et toute action se fait par contact », comme l'écrit Véronique Le Ru dans son essai intitulé *Voltaire newtonien, le combat d'un philosophe pour la science*, et elle poursuit, concernant la notion de référentiel d'étude : « Ce qui sert de référentiel au mouvement, pour Descartes, est relatif : ce sont les corps qu'on choisit, par convention, comme étant au repos dans une situation donnée et qui servent alors de repère du mouvement. » Tout est donc local, alors. La deuxième conséquence de ce relativisme est qu'il affirme que la Terre ne se meut pas, mais qu'elle est portée par un tourbillon ; affirmer le mouvement de la Terre serait effectuer une sorte de raccourci de la pensée : « Que si néanmoins ci-après, pour nous accommoder à l'usage, nous semblons attribuer quelque mouvement à la Terre, il faudra penser que c'est en parlant improprement, et au même sens qu'on peut dire quelquefois de ceux qui dorment et sont couchés dans un vaisseau, qu'ils passent cependant de Calais à Douvres, à cause que le vaisseau les y porte », écrit-il dans la troisième partie des *Principes de la philosophie*. ... La Terre ne se meut pas, et elle ne tourne pas vraiment autour du Soleil, c'est le tourbillon qui la porte qui le fait. Sans doute est-ce là un effet de la prudence de Descartes : celui-ci fut très marqué par la condamnation de Galilée en 1633 par le tribunal de l'Inquisition, qui lui fit renoncer à énoncer franchement un système héliocentrique.

C'est Dieu qui, par une impulsion première et qui s'est conservée depuis la création du monde, a déclenché ces mouvements tourbillonnaires ; en effet, selon Joëlle Fontaine et Arkan Simaan, auteurs de *L'image du monde des Babyloniens à Newton*, comme le Dieu cartésien est immuable en lui-même et en son œuvre, il existe dans l'univers des lois de conservation du mouvement : « Le principe d'inertie lui-même, que Descartes fut le premier à énoncer correctement, est en quelque sorte une loi de conservation : en absence de perturbation, le mouvement se conserve rectiligne et uniforme ». Une fois le monde créé, Dieu n'a plus à intervenir, puisque la quantité de mouvement se conserve au cours du temps.

Mais le plus marquant dans le système cartésien, et en même temps le trait le plus attaqué par Newton lorsqu'il le réfutera, c'est que le monde est rempli d'une matière subtile, qui est à la fois la matière à l'origine de toute chose et celle qui forme les tourbillons, dans sa forme la plus éthérée : « cette matière se glisse en tous les interstices, de sorte qu'il n'y a jamais d'étendue sans matière (...). Dans un espace plein, les seuls mouvements qui puissent perdurer sont circulaires, le monde est formé de tourbillons contigus. Le système solaire est l'un de ces tourbillons : le Soleil occupe le centre du tourbillon du ciel qui emporte les planètes. Ainsi, la Terre se repose en son ciel, mais elle ne laisse pas d'être transportée par lui », comme le résume Robert Locqueneux dans *Une histoire des idées en physique*. La pesanteur sur Terre s'explique par les forces centripètes créées par ces tourbillons.

Le problème essentiel posé par ces tourbillons relève de la mécanique des fluides, et c'est par ce biais que Newton défera méticuleusement la belle mais complexe cohérence élaborée par Descartes : c'est le deuxième livre des *Principia* de Newton qui traite du mouvement des fluides dans un milieu résistant. Véronique Le Ru, dans l'ouvrage déjà cité, a bien analysé comment Newton a démonté le système cartésien : les planètes ne peuvent se déplacer dans un espace qui n'est en fait que de la matière, même si, comme l'affirmait Descartes, celle-ci est très fluide ; les planètes doivent nécessairement rencontrer de la résistance ; en résumé, « sans espace vide, le mouvement serait impossible et dans un monde plein, la résistance au mouvement serait infinie », conclut Véronique Le Ru. Ce qui oppose Descartes à Newton est leurs conceptions de la matière, définie par son étendue dans l'espace par Descartes, alors que Newton la définit par sa quantité, tirée à la fois de sa densité et de son volume. Voltaire lira très attentivement ce deuxième livre des *Principia* et le reformulera à destination d'un public cultivé mais non scientifique, dans les *Éléments de la philosophie de Newton*, ouvrage publié en 1741 ; un argument important de sa défense du savant anglais sera alors l'impossibilité du mouvement des planètes dans le milieu résistant de l'éther. En effet, Voltaire s'attachera, à la suite de Newton, à montrer à ses lecteurs comment les lois de Kepler interdisent les mouvements des corps dans un espace plein. Il combat enfin la définition cartésienne du vide : Descartes a confondu le vide et le néant, d'où le rejet infondé de cette notion.

Le dix-huitième siècle aura ainsi connu une controverse au sujet de la forme de la Terre : avait-elle celle d'un citron ou d'un melon, conformément

à la théorie de Descartes ? Ou bien celle d'une orange, si Newton avait raison ?

### **De Descartes à Newton : portraits et biographies des deux savants dans les *Lettres philosophiques* de Voltaire (1733).**

Voltaire séjourne en Angleterre de mai 1726 à novembre 1728, pays qu'il admire en particulier pour son régime politique de monarchie parlementaire. Il semble avoir rédigé en partie la lettre XIV des *Lettres philosophiques* en 1728, alors qu'il hésite encore entre Descartes et Newton ; il a pu mesurer l'attachement de l'Angleterre à son savant, et le peu de cas qui était fait outre-Manche de Descartes. Peu de temps après leur parution, les *Lettres philosophiques* furent condamnées à être brûlées par le bourreau le 10 juin 1734 à Paris, parce qu'elles témoignaient d'une admiration trop marquée pour le régime anglais et pour les idées du philosophe empiriste Locke ; elles furent jugées subversives du point de vue moral, religieux et politique. C'est alors que Voltaire dut s'exiler, et qu'il se réfugia à Cirey en Lorraine, chez sa maîtresse, Madame du Châtelet, la savante la plus accomplie de son époque, passionnée de sciences et traductrice des *Principia* de Newton. C'est à ses côtés qu'il approfondira véritablement la pensée du savant anglais.

Voltaire propose dans deux des *Lettres*, la XIV<sup>e</sup> et la XV<sup>e</sup>, des portraits comparés et des biographies de Descartes et de Newton, ainsi qu'une présentation des découvertes scientifiques de ce dernier : « Sur le système de l'attraction » ; la XVI<sup>e</sup> lettre est consacrée à l'optique de Newton.

Comme à son habitude, Voltaire ironise sur tout ce qui sépare les deux systèmes, et, par-delà, sur les préjugés symétriques des deux pays qui les ont vus naître : « Un Français qui arrive à Londres trouve les choses bien changées en philosophie comme dans tout le reste. Il a laissé le monde plein ; il le trouve vide ; à Paris, on voit l'univers composé de tourbillons de matière subtile ; à Londres, on ne voit rien de cela (...). Chez vos cartésiens, tout se fait par une impulsion qu'on ne comprend guère ; chez M. Newton, c'est par une attraction dont on ne connaît pas mieux la cause. A Paris, vous vous figurez la Terre faite comme un melon<sup>5</sup> ; à Londres, elle est aplatie des deux côtés. »

Il brosse ensuite un portrait plutôt élogieux de Descartes, ce qui contraste avec ce qu'il pourra écrire par ailleurs sur sa philosophie ; il le présente comme doté d'« une imagination vive et forte qui en fit un homme singulier dans sa vie privée comme

<sup>5</sup> Il doit s'agir d'un melon allongé à la manière d'un citron.

dans sa manière de raisonner » ; dans le récit qu'il fait de sa vie, il dramatise nettement les circonstances de son existence, présentant celle-ci comme une succession d'exils dans différents pays d'Europe : « dans le temps qu'on condamnait en France les seules propositions de sa philosophie qui fussent vraies, il fut aussi persécuté par les prétendus philosophes de Hollande, où il se retira » ; ces faits sont démentis par bien d'autres biographes...

À l'opposé, l'évocation de la vie sans drames de Newton tient en une courte phrase : « Il a vécu quatre-vingt-cinq ans, toujours tranquille, heureux et honoré dans sa Patrie ». Par ailleurs, face à l'humanité de Descartes, qui a eu une maîtresse et de celle-ci une fille qui mourut précocement, ce qui l'attrista beaucoup, Voltaire présente le « chevalier Newton » comme un cerveau brillant, mais dépourvu de sensibilité : « il n'a eu ni passion ni faiblesse ; il n'a jamais été approché d'aucune femme : c'est ce qui m'a été confirmé par le médecin et le chirurgien entre les bras de qui il est mort. On peut admirer en cela Newton, mais il ne faut pas blâmer Descartes. » En effet !

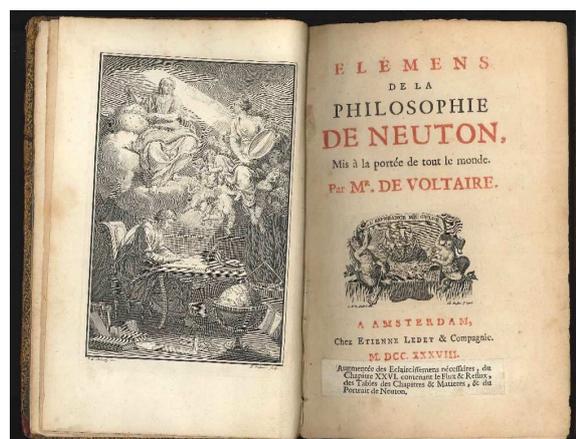
Enfin, Voltaire établit la continuité qui existe entre ces deux géomètres : il rappelle que « Descartes a fait un aussi grand chemin, du point où il a trouvé la géométrie jusqu'au point où il l'a poussée, que Newton en a fait après lui : il est le premier qui ait trouvé la manière de donner les équations algébriques des courbes. », faisant allusion à l'invention du calcul des fluxions, appelé plus tard calcul différentiel. C'est en effet à Newton qu'il reviendra de démontrer les lois de Kepler, après avoir étendu aux ellipses les calculs qu'il pouvait faire sur les cercles ; en effet, la première loi de Kepler affirme que l'orbite des planètes est une ellipse, dont le Soleil occupe l'un des foyers.

### Voltaire et Newton : une pomme, et l'attraction régit les mouvements des corps célestes.

On a oublié que c'est à Voltaire que l'on doit l'anecdote de la pomme ! Et pourtant, c'est bien lui qui l'a fait connaître, et elle apparaît dans la XV<sup>e</sup> lettre ; il dira, dans les *Éléments de la philosophie de Newton*, l'avoir apprise de la nièce du savant, Mrs Conduit.

L'histoire raconte que, vers 1665-1666, par un beau soir d'automne à la campagne, à Woolsthorpe près de Cambridge, Newton aurait imaginé, sous un pommier, que la Lune, comme la pomme qui tombe de l'arbre, est attirée par une force vers le centre de la Terre ; et cette force, c'est l'attraction gravitationnelle ou plus simplement la gravitation.

Mais après la rêverie vient le temps des calculs, et pour ceux-ci, une donnée importe : la mesure précise du rayon de la Terre, et Voltaire reconstitue le raisonnement de Newton, de façon plus ou moins limpide, dans la lettre XV. Quand, dans les années 1665-1666, il commence à vouloir établir la vitesse de la « chute » de la Lune et de tous les corps pesants attirés par le centre de la Terre, comme si celle-ci agissait avec toute sa masse concentrée en son centre, il ne dispose pas d'une mesure correcte du rayon de notre planète, et donc il abandonne provisoirement ses calculs, parce que les résultats ne concordent pas avec les lois de Kepler. Ce n'est qu'en 1682, soit une quinzaine d'années plus tard, que Newton aura à sa disposition les résultats de la mesure rigoureuse grâce à la triangulation d'un arc de méridien faite par l'abbé Picard vers 1670. Il pourra démontrer, grâce à la deuxième loi qu'il va énoncer et à celle de la gravitation, la troisième loi de Kepler : la deuxième loi de Newton établit un rapport de proportionnalité entre la force et l'accélération, qui, combinée à la loi de la gravitation, permet donc de démontrer la troisième loi de Kepler, qui pose une dépendance mathématique entre les périodes de révolution des planètes autour du Soleil et leurs distances à celui-ci. Alors c'est la même force qui « fait la pesanteur sur la Terre et (qui) retient la Lune dans son orbite » ; « les corps pèsent en raison inverse des carrés des distances » et « ce pouvoir de gravitation agit à la proportion de la matière que renferment les corps », comme l'indique Voltaire dans la lettre XV. Newton a établi la loi de la gravitation universelle : « Cette nouvelle découverte a servi à faire voir que le soleil, centre de toutes les planètes, les attire toutes en raison directe de leurs masses, combinées avec leur éloignement. »



*Éléments de la philosophie de Newton, par M. de Voltaire.*  
À gauche, on voit Newton dicter ses découvertes à Voltaire assis à sa table de travail, et celui-ci est inspiré par une Muse qui a pris les traits de Madame du Châtelet : les trois sont ainsi réunis, le savant, son intermédiaire et traductrice, et le vulgarisateur.

## La redéfinition de la portée du discours scientifique, à l'aube du siècle des Lumières : divergences entre Voltaire et Newton.

Voltaire imagine, à la fin de la lettre XV, un dialogue entre Newton et ses détracteurs sur un point précis : celui de la qualité mystérieuse, voire occulte, de cette nouvelle force qu'il vient de découvrir : la gravitation, qu'il désigne par le terme d'« Attraction » ; ses opposants cartésiens lui font remarquer qu'il emploie un terme nouveau et obscur pour désigner finalement « l'impulsion » chère à Descartes. Voltaire use alors de la prosopopée<sup>6</sup>, puisqu'il fait répondre Newton, mort depuis cinq ans, au style direct : « je ne me sers du mot d'Attraction que pour exprimer un effet que j'ai découvert dans la nature, effet certain et indisputable d'un principe inconnu, qualité inhérente dans la matière, dont de plus habiles que moi trouveront, s'ils peuvent, la cause.(...) J'ai découvert une nouvelle propriété de la matière, un des secrets du Créateur ; j'en ai calculé, j'en ai démontré les effets ; peut-on me chicaner sur le nom que je lui donne ? »

Ce sont les tourbillons qu'on peut appeler une qualité occulte, puisqu'on n'a jamais prouvé leur existence. L'Attraction au contraire est une chose réelle, puisqu'on en démontre les effets et qu'on en calcule les proportions. La cause de cette cause est dans le sein de Dieu. »

Le Newton imaginé par Voltaire insiste sur deux points : le premier est que, contrairement à Descartes, il a prouvé par ses calculs, fondés sur les lois de Kepler et sur le calcul différentiel, que la gravitation ou attraction existait bien, ce que le philosophe français n'a jamais pu faire au sujet des tourbillons, donnée purement intellectuelle et dont l'existence était impossible à démontrer.

Le deuxième argument de Newton est qu'il reconnaît d'une certaine manière les limites de son propos, redéfinissant au passage la portée du discours scientifique par rapport au discours philosophique ou religieux : Newton a étudié les « effets », il « calcule les proportions », mais en aucun cas ne se prononce sur les fondements, « la cause », le pourquoi de cette propriété de la matière. Voltaire montre bien ici l'évolution de la science, qui commence avec les Lumières à prendre son indépendance par rapport à la religion : la science cherche à répondre à la question « comment ? » et non à la question « pourquoi ? ». Le croyant Newton ne s'exprime pas ici, c'est le scientifique qui

parle, et il le fait avec d'autant plus d'assurance qu'il a restreint le champ de son propos.

Mais Voltaire, lorsqu'il fait parler Newton, le trahit quand il emploie l'expression « nouvelle propriété de la matière ». En effet, les commentateurs de Newton, et en particulier Alexandre Koyré dans ses *Études newtoniennes*, ont insisté sur les dangers inhérents à ce concept d'attraction, qui pouvait être interprété comme étant le fondement d'une conception mécaniste de l'univers, c'est-à-dire d'une conception qui pouvait se passer de Dieu ; c'est probablement pourquoi Newton a tenu à présenter l'attraction non pas comme une force physique, non pas comme une propriété de la matière, mais comme un des principes mathématiques de la philosophie naturelle. Il veut conférer ainsi à la gravitation un statut strictement mathématique, c'est ce qu'il affirme à son lecteur dans sa préface des *Principia*.

## Une œuvre de fiction comme défense et illustration de la gravitation newtonienne : *Micromégas* de Voltaire.

*Micromégas* est un conte philosophique dont Voltaire a écrit une première version dans les années 1736-1737, donc pendant sa période newtonienne, quand il séjournait à Cirey chez Madame du Châtelet. Le conte n'a été publié qu'en 1751, ce qui laisse supposer que le texte initial, qualifié par son auteur de « bagatelle », a été entre temps étoffé de propos philosophiques et scientifiques. Il s'agit donc d'un témoignage de l'intérêt que Voltaire a porté à l'œuvre de Newton, et sur le long terme.

*Micromégas* raconte le voyage interstellaire d'un géant sage et épris de sciences et de mathématiques, Micromégas, qui vient d'une planète gravitant autour de l'étoile Sirius. Il quitte sa planète après des déboires avec les autorités politiques et religieuses de son pays (ce qui rappelle la situation de Voltaire, exilé), et rencontre un autre géant, un Saturnien, dont le modèle n'est autre que Fontenelle, le secrétaire de l'Académie des sciences de l'époque. Voltaire se moque de lui : « homme de beaucoup d'esprit, qui n'avait à la vérité rien inventé, mais qui rendait un fort bon compte des inventions des autres, et qui faisait passablement de petits vers et de grands calculs » ; ce ton ironique vient de ce que Fontenelle, bien qu'informé des découvertes scientifiques de son temps, était resté cartésien, et avait, dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, parus en 1686, exposé l'héliocentrisme et les tourbillons à travers un dialogue plaisant entre deux aristocrates ; cela en faisait à la fois un prédécesseur et un rival de Voltaire.

<sup>6</sup> Figure de style qui consiste à faire parler un mort...

Celui-ci, comme à son habitude, lance dans Micromégas des piques contre ses adversaires : Descartes, Aristote, la Sorbonne et le clergé ; il les tourne en dérision, prête à leurs partisans des propos caricaturaux et parfois même incompréhensibles. Mais ce conte est avant tout un hommage à la science et aux savants, aux géomètres capables d'évaluer avec justesse la taille des géants grâce à la triangulation (Micromégas mesure environ 36 kilomètres de haut), et enfin aux découvertes de Newton : les interlocuteurs humains des géants sont les savants de l'expédition dirigée par Maupertuis, envoyée vérifier que la Terre était bien aplatie aux pôles, ainsi que le prédisait la théorie de Newton. De plus, Micromégas se déplace au moyen de la gravitation, qui est évoquée avec fantaisie et poésie : « Notre voyageur connaissait merveilleusement les lois de la gravitation, et toutes les forces attractives et répulsives. Il s'en servait si à propos que, tantôt à l'aide d'un rayon du soleil, tantôt par la commodité d'une comète, il allait de globe en globe, lui et les siens, comme un oiseau voltige de branche en branche. » Le conte n'explique rien, mais procède par allusions, ce qui fait son agrément, et il est empreint d'un optimisme plein de gaieté qui est celui du siècle des Lumières.

Les leçons que l'on peut en tirer sont toutefois sérieuses : tout d'abord, l'homme est dérisoirement petit dans l'Univers, mais Voltaire n'en conçoit aucun vertige, comme l'avait fait avant lui Pascal ; il s'en amuse, qualifie la Terre de « petit tas de boue », de « taupinière », et les hommes, surtout ceux qu'il n'aime pas, d'« animalcule », de « mite philosophique » ou encore de « si chétifs animaux ». Cette petitesse doit amener l'homme à faire preuve de modestie et de modération, et lui faire prendre conscience, par exemple, de la vanité inepte des guerres. Rabaisser l'homme est pour Voltaire une occasion de le délester de son esprit de sérieux, qui s'accompagne souvent d'intolérance.

C'est là que se profile une autre leçon du conte. Celui-ci s'achève par le mémorable fou rire des géants, causé par l'intervention d'un théologien disciple de Saint Thomas d'Aquin, et qui affirme qu'« il savait tout le secret » et que « leurs personnes, leurs mondes, leurs soleils, leurs étoiles, tout était fait uniquement pour l'homme » : derrière ce « rire inextinguible », on peut lire un appel de Voltaire à la tolérance et à la nécessité de laisser une place salutaire au doute, pour tout ce qui relève de la métaphysique. C'est probablement la signification du mystérieux livre donné en cadeau final par les géants aux hommes, et qui était censé leur expliquer « le bout des choses » : « un livre tout blanc ». Voir « le bout des choses » n'est pas à la

portée des hommes, et le livre qui pourra les éclairer définitivement restera pour toujours à écrire.

### Bibliographie

- René Descartes, *Discours de la méthode*, 1637.  
 Alexandre Koyré, *Pierre Gassendi, sa vie et son œuvre*, Paris, Albin Michel, 1955.  
 René Descartes, *Principes de la philosophie*, 1644.  
 Issac Newton, *Principia mathematica philosophiae naturalis*, 1687.  
 Véronique Le Ru, *Voltaire newtonien*, Paris, Vuibert/ADAPT, collection « inflexions », 2005.  
 Joëlle Fontaine et Arkan Simaan, *L'image du monde des Babyloniens à Newton*, Paris, Vuibert/ADAPT-SNES, 1999-2010.  
 Robert Locqueneux, *Une histoire des idées en physique*, Paris, Vuibert-SFHST, collection « Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences », 2009.  
 Voltaire, *Éléments de la philosophie de Newton*, 1741.  
 Voltaire, *Lettres philosophiques (Lettres anglaises)*, 1733.  
 Alexandre Koyré, *Études newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968.  
 Voltaire, *Micromégas*, 1752.  
 Fontenelle, *Entretiens sur la pluralité des mondes*, 1686.

### Un travail fait en cours de français en 1<sup>ère</sup> S : l'étude en œuvre intégrale de *Micromégas*

Ont été étudiés de façon approfondie **trois extraits** du conte philosophique, deux passages pris au début et à la fin, et un extrait du chapitre 4, lorsque les géants découvrent la Terre.

Le premier extrait montre un esprit des Lumières, à travers la présentation du personnage de Micromégas ; le deuxième joue sur le contraste entre une vision décalée et naïve de la Terre, et une approche savante qui tient compte des apports de Newton ; le dernier extrait porte sur les leçons que l'on peut tirer du conte. L'analyse de l'œuvre a été aussi l'occasion d'un **travail transdisciplinaire français/physique**, avec :

- un rappel des différentes représentations du monde qui ont émergé en Europe : le système de Ptolémée, celui de Copernic, celui de Descartes, puis les lois de Kepler et enfin les lois de Newton ;
- l'étude de documents sur l'expédition de Maupertuis, ses objectifs et sa méthode pour prouver l'aplatissement de la Terre aux pôles en mesurant la longueur exacte d'un degré d'arc sur un méridien.

L'étude de *Micromégas* s'inscrit parfaitement dans le programme du baccalauréat, puisque le thème retenu pour l'argumentation est la question de l'homme, du XVI<sup>e</sup> siècle à nos jours : on insiste alors sur la place de l'homme dans l'univers et sur le retentissement des découvertes scientifiques en littérature et en philosophie. Le travail transdisciplinaire apparaît sur le descriptif du bac au titre de documents complémentaires.

# LE COIN DES PETITS CURIEUX

*Dans cette nouvelle rubrique nous allons essayer de répondre à des questions que des jeunes (souvent des écoliers) posent à leurs enseignants. Nous le ferons en utilisant un vocabulaire compréhensible à cet âge.*

## Comment se fait-il que les hommes qui sont de l'autre côté de la Terre ne tombent pas ?

ÉMILIE - Je vais essayer de te répondre, mais il faut que tu m'aides ...

Saute sur place.... Mais saute plus haut ! ...

Que se passe-t-il à chaque fois ?

ALEXIS - Je retombe.

ÉMILIE - Et oui, c'est la Terre qui t'attire. On dit qu'elle exerce une force sur toi. Tu la vois cette force ?

ALEXIS - Non.

ÉMILIE - C'est normal, c'est quelque chose d'invisible. On ne voit pas les forces, mais on peut voir ou sentir leurs effets.

Ouvre ta main, paume vers le haut. Je dépose sur ta main un gros livre.

ALEXIS - Oh ! La ! La ! Que c'est lourd !

ÉMILIE - Tu sens que le livre appuie sur ta main. En fait, c'est la Terre qui attire le livre vers elle. Si tu enlèves rapidement ta main, le livre tombe vers la Terre.

ALEXIS - Et alors la Terre attire tout ?

ÉMILIE - Oui, c'est pour cela que tous les gens à la surface de la Terre sont attirés par elle et gardent tous les pieds sur terre.



ALEXIS - Il n'y a que la Terre qui attire tout ?

ÉMILIE - Non, toi aussi tu attires tous les objets qui sont autour de toi.

ALEXIS - Mais alors pourquoi ils ne tombent pas sur moi ?

ÉMILIE - D'abord parce que la Terre est proche et surtout parce que la force que tu exerces sur les objets est très très faible.

ALEXIS - Pourquoi je ne suis pas plus fort que la Terre ?

ÉMILIE - En fait, les forces qu'exerce un corps (tout être vivant ou tout objet) sur les autres corps dépend de la quantité de matière qui le constitue. En physique nous appelons cela la masse.

ALEXIS - Oui, je sais, moi j'ai une masse de 35 kilogrammes.

ÉMILIE - Très bien. Tu vois celle de la Terre, en kilogrammes, s'écrit avec un est de 6 suivi de 24 zéros. C'est donc beaucoup beaucoup plus que ta masse.

ALEXIS - Combien de fois ?

ÉMILIE - ... Hum ! ... des millions de milliards de milliards fois plus.

ALEXIS - Alors la force que la Terre exerce sur le livre est des millions de milliards de milliards fois plus grande que celle que j'exerce sur lui.

ÉMILIE - Bravo ! Tu as tout compris.

ALEXIS - Je sais comment faire pour que la Terre ne m'attire plus.

ÉMILIE - Ah bon : Comment ?

ALEXIS - Je vais dans l'espace, par exemple dans un avion à 3 km de hauteur.

ÉMILIE - Imagine que les réacteurs (ou le moteur) de l'avion tombent en panne. Que va-t-il se passer ?

ALEXIS - Il va tomber.

ÉMILIE - Pourquoi ?

ALEXIS - Parce que la Terre va l'attirer.

ÉMILIE - Et toi qui es dans l'avion aussi. Cette force que l'on appelle force de gravitation agit à grandes distances, mais elle devient de plus en plus faible. Par exemple la force que tu exerces sur le livre situé à 2 mètres de toi est 4 fois plus faible que celle que tu exercerais si le livre était à 1 mètre. Et si le livre est à 3 mètres elle sera 9 fois plus faible, ...

ALEXIS - Et à 4 mètres elle serait 16 fois plus petite, c'est chaque fois 2 fois 2, 3 fois 3, ... Donc si je suis à 2 km de hauteur la force exercée par la Terre sur moi serait 4 fois plus petite que si j'étais à 1 km.

ÉMILIE - Non, la distance qu'il faut prendre c'est celle allant de toi jusqu'au centre de la Terre 2 km + 6400 km. Donc si tu veux que la force qu'exerce la Terre sur toi soit 4 fois plus petite que celle qu'elle exerce, en ce moment, quand tu es à sa surface, il faut que tu sois à 6400 km d'altitude.

ALEXIS - Ouah ! Si loin ?

ÉMILIE - La Terre attire aussi la Lune qui est beaucoup plus loin. Je te l'ai déjà dit, c'est une force d'attraction faible, mais qui agit à très grande distance.

ALEXIS - Pourquoi tu dis que c'est une force faible alors que la Terre est très grosse ?

ÉMILIE - Regarde ce clou, si je le lâche, il tombe, attiré par la Terre. Mais je peux l'empêcher de tomber avec ce tout petit aimant.

ALEXIS - Ah ! Oui, mais pourquoi ?

ÉMILIE - Car l'aimant exerce sur le clou une force plus grande que celle exercée par la Terre sur lui.

ALEXIS - Tu me dis que la Terre attire des objets qui sont loin, mais alors les satellites s'ils sont attirés par la Terre, pourquoi ne lui tombent-ils pas dessus ?

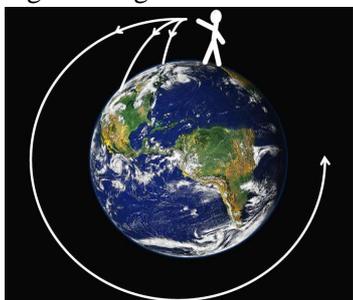
ÉMILIE - Et pourtant ils tombent !

ALEXIS - Ah ! Bon.

ÉMILIE - Imagine que tu lances une pierre, elle va tomber à 4 mètres. Que se passe-t-il si tu la lances avec une vitesse plus grande ?

ALEXIS - Elle va tomber plus loin.

ÉMILIE - Regarde ce globe terrestre.



Si l'objet lancé va de plus en plus loin, il va finir par tomber en « ratant » la Terre. On dit qu'il est satellisé.

ALEXIS - Alors c'est facile d'envoyer un satellite dans l'espace.

ÉMILIE - Non, il a fallu attendre le milieu du 20<sup>e</sup> siècle pour que les hommes créent des fusées pouvant atteindre des vitesses de l'ordre de 7 km par seconde. Quand tu vois passer un satellite le soir dans le ciel, il a donc une vitesse très grande.

ALEXIS - Mais dis-moi dans les satellites, les hommes ne sont pas attirés par la Terre puisqu'on dirait qu'ils volent !

ÉMILIE - Réfléchis. Pourquoi un satellite tourne-t-il autour de la Terre ?

ALEXIS - Parce que la Terre l'attire, et qu'il a une grande vitesse.

ÉMILIE - Et l'astronaute qui est dans la station spatiale ?

ALEXIS - C'est pareil, il tourne avec une grande vitesse.

ÉMILIE - Oui et quelle est cette vitesse ?

ALEXIS - La même que celle de la station spatiale.

ÉMILIE - Comme les deux tombent en « ratant » la Terre (comme tous les objets qui sont dans la station), on a l'impression que les astronautes volent dans la station. On aurait la même impression si

nous étions tous les deux dans un ascenseur dont le câble se serait cassé.

ALEXIS - Ah ! Oui, j'ai vu ça à la télé le mois dernier, dans un avion les hommes volaient. Avant de voler, ils faisaient comme s'ils étaient sur Mars ou sur la Lune.

ÉMILIE - Tu sais pourquoi les hommes sont moins attirés quand ils marchent sur la Lune que quand ils marchent sur la Terre ?

ALEXIS - Parce que la Lune est plus petite.

ÉMILIE - Oui, sa masse est plus petite. Tout à l'heure je te disais que pour satelliser un objet il faut qu'il atteigne la vitesse de 7 km/s et bien si on veut quitter la Terre pour aller vers Mars par exemple, il faut atteindre au moins 11 km/s. Sur la Lune il faut des vitesses plus faibles. Par contre il y a des astres plus massifs et dans ce cas il faut des vitesses plus grandes. Pour quitter l'attraction de Jupiter il faut atteindre une vitesse d'environ 60 km/s et pour le Soleil ce serait plus de 600 km/s

ALEXIS - C'est énorme !

ÉMILIE - Et il y a des étoiles bien plus massives que le Soleil, comme les naines blanches. Certaines ont la masse du Soleil, mais ont un rayon environ 100 fois plus faible. Et là, il faudrait une vitesse de 6 000 km/s pour les quitter.

ALEXIS - Et est-ce qu'il y a encore plus fort ?

ÉMILIE - Oui, pour quitter certains astres il faudrait des vitesses supérieures à 300 000 km/s.

ALEXIS - Mais ça c'est la vitesse de la lumière.

ÉMILIE - Oui, donc même la lumière ne peut pas quitter l'astre. Connais-tu le nom de cet astre ?

ALEXIS - Non.

ÉMILIE - C'est un trou noir : trou parce ce que si un objet passe à proximité, il est attiré et tombe dedans (comme dans un trou) et noir car il n'émet pas de lumière (même la lumière avec sa vitesse ne peut pas le quitter).

ALEXIS - Et alors comment on fait pour le voir ?

ÉMILIE - On ne le voit pas, mais on peut voir ses effets. Comme la Terre nous attire, le trou noir attire aussi la matière. La force est tellement grande que la matière est beaucoup accélérée et émet alors une « lumière » que l'on appelle rayons X. Ce sont ces rayons X que l'on détecte. Mais il y a une autre façon : comme la Lune tourne autour de la Terre, il peut y avoir des étoiles qui tournent autour d'un trou noir. C'est ce que l'on a détecté au centre de notre galaxie. On voit tourner des étoiles autour de quelque chose d'invisible. C'est un trou noir.

ALEXIS - Maintenant je suis bien content de savoir ce qu'est un trou noir. Je vais le raconter à mon père.... Quand est-ce que tu reviens ?

ÉMILIE - Écoute, passe de bonnes vacances d'été, je reviendrai à l'automne. ■

# ARTICLE DE FOND

## Mesure de la constante de la Gravitation Universelle

*Georges Paturel, Observatoire de Lyon*

*Cet article explique les premières tentatives pour mesurer la constante de la gravitation universelle, ainsi que les premiers succès expérimentaux, en particulier celui de Boys qui marqua un véritable progrès dans cette quête d'une valeur précise. Quelques nouvelles approches sont présentées, mais toujours autour de la balance de torsion. Les désaccords subsistants, la recherche de paramètres secondaires est poursuivie, mais avec un résultat toujours vain, pour l'instant.*

### Introduction

Il y a bien longtemps, lors d'une AG du CLEA, j'avais parlé de mon intérêt pour la reproduction de la célèbre expérience historique de Cavendish, visant à mesurer la constante de la gravitation universelle, cette constante que l'on désigne par  $G$  (à ne pas confondre avec l'accélération locale de la gravitation, notée  $g$ ). Béatrice Sandré et Annie Petit m'ont fait parvenir deux articles qui m'ont permis de me lancer dans cette expérience (voir les Cahiers Clairaut 104 et 105). Depuis ce jour j'ai été complètement fasciné par cette mesure, si difficile et si fondamentale.

J'ai eu la chance de rencontrer Terry Queen, un ancien directeur du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), qui avait accepté de faire une conférence sur le sujet, lors de la présentation de notre expérience au Palais de la découverte. Il m'avait dit en substance et de manière prémonitoire, "quand on commence à s'intéresser à cette expérience, on ne peut plus s'en libérer". C'est ce qui m'est arrivé. Si cette mesure est si passionnante, c'est probablement à cause même de sa difficulté, qui explique la faible précision de sa valeur actuelle et les désaccords entre les différents expérimentateurs.

La valeur donnée en 2002 par la CODATA est la suivante :

$$G = 6,67384 \pm 0,00080 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

C'est la valeur donnant le meilleur compromis entre toutes les expériences. Dans les publications récentes, on trouve des différences énormes, au point que même la troisième décimale peut paraître incertaine. Les incertitudes sont-elles sous-estimées ?

Certaines méthodes sont-elles plus fiables que d'autres ? Existe-il un paramètre caché qui expliquerait les désaccords ?

Pour répondre à ces questions, je suis parti d'un volumineux article de 75 pages, écrit par un spécialiste G. T. Gillies, en 1997.

### Les premières tentatives

Avant de rappeler quelques-unes des mesures historiques importantes, il est important de rappeler que l'enjeu, à l'époque de Newton, était de mesurer la densité moyenne de la Terre pour pouvoir calculer la masse de celle-ci. De la masse de la Terre découlaient la masse des autres corps célestes grâce aux lois de Kepler-Newton. Ce n'est que plus tard, quand la formulation moderne de la loi de la gravitation fut écrite, que la constante  $G$  apparut comme l'enjeu réel.

Lisons un passage des "Principia" (1714) de Newton traduit par la marquise du Châtelet : « *Ainsi comme la terre est ordinairement à sa surface environ deux fois plus pesante que l'eau, et qu'en fouillant plus avant, elle est trois, quatre, et même cinq fois plus dense : il est vraisemblable qu'il y a environ cinq ou six fois plus de matière dans le globe de la Terre que s'il n'était formé que d'eau* ».

Donc, selon Newton la densité moyenne de la Terre serait de l'ordre de  $\rho_T = 5,5 \pm 0,5$ . Cette valeur conduit à :  $G = 6,7 \pm 0,6 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . La marque du génie ! Il faudra attendre 60 ans pour qu'une véritable mesure vienne confirmer cette estimation.

La première tentative de mesure de  $G$  remonte à la mission en Amérique du Sud d'un astronome français : Pierre Bouguer. Celui-ci était parti faire la mesure d'un arc de méridien à l'équateur. En 1735, il était à proximité du Chimborazo, une montagne volcanique, en forme de cône, culminant à 6 300m d'altitude. Un pendule placé près de la montagne, devait dévier de la verticale astronomique. Bouguer observa une telle déviation (quelques secondes

d'arc), mais ne put pas en déduire avec précision la force d'attraction entre le pendule et la montagne, ce qui lui aurait permis de déduire alors la masse de la Terre.

La méthode fut reprise avec succès par Maskelyne et Hutton en 1774 et par James et Clark en 1855. Les résultats corroborèrent la conjecture de Newton, avec une densité terrestre moyenne  $\rho_T = 5$  environ.

En 1854, Airy essaya une nouvelle méthode : la période d'un pendule simple devait donner la variation de la masse de la Terre avec la profondeur. Il trouva  $\rho_T = 6,6$ . Von Sterneck reprit cette même méthode en 1883. Il trouva que la densité moyenne de la Terre,  $\rho_T$ , était comprise entre 5,77 et 7.

On voit que 140 ans après Newton, on n'avait pas beaucoup progressé. Un progrès décisif vint d'une invention, aussi simple que géniale, à savoir, la balance de torsion. Une simple barre suspendue en son milieu par un fil très fin. L'idée est sans doute apparue indépendamment en Angleterre et en France autour des années 1777. Le physicien Michell semble être à l'origine de son application à la gravitation par Cavendish. De son côté, Coulomb montre que la relation liant le moment,  $M$ , de la force de torsion à l'angle de torsion  $\theta$  était une loi de proportionnalité :

$$M = C\theta.$$

Mais plus important pour la suite, Coulomb exprime la constante de torsion  $C$  en fonction des caractéristiques du fil en montrant, en particulier, que cette constante dépend de la puissance quatrième du diamètre du fil. Plus le diamètre du fil est petit, meilleure est la sensibilité. Un fil deux fois plus fin est 16 fois plus sensible à la torsion.

## Les premières mesures

C'est donc Cavendish qui utilisa la technique de la balance de torsion pour faire la première mesure réellement précise, en 1798. Le schéma de la balance est facile à comprendre.

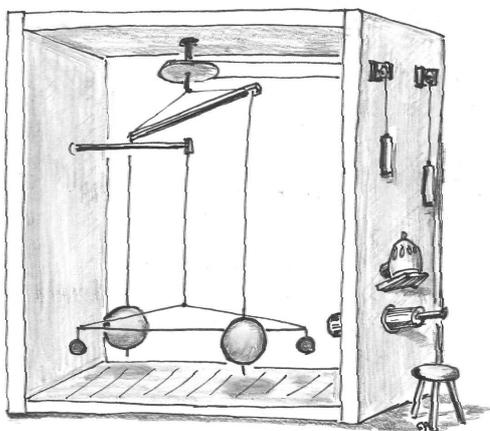


Schéma simplifié de l'expérience de Cavendish

Les grosses boules attirent les petites boules fixées aux extrémités d'une barre, elle-même suspendue en son milieu à un fil très fin. La mesure de l'angle, dont tourne la barre, permet de remonter à la force d'attraction agissant sur les petites boules suspendues. La constante de torsion  $C$  est déterminée par la période d'oscillation du pendule.

Cavendish était un chimiste qui se distinguait par sa méticulosité. Il mit à profit son extrême rigueur pour mesurer la force d'attraction entre deux corps de masses connues. Connaissant la force d'attraction (le poids) entre les grosses boules et la Terre, il déduisit la masse de la Terre et donc sa densité moyenne (le rayon de la Terre était connu depuis longtemps, les premières mesures datant d'Ératosthène, vers -250). Cavendish fit plusieurs mesures, dans des conditions différentes.

Le résultat :  $\rho_T = 5,448$ , presque la valeur attendue par Newton !

D'autres expérimentateurs (Baily et Reich) reprirent la même méthode dans les années 1840. Les mesures furent approximativement en accord avec celle de Cavendish (respectivement  $\rho_T = 5,49$  et  $5,674$ ).

D'autres physiciens tentèrent l'expérience avec une balance classique. La méthode est a priori moins favorable, car la force à mesurer agit dans la même direction que l'attraction terrestre. Von Jolly utilisa par exemple une boule de plomb de 5,5 tonnes pour parvenir à détecter la force supplémentaire.

Néanmoins les résultats furent compatibles avec les mesures faites avec la balance de torsion, mais la dispersion demeurait toujours grande.

## Une mesure exceptionnelle

Au départ, on pensait intuitivement qu'il fallait utiliser des boules de grande masse pour faciliter la mesure. La masse des petites boules suspendues était cependant limitée par la charge de rupture du fil de suspension<sup>7</sup>. Un progrès important consista, à l'opposé de l'intuition première, à faire une balance de petite dimension.

C'est le physicien anglais Boys qui, en 1895, montra l'intérêt d'une balance miniature. En réduisant les masses des boules suspendues, il est possible de réduire le diamètre du fil de suspension. La charge de rupture du fil dépend du carré du diamètre. Ainsi, par exemple, en réduisant les masses suspendues d'un facteur 100, ce qui ne pénalise pas

<sup>7</sup> La masse des petites boules suspendues n'intervient pas dans le calcul, mais il ne faut pas la choisir trop faible pour que les masses annexes (barre, fils de suspension etc...) soient négligeables devant elle.

la mesure, car la valeur des masses suspendues n'intervient pas dans l'expression de l'angle de rotation, le fil pourra avoir un diamètre 10 fois plus petit. Or, rappelez-vous, la constante de torsion dépend du diamètre à la puissance quatre. La sensibilité sera donc 10 000 fois supérieure. Cette idée géniale a permis à Boys de faire une mesure d'une qualité exceptionnelle.

La grande difficulté était d'obtenir un fil très fin. Les chercheurs du BIPM (T. Quinn et R. Davis) m'ont expliqué la technique originale que Boys utilisa pour former des fils de quartz de seulement quelques microns de diamètre. Il faisait fondre le quartz et reliait la masse fondue à la pointe d'une flèche d'arbalète. En tirant la flèche, le quartz s'étirait rapidement en se refroidissant. On imagine sans peine la difficulté d'une telle pratique. Un fil de deux microns de diamètre est très difficile à manipuler. On ne le voit pratiquement pas et il est d'une grande fragilité.

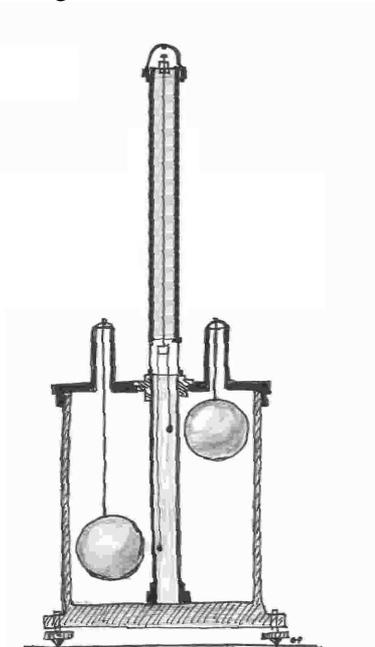


Schéma simplifié de l'expérience de Boys

Un autre intérêt d'une balance de petite taille est sa relative insensibilité à la distribution des masses parasites entourant l'expérience. En effet, les boules suspendues sont très proches et l'effet d'une masse parasite à une distance  $r$  varie en  $r^{-3}$ , par effet différentiel de marée. En revanche, cette qualité deviendrait un défaut pour l'action des masses attractives. En effet chaque grosse boule attire, non seulement la petite boule proche, mais aussi la petite boule plus distante. Dans le cas d'une balance de petite dimension, cette attraction en sens inverse est importante. La solution de Boys a été de placer les boules à des hauteurs différentes, pour chaque côté.

Boys a aussi introduit une méthode pratique pour calculer la constante de torsion à partir de la période d'oscillation de la balance de torsion. Pour ce calcul, il faut connaître le moment d'inertie de l'équipage mobile. Le calcul théorique n'est pas toujours facile. Aussi Boys mesura-t-il ce moment d'inertie en remplaçant les boules suspendues par des masses de forme simple (cylindre) mais placées différemment. La mesure des périodes dans les différentes configurations permet de remonter au moment d'inertie recherché.

Enfin, Boys a compris que le paramètre intéressant à mesurer n'est pas la densité moyenne de la Terre, mais bien la constante de la gravitation universelle. S'il donne aussi la densité moyenne de la Terre, c'est pour rester dans la tradition. Ses résultats sont les suivants :

$$G = 6,6576 \pm 0,002 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\rho_T = 5,5270 \pm 0,0036$$

Pour calculer les valeurs moyennes, Boys a pondéré ses différents résultats d'une manière personnelle<sup>8</sup>, en privilégiant les mesures faites dans les meilleures conditions. Lisons ce que dit Boys de ces conditions de mesure : « *La tranquillité absolue est si importante dans les mesures, que j'ai toujours réservé les nuits du dimanche, de minuit à 6 ou 8 heures du matin, pour les observations... et heureusement pour moi, la plupart de mes observations ont été faites pendant la grève des charbonnages, durant laquelle les trains étaient moins nombreux* ».

### Autres méthodes

La mesure, avec la méthode de Cavendish, se fait de manière statique. On part d'une position de repos, avec les masses attractives situées chacune au plus près d'une des petites masses suspendues, de part et d'autre du fléau. Pour faire la mesure on déplace les masses attractives pour les amener chacune au plus près de la petite masse suspendue opposée. Le fléau tourne alors lentement et oscille pour atteindre, au bout de plusieurs dizaines de minutes, une nouvelle position d'équilibre. On mesure la déviation angulaire entre les deux positions d'équilibre.

Dans les années 1930, le physicien Heyl du "Bureau of Standards" de Washington, utilisa une méthode dynamique. Les masses attractives étaient placées soit dans l'alignement de la barre de suspension d'une balance de torsion, soit perpendiculairement à la barre, au centre. Le calcul montre que les périodes d'oscillations sont différentes pour les deux

<sup>8</sup> Boys ne donnait pas d'incertitudes. Je les ai estimées à partir de ses meilleures mesures. En prenant tous ses résultats on a :  $G = 6,6630 \pm 0,006 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ .

positions. De la mesure de ces périodes on peut déduire  $G$ . La balance doit être placée dans un bon vide pour que l'amortissement soit faible. Les mesures de Heyl et Chrzanowski de 1942 détrônèrent les mesures de Boys. Leur résultat était :

$$G = 6,673 \pm 0,003 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

Il est intéressant de rappeler que Heyl inventa une boussole fonctionnant par induction par le champ magnétique terrestre. Une telle boussole fut utilisée par Lindbergh lors de sa célèbre traversée transatlantique en 1927.

Signalons encore une autre classe de balances de torsion utilisées en mode oscillant. Il s'agit des balances à résonance. Ce type de balance a été utilisé en France (Pontikis) et en Union Soviétique (Kunz et Zahradnicek puis Sagitov), dans les années 1930 puis 1970. Une balance oscillante induit des oscillations dans une deuxième balance. L'analyse de la réponse de cette deuxième balance permet de remonter à  $G$ . Les auteurs espéraient une précision de l'ordre de  $10^{-4}$ . Mais les résultats des deux équipes n'étaient pas compatibles entre eux :

Pour Pontikis :  $G = 6,6714 \pm 0,0006 \times 10^{-11} \text{ SI}$

Pour Sagitov :  $G = 6,6745 \pm 0,0008 \times 10^{-11} \text{ SI}$ .

## Les améliorations

Je ne peux mentionner toutes les expériences qui ont été faites. Je renvoie à l'article de Gillies qui fait une analyse exhaustive des expériences, au moins de 1970 à 1996. Nous allons principalement expliquer quelques difficultés et quelques solutions. La première difficulté semble être une difficulté de métrologie. Comment mesurer les longueurs des éléments et les distances entre ceux-ci ? Cette difficulté provient non seulement des méthodes de mesure (comparateur, cathétomètre) mais aussi de l'homogénéité des éléments. Par exemple, si on utilise des boules pour les masses attractives, comment peut-on être sûr que le centre de masse est bien confondu avec le centre géométrique ? Cette difficulté a poussé certains expérimentateurs à utiliser des cylindres plutôt que des boules, au prix de calculs plus complexes. Par exemple, dans la dernière expérience du BIPM, quatre cylindres de cuivre au béryllium (pour faciliter l'usinage) sont utilisés pour les masses attractives, et quatre autres cylindres plus petits, pour les masses suspendues. Une étude particulière a été faite pour tester l'homogénéité des matériaux de fabrication. Curieusement, la mesure des masses pose moins de problème, bien qu'il faille se référer à un étalon dont on sait qu'il montre des dérives par rapport aux étalons secondaires. Mais, par définition, l'étalon

déposé au BIPM de Sèvres pèse toujours un kilogramme exactement<sup>9</sup>.

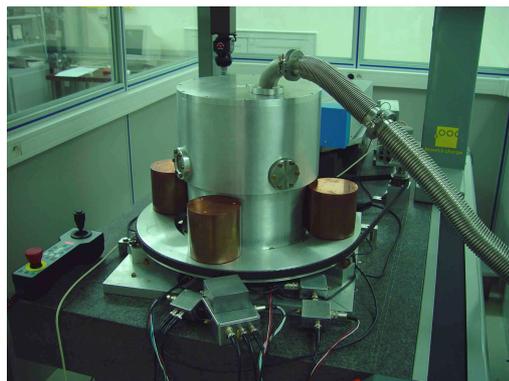


Photo BIPM

*La balance du BIPM en fonctionnement.*

La seconde difficulté, pour les balances de torsion, provient du fil de suspension de la barre. Cavendish utilisait un fil d'argent de 50  $\mu\text{m}$  de diamètre. Ce fil pouvait avoir une certaine rémanence en gardant la mémoire d'une torsion antérieure. C'est pourquoi Boys utilisa un fil de quartz moins sensible à cet effet. Le diamètre était de 2  $\mu\text{m}$  seulement, pour améliorer la sensibilité comme nous l'avons vu plus haut.



*Le fléau suspendu (plateau) avec ses petits cylindres, et un des cylindres attracteurs de la balance du BIPM.*

Une amélioration a consisté à utiliser, non plus un fil, mais un ruban étroit, par exemple en tungstène. La flexion d'un ruban métallique est quasi sans frottement. La perte d'énergie par friction dans le métal est très faible, mais sujette à un comportement complexe, dépendant par exemple de la fréquence. Cette propriété s'appelle l'anélasticité. Un facteur de qualité  $Q$  la caractérise. Ceci a été étudié par Quinn qui a montré également que la constante de torsion est quasiment indépendante de la tension du ruban de suspension, même sous une tension proche de la rupture. Il n'en reste pas moins qu'une source possible de biais provient de ce

<sup>9</sup> Une future définition du kilogramme par l'expérience de la balance du Watt remplacera le kilogramme étalon.

problème d'anélasticité. Certaines expériences récentes éliminent le problème en détordant le fil (ou le ruban) de suspension, pour éviter, ou limiter l'anélasticité. Une mesure obtenue ainsi par Gundlach et Merkowitz en 2000 conduit à une valeur très précise de  $G$  :

$$G = 6,674215 \pm 0,000092 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

Une autre voie pour éliminer les problèmes liés à la suspension de la barre est d'utiliser des mécanismes autres qu'un fil ou un ruban : suspension magnétique ou axe à mercure. Va-t-on voir les désaccords entre les différents laboratoires se résoudre ? Les désaccords proviennent-ils de paramètres non pris en compte ? C'est ce que nous allons voir.

## Les problèmes fondamentaux

Les efforts pour rechercher des paramètres supplémentaires intervenant dans la loi de Newton sont motivés par les désaccords entre les mesures des différentes équipes et par les prédictions de théories alternatives de la gravitation.

Cavendish a longuement discuté de l'existence d'un effet de température pour conclure que les gradients de température provoquaient des turbulences qui faussaient la mesure. Les mesures récentes sont souvent effectuées dans une enceinte sous vide. L'effet parasite doit donc disparaître. Cependant il y a eu un regain d'intérêt pour la recherche d'une dépendance de  $G$  du temps car certaines théories (théorie de jauge) prédisaient un tel effet. À ce jour, les expériences faites n'ont pas confirmé un tel effet.

De même, aucune dépendance de  $G$  avec la nature de la matière constituant les masses attractives n'a été trouvée (Pontikis), pas plus qu'un couplage entre gravitation et électromagnétisme que laisse espérer la théorie des cordes.

Après la publication par Dirac de l'hypothèse des grands nombres qui prévoyait une variation temporelle de  $G$ , idée renforcée par des théories cherchant à étendre la Relativité Générale (théorie de Weyl-Dirac et théorie de Brans-Dicke), de nombreuses tentatives donnèrent une limite à cette variation de l'ordre de :

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{\dot{G}}{G} \leq 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

Ce résultat laisse peu d'espoir de découvrir le phénomène par les mesures directes de  $G$  en laboratoire.

De même, une modification de  $G$  en fonction de la distance de séparation des masses attractives a été

recherchée. Cette dépendance est quantifiée par le paramètre  $\delta$  quand la loi de Newton est écrite :

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^{2+\delta}}$$

Des tests ont été faits entre 0,050 millimètre et plusieurs dizaines de mètres, sans qu'aucune dérive significative n'apparaisse. Il faut dire cependant, que, compte tenu de la difficulté expérimentale, les barres d'erreurs sont grandes, ce qui rend très difficile la détection significative d'un effet, d'autant que des effets parasites apparaissent à faible distance (effet Casimir) et que, à grande distance, il faut utiliser des masses énormes (souvent des réservoirs d'huile ou d'eau, comme par exemple des barrages remplis à différents niveaux pour lesquels le calcul des masses mises en jeu est très délicat).

L'effet d'écran est un autre effet qui a été recherché. Peut-on "absorber" une partie de l'attraction gravitationnelle comme on absorbe un rayonnement ? Le physicien Majorana a introduit un facteur  $\lambda$  pour quantifier cet effet dans l'équation de Newton écrite sous la forme :

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^2} \exp\left(-\int \lambda \cdot \rho \cdot dx\right)$$

Où  $\rho$  est la densité du corps absorbant et  $x$  son épaisseur. L'effet initialement trouvé par Majorana n'a pas été confirmé.

## Conclusion

Il faut bien admettre que depuis Newton et Cavendish, les progrès ont été modestes malgré des efforts gigantesques d'ingéniosité et de précision. Cette mesure en laboratoire risque fort de passionner les physiciens pendant longtemps encore. Il faudrait sans doute améliorer la précision des mesures d'au moins deux ordres de grandeurs pour espérer comprendre l'origine des désaccords entre les résultats actuels. D'un autre côté, des indices tendent à montrer que la gravitation en champ très faible n'obéit pas à la loi de Newton. Il s'agit par exemple de ce qu'on appelle l'anomalie des sondes Pioneer ou même la courbe de rotation plate des galaxies.

On peut espérer que les techniques spatiales pourront apporter des solutions nouvelles car, pour l'instant, la meilleure technique est encore celle inventée par Cavendish en 1798 !

## Références

G.T. Gillies, "The Newtonian gravitational constant : recent measurements and related studies", Reg. Prog. Phys, **60** (1997), p151-225. ■

## Les relations Soleil-Terre : 2. plasma et reconnexion magnétique

Frédéric Pitout, Observatoire Midi-Pyrénées  
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse

(Suite de l'article du CC 141)

### Le 4<sup>ème</sup> état de la matière

Jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les scientifiques qui s'intéressaient aux aurores polaires savaient que leur apparition était étroitement liée à l'activité solaire mais ils étaient toujours confrontés à un épineux problème : comment se fait la connexion entre le Soleil et l'atmosphère terrestre ? Ils avaient bien en tête que ce devait être des particules chargées électriquement qui étaient éjectées par le Soleil mais sous quelle forme ? Certains ont d'abord pensé à des faisceaux d'électrons émis par notre étoile mais cette hypothèse fut vite abandonnée au profit du concept de plasma en mouvement : le vent solaire. Le terme de plasma, avec la multiplication des écrans plats, nous est familier mais la notion est-elle pour autant comprise ?

Un plasma est un gaz composé de particules

chargées, la plupart du temps ions positifs et électrons. Prenons comme exemple le cas de l'eau à l'état solide que l'on chauffe ; nous voyons dans la vie de tous les jours ce qui se passe : l'élévation progressive de température fait passer la glace à l'état d'eau liquide puis à la vapeur d'eau. Maintenant, si nous continuons toujours et encore à chauffer la vapeur d'eau, les molécules d'eau se dissocient en hydrogène et oxygène atomiques (avec éventuellement formation intermédiaire de dihydrogène et dioxygène). Enfin, les atomes d'hydrogène et d'oxygène s'ionisent en libérant des électrons. On obtient alors une soupe de protons, d'ions oxygène et d'électrons : un plasma, parfois considéré comme le 4<sup>ème</sup> état de la matière. La figure 1 donne les énergies caractéristiques qu'il faut fournir à une molécule d'eau à chaque étape décrite précédemment.

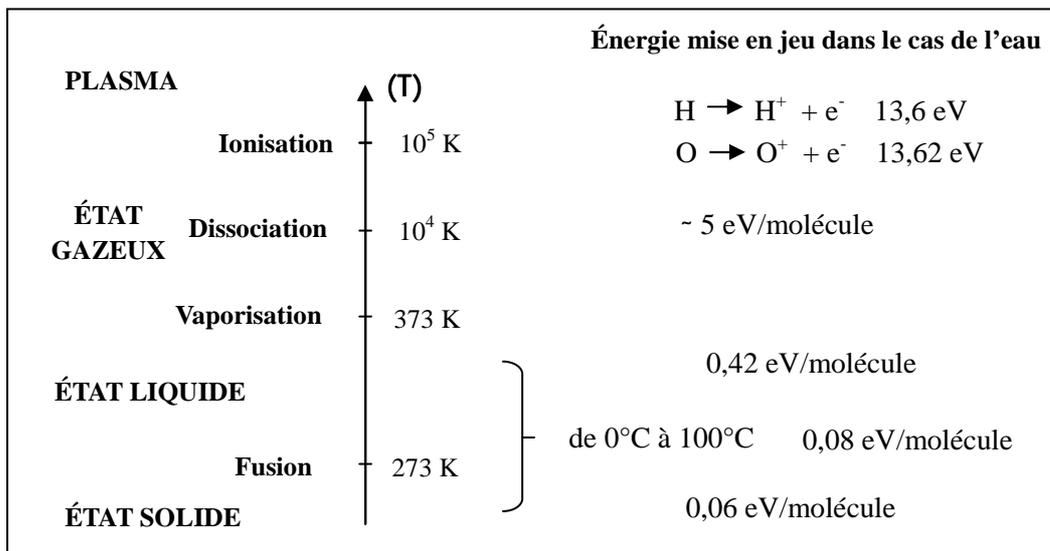


Fig.1. Énergies nécessaires pour les changements d'état de l'eau.

Un plasma se forme donc dès lors qu'un gaz reçoit l'énergie nécessaire à l'ionisation de ses composants. La figure 2 montre quelques plasmas sous forme d'un diagramme température - concentration de charges, deux paramètres importants pour les caractériser.

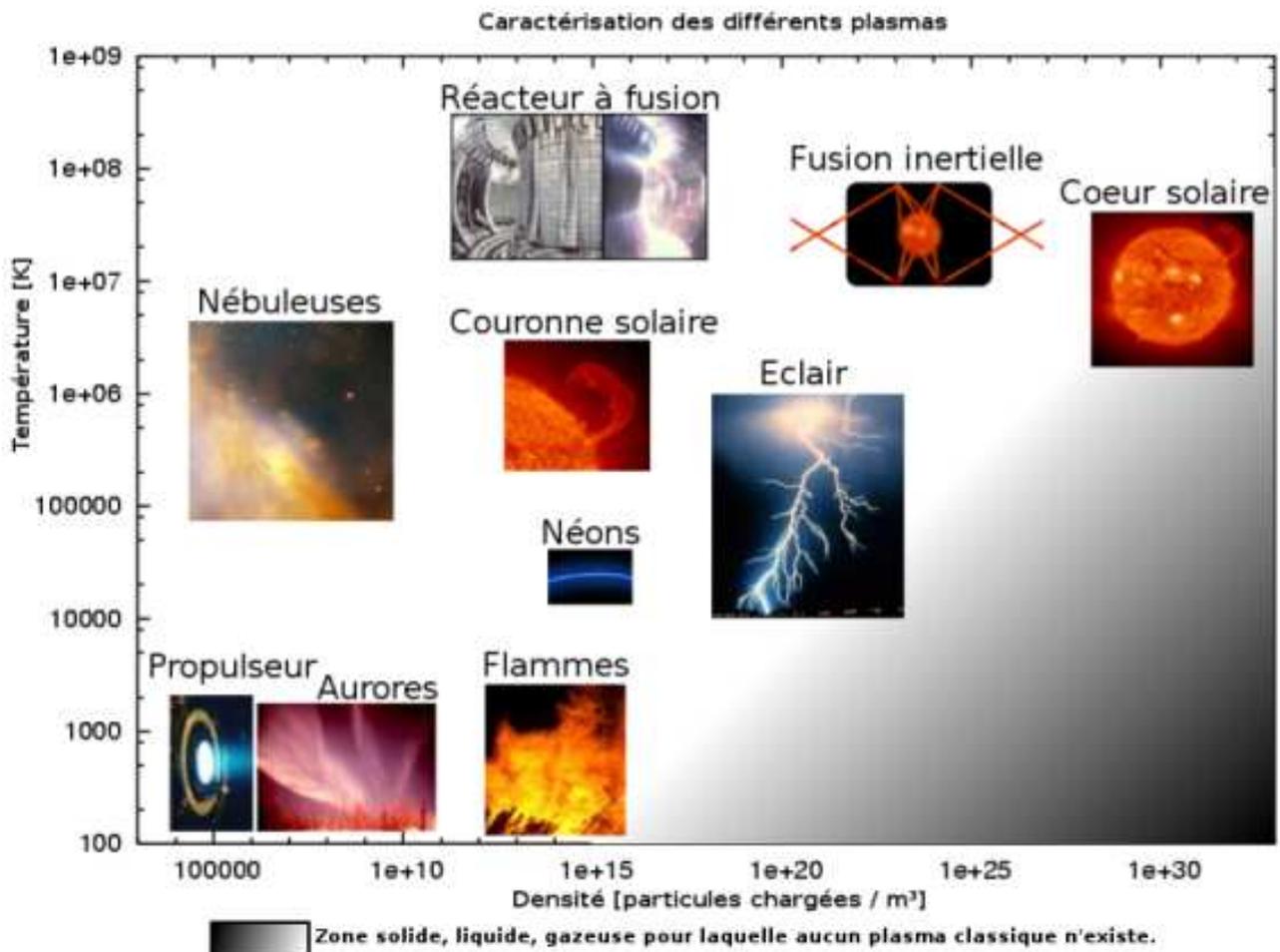


Fig.2. principaux plasmas naturels et de laboratoire disposés sur un diagramme température/concentration de charges.

Dans notre quotidien, outre les écrans déjà mentionnés, nous avons du plasma dans nos tubes fluorescents : c'est une décharge électrique – on parle alors de plasma de décharge – qui ionise et excite un mélange d'argon et de vapeur de mercure. (Précisons que contrairement à l'appellation communément utilisée, c'est rarement du néon qui, lui, émet une couleur rouge.) On trouve aussi des plasmas dans de nombreux domaines industriels ou technologiques : les torches à plasma pour la découpe, la propulsion plasma d'engins spatiaux, les plasmas de laboratoire, dits de confinement, pour la recherche sur la fusion nucléaire, etc.

Dans la nature, on trouve aussi un plasma de décharge autour des éclairs d'orage qui ionisent l'air sur leur passage. L'ionosphère, couche partiellement ionisée de l'atmosphère d'une planète, est aussi un plasma. (Dans le cas de la Terre, l'atmosphère est composée essentiellement des éléments hydrogène, oxygène et azote, et les énergies de première ionisation sont de l'ordre de 10-20 eV. Rappelons que c'est essentiellement le rayonnement ultraviolet solaire qui fournit cette énergie et crée donc le

plasma ionosphérique.) Dans ou à proximité des étoiles, c'est du plasma ; le rayonnement UV et X de ces mêmes étoiles ionisent le gaz interstellaire pour donner naissance aux régions HII des nébuleuses en émission, encore du plasma... En fait, on considère que près de 99% de la matière (baryonique) connue existe sous forme de plasma !

## Théorie de la magnétohydro-dynamique

Pour comprendre le comportement des plasmas, en particulier les plasmas naturels que l'on trouve dans notre environnement proche, il faut s'intéresser un peu à la façon dont on les étudie de manière théorique. Un plasma diffère au final d'un gaz uniquement par le fait que ses constituants sont ionisés mais cela fait, comme on va le voir, une différence énorme pour l'appréhender.

On sait bien depuis la fin du 18<sup>ème</sup> siècle environ décrire un gaz d'un point de vue thermodynamique ou hydrodynamique. Cette dernière décrit

l'écoulement d'un fluide au sens large par une série d'équations rendant compte de l'évolution de quantités macroscopiques : l'équation de conservation de la masse, l'équation de la quantité de mouvement, etc. Quant aux champs électromagnétiques, ils sont régis par quatre équations qui relient champ magnétique  $\vec{B}$ , champ électrique  $\vec{E}$ , densité de charges électriques et densité de courant électrique : les équations de Maxwell.

Pour décrire un plasma, c.-à-d. un fluide constitué de particules chargées et donc sensibles aux champs électromagnétiques, nous avons besoin de l'ensemble des équations mentionnées ci-dessus. L'effet combiné du champ électrique et du champ magnétique crée alors sur chaque particule de charge  $q$ , mue par une vitesse  $v$  la force de Lorentz (force qui sera à rajouter dans l'équation de la quantité de mouvement) :

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Les équations de la mécanique des fluides et de l'électromagnétisme constituent la base de la magnétohydrodynamique (MHD) ; en d'autres termes la dynamique des fluides (des gaz en l'occurrence) ionisés.

La théorie de la MHD décrit un plasma comme un fluide unique sans distinguer électrons et ions. Elle fut développée dans les années 1950 par le Suédois Hannes Alfvén qui reçut pour ses travaux le prix Nobel de physique en 1970. Ceux-ci montrent des propriétés étonnantes des plasmas.

En MHD dite idéale (pas de collisions entre les constituants donc une conductivité infinie) le plasma entraîne dans son mouvement le champ magnétique dans lequel il baigne (2a et b). On dit que le champ magnétique est gelé dans le plasma. Ainsi, le vent solaire « tracte » les lignes du champ magnétique solaire en se propageant dans le milieu interplanétaire. (On parlera d'ailleurs de champ magnétique interplanétaire.)

Toujours en MHD idéale, un élément de plasma traversé par un champ magnétique reste « lié » à ce champ magnétique et ne peut pas se mélanger à un autre plasma traversé par un autre champ magnétique (2c et d). Cette propriété a une conséquence majeure puisque c'est grâce à elle que notre planète Terre est protégée du vent solaire par sa coquille magnétique, la magnétosphère, puisque le plasma du vent solaire ne peut pas pénétrer dans la magnétosphère.

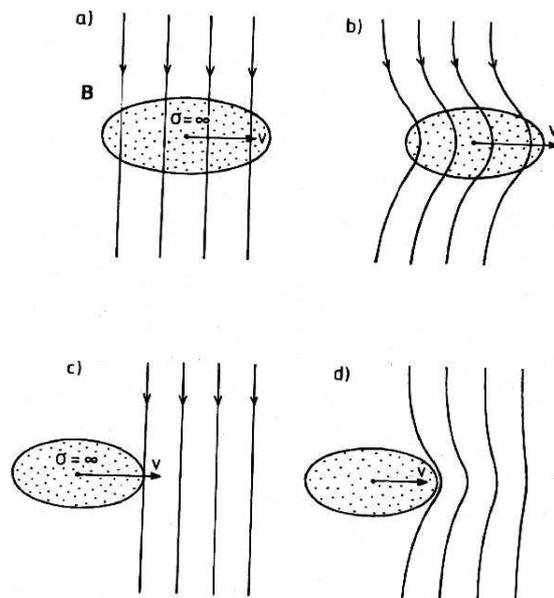


Fig.3. schéma illustrant deux propriétés de la MHD idéale. Le champ magnétique gelé dans le plasma (a et b) et un plasma ne pouvant pénétrer un champ magnétique extérieur (c et d).

À ce sujet, une grandeur fort utile à déterminer est le rapport entre la pression thermique du plasma (de concentration  $n$  et de température  $T$ ) et la pression magnétique du champ  $B$  que l'on note  $\beta$  :

$$\beta = P_{th} / P_{mag} = 2\mu_0 n k_B T / B^2$$

( $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide)

En première approximation, on peut dire que quand  $\beta > 1$ , c'est le plasma qui traîne dans son mouvement des lignes de champ magnétique et quand  $\beta < 1$ , c'est le champ magnétique qui contraint le mouvement du plasma.

Une autre propriété importante de la MHD idéale est la vitesse dite de dérive en « E vectoriel B » que subissent toutes les particules chargées soumises à un champ magnétique et un champ électrique. Cette vitesse est la même pour toutes les particules chargées quelques soient leur masse et charge électrique ! On montre aisément que cette vitesse vaut :

$$\vec{v}_D = (\vec{E} \wedge \vec{B}) / B^2$$

Cette formulation pourtant simple est à la base de la dynamique à grande échelle du plasma du vent solaire, du plasma magnétosphérique et même du plasma présent dans la haute atmosphère ionisée, l'ionosphère. Elle a aussi comme conséquence que bien que des charges électriques soient en mouvement, aucune densité de courant électrique  $j$  n'est générée puisque les charges positives et négatives (de même concentration  $n$  et de charge  $\pm e$ ) se meuvent avec le même vecteur vitesse :

$$\vec{j} = ne (\vec{v}_{+e} - \vec{v}_{-e}) = ne (\vec{v}_D - \vec{v}_D) = \vec{0}$$

Cependant, tout comme le champ électrique combiné au champ magnétique engendre cette vitesse de dérive, n'importe quel autre champ de force combiné au champ magnétique engendre de même une vitesse de dérive : la gravitation ou le gradient du champ magnétique par exemple. Mais à une différence notable près : ces vitesses-là dépendent de la masse et de la charge des particules. Dans les régions de la magnétosphère où ces forces seront non négligeables, des séparations de charges et donc des courants électriques vont apparaître. De fait, on observe tout un système de courants dans la magnétosphère et dans l'ionosphère, courants qui sont essentiels dans les couplages magnétosphère-ionosphère.

Pour résumer, la MHD idéale décrit relativement simplement le transport des plasmas non ou peu collisionnels. Elle rend compte en outre du fait que le vent solaire transporte avec lui le champ magnétique interplanétaire et que le vent solaire déforme la coquille magnétique terrestre - pour lui donner sa forme de queue de comète - sans pouvoir la pénétrer. Elle décrit aussi le mouvement à grande échelle du plasma magnétosphérique.

Notons enfin que cette description fluide des plasmas est une approximation dans la mesure où elle considère uniquement leurs grandeurs macroscopiques moyennes (concentration, vitesse,...), soient en des termes plus précis les moments de la fonction de distribution du plasma. D'autres formulations MHD existent pour décrire plus réalistement un plasma : la MHD résistive qui prend en compte les collisions ou la MHD bifluide dans laquelle les électrons et les ions sont décrits séparément. Une approche plus rigoureuse mais plus complexe et lourde à mettre en œuvre consiste à étudier les variations de la fonction de distribution elle-même, variations régies par l'équation de Boltzmann ou son approximation sans collisions, l'équation de Vlasov.

## Couplage vent solaire-magnétosphère par reconnexion magnétique

On sait depuis plusieurs dizaines d'années que la magnétosphère terrestre n'est pas aussi étanche que la théorie de la MHD idéale le prédit. En effet, nous avons des preuves observationnelles que du plasma du vent solaire parvient à franchir la magnétopause,

la couche externe de la magnétosphère, obstacle un temps supposé infranchissable : juste à l'intérieur de la magnétopause, les particules y ont les mêmes énergies, flux et concentrations que juste à l'extérieur, dans la magnétogaine (région où règne le plasma du vent solaire comprimé par le choc d'étrave). De toute évidence, il y a des fuites !

Pour pouvoir expliquer l'entrée du vent solaire dans la magnétosphère terrestre, il faut donc un processus qui permette à un plasma de pénétrer dans un champ magnétique auquel il n'est pas lié et accessoirement ce processus devra violer la MHD idéale. Plusieurs mécanismes physiques ont été envisagés pour expliquer cette bizarrerie. Parmi eux, le processus de reconnexion magnétique est aujourd'hui privilégié ; il permet dans des conditions particulières une reconfiguration des lignes de champ magnétique.

Pour comprendre, regardons un peu l'équation dite de l'induction qui régit les variations du champ magnétique dans un plasma de conductivité  $\sigma$  et mu d'une vitesse  $v$  :

$$\partial \vec{B} / \partial t = \vec{\nabla} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{B}) + \nabla^2 \vec{B} / \mu_0 \sigma$$

Cette équation, que l'on obtient à partir des équations de Maxwell, nous indique qu'une variation temporelle du champ magnétique en un point donné (terme de gauche) peut provenir de deux phénomènes : de l'advection, c.-à-d. du transport du champ magnétique avec le plasma (premier terme de droite), ou du fait de la diffusion, c.-à-d. de la variation spontanée du champ magnétique (deuxième terme de droite). Dans la grande majorité des plasmas naturels, la MHD idéale s'applique : la conductivité électrique est très grande et par conséquent le terme diffusif est négligeable. Les variations de  $B$  proviennent alors exclusivement de son transport : le champ magnétique est gelé dans le plasma. Par contre, dans des régions de l'espace comportant de forts gradients de  $B$  ou de manière équivalente un courant électrique localisé, le terme diffusif peut devenir important et les conditions de la MHD idéales ne sont plus satisfaites.

Il peut se produire alors entre deux champs magnétiques, si les conditions le permettent - à savoir que les deux champs magnétiques soient antiparallèles et s'annulent localement - une reconfiguration des lignes de champ magnétique comme représenté en trois étapes par la 3 : une ligne rouge et une ligne bleue se reconfigurent pour former deux nouvelles lignes.

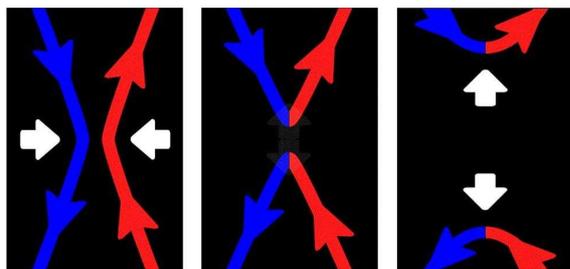


Fig.4. processus de reconnexion entre deux lignes de champ magnétique antiparallèles en 3 étapes.

Ce processus est un moyen efficace de convertir de l'énergie magnétique en énergie cinétique : les particules sont accélérées suite à un tel événement. Le phénomène semble opérer dans plusieurs plasmas naturels : il est invoqué pour expliquer l'éjection de proéminences solaires, les jets de matières observés dans le vent solaire, l'entrée de plasma du vent solaire dans les magnétosphères planétaires et les sous-orages magnétosphériques (phénomène impulsif d'apport de particules de la queue magnétosphérique vers la Terre) et bien d'autres.

La figure 4 montre comment la reconnexion magnétique intervient à la magnétopause (la couche externe de la magnétosphère) entre les lignes du champ magnétique interplanétaire et les lignes du champ géomagnétique. Elle représente une coupe transversale de la Terre (côté nuit en noir, côté jour en blanc ; le Soleil se trouve donc à gauche) avec quelques lignes de champ magnétique. Lorsque qu'une ligne du champ magnétique interplanétaire (ligne i en bleu) se reconnecte avec une ligne (dite fermée) du champ géomagnétique (étape 1 en vert), on obtient deux lignes de champ dites ouvertes (étape 2 en rouge). Les particules chargées ayant la propriété de suivre les lignes de champ magnétique (en spiralant autour de ces lignes), le plasma du vent solaire peut s'écouler le long des lignes ouvertes vers la magnétosphère et l'atmosphère des zones polaires où convergent ces lignes (on rappelle que les pôles magnétiques sont proche des pôles géographiques). Les lignes ouvertes sont ensuite emportées par le vent solaire vers la queue magnétosphérique (étapes 3, 4 5,...).

Nous avons insisté sur le fait que les champs devaient être antiparallèles pour que ce phénomène se produise c.-à-d., dans le cas de la Terre, que le champ magnétique interplanétaire (i) soit dirigé vers le sud. En fait, ce n'est pas si simple : on observe depuis une dizaine d'année, notamment grâce aux sondes de l'Agence Spatiale Européenne *Cluster*, que la reconnexion magnétique peut parfois se produire à la magnétopause dans des régions où les champs magnétiques interplanétaire et terrestre ne

sont pas strictement antiparallèles, voire pas antiparallèles du tout !

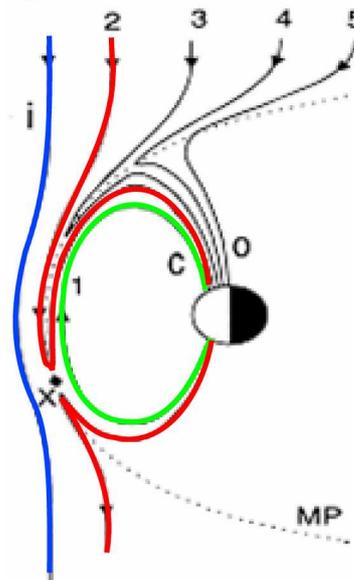


Fig.5. coupe transversale dans le plan midi-minuit de la Terre, de la magnétopause (trait pointillé) et de quelques lignes de champ magnétique.

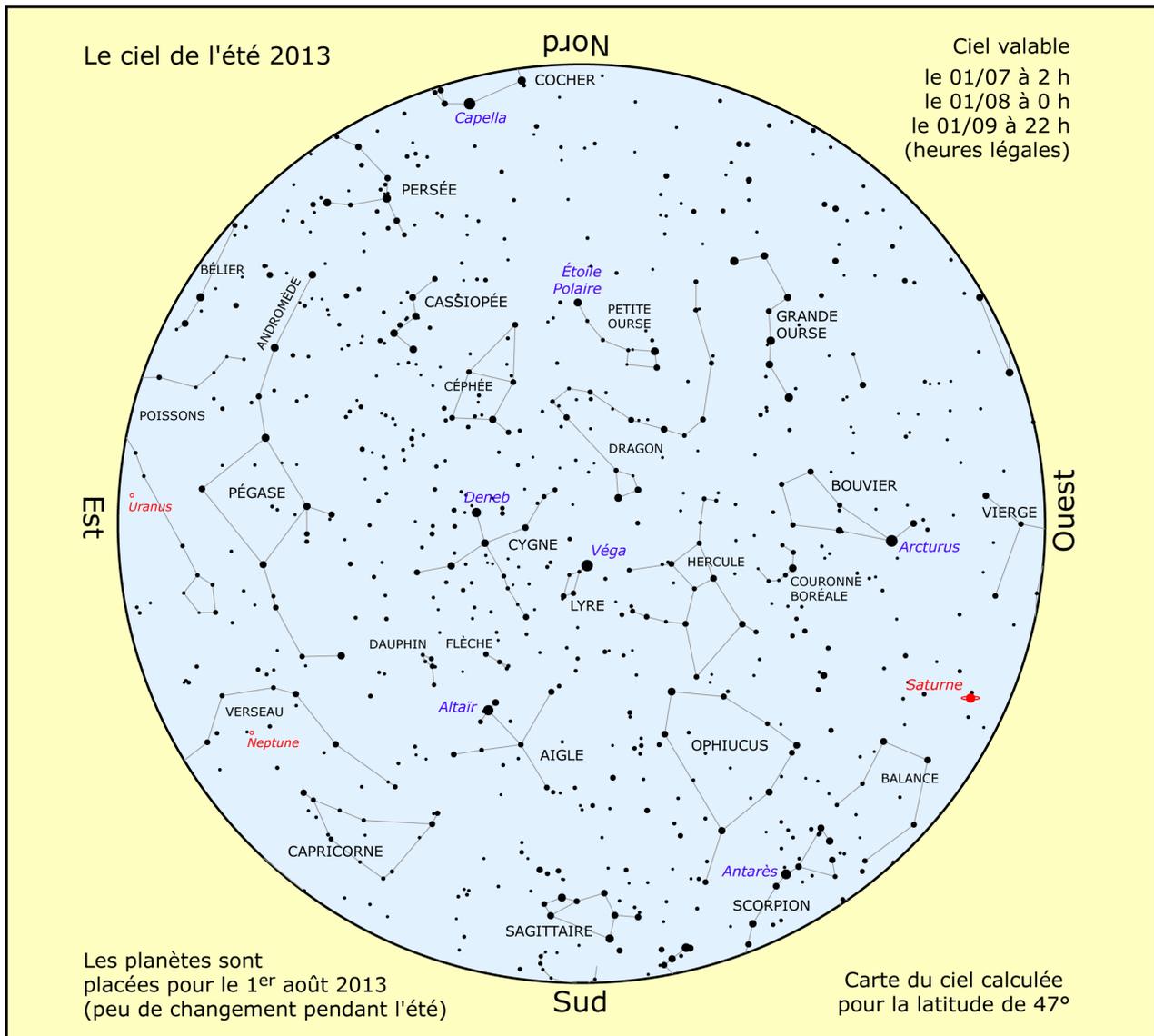
## Une recherche active

A l'heure actuelle, parmi les sujets qui résistent toujours aux efforts des scientifiques figure la caractérisation observationnelle et théorique du phénomène de reconnexion magnétique ; comme nous l'avons vu, tout n'est pas réglé... Gardons à l'esprit que ce processus touche potentiellement tous les plasmas magnétisés et quand on sait que l'écrasante majorité de la matière connue de l'Univers existe sous forme de plasma, on mesure l'importance du phénomène ! Rappelons que proche de notre Terre, la reconnexion magnétique joue un rôle essentiel dans l'éjection de matières solaire, dans la pénétration des vents stellaires dans les magnétosphères planétaires et dans le déclenchement des sous-orages magnétosphériques. On retrouve aussi ce processus dans les plasmas de laboratoire et dans l'univers plus lointain : il est invoqué pour expliquer les disques d'accrétion et jets de matière autour des quasars et noyaux actifs de galaxies (AGN).

## Bibliographie

- Delcroix, J.-L., et A. Bers, *Physique des plasmas 1 et 2*, Savoirs actuels, CNRS Éditions, 1994.
- Lilensten, J. et P.-L. Blelly, *Du Soleil à la Terre, aéronomie et météorologie de l'espace*, Grenoble Sciences, Presses Universitaires de Grenoble, 1999.
- Priest, E. and T. Forbes, *Magnetic reconnection, MHD theory and applications*, Cambridge University Press, 2000. ■

# Le ciel de l'été 2013



## Visibilité des planètes

On peut essayer de trouver **Mercure** cet été, soit le soir jusqu'au 24 juin peu après le coucher du Soleil, très basse à l'horizon ouest et juste au-dessous de Vénus, soit le matin à l'est, la première semaine d'août.

**Vénus** peut être observée le soir à l'ouest peu après le coucher du Soleil mais difficilement car elle reste elle aussi très basse sur l'horizon. Il faudra attendre la fin de l'automne pour mieux la voir.

**Mars** est visible dans le ciel du matin dès le mois de juillet, à l'est.

Après être passé derrière le Soleil le 19 juin, **Jupiter** réapparaît dans le ciel de l'aube mi-juillet.

**Saturne** reste visible le soir tout l'été mais elle se couche de plus en plus tôt.

**Uranus** et **Neptune** sont observables dans un instrument (voir la carte).

## Quelques événements (heures légales)

21/06 : solstice d'été à 7 h 04.

23/06 : plus grosse pleine Lune de l'année (périgée et pleine Lune le même jour).

5/07 : la Terre à l'aphélie (au plus loin du Soleil), à 152 098 000 km.

4/08 (matin) : rapprochement Jupiter Mars Lune Mercure.

12-13/08 (nuit) : maximum de l'essaim d'étoiles filantes des Perséides.

1/09 (matin) : rapprochement Jupiter Lune Mars.

8/09 (soir) : rapprochement Lune Vénus.

9/09 (soir) : rapprochement Lune Saturne.

22/09 : équinoxe d'automne à 22 h 44.

## Lune

Pleine Lune : 23/06, 22/07, 21/08, 19/09.

Nouvelle Lune : 8/07, 6/08, 5/09.

## Nos principes physiques sont-ils « vrais » ? : Henri Poincaré

Christiane Vilain

LUH, observatoire de Paris, site de Meudon et SPHERE, Université Denis Diderot

*Suite de l'article paru dans le numéro précédent.*

Le parcours que nous avons effectué dans le précédent numéro de cette revue fait mieux comprendre le désarroi de certains au tournant du siècle, avant l'émergence des théories de la Relativité restreinte et générale (ainsi que de la Mécanique quantique). La lumière n'est plus une matière mais pas non plus vraiment une vibration ; sa vitesse doit être considérée comme constante quel que soit le mouvement de la source ou le mouvement du repère dans lequel on le mesure. Nos intuitions courantes doivent être abandonnées, avec seul bénéfique la sauvegarde de la relativité galiléenne. De plus, des physiciens talentueux comme Poincaré se mettent à douter de la rotation de la Terre !

Poincaré a entrepris de dégager dans chaque affirmation générale ce qui est imposé par l'expérience et ce qui est choisi par le scientifique, comme plus « commode » en fonction de cette expérience. Par expérience, nous entendons maintenant l'ensemble des expérimentations : celles qui font découvrir quelque chose de nouveau et poser un problème comme celles qui vont servir de « test » à la théorie construite pour répondre au problème, ou encore toute expérience de mesure destinée à simplement préciser une grandeur. Au cours de ses investigations, Poincaré interroge le principe fondamental de la mécanique classique : celui de l'inertie.

### Le principe d'inertie

*« Il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs ; cependant on énonce le plus souvent les faits mécaniques comme s'il y avait un espace absolu auquel on pourrait les rapporter. »*

Après avoir parlé des grandeurs mathématiques et de la géométrie dans son livre de 1902, Poincaré aborde la question générale de la mécanique. Il annonce qu'il va admettre « provisoirement » le temps absolu et la géométrie euclidienne afin de se

concentrer sur les questions de l'espace et du mouvement. Suivons-le, tout aussi provisoirement, dans sa critique du Principe d'inertie exprimé ainsi par Isaac Newton en 1687 :

*« Un corps qui n'est soumis à aucune force ne peut avoir qu'un mouvement rectiligne et uniforme ».*

Poincaré demande : *« Est-ce là une vérité qui s'impose a priori à l'esprit ? S'il en était ainsi comment les grecs l'auraient-ils méconnue ? »*. Or les Grecs l'ont méconnue, constatant que les mouvements avaient tendance à s'arrêter lorsque l'on cessait de pousser ou tirer, sauf celui des astres sur leurs cercles immuables. Il est clair que le principe d'inertie n'est pas non plus expérimental puisque l'on ne peut jamais affirmer que le corps que l'on observe n'est soumis à aucune force. Considérons un palet glissant sans frottement sur une table de marbre lisse ; peut-être pourra-t-on dire qu'il n'est soumis à aucune force parce qu'il se trouve éloigné de tout autre corps, bien qu'il soit évidemment encore dans le champ de gravité de la Terre...

Poincaré propose alors de remplacer l'énoncé traditionnel par le suivant :

*« L'accélération d'un corps ne dépend que de la position de ce corps et des corps voisins et de leurs vitesses »,*

qui peut s'exprimer également en disant que les lois de la mécanique se traduisent par des équations différentielles du second ordre. Pour clarifier ce qu'il vient d'énoncer, il envisage les deux fictions suivantes :

1°) Si l'énoncé traditionnel du principe d'inertie consistait à dire qu'un corps soumis à aucune force conserve sa position, alors c'est la vitesse du corps qui ne dépendrait que de sa position et de celle de ses voisins, et les équations de la mécanique seraient des équations différentielles du premier ordre.

2°) On pourrait imaginer également que le corps qui n'est soumis à aucune force conserve son accélération et que ce soit la variation de cette

accélération qui dépend cette fois de la position et vitesse, mais aussi de l'accélération, du corps et des corps voisins. Les équations de la mécanique seraient alors du troisième ordre, etc....

Réfléchissons un court moment à la première de ces fictions, en fait assez proche de la mécanique des anciens qui remarquaient judicieusement que pour modifier la position d'un objet il leur fallait exercer une force et que lorsqu'ils étaient fatigués, eux-mêmes ou l'âne, le chariot s'arrêtait. Si la résistance de l'air avait été plus importante, peu différente de celle de l'eau, Galilée n'aurait pas inventé sa physique du vide ni posé les bases du principe d'inertie que nous connaissons. Imaginons, dit Poincaré, que les orbites de toutes les planètes de notre système solaire se soient trouvées sur des cercles, en outre tous situés dans un même plan. *« La position d'un astre à un instant donné suffirait alors pour déterminer sa vitesse et toute sa trajectoire »*. Le mouvement de l'astre ne dépendrait alors que d'une condition initiale et non de deux, et pourrait donc obéir à une équation différentielle du premier ordre seulement. La loi adoptée serait raisonnablement conforme à la première des deux fictions. Peut-être alors nous trouvons-nous, avec nos orbites elliptiques (on néglige ici les perturbations des planètes les unes sur les autres), dans une situation simplifiée par rapport à la seconde de nos fictions, mais *« ...il faudrait que nous eussions été trompés par quelque surprenant hasard. »* conclut Poincaré.

## Intermède philosophique

La « physique » ou étude de la nature, a d'abord été fondée sur nos perceptions et les intuitions ou concepts qui en découlaient automatiquement dans notre esprit. L'espace et le temps sont ainsi des intuitions qui, comme nous l'a appris la philosophie critique d'Emmanuel Kant -bien antérieure à celle de Poincaré- permettent l'expérience mais ne s'en déduisent pas. Ces intuitions n'appartiennent donc pas à la réalité extérieure, mais à notre esprit en tant qu'il est soumis aux relations subtiles qui s'établissent entre les perceptions et notre activité nécessaire : nous déplacer et revenir, construire des bâtiments puis des machines, élaborer une image du Monde enfin.

Ce qui est vrai pour l'espace et le temps l'est aussi, d'une autre façon, pour les concepts et les principes physiques sur lesquels nous construisons nos théories. Sans être imposés par l'expérience de façon nécessaire et incontournable, ils sont les outils dont nous avons besoin pour donner un sens à cette expérience, les instruments les mieux adaptés à

l'explicitation des phénomènes à l'intérieur de théories que l'on veut les plus simples possibles, les plus unifiées. Alors nous commençons à « comprendre » les phénomènes. Nos théories doivent également permettre de prédire, et la prédiction permet de « tester » la théorie, sans jamais la confirmer définitivement.

Le rôle de l'expérience dans le choix du principe d'inertie a été parfaitement présenté par Poincaré, qui n'en conclut pas à sa certitude définitive, mais bien à sa pertinence dans les circonstances actuelles. Ajoutons que la théorie de la Relativité Générale, proposée par Einstein trois ans après le décès de Poincaré en 1912, allait transformer les équations de la mécanique en un système plus compliqué, avec pour conséquence que les orbites des planètes ne sont plus véritablement elliptiques ni même fermées, indépendamment de toute perturbation par les autres planètes du système. La raison pour laquelle on a adopté ces nouvelles équations est que leurs prédictions sont meilleures que celles de la physique newtonienne, même lorsque celles-ci ont été affinées par de multiples corrections.

## « La valeur de la science »

Henri Poincaré a sans doute été affecté par les réactions à son premier ouvrage « philosophique », certains n'ayant pas supporté que l'on ébranle leurs certitudes et que l'on renvoie toute généralisation à une attitude simplificatrice « commode ». Il n'était pas le premier ni le plus extrême dans sa critique, puisque certains considéraient alors le « fait » physique lui-même comme « fabriqué » par l'homme au cours de ses manipulations expérimentales. Poincaré se démarque clairement de ce courant « conventionnaliste » radical. Il adopte en outre un ton légèrement différent, sans se dédire toutefois, dans son ouvrage de 1905, ouvrage dont le titre lui-même : *La valeur de la science*, est significatif de la volonté de rectifier une position que l'on avait pu croire négative envers la connaissance scientifique.

Dans une célèbre conférence prononcée pendant un congrès tenu à Saint-Louis, aux États-Unis en 1904, Poincaré parle ainsi des principes physiques :

*« Ces principes sont des résultats d'expérience fortement généralisés ; mais ils semblent emprunter à leur généralité même un degré éminent de certitude. Plus ils sont généraux, en effet, plus on a fréquemment l'occasion de les contrôler et les vérifications, en se multipliant, en prenant les formes les plus variées et les plus inattendues, finissent par ne plus laisser de place au doute. »*

Il doit alors préciser sa pensée puisqu'il avait montré que les principes, une fois bien établis, échappaient à toute remise en cause ultérieure par l'expérience : si un corps que l'on croyait libre ne se meut pas à vitesse rectiligne et uniforme, c'est qu'il existe une force que l'on n'avait pas détectée. Il examine maintenant le principe de la conservation de l'énergie ; lorsque ce principe ne semble pas satisfait, c'est qu'une nouvelle forme d'énergie doit être reconnue : la chaleur s'ajoutant à l'énergie mécanique, la radioactivité, ou une forme encore inconnue d'énergie, et encore une autre si cela était nécessaire. Mais alors, dit Poincaré, « *Et après, qu'avons-nous gagné à ce coup de pouce ? Le principe est intact, mais à quoi désormais peut-il servir ? ... Si un principe cesse d'être fécond, l'expérience, sans le contredire directement, l'aura cependant condamné.* »

Poincaré envisage néanmoins l'avenir de façon tout à fait positive. La science « *ne fait pas un travail de Pénélope* » qui serait toujours à refaire, mais « *tel l'animal qui mue, brise sa carapace trop étroite et s'en fait une plus jeune* ». Que devons-nous faire aujourd'hui, en 1904 ? demande Poincaré à la fin de sa conférence :

« *Peut-être aussi devons-nous construire toute une mécanique nouvelle que nous ne faisons qu'entrevoir, où, l'inertie croissant avec la vitesse, la vitesse de la lumière deviendrait une limite infranchissable* ».

On ne peut aujourd'hui que lui donner raison, et j'aimerais terminer ce parcours en évoquant l'apologie que fait Poincaré de l'astronomie, dans un autre chapitre du même ouvrage de 1905.

## L'astronomie

Reprenant sa fiction d'une humanité enfermée sous des nuages opaques, dans l'impossibilité de voir aucun astre autour de la Terre, Poincaré montre maintenant à quel point cette situation serait pauvre intellectuellement par rapport à la nôtre (et pas seulement triste !).

Même si la science terrestre, à laquelle serait alors condamnée l'humanité, lui permettait de voir émerger un autre « Copernic » (nous l'avons vu), elle ne se serait pas développée de la même façon. Car c'est d'abord l'« *Astronomie qui nous a appris qu'il y a des lois* », permettant à l'homme de considérer ensuite avec un autre regard la

confusion de son monde terrestre, l'incitant à y retrouver petit à petit : « *l'harmonie que l'étude du ciel nous avait fait connaître.* »

Derrière ce lyrisme du savant se trouve le fait de la difficulté –à laquelle s'est affronté Galilée– de l'étude des mouvements dans des milieux résistants : l'air, le sol solide, les obstacles... ; mais aussi ce que connaît bien Poincaré, à savoir la non-linéarité de tous les phénomènes, le « chaos » possible, si peu présent à court terme dans notre système solaire et encore moins dans l'observation des étoiles et des galaxies lointaines. Aristote, qui séparait le monde terrestre du monde supra-lunaire, admettait dans sa physique terrestre, plus complexe que celle des astres, une part de hasard d'« accident ». Bien que certains astres aient toujours été « errants » (les planètes), ils revenaient avec régularité aux mêmes positions, ou presque, alors que les corps terrestres subissaient des changements et pas seulement des déplacements, soumis à la « génération et la corruption ». L'immuabilité des cieux a permis à Newton de construire son système et, en retour, d'expliquer vraiment la chute des corps.

Mais peut-être était-il nécessaire, me semble-t-il, de tenir compte en même temps des corps terrestres pour accomplir ce que fait Newton après Galilée, bien au delà des tentatives de Kepler pour connaître la cause des mouvements. Car si Newton utilise bien les trois lois qu'il extrait de l'ouvrage touffu de Kepler sur les trajectoires des planètes, s'il revient à l'idée d'une force à distance, c'est lui seul qui établit la dynamique moderne. Selon Poincaré en effet :

« *C'est Newton qui nous a montré qu'une loi n'est qu'une relation nécessaire entre l'état présent du monde et son état immédiatement postérieur. Toutes les autres lois, découvertes depuis, ne sont pas autre chose, ce sont, en somme, des équations différentielles.* ».

C'est en tant que spécialiste de la mécanique céleste que Poincaré conclut ainsi sur l'importance de l'astronomie au cours de l'histoire, car il faut analyser le changement du mouvement, instant après instant comme ont su le faire Newton puis Euler et Laplace, pour mathématiser le mouvement et ses causes.



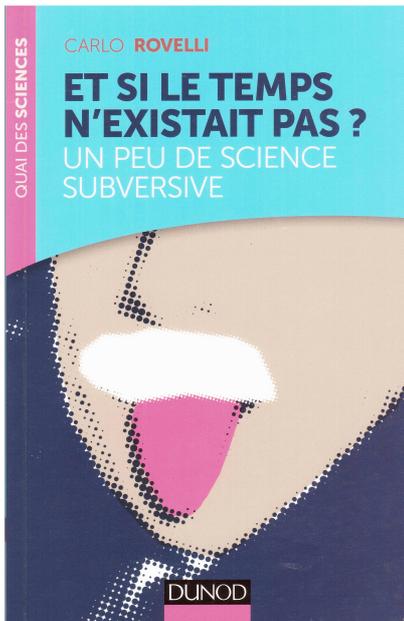
### Colloque à l'occasion du tricentenaire de la naissance d'Alexis Clairaut (1713 – 1765).

Ce colloque s'est déroulé pour partie à l'Observatoire de Paris pour une autre à l'Académie des Sciences. Nous reviendrons dans un prochain numéro des Cahiers Clairaut sur ce grand scientifique qui réussit à entrer à l'Académie des Sciences à l'âge de... 18 ans - un record resté inégalé à ce jour. Pour l'heure vous pouvez voir les vidéos en allant sur le site du CLEA [www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu) dans la rubrique conférences.

# LECTURE POUR LA MARQUISE

Dans cet ouvrage de 182 pages, l'auteur part de mots courants d'astronomie et cherche à en faire ressortir le sens d'origine, puis l'histoire parfois.

## « Et si le temps n'existait pas - Un peu de science subversive » Carlo Rovelli - Dunod (2012)



Carlo Rovelli, de nationalité italienne, est actuellement en poste au Centre de Physique Théorique installé sur le campus de l'université de Marseille Luminy. Il travaille sur la gravitation quantique à boucles, approche « concurrente » de la théorie des cordes dans la tentative d'accorder la relativité générale et la mécanique quantique. Son ouvrage était déjà paru en 2006 chez Bernard Gilson Éditeur sous le titre « Qu'est ce que l'espace ? Qu'est ce que le temps ? ».

Dans son ouvrage l'auteur aborde plusieurs thèmes : tout d'abord son parcours personnel qui l'a amené à travailler dans le domaine concerné ici, ensuite la manière dont la science fonctionne aujourd'hui et enfin les questions relatives à l'espace et au temps en relation avec l'état des recherches actuelles.

Le premier sujet n'est pas inintéressant mais aurait probablement dû faire l'objet d'un autre ouvrage car, mis à part les quelques souvenirs de sa jeunesse de chercheur, il n'apporte pas grand chose

à la compréhension du reste du livre qui aurait mérité d'être développé d'une manière plus détaillée du fait de sa complexité.

La discussion à propos de la nature de la science et de l'organisation actuelle de la recherche scientifique est plus appropriée ici car, s'appuyant sur l'exposition de la tentative de suprématie des tenants de la théorie des cordes sur la physique théorique, l'auteur nous entretient d'une question qu'il connaît bien et où il a eu à pâtir de son choix de prendre une autre direction de recherche. Dans cette partie, il nous pose également une question importante « [...] pourquoi la science est-elle crédible ? » et y répond d'une manière qu'on ne peut que partager car elle ne se veut pas hégémonique : « Pas parce qu'elle nous dit des choses certainement vraies, mais parce que ses réponses sont les meilleures que nous ayons pour le moment. »

Venons-en au sujet même du livre : la nature profonde de l'espace-temps. Après une présentation (trop) rapide et très imagée de la relativité générale et de la mécanique quantique, C. Rovelli aborde le problème de l'unification de ces deux piliers de la physique fondamentale. Bien sûr, en s'appuyant exclusivement sur des analogies, en renonçant totalement à utiliser la moindre équation et en se limitant à quelques dizaines de pages, il était difficile de faire comprendre, même à un niveau élémentaire, le contenu de ces théories maintenant bien établies. Cependant, malgré ces contraintes, il parvient à nous faire comprendre les enjeux de cette recherche et la richesse de la nouvelle représentation qui est en train de se mettre en place dans le cadre de son travail.

Dans un premier temps il aborde la nouvelle vision qu'il envisage pour l'espace. La gravitation quantique à boucles propose de le structurer par un réseau abstrait dont le modèle avait été inventé dans les années 1970 par un mathématicien anglais, Roger Penrose. Ce dernier avait dénommé un tel objet « réseau de spin ». Ses nœuds constituent des « grains d'espace » et les arêtes des relations de proximité entre ces grains. La théorie qui s'appuie sur ce concept décrit l'évolution probabiliste d'un ensemble de quanta d'espace. Bien sûr la maille de ce réseau est extrêmement petite, de l'ordre de  $10^{-33}$  cm ! C. Rovelli insiste bien pour que nous comprenions

que l'espace n'est pas un enchevêtrement de boucles immergées dans celui-ci mais que c'est ce réseau lui-même qui le constitue structurellement et représente le champ gravitationnel. L'espace familier que nous pensons connaître n'existe pas.

Il aborde ensuite la notion de temps à laquelle il va faire subir un traitement similaire. L'auteur rappelle tout d'abord que nous n'avons jamais affaire au temps lui-même mais à un phénomène physique (oscillations, battements ...etc.) dont nous pensons qu'il se déroule avec une certaine périodicité. A partir de là nous supposons qu'il existe une variable  $t$  qui englobe toutes nos observations. Mais à l'échelle sub-atomique, « ... l'idée d'un temps  $t$  qui s'écoule de lui-même, et par rapport auquel tout le reste évolue, n'est plus une idée efficace. » Il devient nécessaire de décrire les variables qui nous intéressent en établissant les relations qu'elles peuvent avoir entre elles sans faire intervenir le temps. Comme pour l'espace, « le temps devient une notion relationnelle. Il n'exprime qu'une relation entre les différents états des choses. » L'espace-temps devient alors une structure évolutive dans laquelle un réseau de spins se transforme en un nouveau réseau, et ainsi de suite de proche en proche, sans qu'on ait eu à parler de temps dans l'enchaînement de ces transformations. Ces réseaux de spin successifs forment alors ce que l'auteur appelle une mousse de spin.

Le livre se termine par une présentation de l'état actuel de la théorie des boucles et de sa concurrente, la théorie des cordes. La force de la première est

qu'elle est beaucoup moins ambitieuse que la seconde. Elle ne prétend pas devenir la théorie du tout mais a pour seule aspiration de réconcilier la relativité générale et la mécanique quantique, ce qui n'est déjà pas si mal. La gravitation quantique à boucles n'est pas seulement une théorie déroutante et innovante mais elle est aussi une manière nouvelle d'aborder la physique théorique qui n'est plus l'étude de l'ensemble des propriétés d'une collection d'objets mais avant tout une approche inédite des relations entre ces objets. On a ici une approche proche de celle qu'avait privilégié Albert Einstein lors de la construction de la relativité restreinte pour laquelle la transformation de Lorentz ne traduisait pas un ralentissement des horloges et un raccourcissement des règles réels mais des relations réciproques entre des observateurs en mouvement relatif.

Carlo Rovelli présente avec soin cet aspect épistémologique et, malgré quelques défauts déjà indiqués ci-dessus, a écrit ici un livre attachant et donnant envie d'en savoir plus sur cette théorie et d'en suivre son évolution dans le futur. Pour compléter cette lecture on pourra écouter avec intérêt le CD que C. Rovelli a enregistré dans la collection de livre-audio « De Vive Voix » et qui s'intitule « **Espace et temps d'Anaximandre à la gravité quantique** ».

Pierre Magnien

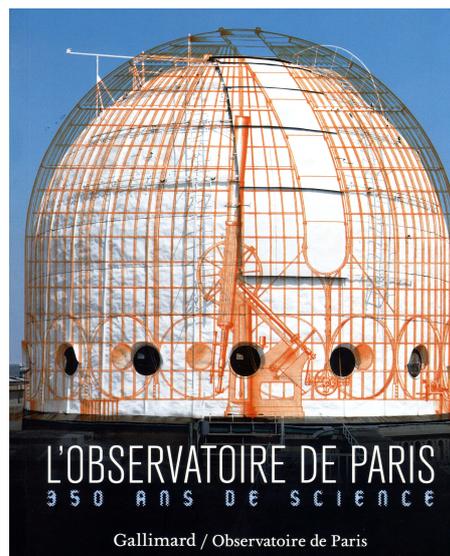


## "L'OBSERVATOIRE DE PARIS, 350 ans de science".

L. Bobis et J Lequeux

Un livre magnifique (ISBN 978-2-0-013806-7) vient d'être édité chez Gallimard sous la direction de Laurence Bobis et James Lequeux. Le titre : On y découvre un très grand nombre de photos d'astronomes célèbres et d'instruments anciens. Mais le livre va bien au-delà, car il décrit aussi les expériences récentes et les projets. Un bel hommage à cet établissement, qui est l'un des plus anciens et un des plus grands centres de recherche en astronomie et en astrophysique du monde. Une belle idée de cadeau !

Georges Paturel



# TÉMOIGNAGE

Élodie Blandin

Chargée de communication et de médiation – Observatoire de Lyon

**Chargée de communication et de médiation : qu'est-ce que ça veut dire ?** Depuis septembre 2012 j'organise des événements à caractère culturel et scientifique sur le site historique de l'Observatoire de Lyon et je contribue au développement des différents outils pédagogiques adaptés au niveau des scolaires que nous recevons tout au long de l'année.

Mon arrivée dans le milieu de l'astronomie a été quelque peu insolite. Mon parcours universitaire n'était pas marqué par les sciences dures. Mon credo c'était la communication et la médiation culturelle. C'est après mon master et mon stage de fin d'étude au service de médiation du Musée des Confluences de Lyon que l'astronomie est venue à moi... En juin 2012, dans le cadre d'un projet que je pilotais, j'ai rencontré le chargé de communication et de médiation de l'Observatoire de Lyon. Il devait prochainement partir pour Paris et laissait un poste vacant. J'ai saisi l'occasion ! Recrutée en juillet 2012, je devais prendre mes fonctions en septembre.

Mes connaissances en astronomie étaient limitées. Il fallait trouver une formation accélérée. Sur les conseils de la responsable du service de diffusion des connaissances de l'Observatoire et de notre professeur relais Sylvie Thiault, je me suis lancée dans l'aventure de l'école d'été du CLEA.

Le 17 août j'embarquais dans la voiture de Sylvie vers une destination rêvée : le centre d'oxygénation du Col Bayard, 1248m. J'avoue qu'à ce moment précis je ne savais pas vraiment à quoi m'attendre. L'astronomie était une discipline synonyme de rêve et d'émerveillement. Poussée par ma curiosité et la soif de la découverte, j'étais prête à ouvrir grand mes oreilles et mes yeux. Mon objectif : engranger le plus de connaissances possibles et partir sur de bonnes bases pour mon futur poste.

L'école d'été allie cours théoriques et ateliers pratiques. Il me semble que cette organisation permet de satisfaire tout le monde du novice au plus chevronné. Pour ma part ce sont surtout les ateliers pratiques qui m'ont permis de progresser

rapidement et de mieux comprendre les phénomènes fondamentaux. Il faut dire que l'EEA réunit une équipe d'animateurs très pédagogues et surtout passionnés ! Revivre l'amarsissage de Curiosity avec Agnès Cousin à peine débarquée de Pasadena ou découvrir les aurores boréales avec Frédéric Pitout sont des souvenirs formidables.

Les moments les plus « magiques » restent cependant les soirées d'observation. J'ai appris à découvrir le ciel. Je l'ai vu comme je ne l'avais jamais vu. Les astronomes amateurs sont de véritables *Jedi* qui savent manier le laser mieux que quiconque pour dessiner dans le ciel des constellations aux formes parfois insolites : petite culotte, thèière, cravate...

Il y eut aussi la randonnée de nuit : qui peut se vanter d'avoir parcouru plusieurs kilomètres totalement dans le noir avec comme seule source de lumière les étoiles de notre Galaxie ?

Le dynamisme et l'enthousiasme des stagiaires et des intervenants ont contribué à faire de ce stage une pure parenthèse de plaisir, de découverte et d'apprentissage ludique ! Autre mot clef de cette semaine : la « convivialité » : arrosages divers, repas succulents, sans oublier la soirée de clôture où animateurs et stagiaires laissent éclater au grand jour leur imagination !

Mise en confiance et plus et sereine j'ai pu débiter ma mission à l'Observatoire de Lyon sur les chapeaux de roues : organisation des Journées Européennes du Patrimoine et de la Fête de la Science, nuit de la « fin du monde »...

Si c'était à refaire ? J'y retournerais avec plaisir. Et avec le recul, je pourrais mieux choisir les ateliers adaptés à mes besoins.

Le milieu de la recherche dans lequel je travaille actuellement est un environnement stimulant intellectuellement et humainement. Malgré « certaines lacunes » concernant des phénomènes physiques complexes je me suis parfaitement intégrée et je souhaite continuer dans le monde de la médiation scientifique. ■

# VIE ASSOCIATIVE

## Stage de formation dans l'académie de Bordeaux

Le stage réalisé en 2012 ayant remporté un vif succès de la part des stagiaires, il a été reconduit cette année, les 24 et 25 avril. Cette formation était proposée à une trentaine d'enseignants du secondaire du pôle scientifique de l'Aquitaine, par Vincent Besnard, conseiller académique à la culture scientifique et technique.

Le planning a été conçu en partenariat avec Nathalie Brouillet de l'Observatoire de Bordeaux et la représentante académique du CLEA (moi-même). Les ateliers ont dû être diversifiés selon le niveau d'enseignement et en prenant en compte que quelques stagiaires de l'an dernier revenaient et qu'il y avait cette année des professeurs de lycée.

Le stage a été inauguré par Jean Luc Fouquet avec une conférence sur « **Les Distances dans l'Univers** ». Ensuite, trois ateliers étaient proposés. Brigitte Garreau encadrait celui nommé Couleurs d'Étoiles, Jean Luc Fouquet m'aidait à encadrer celui sur les phases de la Lune et Jean Ripert prenait en charge les enseignants du Lycée en travaillant sur l'étude du spectre d'une étoile.



L'après-midi commençait avec une conférence sur « **La Radioastronomie** » présentée par l'astrophysicien Fabrice Herpin, connu du C.L.E.A. car il nous avait présenté la conférence « les étoiles vues par Hershell » lors de l'AG 2010 à Bordeaux. Puis les enseignants du collège sont allés s'allonger dans le planétarium du C.L.E.A. pour entendre les commentaires de Jean Ripert et Jean Luc Fouquet, pendant que les enseignants du lycée écoutaient Benoît Lott, chercheur au Centre d'Étude Nucléaire de Bordeaux-Gradignan, expliquant comment réaliser des images du ciel en rayon gamma, à partir des données de la NASA, projet nommé COSMAX.

Malgré la présence de la Lune et la pollution lumineuse, les stagiaires ont assisté à une soirée d'observation à la

tombée de la nuit dans le parc de la mairie d'Artigues. Saturne et Jupiter étaient au rendez-vous. Cette soirée était orchestrée par Jean Ripert et ses deux télescopes, Jean Luc Fouquet avec son laser, Daniel Paupart avec sa tablette et Gérard Prédignac donnant des conseils pour l'astrophotographie.

Le lendemain, Thibault Cavalié, postdoctorant, démarrait la journée avec une conférence sur « **La Planète Mars** ». Trois ateliers s'ensuivaient avec Jean Luc Fouquet et les saisons ; Brigitte Garreau et Daniel Paupart faisaient de la publicité pour le hors série n°10 avec les fiches sur l'éclipse de Lune et la rose des vents ; Jean Ripert reprenait en charge les enseignants du lycée avec l'atelier : relevés des taches solaires et détermination de la période de rotation du Soleil.

L'après-midi, Daniel Paupart, après avoir présenté les 12 fermions et les 12 bosons, a empêché les stagiaires de faire une sieste en les mettant en situation dans la magnifique bibliothèque en simulant un champ de Higgs. Ainsi, déguisé en photon, il traversa le champ sans aucune interaction, par contre déguisé en un personnage connu, il « prit de la masse » et eut du mal à se déplacer. Puis deux ateliers étaient proposés, l'un sur la réalisation d'un cadran solaire par Jean Luc Fouquet, l'autre sur l'utilisation de l'antenne Würzburg par des lycéens, présenté par Fabrice Herpin.



Le stage s'est terminé par la visite de l'observatoire de Floirac exposé par Romuald Bouffet, doctorant au LAB. Les participants nous ont remerciés pour ces deux jours de stage dense.

Vincent Besnard a annoncé que ce stage serait reconduit pour l'année 2014 à Hendaye, au château d'Abbadia.

Roseline Jamet



## Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débuter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.



Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

**Renseignements sur le site du CLEA**

Voir la vidéo à l'adresse :

[accs.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea](http://accs.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea)

## Les productions du CLEA <sup>(1)</sup>

*En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.*

*Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :*

### Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

### DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Été d'Astronomie).

*Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>*

**Le formulaire de commande est sur le site.**

(1) vente aux adhérents uniquement

### Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2013, il sera en Région Midi-Pyrénées. (uniquement pour le planétarium contact : [jean.a.ripert@wanadoo.fr](mailto:jean.a.ripert@wanadoo.fr))

Le site internet

**Une information toujours actualisée**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)



# LES CAHIERS CLAIRAUT



**Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :**

Articles de fond ;  
Réflexions ;  
Reportages  
Textes (extraits, citations, analyses) ;  
Pédagogie de la maternelle au supérieur ;  
TP et exercices ;  
Curiosités ;  
Histoire de l'astronomie ;  
Réalizations d'instruments et de maquettes ;  
Observations ;  
Informatique  
Les Potins de la Voie Lactée.

# COMMENT NOUS JOINDRE ?

**Informations générales :**

[www.clea-astro.eu](http://www.clea-astro.eu)

OU

[www.ac-nice.fr/clea](http://www.ac-nice.fr/clea)

**Siège Social :**

CLEA, c/o CFEED  
5, rue Thomas Mann  
case courrier 7078  
75205 PARIS Cedex

**École d'Été d'Astronomie :**

[daniele.imbault@cea.fr](mailto:daniele.imbault@cea.fr)

**Cahiers Clairaut :**

[christianlarcher3@gmail.com](mailto:christianlarcher3@gmail.com)

**Ventes des productions :**

<http://ventes.clea-astro.eu/>

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)

[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

**Adhésion / Abonnement :**

Adhésion CLEA pour 2013 :	<b>5 €</b>
Abonnement CC pour 2013 :	<b>25 €</b>
Adhésion + abonnement CC :	<b>30 €</b>
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	<b>35 €</b>

**Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>**

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari  
Rédacteur de publication : Christian Larcher  
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUËS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0315 G 89368  
Prix au numéro : 7 €  
Revue trimestrielle : numéro 142, juin 2013