

# 50

CLÉS POUR COMPRENDRE L'  
**ASTRONOMIE**

JOANNE  
BAKER

Traduit de l'anglais par Julien Bambaggi

DUNOD

# Table des matières

## Introduction 3

- 01 Les planètes 4
- 02 Héliocentrisme 8
- 03 Les lois de Kepler 12
- 04 La gravitation de Newton 16
- 05 L'optique de Newton 20
- 06 Lunette et télescope 24
- 07 Raies de Fraunhofer 28
- 08 L'effet Doppler 32
- 09 Parallaxe 36
- 10 Le Grand Débat 40
- 11 Le paradoxe d'Olbers 44
- 12 La loi de Hubble 48
- 13 Échelle des distances cosmiques 52
- 14 Le Big Bang 56
- 15 Fond diffus cosmologique 60
- 16 Big Bang et nucléosynthèse 64
- 17 Antimatière 68
- 18 Matière noire 72
- 19 L'inflation cosmique 76
- 20 La constante cosmologique 80
- 21 Le principe de Mach 84
- 22 La Relativité restreinte 88
- 23 La Relativité générale 92
- 24 Trous noirs 96
- 25 Astrophysique des particules 100
- 26 La « particule de Dieu » 104

- 27 La théorie des cordes 108
- 28 Le principe anthropique 112
- 29 La séquence de Hubble 116
- 30 Amas galactiques 120
- 31 Structure à grande échelle 124
- 32 Radioastronomie 128
- 33 Quasars 132
- 34 Fond cosmique de rayons X 136
- 35 Trous noirs supermassifs 140
- 36 Évolution galactique 144
- 37 Lentilles gravitationnelles 148
- 38 Classer les étoiles 152
- 39 Évolution stellaire 156
- 40 Naissances d'étoiles 160
- 41 Morts d'étoiles 164
- 42 Pulsars 168
- 43 Susauts gamma 172
- 44 Variabilité 176
- 45 Le Soleil 180
- 46 Exoplanètes 184
- 47 Formation du système solaire 188
- 48 Lunes 192
- 49 Exobiologie 196
- 50 Le paradoxe de Fermi 200

Glossaire 204

Index 206

# Introduction

L'astronomie est l'une des sciences les plus anciennes et les plus profondes. Depuis la traque du mouvement du Soleil et des étoiles par nos ancêtres, les connaissances que nous avons acquises ont radicalement modifié la perception de la place de l'Homme dans l'Univers. Chaque avancée a eu des répercussions sociales. Au <sup>xvii</sup>e siècle, Galilée fut arrêté pour avoir affirmé que la Terre tournait autour du Soleil. Les preuves du fait que notre système solaire est éloigné du centre de la Voie lactée ont provoqué pareils sursauts d'incrédulité. Et Edwin Hubble, dans les années 1920, a clos le débat en découvrant que la Voie lactée n'est qu'une des milliards de galaxies dispersées dans un vaste univers en expansion, vieux de 14 milliards d'années.

Au cours du <sup>xx</sup>e siècle, les techniques ont accéléré le rythme des découvertes. Le siècle débuta avec des avancées dans notre connaissance des étoiles et de la fusion nucléaire dont elles sont le siège, parallèlement à nos découvertes sur l'énergie nucléaire et le rayonnement et à la construction de la bombe atomique. Pendant la Deuxième Guerre mondiale et les années qui ont suivi, il y eut le développement de la radioastronomie, l'identification des pulsars, des quasars et des trous noirs. De nouvelles fenêtres sur l'Univers s'ouvrirent d'un coup, depuis le rayonnement micro-onde du fond diffus cosmologique jusqu'aux rayons X et gamma, chaque bande de fréquences étudiée apportant ses propres découvertes.

Ce livre est un voyage dans le monde de l'astronomie et de l'astrophysique à partir des perspectives ouvertes par la recherche moderne. Les premières sections décrivent les grands sauts dans notre connaissance des échelles de l'Univers, cependant qu'ils introduisent les bases, depuis la gravité jusqu'au fonctionnement des lunettes et télescopes. Le groupe suivant de sections s'interroge sur ce que nous avons appris en cosmologie, l'étude de l'Univers comme un tout : ses différentes parties, son histoire et son évolution. On introduit ensuite les aspects théoriques de notre approche de l'Univers, entre autres la Relativité, les trous noirs et les multivers. Les dernières sections regardent en détail ce que nous savons des galaxies, des étoiles et du système solaire, depuis les quasars et l'évolution des galaxies jusqu'aux exoplanètes et à l'astrobiologie. Le rythme des découvertes reste rapide : peut-être les prochaines décennies nous verront-elles témoins du prochain renversement de paradigme – la découverte de la vie en dehors de la Terre.

# 01 Les planètes

**Combien de planètes compte le système solaire ? Il y a quelques années, chacun pouvait facilement répondre : neuf. Ce n'est plus si simple ! Les astronomes ont tout chamboulé en découvrant dans la froideur glacée des confins du système solaire des corps rocheux soutenant la comparaison avec Pluton ainsi que des centaines de planètes tournant autour d'étoiles lointaines. Contraints d'en redéfinir le concept, ils préconisent désormais de décompter dans notre système solaire huit planètes dignes de ce nom et quelques planètes naines comme Pluton.**

Les planètes – nous le savons depuis la Préhistoire – sont différentes des étoiles. Leur nom vient du Grec « errant » : elles se déplacent dans le ciel nocturne tandis que les étoiles en forment l'immuable toile de fond. Nuit après nuit, les étoiles constituent les mêmes motifs : leurs constellations tournent ensemble lentement autour des pôles Nord et Sud, chaque étoile gravant son cercle dans le firmament. Mais les positions des planètes par rapport aux étoiles se déplacent légèrement chaque jour, poursuivant à travers ciel une trajectoire inclinée dans un plan appelé écliptique. Tandis que les planètes tournent autour du Soleil, leur mouvement se fait dans le même plan dont la projection dans le ciel forme un trait.

Les principales planètes autres que la Terre sont connues depuis des millénaires : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. On peut facilement les voir à l'œil nu. Elles occultent souvent les étoiles voisines et leurs mouvements contraires leur confèrent un statut mythique, encore grandi par l'arrivée des télescopes au XVII<sup>e</sup> siècle : Saturne est entourée d'élégants anneaux, Jupiter s'enorgueillit d'une ribambelle de lunes tandis que la surface de Mars est striée de canaux sombres.

**La planète X** Ces certitudes célestes ont été bousculées par la découverte, en 1781, de la planète Uranus par l'astronome britannique William Herschel. Plus pâle et se déplaçant plus lentement que les autres planètes connues, on

## chronologie

**350 av. J.-C.**

Aristote établit que la Terre est ronde

**1543**

Copernic publie sa théorie héliocentrique

**1610**

Galilée observe à la lunette les satellites de Jupiter

**1781**

William Herschel découvre Uranus

la croyait jusqu'alors étoile solitaire. C'est la quête méticuleuse de Herschel qui a définitivement prouvé qu'elle tournait autour du Soleil, lui conférant ainsi son statut de planète. Herschel se reposa sur la gloire que cette découverte lui avait apportée, allant jusqu'à rechercher les faveurs du roi George III dont le nom servit, pendant une courte période, à désigner la nouvelle planète.

D'autres découvertes allaient venir. De légères perturbations dans l'orbite d'Uranus laissaient penser qu'elles étaient dues à la présence, au-delà, d'un autre corps céleste. Plusieurs astronomes traquèrent l'intrus vagabond dans la direction attendue : en 1846, Neptune fut découverte par le Français Urbain Jean Joseph Le Verrier qui coiffait au poteau l'astronome britannique John Couch Adams.

Puis, en 1930, ce fut l'existence de Pluton qui fut corroborée. Comme pour Neptune, de petits écarts dans les mouvements attendus des planètes périphériques suggéraient la présence d'un corps situé au-delà – on l'appela la planète X. Aux États-Unis, Clyde Tombaugh, du Lowell Observatory, le repéra en comparant des photographies du ciel prises à différents moments : c'est par son mouvement que la planète s'est révélée. Mais c'est à une écolière qu'il appartient de lui donner un nom. Venetia Burney, d'Oxford au Royaume-Uni, remporta le concours lancé à cette fin en proposant un nom d'inspiration classique : Pluton, le dieu des Enfers. La planète Pluton a joué un grand rôle dans l'imagerie populaire, depuis le chien de la bande dessinée (Pluton se dit Pluto en anglais) jusqu'au récent plutonium.

**Pluton déchu** Notre système solaire à neuf planètes a tenu bon 75 ans, jusqu'à ce que Michael Brown et son équipe du Caltech découvrent que Pluton n'était pas seule. Aux confins glacés du système solaire, ils ont trouvé quelques objets

## La définition d'une planète

Une planète est un corps céleste qui :

- (a) est en orbite autour du Soleil ;
- (b) a une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et lui donne une forme presque sphérique ;
- (c) a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche.

« Comme les continents, les planètes sont davantage définies par notre façon de les voir que par une assertion énoncée après coup. »

Michael Brown, 2006

### 1843-1846

Adams et Le Verrier découvrent Neptune, dont l'existence était prédite

### 1930

Clyde Tombaugh découvre Pluton

### 1962

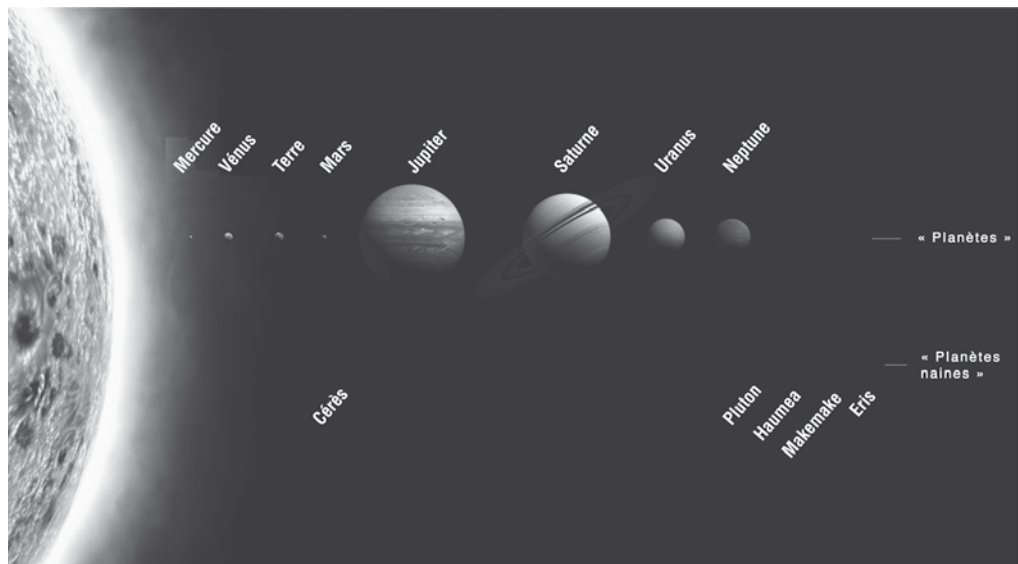
Les premières images de Vénus par la sonde Mariner 2 montrent la surface d'une autre planète

### 1992

Découverte de la première planète extrasolaire

### 2005

Michael Brown découvre Éris



d'assez belle taille, l'un d'entre eux étant même plus gros que Pluton lui-même. Ils l'ont appelé Éris. Une question se posait à la communauté scientifique : la découverte de Brown devait-elle être considérée comme une dixième planète ?

Et que dire des autres corps glacés proches de Pluton et Éris ? Le statut de planète de Pluton était remis en cause. Les confins du système solaire étaient jonchés d'objets recouverts de glace, Pluton et Éris n'en étant que les plus gros. De plus, on connaissait ailleurs des astéroïdes rocheux de taille semblable, dont Cérès, un astéroïde de 950 kilomètres de diamètre découvert en 1801 entre Mars et Jupiter pendant la traque de Neptune.

En 2005, une commission de l'Union astronomique internationale, l'organisation professionnelle des astronomes, se réunit pour décider du sort de Pluton.

### William Herschel (1738-1822)

Frederick William Herschel est né en Allemagne, à Hanovre, en 1738. Il émigra en Angleterre en 1757 où il gagna sa vie comme musicien. Il se prit de passion pour l'astronomie, passion qu'il partageait avec sa sœur Caroline qu'il avait fait venir en Angleterre en 1772. Les Herschel ont construit un télescope pour contempler le ciel nocturne, identifiant des centaines d'étoiles doubles et des milliers

de nébuleuses. Herschel découvrit Uranus qu'il appela « Georgium Sidum », l'étoile de George, en l'honneur du roi George III qui le fit Astronome de la cour. Parmi les autres découvertes de Herschel : la nature binaire de nombreuses étoiles doubles, les variations saisonnières des calottes polaires de Mars et les satellites d'Uranus et Saturne.

Brown et quelques autres voulaient conserver son statut à Pluton considérant qu'il était d'ordre culturel.

Selon eux, Éris devrait aussi être considérée comme une planète. Pour les autres participants, tous les corps glacés au-delà de Neptune n'étaient pas de vraies planètes. Cela fit l'objet d'un vote lors d'une assemblée générale en 2006. On décida d'une nouvelle définition d'une planète. Jusque-là, il ne s'agissait pas d'un concept précis. Certains étaient perplexes, estimant que c'était comme demander, par exemple, la définition précise d'un continent : si l'Australie en est un, pourquoi pas le Groënland ? Où l'Europe finit-elle et où l'Asie commence-t-elle ? Mais les astrophysiciens ont fini par convenir d'un ensemble de règles.

Une planète est définie comme un corps céleste en orbite autour du Soleil, de masse suffisante pour que sa gravité lui donne une forme sphérique et le rende capable d'éliminer les corps voisins. D'après ces règles, Pluton n'est pas une planète parce qu'elle ne remplit pas la dernière condition. Pluton et Éris furent qualifiées de planètes naines, de même que Cérès. Les corps plus petits, en dehors des satellites, restèrent non définis.

**Au-delà du Soleil** Cette définition d'une planète était destinée à notre propre système solaire. Mais on peut l'appliquer ailleurs. Aujourd'hui, nous connaissons plusieurs centaines de planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Elles ont été repérées essentiellement par l'attraction ténue qu'elles exercent sur leur étoile hôte. La plupart de ces planètes sont de massives géantes gazeuses comme Jupiter. Mais de nouveaux engins spatiaux, tel Kepler lancé en 2009, rivalisent pour détecter autour d'autres étoiles des planètes plus petites qui pourraient ressembler à la Terre.

Une autre définition, celle d'une étoile, a elle aussi fini par être remise en cause. Les étoiles sont des boules de gaz, tel le Soleil, suffisamment grosses pour que, dans leur cœur, se soit enclenchée la fusion nucléaire. C'est là l'énergie qui fait briller les étoiles. Mais il n'est pas évident de distinguer les boules de gaz de taille planétaire, comme Jupiter, des étoiles les plus petites et les plus sombres, les naines brunes. L'espace est peut-être peuplé d'étoiles qui ne se sont pas allumées, voire de planètes à la dérive.

« Peut-être notre monde est-il l'enfer d'une autre planète. »

Aldous Huxley

l'idée clé

Les planètes sont des objets hors du commun

# 02 Héliocentrisme

**Nous savons aujourd'hui que la Terre et les planètes tournent autour du Soleil mais il fallut que les preuves s'accumulent au XVII<sup>e</sup> siècle pour que cela finisse par être admis. Notre vision du monde en a été bouleversée : les êtres humains n'étaient pas au centre de l'Univers, ce qui s'opposait aux philosophies et religions dominantes de l'époque. Le débat se poursuit sur la place de l'Homme dans le cosmos avec des arguments semblables, depuis les dogmes créationnistes jusqu'aux aspects rationnels de la cosmologie.**

Les premiers hommes ne pouvaient concevoir qu'un univers gravitant autour d'eux. Dans l'Antiquité, la Terre était placée au centre des modèles du cosmos et tout le reste en découlait. On imaginait que les corps célestes étaient plaqués sur des sphères de cristal tournant autour de la Terre. Ainsi, chaque nuit, les étoiles fixées sur elles – ou révélées par des trous minuscules – étaient entraînées dans un mouvement circulaire autour des pôles célestes nord et sud : les êtres humains étaient bien la clé des mécanismes de l'Univers.

On soupçonnait cependant que ce modèle bien commode était erroné et cela a interpellé des générations de philosophes. L'idée que les cieux se meuvent autour du Soleil plutôt que de la Terre – un modèle héliocentrique, du grec *helios*, Soleil – a été avancée par les philosophes grecs de l'Antiquité dès 270 av. J.-C. Parmi eux, Aristarque de Samos a développé cette idée dans ses écrits. Il calcula la taille relative de la Terre et du Soleil et se rendit compte que ce dernier était bien plus grand. Il paraissait plus logique de penser que c'était le plus petit des deux astres, la Terre, qui se déplaçait.

Ptolémée, au II<sup>e</sup> siècle de notre ère, se servit des mathématiques pour prédire le mouvement des étoiles et des planètes et il obtint des résultats corrects. Mais ses équations ne rendaient pas compte de configurations évidentes. La manifestation la plus curieuse était que, de temps à autre, le mouvement des planètes changeait de sens : c'est le mouvement rétrograde. Ptolémée – qui, comme d'autres avant lui, pensait que les planètes se déplaçaient sur de grandes roues

## chronologie

### 270 av. J.-C.

Les Grecs de l'Antiquité proposent un modèle héliocentrique

### II<sup>e</sup> siècle

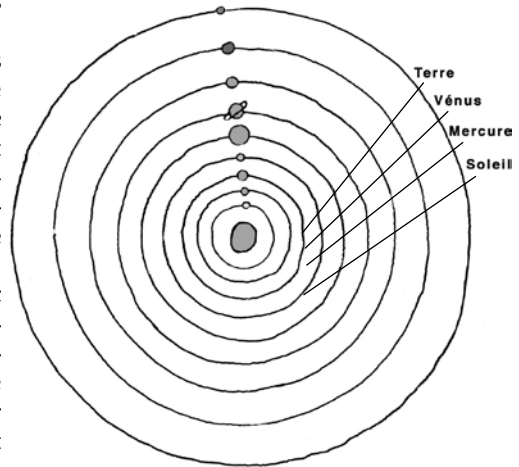
Ptolémée ajoute des épicycles pour expliquer le mouvement rétrograde des planètes



circulaires dans le ciel – conçut une explication en ajoutant de nouvelles roues dentées à leurs orbites. Il avança que les planètes se déplaçaient sur de petits anneaux tout en poursuivant leur trajectoire principale, une espèce de mécanisme d'horlogerie géant. Ce sont ces « épicycles » superposés qui faisaient que les planètes, de temps à autre, donnaient l'impression de rebrousser chemin.

Cette idée d'épicycles s'installa. Elle fut affinée par la suite. Les philosophes étaient séduits par l'idée que la nature mettait en œuvre de parfaites figures géométriques. Mais, à mesure que la précision des mesures astronomiques augmentait, les savantes combinaisons mathématiques parvenaient de moins en moins à les expliquer : les données s'étoffaient, les contradictions aussi...

**Le modèle de Copernic** Au fil des siècles, il fut question, de temps à autre, d'héliocentrisme, mais cela ne fut pas pris au sérieux. La conception géocentrique allait de soi et toute théorie alternative paraissait une vue de l'esprit. Ce ne fut donc pas avant le <sup>xvi</sup>e siècle que les conséquences de l'héliocentrisme furent entièrement développées. Dans son ouvrage de 1543 *De revolutionibus orbium cœlestium*, l'astronome polonais Nicolas Copernic décrit en détail un modèle mathématique héliocentrique, expliquant le mouvement rétrograde des planètes comme une projection vue depuis la Terre de leur mouvement autour du Soleil, la Terre étant elle-même animée d'un mouvement semblable.



« Enfin, nous pourrons mettre le Soleil lui-même au centre de l'Univers. »

Nicolas Copernic

**1543**

Copernic publie son modèle héliocentrique

**1609-1610**

Kepler représente les orbites des planètes par des ellipses ; Galilée découvre les satellites de Jupiter

**1633**

Galilée est poursuivi pour avoir professé l'héliocentrisme

### Nicolas Copernic (1473-1543)

Né à Thorn, en Pologne, Copernic reçut une formation de chanoine, suivant des cours de droit, de médecine, d'astronomie et d'astrologie. Il était fasciné par les idées de Ptolémée sur l'ordre de l'Univers tout en les critiquant et préféra élaborer son propre système dans lequel la Terre et les planètes tournent autour du Soleil. L'ouvrage de Copernic, *De revolu-*

*tionibus orbium cœlestium (De la révolution des sphères célestes)*, publié en mars 1543 – seulement deux mois avant sa mort –, a été une étape cruciale dans l'avènement d'un univers héliocentrique. Mais cela reste loin des idées de l'astronomie moderne.

Le modèle de Copernic mettait en cause la prédominance universelle des êtres humains et cela ne fut pas sans conséquences. L'Église officielle en tenait pour le système géocentrique de Ptolémée. Prudent, Copernic retarda la publication de son ouvrage jusqu'à l'année de sa mort. Ses arguments posthumes furent entendus et tranquillement mis de côté. C'est à un personnage plus enflammé qu'il revint de prendre le relais.

**Les convictions de Galilée** L'astronome italien Galileo Galilei a ostensiblement défié l'Église catholique romaine en défendant l'héliocentrisme. Sa témérité s'appuyait sur les observations qu'il avait faites à la lunette, alors construite depuis peu. Scrutant les cieux avec davantage de précision que ses prédécesseurs, il obtint la preuve que la Terre n'était pas un centre universel : des satellites gravitaient autour de Jupiter tandis que Vénus, comme la Lune, connaissait des phases. Il publia ces découvertes dans son ouvrage de 1610 *Siderus nuncius, Le Messager des étoiles*.

Fort de sa conviction héliocentrique, Galilée défendit sa thèse dans une lettre à la Grande Duchesse Christine. Il avait affirmé que c'était la rotation de la Terre qui donnait l'impression que le Soleil se déplaçait dans le ciel : aussi se retrouva-t-il convoqué à Rome. Le Vatican voulait bien admettre la validité des observations, les astronomes jésuites ayant fait les mêmes constatations à la lunette. Mais l'Église refusa la théorie de Galilée, décrétant qu'il ne s'agissait que d'une simple hypothèse qu'il ne fallait pas prendre au pied de la lettre en dépit de sa séduisante simplicité. On interdit à Galilée de professer l'héliocentrisme, excluant toute possibilité pour lui de « défendre ou enseigner » cette idée controversée.

« Déclarer hérétique le fait de croire à ce qui est prouvé est sans nul doute nocif pour les âmes. »

Galilée

**Les raisons de Kepler** À la même époque, un astronome allemand travaillait aussi sur les mathématiques du mouvement des planètes. Johannes Kepler publia son étude de la trajectoire de Mars dans son ouvrage *Astronomia nova* (1609), l'année même où Galilée monta sa lunette. Kepler découvrit que l'ellipse fournissait de l'orbite de la planète rouge autour du Soleil une meilleure description que le cercle. En se libérant des cercles parfaits, il dépassa le modèle de Copernic et améliora les prévisions du mouvement des planètes. Les idées de Kepler sont aujourd'hui considérées comme une loi élémentaire de la physique mais elles étaient très en avance sur leur temps et mirent longtemps à s'imposer. Pour sa part, Galilée les prit en considération.

Même s'il était désormais sous le coup d'un interdit, Galilée restait convaincu que son explication héliocentrique était la bonne. Le pape Urbain VIII lui demanda de rédiger un compte rendu équilibré des deux points de vue : dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Galilée irrita le pontife en manifestant sa préférence pour son propre point de vue par rapport à celui de l'Église. Le Vatican le convoqua une nouvelle fois à Rome et le mit en accusation pour avoir bravé l'interdit auquel il était soumis. Galilée fut assigné à résidence jusqu'à la fin de sa vie, en 1642. Ce n'est que quatre siècles plus tard, à l'occasion de l'anniversaire de la publication de l'ouvrage contesté, que le Vatican fit des excuses formelles.

**L'idée fait son chemin** Les preuves que l'héliocentrisme était la bonne façon de voir le système solaire se sont peu à peu accumulées au fil des siècles. On vit que les lois de Kepler sur les orbites tenaient bon et elles influencèrent la théorie de la gravitation de Newton. Des planètes plus lointaines furent découvertes et le fait qu'elles tournaient autour du Soleil paraissait évident. Mettre l'Homme au centre de tout n'était plus tenable.

l'idée clé  
Au centre, le Soleil

# 03 Les lois de Kepler

Johannes Kepler recherchait des motifs en toute chose. Examinant les tables astronomiques où étaient relevées les boucles décrites par Mars dans notre ciel, il découvrit trois lois qui régissent la trajectoire des planètes. Il explicita le caractère elliptique de ces trajectoires, les planètes qui sont le plus loin du Soleil se déplaçant le plus lentement autour de lui. Non seulement les lois de Kepler transformèrent l'astronomie mais elles jetèrent les bases de la loi de la gravitation universelle de Newton.

Dans leur mouvement autour du Soleil, les planètes les plus proches de lui se déplacent plus rapidement que celles qui en sont plus éloignées. Mercure ne fait le tour du Soleil qu'en 80 jours terrestres. À la même vitesse, il ne faudrait à Jupiter que 3,5 années terrestres pour parcourir son orbite, alors qu'il lui en faut douze en réalité. Dans leur ballet, les planètes passent les unes devant les autres et, pour un observateur terrestre, certaines semblent parfois rebrousser chemin. Du temps de Kepler, ces mouvements « rétrogrades » constituaient une grande énigme. C'est en la résolvant que vinrent à Kepler les idées qui le conduisirent à établir ses trois lois du mouvement des planètes.

**Des motifs polygonaux** Kepler était un mathématicien allemand qui vécut à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle et au début du XVII<sup>e</sup>. L'astrologie était alors prise très au sérieux tandis que l'astronomie, en tant que science, en était à ses balbutiements. Pour révéler les lois de la nature, le religieux et le sacré comptaient tout autant que l'observation. Lui-même mystique, Kepler était convaincu que la structure sous-jacente de l'Univers reposait sur des formes géométriques parfaites et il passa sa vie à tenter de dégager d'imaginaires motifs polygonaux parfaits cachés dans les œuvres de la nature.

Les travaux de Kepler vinrent presque un siècle après que l'astronome polonais Nicolas Copernic eut avancé que le Soleil se trouvait au centre de l'Univers

## chronologie

### Vers 580 av. J.-C.

Pythagore énonce que les planètes sont en orbite sur des sphères cristallines parfaite

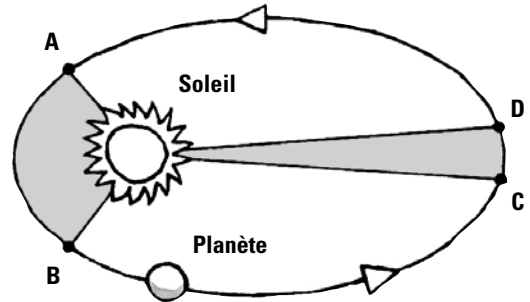
### Vers 150 ap. J.-C.

Ptolémée invente les épicycles pour expliquer le mouvement rétrograde des planètes

### 1543

Copernic propose un système où les planètes tournent autour du Soleil

et que la Terre tournait autour de lui plutôt que l'inverse. Au début, Kepler adopta le système héliocentrique de Copernic, convaincu que les planètes se déplaçaient autour du Soleil selon des trajectoires circulaires. Il imagina un système dans lequel les orbites des planètes étaient portées par une série de sphères de cristal emboîtées et espacées en respectant les proportions d'une série de polygones, eux-mêmes dotés d'un nombre croissant de côtés et remplissant les sphères. L'idée selon laquelle les lois de la nature suivaient des rapports géométriques fondamentaux était apparue chez les Grecs de l'Antiquité.



Kepler s'essaya à modéliser des orbites de planètes étayant ses idées géométriques et, pour cela, il utilisa les données les plus précises disponibles : les tables complexes des mouvements planétaires dans notre ciel méticuleusement établies par Tycho Brahé. C'est dans ces colonnes de nombres que Kepler discerna des motifs qui lui firent réviser son jugement et lui suggérèrent ses trois lois.

En élucidant le mouvement rétrograde de Mars, Kepler réalisa une avancée décisive. De temps à autre, la planète rouge rebrousse chemin dans notre ciel et effectue une petite boucle. Copernic avait modélisé les boucles en ajoutant à l'orbite principale des petits cercles supplémentaires, des « épicycles ». Mais Kepler remarqua que cela n'était pas en accord avec la précision des mesures récentes.

**« Quelque chose me frappa soudain : ce joli petit pois bleu était la Terre. Je levai mon pouce et fermai un œil : mon pouce masqua la Terre. Loin d'avoir l'impression d'être un géant, je me sentis petit, tout petit. »**

**Neil Armstrong**

**1576**

Tycho Brahé effectue un relevé de la position des planètes

**1609**

Kepler publie sa théorie des orbites elliptiques

**1687**

Newton explique les lois de Kepler par la gravité

**2009**

La NASA lance le satellite Kepler afin de repérer des planètes en orbite autour d'autres étoiles

## Lois de Kepler

**Première loi** Les planètes décrivent une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers.

**Deuxième loi** Quand une planète parcourt son orbite, le rayon Soleil-planète balaie des aires égales en des intervalles de temps égaux.

**Troisième loi** Les périodes orbitales sont liées à la taille des ellipses, le carré de la période étant proportionnel au cube du grand axe de l'orbite.

Il chercha une autre explication et eut un éclair de génie : les boucles rétrogrades s'expliqueraient si les orbites planétaires étaient elliptiques et non circulaires comme on le pensait. Comble d'ironie, cela signifiait que la nature n'était pas bâtie sur des formes géométriques parfaites ainsi que Kepler le croyait. Mais il eut le courage de se rendre à l'évidence et de changer d'avis.

**Orbites** La première loi de Kepler dit que les planètes suivent des orbites elliptiques dont le Soleil occupe l'un des deux foyers. La deuxième loi

décrit la vitesse avec laquelle une planète se déplace sur son orbite : en parcourant sa trajectoire, une planète balaie des aires égales en des intervalles de temps égaux. Ces aires sont celles des portions angulaires formées par le Soleil et les deux positions de la planète (AB ou CD), comme une part de tarte. Les orbites étant elliptiques, pour balayer une aire donnée, il faut qu'elle parcoure une distance plus grande quand elle est proche du Soleil que lorsqu'elle en est loin. Une planète se déplace donc plus vite lorsqu'elle est proche du Soleil. La loi de Kepler lie vitesse et distance au Soleil : bien que Kepler ne s'en soit pas rendu compte, cela est dû à la gravitation qui accélère la planète d'autant plus qu'elle est proche de la masse du Soleil.

La troisième loi va encore plus loin en expliquant comment les périodes orbitales varient selon la taille des ellipses en suivant toute l'échelle des distances des planètes au Soleil. Elle énonce que le carré de la période orbitale est proportionnel au cube de la longueur du grand axe de l'ellipse de l'orbite. Plus grande est l'ellipse, plus longue est la période, c'est-à-dire plus il faut de temps pour parcourir l'orbite. Les planètes les plus éloignées se déplacent plus lentement que les plus proches. Il faut près de 2 années terrestres à Mars pour opérer une révolution, 29 à Saturne et 165 à Neptune.

« Nous ne sommes qu'une race avancée de singes sur une planète mineure tournant autour d'une étoile très moyenne. Mais nous sommes capables de comprendre l'Univers, ce qui fait de nous quelque chose de tout à fait à part. »

Stephen Hawking

## « Je mesurais les cieux, je mesure à présent les ombres de la Terre. L'esprit était céleste, ci-gît l'ombre du corps. »

Épithape de Johannes Kepler

Avec ses trois lois, Kepler parvint à décrire les orbites de toutes les planètes de notre système solaire. Ses lois s'appliquent également à tout corps en orbite autour d'un autre, qu'il s'agisse de comètes, d'astéroïdes ou de satellites dans notre système solaire, de planètes autour d'autres étoiles ou même des satellites artificiels filant autour de la Terre. Quatre siècles après qu'il les eut formulées, ses lois demeurent un pilier de la physique. Mais il y a plus : Kepler a été novateur en étant l'un des premiers à utiliser les méthodes scientifiques en usage de nos jours : observer et analyser afin de tester les théories.

Kepler parvint à unifier les principes en des lois géométriques dont il ignorait la cause. Il pensait qu'elles provenaient de configurations géométriques sous-jacentes de la nature. Il revint à Newton de les fonder dans une théorie de la gravitation universelle.

### Johannes Kepler (1571-1630)

Johannes Kepler s'intéressa à l'astronomie dès l'enfance, allant jusqu'à noter dans son journal, alors qu'il n'avait pas dix ans, le passage d'une comète ainsi qu'une éclipse de Lune. Durant les années où il enseigna à Graz, il publia une théorie cosmologique dans un ouvrage intitulé *Mysterium cosmographicum* (*Les Mystères du Cosmos*). Il devint ensuite l'assistant de Tycho Brahé dans son observatoire situé près de Prague ; il lui succéda en tant que Mathématicien impérial en 1601, chargé de préparer l'horoscope de l'Empereur. Kepler analysa les tables astronomiques

de Tycho Brahé et publia ses théories relatives aux orbites non circulaires ainsi que ses première et deuxième lois dans *Astronomia nova* (*La Nouvelle Astronomie*). En 1620, la mère de Kepler, guérisseuse utilisant les vertus médicinales des plantes, fut accusée de sorcellerie et emprisonnée. Kepler dut mener une grande bataille judiciaire pour la faire libérer. Il parvint néanmoins à poursuivre ses travaux et sa troisième loi fut publiée dans son célèbre *Harmonices mundi* (*L'Harmonie des mondes*).

# l'idée clé

## La loi des mondes

# 04 La gravitation de Newton

Newton fit un pas de géant en rapprochant les trajectoires des boulets de canon de celles de planètes, reliant ainsi la Terre et les cieux. Ses lois de la gravitation demeurent parmi les concepts les plus féconds de la physique, fournissant la clé des mouvements aussi bien sur Terre qu'ailleurs dans l'Univers. Newton avança que tous les corps s'attirent entre eux grâce à la force gravitationnelle, dont l'intensité décroît en raison du carré de la distance.

On dit que c'est la chute d'une pomme depuis un arbre qui donna à Newton l'idée de gravité. Quoi qu'il en soit, il fallut à Newton un gros effort d'imagination pour mettre au point des lois valides pour les mouvements tant terrestres que célestes. Il comprit que les objets étaient attirés au sol par quelque force qui les accélérerait. Les pommes tombent des arbres mais que se passerait-il si ces derniers étaient encore plus hauts ? S'ils atteignaient la Lune ? Pourquoi celle-ci ne tombe-t-elle pas sur la Terre comme le fait une pomme ? Autant de questions...

**Tout tombe** La réponse de Newton se trouve dans ses lois du mouvement reliant forces, masse et accélération. Un boulet tiré par un canon franchit une certaine distance avant de retomber au sol. Qu'en serait-il si le tir lui avait communiqué une vitesse plus élevée ? La distance franchie aurait été plus grande. Et s'il s'était déplacé en ligne droite à une vitesse telle que, sous lui, la Terre commencerait à s'incurver : où tomberait-il ? Newton se rendit compte qu'il aurait été attiré vers la Terre mais aurait alors suivi une orbite circulaire, tout comme un satellite est attiré en permanence vers le sol mais ne l'atteint jamais.

## chronologie

**350 av. J.-C.**

Aristote traite de la chute des corps

**1609**

Kepler énonce les lois qui régissent les orbites des planètes