

BULLETIN N° 164
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du mardi 10 avril 2012:

17h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence d' André BRAHIC, Professeur à l'Université Paris VII:

"Enfants du Soleil, histoire de nos origines"

Prochaine séance :

mercredi 9 mai à 17h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris

Conférence de Louis le Sergeant d'Hendecourt,

de l'Institut d'Astrophysique Spatiale

Directeur de Recherche catégorie 1 CNRS/Université Paris-Sud:

"De l'astrochimie à l'astrobiologie: pour une approche méthodologique "

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

Siège Social : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris

Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE PRESIDENT : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE
SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Claude ELBAZ

PRESIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LEVY (†)
PRESIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE
SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 François BEGON
 Bruno BLONDEL
 Patrice CROSSA-REYNAUD
 Michel GONDRAN

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Brigitte DEBUIRE

SECTION DE NICE :
PRESIDENT : Doyen René DARS

SECTION DE NANCY :
PRESIDENT : Pr Pierre NABET

Avril 2012

N°164

TABLE DES MATIERES

- P. 03 Compte-rendu de la séance du mardi 10 avril 2012
- P. 10 Annonces
- P. 11 Documents

Prochaine séance:
mercredi 9 mai à 17h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris
Conférence de Louis le Sergeant d'Hendecourt,
de l'Institut d'Astrophysique Spatiale
Directeur de recherche catégorie 1 CNRS/Université Paris-Sud:
"De l'astrochimie à l'astrobiologie: pour une approche méthodologique"

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES
Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du

Mardi 10 avril 2012

Maison de l'AX 17h30.

La séance est ouverte à 17 h30 sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Claude ELBAZ , Jean -Pierre FRANCOISE , Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Gérard LEVY, Jacques LEVY, Pierre MARCHAIS, Alain STAHL.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Françoise DUTHEIL, Robert FRANCK, Walter GONZALEZ, Marie-Louise LABAT, Saadi LAHLOU, Valérie LEFEVRE-SEGUIN , Emmanuel NUNEZ, Pierre PESQUIES.

La séance est dédiée à la Conférence d' André BRAHIC,
Professeur à l'Université Paris VII:

"Enfants du Soleil, histoire de nos origines"

Notre Président nous présente notre conférencier:

André BRAHIC est professeur à l'Université Paris Diderot et Astrophysicien au C.E.A à Saclay. Après l'étude des supernovae, des phénomènes chaotiques et de la dynamique des galaxies, ses principaux domaines de recherche sont actuellement liés à l'évolution des anneaux de Saturne et à la formation du système solaire. Il a découvert en 1984 les anneaux de Neptune, ce qui a permis à la sonde Voyager de les photographier 5 ans plus tard.

Prolongeant l'œuvre de Maxwell et de Poincaré, il a proposé à la fin des années 1970 le premier modèle de dispersion des vitesses dans les anneaux de Saturne. Il a été l'un des scientifiques associés à l'aventure Voyager d'exploration des confins du système solaire entre 1979 et 1989. Il est actuellement le membre français de l'équipe d'imagerie de la mission américano – européenne Cassini – Huygens qui est en

train d'explorer le monde de Saturne depuis 2004 et devrait continuer jusqu'en 2017. Il a été l'un des pionniers de la planétologie française en promouvant les missions spatiales vers

les petits corps du système solaire et en fondant le programme national de planétologie. Il a été l'un des six membres du Comité International chargé de la définition du mot « planète », définition adoptée en août 2006 par l'Union Astronomique Internationale. Il a présidé de nombreux comités scientifiques et obtenu plusieurs prix nationaux et internationaux tels le prix « Carl Sagan » de la Société Américaine d'Astronomie en 2000 et le prix Jean Perrin de la Société Française de Physique en 2006.

Il est l'auteur de très beaux livres de popularisation scientifique qui ont été des succès de librairie : « De feu et de glace. Planètes ardentes », « Lumières d'étoiles. Les couleurs invisibles » (avec Isabelle Grenier) et « Enfants du Soleil, histoire de nos origines ». Tous ces ouvrages ont été publiés chez Odile Jacob. Il a publié plus de 200 articles scientifiques. Son nom a été donné à l'astéroïde 3488, situé à 2,8 unités astronomiques du Soleil et il est entré dans le Petit Larousse en 2009.

Après s'être lui-même présenté comme ayant travaillé avec Evry SCHATZMAN et Michel HENON, en particulier sur les [supernovae](#), la [théorie du chaos](#), la dynamique des [galaxies](#), les [anneaux planétaires](#) et la formation du [système solaire](#), notre conférencier nous expose les points suivants principalement relatifs à la formation du système solaire et des étoiles.:

I) Introduction et présentation du système solaire

Reprenant l'avant-propos de "*Enfants du Soleil*" (publié dans le précédent bulletin de mars 2012-bulletin 163) en analysant l'évolution des présupposés depuis Aristote en passant par Galilée, Copernic et pour finir le XX^e siècle. Il insiste sur le caractère idéologique, métaphysique de certaines théories qui ont dominé ainsi que sur les difficultés expérimentales de validation, même si de très importants progrès ont fait surface au XX^e siècle.

II) Remarques historiques : Descartes, Buffon, Laplace, aujourd'hui (voir document page 11.)

Cinq noms ont marqué la renaissance de l'astronomie en Occident : Copernic (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Kepler (1571-1630), Galilée (1564-1642) et Newton (1642-1727). On peut les considérer comme les pères fondateurs de l'astronomie moderne.

a) mécanique céleste

Avec **Copernic**, qui place le Soleil au centre du système solaire, **Kepler**, qui énonce ses fameuses trois lois du mouvement des planètes, **Galilée**, qui pose les fondements de la dynamique, et **Newton**, qui trouve la loi de la gravitation, les premiers outils nécessaires à une meilleure compréhension de la formation des planètes étaient en place. **Newton** grâce à sa théorie de la gravitation universelle, qui ne sera dépassée que par celle de la relativité d'**Einstein**, fonda l'**astronomie mathématique**. La **mécanique céleste** a connu son apogée en 1846 avec la **découverte, par le calcul, de la planète Neptune**, indépendamment par **Adams** et **Le Verrier**.

Elle atteignait ses limites quelques années plus tard quand Le Verrier ne parvint pas à expliquer le mouvement du grand axe de l'orbite de Mercure. Il fallut attendre quelques années de plus et la **théorie de la relativité générale d'Einstein** pour comprendre que la théorie de Newton est insuffisante au voisinage d'une masse importante comme le Soleil.

b) évolution du système solaire

Mais il faut encore leur adjoindre **Descartes**, qui fut le premier à introduire la notion d'évolution du système solaire¹. Il a été le premier à pressentir que les mouvements quasi circulaires des corps célestes étaient le résultat de collisions entre "corpuscules" à partir d'un état chaotique et à penser cette évolution sous le mode de la turbulence.

Il faut attendre **Buffon** en 1741 Kant en 1755 et **Laplace** en 1796 pour progresser à nouveau. Ils vont en effet proposer les deux théories qui s'opposeront pendant près de deux siècles, la **théorie catastrophiste (Buffon)** par laquelle la formation des planètes serait due au passage proche d'une étoile qui aurait arraché un filament de matière au Soleil, et la **théorie de la nébuleuse primitive(Kant)** selon laquelle le Soleil et les planètes ont été formés à partir d'une même nébuleuse de gaz primordiale dont notre étoile n'est que la partie centrale condensée. En 1796, **Laplace**, a présenté une théorie de la formation du Soleil et des planètes à partir d'une nébuleuse primitive étendue qui s'est contractée sous l'effet des forces de gravitation.

III) Faits d'observation : (voir document page 15)

Six planètes sont connues depuis les temps les plus reculés: la Terre, bien évidemment, et les cinq planètes visibles à l'œil nu que sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Trois autres ont été découvertes plus récemment : **Uranus au XVIII^e siècle, Neptune au XIX^e siècle et Pluton au XX^e siècle.**

Huit d'entre elles ont déjà été explorées par **au moins une sonde spatiale entre 1970 et 1989²**. Pluton ne sera approchée qu'au début du XXI^e siècle. Après dix ans de négociations entre la N.A.S.A et l'E.S.A on aboutira à la construction de la sonde **Cassini** qui sera lancée en 1997 en vue de l'exploration des anneaux de Saturne. (*La mission elle-même aura coûté environ 4 milliards de dollars, c'est-à-dire presque aussi cher que la construction du LHC*). La mission a été prolongée jusqu'en 2017. Les anneaux de Saturne, situés à 1,5 milliards de km de la Terre avaient eux-mêmes été étudiés par Galilée, Cassini, Laplace, Poincaré et Maxwell.

L'étude de Saturne et de ses anneaux peut aider à mieux connaître la Terre comme toute investigation d'autres planètes.³

Les planètes du système solaire diffèrent selon leurs tailles et leurs distances au soleil . Celles de taille comparable à la terre qui sont très proches du soleil ne disposent pas d'hydrogène et d'autres éléments volatils, nécessaires à la synthèse de l'eau. Les planètes géantes du type Saturne, Uranus, Neptune, sont pourvues d'hydrogène et également de satellites.

Ceci a posé le problème de la définition de la notion de planète solaire ne serait-ce que pour savoir le nombre de planètes solaires. Il s'en suit que:

- une planète tourne autour du soleil
- une planète est à peu près sphérique
- il n'existe pas d'autre objet semblable à proximité

Dans ces conditions , il n'existe que 8 planètes solaires. (Pluton et les toutes petites planètes ne sont pas de vraies planètes...)

IV) D'autres systèmes solaires

¹ Le problème de l'origine du système solaire ne s'est pratiquement pas posé avant le XVI^e siècle.

² sondes Pioneer 10 et 11 lancées en 1972 et 1973 vers Jupiter- sondes voyager 2 et 1 en 1977 également vers Jupiter - Elles ont maintenant quitté notre système solaire

³ voir dans documents "À bord de Cassini autour de Saturne avec André Brahic" p. 38

Jusqu'à la fin du XXème siècle, l'existence d'autres planètes extrasolaires relevait de la pure spéculation.: les planètes sont minuscules par rapport aux étoiles, et elles n'émettent pas de lumière par elles-mêmes. Les méthodes d'observations sont basées sur le fait qu'une grosse planète est à même de perturber le mouvement d'une étoile ou de manière passagère atténuer son rayonnement. Les premières images d'exoplanètes n'ont été obtenues qu'à partir de 2003.

Cependant dès les années 1990 ont été découvertes des planètes extrasolaires avec en particulier en 1995 la découverte autour de l'étoile 51Pégase d'une planète, dont la masse est à une fois et demie celle de Saturne et qui est vingt fois plus proche de son étoile que la terre du soleil. et en 1992 , phénomène alors très surprenant, autour d'un Pulsar PSR1257+12 (résidu d'une étoile, après l'explosion d'une supernova) , de trois planètes. Depuis de très nombreuses exoplanètes ont été détectées.

Les systèmes stellaires pourvus d'exoplanètes diffèrent généralement beaucoup du système solaire. Néanmoins une meilleure connaissance de ces objets nous permettra d'enrichir notre compréhension des phénomènes terrestres y compris celui de l'apparition de la vie.

V) Comment le système solaire ne s'est pas formé

Le problème de la formation du système solaire a longtemps été débattu. (voir éléments historiques ci-dessus). Les planètes sont elles issues d'un arrachement d'éléments solaires ou résultent-elles au contraire de l'accrétion de particules issues de nébuleuses? Les planètes sont-elles des filles ou des soeurs du soleil?

VI) Scénario de formation du système solaire.

Le scénario actuellement le plus probable (observations de mission CASSINI) est celui de **l'accrétion de la matière** . L'espace serait rempli de d'astéroïdes de tailles variables sujets à des collisions entre eux comme en témoignent les multiples traces de bombardements par des météorites sur la terre. Ces bombardements sont étayés par la présence de radio-isotopes comme ²⁶Al en provenance d'étoiles externes. Par ailleurs on a pu observer la présence de nuages de comètes autour du soleil.

Le système solaire résulterait d'une nébuleuse interstellaire qui se serait effondrée sur elle-même. Le centre, en se contractant, a donné naissance au soleil ⁴. Lors des réactions de fusion de l'hydrogène en hélium d'énormes quantités d'énergie ont été libérées. Néanmoins au départ le soleil était plus froid que maintenant créant des amas de grains solides ou planétésimaux. Ces planétésimaux soumis à des collisions multiples, pouvaient soit être brisés soient s'agréger les uns aux autres (accrétion). Un disque d'embryons a succédé au disque de planétésimaux. Ces embryons eux-mêmes soumis à des collisions ont conduit au disque des 8 planètes que nous connaissons aujourd'hui.

Les 4 planètes géantes du système solaire, qui sont très éloignées du soleil, sont constituées à 90% d'hélium et d'hydrogène gazeux. Les planètes "telluriques", beaucoup plus proches du soleil, ont une température élevée et les éléments gazeux soumis à l'agitation thermique ont tendance à s'évader. Elles sont constituées de "résidus" et leur masse est beaucoup plus faible que celle des géantes. Elles comportent certains éléments lourds comme le silicium, le carbone le fer etc... .ces géantes comportent des satellites qui se rapprocheraient plus des planètes telluriques.

VII) Jupiter et le bombardement

Jupiter (la plus grosse planète du système solaire) est 300 fois plus massif que la terre. Très éloigné du soleil, Jupiter serait apparu en premier en collectant tout le gaz présent sur un noyau constitué de

⁴ voir page 21 la formation des planètes géantes et du soleil

l'agrégation de multiples planétésimaux. De plus, il serait à l'origine de la formation de la Terre grâce à son orbite, sa masse.⁵

VIII) la migration

Dans le chapitre 3 de son ouvrage⁶, André Brahic indique qu'à la suite des dernières explorations :

- (i) toutes les planètes géantes sont entourées d'anneaux ;
- (ii) ces anneaux sont globalement tous très différents les uns des autres ;
- (iii) ils sont tous semblables à une petite échelle de l'ordre du kilomètre.

« Pourquoi y a-t-il des anneaux ? » D'une part, tout satellite trop proche d'une planète serait brisé en morceaux et, d'autre part, le jeu des collisions mutuelles entre des particules gravitant autour d'un astre les aplatit rapidement en un disque mince. Le mathématicien français *Édouard Roche* a montré en 1847 qu'un satellite liquide ne pouvait pas exister près d'une planète en deçà d'une certaine limite qui porte son nom. Pour la Terre, la limite de Roche est à environ 18 000 kilomètres du centre. Si la Lune, actuellement à 384 000 kilomètres de nous, était placée à l'intérieur de cette limite, elle serait brisée en morceaux.

Les planètes géantes, beaucoup plus massives que la Terre, exercent des forces de marée considérables dans leur environnement. La limite de Roche de Saturne est exactement à la limite des anneaux. Si un gros satellite pénètre à l'intérieur de cette limite de Roche, il est inexorablement brisé en morceaux. Si des cailloux ou des rochers sont à l'intérieur de la limite de Roche, ils ne peuvent pas se rassembler pour former un satellite. Il ne peut donc y avoir que des petits corps autour d'une planète. En tournant autour de la planète, ils balayent un certain volume et entrent en collision avec leurs voisins. Ces chocs aplatissent rapidement les environs d'une planète en un disque mince.

De quoi sont faits ces anneaux ? grâce aux explorations récentes, nous savons que les planètes géantes sont entourées de corps de toutes les tailles allant de poussières de quelques microns à des blocs de plusieurs dizaines de mètres et jusqu'à des petits satellites de quelques kilomètres. En raison des effets de marée, un gros satellite trop proche de Saturne serait détruit, mais des corps d'une dizaine de kilomètres de diamètre peuvent très bien subsister au sein des anneaux.

IX) Formation de la lune

Bien qu'assez différentes chimiquement, (absence d'eau et d'éléments volatils, abondance de potassium, uranium etc.) les compositions isotopiques des roches sont semblables suggérant que ces corps se sont formés ensemble.

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés:

- a) une fission: la Terre tournant trop vite sur elle-même serait devenue instable, se serait allongée sur elle-même puis se serait scindée.

- b) une capture: la Lune s'approchant de la Terre aurait été freinée et placée sur une orbite elliptique devenue circulaire grâce aux effets de marée.

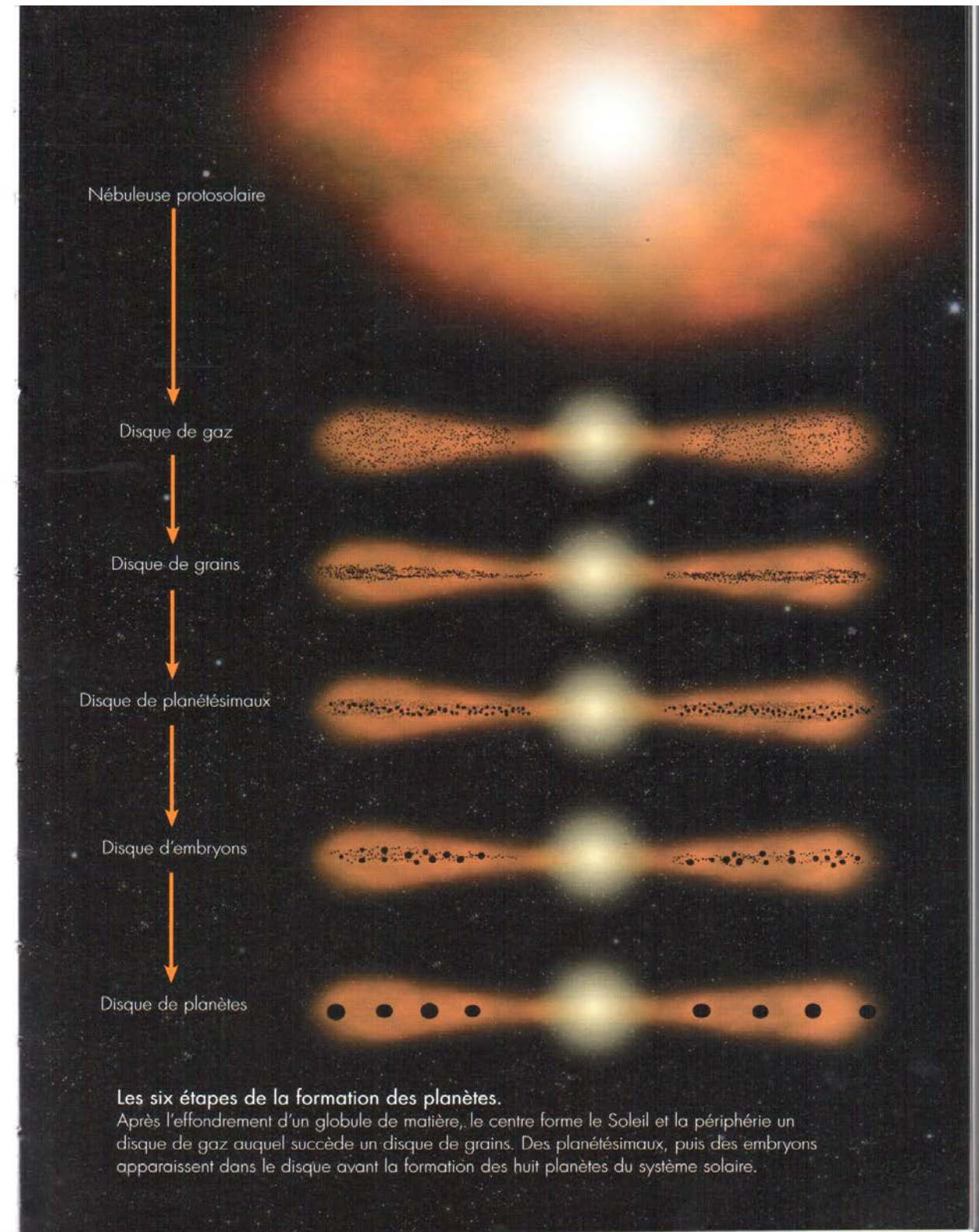
⁵ voir pages 23 et 24 "La Terre est là grâce à Jupiter"

⁶ voir page 27 des documents l'article extrait de l'ouvrage "de feu et de glace" d'André BRAHIC

- c) La lune se serait formée en même temps que la Terre à partir de matériaux divers en orbite autour de la Proto-Terre

- d) Dans le scénario de la collision, un corps de la taille de Mars aurait heurté la Terre , projeté des débris aux alentours qui se seraient ensuite assemblés pour former la Lune. Cette théorie est celle qui recueille le plus d'adhésions actuellement.

X) Formation des étoiles- Formation des filaments



Après cet exposé exceptionnel, notre séance prend fin,

Très amicalement,

Irène HERPE-LITWIN

Annances

I) Notre collègue Christian HERVE nous fait parvenir le programme du prochain colloque "Ethique et Société" relatif à la maladie d'Alzheimer:

UNIVERSITE D'ETE ALZHEIMER

Aix en Provence

18/19 septembre 2012

le préprogramme est accessible sur le site:

http://www.espace-ethique-alzheimer.org/universitedete2012_preprogramme.php

ou en cliquant sur:

[Découvrir le pré-programme de l'Université d'été 2012](#)

II) Nos Collègues de Nice nous annoncent :

l'Institut Culture Science Alhazen vous invite à la prochaine rencontre DLC,
mercredi 2 mai à 18h30
Saint-Jean d'Angély, amphi 4

Les canaux ioniques et les médicaments de demain

*par Florian Lesage, chercheur, chef d'équipe Inserm à l'IPMC
(Institut de Pharmacologie Moléculaire et Cellulaire)*

III) Dans le cadre des rencontres d'Hippocrate de l'Université Paris Descartes, notre Collègue Christian HERVE nous invite également à assister à un colloque:

SPORTS ET DOPAGE : QUELQUES

TEMOIGNAGES

www.medecine.parisdescartes.fr

contacts:

Pr Christian Hervé: christian.herve@parisdescartes.fr

Benjamin Augereau:

benjamin.augereau@parisdescartes.fr

01 53 10 46 17/06 81 79 16 20

Lundi 14 mai 2012 à 18h

Faculté de Médecine Paris Descartes

Amphithéâtre Richet 2ème étage

15, rue de l'Ecole de Médecine 75006Paris

Métro Odéon

Documents

Pour illustrer l'intervention du Pr André BRAHIC, nous vous proposons :

p.12: par *André BRAHIC* / ENFANTS DU SOLEIL / CONTES ET LÉGENDES
Chapitre 1er (Extrait p.49 à56)

p. 16: par *André BRAHIC* / ENFANTS DU SOLEIL / **LES PLANETES** *Chapitre 2*

p. 25: *par André BRAHIC* **LES PLANÈTES GÉANTES UNE NAISSANCE PARTICULIÈRE**

Extrait de "*de feu et de glace*" /Odile Jacob 2010, pages 44 à 64p. 27 *À bord de Cassini autour de Saturne avec André Brahic*

p. 29 **LES ANNEAUX AU COURS DES ÂGES/** Extrait du chapitre 3 "De feu et de glace"
d'André BRAHIC/Odile Jacob 2010

p. 40

<http://actualite.portail.free.fr/tech-sciences/sciences/26-09-2011/a-bord-de-cassini-autour-de-saturne-avec-andre-brahic/>

En vue de la Conférence de Louis le Sergeant d'Hendecourt, nous vous proposons:

p. 47 Un résumé de sa prochaine conférence: De l'astrochimie à l'astrobiologie: pour une approche méthodologique

p. 48: Des briques de la vie primitive découvertes dans une comète artificielle issu du site:

<http://www.science.gouv.fr/fr/actualites/bdd/res/4417/des-briques-de-la-vie-primitive-decouvertes-dans-une-comete-artificielle/>

ENFANTS DU SOLEIL / CONTES ET LÉGENDES

André BRAHIC

Chapitre 1er (Extrait p.49 à56)

La Renaissance

L'astronomie d'observation n'a fait aucun progrès important dans le monde occidental au cours du Moyen Age, au point que l'apparition de la célèbre supernova du Crabe en 1054, qui a été observée par les Chinois, les Arabes et, semble-t-il, par les peuples d'Amérique, n'a apparemment pas été vue dans le monde occidental. Pourtant, ce nouvel astre éphémère était le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune, et visible de jour comme de nuit pendant trois semaines. On peut se demander si la météorologie sur l'Europe était à ce point désastreuse de Lisbonne à Stockholm et de Londres à Athènes, ou si l'apparition de la supernova dérangeait trop ceux qui enseignaient que le ciel était immuable.

La renaissance de l'astronomie occidentale en Occident n'est pas étrangère à la situation économique et politique. A l'aube de l'ère coloniale, la connaissance des positions précises des étoiles est particulièrement utile pour la navigation loin des côtes. De la même manière, au IX^e siècle, l'âge d'or de l'astronomie arabe avait coïncidé avec la plus grande expansion des musulmans. Tout au long de son histoire, l'astronomie a toujours été étroitement liée non seulement aux autres disciplines, dont elle a souvent été la mère, mais aussi à l'évolution sociale et politique.

Cinq noms ont marqué la renaissance de l'astronomie en Occident : **Copernic** (1473-1543), **Tycho Brahe** (1546-1601), **Kepler** (1571-1630), **Galilée** (1564-1642) et **Newton** (1642-1727). On peut les considérer comme les **pères fondateurs de l'astronomie moderne**.

Au cours du Moyen Âge, de nombreux épicycles avaient été rajoutés au système de Ptolémée pour rendre compte du mouvement des planètes. C'est en voulant retrouver des mouvements circulaires et uniformes que Copernic fut conduit à proposer un système héliocentrique beaucoup plus simple. À son époque, aucune expérience ne permettait de décider si la Terre était au repos ou en mouvement. Copernic, qui connaissait la théorie héliocentrique d'Aristarque, avait remarqué les insuffisances des multiples épicycles de Ptolémée. Le fait que Mercure et Vénus accompagnent le Soleil dans sa marche annuelle, les variations d'éclat de Mars, de Vénus et de Jupiter, l'ampleur des rétrogradations de Mars qui dépassent celles de Jupiter qui elles-mêmes dépassent celles de Saturne, trouvent une explication naturelle en plaçant le Soleil au centre du système. De plus, le système héliocentrique de Copernic permet de trouver aisément les distances des planètes.

Son œuvre présente pourtant un certain nombre d'imperfections. Pour **Copernic** comme pour Aristote, l'Univers est limité par la sphère des fixes, et le mouvement circulaire est considéré comme naturel pour les astres. Le Soleil ne joue qu'un simple rôle optique de source de lumière, et son rôle dynamique de cause du mouvement est ignoré. La Terre continue, dans ce système, à jouer un rôle privilégié puisque les mouvements sont rapportés au centre de l'orbite terrestre et non au Soleil qui est légèrement décalé. Malgré toutes ces imperfections, la portée philosophique de l'œuvre est considérable. La Terre perd sa situation centrale. Mise à l'Index par l'Église catholique, l'œuvre de **Copernic** y demeurera durant deux siècles et connaîtra la même hostilité chez les protestants.

À cette occasion, je ne résiste pas au plaisir de citer Cyrano de Bergerac, qui, au début du XVII^e siècle, pensait qu' « il serait aussi ridicule de croire que ce grand corps lumineux tournât autour d'un point dont il n'a que faire que de s'imaginer, quand nous voyons une alouette rôtie, qu'on a, pour la cuire, tourné la cheminée alentour".

S'étant attiré les faveurs du roi du Danemark Frédéric II, **Tycho Brahe** fit édifier le fameux observatoire d'*Uranibor* - le palais d'Uranie, muse de l'astronomie - et l'observatoire de Stelborg - le château des étoiles -, et réalisa les meilleures observations du mouvement des planètes. C'est en s'appuyant sur ces observations remarquables du mouvement de Mars que **Kepler**, cherchant à réaliser le vieux rêve des Grecs- «géométriser l'Univers » découvrit les fameuses trois lois qui portent maintenant son nom.

On peut considérer **Galilée** comme le fondateur de la physique moderne. Il inventa la dynamique, la microscopie, la thermométrie, il établit la loi de la chute des corps et du mouvement du pendule, et il trouva le principe de l'inertie. En étant un des premiers à pointer une lunette vers le ciel, il fit en quelques nuits du mois de juillet 1610 la plus grande moisson de découvertes jamais réalisées par un astronome. Il trouva les taches et la rotation du Soleil, les cratères et les montagnes de la Lune, les quatre gros satellites de Jupiter, les anneaux de Saturne, une multitude d'étoiles jusqu'alors invisibles et de nombreux amas d'étoiles. Il résolut la Voie lactée en étoiles...

Newton fonda la mécanique, l'optique moderne et le calcul différentiel. Il inventa le télescope et l'analyse spectrale. Sa théorie de la gravitation universelle, qui ne sera dépassée que par celle de la relativité d'Einstein, est le point de départ de l'astronomie mathématique. Pendant près de deux cent cinquante ans, l'essentiel des efforts dans cette discipline fut consacré à l'étude des mouvements des corps dans le système solaire. La mécanique céleste a connu son apogée en 1846 avec la découverte, par le calcul, de la planète Neptune, indépendamment par **Adams** et **Le Verrier**. Elle atteignait ses limites quelques années plus tard quand Le Verrier ne parvint pas à expliquer le mouvement du grand axe de l'orbite de Mercure. Il fallut attendre quelques années de plus et la théorie de la relativité générale d'**Einstein** pour comprendre que la théorie de Newton est insuffisante au voisinage d'une masse importante comme le Soleil.

*Les théories cosmogoniques de **Descartes** à **Laplace***

Les théories anciennes ont souvent été jugées, acceptées ou rejetées sur leur valeur philosophique ou sur leur accord avec les idées de leur temps beaucoup plus qu'avec les observations. De fait, les théories anciennes de la formation des planètes ne prenaient en compte qu'un petit nombre de faits d'observation. On peut en recenser cinq: la régularité des orbites planétaires, la similarité entre le système des planètes et les systèmes de satellites, la différence entre les planètes terrestres et les planètes géantes, la rotation lente du Soleil et la loi de Bode-Titius.

Plusieurs centaines de théories ont été proposées pour rendre compte de la formation des planètes. Le petit nombre de faits observationnels incontournables, et donc la difficulté de mettre telle ou telle théorie au rebut pour incompatibilité avec le monde réel, ainsi que la passion que soulevait l'idée de trouver nos origines ont engendré ce foisonnement de scénarios. Leur simple énumération remplirait tout ce volume.

Avec **Copernic**, qui place le Soleil au centre du système solaire, **Kepler**, qui énonce ses fameuses trois lois du mouvement des planètes, **Galilée**, qui pose les fondements de la dynamique, et **Newton**, qui trouve la loi de la gravitation, les premiers outils nécessaires à une meilleure compréhension de la formation des planètes étaient en place. Mais il faut encore leur adjoindre **Descartes**, qui introduit l'idée d'évolution.

Le problème de l'origine du système solaire ne s'est pratiquement pas posé avant le XVIIe siècle. La plupart des philosophes considéraient que les planètes et les étoiles étaient là depuis toujours et pour l'éternité. Pendant longtemps, le dogme officiel, tout au moins en Europe occidentale, plaçait la Terre au centre de l'Univers. En introduisant la notion d'évolution, Descartes a été le premier à proposer une théorie scientifique de l'origine du système solaire. Il expliquait le monde de manière mécanique dans *Le Monde ou Traité de la lumière*, en 1633, et dans ses *Principia philosophiae*, en 1643.

Pour lui, l'Univers était rempli de "tourbillons", au centre desquels se formaient les étoiles et les planètes, tandis qu'ils plaquaient les hommes à la surface de la Terre ou faisaient flotter la Lune autour de la Terre ! Ces tourbillons impalpables étaient un peu comme le vent qui peut vous coller contre un mur ou bien faire voler un objet. Il a été le premier à pressentir que les mouvements quasi circulaires des corps célestes étaient le résultat de collisions entre "corpuscules" à partir d'un état chaotique.

Bien que ce modèle de tourbillons nous paraisse bien désuet et même un peu ridicule, surtout quand on connaît la loi de la gravitation de **Newton**, il faut reconnaître à **Descartes** le mérite d'avoir introduit l'étude de la turbulence qui joue un rôle si important dans de nombreuses théories cosmogoniques modernes et dans la physique actuelle. Descartes a surtout introduit cette idée fondamentale qu'est l'évolution. Dans l'Univers, les objets naissent, vivent et meurent. Rien n'est éternel ! Comme de vulgaires humains, les étoiles, les planètes, le Soleil, la Terre, les galaxies naissent et meurent. Mais leur durée de vie est tellement plus longue qu'il nous semble, à première vue, que rien ne change. « De mémoire de rose, on n'a jamais vu mourir un jardinier ! », dit le proverbe. Si Aristote ou Platon revenaient aujourd'hui, ils auraient l'impression que les étoiles n'ont pas bougé dans le ciel. Il faut attendre des dizaines de milliers, voire des millions d'années pour déceler des changements significatifs !

L'introduction de l'idée d'évolution en astronomie est une conséquence de l'unification des mécaniques terrestre et céleste que l'on maintenait séparées avant **Copernic**. A partir du moment où la Terre est considérée comme une planète parmi les autres et qu'elle est le siège d'une évolution permanente, il n'y a aucune raison pour qu'il n'en aille pas de même des autres planètes et du système solaire tout entier.

Avec **Descartes** et l'idée d'évolution, un premier pas essentiel est donc accompli. Il faut attendre **Buffon** en 1741, **Kant** en 1755 et **Laplace** en 1796 pour progresser à nouveau. Ils vont en effet proposer les deux théories qui s'opposeront pendant près de deux siècles, la théorie catastrophiste par laquelle la formation des planètes serait due au passage proche d'une étoile qui aurait arraché un filament de matière au Soleil, et la théorie de la nébuleuse primitive selon laquelle le Soleil et les planètes ont été formés à partir d'une même nébuleuse de gaz primordiale dont notre étoile n'est que la partie centrale condensée.

Le père des théories catastrophistes est **Buffon**. Il a émis en 1749 l'idée que le Soleil avait été heurté par une comète qui lui aurait arraché un filament de matière dont seraient nées les planètes. Une meilleure connaissance de la nature des comètes a vite fait abandonner cette théorie. Elle a été reprise plus tard en remplaçant la comète par une étoile qui aurait frôlé le Soleil.

En 1755, **Kant** a le premier introduit le concept de nébuleuse primordiale. L'Univers est rempli de matière plus ou moins condensée, et les régions les plus denses attirent la matière environnante et se contractent. Autour du protosoleil, la nébuleuse en rotation s'aplatit, et, dans le disque ainsi formé les concentrations secondaires donnent naissance aux planètes. En 1796, **Laplace**, qui n'avait pas eu connaissance du travail de Kant, a présenté une théorie de la formation du Soleil et des planètes à partir d'une nébuleuse primitive étendue qui s'est contractée sous l'effet des forces de gravitation. Les deux théories de **Kant** et de **Laplace** ont en fait été énoncées indépendamment n'ont en commun que le point de départ. Kant a peut-être été inspiré par Pierre **Estève**, de l'université de Montpellier, qui, en 1748, avait publié à Berlin une tentative d'explication de l'origine du monde, dans laquelle il tente de concilier **Newton** et **Descartes** et où il forme le système planétaire à partir d'une nébulosité. **Laplace** a probablement été inspiré par les observations de nébuleuses effectuées par William **Herschel** à l'aide de son télescope géant pour l'époque.

Contrairement à **Kant**, **Laplace** supposait que la nébuleuse était en fait la partie extérieure du protosoleil. Dans son modèle, au cours de la contraction de la nébuleuse, la vitesse de rotation augmente, de la même manière qu'un patineur tourne plus vite sur lui-même quand il ramène les

bras le long du corps, jusqu'à ce que les forces centrifuges à l'équateur deviennent supérieures aux forces d'attraction et que des anneaux de matière se détachent pour donner ensuite naissance aux planètes (voir la figure 23 au chapitre VIII. De son côté, **Kant** n'a jamais développé ses idées présentées en 1755 et n'a jamais corrigé les erreurs de physique contenues dans son mémoire. Par exemple, il oubliait un principe physique essentiel, à savoir la conservation du moment cinétique, c'est-à-dire de la quantité de rotation d'un corps isolé dans l'espace. De nos jours, une telle erreur ferait échouer à ses examens un étudiant de première année à l'université. La nébuleuse de **Kant** se mettait à tourner spontanément à partir d'un nuage immobile, contre tout principe d'inertie !

Au cours du XIX^e siècle, plusieurs objections ont été soulevées contre la théorie de la nébuleuse primitive. En particulier, le Soleil tourne sur lui-même en plus de vingt-cinq jours, beaucoup plus lentement qu'un objet issu directement de la contraction d'une nébuleuse. De plus, alors qu'il contient plus de 99 % de la masse du système solaire, il renferme moins de 1 % de sa quantité de rotation. Ce problème de la répartition du moment cinétique entre les planètes et le Soleil conduisit à l'époque la majorité des astronomes à préférer le modèle de formation par passage d'une étoile dans le voisinage immédiat du Soleil. Cette théorie catastrophiste a connu son heure de gloire avec le développement en Angleterre, entre 1915 et 1929, d'un modèle quantitatif complet par **Jeans et Jeffreys**. Les théories catastrophistes ont pourtant dû être abandonnées au milieu du siècle. Elles se heurtaient en effet à trop d'objections. Nous y reviendrons au chapitre VII.

L'idée de la nébuleuse primitive a donc été reprise sous une forme moderne depuis une quarantaine d'années, nous en parlerons au chapitre VIII. Auparavant, faisons le point sur les faits d'observation que les astronomes ont accumulés depuis des siècles et sur les contraintes qui en découlent.

LES PLANETES

extrait du chapitre II du livre d'André BRAHIC
"Les enfants du soleil"

Six planètes sont connues depuis les temps les plus reculés : la Terre, bien évidemment, et les cinq planètes visibles à l'œil nu que sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Trois autres ont été découvertes plus récemment : Uranus au XVIII^e siècle, Neptune au XIX^e siècle et Pluton au XX^e siècle. Huit d'entre elles ont déjà été explorées par au moins une sonde spatiale entre 1970 et 1989. Pluton ne sera approchée qu'au début du XXI^e siècle.

La distance Terre-Soleil, égale à cent cinquante millions de kilomètres, est souvent prise comme longueur de référence dans le système solaire pour éviter d'additionner les milliers de millions à tout bout de champ et par peur de perdre un zéro à l'occasion. Par manque d'imagination, cette distance a été surnommée «l'unité astronomique». Pour arpenter le système solaire depuis son centre, il faut donc compter 5 unités astronomiques pour atteindre Jupiter et 31 unités astronomiques pour rejoindre Neptune qui détiendra le record de distance jusqu'en 1999. Cet honneur reviendra ensuite à Pluton qui se déplace sur une orbite excentrique et inclinée de 17% par rapport à l'équateur du Soleil et dont la distance au Soleil varie entre 29,7 et 49,5 unités astronomiques. Toutes les autres planètes se déplacent sur des trajectoires quasi circulaires dans le plan de l'équateur du Soleil ou dans son voisinage immédiat. Ce plan est appelé «plan de l'écliptique».

Pour l'instant, nous ne savons pas s'il existe d'autres planètes dans le système solaire malgré les fausses annonces de découverte parues régulièrement dans la presse. La dixième planète, alias planète X, défraie souvent la chronique, mais toutes les recherches d'objets se déplaçant lentement par rapport aux étoiles et susceptibles d'être une planète se sont révélées infructueuses. Elles ont cependant permis la découverte de nombreux petits corps comme des astéroïdes ou des comètes. On peut affirmer que, dans le plan de l'écliptique, il n'y a pas de planète ayant au moins la taille de Neptune jusqu'à 240 unités astronomiques, sinon elle aurait déjà été détectée dans les programmes de recherche développés dans les années 1940 et 1950. Grâce à la mesure précise de l'orbite des planètes connues, on peut affirmer qu'aucune perturbation gravitationnelle suspecte n'a été décelée. La dixième planète, si elle existe, paraît bien difficile à détecter. Elle devrait recevoir et réfléchir une lumière bien pâle du lointain Soleil et elle serait bien difficile à distinguer au milieu de milliards d'étoiles faibles dans le ciel. La planète Pluton avait été trouvée parmi vingt millions d'astres, étoiles pour la plupart, plus brillants qu'elle ! Il est douteux que la découverte accidentelle d'une grosse planète puisse se reproduire comme dans le cas d'Uranus : un objet lointain, bien au-delà de Pluton, ne se distinguerait pas d'une étoile, et un objet plus proche aurait déjà été détecté depuis longtemps par les perturbations qu'il imposerait aux mouvements d'Uranus et de Neptune.

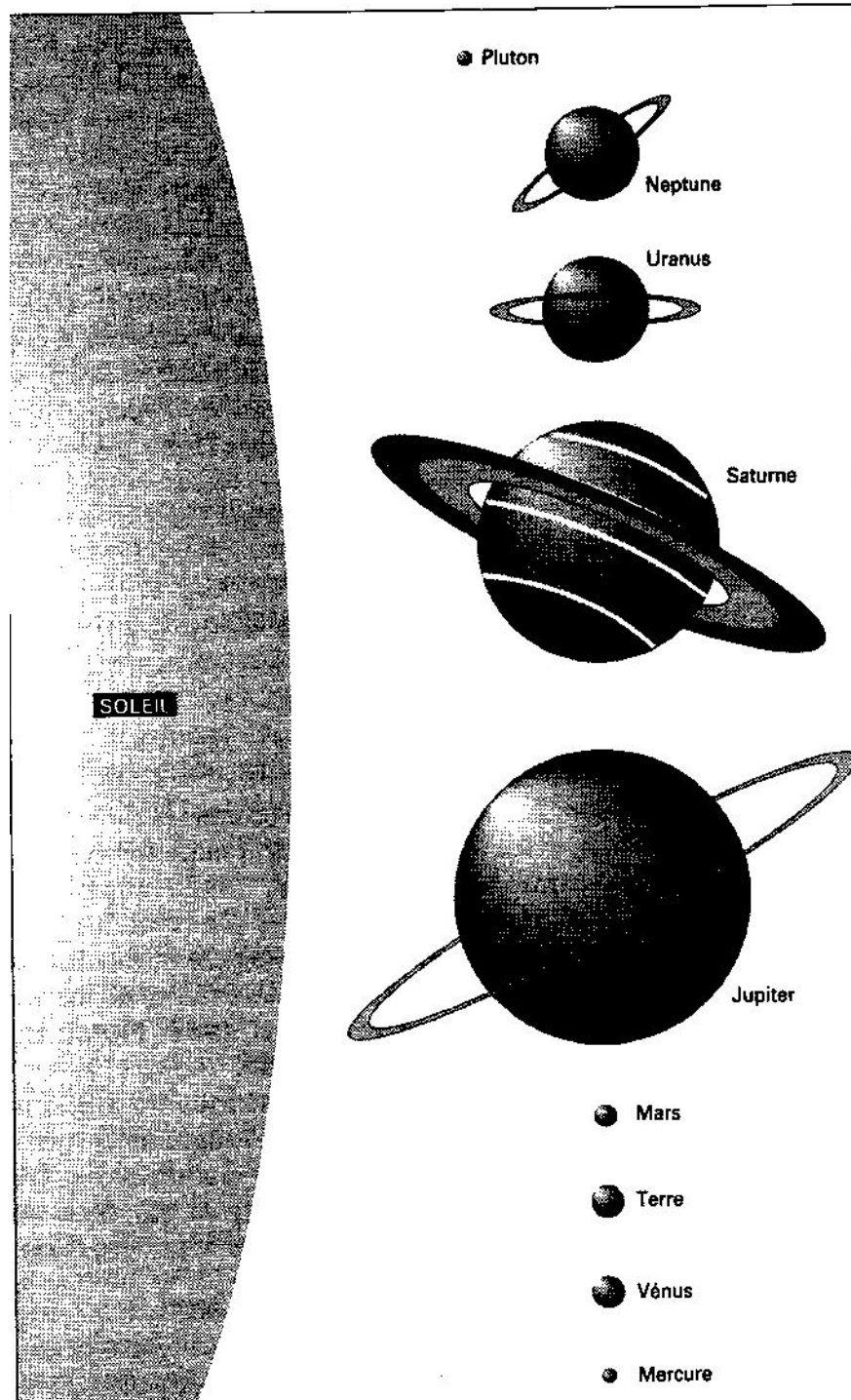


Figure 3 Les tailles relatives des planètes et du Soleil.
Le Soleil est environ dix fois plus gros que Jupiter et cent fois plus gros que la Terre. Sa masse est environ mille fois celle de Jupiter et environ un million de fois celle de la Terre.

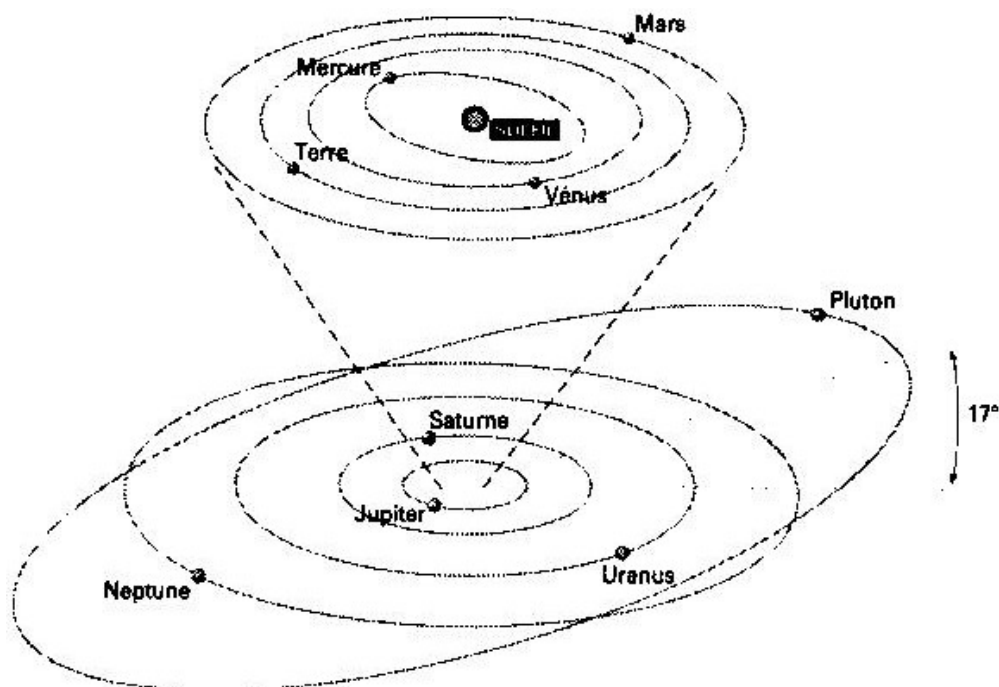


Figure 4 La régularité des orbites planétaires.

De Vénus à Neptune, toutes les planètes sont pratiquement situées dans le plan équatorial du Soleil. Leurs plans orbitaux sont inclinés de moins de $3,5^\circ$ par rapport au plan de l'écliptique défini comme le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. L'inclinaison des deux planètes extrêmes, Mercure et Pluton, est plus importante : respectivement de 7° et de $17,2^\circ$ par rapport au plan de l'écliptique. Pour beaucoup d'astrophysiciens, Pluton est un gros astéroïde, membre de la ceinture d'Edgeworth-Kuiper, plutôt qu'une planète.

Un faible espoir demeure pourtant grâce aux sondes *Pioneer 10 et 11* et *Voyager 1 et 2* qui quittent actuellement le système solaire. Si le hasard de leur route les conduisait à passer au voisinage d'une nouvelle planète, une déviation de leur trajectoire pourrait être observée, mais la probabilité d'un tel événement paraît bien faible ! Ces quatre sondes, parties à la recherche de la limite entre le milieu interplanétaire et le milieu interstellaire, continuent à émettre des signaux audibles quoique de plus en plus faibles. Elles s'éteindront les unes après les autres, et nous perdrons le contact après 2015. Elles deviendront alors, pendant des milliards d'années, des « bouteilles à la mer » contenant un bref message des terriens du xx^e siècle offert à la sagacité d'extraterrestres d'autres rivages.

Les planètes telluriques

On peut distinguer deux catégories de planètes : les planètes terrestres ou telluriques ou encore internes — Mercure, Vénus, la Terre et Mars — et les planètes géantes ou externes, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Cette répartition est simple à comprendre. Dans un gaz, les atomes ou molécules qui le composent s'agitent en tous sens à grande vitesse, d'autant plus vite que la température est élevée. C'est ainsi que les molécules d'azote et d'oxygène que vous respirez à l'instant s'agitent à $1\ 800$ km/h dans l'air qui vous entoure. Elles filent à des vitesses supersoniques ! Les éléments les plus abondants que sont l'hydrogène et l'hélium dans la nature sont aussi les plus légers et, à température donnée, ils atteignent des vitesses plus grandes que celles d'atomes plus massifs. Près du Soleil, à quelques millions ou centaines de millions de kilomètres, la température de centaines de degrés a entraîné l'hydrogène et l'hélium à des vitesses supérieures à la vitesse d'évasion du système solaire, et ils se sont échappés de ces régions avant même que les planètes n'aient été formées. Les planètes les plus proches du Soleil se sont donc agglomérées à partir de matériaux dépourvus d'hydrogène et d'hélium. Loin du Soleil, au contraire, les très basses températures de -240°C à -140°C n'ont pas permis aux gaz

légers de s'évader, et la composition des planètes est proche de celle de la nébuleuse de gaz primitive qui est l'ancêtre commun du Soleil et des planètes. Cette composition est dominée, à 99 %, par l'hydrogène et l'hélium comme partout ailleurs dans l'Univers.

Les planètes proches du Soleil ont donc été formées à partir d'éléments plus lourds tels que le silicium, le carbone, l'aluminium, le calcium, le magnésium, le fer et d'autres qui, combinés avec l'oxygène, forment les minéraux et les roches. On comprend donc bien pourquoi de telles boules de roches entourées parfois d'une mince atmosphère apparaissent si différentes des planètes géantes et pourquoi, privées dès le départ de la majeure partie de la matière disponible dans la nébuleuse primitive, elles sont devenues aussi peu massives, de simples résidus rocheux en quelque sorte. La perte de l'hydrogène et de l'hélium explique aussi leur grande densité, près de 4 pour Mars et un peu plus de 5 pour les autres.

La plus grosse des planètes telluriques, la Terre, a un rayon de 6 378 km, énorme à l'échelle humaine, et qui nous a fait croire pendant longtemps qu'elle était plate. Elle est pourtant dix fois plus petite que Jupiter et plus de cent fois plus petite que le Soleil! Sous-alimentées à la naissance, ces planètes n'ont pu s'orner d'anneaux et retenir de nombreux satellites : aucun pour Mercure et Vénus, un pour la Terre et deux pour Mars.

En dépit de leur composition chimique semblable, les planètes telluriques diffèrent nettement les unes des autres. Contrairement à Vénus et à Mars, Mercure ne possède pas d'atmosphère. La Terre possède le champ magnétique le plus important. Mars et la Terre tournent sur elles-mêmes en une journée, tandis qu'un jour sur Mercure et sur Vénus correspond à deux et huit mois terrestres. La Terre est la seule à posséder de grandes quantités d'eau liquide, l'eau n'existe sur Mars que sous forme de glaces et de vapeur d'eau, tandis que Vénus et Mercure en sont dépourvues.

La surface de Mercure nous a été révélée par les photos saisissantes d'une sonde américaine en 1974. Un ciel noir piqué d'étoiles de par l'absence d'atmosphère, un sol gris-brun, poussiéreux, des cratères à perte de vue. Hormis l'inhabituelle intensité lumineuse d'un Soleil tout proche, on se serait cru sur la Lune ! La surface est criblée de cratères, cicatrices d'un bombardement incessant par des météorites tout au long de son histoire. Comme sur la Lune, aucune érosion, aucune activité géologique depuis des milliards d'années n'est venue adoucir le paysage de Mercure, mais, contrairement à la Lune, son noyau est composé de fer, source de champ magnétique. Tous les corps du système solaire ont été ainsi soumis pendant quatre milliards et demi d'années à un bombardement soutenu, mais les cratères peuvent rapidement s'effacer comme sur Terre quand la pluie, les rivières et le vent érodent les surfaces, ou encore si l'activité géologique remodèle le paysage (volcans, failles, plissements de terrain, etc.). Il suffit de compter les cratères pour estimer l'activité géologique d'un terrain et son âge. Il suffit... cela signifie que des gens ont la patience d'effectuer les calculs et que l'on sait traduire le chiffre obtenu en années d'exposition aux météorites. Nous reviendrons sur ce problème au chapitre III .

Vénus, pudiquement recouverte de nuages, est restée longtemps mystérieuse. Mais les astronomes sont curieux, et, après le passage d'une vingtaine de sondes américaines ou soviétiques, la mission américaine *Magellan* nous a fourni en 1991, grâce à un sondage par radar, une carte avec une résolution de l'ordre de cent mètres. Les cartes *Michelin* de Vénus sont plus précises que nos cartes routières ! On y trouve une grande variété de paysages et de phénomènes géologiques : des volcans, des vallées, des dépressions, des failles, des plateaux, des chaînes de montagnes... Vénus est aussi active que la Terre ! Les photos prises au sol par les sondes *Venera* montrent d'ailleurs un terrain cahotique, parsemé de cailloux aux arêtes vives : de jeunes cailloux, vu l'extrême érosion de l'accablante atmosphère vénusienne.

Les détails topographiques de la surface de Vénus obtenus par radar, l'analyse du sol par les sondes qui ont atterri et de nombreuses autres observations indiquent que les volcans y ont joué un rôle important. Il semble même qu'ils soient toujours actifs! Pourtant, la croûte de Vénus paraît beaucoup plus statique que celle de la Terre, et on n'a pas encore détecté de tectonique des plaques.

Mais ce nouveau paradis pour géologue semble bien inaccessible à l'homme à cause de son écrasante et dangereuse atmosphère. Elle est cent fois plus dense que la nôtre et composée pour l'essentiel de gaz carbonique. Elle opprimerait un astronaute comme un océan comprimerait un plongeur à près de mille mètres de profondeur. Autant dire qu'il n'y résisterait pas. La teneur en gaz carbonique est responsable d'un cuisant effet de serre, et la température dépasse 400 °C. La belle Vénus cache donc un enfer impropre à toute forme de vie ainsi qu'à la présence d'eau liquide.

Tournons nous vers Mars qui semble un peu plus hospitalière d'après les informations recueillies par les sondes américaines *Viking* de 1976 à 1982. Hospitalière pour une courte visite dans un futur proche mais non accueillante car, sur près d'une trentaine de sondes lancées vers Mars par les Etats-Unis et l'Union soviétique, moins du tiers a atteint sa cible ! Les missions martiennes ont joué de malchance au point que les astronomes accusent en riant les prétendus petits hommes verts d'avoir une défense aérienne efficace... Après une interruption d'une quinzaine d'années, l'exploration de Mars a repris de manière particulièrement active au cours des années 1990. Les Etats Unis et l'Europe ont mis au point un programme ambitieux qui pourrait aboutir, vers 2030 ou 2040, à l'envoi d'hommes sur Mars.

Mars apparaît à mi-chemin entre les astres morts que sont Mercure et la Lune, et les mondes géologiquement actifs comme la Terre ou Vénus. On y trouve, comme sur Terre, une grande variété de paysages : des volcans dont certains sont trois fois plus hauts que l'Everest, des dunes, des déserts, des vallées, des canyons dont l'un a plus de 5 000 km de long et 7 km de profondeur, des défilés, des chaînes de montagnes, des plateaux, des failles... mais aussi, comme sur la Lune, de nombreux cratères d'impact. Le paysage est remodelé par une forte érosion éolienne.

La couleur rouge de Mars est si marquée qu'on la voit à l'œil nu depuis la Terre. Elle est due à une forte teneur en oxydes de fer qui la rendent probablement hostile à toute forme de vie, celle-ci s'accommodant mieux d'un milieu réducteur. Couverte d'une atmosphère ténue, cent fois moins dense que sur Terre et composée, comme Vénus, essentiellement de gaz carbonique, Mars connaît une activité climatique et météorologique importante. D'impressionnantes tempêtes de sable ont balayé le paysage autour des sondes sur plusieurs semaines. En hiver, des plaques de givre et de neige sont apparues. Mais il ne faut pas imaginer que les températures sont clémentes le reste de l'année : les températures maximales enregistrées à midi à l'équateur en plein été atteignent 200°C et tombent à - 100 °c la nuit!

La température et la pression à la surface de Mars sont telles que l'eau ne peut exister qu'à l'état solide ou gazeux. Au rythme des saisons, la vapeur d'eau se condense directement en calottes polaires et vice versa. Pourtant, des vallées et des canaux qui semblent avoir été formés il y a plus d'un milliard d'années par des inondations ou des coulées d'eau liquide ont été photographiés. Leurs méandres ressemblent à s'y méprendre aux lacets d'une rivière terrestre. Cette information fondamentale nous enseigne que l'atmosphère d'une planète n'est pas éternelle! Comme tous les objets dans l'Univers, elle naît, évolue et disparaît un jour. Pour nous qui vivons grâce à l'atmosphère terrestre, il est vital de comprendre l'évolution d'une atmosphère en comparant les exemples que nous offre la nature.

Les planètes géantes

De taille impressionnante — Jupiter et Saturne ont plus de 60 000 km de rayon- et de faible densité-0,7 pour Saturne et un peu plus de 1 pour les autres —, les planètes géantes apparaissent comme d'immenses boules de gaz dont la densité, la pression et la température augmentent quand on s'enfonce vers l'intérieur. Elles n'offrent pas de surface solide comme les planètes telluriques. Loin du Soleil, entre sept cent cinquante millions et quatre milliards et demi de kilomètres du Soleil, les lois de Kepler leur imposent de tourner majestueusement autour du Soleil, en douze à cent soixante-cinq ans, tout en virevoltant sur elles-mêmes en dix heures, pour Jupiter et Saturne, et en dix-sept heures, pour

Uranus et Neptune. Pourtant, Jupiter est mille fois plus massive que la Terre (et mille fois moins que le Soleil).

Très-massives et composées à 99 % d'hydrogène et d'hélium comme le Soleil, elles sont toutes rehaussées de magnifiques anneaux et d'une multitude de satellites. Imaginez un instant le spectacle de chapelets de lunes et d'anneaux brillants et colorés sur fond d'étoiles, tels des arcs-en-ciel de la nuit, qu'un voyageur pourrait admirer près de ces planètes, sans parler des tourbillons changeants et nuancés de leur atmosphère ou des spectaculaires aurores polaires⁷ des éclairs et des phénomènes luminescents qui éclairent leurs nuits. Plus de soixante satellites gravitent autour d'elles, dont plus de trente ont été découverts au cours de ces vingt dernières années. Ces satellites sont des corps célestes à part entière qui se distinguent par leur diversité, leur géologie propre et quelquefois même leur météorologie.

Entre 1979 et 1989, les sondes *Voyager* ont bouleversé notre connaissance des confins du système solaire. Cette aventure au cours de laquelle les sondes ont parcouru plus d'un million de kilomètres par jour restera comme un des grands moments de l'histoire humaine. Des milliards d'observations de toute nature ont été envoyées sur Terre, et il aura fallu des dizaines d'années pour dépouiller toutes ces informations et les assimiler.

Formées loin du Soleil, dans les parties les plus froides de la nébuleuse primitive, les planètes géantes ont conservé tous les gaz légers et les glaces initialement présents. Nous ne voyons que la couche supérieure de leur atmosphère qui présente toujours une structure en bandes parallèles souvent séparées par des zones très turbulentes. Du point de vue chimique, on a détecté dans leur atmosphère du méthane, de l'ammoniac, du gaz carbonique, de l'acétylène, de la phosphine et beaucoup d'autres molécules plus ou moins complexes. Ces molécules, bien que minoritaires, sont responsables des couleurs variées qui parent la planète. Le bleu merveilleusement tahitien de Neptune est ainsi dû à la haute teneur en méthane qui absorbe les rayons rouges.

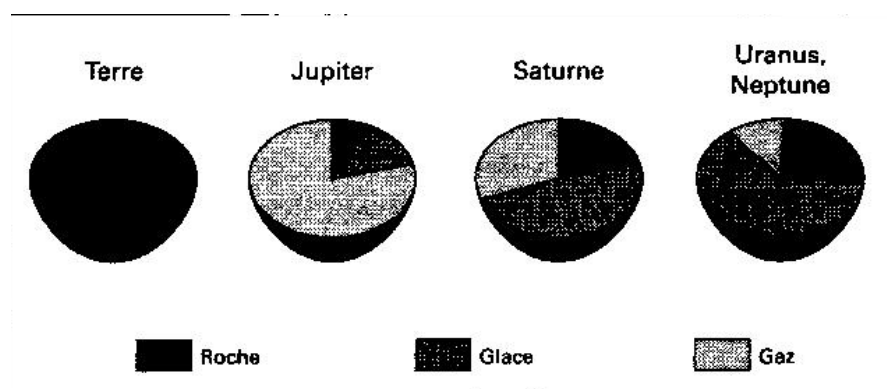


Figure 5 La composition des planètes géantes.

Contrairement aux planètes géantes, la Terre et les planètes telluriques contiennent surtout des roches et très peu de gaz et de glaces. Les proportions relatives de roches, de glaces et de gaz varient d'une planète géante à l'autre, comme le montre ce schéma

⁷ Lorsqu'il y a des bouffées d'activité solaire, le choc d'un plus grand nombre de particules chargées en provenance du Soleil avec celles qui proviennent de la planète se traduit en particulier par des phénomènes de luminescence qu'on appelle "aurores boréales" ou "australes" sur les astres qui possèdent un champ magnétique.

Des cyclones, des anticyclones, des tourbillons et des vents violents agitent sans arrêt l'atmosphère de ces planètes. Les vents soufflent à plus de mille kilomètres à l'heure à l'équateur de Saturne et de Neptune. Les atmosphères de Jupiter et de Saturne tournent plus vite à l'équateur que dans les zones de latitude plus élevée. C'est l'inverse qui se produit dans le cas d'Uranus et de Neptune. On ne sait pas encore pourquoi. Une des manifestations spectaculaires de ces tourbillons est la fameuse « tache rouge » de Jupiter : on sait maintenant qu'il s'agit d'un immense cyclone qui se maintient depuis plus de trois siècles. De nombreuses autres taches, animées de toutes sortes de mouvements, ont été filmées sur Saturne et sur Neptune par les sondes *Voyager*.

La sonde *Voyager 2* a atteint Neptune, la dernière planète au programme, le 25 août 1989, alors que cette planète n'a pas encore fait un tour complet autour du Soleil depuis sa découverte ! Découverte qui a eu d'ailleurs un très grand retentissement au XIX^e siècle car elle a marqué le triomphe de la mécanique céleste et de la loi de la gravitation de Newton. « M. Le Verrier a trouvé une planète au bout de sa plume », disait Arago. Un simple calcul effectué dans un bureau avait permis la découverte d'un corps céleste situé à plus de quatre milliards de kilomètres de la Terre : un pas de géant pour la démarche scientifique et un long voyage pour *Voyager 2*.

La sonde *Voyager 2* avait été initialement conçue pour explorer Jupiter et Saturne. Il est remarquable de constater qu'elle a été améliorée et même réparée à plusieurs milliards de kilomètres de la Terre. On doit saluer l'exploit des ingénieurs qui ont réussi à intervenir à distance sans qu'il y ait le moindre garage susceptible de les aider. Après une première défaillance d'un récepteur radio survenue juste après le lancement à l'été 1977, un des axes de la plateforme orientable s'est grippé lors du survol de Saturne à l'automne 1981. En « secouant » la sonde, les ingénieurs ont été capables de débloquent en partie l'axe et de diagnostiquer les mouvements proscrits de façon à éviter un nouveau blocage. Au prix d'une grande complication des messages envoyés par le réseau d'antennes au sol et d'un programme de travail très élaboré communiqué à la sonde, celle-ci a pleinement rempli sa mission près d'Uranus.

Avant la rencontre avec Neptune, beaucoup étaient inquiets. Cette sonde lancée depuis douze ans serait-elle encore en bon état ? Ce robot de 800 kg à moitié sourd et un peu arthritique n'allait-il pas tomber en panne ? La lumière solaire étant neuf cents fois plus faible au niveau de Neptune que près la Terre et beaucoup d'objets, anneaux ou satellites, étant intrinsèquement très sombres, il n'était donc pas certain *a priori* de pouvoir prendre des images à partir d'une sonde survolant le système de Neptune à plus de 27 km par seconde. D'autant que cet engin avait été conçu pour observer les environs beaucoup plus lumineux de Jupiter et de Saturne ! Les ingénieurs ont magnifiquement réussi à programmer le mouvement de la sonde de manière à compenser l'effet de bougé pendant les prises de vue, un peu comme un photographe opérant à bord d'une voiture lancée à grande vitesse et photographiant une scène sur le bord de la route en effectuant un mouvement exactement inverse de celui de la voiture ! *Voyager 2* a ainsi effectué des mesures dont elle était incapable au moment de son lancement. Partie pleine d'énergie en 1977, elle arrivait à Neptune en 1989 comme une vieille dame un peu rhumatisante, mais pleine d'expérience !

Quel succès ! Telle dernier mouvement d'une symphonie, le tempo s'est accéléré pour un final éblouissant et beaucoup de surprises : un système complet d'anneaux, un satellite Triton particulièrement actif et une superbe planète d'une très belle couleur bleue dont la haute atmosphère glacée est très animée. Au cours des six mois de l'approche, Neptune nous a présenté une palette sans cesse changeante de couleurs bleues et blanches. La présence de vents violents, la persistance de grandes structures de forme ovale, sortes d'immenses tourbillons, ainsi que la variabilité, d'heure en heure, de structures plus petites étaient totalement inattendues d'une atmosphère qui reçoit du Soleil seulement 5% de l'énergie reçue par Jupiter, soit trois cent cinquante fois moins d'énergie que l'atmosphère terrestre.

Les survols d'Uranus, puis de Neptune ont eux aussi apporté leur lot de surprises. Personne ne s'attendait à de telles différences! Avec un diamètre d'environ 50 000 km, Neptune est à peine plus petite qu'Uranus, mais elle a une masse légèrement supérieure (environ dix-sept fois celle de la Terre), ce qui lui confère la densité la plus forte des planètes géantes (1,64) et qui reflète une plus grande proportion d'éléments lourds que ses voisins. L'analyse de la proportion relative d'hydrogène et d'hélium dans les planètes géantes se révèle essentielle pour des problèmes aussi fondamentaux que l'origine du système solaire et la théorie de l'expansion de l'Univers. L'hydrogène et l'hélium sont en effet des atomes simples, présents dès les premiers instants de l'Univers, les atomes plus lourds ayant été formés plus tardivement au sein des étoiles. Leur proportion relative nous donne donc des informations précieuses sur un passé reculé de plus de dix milliards d'années. Les mesures effectuées par les sondes *Voyager* constituent d'excellentes contraintes auxquelles doivent se plier les théories des premiers moments de l'Univers.

La structure interne des planètes géantes n'est connue qu'indirectement par la déviation de trajectoire des sondes lors de leur survol. À l'aide des lois de la gravitation et de modèles mathématiques complexes, on en déduit l'existence en leur centre d'un noyau rocheux dont la masse est de l'ordre de quelques masses terrestres. Autour du noyau, l'énorme pression comprime tellement l'hydrogène qu'il s'y trouve dans un état particulier appelé "hydrogène liquide métallique", liquide puisqu'il est à l'état liquide et métallique puisque, le noyau et l'électron ayant été séparés, le corps devient conducteur comme du métal. Les courants qui circulent dans ces fluides métalliques engendrent les champs magnétiques importants des planètes géantes.

Par ailleurs, Jupiter, Saturne et Neptune rayonnent plus d'énergie qu'elles n'en reçoivent du Soleil. On comprend encore mal la cause de ce surplus d'énergie dans le cas de Neptune. Pour Jupiter, il provient de la chaleur accumulée au moment de sa formation et qui n'a pas encore été totalement évacuée par l'énorme masse de la planète, un peu comme un radiateur éteint qui se refroidit lentement. En revanche, Saturne, plus petite que Jupiter, est déjà refroidie. Dans la zone de l'hydrogène métallique, la température est alors suffisamment basse pour que l'hélium ne soit plus miscible avec l'hydrogène. L'hélium, plus lourd, tombe alors vers le centre de la planète et libère ainsi de l'énergie, de la même manière qu'une chute d'eau.

La dernière planète découverte dans le système solaire, Pluton, est encore bien mystérieuse et le restera probablement jusqu'aux années 2010, le temps pour une sonde d'arriver si le projet de lancement vers 2003 est bien réalisé. Elle apparaît au télescope comme un point faiblement lumineux, noyé parmi les vingt millions d'étoiles qui, sur la voûte céleste, sont au moins aussi brillantes. Son diamètre apparent de moins d'un quart de seconde d'arc ne permet pas de distinguer quoi que ce soit à sa surface. Cependant, plusieurs découvertes importantes ont été faites au cours de ces dix dernières années : en 1978, on lui découvrait un gros satellite, Charon. Entre 1979 et 1985, le diamètre et la masse de Pluton étaient enfin correctement mesurés, ce qui n'empêche pas de trouver encore bon nombre d'erreurs et de valeurs farfelues dans les livres actuels. Avec 2 300 km de diamètre, Pluton est plus petite que la Lune et a une masse cinq cents fois plus faible que celle de la Terre. En 1976, des observations spectroscopiques ont révélé que sa surface est recouverte, au moins partiellement et peut-être même en totalité, de méthane gelé. En 1988, l'observation d'une occultation d'étoile par Pluton mettait en évidence une atmosphère extrêmement ténue où la pression n'atteint qu'un cent millième de la pression terrestre. En effet, lorsque la lumière en provenance d'une étoile est masquée par le passage d'une planète, cette interruption peut être brutale si le corps a une surface solide sans atmosphère, comme dans le cas de la Lune, ou au contraire progressive si la lumière de l'étoile est réfractée par l'atmosphère de la planète. L'atmosphère de Pluton varie probablement beaucoup au cours des saisons, la pression chutant d'un facteur dix lorsqu'elle s'éloigne au maximum du Soleil. Les images et les données de Triton nous révèlent un objet que beaucoup d'astronomes considèrent comme un frère jumeau de Pluton.

Dans les années 1940, certains avaient suggéré que Pluton était un satellite évadé de l'environnement de Neptune. La découverte, depuis le milieu des années 1980, de plusieurs dizaines d'objets de quelques centaines de kilomètres de diamètre situés au-delà de l'orbite de Neptune fait dire à de nombreux astronomes que Pluton n'est en fait que le plus gros objet de cette famille d'astéroïdes lointains.

Nous devrions bientôt assister à une exploration poussée de Mars et de Saturne. La sonde américano-européenne *Cassini-Huygens* est en route vers cette dernière depuis le 15 octobre 1997. Elle arrivera à bon port en 2004 pour nous transmettre une foule d'images et de données spectaculaires sur la planète, ses anneaux et ses satellites. De même, un lancement tous les deux ans vers Mars devrait conduire à un retour d'échantillons dans nos laboratoires d'ici 2010.

Les satellites

On ne connaissait, en 1970, l'existence que de trente deux satellites; et un seul d'entre eux, la Lune, nous avait dévoilé quelques détails de sa surface. Vingt ans plus tard, leur nombre avait doublé : ils sont tous très différents.

Mars possède deux petits satellites : Phobos et Deimos, ou la Terreur et la Panique en grec, deux tristement fidèles compagnons du dieu de la guerre en effet. De forme irrégulière, très petits, très sombres et très proches de la planète, ils sont difficilement observables de la Terre et n'ont été découverts qu'en août 1877. Beaucoup d'astronomes pensent que Phobos et Deimos sont des astéroïdes capturés peu de temps après la formation de Mars. Ce furent les premiers satellites d'une autre planète photographiés de près dès 1969 et 1971 par les sondes américaines *Mariner 6*, *7* et *9*. Comme tout corps sans atmosphère ni activité géologique, les surfaces de Phobos et de Deimos sont saturées de cratères et couvertes d'une couche de poussière qu'on appelle «régolite».

Alors que Mars est très rouge, la surface gris-noir de ses satellites rappelle les « mers » lunaires les plus noires, ces immenses coulées de lave que les anciens ont prises pour des mers. Elle réfléchit moins de 6 % de la lumière du Soleil, c'est-à-dire moins que le velours noir! Il est donc probable que ces corps ne se soient pas formés en même temps que Mars et au même endroit. Comme on trouve, dans les ceintures des astéroïdes, des corps qui semblent avoir ce pouvoir réflecteur et cette couleur, on pourrait penser que Phobos et Deimos se sont formés dans la même région. La densité de Phobos est légèrement inférieure à 2. Celle de Deimos est probablement du même ordre de grandeur. Ils sont donc formés d'un matériau riche en éléments légers, proche de celui des météorites appelées les « chondrites carbonées». Tout cela suggère que Phobos et Deimos sont des objets primitifs.

LES PLANÈTES GÉANTES UNE NAISSANCE PARTICULIÈRE

Extrait de "de feu et de glace" André BRAHIC/Odile Jacob 2010

Les quatre planètes les plus lointaines sont bien différentes des quatre planètes telluriques que sont Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Ce sont d'immenses boules de gaz composées à plus de 90 % d'hydrogène et d'hélium, alors que les secondes en contiennent peu et ont une croûte solide. Toutes les quatre sont entourées d'anneaux et de nombreux satellites, contrairement aux planètes terrestres. Cette différence entre planètes géantes et terrestres est simple à comprendre. À une température donnée, la vitesse d'agitation des atomes et des molécules est d'autant plus faible que ces particules sont plus massives. Les éléments les plus légers comme l'hydrogène et l'hélium sont animés de mouvements d'agitation d'autant plus rapides que la température est plus élevée. Quand on s'approche du Soleil, la température augmente et les éléments légers peuvent atteindre des vitesses supérieures à la vitesse d'évasion. Près du Soleil, là où il fait chaud (quelques centaines de kelvins), l'hydrogène et l'hélium se sont évadés avant même que les planètes n'aient été formées. Comme 99% de la nébuleuse solaire primitive était composée d'hydrogène et d'hélium, les planètes les plus proches du Soleil se sont formées à partir de résidus et leur masse est beaucoup plus faible que celle des géantes. Elles ont été fabriquées à partir d'éléments plus lourds tels que le silicium, le carbone, l'aluminium, le calcium, le magnésium, le fer et d'autres qui, combinés avec l'oxygène, forment les minéraux et les roches. Les planètes terrestres, qui n'ont ni hydrogène, ni hélium, ni anneaux, ni système de satellites, pourraient nous paraître comme de pauvres débris peu intéressants si nous n'habitons l'une d'entre elles, la Terre.

Les planètes géantes ont été formées loin du Soleil dans les parties les plus froides de la nébuleuse primitive (de -240 à -150 °C). Contrairement à la Terre, elles ont conservé toutes les glaces et tous les gaz légers initialement présents. Elles sont gazeuses : au fur et à mesure qu'on s'enfonce dans leur atmosphère, la pression et la température augmentent. mais on ne rencontre pas de croûte solide comme pour les planètes terrestres. Ce sont plutôt les satellites des planètes géantes qui pourraient être comparés, par leur taille et par leur structure, à ces dernières.

Après des siècles de tâtonnements et de polémiques, les astronomes se sont enfin mis d'accord dans les années 1980 sur les grandes étapes de la formation des planètes (voir *Enfants du Soleil* du même auteur, Odile Jacob, 1999). Une nébulosité s'est isolée dans le milieu interstellaire et s'est effondrée sur elle-même. Le centre a donné naissance au Soleil et un disque est apparu dans le plan équatorial du Soleil. Ce jeune Soleil a commencé sa vie en se contractant jusqu'à sa taille actuelle. Il était alors si chaud que le disque était initialement à l'état gazeux. Au moment où les réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium ont démarré, le Soleil avait alors acquis une source d'énergie pour des milliards d'années, mais il était plus froid que lors de l'étape précédente. Le gaz refroidi s'est alors solidifié en grains d'une taille de quelques microns à quelques millimètres et dont la composition dépend de la distance au Soleil avec des éléments réfractaires dans les parties internes du disque et des glaces dans les parties externes. Dans ce disque de grains issu du disque gazeux, des instabilités d'une taille d'environ 500 mètres sont alors apparues pour former des planétésimaux qui ont subi de très nombreuses collisions mutuelles. Quand elles étaient violentes, les planétésimaux ont été brisés en morceaux. Quand elles étaient douces, ils se sont rassemblés pour former des corps plus gros. Cette succession de fragmentations et d'accrétions a fait apparaître un disque d'embryons qui a succédé au disque de planétésimaux. Ces embryons avaient typiquement une taille de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Les interactions et les collisions entre tous ces embryons ont conduit au disque des huit planètes que nous connaissons aujourd'hui.

Ce mécanisme est très efficace pour former les quatre planètes telluriques. mais on s'est longtemps demandé si les planètes géantes avaient été formées de la même manière que la Terre par accumulation de petits planétésimaux ou bien, comme le Soleil par effondrement d'un immense globule. En fait, l'accumulation de nouvelles observations contraignantes, le développement de nouvelles simulations numériques sur de puissants ordinateurs et la découverte de planètes géantes autour d'autres étoiles ont considérablement fait avancer cette étude. Les astronomes sont maintenant persuadés que les planètes géantes ont, elles aussi, collecté des planétésimaux pour se former. Mais la situation a été très différente pour les planètes telluriques et les planètes géantes. Les secondes – situées loin du soleil, baignaient dans un gaz d'hydrogène et d'hélium qui représente 99 % de la masse du milieu interstellaire. Les embryons et les protoplanètes géantes ont très vite capturé le gaz environnant pour former rapidement de grosses planètes.

Les premières, situées dans la chaleur du jeune soleil, n'ont pas rencontré de gaz et ont été assemblées à partir d'un matériau beaucoup moins abondant.

Cette succession de collisions douces et violentes, de mariages et de divorces fait évidemment penser aux légendes de la mythologie grecque. Là aussi, après des débuts agités, un monde plus harmonieux a pu apparaître.

LA TERRE EST LÀ... GRÂCE À JUPITER

Il semblait *a priori* évident qu'une petite planète comme la Terre, 300 fois moins massive que Jupiter, avait dû être formée bien avant, tout simplement parce qu'il semblait qu'il faille plus de temps pour accumuler le matériau d'une géante. Mais, contrairement à ce qu'on pensait jusqu'à une période récente, il semble bien que la plus grosse planète, Jupiter, est apparue en premier en collectant rapidement tout le gaz présent sur un noyau fabriqué par accumulation d'une multitude de petits planétésimaux. Près du Soleil, dans les parties les plus chaudes, le matériau était beaucoup plus rare. Il a donc fallu plus de temps pour constituer les planètes telluriques alors que Jupiter tournait déjà autour du soleil. Le gros Jupiter a considérablement perturbé par son influence gravitationnelle les planétésimaux les plus proches, au point que, d'une part, il a empêché la formation de toute planète entre Mars et lui, et, d'autre part, la planète Mars n'a pas pu complètement se développer. C'est une petite planète avec une faible gravité à la surface.

Jupiter était au bon endroit, assez près de la Terre pour envoyer des planétésimaux qui ont contribué à sa naissance et assez loin pour ne pas trop perturber sa croissance. De nombreuses planètes géantes extrasolaires découvertes récemment sont soit trop près, soit trop loin de leur étoile, soit encore sur des orbites elliptiques au point qu'une autre Terre ne peut exister à cet endroit-là. Saturne a joué un rôle analogue, mais avec une intensité bien moindre.

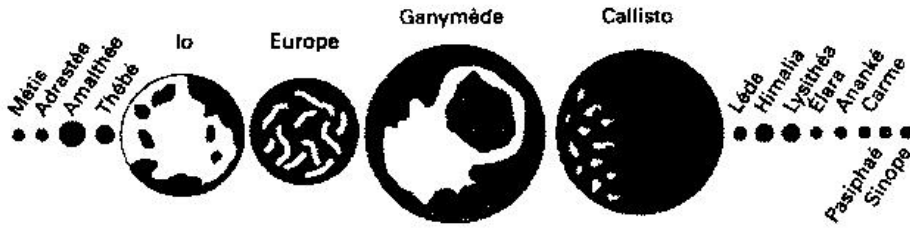
Nous venons donc de comprendre que le gros Jupiter a été formé en premier et que sa masse initiale, sa position et son mouvement ont joué un rôle majeur dans la genèse des autres planètes. Si la Terre a cette position, cette masse et ce mouvement, et si la Vie a pu s'y développer, c'est grâce à Jupiter!

L'observation des planètes extrasolaires nous montre des systèmes très différents du nôtre, dans lesquels des planètes géantes sont souvent très proches de l'étoile centrale ou bien se déplacent parfois sur des orbites elliptiques. Ces observations nous ont permis de comprendre que des planètes géantes trop proches du centre ou encore se déplaçant sur des trajectoires allongées ne permettent pas l'apparition d'une Terre ayant la bonne masse et la bonne température pour que la Vie ait pu se développer. Nous avons aussi compris que les planètes peuvent se rapprocher ou s'éloigner de leur étoile. En effet, d'une part leurs perturbations mutuelles et d'autre part le frottement avec du gaz présent en quantité peuvent conduire à des migrations. Elles peuvent se rapprocher ou s'éloigner du centre!

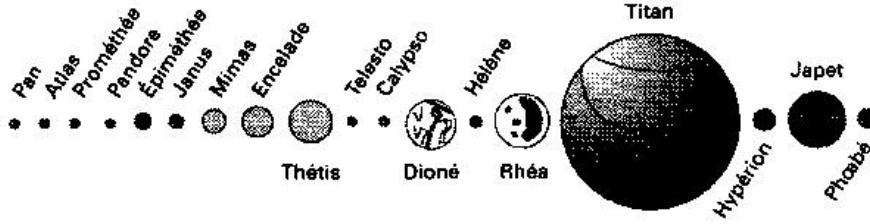
C'est ainsi que les astronomes viennent de découvrir que les planètes géantes de notre système solaire ne sont pas exactement là où elles ont été formées. Au tout début de leur histoire, elles se sont perturbées mutuellement. Elles ont légèrement oscillé autour de positions d'équilibre. À un moment donné, elles sont entrées en résonance, c'est-à-dire que leurs périodes de révolution sont devenues commensurables. Un tel phénomène conduit à une brutale discontinuité et à une variation violente de leur distance au Soleil. Tous les petits corps qui gravitent au-delà dans les parties extérieures du système solaire sont alors violemment perturbés et délogés. Ils se dispersent dans toutes les directions. Certains sont chassés du système solaire, d'autres sont précipités sur le Soleil. Le résultat est alors un violent bombardement dans toutes les directions, tandis que les planètes géantes atteignent leurs positions actuelles.

Cet événement semble avoir eu lieu environ 800 millions d'années après la naissance de la Terre. À ce moment-là, toutes les planètes et les satellites ont été criblés par une multitude de projectiles et des corps de toute tailles. La Lune en garde encore de nombreuses cicatrices qui nous ont permis de dater l'événement. Cet épisode, appelé le Grand Bombardement tardif, est contemporain de l'apparition de la Vie sur Terre. Certains pensent même que ce bombardement a joué un rôle important en apportant sur Terre du matériau indispensable à la Vie, en fragilisant la croûte terrestre et en permettant le démarrage de la dérive des continents. Tout ceci est encore très spéculatif et doit être étudié en détail avant de pouvoir être confirmé.

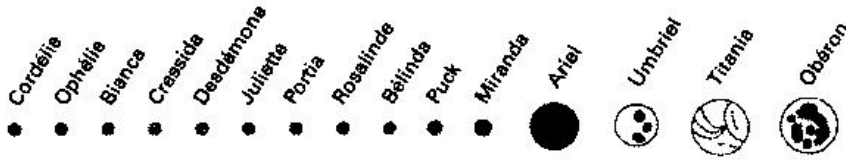
Jupiter



Saturne



Uranus



Neptune



Lune



LES ANNEAUX AU COURS DES ÂGES

Extrait du chapitre 3 "De feu et de glace" d'André BRAHIC/Odile Jacob 2010

Les plus grands noms de la science et de l'astronomie se sont penchés au chevet des anneaux. Ils ont consacré beaucoup de temps à essayer de les comprendre et pourtant nous sommes encore loin du but. La découverte des anneaux de Saturne, une nuit du mois de juillet 1610, a eu lieu à un moment particulier dans l'histoire de l'humanité, à la transition entre l'obscurantisme de l'Inquisition et les Lumières de la Renaissance scientifique. Il ne s'est écoulé que neuf ans entre le sacrifice de Giordano Bruno et les premières observations de Galilée avec sa lunette.

L'histoire des anneaux des planètes a commencé quand Galilée a vu pour la première fois le disque de la planète Saturne accompagné de deux excroissances à travers une lunette à Padoue. La chance n'était pas de son côté à ce moment-là, les anneaux étant presque vus par la tranche l'année de cette première observation. De plus, sa lunette avait des lentilles imparfaites, un grossissement de seulement 32 diamètres et une ouverture très petite. Néanmoins, il eut l'impression de voir quelque chose de tout à fait inattendu dans l'apparence de la planète. Le 30 juillet 1610, il écrivait à Belisario Vinta, conseiller et secrétaire d'État du duc de Toscane, et lui annonçait sa découverte en ces termes : « J'ai découvert une merveille tout à fait extraordinaire, que je voudrais faire connaître à Sa Seigneurie et à Votre Altesse, mais je désirerais que cette découverte reste secrète jusqu'à sa publication dans un article que je suis en train de faire imprimer. Mais j'ai tenu à l'annoncer à Leurs Altesses Sérénissimes de telle sorte que, si quelqu'un la découvrait, elles sauraient que personne ne l'a observé avant moi. Je pense même que personne ne l'observera avant que je l'en informe. Le fait est que la planète Saturne n'est pas un objet isolé, mais est composée de trois composantes qui sont presque en contact et qui ne bougent pas l'une par rapport à l'autre. Elles sont arrangées selon une ligne parallèle au zodiaque et celle du milieu est environ trois fois plus grosse que les composantes latérales⁸ ... »

Moins disert pour ses amis et collègues, Galilée leur a envoyé une anagramme en latin : «SMAISMRMMILMEPOETALEUMIBVNENVGTTAUIRAS». dont la solution est : „ ALTISSIMUM PLANETAM TERGEMINUM OBSER- VAVI. » Cela peut se traduire en français par : « J'ai observé que la planète la plus lointaine était triple. » Ayant découvert quelques mois plus tôt quatre satellites autour de Jupiter, Galilée avait cru *a priori* avoir trouvé deux lunes de Saturne, mais il dut vite déchanter : ces deux appendices étaient apparemment immobiles, il s'agissait donc d'autre chose. Galilée n'était pas au bout de ses surprises quand, deux ans plus tard, en observant à nouveau la planète, il constata que les excroissances avaient disparu. Il se demanda si « Saturne avait dévoré ses enfants » ou bien s'il s'agissait d'un phénomène analogue aux taches solaires, ou encore si sa lunette était trop imparfaite. Nous savons maintenant que la Terre est passée dans le plan des anneaux de Saturne en 1612, comme cela lui arrive tous les quinze ans. Les anneaux ont réapparu en 1613 et sont devenus de plus en plus visibles.

⁸ Traduction à partir de l'ouvrage de G. Abetti, *The History of Astronomy*, Sidwick and Jackson, 1954.

Il est amusant de constater que Kepler a mal déchiffré cette anagramme. En imaginant que la solution était : " SALVE UMBISTINEUM GEMINATUM MARTIA PROLES », soit en français : « Salut, les deux compagnons, enfants de Mars », il a cru que la planète Mars était triple, c'est-à-dire entourée de deux satellites. Cela réjouissait son esprit mathématique, puisque le nombre de satellites de la Terre à Jupiter, en passant par Mars, semblait suivre une progression géométrique. Pourtant, les deux satellites de Mars n'ont été découverts que deux cent soixante-sept ans plus tard. C'est ainsi que Jonathan Swift dans *Le Monde de Lilliput* et Voltaire dans *Micromégas* parlent longuement des deux satellites de Mars, bien avant qu'ils soient connus.

Après la découverte d'appendices autour de Saturne en 1610, les astronomes n'ont pas réalisé tout de suite qu'un anneau plat entourait la planète. Il fallut près de cinquante ans pour trouver la bonne explication. Dans les années qui suivirent l'observation de Galilée, les polémiques ont été vives entre des observateurs qui ne comprenaient pas pourquoi ces excroissances changeaient d'aspect avec le temps. Certains accusaient même leurs collègues d'avoir la vue basse ou d'utiliser des instruments de piètre qualité. Des théories toutes plus extravagantes les unes que les autres ont alors fleuri. Les uns imaginaient des vapeurs changeantes et plus ou moins transparentes à la surface de la planète. Certains dessinaient des taches sombres sur la planète. D'autres faisaient intervenir un jeu de satellites sombres apparaissant et disparaissant. D'autres encore donnaient à la planète une forme ellipsoïdale avec des anses. Ce n'est qu'en 1654 que Christiaan Huygens, alors âgé de 26 ans, a compris que Saturne était entourée d'anneaux, dont l'aspect variait avec l'angle sous lequel on les voyait. Il avait construit avec son frère des lunettes qui étaient parmi les meilleures du monde, mais Huygens a surtout compris qu'un anneau était le seul moyen de comprendre la diversité des observations depuis plus de quarante ans. Par contre, il s'est trompé en croyant que cet anneau était très épais. L'aspect variable de la planète et de ses anneaux s'explique naturellement dans le cadre du modèle héliocentrique. Vingt et un ans après la condamnation de Galilée et douze ans après sa mort, les anneaux de Saturne apportaient ainsi un argument supplémentaire à l'idée d'un Soleil central.

Dès 1675, Jean Dominique Cassini a imaginé que ces anneaux étaient constitués d'une foule innombrable de petites particules tournant sans relâche autour de la planète. Sa vision était la bonne, mais il n'avait à son époque aucun moyen de démontrer qu'il avait raison. Il a découvert en 1675 une division sombre qui porte maintenant son nom. Il fut le premier à comprendre la vraie nature des anneaux : « Cet anneau pourrait être formé comme d'un essaim de petits satellites... l'apparence de l'anneau est causée par un amas de très petits satellites de différents mouvements, qu'on ne voit point séparément⁹ » et : « L'anneau de Saturne est formé d'une infinité de petites planètes fort près l'une de l'autre². »

En 1796, Pierre-Simon de Laplace démontrait que Saturne retenait les anneaux dans le plan équatorial et qu'ils seraient instables et brisés en morceaux s'ils étaient solides. Avant d'écrire les fameuses lois de l'électromagnétisme qui allaient bouleverser les mondes de la science et de l'industrie, James Maxwell commençait sa carrière scientifique par l'étude des anneaux. Malgré deux erreurs de calcul qui n'ont été découvertes que cent douze ans plus tard, il obtenait en 1859 le prix Adams pour avoir démontré que des anneaux liquides ou solides ne pourraient pas subsister autour de la planète et qu'ils étaient donc « composés d'un nombre indéfini de particules individuelles », comme l'avait deviné Cassini. James Keeler a observé à la fin du XIX^e siècle le spectre de la lumière solaire réfléchi par les anneaux. Il a découvert un décalage variant avec la distance à

⁹ *Mémoires de l'Académie royale des sciences*, 1705, p. 18.

Saturne. Cette mesure de vitesse utilisant le même principe que les radars au bord des routes a mis en évidence le fait que chaque particule se déplaçait autour de Saturne en son accord avec les lois de Kepler. L'intuition de Cassini et le calcul de Maxwell étaient confirmés !

En 1911, Henri Poincaré comprenait que les petits corps qui orbitent autour de Saturne sont si nombreux dans un volume relativement faible que les collisions entre eux sont "incessantes. Il s'est rendu compte qu'il fallait tenir compte de l'énergie perdue par les particules lors des impacts et a ainsi qualitativement montré qu'un système de particules subissant des collisions inélastiques mutuelles était aplati en un disque peu épais. Mais il fallut attendre les années 1970 et l'utilisation des ordinateurs pour traiter ce problème. Des calculs précis développant cette idée et de nombreux modèles nouveaux ont été mis au point au cours de ces trente dernières années. Au même moment, l'exploration spatiale bouleversait notre vision de ces bagues planétaires. Un gain de résolution d'un facteur 4 000 avec la mission Voyager, puis un nouveau gain d'un facteur 20 avec la mission Cassini ont totalement modifié notre connaissance des anneaux de Saturne.

Au cours des siècles, les astronomes voyaient des anneaux apparemment homogènes dans leurs lunettes, mais Bernard Lyot, qui était un remarquable observateur, avait suspecté dès les années 1930 la présence de nombreuses divisions en leur sein. À la grande surprise des astronomes, les sondes spatiales ont révélé un système encore plus complexe. Une incroyable diversité règne autour de Saturne. On pourrait imaginer qu'une foule innombrable de cailloux se cognant sans cesse les uns contre les autres engendrerait une gigantesque pagaille autour de Saturne et que toute la matière serait emmêlée sans le moindre ordre. Nous assistons exactement au contraire. De superbes structures parfaitement ordonnées entourent Saturne et plusieurs régions de natures totalement différentes les unes des autres donnent une allure très contrastée à ces anneaux.

En se déplaçant de la planète vers l'extérieur, on rencontre successivement l'anneau D très ténu, l'anneau C transparent et diaphane, l'anneau B opaque et dense, la division de Cassini du nom de son découvreur et l'anneau extérieur-A. Vus de la Terre avec une résolution de l'ordre de 2 500 kilomètres, ces anneaux paraissent homogènes avec des bords très doux. Photographiés par les sondes Voyager avec une résolution de l'ordre du kilomètre, ils se montrent très hétérogènes avec des milliers d'annelets à bords très abrupts. Examinés par la sonde Cassini avec une résolution de l'ordre de quelques dizaines de mètres, ils s'avèrent d'une incroyable richesse. En fait, tout change quand on s'approche. D'une part, une foule de structures inattendues, de formes surprenantes et de figures plus ou moins complexes apparaissent. Augmenter la résolution par des facteurs de plusieurs milliers à plusieurs millions, examiner les anneaux dans toutes les lumières de l'ultraviolet à l'infrarouge et les regarder sous tous les angles ont transformé notre point de vue. Il a fallu quatre siècles pour comprendre leur existence. Leur étude vient d'être totalement renouvelée et ils devraient continuer à intriguer les astronomes au cours des siècles à venir !

Cette expérience devrait nous faire réfléchir dans notre quête de connaissance des astres les plus lointains. En pouvant nous approcher au plus près des astres du système solaire, nous découvrons des mondes nouveaux. Nous ne sommes pas encore capables de visiter les mondes des étoiles et des galaxies, mais nous pouvons imaginer les immenses progrès qui nous attendent quand notre technologie nous permettra d'aller plus loin. D'ici là, nous devons faire preuve d'humilité !

DES ANNEAUX PARTOUT!

Les observations des sondes spatiales et l'utilisation des ordinateurs ont complètement bouleversé l'étude des anneaux. Des modèles numériques sophistiqués ont été mis au point à partir de 1972. J'ai pu développer à cette époque un modèle reprenant les idées de Poincaré. De nouveaux anneaux ont été découverts autour d'Uranus, de Jupiter et de Neptune entre 1977 et

1984. Les retours vers Jupiter avec la sonde Galileo en 1995 et vers Saturne avec la sonde Cassini en 2004 nous ont offert un luxe de détails et de nouveaux phénomènes qu'il nous faut maintenant expliquer.

Le 10 mars 1977, les astronomes s'étaient mobilisés pour observer le passage d'Uranus devant une étoile. En étudiant la manière dont la lumière de l'étoile disparaît derrière l'atmosphère d'Uranus, ils envisageaient de recueillir de nombreuses informations sur sa température et sa composition chimique. Quelle ne fut pas leur surprise de trouver des interruptions de signal avant et après le passage d'Uranus devant l'étoile ! C'était la découverte d'anneaux fins autour de la planète.

Le 5 mars 1979, la sonde Voyager 1 est passée au plus près de Jupiter et a traversé son plan équatorial. L'équipe d'imagerie a imaginé que d'éventuels anneaux seraient alors vus par la tranche, c'est-à-dire dans la meilleure position pour être détectés sur une photographie. En fait, cette tentative de détection n'a été décidée qu'au dernier moment après de nombreuses discussions. En effet, plusieurs scientifiques étaient très sceptiques et trouvaient cette observation inutile. Ils proposaient de regarder plutôt les satellites à ce moment-là, d'autant plus que certains théoriciens avaient « démontré » que Jupiter ne pouvait pas posséder d'anneaux car, disaient-ils, la planète était trop chaude à sa naissance. Les anneaux de Jupiter sont pourtant bien là ! Il faut se méfier des prédictions. Rien ne remplace l'observation !

En 1983, les environs de Neptune n'avaient pas encore révélé leurs secrets. En particulier, le passage de Neptune devant une étoile avait été observé par plusieurs dizaines d'équipes dans le Pacifique, de la Chine à l'Australie en passant par de nombreuses îles de cet océan. J'avais utilisé le télescope franco-canadien situé au sommet du Mauna Kea dans la Grande Île d'Hawaï. Aucun anneau n'avait été détecté à cette occasion. Je me souviens des discussions de cette époque. Des théoriciens nous ont expliqué que l'orbite rétrograde du satellite Triton interdisait la présence d'anneaux. Plusieurs observateurs ont alors signé un article dans lequel ils affirmaient qu'il n'y avait pas d'anneaux autour de Neptune. J'ai refusé de le cosigner, estimant que l'absence de preuve n'était pas la preuve de l'absence. Mais pratiquement tout le monde avait renoncé à observer les occultations stellaires par Neptune. Je n'étais pourtant pas découragé.

Le 22 juillet 1984 à l'Observatoire européen austral au Chili et le 15 août 1985 à l'Observatoire du Mauna Kea, j'ai eu la chance de trouver une interruption de signal juste avant le passage de Neptune devant une étoile. Mais il y avait un problème, la détection avait eu lieu d'un côté de la planète et non de l'autre, comme si l'anneau était incomplet. C'était la découverte des arcs de Neptune !

Le dépouillement de nos observations nous indiquait que ces anneaux étaient à 75 000 kilomètres du centre de la planète, à la distance prévue du passage de la sonde Voyager 2 dans le plan équatorial de Neptune le 25 août 1989. Il a fallu de nombreuses négociations au sein des équipes scientifiques pour réussir à convaincre nos collègues de passer légèrement plus loin. Bien nous en a pris. La sonde n'a connu aucun problème et les photographies des arcs nous ont confirmé leur existence. Elles nous ont montré qu'ils n'occupaient qu'un dixième de la circonférence d'un anneau continu et très ténu. Seuls les arcs pouvaient être détectés de la Terre, mais nous n'avions qu'une chance sur dix de les découvrir par occultation. J'ai eu beaucoup de chance en 1984 !

Nous pouvons tirer trois conséquences de ces découvertes de la fin du XX^e siècle : (i) toutes les planètes géantes sont entourées d'anneaux ; (ii) ces anneaux sont globalement tous très différents les uns des autres ; (iii) ils sont tous semblables à une petite échelle de l'ordre du kilomètre. Nous pouvons aisément imaginer que les autres planètes géantes autour d'autres étoiles sont elles aussi entourées d'anneaux et que la diversité règne en maître.

POURQUOI Y A-T-IL DES ANNEAUX AUTOUR DES PLANÈTES?

La première question qui vient à l'esprit en observant l'environnement des planètes géantes est : « Pourquoi y a-t-il des anneaux ? », La réponse est simple. D'une part, tout satellite trop proche d'une planète serait brisé en morceaux et, d'autre part, le jeu des collisions mutuelles entre des particules gravitant autour d'un astre les aplatit rapidement en un disque mince.

Le mathématicien français Édouard Roche a montré en 1847 qu'un satellite liquide ne pouvait pas exister près d'une planète en deçà d'une certaine limite qui porte son nom. Ceci est simple à comprendre. À un instant donné, le point du satellite le plus proche de la planète est plus attiré que le point le plus éloigné puisque la force d'attraction dépend de la distance. Cette force différentielle exercée par la planète en chaque point du satellite peut le briser s'il est trop proche. Pour la Terre, la limite de Roche est à environ 18 000 kilomètres du centre. Si la Lune, actuellement à 384 000 kilomètres de nous, était placée à l'intérieur de cette limite, elle serait brisée en morceaux. Contrairement à ce qu'ont imaginé certains auteurs de science-fiction, il serait impossible de placer une ville artificielle de plusieurs centaines de kilomètres de long à l'intérieur de la limite de Roche de la Terre. Nous vivons à l'intérieur de la limite de Roche sans en souffrir et nos satellites artificiels n'ont aucun problème. En effet, les corps solides ont une certaine cohésion interne et peuvent survivre près d'une planète, à condition qu'ils ne soient pas trop gros.

Les planètes géantes, beaucoup plus massives que la Terre, exercent des forces de marée considérables dans leur environnement. La limite de Roche de Saturne est exactement à la limite des anneaux. Il en est de même pour les autres géantes. Si un gros satellite pénètre à l'intérieur de cette limite, il est inexorablement brisé en morceaux. Si des cailloux ou des rochers sont à l'intérieur de la limite de Roche, ils ne peuvent pas se rassembler pour former un satellite. Il ne peut donc y avoir que des petits corps autour d'une planète. En tournant autour de la planète, ils balayent un certain volume et entrent en collision avec leurs voisins. Ces chocs aplatissent rapidement les environs d'une planète en un disque mince. Que les anneaux soient issus d'un matériau primitif qui n'a jamais pu se rassembler en un satellite ou d'un astre qui est venu se briser plus tardivement, leur existence est une conséquence naturelle des effets de marée et des collisions.

Il n'y a pas d'anneaux autour de la Terre et des autres planètes telluriques tout simplement parce qu'il n'y a pas suffisamment de matériau disponible autour d'elles. Si nous étions très riches et si nous lançions des milliards de satellites artificiels, leurs collisions mutuelles les rassembleraient en un spectaculaire anneau équatorial. Les nuits seraient alors éclairées par un clair d'anneau permanent, mais nous ne verrions plus les étoiles, ce qui serait vraiment regrettable!

« De quoi sont faits ces anneaux ? » est une des premières questions à laquelle les astronomes ont essayé de répondre. Nous avons compris que ces anneaux ne sont ni solides ni liquides et sont un assemblage de petits corps, mais nous aimerions savoir s'il s'agit de poussières, de cailloux ou de rochers, et quelle est leur nature. Quand nous voulons étudier un objet sur Terre, nous commençons par l'examiner sous toutes les coutures en le regardant sous la lumière, à contre jour, par transparence, etc. Puis nous utilisons des rayonnements infrarouge ou ultraviolet pour en savoir plus. Les astronomes ont procédé de la même manière pour connaître les anneaux. Avant l'exploration spatiale, ceci n'était pas possible. En effet, vue de Saturne, la Terre est angulairement très proche du Soleil. L'angle d'éclairement des anneaux varie donc très peu vu de la Terre. De plus, l'atmosphère terrestre, qui nous protège, arrête une grande partie des rayonnements infrarouge et ultraviolet.

COMMENT SAVOIR DE QUOI ILS SONT FAITS ?

Voir les anneaux du côté nuit et du côté jour, apercevoir la planète à travers les anneaux ou admirer l'ombre des anneaux sur la planète et l'ombre de la planète sur les anneaux offrent de nombreuses occasions de s'émerveiller. Mais ces vues sous tous les angles n'ont pas uniquement un intérêt esthétique. Elles nous permettent de mieux comprendre la nature et la composition des particules des anneaux en étudiant comment elles réagissent aux jeux de lumière. En tournant autour de Saturne, la sonde Cassini nous a montré les anneaux sous tous les éclairages, de nuit et de jour, en lumière rasante comme en plein Soleil. En mesurant la facilité avec laquelle un rayonnement traverse les anneaux, on peut estimer leur opacité et leur densité à différentes longueurs d'onde soit en regardant une étoile à travers les anneaux, soit en envoyant un signal radio traversant les anneaux pour parvenir à la Terre. On peut ainsi obtenir de précieuses informations sur les tailles des particules. En effet, le rayonnement à une longueur d'onde donnée λ passe aisément à travers toutes les particules plus petites que λ et il est arrêté par toutes les particules plus grandes. En utilisant plusieurs longueurs d'onde, on peut ainsi reconstituer la distribution des tailles. Les rayonnements infrarouges et ultraviolets peuvent nous dévoiler la température et la composition des anneaux. Les variations de température des particules des anneaux en fonction de leur position (de nuit, au petit matin, dans la journée, le soir) ont été mesurées. La vitesse à laquelle les particules se refroidissent ou se réchauffent nous apporte d'importantes contraintes sur leur nature.

Vous avez peut-être déjà remarqué, vue d'avion, l'apparition d'une brutale surbrillance en admirant une forêt ou un lac, au moment où le Soleil, vous-même et la tache brillante étiez alignés. Cet effet, connu sous le nom d'effet d'opposition, a été observé sur les anneaux de Saturne par la sonde Cassini. La zone des anneaux alignée avec le Soleil et la sonde présente un minimum d'ombres, aussi bien dues aux irrégularités du sol sur un rocher qu'aux ombres mutuelles des particules les unes sur les autres. Ce phénomène est encore mal compris, mais son étude nous permet de mieux connaître les particules des anneaux.

Grâce à ces multiples observations, nous avons compris que les planètes géantes sont entourées de corps de toutes les tailles allant de poussières de quelques microns à des blocs de plusieurs dizaines de mètres et jusqu'à des petits satellites de quelques kilomètres. En raison des effets de marée, un gros satellite trop proche de Saturne serait détruit, mais des corps d'une dizaine de kilomètres de diamètre peuvent très bien subsister au sein des anneaux. L'observation dans les différentes couleurs, de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par la lumière visible, nous a montré une grande variété de compositions chimiques et d'états de surface. Les anneaux de Saturne sont couverts de glace d'eau qui est l'élément dominant, mais d'autres composants tels que des silicates et d'autres glaces sont aussi présents. Par contre, les anneaux d'Uranus et de Neptune contiennent du matériau beaucoup plus sombre.

DES ANNEAUX DYNAMIQUES UN FESTIVAL D'ONDES

Loin d'être homogènes comme on l'avait imaginé avant l'exploration spatiale, les anneaux sont très différents d'un endroit à l'autre. Des dizaines de milliers d'annelets entourent Saturne. Il existe non seulement une ségrégation spatiale entre les particules, serrées les unes contre les autres en certains endroits et clairsemées en d'autres, mais aussi d'importantes différences de couleur entre les annelets. Cela signifie que la composition chimique des particules et l'état de leur surface varient avec la distance à Saturne.

Au contraire des galaxies qui évoluent sur des échelles de temps qui se comptent en milliards d'années, les anneaux se transforment sous nos yeux. Si nous pouvions remonter le temps en faisant défiler les millénaires, nous assisterions à un véritable film d'action. Loin d'être figés dans une forme immuable, les anneaux évoluent si vite que notre génération a pu observer de multiples changements entre les passages des sondes Voyager et Cassini en vingt-cinq ans d'écart.

La division de Cassini nous offre l'exemple le plus spectaculaire de structure créée par un satellite. Séparant les anneaux A et B, elle a été sculptée par le satellite Mimas. À chaque fois que Mimas a effectué une révolution autour de Saturne, le bord interne de la division en a effectué deux. Cette configuration particulière, connue sous le nom de résonance, est responsable de l'existence de la division de Cassini. Les autres satellites de Saturne interviennent pour provoquer la formation d'ondes et de discontinuités au sein de cette division.

Les petits satellites d'une taille supérieure au kilomètre jouent un rôle important dans la structure des anneaux en provoquant la formation d'ondes et de divisions nettes. Ils sont assez petits pour survivre aussi près de Saturne sans être détruits par les effets de marée. Mais ils sont assez gros pour creuser une tranchée au sein de laquelle ils se déplacent et soulever un cortège d'ondes. Ces astres sont des génies du dessin ! Ils sculptent une multitude de structures. Par exemple, dans l'anneau A, Pan et Daphnis ont aménagé leur espace vital au sein duquel ils se déplacent librement et harmonieusement en créant de superbes ondes en avant et en arrière de leur mouvement, tel un personnage royal qui ne circulerait qu'au milieu de paysages décorés et de personnages costumés.

Les anneaux sont le paradis des ondes. Certaines ressemblent à de la tôle ondulée et d'autres ont une forme spirale. Les observations à haute résolution de Cassini nous ont permis de découvrir de nouvelles ondes spirales, des annelets, des arcs de matière, des ondes en forme de tôle ondulée et une foule de structures nouvelles telles que des marbrures, des « cordes », des sillages, etc. Qu'ils baignent dans les anneaux ou qu'ils soient situés à leur périphérie, les satellites se perturbent mutuellement, perturbations qui se répercutent évidemment dans tous les anneaux. Tel un orchestre composé de milliers de musiciens qui joueraient en parfaite synchronisation, les interactions complexes entre une multitude de corps entraînent un remarquable équilibre.

Les mécanismes détaillés des interactions entre les satellites et les anneaux sont loin d'être bien compris. Les perturbations gravitationnelles, les collisions entre particules et les phénomènes de résonance entre le mouvement des satellites et celui des particules des anneaux jouent un rôle essentiel. Ces trois effets conduisent un satellite et un anneau proches à se repousser. Contrairement à notre intuition, les forces gravitationnelles d'attraction entre toutes les composantes des anneaux peuvent conduire à des phénomènes de répulsion ! La compréhension détaillée de ces mécanismes de confinement a de multiples applications dans des domaines variés de la physique.

Situé au bord extérieur de l'anneau A, Atlas nous offre un bel exemple de phénomène de répulsion entre satellites et anneaux. Ce satellite qui retient le monde porte bien son nom ! Il joue le rôle de barrière repoussant les anneaux vers l'intérieur et empêchant les particules de s'échapper. En échange, les anneaux repoussent légèrement Atlas vers l'extérieur. Deux satellites situés de part et d'autre d'un anneau et appelés satellites bergers le confinent dans un espace réduit.

Finalement, les cailloux qui tournent autour de Saturne ignorent la justice sociale et la morale. Les plus gros ont créé leur espace vital afin de se déplacer aisément dans un sillon qu'ils ont préalablement vidé. Personne ne les gêne dans leur voyage. Ils repoussent les plus petits et les confinent dans un volume réduit les obligeant à se cogner sans cesse. Il y a tout de même quelques mécanismes de régulation. Quand trop de particules sont rassemblées en un volume trop petit, elles réussissent à repousser significativement les satellites responsables. De temps en temps, l'arrivée de météores détruit un bel agencement et un nouvel ordre se crée.

AUX LIMITES DES ANNEAUX DE SATURNE

On peut se demander jusqu'où s'étendent les anneaux, aussi bien vers Saturne que vers l'extérieur. Que deviennent les particules quand on se rapproche de Saturne ? Tout caillou, trop proche de la planète, qui entre en contact avec l'atmosphère est freiné par le frottement et disparaît rapidement dans Saturne. Un flux de particules est en permanence absorbé par la planète, mais la masse en jeu est totalement négligeable par rapport à celle de Saturne. Par contre, cette perte constante de matériau doit être compensée par un nouvel apport extérieur si les anneaux ont une durée de vie longue.

Au plus près de la planète, un anneau bien différent des autres, appelé anneau D, est visible sur une largeur d'un peu plus de 7 000 kilomètres. Son bord interne est à environ 6000 kilomètres du sommet des nuages. Photographié par les sondes Voyager et Cassini, il a varié sur une durée de vingt-cinq ans. Ces perturbations sont peut-être liées à la proximité de la planète ou à son champ magnétique.

Vers l'extérieur, les anneaux de Saturne ne s'arrêtent pas brutalement au bord de l'anneau A, à l'endroit qui correspond à la limite de Roche. Juste à la limite en dessous de laquelle les effets de marée sont prépondérants et au-delà de laquelle un gros satellite peut exister règne un anneau étrange appelé l'anneau F. Il est en interaction permanente avec deux satellites, Prométhée et Pandore, qui l'encadrent et le confinent dans un volume réduit, tels deux chiens de berger près de leur troupeau. Des formes étranges provoquées par l'attraction de ces deux satellites apparaissent et disparaissent sans cesse. Une immense structure spirale parcourt cet anneau. Dans la mythologie grecque, Prométhée a son foie sans cesse dévoré par un aigle. Autour de Saturne, Prométhée passe son temps à voler des particules à l'anneau F. Cet anneau F fait penser à l'anneau *e* d'Uranus, lui aussi la limite de Roche et qui est encadré par les satellites Ophélie et Cordélia. Autour de Neptune, l'anneau Adams possède, lui aussi deux bergers, Galathée et Larissa.

Au-delà de l'anneau F, un anneau très ténu appelé anneau G est situé hors de la zone où les effets de marée sont prépondérants. Du matériau constitué de fines poussières s'étend très loin de Saturne et empiète dans le monde des satellites, bien au-delà d'Encelade. On l'appelle l'anneau E. Nous venons de découvrir qu'Encelade perd sans cesse du matériau et alimente cet anneau en poussières. L'image naïve de la succession d'une planète, puis d'anneaux et enfin de satellites doit être nuancée. Il existe des petits satellites au sein des anneaux et des anneaux ténus au sein du monde des satellites.

HÉLICES ET AVIATEURS

Les images les plus détaillées des anneaux de Saturne ont été obtenues quand ils ont été frôlés par la sonde Cassini au moment de sa mise en orbite autour de la planète. À l'époque, un grand débat a eu lieu entre les scientifiques et les ingénieurs. Les premiers voulaient profiter du moment où la sonde passait au plus près des anneaux, juste au-dessus de leur plan, avant d'être satellisée autour de Saturne pour prendre des clichés à très haute résolution. Les seconds refusaient d'actionner et de pointer les instruments dans un moment délicat où les moteurs étaient mis en route et où le contact avec la Terre était momentanément perdu afin d'utiliser l'antenne de communication comme bouclier avant. « Quand la tempête fait rage, disaient-ils aux astronomes, personne ne monte sur le pont du vaisseau ! » Finalement, un compromis a été trouvé. Il était hors de question de manœuvrer les caméras et de viser une série de cibles, mais il était possible de simplement ouvrir l'obturateur des caméras sans connaître *a priori* la direction de visée.

Les photographies ainsi obtenues ont une excellente résolution, inégalée par la suite quand la sonde était plus éloignée des anneaux. On y distingue d'étranges structures surnommées « hélices », auxquelles on a donné le nom d'aviateurs célèbres comme Blériot, Santos-Dumont, Lindbergh, Richthofen ou Wright. Ces structures, prédites par des calculs théoriques, trahissent la présence de « rochers » de quelques dizaines de mètres de dimension. De tels objets sont trop petits pour pouvoir former une division, mais suffisamment gros pour perturber leur environnement et rassembler les particules sous une forme qui rappelle une hélice d'avion. La découverte des hélices permet de combler le fossé entre les poussières de quelques fractions de micron à quelques centimètres de dimension (détectées par les occultations) et les petits satellites d'une taille de quelques centaines de mètres (détectés dans les images). Ces hélices nous permettent de mieux comprendre comment le matériau s'est réparti au sein des anneaux et de vérifier le bien-fondé des simulations numériques.

LIBERTÉ, ÉGALITÉ, FRATERNITÉ

La découverte d'arcs autour de Neptune fut une grande surprise. Sachant que les particules des anneaux planétaires obéissent aux lois de Kepler, aucun astronome n'aurait imaginé leur existence avant 1984. En effet, un corps tourne d'autant plus vite autour d'une planète qu'il en est plus proche. La partie interne d'un arc devrait donc rapidement se séparer de la partie externe et il devrait s'étaler tout autour de la planète en un anneau complet en moins d'une dizaine de jours. Pour qu'un arc puisse exister, il faut que son matériau soit confiné dans un espace réduit. Seuls des satellites sont capables de cela. Les arcs de Neptune ont des frontières nettes dans les directions radiales et azimutales. Depuis leur découverte, d'autres arcs ont été découverts autour de Saturne et d'Uranus.

Mais comment confiner la matière par la seule gravitation ? De nombreux chercheurs développent actuellement des modèles théoriques pour comprendre ce phénomène et essayer de résoudre les équations qui le décrivent. Il est frappant de constater que le confinement est un des problèmes majeurs de la physique contemporaine. Nous savons que la matière au centre du Soleil est écrasée par toute la masse qui la surplombe au point de provoquer des réactions thermonucléaires, sources d'énergie. Nous aimerions pouvoir maîtriser et provoquer la fusion sur Terre pour enfin résoudre nos problèmes d'énergie. Pour cela, les scientifiques essaient de confiner la matière dans un fort champ magnétique. Les conditions autour de Neptune et dans nos expériences terrestres sont bien différentes, mais les équations décrivant ce confinement sont les mêmes dans le cas de la gravitation et dans celui du champ magnétique. Ceci illustre bien l'universalité des phénomènes physiques.

Étant à l'origine de la découverte, j'ai eu le privilège de baptiser ces arcs. J'ai choisi : "Liberté, Égalité et Fraternité." Ils ont en effet été photographiés en 1989, année où un mur tombait à Berlin, où des étudiants manifestaient place Tian'anmen à Pékin et où d'épouvantables dictateurs étaient chassés du pouvoir au Chili et en Roumanie. De plus, nous célébrions le 200^e anniversaire de la Déclaration des droits de l'homme. Quelques mois plus tard, un quatrième arc était trouvé par une de mes collaboratrices, Cécile Ferrari. Il a été baptisé « Courage », mot commençant par un C comme Cécile. Ces quatre noms ont été adoptés en 1994 par l'Union astronomique internationale qui regroupe les astronomes professionnels du monde entier. Courage, Liberté, Égalité et Fraternité arquent la frontière

avec les confins du système solaire. En prenant les quatre premières lettres des quatre arcs, on forme le mot « clef », symbole de la clef en tête d'une portée de musique et de la clef pour ouvrir la porte. Ce qui est une façon de rendre hommage à l'harmonie du ciel et à la curiosité des hommes.

Nul ne connaît l'âge des anneaux. Sont-ils vieux ou jeunes ? Pendant des siècles, la majorité des astronomes a considéré que les anneaux de Saturne avaient le même âge que la planète, c'est-à-dire 4,55 milliards d'années et qu'ils étaient simplement le reliquat du matériau primitif qui entourait Saturne dès sa formation. Au contraire, certains avaient imaginé qu'ils étaient beaucoup plus jeunes et qu'ils pouvaient résulter de la cassure d'un satellite ayant été brisé après avoir franchi la limite de Roche de la planète.

Les études récentes ont mis en évidence de nombreux mécanismes d'érosion des anneaux. Le bombardement météoritique peut détruire de nombreux cailloux ou arracher beaucoup de matériau à l'influence de Saturne. Le rayonnement solaire freine les particules les plus petites. Celles dont la taille est inférieure à quelques microns tombent sur la planète en moins de quelques dizaines de milliers d'années. Celles dont la taille est de l'ordre du centimètre ne peuvent pas subsister au-delà de 1 ou 2 milliards d'années. Les interactions avec les petits satellites peuvent éliminer du matériau. En étudiant simultanément l'efficacité de plusieurs mécanismes de destruction, certains scientifiques ont estimé que les anneaux de Saturne n'avaient que 2 millions d'années. En fait, ils n'ont pas tenu compte de mécanismes de renouvellement moins bien connus. Prométhée capture du matériau, mais Encelade en fournit !

Partisans d'anneaux jeunes et d'anneaux vieux ont confronté leurs raisonnements et finalement un argument de bon sens semble l'emporter. Si les anneaux des planètes avaient une courte durée de vie, il est peu probable que les quatre planètes géantes se soient parées d'anneaux juste avant l'exploration spatiale. Ces anneaux peuvent être comparés aux bâtiments anciens comme les arènes de Nîmes ou les cathédrales moyenâgeuses. Les monuments sont vieux, mais beaucoup de pierres ont été changées. Il en est de même des anneaux : processus de destruction et de régénération s'équilibrent. Si nous pouvions faire un voyage accéléré dans le passé, nous verrions probablement que les géantes sont toujours entourées d'anneaux dont l'apparence varie avec le temps.

DES TRACES DE DOIGTS SUR LE MICROSILLON

La gravitation l'emporte sur toutes les autres forces fondamentales de la physique pour gouverner le comportement des anneaux. Mais les forces électromagnétiques se manifestent de manière étonnante en provoquant des « orages magnétiques ». Sur plus de 70 000 kilomètres de longueur, d'immenses nuages de poussières sont soulevés à des hauteurs de plusieurs milliers de kilomètres au-dessus et en dessous du plan des anneaux. À certaines périodes, les orages succèdent aux orages. Les structures radiales qui apparaissent au petit matin sont étalées par la rotation différentielle des anneaux. Elles durent en moyenne deux rotations, soit une vingtaine d'heures, avant de se dissiper et d'être remplacées par d'autres. Les poussières diffusent la lumière, mais la réfléchissent mal. Quand on regarde les anneaux à contre-jour, avec le Soleil dans les yeux, ces structures paraissent brillantes. Avec le Soleil dans le dos, elles paraissent sombres. Elles donnent le sentiment de « traces de doigts » sur le microsillon des anneaux. Elles ont été surnommées *spokes* par nos collègues américains, en référence aux rayons de roues des diligences des westerns.

LE DERNIER ÉQUINOXE

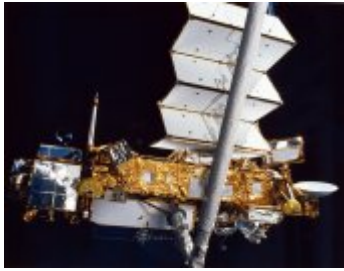
Il faut près de trente ans à Saturne pour accomplir une révolution autour du Soleil. Tous les quinze ans, il y a donc un équinoxe sur Saturne. La Terre et le Soleil passent à ce moment-là dans le plan des anneaux qui sont vus de la Terre par la tranche. Ils sont si fins qu'ils disparaissent pratiquement de notre vue. Cela avait beaucoup surpris Galilée qui n'avait pas compris en 1612 pourquoi il ne voyait plus d'appendices autour de Saturne. Depuis, chaque équinoxe a été observé en bénéficiant à chaque fois des derniers progrès instrumentaux. Pour avoir admiré les quatre derniers, je peux mesurer combien chacun marque les progrès scientifiques et l'avancée de nos technologies. En 1966, nombre d'observations avaient lieu à l'œil nu au bout du télescope et les luminosités étaient estimées très grossièrement. En 1980, j'ai organisé une campagne d'observations en utilisant de nouveaux détecteurs électroniques (les **CCD** ou dispositifs à transfert de charge) qui sont maintenant devenus communs dans nos caméras et nos appareils photographiques. La qualité des résultats a été telle que j'ai pu mesurer avec une précision de l'ordre de 300 mètres l'épaisseur globale des anneaux qui est de 1,4 kilomètre. En 1995, j'ai bénéficié de l'invention d'une nouvelle technique, l'optique adaptative, réduisant sensiblement les effets perturbateurs de la turbulence atmosphérique sur la netteté des images. Cela nous a permis de découvrir de nouveaux satellites. En 2009, pour la première fois, une sonde spatiale était là « au bon moment ». D'étonnantes images nous ont permis de voir des ombres de satellites sur les anneaux et des ombres de structures verticales nous donnant ainsi accès pour la première fois à des informations sur la troisième dimension et la structure verticale des anneaux.

LE PROCHAIN VOYAGE

« Apportez-moi un caillou prélevé dans les anneaux et je vous expliquerai le monde » pourrait dire l'astronome. Pour cela, il faudra retourner auprès des planètes géantes avec de nouveaux moyens. Jusqu'en 2017 et jusqu'au solstice sur Saturne, la sonde Cassini va continuer d'observer les humeurs des anneaux de Saturne. Il faudra des années pour analyser des millions d'images, en extraire les principales informations et découvrir de nouveaux phénomènes avant de retourner visiter ce monde si étrange.

Mais il n'est jamais trop tôt pour penser aux missions futures. Pour Uranus et Neptune, l'étape suivante consistera à placer une sonde en orbite autour de ces planètes lointaines. Quant à Saturne, on peut rêver d'un robot qui plongerait dans les anneaux et rebondirait de caillou en caillou en étant muni de bons « essuie-glaces ». Malheureusement, la technologie n'est pas encore tout à fait prête pour cette dernière mission et les trajets vers Neptune et Uranus sont bien longs si on veut arriver à faible vitesse dans leur voisinage avant de tourner autour. Je suis persuadé que les planètes géantes qui gravitent autour des étoiles voisines possèdent, elles aussi, des anneaux. Encore faudrait-il le vérifier et surtout pouvoir les observer pour les comparer à ceux du système solaire.

J'aimerais bien participer à ces nouvelles aventures, mais elles n'auront probablement pas lieu avant la fin du XXI^e siècle. Je crains de ne jamais écrire le récit de ces nouveaux voyages. En attendant, nous devons nous contenter de dessins d'artistes et nous ne pouvons qu'imaginer le spectacle qui s'offrirait à nous si nous chevauchions un caillou dans les anneaux.



Buzz : qui a vu tomber les débris d'UARS ?

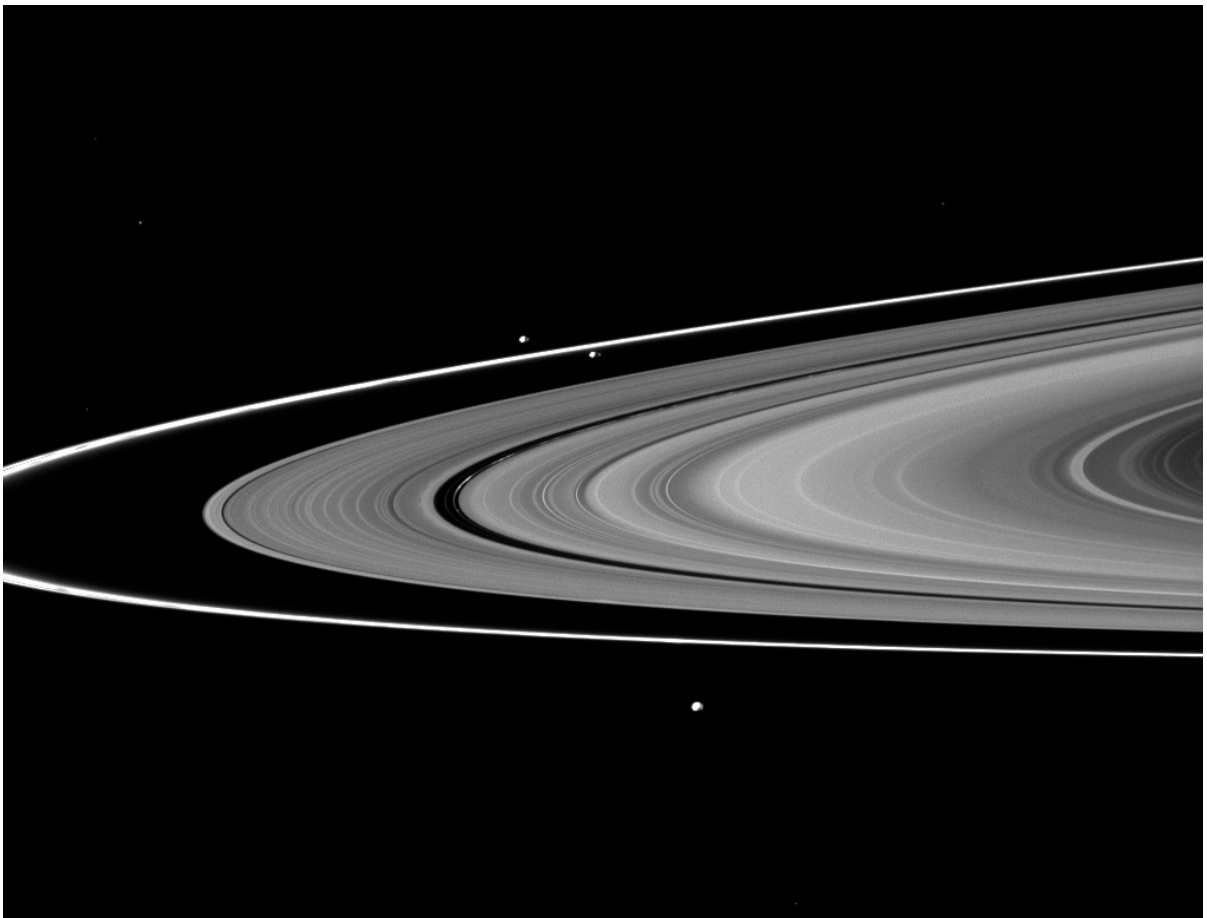
À bord de Cassini autour de Saturne avec André Brahic

<http://actualite.portail.free.fr/tech-sciences/sciences/26-09-2011/a-bord-de-cassini-autour-de-saturne-avec-andre-brahic/>

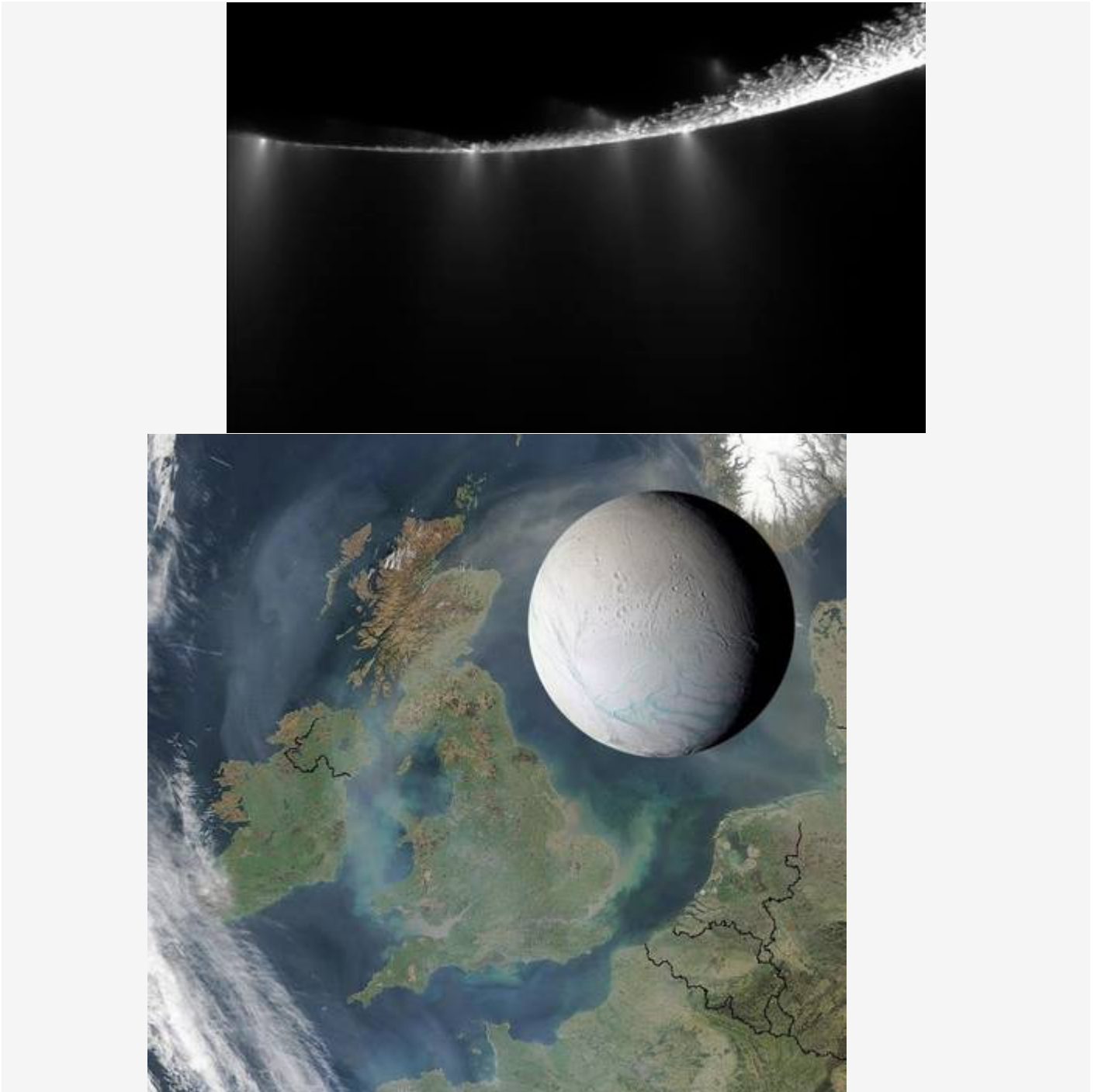


Par Futura-Sciences - Lundi 26 septembre, 13h00

- 
- 
- 



Diaporama (7 photos)



Il y a 165 ans, le 23 septembre 1846, on découvrait Neptune, c'est l'occasion de continuer notre voyage parmi les planètes ardentes en compagnie du découvreur des anneaux de Neptune, André Brahic. Quelques lunes de Saturne sont ici à l'honneur.

En juin 1980, la sonde Voyager 1 est sur le point d'arriver aux abords de Saturne. Devant le succès déjà remporté par Voyager avec l'exploration de Jupiter, André Brahic et quelques-uns de ses collègues réfléchissent déjà à la prochaine étape, c'est-à-dire la mise en orbite d'une sonde autour de Saturne après les survols de Voyager 1 et 2. Toutefois, tous ne sont pas enthousiastes, pensant que le projet est trop ambitieux et trop coûteux.

Comme il est raconté dans l'ouvrage De feu et de glace, planètes ardentes, André Brahic apostrophe ses collègues un peu frileux en leur disant : « dans la vie, il suffit de dire qu'une chose est impossible pour qu'elle le devienne ». Il faudra tout de même dix ans pour que N.A.S.A. et E.S.A. se mettent d'accord pour construire la sonde Cassini qui sera lancée en 1997. La mission elle-même aura coûté environ 4 milliards de dollars, c'est-à-dire presque aussi cher que la construction du LHC.



Les membres de l'équipe d'imagerie de la mission Cassini de gauche à droite : Joe Burns, Torrence Johnson, Alfred McEwen, Carl Murray, Bob West, Joe Veverka, Peter Thomas, André Brahic. En bas et toujours de gauche à droite : Tony DelGenio, Andy Ingersoll, Carolyn Porco, Steve Squyres, Luke Dones (manquant sur la photo : Gerhard Neukum). © N.A.S.A.-JPL

André Brahic est bien sûr sélectionné dans l'équipe d'imagerie de la mission Cassini. Il en fait toujours partie et comme la mission a été prolongée jusqu'en 2017, le chercheur compte bien travailler encore longtemps. Il milite donc pour la suppression de la retraite, comme il le déclare malicieusement dans la vidéo d'une conférence qu'il a donnée à l'École normale supérieure pour les Ernest.

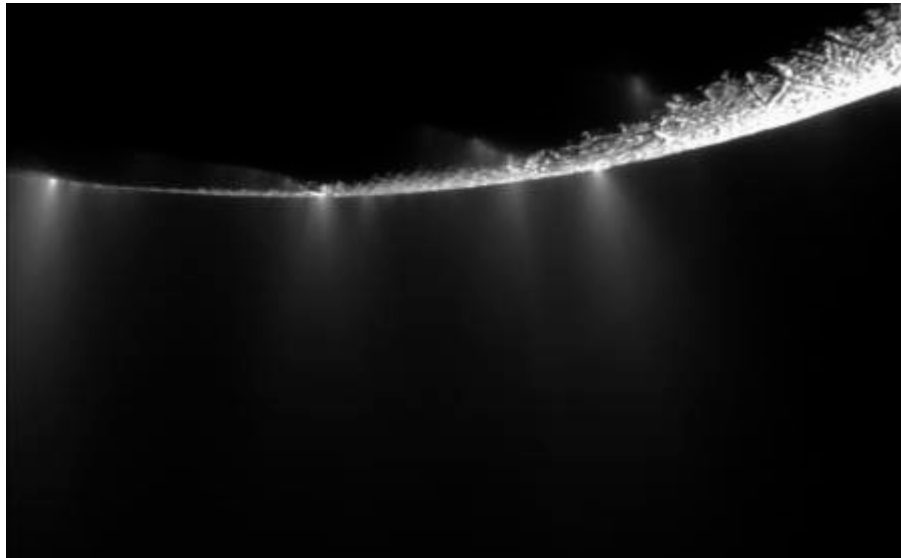
Une sonde à 1 h 30 lumière de la Terre

Pour l'heure, le chercheur continue à étudier les images en provenance de Cassini. Il s'agit d'un très lourd travail car des semaines et parfois des mois de traitement sont souvent nécessaires pour extraire l'information scientifique à partir des données brutes transmises par la sonde. Les plus belles images sont disponibles sur le site Cassini Imaging Central Laboratory for Operations (CICLOPS) de l'équipe d'imagerie de Cassini.

Prendre ces données est loin d'être une sinécure. La sonde se trouve à environ 1 h 30 lumière de la Terre et la transmission d'instructions ne suffit pas pour que la sonde exécute des opérations réglées au quart de seconde près. Il faut en effet attendre que la sonde confirme qu'elle a correctement reçu son programme à effectuer avant que les ingénieurs du JPL ne lui donnent l'ordre de le faire. Il s'écoule donc à chaque fois pas loin de 4 h 30.

Une conférence sur les anneaux de Saturne à l'École normale supérieure par André Brahic. © Les Ernest/Dailymotion

Pas loin d'1 million d'images, dont toutes ne sont pas spectaculaires, ont été prises par Cassini. On trouve les plus belles dans la section Imaging Diary du site de CICLOPS. Quand vous lisez les légendes associées, sachez que l'un des auteurs n'est autre qu'André Brahic lui-même. Ce sont d'ailleurs certaines de ces images que vous pouvez retrouver dans son livre. L'ouvrage est très à jour puisque l'on y retrouve les images de la récente collision d'astéroïdes observée par Hubble.



Des geysers s'échappant du pôle sud d'Encelade. © N.A.S.A.-JPL

Plus de soixante lunes ont été découvertes autour de Saturne. La plus grosse, Titan, possède une atmosphère d'azote comme la Terre avec une pression au sol proche de la pression atmosphérique terrestre, mais une température de - 200 °C. Des rivières de méthane coulent au milieu de la glace d'eau et alimentent des lacs de méthane. Des nuages de méthane et des pluies de méthane surmontent le paysage. L'éthane, le propane et de nombreux hydrocarbures sont aussi présents sur Titan. Mais la lune la plus étonnante, Encelade, occupe une place à part.

Les énigmatiques Encelade et Japet

Étant donnée sa petite taille, il était difficile d'imaginer que ce satellite puisse être actif. André Brahic et ses collègues ont pourtant découvert qu'un important cryovolcanisme existait sous la forme de véritables geysers au niveau du pôle sud d'Encelade. Sa surface peu cratérisée montre aussi qu'il s'agit d'un monde actif, des chercheurs comme Julie Castillo ont donc proposé des théories pour expliquer cette activité.



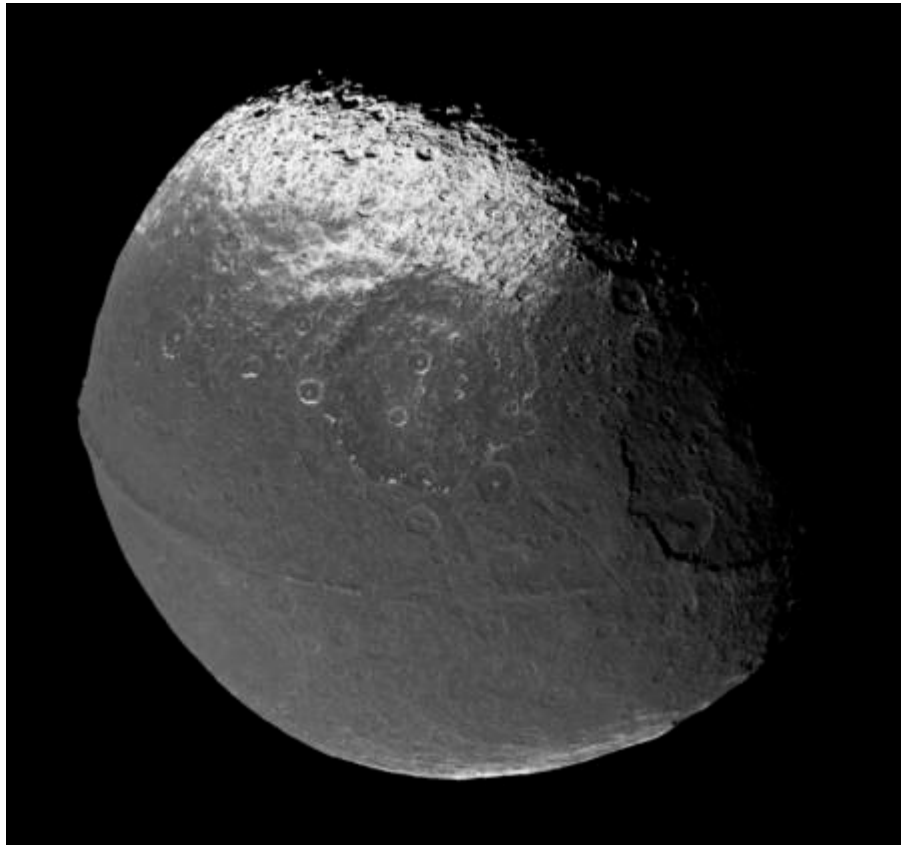
Encelade est vraiment une petite lune de Saturne comme on peut le voir sur cette image donnant l'échelle de sa taille en comparaison avec les îles britanniques. Expliquer d'où elle tire l'énergie qui la rend active n'est pas une mince affaire. © N.A.S.A.-JPL

Pour expliquer la source d'énergie d'Encelade, on fait intervenir les considérables effets de marées de Saturne, les perturbations des autres satellites, la radioactivité et la présence d'une mer souterraine composée d'eau liquide. De la vapeur d'eau s'échappe des geysers d'Encelade, mais de nombreuses molécules organiques ont aussi été détectées. Les trois composants nécessaires à la vie, à savoir de l'énergie, une chimie complexe et de l'eau liquide, sont présents sur Encelade. Cela ne signifie pas que la vie existe dans les mers souterraines, mais nous pourrions y trouver l'un des chaînons manquants entre le monde inanimé et le monde vivant. C'est pourquoi la N.A.S.A. et l'E.S.A. préparent un retour vers Europe et Encelade dans les années 2020.

Nous aurons alors une pensée pour Arthur Clarke qui a mis en scène dans son célèbre roman, 2010 : Odyssée 2, la découverte d'une forme de vie sur Europe.

Une vue de Japet, l'une des lunes les plus mystérieuses de Saturne en raison de son bourrelet équatorial et de ses deux faces, l'une blanche, l'autre sombre. © N.A.S.A.-JPL

L'autre curiosité qui vient à l'esprit après Titan et Encelade, quand on parle des lunes de Saturne, est bien évidemment Japet avec sa peau de dalmatien et son bourrelet équatorial. Plusieurs explications ont été proposées pour expliquer ces énigmes. La plus probable pour l'existence d'une face sombre et d'une face blanche, et que mentionne André Brahic dans son livre, est que le matériau noir, composé de molécules organiques, provient d'un tore de poussière qui entoure Saturne. Il ne s'agirait pas d'un dépôt de matières internes éjectées par des éruptions passées.



Une autre vue de Japet prise lors d'un survol par la sonde Cassini. Le bourrelet équatorial est bien visible. © N.A.S.A.-JPL

Les anneaux de Saturne sont en eux-mêmes passionnants, non seulement en raison de leur beauté, mais aussi par la richesse et la variété des phénomènes qu'ils exhibent. Les autres planètes géantes sont elles aussi pourvues d'anneaux riches et variés. Avec la mission Cassini, les anneaux de Saturne sont devenus d'extraordinaires laboratoires de physique permettant d'étudier de multiples problèmes afin d'essayer de mieux comprendre les processus d'accrétion, l'effet des résonances, le confinement gravitationnel, de multiples variétés d'ondes et de perturbations.

Alors que les ondes spirales des galaxies mettent des centaines de millions d'années pour effectuer une révolution, on peut suivre celles des anneaux de Saturne en quelques jours ! Ces anneaux devraient permettre de mieux comprendre les disques lointains dans l'espace (tels que les disques circumstellaires ou les galaxies) ou lointains dans le temps (comme le disque protoplanétaire qui a donné naissance à la Terre et à ses voisines).

Les arcs de matière confinée gravitationnellement de Neptune découverts en 1984 sur Terre par André Brahic à l'occasion d'une occultation d'étoile et observés ici par Voyager. © N.A.S.A.-JPL

De manière tout à fait inattendue, les processus de confinement gravitationnel des arcs de Neptune et de Saturne nous ont conduits à un autre problème de physique. Les arcs planétaires sont confinés par les interactions gravitationnelles de petits satellites voisins. Les phénomènes de résonance, les collisions et les perturbations jouent un rôle important dans ce phénomène.

Dans un contexte complètement différent, les Hommes tentent de confiner de la matière dans de forts champs magnétiques pour pouvoir démarrer des réactions de fusion et enfin résoudre le problème de l'énergie. Dans les deux cas, des équations de Fokker-Planck, du nom des physiciens qui les ont écrites, permettent de décrire les phénomènes. Ces équations n'ont pas de solution analytique et des centaines de

physiciens tentent de les résoudre au prix de multiples approximations. Voilà qui montre bien l'universalité de la physique.

Par Laurent Sacco, [Futura-Sciences](#)

[Retrouvez cet article](#) sur Futura-Sciences, le magazine de l'innovation, de la [science](#) et de la découverte

[Share on email](#)[Share on favorites](#)[Share on twitter](#)[Share on facebook](#)[Share on netvibes](#) | [More Sharing Services](#)[Partager](#)

A lire aussi sur [Futura-sciences.com](#)

- [Cassini offre de nouvelles images de Téthys, Dioné et Encelade](#)
- [En images : Encelade à bout portant](#)
- [Mission Cassini-Huygens : vers Saturne et Titan](#)
- [INTERVIEW : Retour sur la mission Huygens avec Roger-Maurice Bonnet](#)

Figure 6 Les tailles relatives des principaux satellites du système solaire.
Les plus gros satellites du système solaire sont plus gros que Mercure et Pluton et d'une taille proche de celle de Mars.

De l'astrochimie à l'astrobiologie: pour une approche méthodologique

Résumé de la prochaine conférence de Louis Le Sergeant d'Hendecourt
DR1 Institut d'Astrophysique Spatiale et Université Paris-Sud

Résumé: L'astrochimie est une discipline reconnue de l'astrophysique. L'observation de nombreuses molécules « complexes » dans de nombreux objets astronomiques permet non seulement de caractériser ceux-ci mais donne accès à des informations fondamentales sur certains processus clefs de l'astrophysique moderne : effondrement des nuages moléculaires, formation des étoiles et des disques protoplanétaires, conditions physico-chimiques de formation de planètes... L'astrobiologie n'en n'est pas au même stade : le grand éparpillement thématique lié à la complexité des phénomènes, la focalisation parfois trop spécialisée sur certains aspects secondaires et la propension à la surenchère médiatique ne favorise guère la réputation scientifique d'une discipline mal établie. Pourtant, il est un sujet que l'astrobiologie considère assez peu et qui pourtant en commande l'intérêt. Ce sujet est celui de l'origine de la vie sur la Terre, problème considéré comme « trop » complexe pour pouvoir être abordé dans son détail. Les lois physiques et chimiques qui régissent l'astrochimie sont, par essence, déterministes. Il est donc à priori possible de bâtir un scénario astrophysique qui permettrait de déboucher sur l'émergence de la vie sur Terre tout en s'appuyant sur des expériences de laboratoire. Toutefois, cette approche bute rapidement sur les lois de la complexité. Si les molécules interstellaires observées dans l'espace par la radioastronomie sont indéniablement compliquées, elles ne peuvent pas être qualifiées de complexes ni même issues de processus complexes (un adjectif dont la signification est singulièrement galvaudée). Pour tourner cette difficulté qui apparaît dès que la complexité moléculaire s'installe, je proposerai une approche systémique du problème et montrerai que l'emploi d'expériences non dirigées (des simulations), aussi appelée parfois « chimie systémique » peut permettre une réelle avancée du problème concernant la chimie prébiotique, dans un cadre issu de l'astrophysique tout en respectant la thermodynamique et l'approche physico-chimique. J'explicitierai ensuite quels sont les obstacles épistémologiques qui s'opposent à la transition de l'inanimé au vivant.

Des briques de la vie primitive découvertes dans une comète artificielle

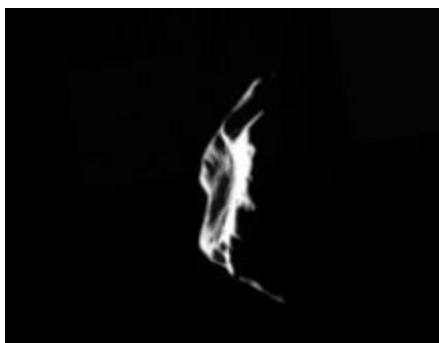
Date : 14 mars 2012

[Retour à la liste](#)



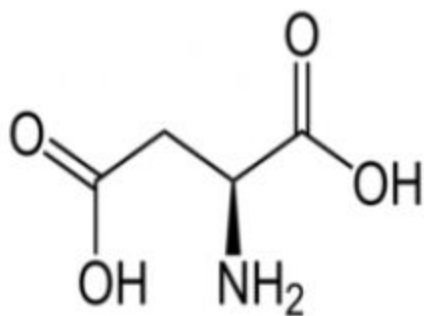
Voilà une idée qui ravira les auteurs de science-fiction : nous aurions peut-être tous une origine extraterrestre. En effet, les premières molécules de la vie se formeraient naturellement dans les comètes, selon des travaux menés par une équipe franco-allemande (1), publiés dans la version en ligne de la revue ChemPlusChem. Après avoir fabriqué une comète artificielle, les chercheurs ont analysé ses composants avec une technique unique au monde. Et il est apparu pour la première fois que les comètes pourraient renfermer des molécules qui constituaient la matière génétique primitive.

Première étape : fabriquer une comète artificielle



Ces analyses s'inscrivent dans le cadre de la grande mission spatiale européenne "Rosetta". Ce programme a pour objectif de faire atterrir en 2015 une sonde sur la comète Tchourioumov-Guerassimenko afin d'étudier la composition de son noyau. Pour essayer d'anticiper les résultats de Rosetta, les scientifiques ont imaginé fabriquer **une comète artificielle**, ou "glace interstellaire/cométaire simulée", et analyser ses constituants. L'équipe de Louis Le Sergeant d'Hendecourt s'est chargée de fabriquer une micro-comète. Dans des conditions extrêmes semblables à celles de l'espace (-200°C et sous vide), les chercheurs ont condensé, sur un morceau solide de fluorure de magnésium (MgF₂), des composés existant dans le milieu interstellaire (des molécules d'eau, d'ammoniac (NH₃) et de méthanol (CH₃OH)). Ils ont ensuite irradié le tout avec un rayonnement ultraviolet. Au bout de dix jours, ils ont obtenu quelques précieux microgrammes (millionièmes de gramme) de **matière organique artificielle**.

De nombreux acides aminés ont été identifiés



Cette matière organique interstellaire simulée a été ensuite analysée par l'équipe d'Uwe Meierhenrich et de Cornelia Meinert. Cela, avec une technologie très performante : un chromatographe multidimensionnel en phase gaz. Cet appareil permet de détecter dix fois plus de molécules dans un échantillon qu'un chromatographe traditionnel dit monodimensionnel.

Grâce à leur technologie, les chimistes ont pu identifier **vingt-six acides aminés** (les "briques" de base qui constituent les protéines) dans la comète artificielle - là où les précédentes expériences internationales avaient trouvé seulement trois acides aminés. Plus important, ils ont aussi découvert ce que personne n'avait observé avant eux : **six acides diaminés**, des molécules formées de deux groupes amines (-NH₂) et non d'un seul comme les acides aminés classiques. Parmi ces molécules, la N-(2-Aminoethyl)glycine. Un nom barbare mais un résultat révolutionnaire ! Car ce dernier composé pourrait être **un des constituants majeurs de l'ancêtre de l'ADN terrestre** : la molécule d'acide peptidique nucléique (APN).

Primordiaux, ces résultats indiquent que les premières structures moléculaires de la vie auraient pu se former dans le milieu interstellaire et cométaire, avant d'atterrir sur la Terre primitive lors de la chute de météorites et de comètes.

L'étape suivante : déterminer les conditions de pression, de température, de pH, etc., dans lesquelles la N-(2-Aminoethyl)glycine a pu ensuite former de l'APN. Pour mener à bien ce nouveau projet, les chercheurs ont déjà commencé à constituer une collaboration avec deux grandes équipes, l'une américaine et l'autre, anglaise.

Notes :

(1) L'équipe franco-allemande comprend les groupes d'Uwe Meierhenrich et de Cornelia Meinert de l'Institut de chimie de Nice (Université Nice Sophia Antipolis/CNRS), et de Louis Le Sergeant d'Hendecourt de l'Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/Université Paris-Sud)

Sources :

N-(2-Aminoethyl)glycine and Amino Acids in Interstellar Ice Analogues ; Cornelia Meinert, Jean-Jacques Filippi, Pierre de Marcellus, Louis le Sergeant d'Hendecourt, and Uwe J. Meierhenrich.
[ChemPlusChem, online le 29 février 2012.](#)

Des briques moléculaires de la vie primitive découvertes dans une comète artificielle, [communiqué de presse du CNRS.](#)

Pour en savoir plus :

[2016 - 2023 : Retour sur Terre d'échantillons d'astéroïde primitif](#), article science.gouv, le 7 juillet 2011

[Quand Rosetta rencontre Lutetia](#), article science.gouv.fr, le 9 juillet 2010

Le site de l'[Agence spatiale européenne sur Rosetta](#) (en anglais)

Conférence filmée de Marie Christine Maurel, [sur l'origine de la vie](#), le 8 juin 2009, Canal-U

Conférence filmée, intitulée "[La vie : origine et distribution possible dans l'univers](#)", présentée par André Brack, le 2 janvier 2000, Canal-U

Crédits iconographiques :

Comète Hale-Bopp, par kevin dooley, licence CC BY-SA 2.0

Photographie de l'astéroïde Lutétia, prise par la sonde Rosetta lors de son voyage vers la comète Tchourioumov-Guerassimenko, crédit ESA 2010 MPS for OSIRIS Team

MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA

Représentation de l'acide aminé, l'acide aspartique, par NEUROtiker, œuvre du domaine public

(Cécile Pinault pour Science.gouv)