

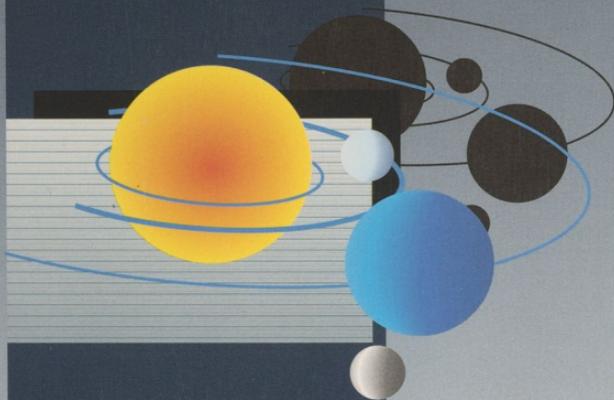
№ V
58710

La Terre et l'Univers

Sciences de l'Univers

L. Bottinelli
A. Brahic
L. Gougenheim
J. Ripert
J. Sert

*Collection
Synapses*



H HACHETTE
Éducation

2-01C

1739282 85 ve
52

La Terre et l'Univers

Sciences de l'Univers

AVANT-PROPOS

L. BOTTINELLI

Professeur à l'Université Paris-Sud

A. BRAHIC

Professeur à l'Université Paris-VII

L. GOUGUENHEIM

Professeur à l'Université Paris-Sud

J. RIPERT

Professeur de Sciences physiques au lycée Clément Marot de Cahors

J. SERT

Professeur de Mathématiques au lycée Georges Leygues de Villeneuve-sur-Lot

4°V
58740



HACHETTE
Éducation

Couverture : Fractale
Maquette : Médiamax
Composition et mise en page : SG Production
Dessins : R. Picard

© HACHETTE LIVRE 1993, 79, boulevard Saint-Germain F 75006 Paris.
I.S.B.N. 2.01.134966.4

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (Alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille 75006 Paris), constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.





AVANT-PROPOS

L'astronomie, science de l'Univers, est un champ disciplinaire, qui a sa propre problématique et utilise les acquis des autres sciences (Physique, Chimie, Mathématique,...) comme outils. On peut l'enseigner de cette façon, en présentant les problèmes spécifiques qu'elle se pose et résout. Elle offre aussi de nombreux exemples de situations qui permettent d'illustrer des lois physiques et de souligner leur universalité : l'Univers est un splendide laboratoire, considérablement plus riche et plus varié que nos laboratoires terrestres.

Les nouveaux programmes des classes de Seconde et de Première scientifique l'abordent de ces deux façons complémentaires. Ceux des sciences de la Terre situent la Terre dans son environnement, en la comparant aux autres planètes du système solaire et en traitant de ses relations au Soleil, sa principale source d'énergie. Ils donnent au concept d'évolution un éclairage particulier : l'évolution de la planète Terre entretient avec le monde du vivant des relations complexes, dont l'intérêt ne se limite pas à la compréhension de la Vie en général et de celle de l'Homme en particulier, parce qu'il y a aussi une évolution des planètes, indépendante du monde du vivant.

De leur côté, les programmes de physique font référence à des situations astronomiques pour illustrer, par exemple, les changements de référentiels, la lumière, la couleur et l'analyse spectrale, ou encore l'énergie thermonucléaire.

Les thèmes astronomiques se trouvent donc éclatés entre deux disciplines de l'enseignement, ce qui permet aux élèves de bénéficier de la richesse de cette approche pluridisciplinaire, mais peut présenter une certaine difficulté pour les enseignants, en particulier naturalistes, mais peut-être aussi physiciens, amenés à entrer dans ce champ souvent nouveau pour eux, et à bien connaître les frontières du domaine propre à chacun. Cet ouvrage s'efforce de répondre à leur attente.

Ses auteurs sont convaincus de la richesse du champ que couvrent les sciences de l'Univers, de l'intérêt qu'elles suscitent chez les jeunes et du rôle moteur que peut jouer la motivation chez un élève pour l'amener à consentir l'effort que nécessite tout apprentissage. Notre objectif est de développer chez eux le goût et la pratique de la

démarche expérimentale. S'opposant à la tendance actuelle de notre société, amplifiée par les médias, à procéder par affirmation, à l'utilisation générale qui est faite de l'argument d'autorité, l'enseignement scientifique nous semble avoir pour objectif premier, avant de former les futurs spécialistes d'une discipline, où même de susciter les nécessaires vocations, d'apprendre à tous la démarche scientifique dans ce qu'elle a à la fois d'imaginatif et de rationnel, son va-et-vient entre l'observation ou l'expérience et la théorisation, à apprécier le degré de certitude d'une connaissance, la nécessité d'utiliser un outil élaboré qu'est le formalisme mathématique, sans pour autant que son emploi ne masque la forêt des phénomènes que l'on veut comprendre.

L'ouvrage s'inspire de ces principes. Il s'organise autour des thèmes retenus dans les programmes ; il présente donc les principales propriétés des astres du système solaire ainsi que la place occupée par la Terre, considérée comme une planète parmi d'autres, et ses relations avec le Soleil. Le formalisme y est volontairement limité ; les aspects plus techniques font l'objet de développements spécifiques, bien identifiés, dont il est possible de faire l'économie ; on suggère des thèmes d'activités pratiques, que l'enseignant pourra développer à sa guise, en se reportant éventuellement à des ouvrages plus spécialisés.

Engagés depuis de nombreuses années dans des actions de formation continue d'enseignants, lors de stages académiques ou d'Universités d'été, nous voudrions que passe dans la pratique enseignante ce même climat d'enthousiasme, de liberté et de collaboration entre disciplines que nous avons connu dans ces activités.

Les sciences de l'Univers sont l'objet de découvertes spectaculaires, largement engrangées, en particulier, dans la seconde moitié de notre siècle, et qui modifient notre vision du monde en général, et de la Terre en particulier. Tout « honnête homme » devrait avoir la possibilité d'accéder à ces connaissances ; nous avons la conviction que c'est d'abord à l'enseignant que revient le rôle de les diffuser, en les expliquant et en les replaçant dans le contexte de connaissances plus générales, parce qu'elle doit rendre le futur adulte capable de comprendre le monde qui l'entoure et d'agir de façon responsable.

C'est notre vœu que cet ouvrage contribue à éveiller chez les élèves la joie de comprendre, qui reste liée pour nous à l'éducation et aux enseignants en particulier.

Lucienne Gouguenheim

Septembre 1993.

AVANT-PROPOS	3
--------------------	---

**PREMIER CHAPITRE :
LA TERRE
DANS LE SYSTÈME SOLAIRE**

A. BRAHIC

1 . PRÉSENTATION DU SYSTÈME SOLAIRE	9
. Planètes géantes et planètes telluriques	11
. De quoi sont faites les planètes ?	13
. Quelques propriétés essentielles : la masse, la taille et la densité	15
. Les planètes	16
. Les satellites	22
. Les comètes	30
. Les astéroïdes	32
. Les météorites	33
. Les poussières et le milieu interplanétaire	34
. Les anneaux	34
2 . LA FORMATION ET L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE	39
. Les premières théories	39
. Les difficultés	40
. Un scénario	40
3 . LA TERRE ET LE SYSTÈME SOLAIRE	43
. La planète Terre	43
. La machine Terre	44
. Voyage vers l'intérieur de la Terre et des planètes	46
. Le volcanisme	52
. La cratérisation	56
. Les marées	57
. L'atmosphère	59
. L'eau	67
. L'exploration doit continuer	68

EXERCICES

1. Peindre la Lune	69
2. Les couleurs	69
3. Les montagnes, les planètes et les hommes	70
4. Les journaux	73

**DEUXIÈME CHAPITRE :
LES MOUVEMENTS DE LA TERRE,
DE LA LUNE ET DES PLANÈTES**

L. GOUGUENHEIM - J. RIPLEY - J. SERRE

1 . LES MOUVEMENTS DE LA TERRE	77
. Le rayon de la Terre	77
. Le mouvement diurne et le mouvement annuel de la Terre	78
. Le jour solaire	78
. Les saisons	80
. L'inégalité de la durée du jour et de la nuit	81
. L'inégalité de la durée des saisons	81
. Conséquences climatiques	82
2 . LES MOUVEMENTS DES PLANÈTES	83
. L'observation des planètes depuis la Terre	83
. Phases et conditions d'observation des planètes inférieures	83
. Phases et conditions d'observation des planètes supérieures	85
. Mouvements de rétrogradation	85
. Les distances relatives des planètes	86
3 . ÉVOLUTION DES CLIMATS ET ASTRONOMIE	87
. Le Soleil : son évolution et son activité	87
. Les éléments orbitaux de la Terre et leur variation	88
. Variation des éléments orbitaux	88
. La longitude du périhélie	89
. Interprétation des variations climatiques	89
4 . DU GÉOCENTRISME À L'HÉLIOCENTRISME	91
. Les premiers astronomes	91
. La révolution copernicienne	92
. Tycho Brahé	93
. Johannes Képler	93
. Galilée	95
5 . LES CALENDRIERS	97
. Les grands cycles naturels	97
. Les solutions empiriques	98
. Premiers pas dans la rigueur : les Grecs	99
. Les solutions actuelles	100
. Conclusion	101

ACTIVITÉS

- . Période de rotation de la Terre 103
- . Mesure de la hauteur du Soleil 106
- . Jour solaire - jour stellaire 108
- . Utilisations possibles du calendrier des postes ... 109
- . Orbite de Mercure 111
- . Mouvements rétrogrades des planètes 113
- . Vénus : conditions d'observation,
diamètre apparent, phases 116
- . Jour et année sur Mercure 118
- . Jupiter et ses satellites 120
- . Les calendriers 123

EXERCICES

- Du géocentrisme à l'héliocentrisme** 124
1. Troisième loi de Képler 124
 2. Orbite de Mars 124
 3. Excentricité de l'orbite terrestre 124
 4. Vitesse des étoiles 125

TROISIÈME CHAPITRE :

LE SOLEIL ET LES ÉTOILES

L. BOTTINELLI - J. SERRE - J. RIPERT

1. **DESCRIPTION DU SOLEIL** 129
 - . La photosphère solaire 129
 - . Les oscillations solaires 129
 - . La chromosphère et la couronne 130
 - . L'activité solaire 130
 - . Les caractéristiques du Soleil 131
 - . Origine de l'énergie du Soleil 131
2. **LA LUMIÈRE, SOURCE D'INFORMATION SUR LE SOLEIL ET LES ÉTOILES** 133
 - . L'observation des étoiles 133
 - . Classification des étoiles et diagramme de Hertzsprung-Russel 134
 - . Évolution du Soleil et des étoiles 135
3. **ORIGINE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES** 139
 - . La fin de l'évolution des étoiles 139
 - . Les résidus de l'évolution stellaire : naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs 140
 - . Les éléments chimiques du système solaire 142

4. **LA VIE DANS L'UNIVERS** 143
 - . Les conditions de la vie 143
 - . L'origine de la vie sur Terre 144
 - . Les zones propices à la vie au voisinage d'une étoile 145
 - . Combien de systèmes planétaires ? 145
 - . Probabilité d'existence de civilisations techniquement avancées 146
 - . Comment communiquer ?
Le projet Seti 146

ACTIVITÉS

- . Période de rotation propre du Soleil 149
- . Détermination de la vitesse radiale à partir d'un spectre 153
- . Exemple de classification spectrale d'étoiles 156
- . Analyse du spectre de Markab (α Pégase) 159
- . Roemer et la vitesse de la lumière 161

EXERCICES

- La vie dans l'Univers** 164
1. Énergie solaire reçue sur Vénus et sur Terre
 2. Vitesse d'évasion sur Terre et sur Mars
 3. Flux d'énergie reçue sur une planète
 4. Calcul de fréquences
 5. Centre de masse du système Soleil-Jupiter

Les caractéristiques du Soleil 166

1. Le rayon du Soleil
2. La masse du Soleil
3. La luminosité du Soleil
4. La température superficielle du Soleil

L'origine de l'énergie du Soleil 168

1. Énergie libérée par le Soleil depuis sa formation
2. Durée de vie dans le cas d'un combustible classique
3. Durée de vie dans le cas d'une origine gravitationnelle
4. Rendement de la transformation de protons en noyaux d'Hélium
5. Durée de vie dans le cas d'une origine thermonucléaire
6. Taux de transformation de la masse en énergie dans le Soleil

L'expression de distances en unité de lumière 170

1. Les unités de longueur exprimées en unité de lumière
2. Les distances moyennes des planètes au Soleil
3. Variation de la distance Terre-Soleil
4. La nébuleuse du Crabe
5. Échos de lumière et vitesses apparentes superluminiques

BIBLIOGRAPHIE 174

I

LA TERRE DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

A. BRAHIC

LA SECONDE MOITIÉ du XX^e siècle sera probablement considérée dans le futur comme une époque aussi importante dans l'histoire de l'humanité que celle de la découverte des Amériques et des grands voyages des XV^e et des XVI^e siècles. En quelques décades, nous venons de vivre l'âge d'or de l'exploration du système solaire.

C'est un tournant dans l'histoire de nos connaissances : en moins d'une génération, nous en avons plus appris sur les planètes qu'au cours des quarante siècles qui ont précédé. Les hommes ont maintenant marché sur la Lune et rapporté des cailloux sur place, mesuré ses vents et constaté l'absence de vie. Des sondes automatiques se sont posées sur Vénus, d'autres ont percé ses nuages et révélé des détails de sa surface. La comète de Halley, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et leurs environnements ont reçu la visite d'engins fabriqués par l'Homme.

Une telle exploration, menée de pair avec une recherche vigoureuse et l'utilisation de nouvelles techniques d'observation à partir de la Terre, a fourni une moisson de découvertes fondamentales et a eu un impact immédiat sur la pensée scientifique. Elle nous a fait prendre conscience que la Terre était une planète parmi les autres et nous a montré que le système solaire était beaucoup plus riche que prévu. On peut même dire que sa caractéristique essentielle est la **diversité** des corps célestes qu'il contient et des phénomènes physiques qui s'y déroulent. De plus, les retombées socio-économiques de cette exploration devraient se multiplier à l'avenir. Certains sourient aujourd'hui à l'idée d'exploiter les matières premières de la Lune ou des astéroïdes, comme d'autres traitaient d'utopistes ceux qui, il y a moins d'un siècle, imaginaient qu'on pourrait un jour échapper à l'attraction terrestre. Pourtant, nous vivons le prélude d'une grande aventure : au cours des siècles prochains, des hommes quitteront la Terre pour explorer et exploiter les mondes voisins !

Une des grandes leçons de l'exploration du système solaire, et plus généralement de l'étude de l'Univers, est la prise de conscience du fait que tous les objets célestes évoluent ! L'évolution n'est pas le propre de l'Homme. Des êtres vivants aux planètes, des étoiles aux galaxies, **tous les objets de l'Univers évoluent !** L'évolution des corps célestes a lieu indépendamment des hommes.

Il est souvent difficile de nous représenter notre Terre comme une planète ordinaire. Et pourtant, en termes de position et de taille, notre Terre est vraiment commune, elle est soumise aux mêmes mécanismes physiques qui ont formé et font évoluer les autres corps du système solaire. Un des grands progrès de l'aventure spatiale est d'avoir

fait comprendre aux hommes les relations étroites entre les planètes et de les avoir conduit à entreprendre une étude comparée des corps du système solaire. Les autres planètes et satellites ont en effet beaucoup à nous apprendre sur la Terre de la même manière que l'étude de la Terre doit nous permettre de mieux comprendre les autres corps du système solaire. Par exemple, Vénus a la même masse et les mêmes dimensions que la Terre, mais tourne beaucoup moins vite et ne possède pas d'eau liquide à sa surface : la météorologie y est donc plus facile que sur Terre. L'atmosphère de Titan est, comme celle de la Terre, composée essentiellement d'azote et la pression au sol est la même que sur Terre ; en revanche elle est beaucoup plus froide. Les volcans de Mars sont plus gros que ceux de la Terre, et ceux d'Io sont plus actifs. On pourrait multiplier les exemples à l'infini. Pour mieux connaître la Terre, on ne peut pas, comme le physicien dans son laboratoire, faire des expériences sur les objets étudiés. Il est impossible et il n'est surtout absolument pas souhaitable de faire la moindre expérience sur la Terre : de la chauffer, de la déformer,... Il suffit en fait de comparer son comportement à celui d'un corps plus gros ou plus petit, plus dense ou moins dense, ou encore de composition chimique différente...

Des tâtonnements primitifs et de l'époque où les planètes étaient bien mystérieuses pour les hommes, il subsiste des croyances qui nous paraissent bien ridicules comme l'astrologie, les histoires de « soucoupes volantes » ou des textes parascientifiques. De ce passé maintenant révolu, il subsiste quelques escrocs qui exploitent la crédulité humaine. Il est évident que la position des planètes au moment de la naissance d'un individu n'a strictement aucune influence sur son futur et on peut s'en féliciter. De la même manière, les milliers d'astronomes qui scrutent le ciel depuis des siècles en utilisant des techniques de plus en plus sophistiquées n'ont jamais vu le moindre débarquement « d'extra-terrestres ».

La prise de conscience « écologique » de notre planète Terre est un des progrès du XX^e siècle. Il faut toutefois raison garder. L'Homme n'est pas responsable de tous les désagréments que nous rencontrons sur notre planète. L'évolution de la Terre dans son ensemble, si elle est marquée par la présence de la vie, a lieu indépendamment des hommes. Pour l'instant, les phénomènes naturels (volcans, tremblements de terre, raz de marées, cyclones,...) ont une puissance bien supérieure aux créations de l'Homme. Il faut simplement prendre garde à ne pas jouer les "apprentis sorciers". Seule la connaissance scientifique et l'étude rationnelle de tous les phénomènes qui permettent de comprendre l'évolution de la Terre et des planètes nous feront progresser. Toute autre attitude serait une régression !

Le progrès des connaissances, les retombées pratiques et une certaine vision du monde et du futur de l'humanité devraient nous encourager à poursuivre activement cette exploration et surtout à enseigner les résultats à un maximum d'élèves et d'étudiants. On peut espérer que la prise de conscience du fait que la Terre est une « machine » qui forme un tout encouragera les hommes à se comporter plus raisonnablement, à être plus ouverts, à comprendre que beaucoup de problèmes doivent être abordés et traités à l'échelle de la planète et à éviter tout comportement égoïste, égocentrique et tout repliement sur soi.

PRÉSENTATION DU SYSTÈME SOLAIRE

1

Contrairement à ce que l'on croyait au XIX^e siècle, les planètes ne se déplacent pas dans le vide autour du Soleil. Le Soleil éjecte en permanence des particules de haute énergie et les comètes et les astéroïdes perdent sans cesse des molécules, des atomes, des poussières,... L'espace entre les planètes est donc rempli de noyaux d'atomes, d'électrons, de grains, de poussières,... En plus des planètes et des satellites, les anneaux des planètes, les comètes, les astéroïdes et des milliards de petits corps complètent l'inventaire des objets du système solaire.

Il est impossible de rendre compte en quelques pages de toutes les découvertes récentes et de la diversité des planètes et satellites du système solaire. Nous nous contenterons de mettre en évidence quelques faits marquants.

Les propriétés physiques et le mouvement des corps du système solaire ne sont pas le fruit du hasard, mais sont une conséquence naturelle des lois de la physique. Par exemple, là où il fait chaud, près du Soleil, on trouve des éléments réfractaires et des densités élevées ; là où il fait froid, loin du Soleil, les glaces et les éléments volatils prédominent, les densités sont moins élevées. Les planètes et les gros satellites sont de forme sphérique, les

petits corps (astéroïdes, comètes, petits satellites) ont une faible gravité et sont en revanche de forme irrégulière.

Notre système solaire n'occupe qu'une place modeste dans l'Univers. Une façon commode de représenter les distances dans l'Univers est de tracer six cercles (Fig. 2) qui représentent respectivement le couple Terre-Lune (la géophysique), le système solaire (la planétologie), les étoiles proches (la physique stellaire), la Galaxie (la physique galactique), les galaxies (le monde extra-galactique) et l'Univers observé (la cosmologie). On passe de l'un à l'autre en réduisant leur taille respectivement par un facteur 10 000, 10 000, 10 000, 10 000, 40 et 5 000.

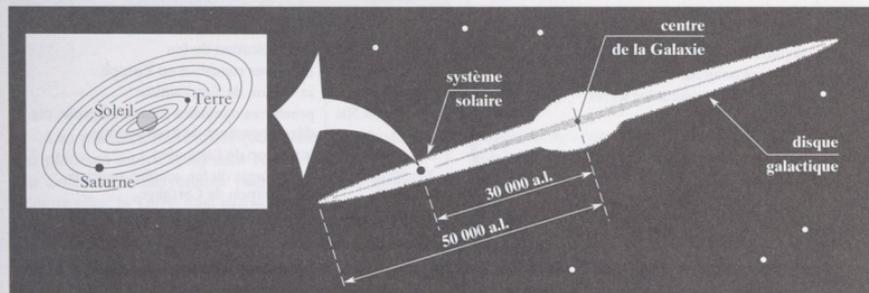


Fig. 1 : La place du système solaire dans la Galaxie. Notre Galaxie est un disque plat avec un renflement en son centre. Son diamètre est de l'ordre de 100 000 années-lumière. Elle est composée d'environ cent milliards d'étoiles, mais aussi de gaz, de poussières et de rayons cosmiques (particules de haute énergie qui sillonnent la Galaxie). Le Soleil et son cortège de planètes sont situés dans les régions périphériques à environ 30 000 années lumière du centre. Le système solaire a quelques heures-lumière de dimension alors que l'étoile la plus proche est à plus de quatre années-lumière.

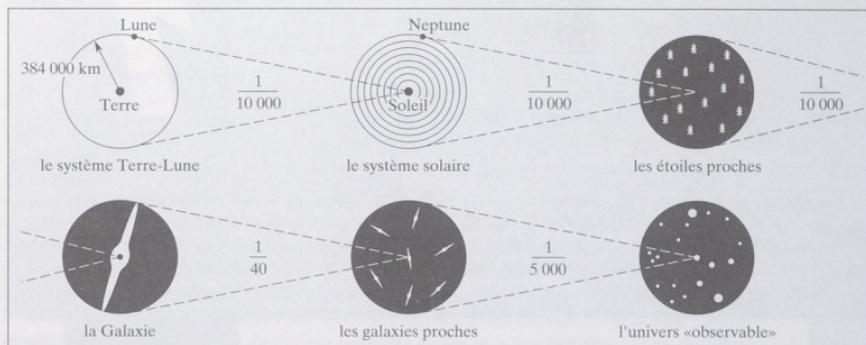


Fig. 2 : Les distances dans l'Univers.

avant le mois de décembre	
dates	événements
1 ^{er} janvier	début de l'expansion de l'Univers (big-bang)
1 ^{er} avril	formation de la Galaxie
9 septembre	formation du système solaire
14 septembre	formation de la Terre
25 septembre	apparition de la vie sur Terre
2 octobre	formation des plus vieilles roches connues sur Terre
9 octobre	bactéries fossiles et algues fossiles les plus anciennes
1 ^{er} novembre	invention du sexe (par les micro-organismes)
12 novembre	plantes fossiles les plus anciennes effectuant la photosynthèse
15 novembre	les premières cellules avec des noyaux prospèrent

décembre	
dates	événements
1 ^{er}	Oxygène dans l'atmosphère terrestre
5	volcanisme intense sur Mars
16	premiers vers
17	les invertébrés prospèrent
18	apparition du plancton océanique
19	premiers poissons et premiers vertébrés
20	les plantes colonisent les terres
21	premiers insectes
22	premiers amphibiens
23	premiers reptiles
24	premiers dinosaures
25	rien à signaler
26	premiers mammifères
27	premiers oiseaux
28	extinction des dinosaures
29	premiers cétacés et premiers primates
30	grands mammifères

31 décembre	
heures	événements
22h 30min 00s	premiers hommes
23h 46min 00s	domestication du feu
23h 59min 00s	peintures rupestres en Europe
23h 59min 20s	invention de l'agriculture
23h 59min 50s	premières dynasties (Sumer, Égypte, etc.), développement de l'astronomie
23h 59min 51s	invention de l'alphabet
23h 59min 54s	métallurgie du fer, empire assyrien et fondation de Carthage
23h 59min 56s	empire romain, géométrie d'Euclide, physique d'Archimède, astronomie de Ptolémée
23h 59min 58s	civilisation Maya, empire byzantin, invasions mongoles, croisades
23h 59min 59s	la Renaissance en Europe

Tableau 1 : Le « calendrier universel ». Représentons, sur une année fictive, l'histoire de l'Univers en imaginant que le Big-Bang a eu lieu le 1^{er} janvier et que nous sommes actuellement le 31 décembre à minuit. L'apparition de l'Homme sur Terre a eu lieu il y a moins d'une heure et demi.

PLANÈTES GÉANTES ET PLANÈTES TELLURIQUES

On peut distinguer deux catégories de planètes : les planètes telluriques (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) et les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune).

Les planètes géantes ou planètes extérieures sont éloignées du Soleil, de grande taille (Jupiter et Saturne ont plus de 60 000 kilomètres de rayon) et de faible densité (0,7 pour Saturne et un peu plus de 1 pour les autres). Ce sont d'immenses boules de gaz dont la densité, la pression et la température augmentent de l'extérieur vers l'intérieur. Elles ne possèdent pas de surface solide. La plus grosse d'entre elles, Jupiter, est environ mille fois moins massive que le Soleil et environ mille fois plus massive que la Terre. Situées entre 750 millions et 4,5 milliards de

kilomètres du Soleil, ces planètes mettent entre 12 et 165 ans pour effectuer une révolution autour du Soleil. Elles tournent sur elles mêmes en 10 heures (pour Jupiter et Saturne) ou en 17 heures (pour Uranus et Neptune). Pluton, la dernière planète non encore visitée, s'apparente, par ses caractéristiques physiques, à un satellite tel que Triton.

Les planètes géantes ont, en première approximation, une composition proche de celle du Soleil et de la nébuleuse primitive. Elles sont à 99 % composées d'Hydrogène et d'Hélium. Elles sont toutes entourées d'anneaux. Elles possèdent toutes un système complet de satellites : plus de soixante gravitent autour de ces planètes, près de trente ont été découverts au cours de ces quinze dernières années. Ces satellites sont des corps célestes à part entière qui se distinguent par une grande diversité et possèdent chacun leur géologie propre et même parfois leur météorologie.

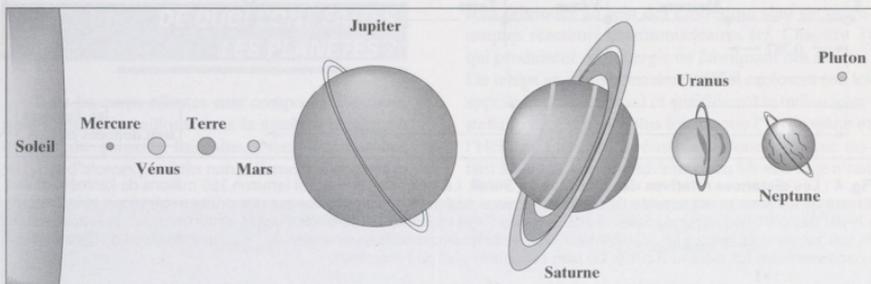


Fig. 3 : Tailles relatives des planètes. Sur ce schéma, les tailles relatives du Soleil et des neuf planètes connues sont respectées. Le diamètre du Soleil est environ dix fois supérieur à celui de Jupiter qui est lui-même environ dix fois plus grand que celui de la Terre (cf. tableau VI).

Les planètes telluriques (ou planètes terrestres ou planètes intérieures) sont relativement proches du Soleil et relativement petites. La plus grosse d'entre elles, la Terre, a un rayon de 6 378 kilomètres ; elle est environ dix fois plus petite que Jupiter et plus de cent fois plus petite que le Soleil. Ces planètes terrestres ont toutes une croûte solide à la surface et contiennent des roches. Elles ne possèdent pas d'anneaux. Elles ne possèdent pratiquement pas de satellites (aucun pour Mercure et Vénus, un pour la Terre et deux pour Mars). Elles ne contiennent pratiquement pas d'Hydrogène et d'Hélium, elles sont

assez denses (une densité proche de 4 pour Mars et un peu supérieure à 5 pour les autres). Ce sont plutôt les satellites des planètes géantes qui pourraient être comparés, par leur taille et leur structure, aux planètes terrestres.

Cette répartition entre planètes internes et planètes géantes est simple à expliquer. Les planètes géantes, qui ont été formées dans les parties les plus froides de la nébuleuse primitive, ont conservé, contrairement aux planètes terrestres, tous les gaz légers et toutes les glaces présents initialement. 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.

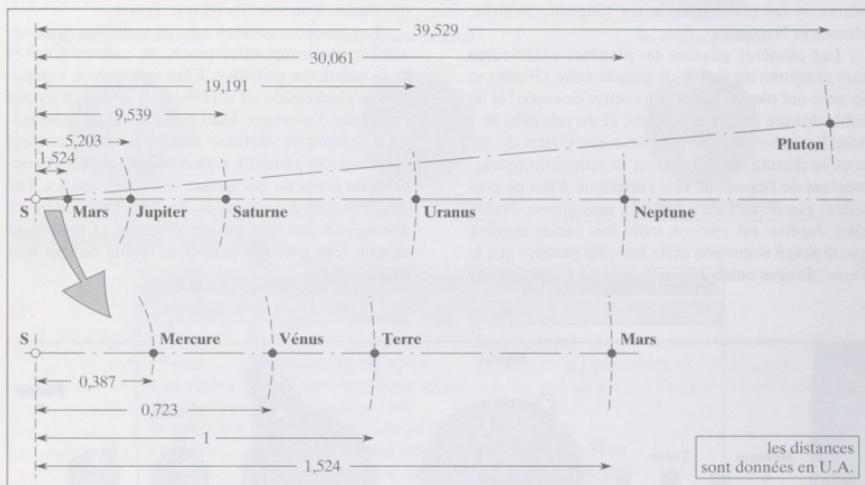


Fig. 4 : Les distances relatives des planètes au Soleil. La distance Terre-Soleil (environ 150 millions de kilomètres) sert d'unité de distance et est appelée l'unité astronomique (U.A.). Pluton se déplace sur une orbite excentrique et inclinée de 17° par rapport à l'équateur du Soleil. Sa distance au Soleil varie entre 29,6 et 49,4 unités astronomiques. À l'exception de Pluton, toutes les planètes se déplacent sur une orbite quasi-circulaire dans le plan de l'équateur du Soleil ou dans son voisinage immédiat (cf. tableau II p.13). Ce plan est appelé plan de l'écliptique.

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 et les planètes se sont donc agglomérées à partir de matériau contenant très peu d'Hydrogène et d'Hélium. En revanche, loin du Soleil, il fait plus froid (de 30 à 120 kelvins), la composition des planètes est proche de celle de la nébuleuse primitive qui est l'ancêtre commun du Soleil et des planètes. L'Hydrogène et l'Hélium, qui sont les éléments les plus abondants dans l'Univers, dominent.

Les planètes telluriques étaient donc initialement déficientes en Hydrogène et en Hélium ; elles ont 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. Si on plaçait une planète géante (par exemple Saturne)

près du Soleil (par exemple à la même distance que Mercure), la température de l'atmosphère augmenterait, la vitesse d'agitation de l'Hydrogène et de l'Hélium dépasserait la vitesse d'évasion. Ces éléments s'évaderaient et il ne resterait plus qu'un « noyau » de quelques masses terrestres. On comprend donc bien pourquoi la composition des planètes géantes et telluriques est si différente. On comprend aussi pourquoi la Terre est tellement moins massive que Jupiter puisque 99 % de la matière de l'Univers sont composés d'Hydrogène et d'Hélium et puisque les planètes terrestres ont été formées à partir de résidus de la nébuleuse primitive alors que 99 % de la matière étaient déjà partis. De ce point de vue, on peut considérer que les planètes terrestres sont des débris ! Nous aimons pourtant beaucoup le troisième débris en partant du Soleil, là où nous habitons.

nom	distance moyenne au Soleil		période sidérale (en années terrestres)	période synodique (en jours terrestres)	vitesse orbitale moyenne (en km.s ⁻¹)	excentricité	inclinaison sur l'écliptique
	(en unités astronomiques)	(en millions de km)					
Mercury	0,387	57,9	0,24084	115,9	47,89	0,2056	7° 00' 26"
Vénus	0,723	108,2	0,61515	583,9	35,03	0,0068	3° 23' 40"
Terre	1	149,6	1,00004	-	29,79	0,0167	0° 00' 14"
Mars	1,524	227,9	1,8809	779,9	24,13	0,0934	1° 51' 09"
Jupiter	5,203	778,3	11,862	398,9	13,06	0,0483	1° 18' 28"
Saturne	9,539	1 427,0	29,457	378,1	9,64	0,0560	2° 29' 17"
Uranus	19,191	2 871,0	84,07	369,7	6,81	0,0461	0° 48' 26"
Neptune	30,061	4 497,1	164,81	367,5	5,43	0,0100	1° 46' 27"
Pluton	39,529	5 913,5	248,53	366,7	4,74	0,2484	17° 09' 03"

Tableau II : Caractéristiques orbitales des planètes. La période sidérale est la période de révolution d'une planète par rapport à un repère lié aux étoiles. La période synodique est la période de révolution d'une planète par rapport à un repère lié à la Terre.

DE QUOI SONT FAITES LES PLANÈTES ?

Tous les corps célestes sont composés d'atomes, qu'il s'agisse de cailloux dans le système solaire ou d'amas de galaxies lointains. Nous connaissons 90 types d'atomes produits naturellement. Ces atomes

sont fabriqués au sein des étoiles qui sont de gigantesques réacteurs thermonucléaires (cf. Chapitre 3) qui produisent de l'énergie en fabriquant des atomes. De temps en temps, certaines étoiles explosent (on les appelle des supernovae) et enrichissent le milieu interstellaire en éléments plus lourds que l'Hydrogène et l'Hélium. Les étoiles réussissent donc à chaque instant à faire ce que les alchimistes du Moyen-Âge n'ont

élément	symbole	numéro atomique	nombre d'atomes pour un million d'atomes d'Hydrogène	élément	symbole	numéro atomique	nombre d'atomes pour un million d'atomes d'Hydrogène
Hydrogène	H	1	1 000 000	Sodium	Na	11	2
Hélium	He	2	80 000	Nickel	Ni	28	2
Oxygène	O	8	740	Chrome	Cr	24	0,5
Carbone	C	6	450	Phosphore	P	15	0,5
Néon	Ne	18	130	Manganèse	Mn	25	0,4
Azote	N	7	92	Chlore	Cl	17	0,2
Magnésium	Mg	12	40	Potassium	K	19	0,2
Silicium	Si	14	37	Titane	Ti	22	0,1
Fer	Fe	26	32	Cobalt	Co	27	0,1
Soufre	S	16	19	Zinc	Zn	30	0,05
Argon	Ar	18	4	Fluor	F	9	0,03
Aluminium	Al	13	3	Cuivre	Cu	29	0,02
Calcium	Ca	20	2	tous les autres			< 10⁻²

Tableau III : Abondances cosmiques. Les 25 éléments les plus communs dans le système solaire sont ici représentés par ordre décroissant d'abondance.

jamais pu réaliser : convertir un élément en un autre !

L'Hydrogène et l'Hélium, les deux éléments les plus simples de l'Univers, ont été fabriqués les premiers aux tout débuts de l'expansion de l'Univers, il y a environ 15 milliards d'années. L'âge de notre Galaxie est estimé à environ 12 milliards d'années. Plusieurs générations d'étoiles se sont succédé et ont fabriqué des éléments plus lourds que l'Hydrogène et l'Hélium. Au moment de la naissance du Soleil et de son cortège de planètes, il y a 4,5 milliards d'années, environ 1% du matériau disponible était composé d'atomes plus lourds que l'Hydrogène et l'Hélium.

Les atomes se rassemblent sous forme de molécules (l'eau, le gaz carbonique, l'alcool ou le quartz sont des exemples de molécules qui nous sont familières). Selon la température et la pression, la matière est à l'état solide, liquide ou gazeux. L'état liquide est le plus rare puisqu'il requiert un domaine restreint de température. Par exemple, à la pression atmosphérique, l'eau n'est liquide que dans un intervalle de température de 100 °C et l'ammoniaque n'est liquide qu'entre -78 °C et -33 °C.

Les philosophes grecs de l'Antiquité ont divisé la matière en quatre « catégories » : la terre, l'air, l'eau et le feu. Nous venons de voir que la matière est composée en fait de 90 éléments ; il est cependant commode de reprendre cette classification en quatre types en changeant bien entendu les « catégories ». Quatre états sont en effet communs dans le système solaire : les plasmas, les gaz, les glaces et les roches.

Les plasmas – C'est une forme qui nous est peu familière sur Terre, sauf dans les laboratoires des physiciens. Un plasma est un gaz dans lequel les atomes et les molécules ont perdu des électrons. Il est donc composé de noyaux et d'électrons libres. On dit qu'il est ionisé. Un plasma interagit avec les champs électrique et magnétique environnants et avec d'autres plasmas.

L'environnement de la Terre, appelé la magnétosphère, est un plasma. Il en est de même de la queue d'une comète. Le Soleil expulse en permanence des atomes, des particules électrisées, des électrons, des noyaux d'atomes. Tout ceci constitue un plasma dans lequel baignent les planètes qui tournent autour du Soleil. On peut considérer que le milieu interplanétaire est un plasma.

Les gaz – L'atmosphère d'une planète est un exemple typique de gaz. Les scientifiques pensent que notre système solaire s'est formé à partir d'un immense nuage de gaz et de poussières dont le centre est devenu le Soleil et dont la périphérie s'est condensée en planètes. Ce nuage est appelé la nébuleuse primitive.

Les glaces – Elles sont très fréquentes dans le système solaire, surtout dans la partie extérieure là où il fait le plus froid. Différentes formes de glaces d'eau nous sont familières sur Terre : neige, givre, grêle, lacs gelés, banquise, icebergs, ... Les satellites des planètes géantes (par exemple Europe autour de Jupiter, Encelade autour de Saturne ou encore Triton autour de Neptune) ainsi que les noyaux de comètes ou les particules des anneaux de Saturne sont couverts de glaces. On retrouve à la surface de ces corps non seulement de la glace d'eau mais aussi des glaces d'autres éléments volatils. Les quatre formes de glaces les plus fréquentes aux confins du système solaire sont la glace d'eau (H₂O), d'ammoniaque (NH₃), de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂).

Les roches – Ce sont des composés formés de minéraux. L'élément Silicium joue un rôle important. La principale différence entre une roche et un minéral est son homogénéité. Un minéral est formé d'une seule substance tandis qu'une roche peut être faite de plusieurs minéraux. Les transformations ont été si nombreuses sur Terre que très peu d'éléments sont à l'état pur. L'Or ou l'Argent sont des exemples de minéraux composés d'un seul élément. Leur rareté en fait leur prix. Le Carbone, sous forme de graphite ou de diamant, de même que le Soufre ou le Cuivre à l'état pur sont aussi très rares sur Terre. Les minéraux composés de molécules simples sont beaucoup plus communs.

Les roches sont classées en fonction des minéraux qu'elles contiennent. Le quartz (SiO₂), l'hématite (Fe₂O₃), la pyrite de fer (FeS₂) et la calcite (CaCO₃) sont quatre exemples des quatre types de minéraux les plus communs sur Terre, soit respectivement les silicates, les oxydes, les sulfites et les carbonates.

Les roches sont aussi classées en fonction de leur origine. On distingue alors trois grandes catégories : Les **roches ignées** sont obtenues directement par refroidissement d'un magma en fusion. Les roches ramassées sur les pentes d'un volcan sont des basaltes représentatifs des roches ignées. Deux tiers de la croûte terrestre sont formés de roches ignées.

Les **roches sédimentaires** proviennent de l'agglomération de fragments d'autres roches cassées par l'érosion.

Les **roches métamorphiques** sont produites à partir de roches ignées ou sédimentaires qui ont été enterrées à de grandes profondeurs sous la surface terrestre, modifiées par les hautes pressions et températures rencontrées et qui sont remontées à la surface. Ce processus cyclique de montée et de descente des roches correspond au mouvement des plaques continentales terrestres. À notre connaissance, les autres

planètes ne présentent pas de tectonique des plaques ; la Terre est donc probablement le seul endroit où des roches métamorphiques se trouvent à la surface.

On peut imaginer un quatrième type de roche : les **roches primitives**. De telles roches n'ont jamais été en fusion et n'ont subi que très peu de modifications depuis la formation du système solaire. Elles se trouvent dans les météorites qui tombent sur la Terre ; aucune roche de ce type n'a été conservée sur Terre depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années. Les roches les plus vieilles trouvées sur Terre ont un âge de l'ordre de 3,8 milliards d'années. Cela indique que la Terre primitive était très chaude et que de nombreux processus géologiques se sont développés à la surface grâce à l'énergie thermique disponible. À l'exception des météorites qui viennent d'ailleurs et dont seulement quelques milliers ont été retrouvées à la surface de la Terre, les roches terrestres sont le résultat d'une succession de transformations. Grâce à une activité géologique et une érosion intense, le premier milliard d'années de notre histoire géologique a été effacé sur Terre. Pour sonder cette période, nous devons nous rendre en d'autres endroits comme la Lune, Mars ou encore les astéroïdes, là où les conditions initiales ont été beaucoup moins altérées.

Chaque planète est un ensemble de roches, de métal, de glaces et de gaz. Certaines sont très différentes de la Terre, d'autres lui ressemblent beaucoup.

QUELQUES PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES : LA MASSE, LA TAILLE ET LA DENSITÉ

Les différences entre les planètes s'expliquent essentiellement par leurs masses différentes. Pour une planète, comme pour une étoile ou un satellite, c'est avant tout la masse qui détermine les conditions physiques au centre, donc le flux de chaleur dégagé et finalement l'évolution et l'état des couches extérieures. D'autres paramètres telles la densité ou la composition chimique jouent également un rôle, mais à un degré moindre.

La mesure de la densité permet d'obtenir d'excellentes informations sur la composition chimique avant même de se livrer à une analyse spectroscopique détaillée ou de se rendre sur place grâce aux sondes spatiales.

La masse d'une planète est mesurée avec beaucoup de précision en observant le mouvement de ses satellites naturels ou artificiels et en appliquant la

troisième loi de Képler. D'après cette loi, le carré de la période orbitale est proportionnel au cube de la distance à la planète (plus précisément au demi-grand axe de l'ellipse trajectoire). Le coefficient de proportionnalité ne dépend que de la masse de la planète, si on suppose que la masse du satellite est négligeable devant celle de la planète :

$$T^2 = 4 \pi^2 / GM,$$

où G est la constante de la gravitation et M la masse de la planète. Connaissant sa distance à la Terre et mesurant son diamètre apparent, on calcule aisément la taille d'un corps céleste. En divisant la masse par le volume, on obtient la densité moyenne.

La densité est simplement une mesure de la quantité de masse contenue dans un volume donné. Par exemple, l'eau a une densité de 1 (correspondant à un gramme par cm^3 ou encore à une tonne par m^3) et la glace d'eau, qui flotte sur l'eau, a une densité de 0,92. Un morceau de bois de pin a une densité de 0,5 et une roche volcanique poreuse de 0,7. Tous les deux flottent encore mieux sur l'eau. Les roches usuelles ont sur Terre une densité de l'ordre de 2,5 à 3,5. Un métal comme le plomb a une densité de 11 et l'or une densité de 19.

La mesure précise de l'orbite d'un satellite naturel ou artificiel autour d'une planète, ou bien de la déviation de trajectoire d'une sonde spatiale quand elle survole une planète, permet d'estimer son champ gravitationnel. Par ailleurs, l'étude théorique de modèles de planètes composés de couches concentriques de densités différentes permet de calculer le champ gravitationnel de ces modèles. La comparaison des modèles et des observations permet, par itération, d'estimer la densité des différentes couches qui composent l'intérieur d'un corps céleste.

La mesure de la densité moyenne d'une planète fournit des indications importantes sur sa composition chimique. Par exemple, on peut s'attendre à ce qu'une planète comme la Terre soit au moins aussi dense que les roches que l'on trouve à sa surface. En fait, la densité moyenne de notre planète est pratiquement deux fois plus grande et ceci pour deux raisons : d'une part, le noyau central de la Terre est composé de fer et de nickel, beaucoup plus denses que les roches et, d'autre part, ce noyau est très fortement comprimé par le poids des couches situées au-dessus. En conséquence, la densité moyenne de la Terre est de 5,5. On peut s'attendre à ce qu'une planète de même composition, mais moins massive, soit moins comprimée au centre et donc moins dense. L'inverse sera vrai pour une planète plus massive. Tout comportement différent témoigne de compositions chimiques différentes.

élément et substance	densité	planète	densité	(voir légende)
Or	19			↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓
Mercure	13,6			
Plomb	11			
Acier	7,8			
		Mercury	5,3 *	
Pyrite	5			
		Vénus	4,4 *	
		Terre	4,4 *	
		Mars	3,8 *	
Diamant	3,5			
		Lune	3,3	
Quartz	2,6			
		Pluton	2,2	
		Neptune	1,5	
		Jupiter	1,3	
		Uranus	1,2	
Eau	1			
Pierre ponce	0,7			
		Saturne	0,7	
Bois	0,5			
Charbon de bois	0,35			
Liège	0,2			

↓ flotte dans le mercure

↑ s'enfonce dans l'eau ↓ flotte sur l'eau

* : la densité des planètes telluriques a été corrigée des effets de compression

Tableau IV : Densités de différentes substances et des planètes.

La lecture des tableaux IV et V montre que l'on peut distinguer quatre catégories de corps : les planètes telluriques, les planètes géantes, Pluton et les satellites, les petits corps (astéroïdes et comètes). La planète Mars, plus petite que la Terre, a une partie centrale moins comprimée et donc une densité moindre. En revanche, la planète Mercure, aussi dense que la Terre, a une composition chimique différente : elle possède, relativement à sa taille, un énorme noyau de fer et de nickel, beaucoup plus gros que celui de la Terre. Au contraire, les planètes géantes sont beaucoup plus grosses que les planètes

terrestres et moins denses. Elles ne peuvent donc pas être faites de roches et de métal ; elles sont essentiellement composées des deux éléments les plus légers : l'Hydrogène et l'Hélium. Leur composition est, en première approximation, proche de celle du Soleil et des étoiles. Pluton, qui a une taille semblable à celle de la Lune, possède une densité deux fois moindre, estimée à 2,2. Ceci suggère qu'au moins la moitié de sa masse est sous forme de glace d'eau.

nom	densité	composition
Mercury	5,4	Fer, Nickel, silicates
Vénus	5,3	silicates, Fer, Nickel
Terre	5,5	silicates, Fer, Nickel
Lune	3,3	silicates
Mars	3,9	silicates, Fer, Soufre
Jupiter	1,3	Hydrogène, Hélium
Callisto	1,9	glace d'eau, silicates
Ganymède	1,9	glace d'eau, silicates
Europe	3,0	silicates, glace d'eau
Io	3,4	silicates
Saturne	0,7	Hydrogène, Hélium
Titan	1,8	glace d'eau, silicates
Uranus	1,2	glaces, Hydrogène, Hélium
Neptune	1,7	glaces, Hydrogène, Hélium
Triton	2,0	glace d'eau, silicates
Pluton	2,2	glace d'eau, silicates

Tableau V : Densité et composition chimique des planètes et des principaux satellites.

LES PLANÈTES

Six planètes sont connues depuis les temps les plus reculés : la Terre sur laquelle nous vivons et les cinq visibles à l'œil nu : 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. Seule Pluton ne sera approchée qu'au XXI^e siècle.

Pour l'instant, nous ne savons pas s'il existe d'autres planètes dans le système solaire. Toutes les recherches d'objets se déplaçant lentement par rapport aux étoiles se sont révélées infructueuses,

Lucette BOTTINELLI est professeur à l'Université Paris-Sud et astrophysicienne à l'Observatoire de Paris. Spécialiste de Radioastronomie, elle est connue pour ses travaux sur les galaxies et l'échelle des distances extragalactiques.

Elle a écrit plusieurs ouvrages de vulgarisation et d'intérêt pédagogique; elle anime de nombreuses actions de formation d'enseignants, dans le cadre académique ou national, et participe à la création d'une formation en Astronomie-Astrophysique par le Centre National d'Études à Distance.

André BRAHIC est professeur à l'Université Paris VII. Il dirige l'Équipe Universitaire de Recherche et d'Observation en Planétologie et en Astrophysique (E.U.R.O.P.A.) à l'Observatoire de Paris. Spécialiste des anneaux planétaires, il a découvert avec deux autres collègues, en 1984 et en 1985, les anneaux de Neptune. Il est membre de l'équipe imagerie de la sonde américano-européenne, qui doit explorer le monde de Saturne entre 2004 et 2007, et président du Programme National de Planétologie. Expert auprès de la N.A.S.A., de l'Agence Spatiale Européenne, du Centre National d'Études Spatiales, du C.N.R.S. et du ministère de l'Éducation nationale, il fut l'un des scientifiques européens associés à la mission Voyager qui a exploré les planètes géantes entre 1979 et 1989.

Lucienne GOUGUENHEIM est professeur à l'Université Paris-Sud et astrophysicienne à l'Observatoire de Paris. Elle est spécialiste de l'étude des galaxies et de la cosmologie. Elle possède une riche expérience de l'enseignement de l'Astronomie en France et aux États-Unis; elle préside actuellement la Commission de l'Union Astronomique internationale spécialisée dans les problèmes d'enseignement. Elle a contribué à la création du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes (CLEA) dont elle est la présidente, ainsi qu'à celle du groupe de recherche pédagogique du CLEA.

Jean RIPERT est professeur de Physique en lycée. Membre du conseil du CLEA et d'un groupe de recherche pédagogique, il a élaboré de nombreux documents. Il participe à l'organisation et à l'animation de stages MAPFEN et d'Universités d'Été en Physique et en Astronomie.

Josée SERT est professeur de Mathématiques en lycée. Elle enseigne l'Astronomie dans les classes de terminales littéraires et a animé un club d'Astronomie.

Membre du groupe de recherche pédagogique du CLEA, elle a élaboré plusieurs documents. Elle participe à l'organisation et à l'animation de stages MAPFEN et d'Universités d'Été en Astronomie.



9 782011 349668

BIBLIOTHEQUE NATIONALE DE FRANCE



3 7502 00086981 0

Imprimé en France
par ALICIA - Bayonne

13/4966/1



Participant d'une démarche de transmission de fictions ou de savoirs rendus difficiles d'accès par le temps, cette édition numérique redonne vie à une œuvre existant jusqu'alors uniquement sur un support imprimé, conformément à la loi n° 2012-287 du 1^{er} mars 2012 relative à l'exploitation des Livres Indisponibles du XX^e siècle.

Cette édition numérique a été réalisée à partir d'un support physique parfois ancien conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal. Elle peut donc reproduire, au-delà du texte lui-même, des éléments propres à l'exemplaire qui a servi à la numérisation.

Cette édition numérique a été fabriquée par la société FeniXX au format PDF.

La couverture reproduit celle du livre original conservé au sein des collections de la Bibliothèque nationale de France, notamment au titre du dépôt légal.

*

La société FeniXX diffuse cette édition numérique en accord avec l'éditeur du livre original, qui dispose d'une licence exclusive confiée par la Sofia – Société Française des Intérêts des Auteurs de l'Écrit – dans le cadre de la loi n° 2012-287 du 1^{er} mars 2012.

Avec le soutien du

