

SPACEFOX  
ARIUS  
DEUCHNORD  
AMAURY  
ETHERPIN



# Beste de savoir

Introduction à l'astronomie

---

samedi 05 avril 2025



# Table des matières

Introduction	4
I. La science et l'univers: un bref tour d'horizon	7
Introduction	8
I.1. Préambule (1/2)	11
I.1.1. Qu'est-ce que l'astronomie ?	11
I.1.2. Qu'est-ce que la science ?	11
I.1.3. Les lois de la nature	13
I.1.4. Les nombres en astronomie	14
I.1.5. Les conséquences du temps de déplacement de la lumière	16
Contenu masqué	17
I.2. Préambule (2/2)	19
I.2.1. Un voyage dans l'univers	19
I.2.2. L'Univers dans son ensemble	23
I.2.3. L'univers du très petit	25
Conclusion	26
Conclusion	29
II. Observer le ciel: la naissance de l'astronomie	31
Introduction	32
II.1. Le ciel, au-dessus de nos têtes	33
Introduction	33
II.1.1. La sphère céleste	33
II.1.2. Les pôles célestes et l'équateur céleste	36
II.1.3. Lever et coucher du Soleil	37
II.1.4. Étoiles fixes et vagabondes	41
II.1.5. Constellations	42
Contenu masqué	44
II.2. L'astronomie antique	45
Introduction	45
II.2.1. L'astronomie autour du monde	45
II.2.2. Les grecs anciens et la cosmologie romaine	46

II.2.3. Mesure de la Terre par Ératosthène . . . . .	48
II.2.4. Hipparque et la précession . . . . .	50
II.2.5. Le modèle du système solaire selon Ptolémée . . . . .	51
<b>II.3. Astrologie et astronomie</b>	<b>55</b>
Introduction . . . . .	55
II.3.1. Les débuts de l'astrologie . . . . .	55
II.3.2. L'horoscope . . . . .	56
II.3.3. L'astrologie aujourd'hui . . . . .	57
<b>II.4. La naissance de l'astronomie moderne</b>	<b>60</b>
Introduction . . . . .	60
II.4.1. Copernic . . . . .	61
II.4.2. Le modèle héliocentrique . . . . .	62
II.4.3. Galilée et le début de la science moderne . . . . .	63
II.4.4. Les observations astronomiques de Galilée . . . . .	65
<b>III. Les orbites et la gravité</b>	<b>69</b>
Introduction	70
<b>III.1. Les lois du mouvement planétaire</b>	<b>71</b>
Introduction . . . . .	71
III.1.1. L'observatoire de Tycho Brahe . . . . .	71
III.1.2. Johannes Kepler . . . . .	72
III.1.3. Les deux premières lois du mouvement planétaire . . . . .	73
III.1.4. La troisième loi de Kepler . . . . .	75
Conclusion . . . . .	77
Contenu masqué . . . . .	78
<b>III.2. La grande synthèse de Newton</b>	<b>79</b>
Introduction . . . . .	79
III.2.1. Les lois du mouvement de Newton . . . . .	80
III.2.2. Interprétation des lois de Newton . . . . .	80
III.2.3. Masse, volume et densité . . . . .	83
III.2.4. Moment cinétique . . . . .	84
<b>III.3. La loi de l'attraction universelle de Newton</b>	<b>86</b>
Introduction . . . . .	86
III.3.1. La loi de l'attraction universelle de Newton . . . . .	86
III.3.2. Mouvement orbital et masse . . . . .	89
Contenu masqué . . . . .	91
<b>III.4. Les orbites dans le système solaire</b>	<b>92</b>
Introduction . . . . .	92
III.4.1. Les orbites des planètes . . . . .	92
III.4.2. Orbites d'astéroïdes et de comètes . . . . .	93
Conclusion . . . . .	94

<b>III.5. Mouvements des satellites et des engins spatiaux</b>	<b>96</b>
Introduction	96
III.5.1. Généralités	96
III.5.2. Vaisseau spatial interplanétaire	98
<b>III.6. La gravité avec plus de deux corps</b>	<b>100</b>
Introduction	100
III.6.1. Les interactions de plusieurs corps	100
III.6.2. La découverte de Neptune	101
<b>IV. Annexes</b>	<b>104</b>
<b>IV.1. Annexe C : Notations scientifiques</b>	<b>105</b>
IV.1.1. Écrire des grands nombres	105
IV.1.2. Écrire des petits nombres	106
IV.1.3. La multiplication et la division	106
Contenu masqué	108
<b>IV.2. Annexe G Une sélection de lunes</b>	<b>110</b>
<b>IV.3. Annexe K : Éléments chimiques</b>	<b>112</b>

# Introduction



### Paternité du cours

Ce tutoriel est une traduction bénévole du cours *Astronomy*, publiée par OpenStax [↗](#). Ce cours — de même que la présente traduction — a été publié sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY) [↗](#), ce qui signifie que vous pouvez distribuer, remixer et développer le contenu, à condition d'en attribuer la paternité à OpenStax et à ses contributeurs. OpenStax est une organisation à but non lucratif basée à l'université de Rice [↗](#), dont la mission est d'améliorer l'accès des étudiants à l'éducation. Le premier manuel universitaire sous licence libre a été publié en 2012 et la bibliothèque s'est depuis étendue à plus de 25 livres pour l'université et les cours AP® utilisés par des centaines de milliers d'étudiants américains.

Ce cours d'astronomie est rédigé dans un langage clair et non technique, avec une touche d'humour occasionnelle et un large éventail d'illustrations explicatives. Il comporte de nombreuses analogies tirées de la vie quotidienne afin d'aider les non-scientifiques à apprécier, à leur manière, ce que révèle notre exploration moderne de l'univers. Il est mis gratuitement à la disposition des étudiants du monde entier sous forme électronique (et à faible coût sous forme imprimée, dans sa [version originale](#) [↗](#) en anglais). Si vous avez déjà levé les bras au ciel en signe de désespoir face à la montée en flèche du coût des manuels d'astronomie, vous devez à vos étudiants de jeter un coup d'œil à ce manuel.



### Choix pédagogiques - Note des traducteurs

Ce cours, destiné aux étudiants américains, comporte des choix pédagogiques orientés pour ces étudiants. À ce stade, le projet de traduction vise uniquement à traduire ce cours. À long terme, ce cours pourra faire l'objet de corrections visant à en améliorer la pédagogie, la neutralité et d'éventuelles approximations.

Il a été rédigé, mis à jour et révisé par un large éventail d'astronomes et d'enseignants en astronomie dans le cadre d'un effort communautaire important. Il contient des informations et des images sur l'exploration de Pluton par New Horizons, la découverte d'ondes gravitationnelles, la mission Rosetta vers la comète C-G et bien d'autres projets récents en astronomie. La discussion sur les exoplanètes a été mise à jour avec des informations récentes - indiquant non seulement des exemples individuels, mais aussi des tendances dans les types de planètes qui semblent être les plus courants. Les trous noirs font l'objet d'un chapitre à part entière, et le rôle des trous noirs supermassifs dans les galaxies actives et l'évolution des galaxies est clairement expliqué. Les chapitres ont été révisés par des experts en la matière pour en vérifier l'exactitude et l'actualité.

Ce cours est écrit pour aider les étudiants à comprendre la situation dans son ensemble plutôt que de se perdre dans des faits aléatoires à mémoriser. Le langage utilisé est accessible et attrayant. Des diagrammes et des tableaux récapitulatifs utiles passent en revue et résument les idées abordées. Chaque chapitre contient des activités de groupe interactives que vous pouvez organiser pour aider les étudiants à travailler en équipe et à mettre en commun leurs connaissances.



Ce cours est actuellement en cours de traduction et n'est pas complet à ce jour. Les différents chapitres seront publiés au fur et à mesure de l'avancement du travail de traduction. Il est possible de suivre les mises à jour de ce cours voire d'être notifié par courriel (celui utilisé pour l'inscription sur le site) via les liens figurant dans le menu de gauche.

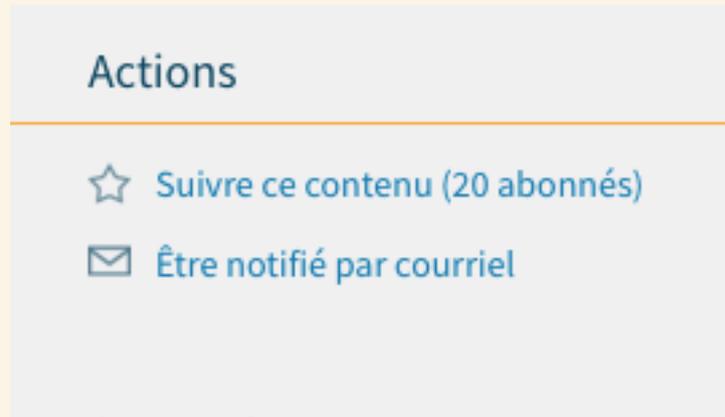


FIGURE 1. – Liens « Suivre ce contenu » et « Être notifié par courriel » dans le menu de gauche.

L'image d'illustration de ce tutoriel appartient à Ralina Shaikhetdinova et a été publiée sous licence [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY\)](#) sur [Wikimedia Commons](#).

## Première partie

### La science et l'univers: un bref tour d'horizon

# Introduction



FIGURE 1. – **Figure 1.1 : Galaxies lointaines.** Ces deux îles d'étoiles (galaxies) en interaction sont si éloignées que leur lumière met des centaines de millions d'années à nous parvenir sur Terre (photographiées avec le télescope spatial Hubble). (crédit : modification des travaux de la NASA, de l'ESA, le *Hubble Heritage* (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration, et de K. Noll (STScI))

Nous vous invitons à participer à une série de voyages pour explorer l'univers tel que les astronomes le comprennent aujourd'hui. Au-delà de la Terre se trouvent de vastes et magnifiques royaumes remplis d'objets qui n'ont pas d'équivalent sur notre planète. Néanmoins, nous espérons vous montrer que l'évolution de l'univers est directement responsable de votre présence sur Terre aujourd'hui.

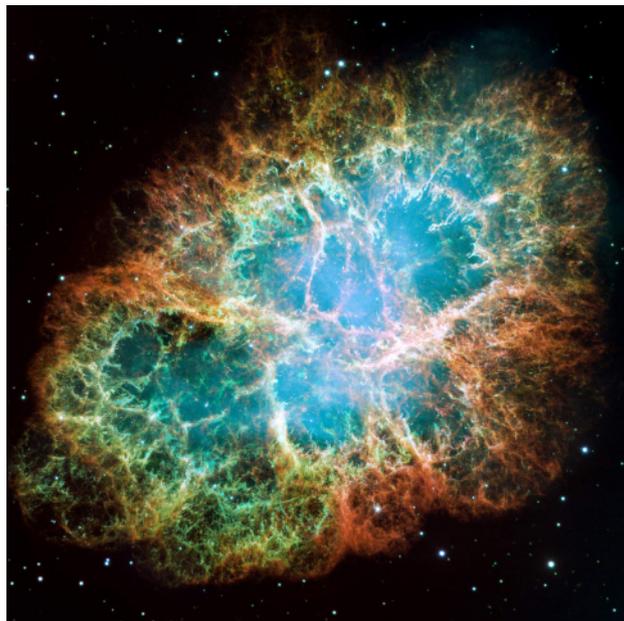
Au cours de votre voyage, vous rencontrerez :

- un système de canyons si grand que, sur Terre, il s'étendrait de Los Angeles à Washington, DC (*figure 1.2*).



FIGURE 2. – **Figure 1.2 : Mosaïque de Mars.** Cette image de Mars est centrée sur le complexe de canyons Valles Marineris (Mariner Valley). (crédit : modification d'un travail de la NASA)

- un cratère et d'autres preuves sur Terre qui nous indiquent que les dinosaures (et de nombreuses autres créatures) sont morts à cause d'une collision cosmique.
- une petite lune dont la gravité est si faible qu'un bon lancer depuis sa surface pourrait mettre une balle de baseball en orbite.
- une étoile effondrée si dense que pour reproduire son intérieur, il faudrait comprimer chaque être humain sur Terre dans une seule goutte de pluie.
- des étoiles explosives dont la fin violente pourrait anéantir toutes les formes de vie sur une planète en orbite autour d'une étoile voisine (*figure 1.3*).
- une "galaxie cannibale" qui a déjà consommé un certain nombre de ses petites voisines et n'a pas encore fini de trouver de nouvelles victimes.
- un écho radio qui est le signal faible mais indubitable de l'événement de la création de notre univers.



**FIGURE 3. – Figure 1.3 : Cadavre stellaire.** Nous observons les restes d'une étoile qui a explosé dans notre ciel en 1054 (et qui a été, brièvement, assez brillante pour être visible pendant la journée). Aujourd'hui, ce vestige est appelé la nébuleuse du Crabe et sa région centrale est visible ici. Ces étoiles explosives sont cruciales pour le développement de la vie dans l'univers. (crédit : NASA, ESA, J. Hester (Arizona State University))

Ce sont ces découvertes qui font de l'astronomie un domaine si passionnant pour les scientifiques et bien d'autres. Mais vous explorerez bien plus que les objets de notre univers et les dernières découvertes à leur sujet. Nous accorderons autant d'attention au processus par lequel nous en sommes venus à comprendre les royaumes au-delà de la Terre qu'aux outils que nous utilisons pour accroître cette compréhension.

Nous recueillons des informations sur le cosmos à partir des messages que l'univers nous envoie. Les étoiles étant les éléments fondamentaux de l'univers, décoder le message de la lumière des étoiles a été un défi central et un triomphe de l'astronomie moderne. Lorsque vous aurez terminé la lecture de ce texte, vous saurez un peu comment lire ce message et comment comprendre ce qu'il nous dit.

## I.1. Préambule (1/2)

### I.1.1. Qu'est-ce que l'astronomie ?

L'astronomie est définie comme l'étude des objets qui se trouvent au-delà de notre planète Terre et des processus par lesquels ces objets interagissent les uns avec les autres. Nous verrons cependant qu'elle est bien plus que cela. C'est aussi la tentative de l'humanité d'organiser ce que nous apprenons en une histoire claire de l'univers, depuis l'instant de sa naissance dans le Big Bang jusqu'au moment présent. Tout au long de ce livre, nous insistons sur le fait que la science est un rapport de progrès - un rapport qui change constamment à mesure que de nouvelles techniques et de nouveaux instruments nous permettent de sonder l'univers plus profondément.

En considérant l'histoire de l'univers, nous verrons encore et encore que le cosmos évolue ; il change profondément sur de longues périodes de temps. Par exemple, l'univers a fabriqué le carbone, le calcium et l'oxygène nécessaires à la construction d'un objet aussi intéressant et compliqué que vous. Aujourd'hui, plusieurs milliards d'années plus tard, l'univers a évolué pour devenir un lieu plus accueillant pour la vie. Retracer les processus évolutifs qui continuent à façonner l'univers est l'une des parties les plus importantes (et les plus satisfaisantes) de l'astronomie moderne.

### I.1.2. Qu'est-ce que la science ?

Le juge ultime en science est toujours ce que la nature elle-même révèle sur la base d'observations, d'expériences, de modèles et de tests. La science n'est pas simplement un ensemble de connaissances, mais une *méthode* par laquelle nous tentons de comprendre la nature et son comportement. Cette méthode commence par de nombreuses observations sur une période de temps donnée. À partir des tendances trouvées par les observations, les scientifiques peuvent *modéliser* les phénomènes particuliers que nous voulons comprendre. Ces modèles sont toujours des approximations de la nature, soumises à de nouveaux tests.

À titre d'exemple astronomique concret, les anciens astronomes ont construit un modèle (en partie à partir d'observations et en partie à partir de croyances philosophiques) selon lequel la Terre était le centre de l'univers et que tout se déplaçait autour d'elle dans des orbites circulaires. Au début, les observations du Soleil, de la Lune et des planètes dont nous disposions correspondaient à ce modèle ; cependant, après d'autres observations, le modèle a dû être mis à jour en ajoutant cercle après cercle pour représenter les mouvements des planètes autour du centre de la Terre. Au fil des siècles et de l'amélioration des instruments permettant de suivre les objets dans le ciel, l'ancien modèle (même avec un nombre considérable de cercles) ne pouvait plus expliquer tous les faits observés. Comme nous le verrons dans la partie [Observer le ciel : la naissance de l'astronomie](#) ↗ , un nouveau modèle, avec le Soleil au centre, correspondait mieux

## I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon

aux preuves expérimentales. Après une période de lutte philosophique, il a été accepté comme notre vision de l'univers.

Lorsqu'ils sont proposés pour la première fois, les nouveaux modèles ou idées sont parfois appelés des hypothèses. Vous pensez peut-être qu'il ne peut y avoir de nouvelles hypothèses dans une science comme l'astronomie - que tout ce qui est important a déjà été appris. Rien ne pourrait être plus éloigné de la vérité. Tout au long de ce manuel, vous trouverez des discussions sur des hypothèses récentes, et parfois encore controversées, en astronomie. Par exemple, la signification que les énormes morceaux de roche et de glace qui frappent la Terre ont pour la vie sur Terre elle-même est encore débattue. Et si tout porte à croire que de vastes quantités d'"énergie noire" invisible constituent la majeure partie de l'univers, les scientifiques n'ont aucune explication convaincante sur la nature de cette énergie noire. La résolution de ces questions nécessitera des observations difficiles réalisées à la pointe de notre technologie, et toutes ces hypothèses doivent être testées plus avant que nous ne les incorporions pleinement dans nos modèles astronomiques standard.

Ce dernier point est crucial : une hypothèse doit être une explication proposée qui peut être réfutée. L'approche la plus directe de ce type de test en science consiste à réaliser une expérience. Si l'expérience est menée correctement, ses résultats seront soit en accord avec les prédictions de l'hypothèse, soit en contradiction avec celle-ci. Si le résultat expérimental est vraiment incompatible avec l'hypothèse, le scientifique doit rejeter l'hypothèse et essayer de développer une alternative. Si le résultat expérimental est en accord avec les prédictions, cela ne prouve pas nécessairement que l'hypothèse est absolument correcte ; il se peut que des expériences ultérieures contredisent des parties cruciales de l'hypothèse. Mais plus il y a d'expériences en accord avec l'hypothèse, plus nous sommes susceptibles d'accepter l'hypothèse comme une description utile de la nature.

Une façon d'y penser est de considérer un scientifique qui est né et vit sur une île où ne vivent que des moutons noirs. Jour après jour, le scientifique ne rencontre que des moutons noirs, il émet donc l'hypothèse que tous les moutons sont noirs. Bien que chaque mouton observé renforce l'hypothèse, le scientifique n'a qu'à se rendre sur le continent et observer un seul mouton blanc pour prouver que l'hypothèse est fautive.

Lorsque vous lisez des articles sur les expériences, vous avez probablement l'image mentale d'un scientifique dans un laboratoire en train de réaliser des tests ou de prendre des mesures minutieuses. C'est certainement le cas pour un biologiste ou un chimiste, mais que peuvent faire les astronomes lorsque notre laboratoire est l'univers ? Il est impossible de mettre un groupe d'étoiles dans un tube à essai ou de commander une autre comète à une entreprise de fournitures scientifiques.

C'est pourquoi l'astronomie est parfois qualifiée de science d'*observation* ; nous effectuons souvent nos tests en observant de nombreux échantillons du type d'objet que nous voulons étudier et en notant soigneusement les variations entre les différents échantillons. Les nouveaux instruments et les nouvelles technologies nous permettent d'observer les objets astronomiques sous de nouvelles perspectives et avec plus de détails. Nos hypothèses sont alors jugées à la lumière de ces nouvelles informations, et elles sont acceptées ou rejetées de la même manière que nous évaluerions le résultat d'une expérience en laboratoire.

Une grande partie de l'astronomie est également une science *historique* - ce qui signifie que ce que nous observons s'est déjà produit dans l'univers et que nous ne pouvons rien faire pour le changer. De la même façon, un géologue ne peut pas modifier ce qui est arrivé à notre planète, et

## I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon

un paléontologue ne peut pas ramener à la vie un animal ancien. Si cela peut rendre l'astronomie difficile, cela nous donne aussi des occasions fascinantes de découvrir les secrets de notre passé cosmique.

On pourrait comparer l'astronome à un détective qui tente de résoudre un crime qui s'est produit avant que le détective n'arrive sur les lieux. Il y a beaucoup de preuves, mais le détective et le scientifique doivent passer au crible et organiser les preuves pour vérifier diverses hypothèses sur ce qui s'est réellement passé. En outre, le scientifique ressemble au détective d'une autre manière : tous deux doivent prouver ce qu'ils avancent. Le détective doit convaincre le procureur, le juge et peut-être même le jury que son hypothèse est correcte. De même, le scientifique doit convaincre ses collègues, les rédacteurs en chef des revues scientifiques et, en fin de compte, un large éventail d'autres scientifiques que son hypothèse est provisoirement correcte. Dans les deux cas, on ne peut demander que des preuves "au-delà du doute raisonnable". Et parfois, de nouvelles preuves obligeront le détective et le scientifique à réviser leur dernière hypothèse.

Cet aspect autocorrectif de la science la distingue de la plupart des activités humaines. Les scientifiques passent beaucoup de temps à s'interroger et à se remettre en question, c'est pourquoi les demandes de financement de projets - ainsi que les rapports destinés à être publiés dans des revues universitaires - sont soumis à un vaste processus d'*évaluation par les pairs*, qui consiste en un examen minutieux par d'autres scientifiques du même domaine. En science (après un enseignement et une formation formels), chacun est encouragé à améliorer ses expériences et à remettre en question toutes les hypothèses. Les nouveaux scientifiques savent que l'un des meilleurs moyens de faire avancer leur carrière est de trouver une faiblesse dans notre compréhension actuelle d'un phénomène et d'y remédier par une hypothèse nouvelle ou modifiée.

C'est l'une des raisons pour lesquelles la science a fait des progrès aussi spectaculaires. Aujourd'hui, un étudiant en sciences de premier cycle en sait plus sur les sciences et les mathématiques que Sir Isaac Newton, l'un des scientifiques les plus renommés qui ait jamais vécu. Même dans ce cours d'introduction à l'astronomie, vous apprendrez à connaître des objets et des processus dont personne, il y a quelques générations, n'imaginait même l'existence.

### I.1.3. Les lois de la nature

Au fil des siècles, les scientifiques ont extrait diverses *lois scientifiques* d'innombrables observations, hypothèses et expériences. Ces lois scientifiques sont, en quelque sorte, les "règles" du jeu de la nature. Une découverte remarquable sur la nature - qui sous-tend tout ce que vous lirez dans ce texte - est que les mêmes lois s'appliquent partout dans l'univers. Les règles qui déterminent le mouvement des étoiles si lointaines que votre œil ne peut les voir sont les mêmes que celles qui déterminent l'arc d'une balle de baseball après qu'un batteur l'a frappée hors du parc.

Notez que sans l'existence de telles lois universelles, nous ne pourrions pas faire beaucoup de progrès en astronomie. Si chaque poche de l'univers avait des règles différentes, nous aurions peu de chances d'interpréter ce qui se passe dans les autres "voisinages". Mais la cohérence des lois de la nature nous donne un pouvoir énorme pour comprendre des objets lointains sans avoir à voyager jusqu'à eux et à apprendre les lois locales. De la même manière, si chaque région d'un pays avait des lois complètement différentes, il serait très difficile de faire du commerce ou même de comprendre le comportement des gens dans ces différentes régions. En revanche, un

## I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon

ensemble cohérent de lois nous permet d'appliquer ce que nous apprenons ou pratiquons dans un État à tout autre État.

Cela ne veut pas dire que nos modèles et lois scientifiques actuels ne peuvent pas changer. De nouvelles expériences et observations peuvent conduire à de nouveaux modèles plus sophistiqués - des modèles qui peuvent inclure de nouveaux phénomènes et des lois sur leur comportement. La théorie générale de la relativité proposée par Albert Einstein est un parfait exemple d'une telle transformation qui a eu lieu il y a environ un siècle ; elle nous a conduits à prédire, et finalement à observer, une nouvelle classe étrange d'objets que les astronomes appellent les *trous noirs*. Seul le patient processus d'observation de la nature, toujours plus minutieux et précis, peut démontrer la validité de ces nouveaux modèles scientifiques.

Un problème important dans la description des modèles scientifiques est lié aux limites du langage. Lorsque nous essayons de décrire des phénomènes complexes en termes de tous les jours, les mots eux-mêmes peuvent ne pas être adéquats pour faire le travail. Par exemple, vous avez peut-être entendu comparer la structure de l'atome à un système solaire miniature. Si certains aspects de notre modèle moderne de l'atome nous rappellent effectivement les orbites planétaires, de nombreux autres aspects sont fondamentalement différents.

Ce problème est la raison pour laquelle les scientifiques préfèrent souvent décrire leurs modèles en utilisant des équations plutôt que des mots. Dans ce livre, qui est conçu pour introduire le domaine de l'astronomie, nous utilisons principalement des mots pour discuter de ce que les scientifiques ont appris. Nous évitons les mathématiques complexes, mais si ce cours suscite votre intérêt et que vous poursuivez dans le domaine scientifique, de plus en plus de vos études feront appel au langage précis des mathématiques.

### I.1.4. Les nombres en astronomie

En astronomie, nous traitons des distances à une échelle à laquelle vous n'avez peut-être jamais pensé auparavant, avec des nombres plus grands que tous ceux que vous avez pu rencontrer. Nous adoptons deux approches qui rendent le traitement des nombres astronomiques un peu plus facile. Tout d'abord, nous utilisons un système d'écriture des grands et petits nombres appelé notation scientifique (ou parfois notation en puissance de dix). Ce système est très attrayant car il élimine les nombreux zéros qui peuvent sembler écrasants pour le lecteur. En notation scientifique, si vous voulez écrire un nombre tel que 500 000 000, vous l'exprimez par  $5 \times 10^8$ .

Le petit chiffre en relief après le 10, appelé *exposant*, indique le nombre de positions que nous avons dû déplacer vers la gauche pour convertir 500 000 000 en 5. Si vous rencontrez ce système pour la première fois ou si vous souhaitez vous rafraîchir la mémoire, nous vous suggérons de consulter [l'annexe C](#) et l'exemple 1.1 ci-dessous pour plus d'informations. La deuxième façon de simplifier les chiffres est d'utiliser un ensemble cohérent d'unités - le système métrique *International System of Units*, ou SI (du français [Système International d'Unités](#)). Voyez également l'exemple 1.2 ci-dessous.

Une unité couramment utilisée par les astronomes pour décrire les distances dans l'univers est l'année-lumière, qui correspond à la distance parcourue par la lumière en un an. Comme la lumière voyage toujours à la même vitesse et que cette vitesse est la plus rapide possible dans l'univers, elle constitue une bonne norme pour mesurer les distances. Vous pouvez être confus parce qu'une "année-lumière" semble impliquer que nous mesurons le temps, mais cette

confusion entre temps et distance est également courante dans la vie de tous les jours. Par exemple, lorsque votre ami vous demande où se trouve le cinéma, vous pouvez répondre "à environ 20 minutes du centre-ville".

Alors, combien de kilomètres y a-t-il dans une année-lumière ? La lumière voyage à la vitesse étonnante de  $3 \times 10^8$  kilomètres par seconde (km/s), ce qui fait qu'une année-lumière mesure  $9,46 \times 10^{12}$  kilomètres. On pourrait penser qu'une unité aussi grande atteindrait facilement l'étoile la plus proche, mais les étoiles sont bien plus éloignées que notre imagination pourrait nous le faire croire. Même l'étoile la plus proche se trouve à 4,3 années-lumière, soit plus de 40 milliards (40 mille milliards) de kilomètres. D'autres étoiles visibles à l'œil nu se trouvent à des centaines ou des milliers d'années-lumière (figure 1.4).

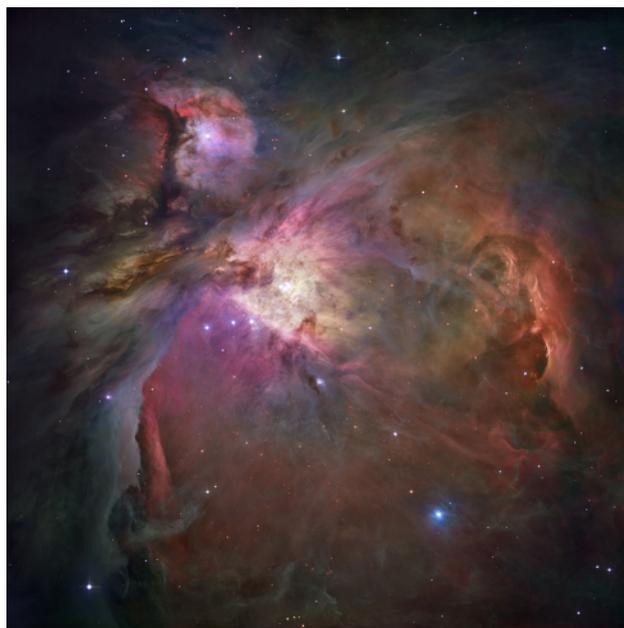


FIGURE I.1.1. – **Figure 1.4 Nébuleuse d'Orion.** Ce magnifique nuage de matière première cosmique (gaz et poussière à partir desquels de nouvelles étoiles et planètes sont fabriquées) appelé nébuleuse d'Orion se trouve à environ 1 400 années-lumière. Cela représente une distance d'environ  $1,34 \times 10^{16}$  kilomètres, un nombre considérable. Le gaz et la poussière de cette région sont éclairés par la lumière intense de quelques étoiles adolescentes extrêmement énergiques. (crédit : NASA, ESA, M. Robberto (*Space Telescope Science Institute/ESA*) et le *Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team*)

#### Exemple 1.1

##### Notation scientifique

En 2015, l'être humain le plus riche de notre planète disposait d'un patrimoine net de 79,2 milliards de dollars. Certains diront qu'il s'agit d'une somme astronomique. Exprimez ce montant en notation scientifique.

##### Solution

© Contenu masqué n°1

### Exemple 1.2

#### Se familiariser avec une année-lumière

Combien de kilomètres y a-t-il dans une année-lumière ?

#### Solution

© Contenu masqué n°2

## 1.1.5. Les conséquences du temps de déplacement de la lumière

Il existe une autre raison pour laquelle la vitesse de la lumière est une unité de distance si naturelle pour les astronomes. Les informations sur l'univers nous parviennent presque exclusivement par le biais de diverses formes de lumière, et toute cette lumière voyage à la vitesse de la lumière, soit une année-lumière par an. Cela fixe une limite à la vitesse à laquelle nous pouvons apprendre des événements dans l'univers. Si une étoile se trouve à 100 années-lumière, la lumière que nous voyons ce soir a quitté cette étoile il y a 100 ans et arrive à peine dans notre voisinage. Le plus tôt que nous pouvons apprendre sur les changements survenus dans cette étoile est 100 ans après les faits. Pour une étoile située à 500 années-lumière, la lumière que nous détectons ce soir est partie il y a 500 ans et porte des nouvelles vieilles de 500 ans.

Parce que beaucoup d'entre nous sont habitués aux nouvelles instantanées d'Internet, certains pourraient trouver cela frustrant.

"Vous voulez dire que lorsque je vois cette étoile là-haut", demandez-vous, "je ne saurai pas ce qui s'y passe réellement avant 500 ans?"

Mais ce n'est pas la façon la plus utile d'envisager la situation. Pour les astronomes, c'est maintenant que la lumière nous parvient, ici sur Terre. Il n'y a aucun moyen pour nous de savoir quoi que ce soit sur cette étoile (ou autre objet) avant que sa lumière ne nous parvienne.

Mais ce qui, au premier abord, peut sembler une grande frustration est en fait un énorme avantage déguisé. Si les astronomes veulent vraiment reconstituer ce qui s'est passé dans l'univers depuis son origine, ils doivent trouver des preuves de chaque époque (ou période de temps) du passé. Où pouvons-nous trouver aujourd'hui des preuves d'événements cosmiques qui se sont produits il y a des milliards d'années ?

Le délai d'arrivée de la lumière apporte une réponse à cette question. Plus on regarde loin dans l'espace, plus la lumière a mis de temps pour arriver jusqu'ici, et plus elle a quitté son lieu d'origine il y a longtemps. En regardant à des milliards d'années-lumière dans l'espace, les astronomes voient en fait des milliards d'années dans le passé. De cette façon, nous pouvons reconstituer l'histoire du cosmos et avoir une idée de son évolution au fil du temps.

C'est l'une des raisons pour lesquelles les astronomes s'efforcent de construire des télescopes capables de recueillir de plus en plus de lumière faible dans l'univers. Plus nous collectons de lumière, plus les objets que nous pouvons observer sont faibles. En moyenne, les objets moins lumineux sont plus éloignés et peuvent donc nous renseigner sur des périodes de temps encore plus lointaines. Des instruments tels que le télescope spatial Hubble (*figure 1.5*) et le Très Grand Télescope du Chili (que vous découvrirez dans le chapitre [sur les instruments astronomiques](#) ↗ offrent aux astronomes des vues de l'espace lointain et du temps profond meilleures que toutes celles dont nous disposions auparavant.



FIGURE I.1.2. – **Figure 1.5** **Télescope en orbite.** Le télescope spatial Hubble, représenté ici en orbite autour de la Terre, est l'un des nombreux instruments astronomiques présents dans l'espace. (crédit : modification du travail de l'Agence spatiale européenne)

## Contenu masqué

### Contenu masqué n°1

79,2 milliards de dollars peuvent être écrits 79 200 000 000 dollars. Exprimé en notation scientifique, il devient <sup>10</sup>. [Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°2

La lumière parcourt  $3 \times 10^5$  km en 1 s. Calculons donc la distance qu'elle parcourt en un an :

- Il y a 60 ( $6 \times 10^1$ ) s dans 1 min, et  $6 \times 10^1$  min dans 1 h.
- En multipliant ces chiffres, on obtient  $3,6 \times 10^3$  s/h.
- Ainsi, la lumière parcourt  $3 \times 10^5$  km/s  $\times 3,6 \times 10^3$  s/h =  $1,08 \times 10^9$  km/h.
- Il y a 24 ou  $2,4 \times 10^1$  h dans un jour, et 365,25 ( $3,65 \times 10^2$ ) jours dans 1 an.
- Le produit de ces deux nombres est  $8,77 \times 10^3$  h/an.
- En multipliant ce chiffre par  $1,08 \times 10^9$  km/h, on obtient  $9,46 \times 10^{12}$  km/année-lumière.

## *I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon*

La lumière parcourt donc près de 10 000 000 000 km en un an. Pour vous aider à imaginer cette distance, sachez qu'une corde d'une année-lumière pourrait faire 236 millions de fois le tour de la Terre.

[Retourner au texte.](#)

## I.2. Préambule (2/2)

### I.2.1. Un voyage dans l'univers

Nous pouvons maintenant faire un bref tour d'introduction de l'univers tel que les astronomes le comprennent aujourd'hui, afin de nous familiariser avec les types d'objets et de distances que vous rencontrerez tout au long du texte. Nous commençons chez nous avec la Terre, une planète presque sphérique d'environ 13 000 kilomètres de diamètre (*figure 1.6*). Un voyageur de l'espace entrant dans notre système planétaire distinguerait facilement la Terre des autres planètes de notre système solaire par la grande quantité d'eau liquide qui recouvre environ deux tiers de sa croûte. Si le voyageur disposait d'un équipement lui permettant de recevoir des signaux de radio ou de télévision, ou s'il s'approchait suffisamment pour voir les lumières de nos villes la nuit, il trouverait rapidement des signes indiquant que cette planète aqueuse est dotée d'une vie consciente.

FIGURE I.2.1. – **Figure 1.6 Le port d'attache de l'humanité.** Cette image montre l'hémisphère occidental vu de l'espace à 35 400 kilomètres (environ 22 000 miles) au-dessus de la Terre. Les données sur la surface terrestre d'un satellite ont été combinées avec les données d'un autre satellite sur les nuages pour créer l'image. (crédit : modification des travaux de R. Stockli, A. Nelson, F. Hasler, NASA/ GSFC/ NOAA/ USGS)

Notre voisin astronomique le plus proche est le satellite de la Terre, communément appelé la Lune. La figure 1.7 montre la Terre et la Lune dessinées à l'échelle sur le même schéma. Remarquez à quel point nous devons réduire la taille de ces corps pour les faire tenir sur la page à la bonne échelle. La distance entre la Lune et la Terre est d'environ 30 fois le diamètre de la Terre, soit environ 384 000 kilomètres, et il faut environ un mois à la Lune pour tourner autour de la Terre. Le diamètre de la Lune est de 3 476 kilomètres, soit environ un quart de la taille de la Terre.

FIGURE I.2.2. – **Figure 1.7 Terre et Lune, dessinées à l'échelle.** Cette image montre la Terre et la Lune dessinées à l'échelle, tant pour la taille que pour la distance. (crédit : modification d'un travail de la NASA)

La lumière (ou les ondes radio) met 1,3 seconde à voyager entre la Terre et la Lune. Si vous avez vu les vidéos des vols Apollo vers la Lune, vous vous souvenez peut-être qu'il y avait un délai d'environ 3 secondes entre le moment où le centre de contrôle de la mission posait une

## I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon

question et le moment où les astronautes répondaient. Ce n'était pas parce que les astronautes réfléchissaient lentement, mais plutôt parce que les ondes radio mettaient près de 3 secondes pour faire l'aller-retour.

La Terre tourne autour de notre étoile, le Soleil, qui se trouve à environ 150 millions de kilomètres, soit environ 400 fois plus loin de nous que la Lune. Nous appelons la distance moyenne Terre-Soleil une unité astronomique (UA) car, aux débuts de l'astronomie, c'était l'étalon de mesure le plus important. La lumière met un peu plus de 8 minutes à parcourir une unité astronomique, ce qui signifie que les dernières nouvelles que nous recevons du Soleil datent toujours de 8 minutes. Le diamètre du Soleil est d'environ 1,5 million de kilomètres ; la Terre pourrait se loger confortablement à l'intérieur de l'une des éruptions mineures qui se produisent à la surface de notre étoile. Si le Soleil était réduit à la taille d'un ballon de basket, la Terre serait un petit pépin de pomme à environ 30 mètres du ballon.

Il faut à la Terre 1 an ( $3 \times 10^7$  secondes) pour faire le tour du Soleil à notre distance ; pour faire ce tour, nous devons voyager à environ 110 000 kilomètres par heure.

*i*

Si, comme de nombreux élèves, vous préférez encore les miles aux kilomètres, l'astuce suivante peut vous être utile. Pour convertir les kilomètres en miles, il suffit de multiplier les kilomètres par 0,6. Ainsi, 110 000 kilomètres par heure deviennent 66 000 miles par heure.

Étant donné que la gravité nous retient fermement à la Terre et qu'il n'existe aucune résistance au mouvement de la Terre dans le vide de l'espace, nous participons à ce voyage extrêmement rapide sans en être conscients au jour le jour.

La Terre n'est qu'une des huit planètes qui tournent autour du Soleil. Ces planètes, ainsi que leurs lunes et des essaims de corps plus petits comme les planètes naines, constituent le système solaire (*figure 1.8*). Une planète est définie comme un corps de taille significative qui tourne autour d'une étoile et ne produit pas sa propre lumière. Si un grand corps produit systématiquement sa propre lumière, on l'appelle alors une étoile. Plus tard dans le livre, cette définition sera quelque peu modifiée, mais elle convient parfaitement pour l'instant, alors que vous commencez votre voyage.

**FIGURE I.2.3. – Figure 1.8 Notre famille solaire.** Le Soleil, les planètes et certaines planètes naines sont représentés avec leurs tailles à l'échelle. Les orbites des planètes sont beaucoup plus éloignées les unes des autres que ne le montre ce dessin. Remarquez la taille de la Terre (*Earth*, en anglais) par rapport aux planètes géantes. (crédit : modification du travail de la NASA)

Nous sommes en mesure de voir les planètes proches dans notre ciel uniquement parce qu'elles reflètent la lumière de notre étoile locale, le Soleil. Si les planètes étaient beaucoup plus éloignées, l'infime quantité de lumière qu'elles reflètent ne serait généralement pas visible pour nous. Les planètes en orbite autour d'autres étoiles que nous avons découvertes jusqu'à présent l'ont été grâce à l'attraction qu'elles exercent sur leur étoile mère ou à la lumière qu'elles bloquent lorsqu'elles passent devant leur étoile. Nous ne pouvons pas voir la plupart de ces planètes directement, bien que quelques-unes fassent actuellement l'objet d'une imagerie directe.

Le Soleil est notre étoile locale, et toutes les autres étoiles sont également d'énormes boules de gaz incandescentes qui génèrent de grandes quantités d'énergie par des réactions nucléaires en leur sein. Nous aborderons plus en détail les processus qui font briller les étoiles plus loin dans ce livre. Les autres étoiles semblent faibles uniquement parce qu'elles sont très éloignées. Si nous poursuivons notre analogie avec le ballon de basket, Proxima Centauri, l'étoile la plus proche du Soleil, située à 4,3 années-lumière, se trouverait à près de 7 000 kilomètres du ballon de basket.

*i*

Lorsque vous regardez un ciel étoilé par une nuit claire, toutes les étoiles visibles à l'œil nu font partie d'un ensemble unique d'étoiles que nous appelons la galaxie de la Voie lactée, ou simplement la galaxie. Lorsque nous faisons référence à la Voie lactée, nous mettons la majuscule à Galaxie ; lorsque nous parlons d'autres galaxies d'étoiles, nous utilisons la minuscule à *galaxie*.

Le Soleil est l'une des centaines de milliards d'étoiles qui composent la galaxie ; son étendue, comme nous allons le voir, dépasse l'imagination humaine. Dans une sphère de 10 années-lumière de rayon centrée sur le Soleil, on trouve environ dix étoiles. Dans une sphère de 100 années-lumière de rayon, il y a environ 10 000 ( $10^4$ ) étoiles - beaucoup trop pour les compter ou les nommer - mais nous n'avons encore traversé qu'une infime partie de la Voie lactée. Dans une sphère de 1 000 années-lumière, nous trouvons quelque dix millions ( $10^7$ ) d'étoiles ; dans une sphère de 100 000 années-lumière, nous englobons enfin la totalité de la Voie lactée.

Notre Galaxie ressemble à un disque géant avec une petite boule au milieu. Si nous pouvions sortir de notre galaxie et regarder le disque de la Voie lactée d'en haut, il ressemblerait probablement à la galaxie de la figure 1.9, avec sa structure en spirale soulignée par la lumière bleue des étoiles adolescentes chaudes.

**FIGURE I.2.4. – Figure 1.9 Galaxie spirale.** Cette galaxie de milliards d'étoiles, appelée par son numéro de catalogue NGC 1073, serait similaire à notre propre galaxie, la Voie lactée. Nous voyons ici le système géant en forme de roue avec une barre d'étoiles en son milieu (crédit : NASA, ESA).

Le Soleil se trouve à un peu moins de 30 000 années-lumière du centre de la Galaxie, à un endroit où il n'y a pas grand-chose qui le distingue. Depuis notre position à l'intérieur de la Voie lactée, nous ne pouvons pas voir jusqu'à son bord le plus éloigné (du moins pas avec la lumière ordinaire) car l'espace entre les étoiles n'est pas complètement vide. Il contient une distribution éparse de gaz (principalement l'élément le plus simple, l'hydrogène) mélangé à de minuscules particules solides que nous appelons poussière interstellaire. Ce gaz et cette poussière s'accumulent en d'énormes nuages en de nombreux endroits de la Galaxie, devenant la matière première des futures générations d'étoiles. La figure 1.10 montre une image du disque de la Galaxie tel qu'il est vu depuis notre point d'observation.

FIGURE I.2.5. – **Figure 1.10 La galaxie de la Voie lactée.** Comme nous nous trouvons à l'intérieur de la Voie lactée, nous voyons son disque en coupe transversale, étalé dans le ciel comme une grande avenue d'étoiles d'un blanc laiteux, avec des "failles" sombres de poussière. Sur cette image spectaculaire, on en voit une partie au-dessus des Trona Pinnacles, dans le désert californien. (crédit : Ian Norman)

En général, la matière interstellaire est si peu dense que l'espace entre les étoiles est un bien meilleur vide que tout ce que nous pouvons produire dans les laboratoires terrestres. Pourtant, la poussière de l'espace, qui s'accumule sur des milliers d'années-lumière, peut bloquer la lumière d'étoiles plus lointaines. À l'instar des immeubles lointains qui disparaissent de notre vue par une journée de smog à Los Angeles, les régions les plus éloignées de la Voie lactée ne sont pas visibles derrière les couches de smog interstellaire. Heureusement, les astronomes ont découvert que les étoiles et les matières premières brillent de diverses formes de lumière, dont certaines pénètrent le brouillard, et nous avons ainsi pu dresser une assez bonne carte de la Galaxie.

Cependant, des observations récentes ont également révélé un fait plutôt surprenant et inquiétant. Il semble qu'il y ait plus - beaucoup plus - dans la Galaxie que ce que l'on peut voir à l'œil (ou au télescope). Grâce à diverses recherches, nous avons la preuve qu'une grande partie de notre Galaxie est constituée de matériaux que nous ne pouvons actuellement pas observer directement avec nos instruments. Nous appelons donc cette composante de la Galaxie la *matière noire*. Nous savons que la matière noire est présente grâce à l'attraction qu'elle exerce sur les étoiles et la matière brute que nous pouvons observer, mais la composition et la quantité de cette matière noire restent un mystère. En outre, cette matière noire n'est pas confinée à notre galaxie ; elle semble également constituer un élément important d'autres groupes d'étoiles.

D'ailleurs, toutes les étoiles ne vivent pas seules, comme le Soleil. Beaucoup sont nées dans des systèmes doubles ou triples, avec deux, trois ou plus d'étoiles tournant les unes autour des autres. Comme les étoiles s'influencent mutuellement dans des systèmes aussi proches, les étoiles multiples nous permettent de mesurer des caractéristiques que nous ne pouvons pas discerner en observant des étoiles individuelles. Dans un certain nombre d'endroits, suffisamment d'étoiles se sont formées ensemble pour que nous les reconnaissons comme des amas d'étoiles (*figure 1.11*). Certains des plus grands amas d'étoiles catalogués par les astronomes contiennent des centaines de milliers d'étoiles et occupent des volumes d'espace de plusieurs centaines d'années-lumière.

FIGURE I.2.6. – **Figure 1.11 Amas d'étoiles.** Ce grand amas d'étoiles est connu par son numéro de catalogue, M9. Il contient environ 250 000 étoiles et peut être observé plus clairement depuis l'espace grâce au télescope spatial Hubble. Il est situé à environ 25 000 années-lumière. (crédit : NASA, ESA)

Vous entendrez peut-être dire que les étoiles sont "éternelles", mais en fait, aucune étoile ne peut durer éternellement. Puisque le "métier" des étoiles est de produire de l'énergie, et que la production d'énergie nécessite d'utiliser un combustible, toutes les étoiles finissent par manquer de combustible. Cette nouvelle ne doit cependant pas vous faire paniquer, car notre Soleil a encore au moins 5 ou 6 milliards d'années devant lui. Le Soleil et toutes les étoiles finiront par mourir, et c'est au cours de leur agonie que sont révélés certains des processus les plus intrigants et les plus importants de l'univers. Par exemple, nous savons maintenant que de nombreux

atomes de notre corps étaient autrefois à l'intérieur d'étoiles. Ces étoiles ont explosé à la fin de leur vie, recyclant leur matière dans le réservoir de la galaxie. En ce sens, nous sommes tous littéralement constitués de "poussière d'étoile" recyclée.

## 1.2.2. L'Univers dans son ensemble

Dans un sens très approximatif, vous pourriez considérer le système solaire comme votre maison ou votre appartement et la galaxie comme votre ville, composée de nombreuses maisons et bâtiments. Au XXe siècle, les astronomes ont pu montrer que, tout comme notre monde est composé de très nombreuses villes, l'univers est composé d'un nombre énorme de galaxies.

*i*

Nous définissons l'univers comme étant tout ce qui existe et qui est accessible à nos observations.

Les galaxies s'étendent aussi loin dans l'espace que nos télescopes peuvent voir, plusieurs milliards d'entre elles étant à la portée des instruments modernes. Lorsqu'elles ont été découvertes pour la première fois, certains astronomes ont appelé les galaxies des univers insulaires, et ce terme est tout à fait approprié ; les galaxies ressemblent en effet à des îles d'étoiles dans les vastes mers sombres de l'espace intergalactique.

La galaxie la plus proche, découverte en 1993, est une petite galaxie située à 70 000 années-lumière du Soleil, dans la direction de la constellation du Sagittaire, où le brouillard de notre propre galaxie la rend particulièrement difficile à discerner.

*i*

Une constellation, rappelons-le, est l'une des 88 sections en lesquelles les astronomes divisent le ciel, chacune portant le nom d'un modèle d'étoile prééminent en son sein.

Au-delà de cette galaxie naine du Sagittaire se trouvent deux autres petites galaxies, distantes d'environ 160 000 années-lumière. Enregistrées pour la première fois par l'équipage de Magellan lors de son tour du monde, elles sont appelées les Nuages de Magellan (*figure 1.12*). Ces trois petites galaxies sont des satellites de la Voie lactée et interagissent avec elle par la force de gravité. Au final, elles pourraient même être avalées par notre galaxie, beaucoup plus grande, comme d'autres petites galaxies l'ont été au cours des temps cosmiques.

**FIGURE I.2.7. – Figure 1.12 Galaxies voisines.** Cette image montre le Grand Nuage de Magellan et le Petit Nuage de Magellan au-dessus des télescopes du Grand Réseau Millimétrique/Submillimétrique d'Atacama (ALMA) dans le désert d'Atacama au nord du Chili. (crédit : ESO, C. Malin)

La grande galaxie la plus proche est une spirale assez semblable à la nôtre, située dans la constellation d'Andromède, et est donc appelée galaxie d'Andromède ; elle est également connue par l'un de ses numéros de catalogue, M31 (*figure 1.13*). M31 se trouve à un peu plus de 2 millions d'années-lumière et fait partie, avec la Voie lactée, d'un petit groupe de plus de 50 galaxies appelé le Groupe local.

FIGURE I.2.8. – **Figure 1.13 Galaxie spirale la plus proche.** La galaxie d'Andromède (M31) est un ensemble d'étoiles en forme de spirale similaire à notre propre Voie lactée. (crédit : Adam Evans)

A des distances de 10 à 15 millions d'années-lumière, nous trouvons d'autres petits groupes de galaxies, puis à environ 50 millions d'années-lumière, des systèmes plus impressionnants avec des milliers de galaxies membres. Nous avons découvert que les galaxies se trouvent principalement dans des amas, grands et petits (*figure 1.14*).

FIGURE I.2.9. – **Figure 1.14 Amas de galaxies de Fornax.** Sur cette image, vous pouvez voir une partie d'un amas de galaxies situé à environ 60 millions d'années-lumière dans la constellation de Fornax. Tous les objets qui ne sont pas des points lumineux dans l'image sont des galaxies composées de milliards d'étoiles. (crédit : ESO, J. Emerson, VISTA. Remerciements : Cambridge Astronomical Survey Unit)

Certains de ces amas forment eux-mêmes des groupes plus importants appelés superamas. Le Groupe local fait partie d'un superamas de galaxies, appelé Superamas de la Vierge, qui s'étend sur un diamètre de 110 millions d'années-lumière. Nous commençons tout juste à explorer la structure de l'univers à ces énormes échelles et nous faisons déjà des découvertes inattendues.

À des distances encore plus grandes, là où de nombreuses galaxies ordinaires sont trop faibles pour être vues, nous trouvons les quasars. Il s'agit de centres brillants de galaxies, qui brillent de la lumière d'un processus extraordinairement énergétique. L'énorme énergie des quasars est produite par des gaz chauffés à une température de plusieurs millions de degrés lorsqu'ils tombent vers un trou noir massif et tourbillonnent autour de lui. La brillance des quasars en fait les balises les plus lointaines que nous pouvons voir dans les océans sombres de l'espace. Ils nous permettent de sonder l'univers à 10 milliards d'années-lumière ou plus, et donc 10 milliards d'années ou plus dans le passé.

Grâce aux quasars, nous pouvons remonter jusqu'à l'explosion du Big Bang qui marque le début des temps. Au-delà des quasars et des galaxies visibles les plus lointaines, nous avons détecté la faible lueur de l'explosion elle-même, qui remplit l'univers et nous parvient donc de toutes les directions de l'espace. La découverte de cette "lueur de la création" est considérée comme l'un des événements les plus importants de la science du XXe siècle, et nous continuons à explorer les nombreuses choses qu'elle peut nous apprendre sur les premiers temps de l'univers.

La mesure des propriétés des galaxies et des quasars dans des endroits éloignés nécessite de grands télescopes, des dispositifs sophistiqués d'amplification de la lumière et un travail minutieux. Chaque nuit claire, dans des observatoires du monde entier, des astronomes et des étudiants travaillent sur des mystères tels que la naissance de nouvelles étoiles et la structure à grande échelle de l'univers, intégrant leurs résultats dans la trame de notre compréhension.

### 1.2.3. L'univers du très petit

La discussion qui précède vous a probablement fait comprendre que l'univers est extraordinairement grand et extraordinairement vide. En moyenne, il est 10 000 fois plus vide que notre Galaxie. Pourtant, comme nous l'avons vu, même la Galaxie est essentiellement un espace vide. L'air que nous respirons contient environ 10<sup>19</sup> atomes par centimètre cube et nous considérons généralement l'air comme un espace vide. Dans le gaz interstellaire de la Galaxie, il y a environ un atome par centimètre cube. L'espace intergalactique est si peu rempli que pour trouver un atome, il faut en moyenne parcourir un mètre cube d'espace. La majeure partie de l'univers est fantastiquement vide ; les endroits qui sont denses, comme le corps humain, sont extrêmement rares.

Même nos solides les plus familiers sont essentiellement constitués d'espace. Si nous pouvions démonter un tel solide, morceau par morceau, nous finirions par atteindre les minuscules molécules dont il est constitué. Les molécules sont les plus petites particules en lesquelles toute matière peut être divisée tout en conservant ses propriétés chimiques. Une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O), par exemple, est constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène liés ensemble.

Les molécules, quant à elles, sont constituées d'atomes, qui sont les plus petites particules d'un élément qui peuvent encore être identifiées comme cet élément. Par exemple, un atome d'or est le plus petit morceau d'or possible. Près de 100 types différents d'atomes (éléments) existent dans la nature. La plupart d'entre eux sont rares, et seuls quelques-uns représentent plus de 99 % de tout ce avec quoi nous entrons en contact. Les éléments les plus abondants dans le cosmos aujourd'hui sont répertoriés dans le tableau 1.1 ; considérez ce tableau comme les "grands succès" de l'univers en matière d'éléments. Notez que la liste comprend les quatre éléments les plus courants dans la vie sur Terre : l'hydrogène, le carbone, l'azote et l'oxygène.

Élément <sup>1</sup>	symbole	Nombre d'atomes par million d'atomes d'hydrogène
Hydrogène	H	1 000000
Hélium	He	80 000
Carbone	C	450
Azote	N	92
Oxygène	O	740
Néon	Ne	130
Magnésium	Mg	40
Silicium	Si	37
Soufre	S	19
Fer	Fe	32

Tous les atomes sont constitués d'un noyau central, chargé positivement, entouré d'électrons chargés négativement. La majeure partie de la matière de chaque atome se trouve dans le noyau,

## I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon

qui est constitué de protons positifs et de neutrons électriquement neutres, tous étroitement liés les uns aux autres dans un espace très réduit. Chaque élément est défini par le nombre de protons dans ses atomes. Ainsi, tout atome ayant 6 protons dans son noyau s'appelle carbone, tout atome ayant 50 protons s'appelle étain, et tout atome ayant 70 protons s'appelle ytterbium.

*i*

Pour une liste des éléments, voir [l'annexe K](#) ↗ .

La distance entre un noyau atomique et ses électrons est généralement 100 000 fois supérieure à la taille du noyau lui-même. C'est pourquoi nous disons que même la matière solide est principalement de l'espace. L'atome typique est bien plus vide que le système solaire jusqu'à Neptune. La distance entre la Terre et le Soleil, par exemple, n'est que de 100 fois la taille du Soleil. C'est l'une des raisons pour lesquelles les atomes ne ressemblent pas à des systèmes solaires miniatures.

Fait remarquable, les physiciens ont découvert que tout ce qui se passe dans l'univers, du plus petit noyau atomique aux plus grands superamas de galaxies, peut être expliqué par l'action de quatre forces seulement : la gravité, l'électromagnétisme (qui combine les actions de l'électricité et du magnétisme) et deux forces qui agissent au niveau nucléaire. Le fait qu'il y ait quatre forces (et non un million, ou une seule) a intrigué les physiciens et les astronomes pendant de nombreuses années et a conduit à la recherche d'une image unifiée de la nature.

*i*

Lien vers l'apprentissage

Pour construire un atome, particule par particule, consultez cette [animation guidée](#) ↗ pour construire un atome (en anglais).

## Conclusion

Si vous êtes novice en astronomie, vous avez probablement atteint la fin de notre brève visite dans ce chapitre avec des émotions mitigées. D'une part, vous êtes peut-être fasciné par certaines des nouvelles idées que vous avez lues et vous avez peut-être envie d'en savoir plus. D'autre part, vous vous sentez peut-être un peu dépassé par le nombre de sujets que nous avons abordés, et le nombre de nouveaux mots et de nouvelles idées que nous avons introduits. Apprendre l'astronomie, c'est un peu comme apprendre une nouvelle langue : au début, il semble qu'il y ait tellement de nouvelles expressions que vous ne les maîtriserez jamais toutes, mais avec la pratique, vous développerez rapidement une certaine aisance avec elles.

À ce stade, vous vous sentez peut-être un peu petit et insignifiant, éclipsé par les échelles cosmiques de la distance et du temps. Mais il existe une autre façon de considérer ce que vous avez appris de nos premiers aperçus du cosmos. Considérons l'histoire de l'univers depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui et comprimons-la, pour plus de facilité, en une seule année (nous avons emprunté cette idée au livre de Carl Sagan, *Les Dragons d'Eden*, qui a remporté le prix Pulitzer en 1977).

---

1. Cette liste d'éléments est classée dans l'ordre du numéro atomique, qui correspond au nombre de protons dans chaque noyau.

I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon

À cette échelle, le Big Bang s'est produit au premier instant du 1er janvier, et cet instant, où vous lisez ce chapitre, serait la fin de la toute dernière seconde du 31 décembre. Quand d'autres événements du développement de l'univers se sont-ils produits au cours de cette "année cosmique" ? Notre système solaire s'est formé autour du 10 septembre, et les plus anciennes roches que nous pouvons dater sur Terre remontent à la troisième semaine de septembre (*figure 1.15*).

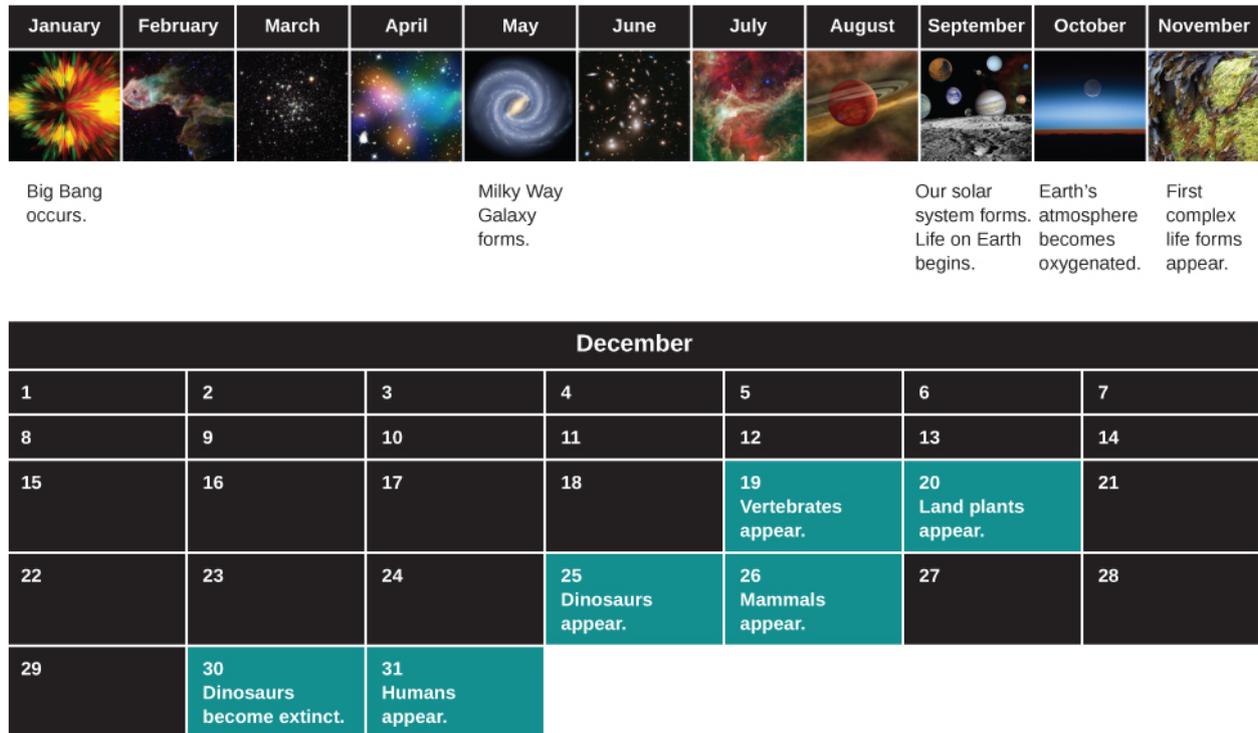


FIGURE I.2.10. – **Figure 1.15. Cartographie du temps cosmique.** Sur un calendrier cosmique, où le temps écoulé depuis le Big Bang est comprimé en un an, les créatures que nous appellerions humaines n'apparaissent pas sur la scène avant le soir du 31 décembre. (crédit : février : modification du travail par la NASA, JPL-Caltech, W. Reach (SSC/Caltech) ; mars : modification du travail par l'ESA, Hubble et la NASA, Remerciements : Giles Chapdelaine ; avril : modification des travaux par la NASA, l'ESA, CFHT, CXO, M.J. Jee (University of California, Davis), A. Mahdavi (San Francisco State University) ; mai : modification des travaux par la NASA, JPL-Caltech ; juin : modification des travaux par la NASA/ESA ; juillet : modification des travaux par la NASA, JPL-Caltech, Harvard-Smithsonian ; août : modification des travaux par la NASA, JPL-Caltech, R. Hurt (SSC-Caltech) ; septembre : modification des travaux par la NASA ; octobre : modification des travaux par la NASA ; novembre : modification des travaux par Dénes Emőke).

Où se situe l'origine des êtres humains au cours de cette année cosmique ? La réponse s'avère être le soir du 31 décembre. L'invention de l'alphabet ne se produit pas avant la cinquantième seconde de 23h59 le 31 décembre. Et les débuts de l'astronomie moderne ne sont qu'une fraction de seconde avant le Nouvel An. Dans un contexte cosmique, le temps dont nous avons disposé pour étudier les étoiles est infime, et le fait que nous ayons réussi à reconstituer une partie de l'histoire est remarquable.

## *I. La science et l'univers : un bref tour d'horizon*

Certes, nos tentatives de compréhension de l'univers ne sont pas complètes. À mesure que de nouvelles technologies et de nouvelles idées nous permettront de recueillir des données de plus en plus nombreuses et de meilleure qualité sur le cosmos, le tableau actuel de l'astronomie subira très probablement de nombreux changements. Néanmoins, en lisant notre rapport d'étape actuel sur l'exploration de l'univers, prenez quelques minutes de temps en temps pour savourer tout ce que vous avez déjà appris.

## Conclusion

Si vous êtes novice en astronomie, vous avez probablement atteint la fin de notre brève visite dans ce chapitre avec des émotions mitigées. D'une part, vous êtes peut-être fasciné par certaines des nouvelles idées que vous avez lues et vous avez peut-être envie d'en savoir plus. D'autre part, vous vous sentez peut-être un peu dépassé par le nombre de sujets que nous avons abordés, et le nombre de nouveaux mots et de nouvelles idées que nous avons introduits. Apprendre l'astronomie, c'est un peu comme apprendre une nouvelle langue : au début, il semble qu'il y ait tellement de nouvelles expressions que vous ne les maîtriserez jamais toutes, mais avec la pratique, vous développez rapidement une certaine aisance avec elles.

À ce stade, vous vous sentez peut-être un peu petit et insignifiant, éclipsé par les échelles cosmiques de la distance et du temps. Mais il existe une autre façon de considérer ce que vous avez appris de nos premiers aperçus du cosmos. Considérons l'histoire de l'univers depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui et comprimons-la, pour plus de facilité, en une seule année (nous avons emprunté cette idée au livre de Carl Sagan, *Les Dragons d'Eden*, qui a reçu le prix Pulitzer en 1977).

À cette échelle, le Big Bang s'est produit au premier instant du 1er janvier, et cet instant, où vous lisez ce chapitre, serait la fin de la toute dernière seconde du 31 décembre. Quand d'autres événements du développement de l'univers se sont-ils produits au cours de cette "année cosmique" ? Notre système solaire s'est formé autour du 10 septembre, et les plus anciennes roches que nous pouvons dater sur Terre remontent à la troisième semaine de septembre (*figure 1.15*).

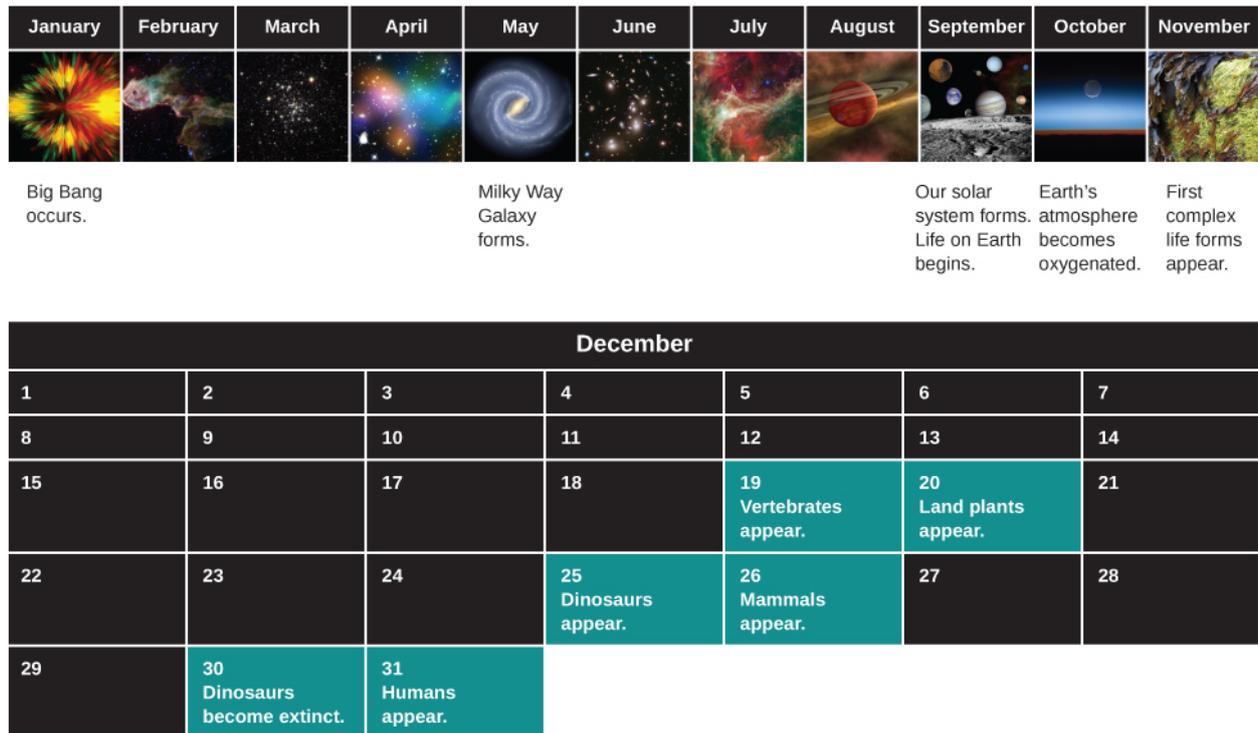


FIGURE I.2.1. – **Figure 1.15 : Graphique du temps cosmique.** Sur un calendrier cosmique, où le temps écoulé depuis le Big Bang est comprimé en un an, les créatures que nous appellerions humaines n'apparaissent pas sur la scène avant le soir du 31 décembre. (crédit : février : modification du travail par la NASA, JPL-Caltech, W. Reach (SSC/Caltech) ; mars : modification du travail par l'ESA, Hubble et la NASA, Remerciements : Giles Chapdelaine ; avril : modification des travaux par la NASA, l'ESA, CFHT, CXO, M.J. Jee (University of California, Davis), A. Mahdavi (San Francisco State University) ; mai : modification des travaux par la NASA, JPL-Caltech ; juin : modification des travaux par la NASA/ESA ; juillet : modification des travaux par la NASA, JPL-Caltech, Harvard-Smithsonian ; août : modification des travaux par la NASA, JPL-Caltech, R. Hurt (SSC-Caltech) ; septembre : modification des travaux par la NASA ; octobre : modification des travaux par la NASA ; novembre : modification des travaux par Dénes Emőke).

Où se situe l'origine des êtres humains au cours de cette année cosmique ? La réponse s'avère être le soir du 31 décembre. L'invention de l'alphabet ne se produit pas avant la cinquantième seconde de 23h59 le 31 décembre. Et les débuts de l'astronomie moderne ne sont qu'une fraction de seconde avant le Nouvel An. Dans le contexte cosmique, le temps dont nous avons disposé pour étudier les étoiles est infime, et le fait que nous ayons réussi à reconstituer une grande partie de l'histoire est remarquable.

Il est certain que nos tentatives de compréhension de l'univers ne sont pas terminées. À mesure que de nouvelles technologies et de nouvelles idées nous permettront de recueillir des données de plus en plus nombreuses et de meilleure qualité sur le cosmos, notre image actuelle de l'astronomie subira très probablement de nombreux changements. Néanmoins, en lisant notre rapport d'étape actuel sur l'exploration de l'univers, prenez quelques minutes de temps en temps pour savourer tout ce que vous avez déjà appris.

## Deuxième partie

### Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

## Introduction



FIGURE 1. – **Figure 2.1 : Le ciel de nuit.** Sur cette photographie du ciel nocturne du désert d’Atacama au Chili, vous pouvez voir le centre de la Voie Lactée – notre galaxie – s’arquer au centre de l’image. À gauche, le Grand Nuage de Magellan et le Petit Nuage de Magellan, de petites galaxies en orbite autour de la Voie Lactée, qui sont facilement visibles depuis l’hémisphère Sud. (Crédit : adaptation d’un travail de l’ESO / Y. Beletsky).

À votre grande surprise, un membre de la *Flat Earth Society*<sup>1</sup> emménage à côté de chez vous. Il croit que la Terre est plate et que toutes les images vues de l’espace d’une Terre sphérique sont soit des faux, soit montrent le disque rond (mais plat) de la Terre vu du dessus. Comment pouvez-vous prouver à votre voisin que la Terre est réellement sphérique ? Réfléchissez à ceci par vous-même ; vous trouverez des suggestions de réponse plus loin dans ce chapitre.

Aujourd’hui, peu de gens passent beaucoup de temps à regarder le ciel la nuit. Autrefois, avant que les lumières électriques privent tant de monde de la beauté du ciel, les étoiles et planètes avaient un rôle important dans la vie quotidienne. Tous les écrits qui nous sont parvenus – sur papier comme sur pierre – montrent que les civilisations antiques avaient remarqué, adoré et tenté d’expliquer les lumières dans le ciel, et les incluaient à leurs conceptions du monde. Ces observateurs antiques ont remarqué à la fois la régularité majestueuse et les surprises sans fin des mouvements célestes. À travers leur étude minutieuse des planètes, les Grecs puis les Romains posèrent les fondations d’une science : l’astronomie.

---

1. Littéralement « Société de la Terre Plate », une organisation qui soutient l’idée que la Terre est plate. [Plus d’informations sur Wikipédia](#) [↗](#).

## II.1. Le ciel, au-dessus de nos têtes

### Introduction

*i*

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez capable de :

- Définir les caractéristiques principales de la sphère céleste ;
- Expliquer le système utilisé par les astronomes pour décrire le ciel ;
- Expliquer le mouvement apparent des étoiles depuis la Terre ;
- Expliquer les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes depuis la Terre ;
- Comprendre le sens moderne du terme *constellation*.

Nos sens nous suggèrent que la Terre est le centre de l'univers – le moyeu autour duquel tournent les cieux. Cette approche **géocentrique** (centrée sur la Terre) étaient crue par presque tout le monde avant la Renaissance : après tout, c'est simple, logique et d'apparence évident. En outre, la perspective géocentrique renforçait les systèmes philosophiques et religieux qui enseignaient le rôle unique de l'être humain comme centre du cosmos. Toutefois, l'approche géocentrique se révéla fausse. L'un des grands thèmes de notre histoire intellectuelle est l'abandon de la perspective géocentrique. Examinons donc les étapes par lesquelles nous avons réévalué la place de notre monde dans l'ordre cosmique.

#### II.1.1. La sphère céleste

Si vous partez à la campagne ou vivez loin des lumières des villes, votre perception du ciel par une nuit claire est proche de celle que pouvaient en avoir les gens, partout dans le monde, avant l'invention du télescope. En regardant vers le haut, vous avez l'impression que le ciel est un immense dôme creux avec vous au centre (*figure 2.2*), et que toutes les étoiles sont à la même distance de vous, à la surface du dôme. Le haut de ce dôme – le point directement au-dessus de votre tête – est appelé le **zénith**, et l'**horizon** est là où le dôme rencontre la Terre. Sur la mer ou dans une plaine plate, vous pouvez facilement constater que l'horizon forme un cercle autour de vous ; mais très souvent l'horizon est partiellement masqué par des montagnes, des arbres, des bâtiments ou de la brume.

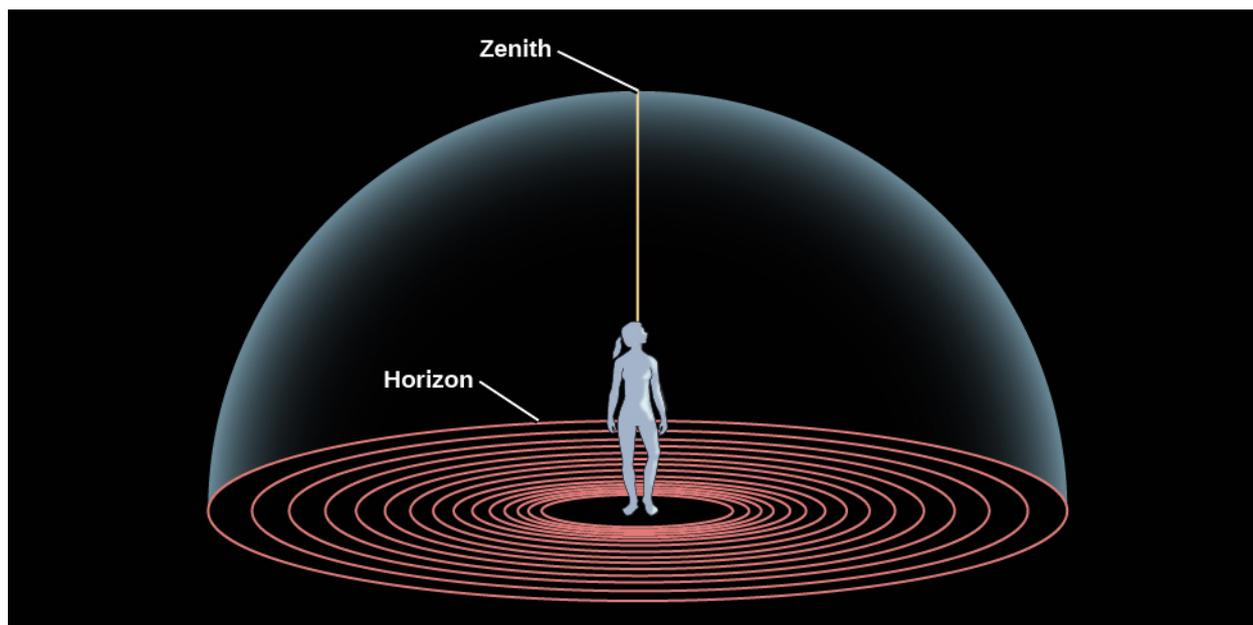


FIGURE II.1.1. – **Figure 2.2 : Autour de nous, le ciel.** L'horizon est là où le ciel rencontre la terre ; le zénith est le point directement au-dessus de la tête de l'observateur.

Si vous vous allongez dans un lieu découvert et observez le ciel nocturne pendant des heures, comme le faisaient régulièrement les bergers et voyageurs antiques, vous verrez les étoiles se lever sur l'horizon est (comme le font le Soleil et la Lune), et se coucher sur l'horizon ouest. En regardant le ciel tourner ainsi, nuit après nuit, vous pourriez finalement concevoir que le dôme céleste est en réalité une portion d'une vaste sphère qui vous tourne autour et vous montre différentes étoiles au cours de sa révolution. Les Grecs anciens considéraient le ciel comme une **sphère céleste** (*figure 2.3*). Certains y pensaient comme à une sphère réellement faite d'un matériau cristallin transparent, dans lequel les étoiles auraient été incluses comme de minuscules bijoux.

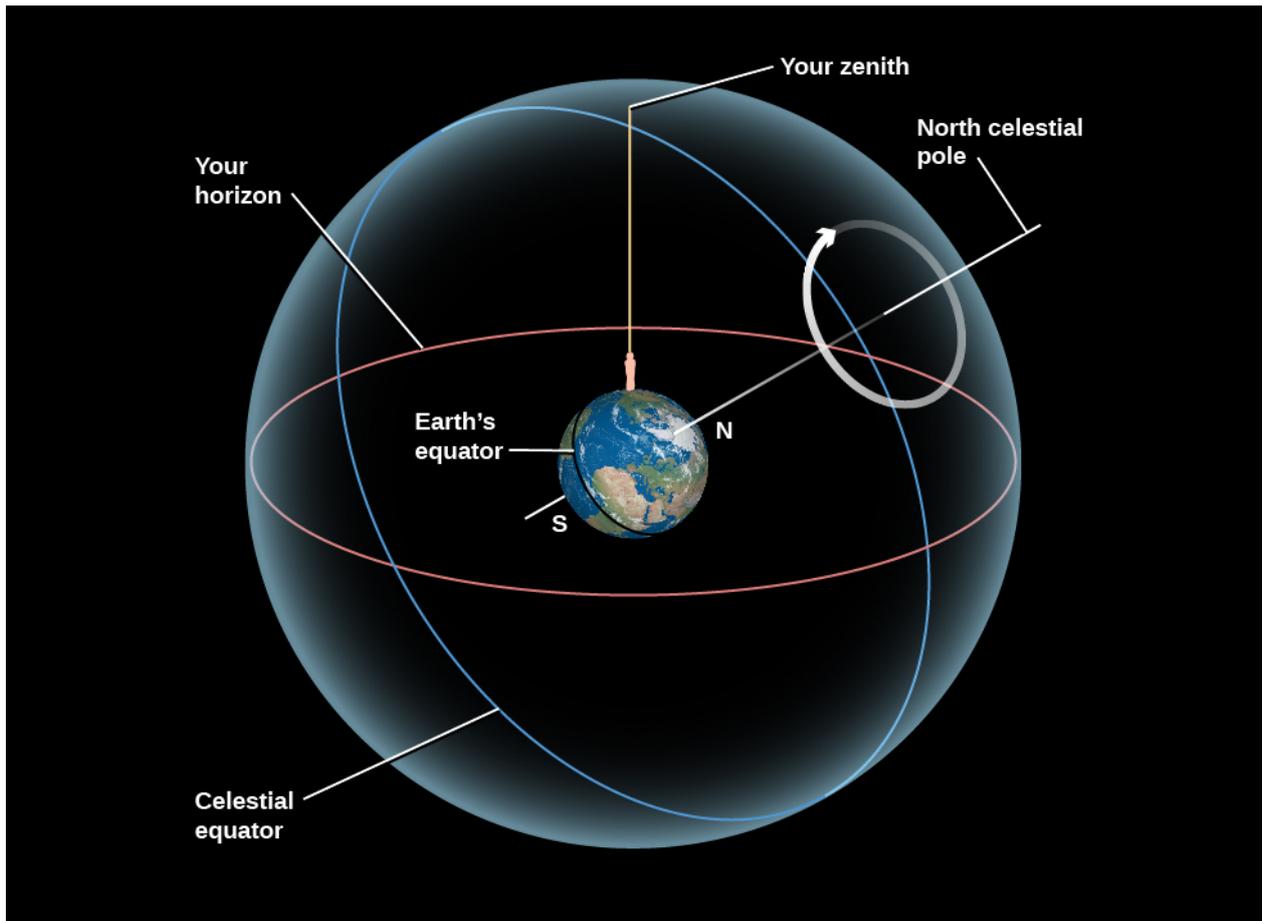


FIGURE II.1.2. – **Figure 2.3 : Les cercles sur la sphère céleste.** Voici une représentation de la sphère céleste (imaginaire) autour de la Terre. Elle lui tourne autour sur son axe, et des objets y sont fixés. En réalité, c'est la Terre qui tourne autour de cet axe, ce qui crée l'illusion que le ciel nous tourne autour. Notez que, sur cette image, la Terre a été inclinée de façon à ce que l'observateur soit en haut et le pôle Nord est indiqué par la lettre N. Le mouvement apparent des objets célestes dans le ciel, autour du pôle, est indiqué par la flèche circulaire.

Aujourd'hui, nous savons que ça n'est pas la sphère céleste qui tourne au fil du jour et de la nuit, mais plutôt la planète sur laquelle nous vivons. Nous pouvons planter un bâton imaginaire du pôle Nord au pôle Sud, qui représenterait l'axe de notre planète. C'est parce que la Terre tourne autour de cet axe en 24 heures que nous voyons le Soleil, la Lune et les étoiles se lever et se coucher avec une régularité d'horloge. Aujourd'hui, nous savons que les objets célestes ne sont pas fixés sur un dôme, mais dispersés dans l'espace sur des distances très différentes. Néanmoins, il est parfois toujours utile de parler du dôme ou de la sphère céleste, pour nous aider à suivre les trajectoires d'objets dans le ciel. C'est particulièrement vrai dans des salles spéciales, appelées *planétariums*, dans lesquelles on projette une simulation des étoiles et des planètes sur un écran hémisphérique blanc.

Comme la sphère céleste tourne, les objets qu'elle porte conservent leurs positions respectives, les uns par rapport aux autres. Un groupe d'étoiles comme la Grande Ourse a la même forme au cours de la nuit, même s'il tourne dans le ciel. Au cours d'une seule nuit, même les objets dont nous savons qu'ils ont des mouvements propres significatifs, comme les planètes proches, semblent fixes par rapport aux étoiles. Seuls les météores – de brèves « étoiles filantes » qui

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

apparaissent seulement quelques secondes – se déplacent sensiblement par rapport aux autres objets de la sphère céleste<sup>1</sup>. Nous pouvons utiliser le fait que la sphère céleste entière semble tourner d'une pièce pour définir un système permettant de noter ce qui sera visible, où et à quel moment, dans le ciel.

### II.1.2. Les pôles célestes et l'équateur céleste

Pour nous aider à nous repérer dans ce ciel en rotation permanente, les astronomes utilisent un système qui étend le système de coordonnées de la Terre dans le ciel. Imaginez une ligne qui traverse la Terre en connectant les pôles Nord et Sud. C'est l'axe de la Terre, et la Terre tourne autour de cet axe. Si nous étendons cette ligne imaginaire au-delà de la Terre, les deux points où elle croise la sphère céleste sont appelés le *pôle Nord céleste* et *pôle Sud céleste*. Comme la Terre tourne autour de cet axe, le ciel semble tourner en sens contraire autour de ces **pôles célestes** (*figure 2.4*). Nous projetons aussi (dans notre imagination) l'équateur terrestre sur le ciel et l'appelons **équateur céleste**. Il est à mi-distance des pôles célestes, tout comme l'équateur terrestre est à mi-distance des pôles de notre planète.



FIGURE II.1.3. – **Figure 2.4 : Encercler le pôle céleste Sud.** Cette photo à longue exposition montre les traces laissées par le mouvement apparent des étoiles autour du pôle céleste Sud. En réalité, c'est la Terre qui tourne. (*Crédit : ESO / Itzok Bončina*)

Il est temps d'imaginer comment notre position à différents endroits du globe terrestre affecte notre perception du ciel. Le mouvement apparent de la sphère céleste dépend de votre latitude (la position au nord ou au sud de l'équateur). Tout d'abord, notez que l'axe de la Terre pointe les pôles célestes, et donc que ces deux points du ciel ne semblent pas tourner.

---

1. Ce ne sont pas du tout des étoiles ; plutôt des petits morceaux de poussière cosmique qui brûlent lors de leur rentrée dans l'atmosphère terrestre.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Si vous vous teniez au pôle terrestre Nord, par exemple, vous verrez le pôle Nord céleste au-dessus de votre tête, à votre zénith. L'équateur céleste, à  $90^\circ$  des pôles célestes, se trouverait sur l'horizon. Si vous regardiez les étoiles au cours de la nuit, vous les verriez tourner autour du pôle céleste, sans qu'aucune ne se lève ni se couche. De la même manière, un observateur au pôle Sud ne verrait que la moitié sud du ciel.

D'autre part, si vous étiez à l'équateur, vous verriez l'équateur céleste (qui n'est, après tout, qu'une « extension » de l'équateur terrestre) passer directement au-dessus de votre tête, au zénith. Les pôles célestes, à  $90^\circ$  de l'équateur céleste, seraient aux points nord et sud de votre horizon. Lorsque le ciel tournerait, toutes les étoiles se lèveraient et se coucheraient ; elles se déplaceraient tout droit depuis le côté est de l'horizon et se coucheraient droit sur son côté ouest. Pendant une période de 24 heures, toutes les étoiles seraient au-dessus de l'horizon exactement la moitié du temps. Évidemment, pendant certaines de ces heures, le soleil serait trop brillant pour que nous puissions voir toutes ces étoiles.

Pour un observateur à  $38^\circ$  N de latitude, le pôle céleste Sud est  $38^\circ$  sous l'horizon sud, et donc n'est jamais visible. Pour cet observateur, les étoiles à moins de  $38^\circ$  du pôle Nord ne peuvent jamais se coucher : elles sont toujours au-dessus de l'horizon, nuit et jour. Cette portion du ciel est appelée la **zone circumpolaire** nord. Pour des observateurs en Europe, la Grande Ourse, la Petite Ourse et Cassiopée<sup>1</sup> sont des exemples de groupes d'étoiles de la zone circumpolaire nord. D'un autre côté, les étoiles à moins de  $38^\circ$  du pôle céleste Sud ne se lèvent jamais : cette partie du ciel est la zone circumpolaire sud. Pour les observateurs en Europe, la Croix du Sud<sup>1</sup> est dans cette zone.

En ce moment précis de l'histoire de la Terre, il se trouve qu'il y a une étoile très proche du pôle céleste Nord. Elle est appelée l'Étoile Polaire (ou Polaris), et se distingue comme étant l'étoile qui bouge le moins pendant la rotation quotidienne du ciel septentrional. Comme elle bouge très peu alors que les autres étoiles bougent beaucoup, elle joue un rôle spécial dans la mythologie de plusieurs tribus autochtones d'Amérique du Nord.

### Les bases de l'astronomie

#### II.1.2.0.1. Quel est ton angle ?

Les astronomes utilisent des angles pour mesurer la distance apparente entre les objets du ciel. Par définition, il y a  $360^\circ$  dans un cercle, donc un grand cercle de la sphère céleste contient  $360^\circ$ . La demi-sphère ou dôme du ciel contient  $180^\circ$  d'un horizon à l'horizon opposé. Ainsi, si deux étoiles sont éloignées de  $18^\circ$ , elles apparaissent éloignées d'un dixième du dôme du ciel. Pour vous donner une idée de la taille d'un degré, la pleine Lune est large d'environ un demi-degré. C'est à peu près la largeur de votre petit doigt vu bras tendu.

### II.1.3. Lever et coucher du Soleil

Nous avons décrit le mouvement des étoiles dans le ciel nocturne, mais qu'en est-il du jour ? Les étoiles continuent à tourner, mais la luminosité du Soleil les rend difficiles à voir. La Lune, elle, est souvent visible en journée. Pour n'importe quel jour donné, nous pouvons penser que

1. Ne vous inquiétez pas si vous n'êtes pas familiers avec les groupes d'étoiles mentionnés, ils seront introduits plus formellement plus tard.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

le Soleil est à une certaine position de l'hypothétique sphère céleste. Quand le Soleil se lève – c'est-à-dire : quand la rotation de la Terre amène le Soleil au-dessus de l'horizon – la lumière solaire est dispersée par les molécules de notre atmosphère, ce qui remplit le ciel de lumière et cache les étoiles au-dessus de l'horizon.

Depuis des milliers d'années, les astronomes sont conscients que le Soleil ne se contente pas de se lever et de se coucher. Il change graduellement de position sur la sphère céleste, un déplacement d'environ  $1^\circ$  par jour vers l'Est par rapport aux étoiles. Il est possible que nos ancêtres pensaient que le Soleil tournait lentement autour de la Terre et mettait une période appelée **un an** pour faire un tour complet. Aujourd'hui, évidemment, nous savons que la Terre tourne autour du Soleil, mais l'effet est le même : la position du Soleil change chaque jour. Nous pouvons faire une expérience similaire en marchant autour d'un feu de camp la nuit : nous voyons les flammes apparaître devant chaque personne assise au tour du feu à tour de rôle.

Le trajet annuel que le Soleil semble faire autour de la sphère céleste est appelé **l'écliptique** (Figure 2.6). À cause de son mouvement sur l'écliptique, le Soleil se lève environ 4 minutes plus tard chaque jour par rapport aux étoiles. La Terre doit faire un petit peu plus d'un tour complet (par rapport aux étoiles) pour rattraper à nouveau le Soleil.

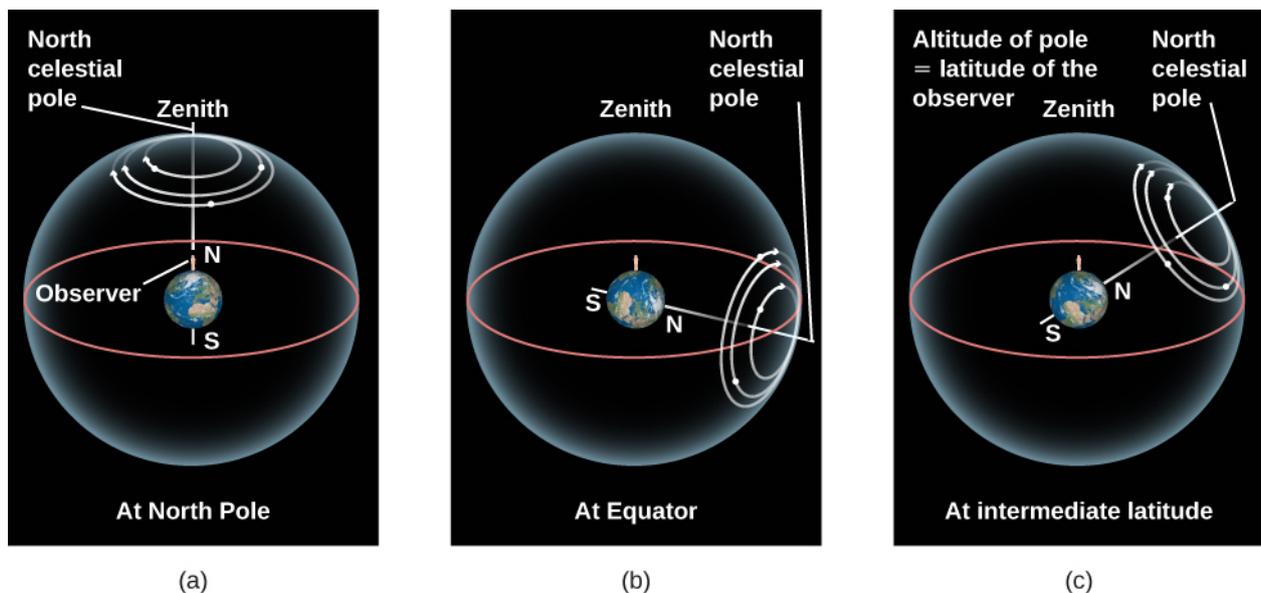


FIGURE II.1.4. – **Figure 2.5 : Cercles stellaires à différentes latitudes.** La rotation du ciel semble différente selon votre latitude sur Terre. Dans chaque cas, le cercle rouge est votre horizon, et le zénith le point au-dessus de votre tête. (a) Au pôle Nord, les étoiles tournent autour du zénith et ne se lèvent ou ne se couchent jamais. (b) À l'équateur, les pôles célestes sont sur l'horizon, et les étoiles se lèvent et se couchent « verticalement ». (c) Aux latitudes intermédiaires, le pôle nord est quelque part entre le zénith et l'horizon. Son angle à l'horizon est égal à la latitude de l'observateur. Les étoiles se lèvent et se couchent en formant un angle avec l'horizon.

Au fur et à mesure du passage des mois, nous voyons le Soleil depuis différents points de notre orbite ; ainsi nous le voyons projeté depuis ces points et donc sur différentes étoiles à l'arrière-plan (Figure 2.6 et Table 2.1) – ou tout du moins nous le verrions, si nous pouvions voir les étoiles de jour. En pratique, nous devons déduire quelles étoiles se trouvent derrière le

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Soleil par l'observation des étoiles visibles dans la direction opposée, la nuit. Un an plus tard, lorsque la Terre a complété un tour autour du Soleil, celui-ci nous apparaît avoir complété un tour dans le ciel, le long de l'écliptique.

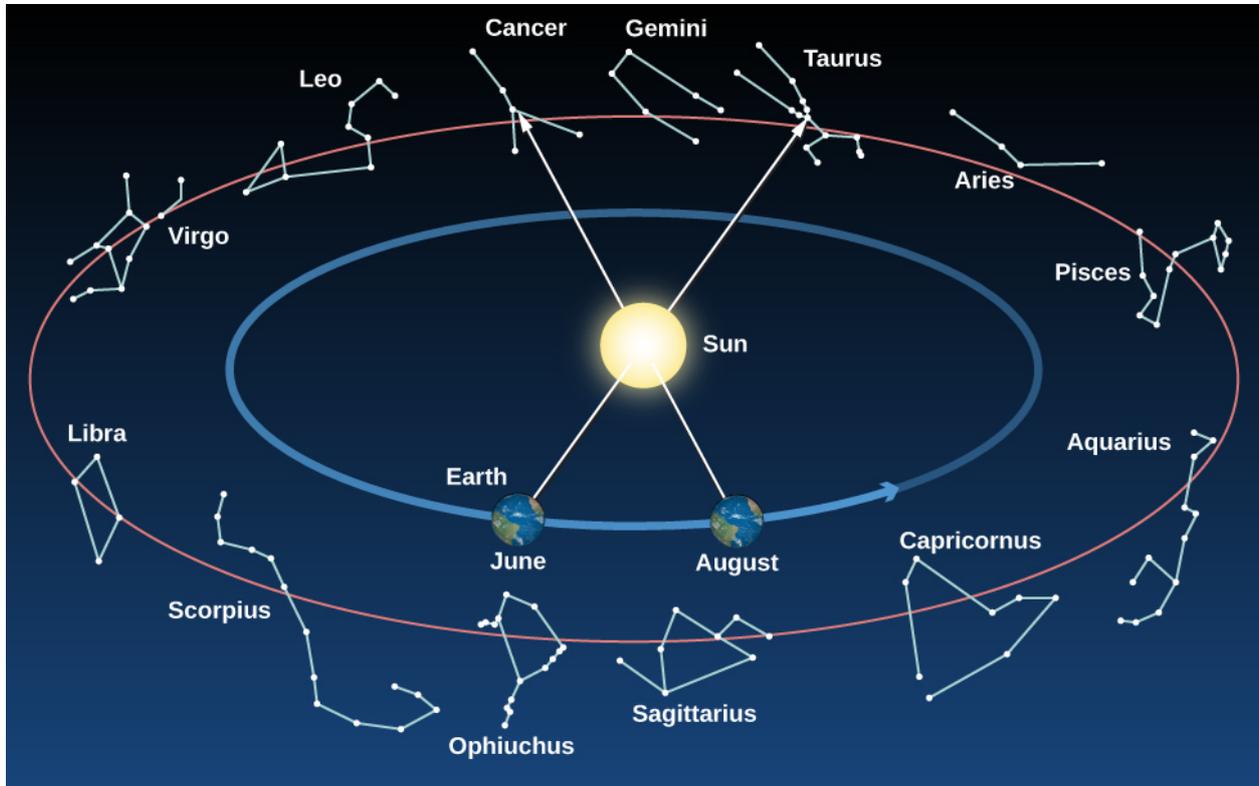


FIGURE II.1.5. – **Figure 2.6 : Constellations de l'écliptique.** Comme la Terre tourne autour du Soleil, nous sommes sur la « plateforme Terre » et voyons le Soleil se déplacer dans le ciel. Le cercle que le Soleil semble faire autour de nous pendant sa course annuelle est appelée *l'écliptique*. Ce cercle (comme tous les cercles célestes) travers un ensemble de constellations. Nos ancêtres pensaient que ces constellations visitées par le Soleil, la Lune et les planètes, devaient être spéciales et ont été incorporées dans leurs systèmes d'astrologie. Notez que, quelle que soit l'époque de l'année, certaines de ces constellations sont visibles dans le ciel nocturne, tandis que d'autres sont dans le ciel diurne et donc sont masquées par la brillance du Soleil. Le terme « constellation » sera défini plus précisément dans la section suivante.

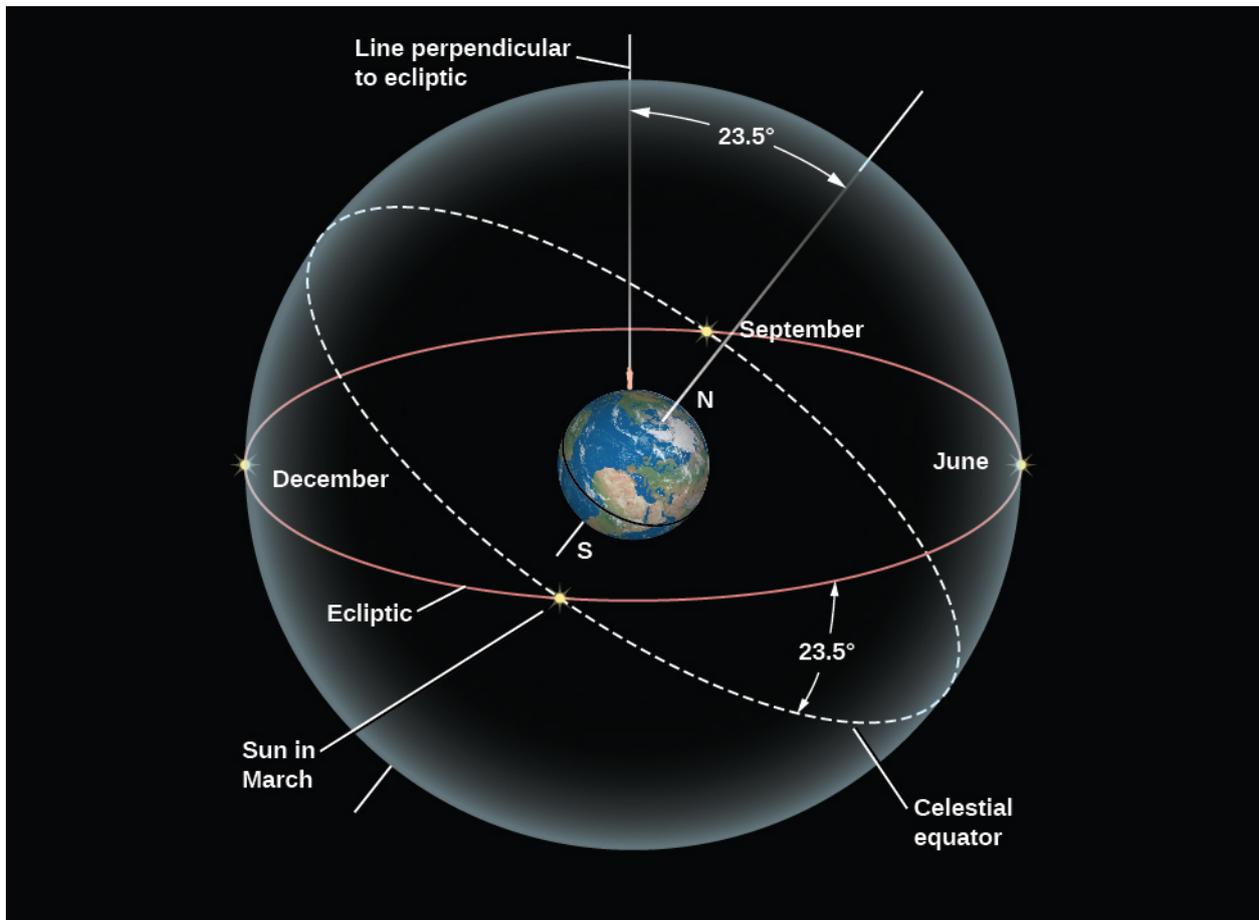
Constellations de l'écliptique	Entrée du Soleil	Sortie du Soleil
Capricorne	21 janvier	16 février
Verseau	16 février	11 mars
Poissons	11 mars	18 avril
Bélier	18 avril	13 mai
Taureau	13 mai	22 juin

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Gémeaux	22 juin	21 juillet
Cancer	21 juillet	10 août
Lion	10 août	16 septembre
Vierge	16 septembre	31 octobre
Balance	31 octobre	23 novembre
Scorpion	23 novembre	29 novembre
Ophiuchus <sup>1</sup>	29 novembre	18 décembre
Sagittaire	18 décembre	21 janvier

TABLE II.1.2. – Table 2.1 : Constellations de l'écliptique

L'écliptique n'est pas aligné avec l'équateur céleste, mais est inclinée d'environ  $23,5^\circ$ . En d'autres termes, le trajet annuel du Soleil dans le ciel n'est pas lié à l'équateur terrestre. Ceci s'explique par le fait que l'axe de rotation de notre planète est incliné d'environ  $23,5^\circ$  par rapport à une ligne perpendiculaire à l'écliptique (*Figure 2.7*). Cette inclinaison est commune chez les corps célestes ; Uranus et Pluton sont en fait si inclinés qu'ils orbitent « sur leur tranche » autour du Soleil.



1. Ou Serpenteaire

FIGURE II.1.6. – **Figure 2.7 : L'inclinaison de l'axe.** L'équateur céleste est incliné de  $23,5^\circ$  par rapport à l'écliptique. Ainsi, les habitants de l'hémisphère Nord voient le Soleil au nord de l'équateur céleste et haut dans le ciel en juin, et au sud de l'équateur céleste et bas dans le ciel en décembre.

L'inclinaison de l'écliptique est la raison du déplacement du Soleil du nord au sud dans le ciel au cours des saisons. Dans le chapitre [La Terre, la Lune et le Ciel](#) [↗](#), nous étudierons plus en détail le fonctionnement des saisons.

## II.1.4. Étoiles fixes et vagabondes

Le Soleil n'est pas le seul objet qui se déplace parmi les étoiles fixes. La Lune et toutes les planètes visibles à l'œil nu – Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne et Uranus<sup>1</sup> – voient aussi leurs positions changer lentement de jour en jour. Au cours d'une journée, la Lune et les planètes se lèvent et se couchent avec la rotation de la Terre, tout comme le font le Soleil et les étoiles. Mais comme le Soleil, elles possèdent un mouvement indépendant par rapport aux étoiles, superposé à la rotation quotidienne de la sphère céleste. C'est en remarquant ces mouvements que les Grecs, il y a 2000 ans, ont distingué ce qu'ils ont appelé les *étoiles fixes* – celles qui conservaient leurs positions entre elles à travers les générations – des *étoiles vagabondes*, ou **planètes**. Le mot « planète » signifie d'ailleurs « vagabond » en grec ancien.

Aujourd'hui, nous ne considérons plus la Lune et le Soleil comme des planètes ; mais nos ancêtres appliquaient ce terme aux sept objets mouvants du ciel. Une grande partie de l'astronomie antique était dédiée à l'observation et à la prédiction des mouvements de ces vagabonds célestes. La Lune, plus proche voisine de la Terre, a le mouvement apparent le plus rapide : elle termine un tour complet dans le ciel en environ un mois<sup>2</sup>. Pour ce faire, la Lune se déplace chaque jour dans le ciel d'environ  $12^\circ$ , soit 24 fois son diamètre apparent.

### Exemple 2.1

#### II.1.4.0.1. Angles dans le ciel

Un cercle est divisé en 360 degrés ( $^\circ$ ). Lorsque nous mesurons l'angle parcouru dans le ciel par quelque chose qui se déplace, nous pouvons utiliser cette formule :

$$\text{vitesse} = \frac{\text{distance}}{\text{temps}}$$

Cette formule est vraie que le déplacement soit mesuré en kilomètres par heure ou en degrés par heure, tant que nous utilisons des unités cohérentes.

Prenons un exemple : disons que vous remarquez la très brillante étoile Sirius, pile au Sud de votre lieu d'observation, dans l'hémisphère nord. Vous notez l'heure, et plus tard vous notez l'heure à laquelle Sirius se couche sous l'horizon. Vous remarquez que Sirius a parcouru une distance angulaire d'environ  $75^\circ$  en 5 heures. Combien de temps mettra Sirius à revenir à sa place d'origine ?

1. Uranus est tout juste observable dans les meilleures conditions.

2. C'est l'une des définitions – mais pas la seule – d'un « mois lunaire ».

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

### II.1.4.0.2. Solution

La vitesse de Sirius est  $\frac{75^\circ}{5\text{h}} = \frac{15^\circ}{1\text{h}}$ . Si nous voulons calculer le temps nécessaire à Sirius pour retrouver sa position d'origine dans le ciel, nous devons attendre qu'elle ait fait un tour complet, soit  $360^\circ$ . En réarrangeant la formule de la vitesse ci-dessus, nous trouvons :

$$\text{temps} = \frac{\text{distance}}{\text{vitesse}} = \frac{360^\circ}{15^\circ/\text{h}} = 24\text{h}$$

Le temps réel est plus court de quelques minutes. Nous verrons pourquoi dans un chapitre ultérieur.

### II.1.4.0.3. Vérifiez vos connaissances

La Lune bouge dans le ciel, par rapport aux étoiles en arrière-plan (en plus du mouvement des étoiles qui résulte de la rotation de la Terre). Sortez par une nuit claire et notez la position de la Lune par rapport aux étoiles proches. Répétez l'opération quelques heures plus tard. De combien la Lune s'est-elle déplacée ? Pour référence, le diamètre de la Lune est d'environ  $0,5^\circ$ .

Suivant votre estimation du mouvement, combien de temps va mettre la Lune à revenir à sa position par rapport aux étoiles où vous l'avez observée la première fois ?

☉ Réponse

Les trajectoires individuelles de la Lune et des planètes dans le ciel sont toutes proches de l'écliptique, quoique pas exactement sur celle-ci. Ceci s'explique par le fait que les trajectoires des planètes autour du Soleil, et de la Lune autour de la Terre, sont presque toutes dans le même plan, comme si elles étaient des cercles sur une très grande feuille de papier. Les planètes, le Soleil et la Lune se trouvent toutefois dans une ceinture étroite de  $18^\circ$  de large, centrée sur l'écliptique, appelée le **zodiaque** (*Figure 2.6*). La racine du mot « zodiaque » est la même que celle du mot « zoo » et désigne une collection d'animaux ; de nombreux motifs d'étoiles dans la ceinture du zodiaque rappelaient aux anciens des animaux, comme un poisson ou une chèvre. Le mouvement des planètes dans le ciel au cours des mois est une combinaison de leurs mouvements propres et de celui de la Terre autour du Soleil ; par conséquent, ces mouvements sont plutôt complexes. Comme nous le verrons, cette complexité a fasciné les astronomes pendant des siècles.

## II.1.5. Constellations

La toile de fond des mouvements des « vagabonds » céleste est la voûte étoilée. Dans une plaine dégagée, par une nuit sans nuage, nous pouvons voir environ 3000 étoiles à l'œil nu. Pour trouver leur chemin dans cette multitude, nos ancêtres ont créé des groupements d'étoiles, en fonction de figures géométriques familières ou – plus rarement – de ressemblances avec des choses qu'ils connaissaient. Chaque civilisation a défini ses propres groupements d'étoiles, à l'image des tests

---

3. (*The root of the term “zodiac” is the same as that of the word “zoo” and means a collection of animals ; many of the patterns of stars within the zodiac belt reminded the ancients of animals, such as a fish or a goat.*)  
-> TODO vérifier cette affirmation

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

de Rorschach modernes dans lesquels vous devez voir des motifs ou des images dans un ensemble de taches d'encre. Les anciens Chinois, Égyptiens, Grecs, entre autres, ont chacun défini leurs propres groupes – ou constellations – d'étoiles. Elles leur ont été utiles pour aider à la navigation et transmettre les connaissances sur les étoiles à leurs enfants.

Vous êtes peut-être familier avec quelques-uns de ces anciens motifs, toujours en usage aujourd'hui, comme la Grande Ourse, la Petite Ourse, ou le chasseur Orion et sa reconnaissable ceinture de trois étoiles (*Figure 2.8*). Toutefois, beaucoup des étoiles visibles sont exclues des motifs reconnaissables d'étoiles, et un télescope révèle des millions d'étoiles trop faibles pour être visibles à l'œil nu. C'est pourquoi, dans les premières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle, les astronomes du monde entier ont décidé d'établir un système plus formel d'organisation du ciel.

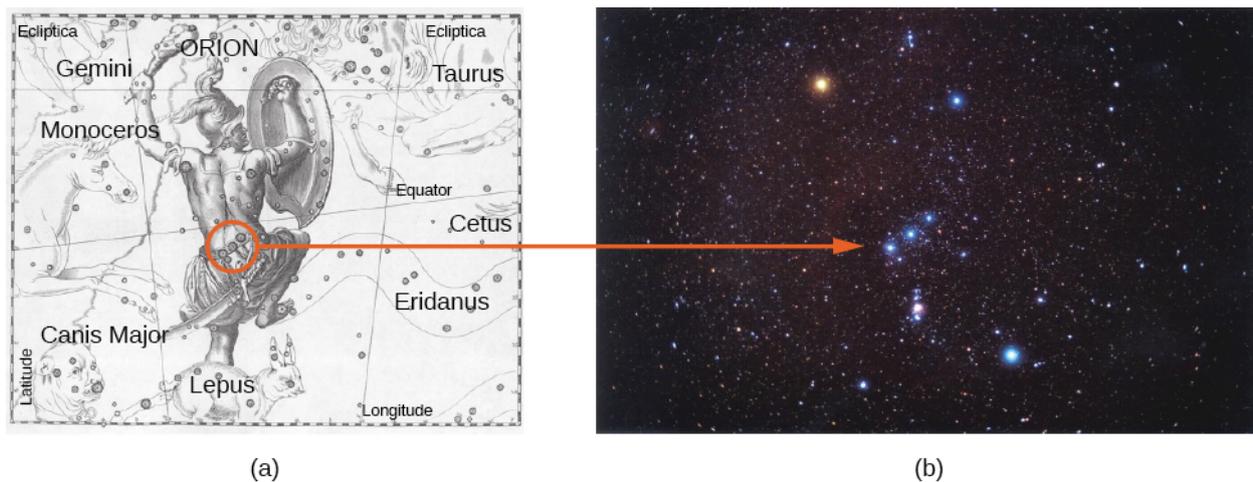


FIGURE II.1.7. – **Figure 2.8 : Orion.** (a) La constellation d'hiver Orion, le chasseur, est entourée par des constellations voisines, comme illustré par cet atlas d'Hevelius du dix-septième siècle. (b) Cette photographie montre la région d'Orion dans le ciel. Les trois étoiles bleues constituent la ceinture d'Orion. L'étoile brillante rouge au-dessus de la ceinture est son aisselle, et est appelée Bételgeuse. L'étoile brillante bleue sous la ceinture est son pied et s'appelle Rigel. (*Crédits : (a) Une modification d'un travail de Johannes Hevelius ; (b) une modification d'un travail de Matthew Spinelli*).

Aujourd'hui, nous utilisons le terme *constellation* pour désigner l'un des 88 secteurs par lesquels nous divisons le ciel – un peu de la manière dont l'Union Européenne est divisée en 27 états. Les frontières modernes entre les constellations sont des lignes imaginaires dans le ciel, courant dans les directions nord-sud et est-ouest, de façon à ce que chaque point du ciel soit dans une constellation. Cependant, comme les états, les constellations sont de tailles différentes. Toutes les constellations modernes sont listées dans l'article Wikipedia "[Liste des constellations](#)". Beaucoup de ces constellations sont nommées d'après les motifs connus des Grecs anciens qu'elles contiennent<sup>1</sup>. Ainsi, la constellation moderne d'Orion est une sorte de boîte dans le ciel, qui contient parmi beaucoup d'autres objets, les étoiles que nos ancêtres dépeignaient comme la figure du chasseur. Certaines personnes utilisent le terme d'*astérisme* pour désigner un motif très reconnaissable à l'intérieur d'une constellation – et parfois à cheval sur plusieurs d'entre elles. Par exemple, la grande casserole est un astérisme de la grande ourse.

1. La francophonie utilise les traduction françaises des noms des motifs des Grecs anciens (*la grande ourse, le petit chien, l'aigle...*) ; le monde anglo-saxon utilise lui les versions *latines* de ces mêmes noms (respectivement : *Ursa Major, Canis Minor, Aquila*).

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Les constellations ressemblent rarement aux personnes ou animaux d'après lesquelles elles sont nommées, ce qui peut rendre perplexe. Il est peu probable que les Grecs anciens eux-mêmes n'ont pas nommé les groupes d'étoiles ainsi parce qu'ils ressemblent des personnes ou des sujets réels. Ils ont plutôt nommé ces parties du ciel en l'honneur de personnages de leur mythologie, puis créé les groupements d'étoiles autour de ces noms du mieux qu'ils ont pu.

### Des liens pour apprendre

Cette [carte du ciel détaillée interactive](#) [↗](#) (*français disponible dans le menu en haut à gauche*) montre l'emplacement du Soleil, de la Lune, des planètes, des étoiles, des constellations et même des satellites, et donne des informations à leur sujet. Commencez par définir votre site d'observation en utilisant les options du menu en haut à droite. L'excellent site [Figures in the Sky](#) [↗](#) (*en anglais uniquement*) montre les constellations telles qu'imaginées par les différentes cultures autour du monde.

## Contenu masqué

### Contenu masqué n°3 :

#### Réponse

La vitesse de la Lune est de  $0,5^\circ / 1 \text{ h}$ . Pour parcourir intégralement les  $360^\circ$ , la Lune a besoin de 720 h :  $\frac{0,5^\circ}{1\text{h}} = \frac{360^\circ}{720\text{h}}$ . Diviser 720 h par un facteur de conversion de 24 heures par jour nous montre que ce cycle lunaire est d'environ 30 jours. [Retourner au texte.](#)

## II.2. L'astronomie antique

### Introduction

*i*

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez capables de :

- Donner des exemples des commencements de l'astronomie ;
- Expliquer comment les astronomes grecs ont déduit que la Terre est sphérique ;
- Expliquer comment les astronomes grecs ont calculé la taille de la Terre ;
- Expliquer le mouvement terrestre appelé « précession » ;
- Décrire le système de mouvements planétaires géocentrique de Ptolémée.

Maintenant, revenons brièvement sur l'Histoire. Une grande part des civilisations occidentales modernes sont fondées, d'une façon ou d'une autre, sur les idées des Grecs et Romains antiques ; et c'est vrai pour l'astronomie. Cependant, beaucoup d'autres cultures antiques ont aussi développé des systèmes sophistiqués d'observation et d'interprétation du ciel.

### II.2.1. L'astronomie autour du monde

Les astronomes antiques babyloniens, assyriens et égyptiens connaissaient la durée approximative de l'année. Les Égyptiens, par exemple, ont adopté il y a 3000 ans un calendrier basé sur une année de 365 jours. Ils suivaient avec attention le moment de lever avant l'aube de l'étoile Sirius, qui a un cycle annuel correspondant à l'inondation du Nil. Les Chinois avaient aussi un calendrier fonctionnel ; ils ont déterminé la durée de l'année à la même période que les Égyptiens. Les Chinois ont aussi noté des comètes, des météores brillants et les taches sombres du Soleil<sup>1</sup>. Plus tard, les astronomes Chinois ont conservé des enregistrements détaillés d'« étoiles invitées » – qui sont normalement trop faibles pour être vues, mais qui s'illuminent soudain pour devenir visible à l'œil nu pour quelques semaines ou mois. Nous utilisons toujours certains de ces documents pour étudier des étoiles qui ont explosé il y a longtemps.

La culture Maya, au Mexique et en Amérique Centrale, a développé un calendrier sophistiqué basé sur la planète Vénus. Ils ont construit des sites dédiés à l'observation astronomique il y a plus de mille ans. Les Polynésiens maîtrisaient la navigation aux étoiles, une compétence qui leur a permis de parcourir des centaines de kilomètres au large sur l'océan et de coloniser des îles très éloignées de leur point de départ.

En Grande-Bretagne, avant que l'usage de l'écriture ne se répande, les peuples antiques utilisaient des pierres pour conserver une trace des trajectoires du Soleil et de la Lune. Il existe toujours certains des grands cercles qu'ils ont construit à cet effet, et qui datent d'aussi loin que 2800 avant notre ère. Le plus connu est Stonehenge, qui sera étudié dans [La Terre, la Lune et le](#)

---

1. Beaucoup d'objets astronomiques ont été introduits dans [La science et l'univers : un bref tour d'horizon](#) [↗](#). Si vous n'êtes pas familier avec des termes comme *comètes* et *météores*, vous pouvez relire ce chapitre.

Ciel ↗<sup>2</sup>.

## II.2.2. Les grecs anciens et la cosmologie romaine

Notre concept du cosmos – sa structure de base et son origine – est appelé **cosmologie**, un mot aux racines grecques. Avant l'invention des télescopes, les seuls indices accessibles aux humains quant au fonctionnement de l'univers passaient par leurs sens. Nos ancêtres ont développé des cosmologies qui combinaient leurs observations directes des cieux avec une riche variété de symbolisme philosophique et religieux.

Au moins 2000 ans avant Christophe Colomb, les personnes éduquées de l'Est méditerranéen savaient que la Terre était ronde. La théorie d'une Terre sphérique remonte peut-être au temps de Pythagore, un philosophe et mathématicien qui vivait il y a 2500 ans. Il pensait que les cercles et les sphères étaient des « formes parfaites » ; et suggérait donc que la Terre devait être une sphère. Comme preuve que les dieux aimaient les sphères, les Grecs citaient le fait que la Lune en est une, via une preuve que nous étudierons plus loin.

Les écrits d'Aristote (384–322 avant JC), le tuteur d'Alexandre le Grand, résument la majorité de ces idées. Ils décrivent comment la progression des phases de la Lune – son changement de forme apparent – proviennent de notre vision de différentes parties de l'hémisphère éclairé de la Lune au fur et à mesure de son déplacement (cf [La Terre, la Lune et le Ciel ↗](#)). Aristote savait aussi que le Soleil devait être plus loin de la Terre que la Lune, car de temps à autres cette dernière passe exactement entre la Terre et le Soleil et le masque temporairement. Ce phénomène est appelé *éclipse de Soleil*.

Aristote citait des preuves convaincantes que la Terre devait être ronde. La première est le fait que, lorsque la Lune entre ou sort de l'ombre de la Terre lors d'une éclipse de Lune, la forme de l'ombre vue sur la Lune est toujours ronde (*Figure 2.9*). Seul un objet sphérique provoque toujours des ombres rondes. Si la Terre était un disque, par exemple, il y aurait des cas où la lumière du Soleil la frapperait par le côté et où son ombre sur la Lune serait une ligne.



FIGURE II.2.1. – **Figure 2.9 : L'ombre ronde de la Terre.** Une éclipse de Lune survient lorsque la Lune traverse l'ombre de la Terre. Notez la forme courbe de l'ombre – une preuve connue depuis l'antiquité de la sphéricité de la Terre. (*Crédit : modification d'un travail de Brian Paczkowski*).

Comme seconde preuve, Aristote expliquait que les voyageurs qui allaient loin au sud pouvaient observer des étoiles invisibles plus au nord, et que la hauteur de l'Étoile Polaire – l'étoile la plus proche du pôle céleste Nord – diminuait d'autant plus que le voyageur était au sud. La seule explication possible était que le voyageur se déplace sur une surface courbe, montrant les étoiles sous un angle différent. D'autres preuves de la rotondité de la Terre sont présentées dans l'encart « Comment savons-nous que la Terre est ronde ? » ci-dessous.

Un penseur Grec, Aristarque de Samos (310 - 230 avant JC) a même suggéré que la Terre tournait autour du Soleil, mais Aristote et la plupart des savants Grecs antiques ont rejeté cette idée. Une de leurs raisons de leur conclusion était que, si la Terre tournait autour du Soleil, ils

---

2. Vous pouvez trouver des ressources sur l'astronomie dans les différentes cultures mondiales [dans ce document ↗](#) (*en anglais, pointant vers des documents en anglais*).

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

devraient observer les étoiles dans des positions différentes au cours de l'orbite de la Terre. Lors du déplacement de la Terre, les positions des étoiles les plus proches devraient varier par rapport aux étoiles les plus lointaines. D'une façon similaire, lors que nous nous déplaçons, nous voyons les objets en premier plan bouger par rapport aux objets plus lointains en arrière-plan. Lorsque nous voyageons en train, les arbres du premier-plan semblent changer de position par rapport aux collines distantes, au fur et à mesure que le train roule. Nous utilisons ce phénomène de façon inconsciente pour estimer les distances.

Ce changement apparent de direction d'un objet dû au déplacement de l'observateur est appelé **parallaxe**. Nous appelons *parallaxe stellaire*<sup>1</sup> le changement dans la direction apparente d'une étoile provoqué par le mouvement orbital de la Terre. Les Grecs ont fait des efforts spécifiques pour observer la parallaxe stellaire, allant jusqu'à enrôler à cet effet les soldats dotés de la meilleure vision, mais sans résultats. Les étoiles les plus brillantes (et à priori les plus proches) ne semblaient pas se déplacer lorsque les Grecs les observaient au printemps et à l'automne (lorsque la Terre est de l'autre côté du Soleil).

Ceci impliquait soit que la Terre ne se déplaçait pas, soit que les étoiles étaient à des distances si titanesques que les décalages dus à la parallaxe étaient d'une petitesse immensurable. Un cosmos si gigantesque impliquait un saut d'imagination que les philosophes antiques n'étaient pas préparés à faire, c'est pourquoi ils préférèrent rester sur la sûreté d'un modèle géocentrique, qui domina la culture occidentale pour presque deux millénaires.

### Les bases de l'astronomie

#### II.2.2.0.1. Comment savons-nous que la Terre est ronde ?

En plus des deux arguments susmentionnés et tirés des écrits d'Aristote, vous pouvez tenir les raisonnements suivants :

1. Regarder un navire quitter le port par un jour clair et calme. Sur une Terre plate, vous verriez simplement le navire devenir de plus en plus petit au fur et à mesure de son éloignement. Mais ce n'est pas ce que l'on observe en réalité. À la place, le navire s'enfonce sous l'horizon, sa coque disparaissant en premier tandis que son mât reste visible plus longtemps. Enfin, seulement le haut de son mât reste visible tandis que le navire navigue sur la courbure terrestre. Enfin, le navire disparaît sous l'horizon.
2. La Station Spatiale Internationale orbite autour de la Terre en 90 minutes environ. Les photographies prises depuis les satellites ou la navette spatiale montrent toutes que la Terre est ronde.
3. Imaginez que vous ayez des amis répartis partout sur Terre. Vous les appelez tous en même temps et leur demandez : « Où est le Soleil ? » Sur une Terre plate, chacun d'eux vous donnerait approximativement la même réponse ; mais sur une Terre ronde, le Soleil serait haut dans le ciel pour certain d'entre eux, bas pour d'autres, et invisible pour les derniers – qui seraient passablement énervés que vous les réveillez au milieu de la nuit.

---

1. Ou *parallaxe annuelle*, ou encore *parallaxe héliocentrique*.

### II.2.3. Mesure de la Terre par Ératosthène

Non seulement les Grecs savaient que la Terre est ronde, mais ils étaient aussi capables d'en mesurer la taille. La première mesure plutôt précise du diamètre de la Terre a été réalisée vers 200 avant JC par Ératosthène (276 - 194 avant JC), un Grec qui vivait à Alexandrie en Égypte.

Le Soleil est si éloigné de nous que ses rayons, lorsqu'ils nous atteignent, peuvent être considérés comme parallèles. Pour comprendre pourquoi, voyez la *figure 2.10*. Prenons une source de lumière proche de la Terre – disons, en position A. Ses rayons frappent différents endroits de la Terre sous des angles différents. Depuis une source de lumière B ou C (qui sont plus éloignées de la Terre), l'angle entre les rayons qui frappent des points opposés de la Terre est plus petit. Plus la source est distante, plus l'angle est petit ; pour une source à l'infini, les rayons voyagent sur des droites parallèles.

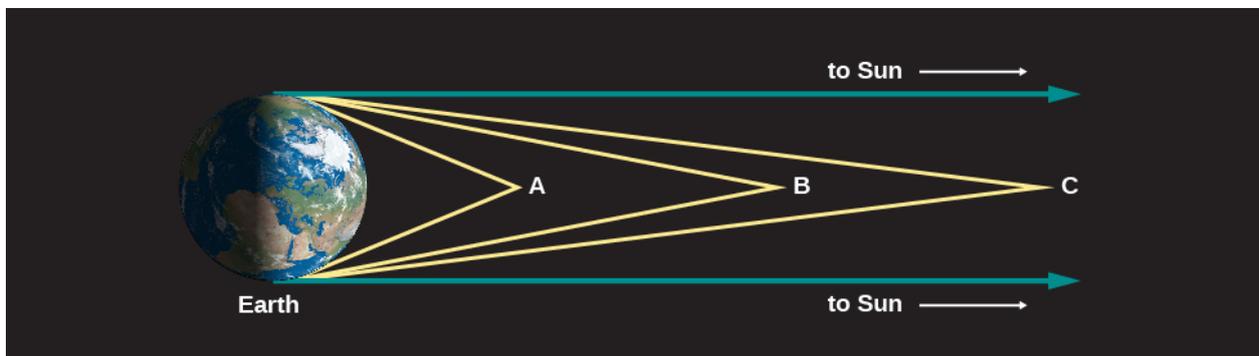


FIGURE II.2.2. – **Figure 2.10 : Rayons de lumière depuis l'espace.** Plus un objet est lointain, plus les rayons de lumière qui en proviennent semblent parallèles.

Évidemment, le Soleil n'est pas infiniment loin, mais à une distance de 150 millions de kilomètres. Lorsqu'ils frappent la Terre, ses rayons divergent d'un angle trop petit pour être visible à l'œil nu. En conséquence, si toutes les personnes du monde pouvaient pointer le Soleil en même temps, leurs doigts seraient essentiellement tous parallèles<sup>1</sup>.

Ératosthène savait que, le premier jour de l'été à Syène en Égypte (actuellement Assouan), à midi, le Soleil éclairait le fond d'un puits vertical. Ceci signifiait que le Soleil était directement au-dessus du puits – et donc que Syène était sur une ligne qui liait le centre de la Terre au Soleil. À une date et une heure équivalentes, à Alexandrie, Ératosthène observa l'ombre d'une colonne et constata que le Soleil n'était pas exactement à la verticale, mais légèrement au sud du zénith, de façon à ce que les rayons fassent un angle d'environ  $\frac{1}{50}$  de cercle ( $7^\circ$ ). Puisque les rayons du Soleil frappant les deux villes sont parallèles entre eux, pourquoi ces rayons ne feraient-ils pas le même angle avec la surface de la Terre ? Ératosthène partit du principe que, à cause de la courbure de la Terre, « la verticale » n'indiquait pas la même direction dans les deux villes. Une conséquence de ceci, c'est que la mesure de l'angle entre le rayon du Soleil et la verticale à Alexandrie lui permettait de mesurer la taille de la Terre : une Terre ronde impliquait que Alexandrie devait se situer à  $\frac{1}{50}$  de circonférence terrestre au nord de Syène (*Figure 2.11*). Une mesure indiquait qu'Alexandrie se situait à 5000 *stades*<sup>2</sup> au nord de Syène, et donc que la circonférence de la Terre devait être de  $50 \times 5000$  soit 250 000 stades.

1. Le même raisonnement s'applique aussi aux planètes et aux étoiles, ce qui nous permettra de le réutiliser lorsque nous verrons comment fonctionnent les télescopes.

2. Le *stade* était une unité de mesure de la Grèce et de l'Égypte antique, et valait 600 *pieds* grecs (respectivement égyptiens).

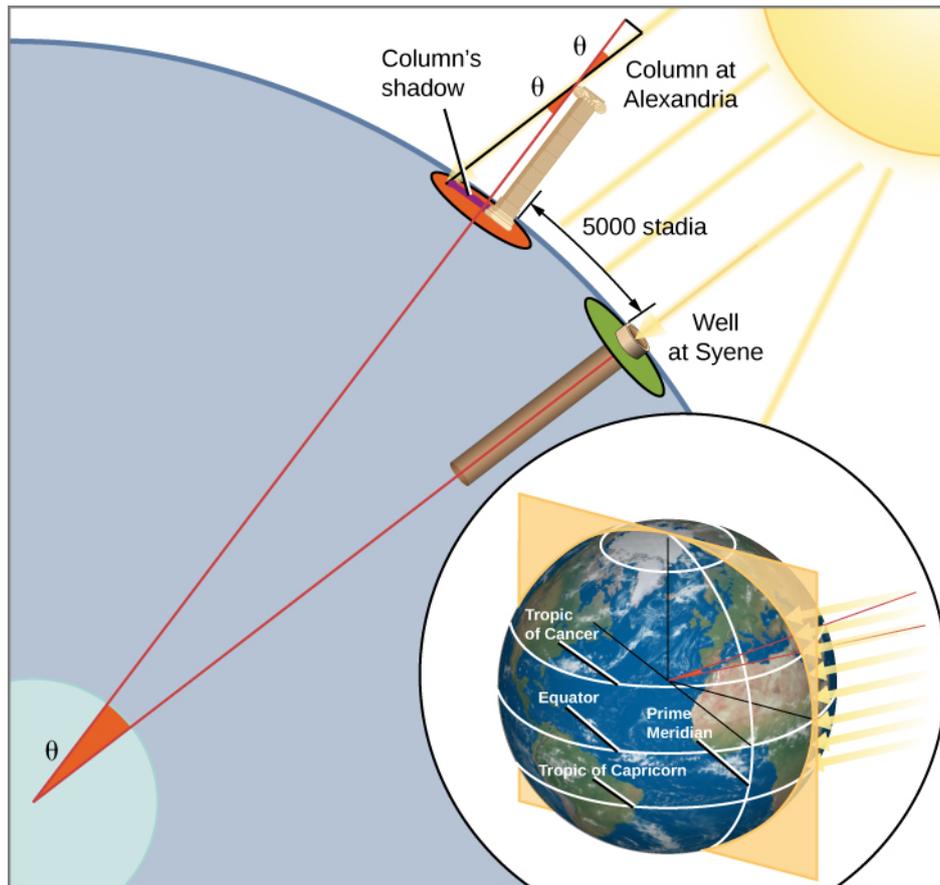


FIGURE II.2.3. – **Figure 2.11 : Comment Ératosthène a mesuré la taille de la Terre.** Ératosthène a mesuré la taille de la Terre par l'observation de l'angle avec lequel les rayons du Soleil frappent la surface de notre planète. Les rayons du Soleil arrivent parallèles, mais comme la surface de la Terre est courbe, un rayon à Cyrène arrive perpendiculairement tandis qu'un rayon à Alexandrie fait un angle de  $7^\circ$  avec la verticale. Cela signifie que la surface de la Terre entre Cyrène et Alexandrie est courbée de  $7^\circ$  sur  $360^\circ$ , ou  $\frac{1}{50}$  d'un cercle complet. Ainsi, la distance entre les deux villes doit être de  $\frac{1}{50}$  de la circonférence de la Terre. (Crédit : modification d'un travail de la NOAA Ocean Service Education).

Il est impossible d'évaluer avec exactitude la précision de la mesure d'Ératosthène, parce qu'il y a un doute sur la longueur exact du stade qu'il utilisait comme unité de distance. S'il utilisait le stade grec d'Olympie, son résultat est trop grand d'environ 20 % ; mais s'il utilisait un stade égyptien, sa mesure est exacte à 1 % près (39 375 km mesurés pour 40 007,864 km pour un méridien passant par les pôles). Cela dit, même si sa mesure n'était pas exacte, sa réussite à mesurer la taille de notre planète uniquement à l'aide d'ombres, de rayons du Soleil et du pouvoir de la pensée humain est l'une des plus grandes réalisations intellectuelles de l'histoire.

#### Ératosthène et la Terre plate (*bonus francophone*)

L'expérience d'Ératosthène ne prouve pas que la Terre est ronde – elle le suppose dans ses calculs – et est tout à fait compatible avec un modèle de Terre plate.

Cependant, on peut prouver que la Terre est ronde... grâce à l'expérience d'Ératosthène !

Les détails de cet apparent paradoxe sont lisibles ici [↗](#) (qui est une mise en page lisible de ce thread Twitter [↗](#)).

## II.2.4. Hipparque et la précession

Le plus grand astronome de l'antiquité était peut-être Hipparque, né à Nicée dans l'actuelle Turquie. Il a construit un observatoire sur l'île de Rhodes autour de 150 avant JC, pendant l'expansion de l'influence de la République romaine autour de la Méditerranée. Là, il mesura avec la meilleure précision possible la position d'objets célestes. Il compila ainsi le premier catalogue d'étoiles, qui contenait environ 850 éléments. Il a désigné des coordonnées célestes pour chacune de ces étoiles, spécifiant leurs positions dans le ciel de la même manière que nous spécifions la position d'un point sur Terre par sa latitude et sa longitude.

Il divisa aussi les étoiles en **magnitudes apparentes** selon leur luminosité apparente. Il appela les plus brillantes « étoiles de première magnitude », le groupe suivant en terme de brillance « étoiles de seconde magnitude », et ainsi de suite. Ce système arbitraire, bien que modifié, est toujours utilisé aujourd'hui – même s'il est de moins en moins utile pour les astronomes professionnels.

En observant les étoiles et en comparant ses données avec des observations plus anciennes, Hipparque fit l'une de ses découvertes les plus remarquables : la position dans le ciel du pôle céleste nord avait changé au cours du siècle et demi passé. Hipparque en déduisit, à raison, que ce phénomène ne s'était pas produit seulement pendant cette période d'observation, mais en réalité existait tout le temps. Rappelons ici que le pôle nord céleste est simplement la projection du pôle nord terrestre dans le ciel. Si le pôle nord céleste vacille, alors la Terre elle-même doit vaciller. Aujourd'hui, nous savons qu'en effet, la direction dans laquelle l'axe de la Terre pointe change dans un mouvement lent et régulier, appelé **précession**. Si vous avez déjà regardé une toupie tourner, vous avez observé un mouvement similaire : l'axe vertical décrit un chemin qui forme un cône (*Figure 2.12*).

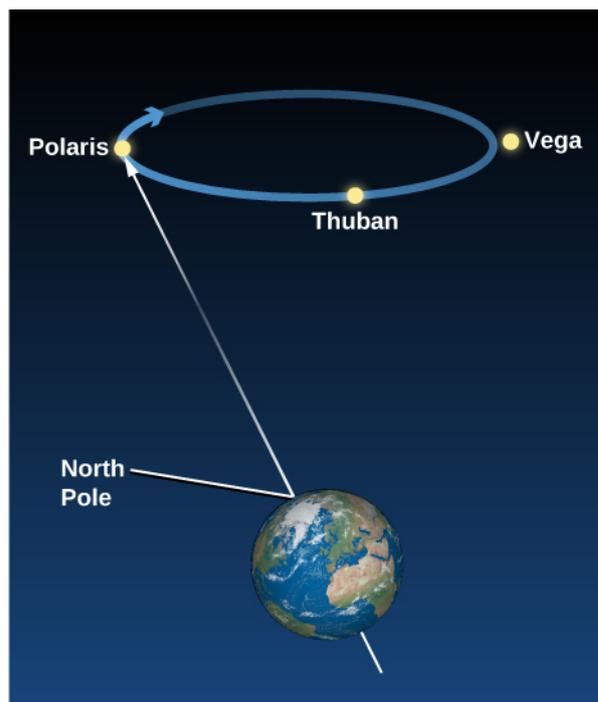
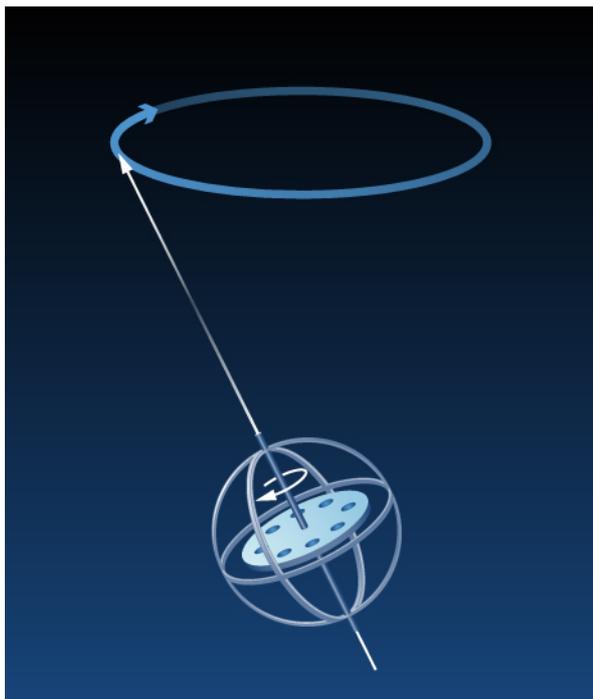


FIGURE II.2.4. – **Figure 2.12 : Précession.** Tout comme l'axe d'une toupie qui tourne rapidement oscille lentement en cercles, l'axe de la Terre oscille en un cycle de 26 000 ans. Aujourd'hui le pôle Nord céleste est proche de l'Étoile Polaire, mais il y a environ 5 000 ans il était proche de l'étoile appelée Alpha Draconis (ou Thuban), et dans 14 000 ans il sera proche de l'étoile appelée Véga.

Parce que notre planète n'est pas exactement une sphère mais est un peu plus large à l'équateur, l'attraction du Soleil et de la Lune la font vaciller comme une toupie. Il faut environ 26 000 ans à l'axe de la Terre pour compléter un cercle de précession. En conséquence de ce mouvement, le point pointé par notre axe dans le ciel change au cours du temps. Alors que Alpha de la Petite Ourse (ou Polaris, ou l'Étoile Polaire) est l'étoile la plus proche du pôle nord céleste aujourd'hui (elle en sera le plus proche vers 2100), Véga (dans la constellation de la Lyre) sera l'étoile polaire dans 14 000 ans.

### II.2.5. Le modèle du système solaire selon Ptolémée

Le dernier grand astronome de la Rome antique était Claude Ptolémée (ou simplement Ptolémée), qui réalisa ses plus grands travaux aux alentours de l'an 140 de notre ère, à Alexandrie en Égypte. Il réalisa une grande compilation de connaissances astronomiques, aujourd'hui connue sous le nom d'*Almageste* (d'après une arabisation d'un terme grec ancien signifiant « La Grande Composition »). L'*Almageste* ne contient pas seulement des travaux originaux de Ptolémée, mais aussi une étude des réalisations astronomiques passées, principalement celles d'Hipparque. C'est aujourd'hui notre principale source d'information sur les travaux de ce dernier et d'autres astronomes de la Grèce antique.

La contribution la plus importante de Ptolémée a été sa représentation géométrique du système solaire, capable de prédire la position des planètes pour n'importe quelle date. Hipparque n'avait pas assez de données pour résoudre ce problème lui-même, aussi il a accumulé des observations pour la postérité. Ptolémée a complété ce matériau avec de nouvelles observations et a construit un modèle cosmologique qui a duré plus de mille ans, jusqu'à l'arrivée de Copernic.

Le facteur le plus complexe à expliquer dans le mouvement des planètes est leur errance apparente dans le ciel, qui est le résultat de la combinaison de leur mouvement propre et du mouvement orbital de la Terre. Regarder les planètes depuis notre point de vue sur une Terre en mouvement, c'est un peu comme regarder une course automobile en tant que participant : parfois la voiture d'un concurrent vous dépasse, mais parfois vous les dépassez, ce qui les fait sembler reculer par rapport à vous le temps du dépassement.

La *Figure 2.13* montre le mouvement de la Terre et d'une planète plus éloignée du Soleil – ici, Mars. La Terre voyage autour du Soleil dans la même direction et presque sur le même plan que l'autre planète, mais sa vitesse orbitale est plus élevée. En conséquence, elle dépasse périodiquement la planète, comme une voiture de course sur le côté intérieur d'un virage. La figure montre où se trouve la planète dans le ciel à différents moments. Le chemin de la planète par rapport aux étoiles est présenté à droite de la figure.

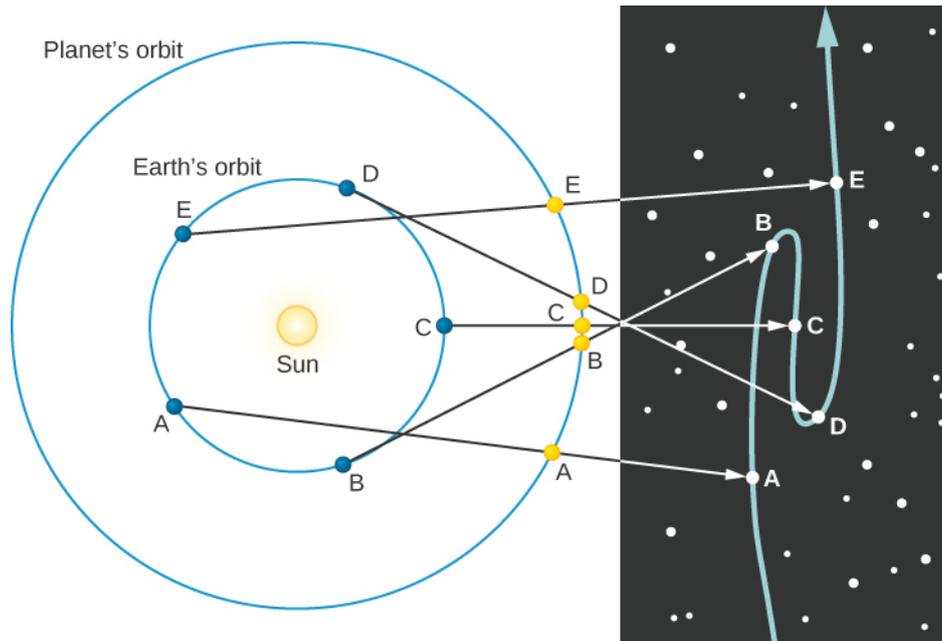


FIGURE II.2.5. – **Figure 2.13 : Mouvement rétrograde d'une planète au-delà de l'orbite terrestre.** Les lettres sur le diagramme montrent où la Terre et Mars sont à différents moments. En suivant les lignes de chaque position de la Terre à chaque position correspondante pour Mars, vous pouvez voir à quoi ressemble le chemin rétrograde de Mars sur le fond des étoiles.

Un lien pour apprendre

Le [simulateur de configurations planétaires de Foothill AstroSims](#) *(en anglais)* vous permet de visualiser les mouvements habituels directs et occasionnellement rétrogrades des autres planètes. Vous pouvez alterner entre la visualisation du mouvement de la Terre et de Mars – et des autres planètes.

Normalement, les planètes se déplacent vers l'est dans le ciel au cours des semaines et des mois, alors qu'elles orbitent autour du Soleil. Mais il arrive que, comme entre les positions B et D de notre exemple en *Figure 2.13*, elles semblent dériver en arrière et revenir vers l'ouest, lorsque la Terre dépasse la planète. Même si elle se déplace en réalité vers l'est, la Terre, plus rapide, la double et semble, depuis notre position, la laisser sur derrière. Lorsque la Terre atteint la position E sur son orbite, la planète reprends son mouvement apparent vers l'Est dans le ciel. Le mouvement apparent d'une planète vers l'ouest lorsque la Terre passe entre elle et le Soleil est appelé **mouvement rétrograde**. Un tel mouvement est simple à comprendre de nos jours, maintenant que nous savons que la Terre est l'une des planètes, qu'elle orbite autour du Soleil et qu'elle n'est pas le centre immobile de la Création. Mais Ptolémée a dû faire face à un problème bien plus complexe, celui d'expliquer ces mouvements rétrogrades tout en supposant une Terre immobile.

En outre, les Grecs pensaient que les mouvements célestes étaient circulaires. Ptolémée a donc dû construire son modèle en utilisant seulement des cercles. C'est pour ça qu'il a eu besoin de dizaines de cercles, certains tournant autour d'autres cercles, dans une structure complexe qui rend confus le spectateur moderne. Mais nous ne devons pas laisser notre jugement moderne ternir notre admiration pour la réalisation de Ptolémée : à cette époque, un univers complexe centré sur la Terre était parfaitement raisonnable et, à sa manière, assez beau. Cependant, comme

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

l'aurait dit le roi de Castille Alphonse X après s'être fait expliquer le système de mouvement des planètes : « *Si le Seigneur Tout-Puissant m'avait consulté avant de commencer sa Création, je lui aurais conseillé quelque chose de plus simple* ».

Ptolémée a résolu le problème du mouvement observé des planètes en plaçant chacune d'elle sur une petite orbite appelée **épicycle**. Le centre de l'épicycle tourne autour de la Terre selon un cercle appelé *déférent* (Figure 2.14). Lorsque la planète est dans la position *x* sur la Figure 2.14 de l'orbite épicycle, elle bouge dans la même direction que le centre de l'épicycle ; depuis la Terre, elle semble bouger vers l'est. À l'inverse, lorsqu'elle est dans la position *y*, elle se déplace autour de la Terre en sens inverse du centre de l'épicycle. En choisissant la bonne combinaison de vitesses et de distances, Ptolémée a réussi à modéliser des planètes qui se déplacent vers l'ouest à la bonne vitesse, sur la bonne distance et pendant la bonne durée. Il a donc réussi à expliquer le mouvement rétrograde avec son modèle.

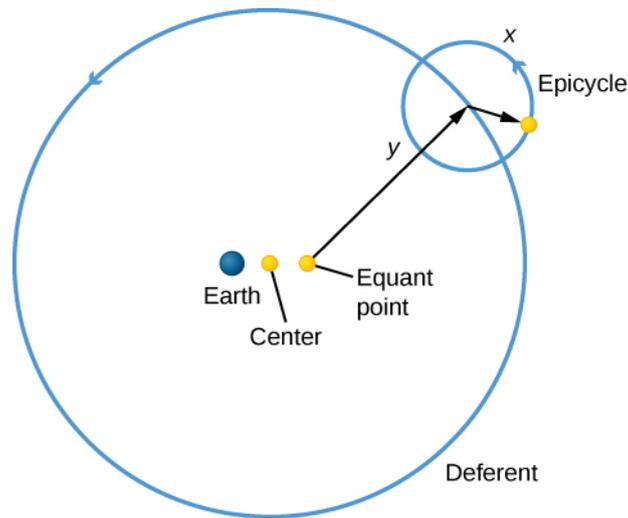


FIGURE II.2.6. – **Figure 2.14 : Le système cosmologique complexe de Ptolémée.** Chaque planète orbite sur un petit cercle appelé *épicycle*. Chaque épicycle orbite sur un grand cercle appelé *déférent*. Ce système n'est pas exactement centré sur la Terre, mais sur un point décalé appelé *équant*. Les Grecs anciens avaient besoin de cette complexité pour expliquer les mouvements réels des planètes dans le ciel, car ils croyaient que la Terre était immobile et que tous les mouvements célestes étaient des cercles.

### Un lien pour apprendre

Utilisez le [simulateur de système ptolémaïque de Foothill AstroSims](#) <sup>↗</sup> (*en anglais*) pour comprendre comment le système d'épicycles et de déférents de Ptolémée explique le mouvement apparent des planètes.

Cependant, nous verrons dans [Orbites et gravité](#) <sup>↗</sup> que les planètes, dont la Terre, voyagent autour du Soleil sur des orbites qui sont des ellipses et non des cercles. Leur comportement réel ne peut pas être représenté avec précision par un ensemble de mouvement circulaires uniformes. Pour correspondre aux mouvements observés des planètes, Ptolémée a dû centrer les cercles déférents sur un point éloigné de la Terre, et pas sur la Terre elle-même. De plus, il a introduit un mouvement circulaire uniforme autour d'encore un autre axe appelé *point équant*. Tout ceci a considérablement complexifié son modèle.

## *II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie*

Le génie mathématique remarquable de Ptolémée lui a permis de développer un système aussi complexe pour modéliser, avec succès, le mouvement observé des planètes. Il est possible que le but de Ptolémée ne fût pas de concevoir un modèle cosmologique qui représente la réalité, mais seulement un outil mathématique qui lui aurait permis de prédire les positions des planètes à n'importe quelle date. Quoiqu'il en soit, ce modèle – un peu modifié – a finalement été accepté comme faisant autorité dans le monde musulman, puis plus tard en Europe chrétienne.

## II.3. Astrologie et astronomie

### Introduction

i

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez capables de :

- Expliquer les origines de l'astrologie ;
- Expliquer ce qu'est un horoscope ;
- Résumer les arguments qui invalident l'astrologie comme discipline scientifique.

Beaucoup de cultures anciennes considéraient les planètes et les étoiles comme des représentants ou symboles de leurs dieux, ou d'autres forces surnaturelles qui contrôlaient leurs vies. Pour ces cultures, étudier les cieux n'était pas un sujet abstrait : c'était une question de vie ou de mort, une nécessité de comprendre les actions des dieux et de s'attirer leurs faveurs. Avant notre époque de perspectives scientifiques, tout ce qui arrivait dans la nature – du climat aux maladies et accidents en passant par les surprises célestes telles que les éclipses ou les comètes – était vu comme un caprice ou un mécontentement des dieux. Tout signe qui pouvait aider la population à comprendre ce que les dieux avaient en tête était considéré comme extrêmement important.

Les mouvements des sept objets qui avaient le pouvoir de « vagabonder » dans le royaume des cieux – le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles à l'œil nu – avaient clairement une signification spéciale dans un tel système de pensée.

Les plus anciennes cultures ont associé ces sept objets avec diverses entités surnaturelles de leurs panthéons, et en ont conservé trace pour des raisons religieuses. Même dans la sophistiquée Grèce antique, les planètes avaient des noms de divinités et étaient considérées comme ayant les mêmes pouvoirs et influences que les dieux d'après lesquels elles tiraient leurs noms. De telles idées est né le système ancestral appelé **astrologie**, toujours utilisé par quelques personnes aujourd'hui. Dans ce système, la position de ces corps par rapport aux étoiles du zodiaque sont censées être les clés qui permettent de comprendre ce que l'on peut espérer de la vie.

### II.3.1. Les débuts de l'astrologie

L'astrologie a débuté à Babylone il y a deux millénaires et demie. Les Babyloniens croyaient que les planètes et leurs mouvements influençaient le destin des rois et des nations ; ils ont utilisé leurs connaissances de l'astronomie pour guider leurs dirigeants. Quand la culture de Babylone a été absorbée par les Grecs, l'astrologie gagna lentement en influence dans tout le monde occidental, pour finir par s'étendre jusqu'en Asie.

Au 2<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, les Grecs ont démocratisé l'astrologie en développant l'idée de l'influence des planètes sur chaque individu. En particulier, ils croyaient que la configuration du Soleil, de la Lune et des planètes au moment de la naissance affectait la personnalité et la chance d'une personne – une doctrine appelée *astrologie individuelle*. L'astrologie individuelle a

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

atteint son pic avec Ptolémée, 400 ans plus tard. Aussi fameux pour son astrologie que pour son astronomie, Ptolémée a rédigé le *Tetrabiblos*, un traité sur l'astrologie qui reste la « bible » du sujet. C'est principalement cette religion ancienne, plus vieille que le Christianisme ou l'Islam, qui est toujours pratiquée par les astrologues contemporains.

### II.3.2. L'horoscope

La clé de l'astrologie individuelle est l'**horoscope**, un graphique des positions des planètes dans le ciel au moment de la naissance d'un individu. Le mot « horoscope » vient indirectement du grec ancien *hōroskopos*, de *hōra* (« heure, temps ») et de *skopos* (« observateur, spectateur »). « Horoscope » peut donc être traduit littéralement par quelque chose comme « observateur du temps ». Lorsque que l'on trace un horoscope, les planètes (en incluant le Soleil et la Lune, classés comme *vagabonds* par nos ancêtres) doivent d'abord être situées dans le zodiaque. À l'époque où l'astrologie a été créée, le zodiaque était divisé en 12 secteurs appelés *signes* (Figure 2.15), chacune de 30° de long. Chacun d'eux a été nommé d'après une constellation du ciel dans laquelle le Soleil, la Lune ou les planètes passaient – par exemple, le signe de la Vierge fut nommé d'après la constellation de la Vierge.



FIGURE II.3.1. – Figure 2.15 : Signes du zodiaque. Cette gravure sur bois médiévale représente les signes du zodiaque.

Aujourd'hui, lors d'une conversation courante, si quelqu'un vous demande votre « signe », il parle du « signe solaire » – le signe du zodiaque dans lequel le Soleil était au moment de votre naissance. Toutefois, plus de 2000 ans ont passé depuis que les signes ont été nommés depuis les constellations. À cause de la précession, les constellations du zodiaques glissent vers l'ouest le long de l'écliptique, parcourant un tour complet en 26 000 ans environ. C'est pourquoi aujourd'hui les étoiles se sont décalées d'environ  $\frac{1}{12}$  du zodiaque – soit la largeur d'un signe. Dans la plupart des formes d'astrologie, cependant, les signes restent assignés aux dates de l'année qu'elles avaient lorsque l'astrologie a été créée. Ceci signifie que les signes astrologiques

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

et les constellations réelles sont décalées d'un cran ; le signe du Bélier, par exemple, se trouve maintenant dans la constellation des Poissons. Lorsque vous cherchez votre signe dans les colonnes astrologiques d'un journal, le nom du signe associé à votre date de naissance n'est plus le nom de la constellation dans laquelle se trouvait le Soleil ce jour là. Pour connaître cette constellation, vous devez chercher le signe *avant* celle qui contient votre date de naissance<sup>1</sup>.

Un horoscope complet ne montre pas seulement la position du Soleil, mais aussi de la Lune et de chaque planète, en indiquant leurs positions par leurs signes du zodiaque respectifs. Cependant, comme la sphère céleste tourne (à cause de la rotation de la Terre), le zodiaque en entier se déplace vers l'ouest dans le ciel, à raison d'un tour par jour. Ceci implique que la position du ciel (ou « maison » en astrologie) doit aussi être calculée. Il existe des règles d'interprétation plus ou moins standardisées de l'horoscope. La plupart d'entre elles, au moins dans les écoles astrologiques occidentales, sont dérivées du *Tetrabiblos* de Ptolémée. Chaque signe, chaque maison et chaque planète – ces dernières agissant comme centre de force – est supposée être associée d'une certaine manière à la vie d'une personne.

L'interprétation détaillée d'un horoscope est un travail très compliqué, et il y a beaucoup d'écoles de pensées astrologiques sur la façon dont il devrait être fait. Bien que quelques règles soient standardisées, le poids associé à chacune d'elles et comment elles doivent être appliquées est une question de jugement – un « art ». Ceci implique qu'il est très difficile de lier l'astrologie à des prédictions précises, ou même d'obtenir les mêmes prédictions d'astrologues différents.

### II.3.3. L'astrologie aujourd'hui

Les astrologues contemporains utilisent toujours les principes de base posés par Ptolémée il y a près de 2000 ans. Ils font des horoscopes (un processus grandement simplifié par le développement de programmes informatiques dédiés) et suggèrent des interprétations. L'astrologie des signes solaires (celle que vous lisez dans les journaux et magazines) est une variante récente et simplifiée de l'astrologie personnelle. Même les astrologues professionnels ne donnent pas beaucoup de crédit à un système si limité, qui essaie de ranger tout le monde dans seulement 12 groupes. Cependant, elle reste prise au sérieux par beaucoup de gens, peut-être parce qu'elle est très présente dans les médias.

Aujourd'hui, nous en savons beaucoup plus que nos ancêtres sur la nature des planètes en tant que corps physiques, ou sur la génétique humaine. Il est difficile d'imaginer que les positions du Soleil, de la Lune ou des planètes dans le ciel au moment de notre naissance puisse avoir quoi que ce soit à voir avec notre personnalité ou notre futur. Aucune force connue, pas plus la gravité qu'une autre, ne peut causer de tels effets<sup>1</sup>. Les astrologues doivent donc expliquer qu'il existe des forces inconnues exercées par les planètes et qui dépendent de leurs configurations les unes par rapport aux autres, mais que varient pas selon la distance aux planètes. Forces pour lesquelles il n'existe pas le moindre lambeau de preuve.

Un autre aspect curieux de l'astrologie est son emphase sur la configuration des planètes à la naissance. Mais qu'en est-il des forces qui pourraient nous influencer à la conception ? Est-ce que notre matériel génétique n'est pas plus important pour déterminer notre personnalité que les circonstances de notre naissance ? Est-ce que nous serions réellement des personnes différentes si nous étions nées quelques heures plus tôt ou plus tard, comme l'affirme l'astrologie ?

---

1. En première approche seulement. En réalité, l'écliptique traverse 13 constellations – le Serpenteire (aussi appelé Ophiuchus) n'existe pas en astrologie ; de plus, la durée passée par le Soleil dans chaque constellation est variable. Voyez [la table 2.1](#) pour plus de détails.

1. Par exemple, un calcul rapide montre que, lors d'un accouchement, l'attraction gravitationnelle de la sage-femme sur le bébé est plus importante que celle de Mars.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Lorsque l'astrologie a été conçue, la naissance était vue comme un moment magique, chargé de significations ; mais aujourd'hui nous comprenons beaucoup mieux le long processus qui le précède.

En réalité, aujourd'hui bien peu de personnes instruites croient que leurs vies entières sont prédéterminées par des influences astrologiques à leur naissance. Par contre, beaucoup semblent croire en la validité de l'astrologie comme indicateur d'affinités et de personnalités. Un nombre surprenant d'Étatsuniens portent des jugements sur les gens – qui ils embauchent, s'associent avec, ou même se marient – sur la base d'informations astrologiques. Bien sûr, ce sont des décisions difficiles, et vous pourriez arguer que nous devrions utiliser toutes les informations pertinentes pour nous aider à faire les bons choix. Mais est-ce que l'astrologie fournit la moindre information réellement utile sur la personnalité humaine ? Ce genre de question peut être étudiée par la méthode scientifique (cf [Tester l'astrologie](#) ↗ ).

Les résultats de centaines de tests sont les mêmes : il n'y a aucune preuve que l'astrologie personnelle ait le moindre pouvoir prédictif, même dans une acceptation statistique. Alors pourquoi tant de personnes ont des anecdotes à propos d'une bonne prédiction que leur aurait faite un astrologue ? Les astrologues efficaces, de nos jours, utilisent le langage de l'astrologie et le zodiaque que comme un vernis sur leurs pratiques. La plupart d'entre eux travaillent comme thérapeutes amateurs et disent à leurs clients les vérités qu'ils veulent ou ont besoin d'entendre<sup>2</sup>.

L'astrologie n'a aucune base scientifique ; au mieux, c'est une pseudoscience. Elle est un système historique intéressant, un reste de l'époque pré-scientifique surtout utile pour l'envie qu'elle a donnée aux gens d'étudier les cycles et motifs célestes. D'elle a grandi l'astronomie, qui est notre sujet principal ici.

### Établir des connexions

#### II.3.3.0.1. Tester l'astrologie

En réponse à l'intérêt du public moderne pour l'astrologie, les scientifiques ont conçu un grand nombre de tests statistiques pour valider ses pouvoirs prédictifs. Le plus simple d'entre eux utilise le signe astrologique solaire pour déterminer si – comme l'affirment les astrologues – certains signes sont plus susceptibles que d'autres d'être associés à des mesures objectives de succès, comme gagner des médailles olympiques, toucher de plus hauts salaires, être élu à un poste important ou avoir un rang militaire élevé. (Vous pouvez faire ce test vous-même à partir des dates de naissances des députés ou des membres des équipes olympiques). Est-ce que nos dirigeants sont, d'une quelconque manière, sélectionnés par leurs horoscopes et donc plus susceptibles d'être Lion que Scorpion – par exemple ? Vous n'avez même pas besoin de faire des prédictions précises dans de tels tests. Après tout, la plupart des praticiens de l'astrologie se contredisent sur quel signe donne quel type de personnalité. Pour démontrer la validité des hypothèses astrologiques, il suffirait de montrer que les dates de naissance de nos dirigeants se regroupent sur un ou deux signes, de manière statistiquement significative. Des dizaines de tels tests ont été réalisés, et tous se sont révélés totalement négatifs : les dates de naissances des dirigeants (ou d'autres champs testés) sont distribuées aléatoirement sur *tous* les signes. Le signe astrologique solaire ne prédit absolument rien sur la profession future ou les traits de personnalité

2. Des études récentes ont montré que n'importe quel type de thérapie à court terme peut aider les patients à se sentir un peu mieux, par le seul fait de pouvoir parler de leurs problèmes à quelqu'un qui les écoute attentivement. Ceci, en soit, est bénéfique – tant que ça n'interfère pas avec les soins réellement nécessaires.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

principaux.

Dans un bel exemple d'un tel test, deux statisticiens ont examiné la liste des réengagements du corps des Marines des États-Unis. Vous serez sans doute d'accord pour dire qu'il faut posséder certains traits de personnalité pour non seulement s'engager, mais aussi se réengager dans les Marines. Si les signes solaires pouvaient prédire des traits de personnalité forts – comme l'affirment les astrologues – alors ceux qui se réengagent (donc ont des personnalités similaires) devraient être répartis de préférence dans les quelques signes qui correspondent à la personnalité de quelqu'un qui aime être un Marine. Cependant, les réengagés étaient répartis aléatoirement dans tous les signes.

Des études plus complètes ont aussi été faites, impliquant des horoscopes calculés pour des milliers d'individus. Tous les résultats de ces études sont négatifs : aucun des systèmes d'astrologie n'a montré la moindre efficacité à connecter l'astrologie à des aspects de la personnalité, au succès ou à trouver l'amour.

D'autres tests montrent que ce que dit l'interprétation de l'horoscope n'a presque aucune importance tant qu'elle est assez vague et que chaque personne puisse croire qu'elle a été préparée spécifiquement pour elle. Le statisticien Français Michel Gauquelin, par exemple, a envoyé l'interprétation de l'horoscope de l'un des pires tueurs en série de l'histoire à 150 personnes, mais à dit à chaque destinataire qu'il s'agissait d'une « lecture » préparée exclusivement pour lui. Quatre-vingt-quatorze pour cent des lecteurs ont dit qu'ils se reconnaissaient dans l'interprétation de l'horoscope du tueur en série.

Geoffrey Dean, un chercheur Australien, a inversé les lectures astrologiques de 22 sujets, substituant des phrases de l'horoscope par leur opposé. Cependant, ces sujets ont dit que les lectures ainsi modifiées s'appliquaient à eux aussi souvent (95 %) que les personnes à qui il avait donné les phrases d'origines.

### Un lien pour apprendre

Si le sujet de l'astrologie vue du point de vue d'un astronome vous intéresse, [cet article](#)  (*en anglais*), présenté sous la forme d'une FAQ accessible, vous éclairera.

## II.4. La naissance de l'astronomie moderne

### Introduction

i

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez capables de :

- Expliquer comment Copernic a conçu le modèle héliocentrique du système solaire ;
- Expliquer le modèle de mouvements planétaires de Copernic, et décrire les preuves et arguments en sa faveur ;
- Décrire les découvertes de Galilée à propos des mouvements et des forces ;
- Expliquer comment les découvertes de Galilée ont fait pencher la balance des preuves en faveur du modèle copernicien.

L'astronomie n'a pas connu d'avancées majeures dans une Europe médiévale déchirée par les conflits. La naissance et l'expansion de l'Islam après le septième siècle ont conduit à une floraison de cultures arabes et juives qui ont préservé, traduit et complété nombre d'idées astronomiques des Grecs anciens. Par exemple, beaucoup des noms des étoiles les plus brillantes viennent de l'arabe, tout comme des termes astronomiques tels que « zénith ».

En Europe, le commerce avec les pays arabes a conduit à une redécouverte des textes anciens comme l'*Almageste* et a réveillé l'intérêt pour les questions astronomiques. Cette renaissance en astronomie fut incarnée dans le travail de Copernic (*Figure 2.16*).

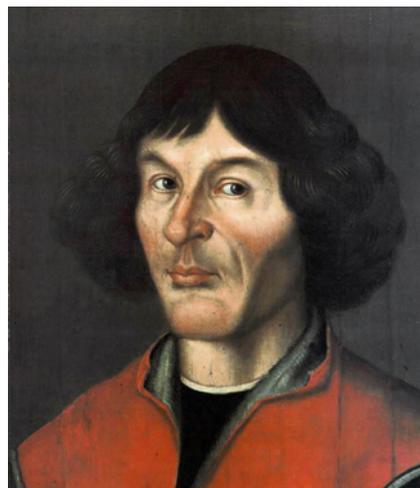


FIGURE II.4.1. – **Figure 2.16 : Nicolas Copernic (1473 – 1543)**. Copernic était un clerc et scientifique qui a joué un rôle majeur dans l'émergence de la science moderne. Bien qu'il n'ait pas pu prouver que la Terre tourne autour du Soleil, il a présenté des arguments si complets en faveur de cette idée qu'il a renversé le cours de la pensée cosmologique et posé les fondations sur lesquelles Galilée et Kepler ont pu s'appuyer avec tant d'efficacité au siècle suivant.

### II.4.1. Copernic

Un des événements les plus importants de la Renaissance fut l'éviction de la Terre comme centre de l'univers, une révolution intellectuelle initiée par un clerc polonais<sup>1</sup> du seizième siècle. Nicolas Copernic est né à Thorn (maintenant Toruń), une ville commerçante située sur la Vistule. Il a étudié le droit et la médecine, mais ses centres d'intérêt principaux étaient l'astronomie et les mathématiques. Sa plus grande contribution à la science fut une réévaluation critique des théories existantes du mouvement des planètes, et le développement d'un nouveau modèle du système solaire centré sur le Soleil, dit **héliocentrique**. Copernic a conclu que la Terre est une planète, et que toutes les planètes tournent autour du Soleil. Seule la Lune orbite autour de la Terre (*Figure 2.17*).

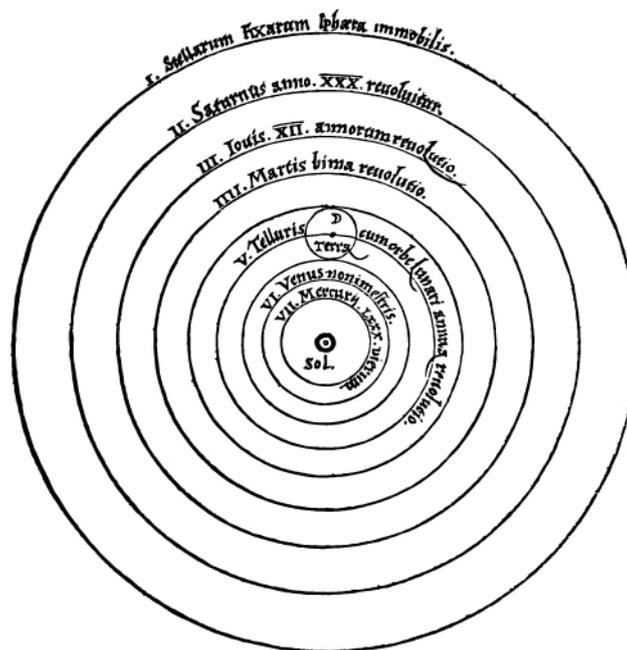


FIGURE II.4.2. – **Figure 2.17 : Le système de Copernic.** Copernic a imaginé une organisation héliocentrique du système solaire. Il a été publié dans la première édition de *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Notez le mot *Sol* pour « Soleil » au centre. (*Crédit : Nicolas Copernic*).

Copernic a décrit ses idées dans son livre *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*Des révolutions des sphères célestes*), publié en 1543, année de sa mort. À cette époque, le vieux système ptolémaïque avait besoin d'ajustements significatifs pour prédire correctement les positions des planètes. Copernic voulait concevoir une meilleure théorie d'après laquelle il pourrait calculer les positions planétaires ; mais ce faisant, il n'était pas lui-même dépourvu de tous les préjugés traditionnels.

Il commença avec plusieurs présupposés communs à son époque, comme l'idée que les mouvements des corps célestes devaient être des combinaisons de mouvement circulaires uniformes. Mais il ne supposait pas – comme la plupart des gens le faisaient – que la Terre devait être au centre de l'univers, et présenta une défense élégante et persuasive du système héliocentrique. Cependant ses idées n'ont été largement acceptées que plus d'un siècle après sa mort. Elles ont toutefois été largement discutées par les savants et ont fini par avoir une profonde influence sur le cours de l'histoire mondiale.

1. Ou allemand, si tant est que ces nationalités aient eu un sens à son époque. Lisez [la section Wikipédia sur la controverse sur la nationalité de Copernic](#) pour plus de détails.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Une des objections levées contre le système héliocentrique était que, si la Terre se déplaçait, nous devrions tous sentir ce mouvement. Les objets solides seraient arrachés de la surface ; une balle lâchée depuis une grande hauteur ne frapperait pas le sol directement sous elle ; et ainsi de suite. Mais une personne qui se déplace n'est pas toujours au courant de ce mouvement. Nous en avons tous fait l'expérience, lorsque ce bus, train ou navire à côté de nous semble bouger jusqu'à l'instant où nous découvrons que c'est nous qui nous déplaçons.

Copernic a soutenu que le mouvement annuel apparent du Soleil depuis la Terre pouvait tout aussi bien être expliqué par le mouvement de la Terre autour du Soleil. Il expliqua aussi que la rotation apparente de la sphère céleste pouvait être expliquée par une Terre qui tourne dans une sphère céleste stationnaire. Une objection fut que si la Terre tournait autour de son axe, elle serait éparpillée en morceaux. Copernic répondit que si un tel mouvement devait déchirer la Terre, le mouvement plus rapide d'une sphère céleste requis par les hypothèses du système géocentrique devrait être bien plus dévastateur.

### II.4.2. Le modèle héliocentrique

L'idée la plus importante dans le *Des révolutions des sphères célestes* de Copernic et que la Terre est l'une des six planètes alors connues qui tourne autour du Soleil. C'est avec ce concept qu'il a pu élaborer une image générale du système solaire. Il a rangé les planètes dans l'ordre correct, de la plus proche à la plus éloignée du Soleil : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne. Plus tard, Copernic a déduit de tout ceci que plus une planète est proche du Soleil, plus sa vitesse orbitale est grande. Ceci lui a permis d'expliquer les mouvements rétrogrades complexes des planètes sans recourir à des épicycles. Il a pu aussi élaborer une échelle approximative du système solaire.

Copernic n'a pas pu prouver que la Terre tourne autour du Soleil. En fait, avec quelques ajustements, le vieux système ptolémaïque pouvait rendre compte, lui aussi, des mouvements des planètes dans le ciel. Mais Copernic a souligné que la cosmologie de Ptolémée était maladroite et manquait de la beauté et de la symétrie de sa successeuse.

À l'époque de Copernic, peu de gens pensaient qu'il était possible de prouver que l'un ou l'autre des systèmes géocentriques ou héliocentrique était correct. Une longue tradition philosophique, remontant aux Grecs et défendue par l'Église catholique, soutenait que la pure pensée humaine associée à la révélation divine constituait le chemin de la vérité. La nature, telle que révélée par nos sens, était suspecte. Les expériences n'avaient pas grande importance.

Cet environnement incitait peu à mener des observations ou des expériences qui auraient pu mener faire la distinction entre les deux modèles cosmologiques – ou n'importe quoi d'autre. Ça ne devrait donc pas nous surprendre que l'idée héliocentrique a été débattue pendant plus d'un demi-siècle sans le moindre test pour déterminer sa validité<sup>1</sup>.

À l'inverse, aujourd'hui les scientifiques s'empressent de tester les nouvelles hypothèses et n'acceptent les nouvelles idées que lorsque les résultats sont là. Par exemple, lorsque deux chercheurs de l'université de l'Utah ont annoncé en 1989 qu'ils avaient découvert un moyen de réaliser la fusion nucléaire – celle qui existe au cœur des étoiles – à température ambiante, d'autres scientifiques de plus de 25 laboratoires des États-Unis tentèrent de reproduire cette « fusion froide » en quelques semaines – sans succès. La théorie fusion froide s'est rapidement effondrée.

Comment regarderions-nous le modèle de Copernic aujourd'hui ? Lorsqu'une nouvelle hypothèse

---

1. En fait, dans les colonies d'Amérique du Nord, le vieux système géocentrique était toujours enseigné à l'université de Harvard les années qui ont suivi sa fondation en 1636.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

ou théorie scientifique est proposée, on commence par en vérifier la cohérence avec ce que l'on sait déjà. L'idée héliocentrique de Copernic a passé ce test, puisqu'elle permettait de calculer les positions des planètes au moins aussi bien que la théorie géocentrique. L'étape suivante est de déterminer en quoi les prédictions de la nouvelle hypothèse diffèrent des idées déjà en place. Dans le cas de Copernic, un exemple était que, si Vénus tournait autour du Soleil, la planète devait montrer un ensemble de phases du même type que celles de la Lune ; mais si elle tournait autour de la Terre, ces phases n'existeraient pas (*Figure 2.18*). De plus, nous ne serions pas capables de voir une « pleine Vénus », parce que le Soleil serait entre elle et la Terre. Mais à cette époque, avant les lunettes et télescopes, personne n'imaginait tester ces prédictions.

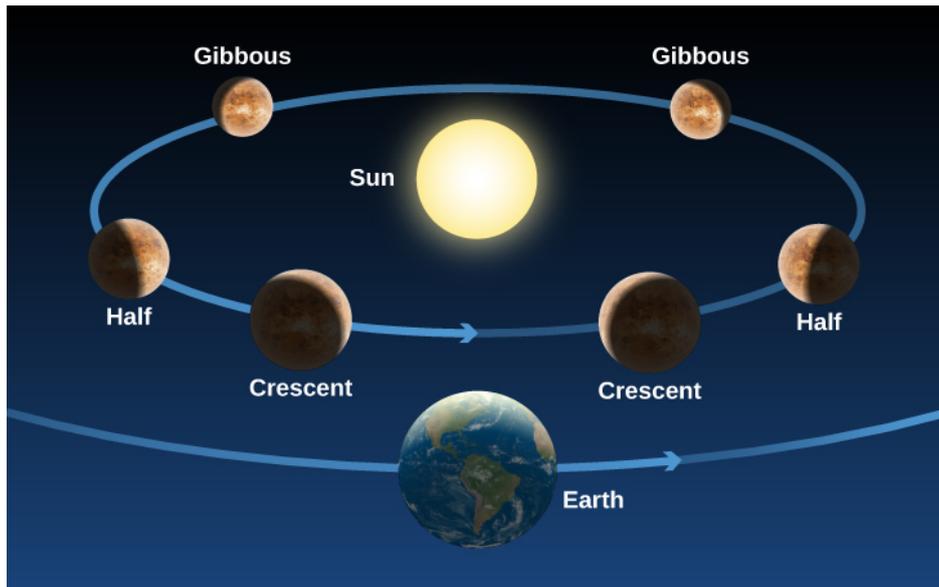


FIGURE II.4.3. – **Figure 2.18 : Phases de Vénus.** Comme Vénus tourne autour du Soleil, nous voyons sa surface éclairée changer, exactement de la même manière que nous voyons la Lune s'illuminer en différentes phases au cours d'un mois.

Un lien pour apprendre

[Cette animation](#) [↗](#) (*en anglais*) montre les phases de Vénus. Vous pouvez aussi voir sa distance à la Terre au cours de son orbite autour du Soleil.

### II.4.3. Galilée et le début de la science moderne

Beaucoup des concepts scientifiques modernes d'observation, d'expérimentation et de test des hypothèses à l'aide de mesures quantitatives précises ont été lancés par un homme qui vivait près d'un siècle après Copernic. Galilée (*Figure 2.19*), un contemporain de Shakespeare, est né à Pise. Comme Copernic, il commença des études médicales sans grand intérêt pour le sujet, puis changea pour les mathématiques. Il a occupé des postes de professeur aux universités de Pise et de Padoue, puis est devenu mathématicien du grand-duc de Toscane à Florence.

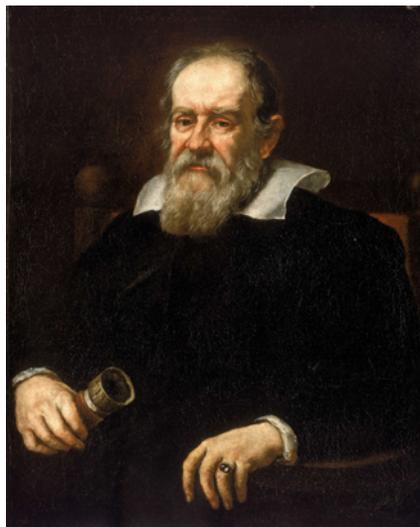


FIGURE II.4.4. – **Figure 2.19 : Galilée (1564 – 1642).** Galilée a préconisé de réaliser des expériences ou de faire des observations pour connaître les voies de la nature. Lorsqu'il pointa son télescope vers le ciel, il y découvrit des choses que les philosophes n'avaient pas supposé être là.

Les plus grandes contributions de Galilée appartiennent au domaine de la cinématique, l'étude du mouvement et des actions des forces sur des corps. Si quelque chose est au repos, cette chose reste au repos et a besoin d'une influence extérieure pour commencer à bouger – ceci nous est familier et était déjà familier aux contemporains de Galilée. Le repos était donc considéré comme l'état naturel de la matière. Galilée a montré, cependant, que le repos n'était pas plus naturel que le mouvement.

Si un objet glisse sur un sol rugueux, il s'arrête rapidement, parce que la friction entre le sol et cet objet agit comme une force qui le ralentit. Cependant, si le sol et l'objet sont hautement polis, l'objet — auquel on a donné la même vitesse initiale — va glisser plus loin avant de s'arrêter. Sur une couche de glace bien lisse, il glissera encore plus loin. Galilée a imaginé que si toutes les forces résistantes étaient supprimées, l'objet continuerait à se mouvoir indéfiniment. Son propos était qu'une force était nécessaire pour mettre un objet en mouvement, mais aussi pour le ralentir, l'arrêter, l'accélérer, ou lui faire changer de direction. Vous pouvez expérimenter ceci en poussant une voiture, ou en déplaçant un bateau en tirant sur son amarre.

Galilée a aussi étudié la façon dont les objets **accélèrent** – changent de vitesse ou de direction. Galilée observa des objets en chute libre ou qui roulaient le long d'une rampe. Il découvrit que ces objets accélèrent uniformément ; c'est-à-dire que, dans des intervalles égaux en temps, ils gagnaient une quantité égale de vitesse. Galilée formula ses découvertes en des lois aux termes mathématiques précis, qui permirent aux futurs expérimentateurs de prédire à quelle distance et à quelle vitesse des objets se déplaceraient en divers intervalles de temps.

#### Des liens pour apprendre

En théorie, si Galilée avait raison, une plume et un marteau lâchés de la même hauteur devraient arriver au sol en même temps. Sur Terre, cette expérience est impossible à cause de la résistance et des mouvements de l'air qui font voler la plume, qui ne tombe donc pas tout droit, accélérée par la seule force de gravité. Pendant longtemps, les professeurs de physique expliquaient que cette expérience serait possible dans un lieu sans atmosphère, comme sur la Lune. En 1971, l'astronaute d'Apollo 15 David Scott prit une plume et

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

un marteau et réalisa l'expérience, pour le délice des amateurs de physique. La NASA fournit [une vidéo de l'expérience avec quelques commentaires](#) [↗](#) (*en anglais*). En 2014, l'expérience a été reproduite sur Terre, [dans la plus grande chambre à vide du monde](#) [↗](#) (*aussi en anglais*).

Quelque part dans les années 1590, Galilée adopta l'hypothèse copernicienne d'un système solaire héliocentrique. Dans l'Italie catholique, ça n'était pas une philosophie populaire : les autorités cléricales soutenaient toujours les idées d'Aristote et de Ptolémée, et elles avaient des raisons politiques et économiques puissantes pour insister sur le fait que la Terre était le centre de la création. Galilée a non seulement changé de position, mais a aussi eu l'audace d'écrire en italien plutôt qu'en latin scolaire – en plus de faire donner des cours publics sur ses théories. Pour lui, il n'y avait pas de contradiction entre l'autorité de l'Église en terme de religion et de moralité, et l'autorité de la nature (révélée par les expériences) en matière de science. C'est principalement à cause de Galilée et de ses « dangereuses » opinions que, en 1616, l'Église émit un décret d'interdiction déclarant que la doctrine copernicienne était « fausse et absurde » et donc ne devait être ni retenue, ni défendue.

### II.4.4. Les observations astronomiques de Galilée

Nous ne savons pas qui a eu, pour la première fois, l'idée de combiner deux ou plus lentilles de verre pour créer un instrument qui agrandit les images des objets distants, les faisant paraître plus proches. Les premières lunettes astronomiques connues avec certitude ont été fabriquées en 1608 par le fabricant de lunettes de vision hollandais Hans Lippershey (1570 – 1619). Galilée a entendu parler de cette découverte et, sans même avoir vu une lunette assemblée, en a construit une avec un pouvoir de grossissement de trois fois ( $3\times$ ), qui faisait apparaître les objets distants trois fois plus proches et plus gros (*Figure 2.20*).

Vocabulaire : lunette astronomique, longue-vue, jumelles, télescope

Une lunette astronomique est un instrument d'optique constitué de lentilles qui permet d'augmenter la taille apparente des objets lointains.

Une longue-vue fonctionne exactement de la même façon, mais est équipée d'un redresseur d'image – une lunette astronomique inverse les images – et est souvent pliable.

Une paire de jumelles n'est rien d'autre que deux petites longues-vues accolées, pour offrir une vision binoculaire.

Un télescope est un instrument très différent dans son fonctionnement, comme nous le verrons plus tard. Toutefois, la langue anglaise utilise le mot « *telescope* » pour désigner les lunettes astronomiques *et* les télescopes.



FIGURE II.4.5. – **Figure 2.20 : La lunette de Galilée.** Cette lunette est constituée d'un tube en bois couvert de papier, et possède une lentille de 26 millimètres de diamètre.

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

Le 25 août 1609, Galilée dévoila une lunette d'un grossissement de  $9\times$  aux officiels du gouvernement de la cité-état de Venise. Un *grossissement de  $9\times$*  signifie que les dimensions linéaires des objets observés semblent neuf fois plus grandes, ce qui revient à dire que l'objet apparaît comme s'il était neuf fois plus proche qu'en réalité. Ce type d'objet qui permet de voir les objets lointains procure d'évidents avantages militaires. Grâce à cette invention, le salaire de Galilée fut pratiquement doublé, et il reçut une chaire de professeur à vie – ses collègues universitaires en furent outrés, en particulier car l'invention n'était même pas originale.

D'autres que Galilée avaient déjà utilisé des longues-vues pour observer des choses sur Terre. Mais, dans un éclair de perspicacité qui changea l'histoire de l'Astronomie, il réalisa qu'il pouvait se servir de la puissance de ces outils pour observer les cieux. Avant d'utiliser sa lunette pour des observations astronomiques, Galilée a dû concevoir une monture stable et améliorer la qualité optique. Il augmenta le grossissement jusqu'à  $30\times$ . Galilée eut aussi besoin de gagner confiance dans la qualité des lunettes.

À cette époque on considérait la vision humaine comme l'arbitre de la réalité en ce qui concerne les tailles, formes et couleurs. Les lentilles, miroirs et prismes étaient connus pour déformer les images distantes en les grossissant, rapetissant ou inversant ; ou en éparpillant la lumière en un spectre – un arc-en-ciel de couleurs. Galilée entreprit donc une série d'expériences, dans le but de se convaincre que ce qu'il voyait à travers la lunette était identique à ce qu'il verrait s'il se rapprochait. Ainsi, il pourrait être confiant dans le fait que les miracles célestes révélés par son instrument étaient aussi réels.

Au début de son travail astronomique, fin 1609, Galilée découvrit beaucoup d'étoiles trop ténues pour être visibles à l'œil nu mais qui devenaient visibles à la lunette. En particulier, il découvrit que certains objets flous se révélaient être constitués d'une multitude d'étoiles, et que la Voie Lactée – la bande laiteuse qui traverse le ciel nocturne – était aussi constituée d'innombrables étoiles individuelles.

En examinant les planètes, Galilée découvrit quatre lunes orbitant autour de Jupiter, avec des périodes d'un peu moins de deux jours à environ 17 jours<sup>1</sup>. Cette découverte était particulièrement importante, parce qu'elle montrait que tout n'avait pas à tourner autour de la Terre. De plus, elle prouvait que certains centres de mouvement pouvaient eux aussi se déplacer. Certains défenseurs du géocentrisme affirmaient que si la Terre était en mouvement, la Lune serait laissée derrière, parce qu'elle ne pourrait pas rattraper le mouvement rapide de la Terre. Les lunes de Jupiter montraient l'inexactitude de cet argument.

C'est à l'aide de cette lunette que Galilée put réaliser le test de la théorie de Copernic mentionné plus tôt, basé sur les phases de Vénus. En quelques mois, il observa que Vénus présentait des phases comme celles de la Lune, montrant ainsi qu'elle devait orbiter autour du Soleil. Nous voyons donc différentes parties de sa face éclairée selon l'époque d'observation (cf la *Figure 2.18*). Ces observations ne correspondaient pas au modèle de Ptolémée, dans lequel Vénus tournait autour de la Terre. Dans ce modèle, Vénus pouvait présenter des phases, mais elles ne correspondaient pas à celles observées par Galilée.

Galilée a aussi observé la Lune, et y vit des cratères, des chaînes de montagnes, des vallées et des zones plates et sombres qu'il pensait être de l'eau. Ces découvertes montraient que la Lune pouvait ne pas être très différente de la Terre, ce qui suggérait que la Terre, elle aussi, pouvait être un corps céleste comme les autres.

---

1. En reconnaissance de cette découverte et en l'honneur de son travail, la NASA a nommé « Galileo » (du nom italien de Galilée) [l'une des sondes envoyée étudier le système jovien](#) ↗.

### Un lien pour apprendre

Pour plus d'informations sur la vie et le travail de Galilée, voyez [le projet Galilée](#) [↗](#) [en anglais] de la Rice University.

Le travail de Galilée rendait difficile le refus du modèle copernicien, et la Terre a été lentement détrônée de sa position centrale dans l'Univers pour être remise à sa place d'une des planètes du Soleil. Cependant, Galilée commença par rencontrer une grande opposition. L'Église Catholique Romaine, perturbée par la Réforme Protestante, cherchait à affirmer son autorité et a choisi de faire de Galilée un exemple. Il a dû comparaitre devant l'Inquisition pour répondre d'accusations selon lesquelles son travail était hérétique, et a finalement été condamné à l'assignation à résidence. Ses ouvrages étaient sur la liste des livres interdits jusqu'en 1836 – bien que, dans les pays où l'Église Catholique Romaine avait moins d'influence, ils étaient largement lus et commentés. Il a fallu attendre 1992 pour que l'Église Catholique admette publiquement qu'elle avait commis une erreur en censurant les idées de Galilée.

Les nouvelles idées de Copernic et Galilée démarrèrent une révolution dans notre conception du cosmos. Il devint finalement évident que l'Univers est un lieu vaste, dans lequel la Terre n'a pas de rôle particulier. L'idée que la Terre tourne autour du Soleil comme les autres planètes a soulevé la possibilité que ces dernières pourraient être elles-mêmes des « mondes », et peut-être même abriter la vie. L'humanité a été rétrogradée de sa position au centre de l'Univers avec la rétrogradation de la Terre. L'Univers, malgré ce que nous pourrions souhaiter, ne tourne pas autour de nous.

Tout ceci est évident pour la plupart d'entre nous aujourd'hui. Mais il y a quatre siècles, ces idées étaient terrifiantes et hérétiques pour certains, immensément stimulantes pour d'autres. Les pionniers de la Renaissance ont lancé le monde européen sur la voie de la science et de la technologie, que nous suivons encore aujourd'hui. Pour eux, la nature était rationnelle et pouvait être connue, ses secrets révélés par les expériences et les observations.

### Observer par vous-même

#### II.4.4.0.1. Observer les planètes

Vous pouvez voir au moins une planète briller dans le ciel nocturne presque à n'importe quel moment de la nuit, à n'importe quelle saison. Les cinq planètes connues de nos ancêtres – Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne – sont plus lumineuses que presque toutes les étoiles, et peuvent être observées même depuis les centres-villes si vous savez où et quand regarder. Une façon de différencier les étoiles des planètes est que ces dernières scintillent moins.

**Vénus** reste toujours proche du Soleil de notre point de vue. Elle apparaît comme une « étoile du soir » à l'ouest après le crépuscule, ou comme une « étoile du matin » à l'est avant l'aube. C'est l'objet céleste le plus brillant après le Soleil et la Lune. Elle brille beaucoup plus que n'importe quelle étoile, et dans certaines circonstances peut même projeter des ombres visibles. Certains jeunes militaires ont essayé de tirer sur Vénus, pensant qu'il s'agissait d'un appareil ennemi ou un OVNI.

**Mars**, avec sa couleur rouge caractéristique, peut être presque aussi brillante que Vénus lorsqu'elle est au plus proche de la Terre, mais est généralement plus discrète. **Jupiter** est souvent la seconde planète en termes de luminosité, à peu près à égalité avec les étoiles les

## II. Observer le ciel : la naissance de l'astronomie

plus brillantes. **Saturne** est plus faible et varie énormément en luminosité, selon que ses grands anneaux sont vu presque par la tranche (pâle) ou largement ouverts (lumineuse). **Mercure** est plutôt brillante, mais peu de gens la remarquent parce qu'elle reste toujours très proche du Soleil – jamais plus de  $28^\circ$  – et donc dans un ciel crépusculaire lumineux. En accord avec leur nom, les planètes « errent » par rapport au fond « fixe » des étoiles. Bien que leurs mouvements apparents soient complexes, elles suivent un ordre sur lequel le modèle héliocentrique du système solaire (décrit dans ce chapitre) est basé. Les positions des planètes avec des cartes et guides sont décrites dans des magazines spécialisés tels que [Ciel & Espace](#)  (disponible en ligne et dans tous les bons kiosques). D'innombrables programmes pour ordinateurs, téléphones et tablettes vous montrent aussi où trouver les planètes n'importe quelle nuit.

Troisième partie  
Les orbites et la gravité

# Introduction

FIGURE 1. – **Figure 3.1 Station spatiale internationale.** Cet habitat et laboratoire spatial tourne autour de la Terre toutes les 90 minutes (crédit : modification d'un travail de la NASA).

Comment trouver une nouvelle planète à la périphérie de notre système solaire, trop faible pour être vue à l'œil nu et si éloignée qu'elle se déplace très lentement parmi les étoiles ? Tel était le problème auquel étaient confrontés les astronomes au XIXe siècle, alors qu'ils tentaient de dresser un inventaire complet de notre système solaire.

Si nous pouvions observer le système solaire depuis l'espace, l'interprétation des mouvements planétaires serait beaucoup plus simple. Mais le fait est que nous devons observer les positions de toutes les autres planètes depuis notre propre planète en mouvement. Les scientifiques de la Renaissance ne connaissaient pas mieux les détails des mouvements de la Terre que ceux des autres planètes. Leur problème, comme nous l'avons vu dans Observer le ciel : la naissance de l'astronomie, était qu'ils devaient déduire la nature de tous les mouvements planétaires en se basant uniquement sur leurs observations terrestres des positions des autres planètes dans le ciel. Pour résoudre plus complètement ce problème complexe, il fallait de meilleures observations et de meilleurs modèles du système planétaire.

# III.1. Les lois du mouvement planétaire

## Introduction

*i*

### Objectifs

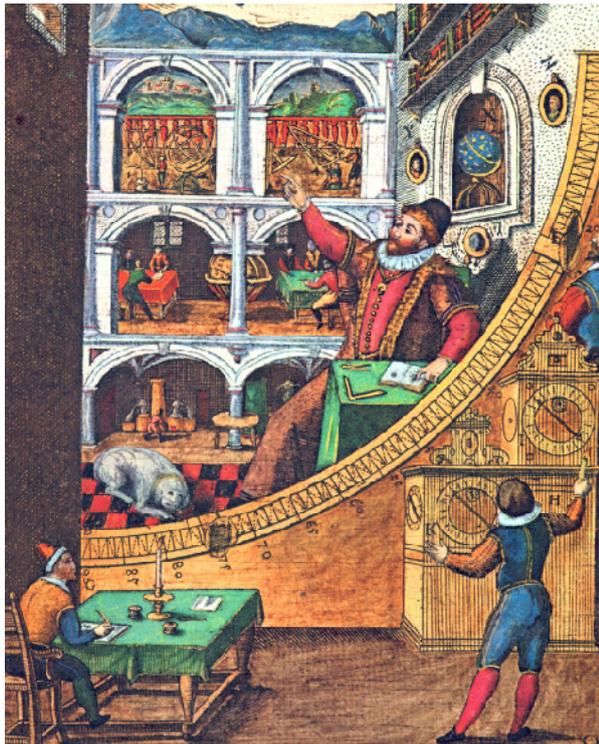
À la fin de cette section, vous serez en mesure de :

- Décrire comment Tycho Brahe et Johannes Kepler ont contribué à notre compréhension du mouvement des planètes autour du Soleil.
- Expliquer les trois lois du mouvement planétaire de Kepler.

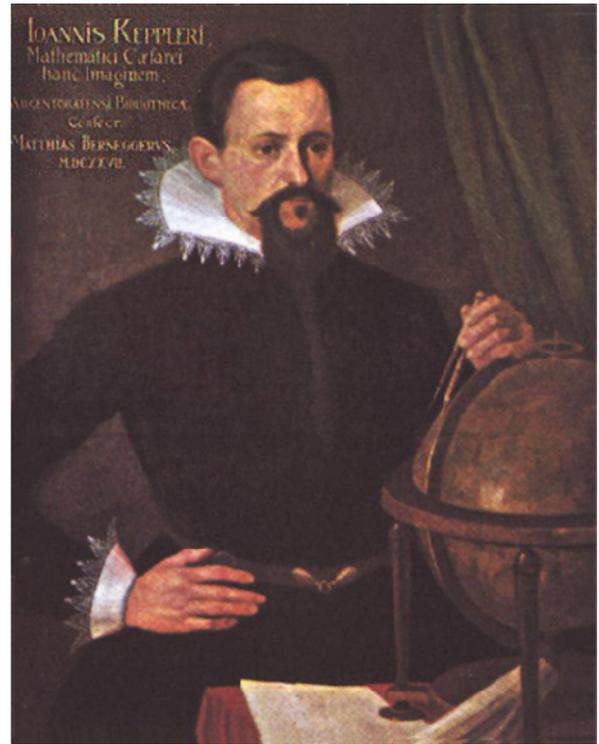
À peu près au moment où Galilée commençait ses expériences sur la chute des corps, les efforts de deux autres scientifiques ont fait progresser de façon spectaculaire notre compréhension du mouvement des planètes. Ces deux astronomes étaient l'observateur Tycho Brahe et le mathématicien Johannes Kepler. Ensemble, ils ont fondé les spéculations de Copernic sur une base mathématique solide et ont ouvert la voie aux travaux d'Isaac Newton au siècle suivant.

### III.1.1. L'observatoire de Tycho Brahe

Tycho Brahe naquit dans une famille de la noblesse danoise trois ans après la publication du *De Revolutionibus* de Copernic. Il s'intéressa très tôt à l'astronomie et, jeune homme, fit des observations astronomiques importantes. Parmi celles-ci, une étude minutieuse de ce que nous savons aujourd'hui être une étoile explosée qui brille dans le ciel nocturne. Sa réputation grandissante lui valu le patronage du roi danois Frédéric II et, à l'âge de 30 ans, Brahe pu fonder un bel observatoire astronomique sur l'île de Hven, dans la mer du Nord (figure 3.2). Brahe était le dernier et le plus grand des observateurs pré-télescopiques en Europe.



(a)



(b)

FIGURE III.1.1. – **Figure 3.2 Tycho Brahe (1546–1601) et Johannes Kepler (1571–1630).** (a) Une gravure stylisée montre Tycho Brahe utilisant ses instruments pour mesurer l'altitude des objets célestes au-dessus de l'horizon. Le grand instrument incurvé au premier plan lui permettait de mesurer des angles précis dans le ciel. Notez que la scène fait allusion à la grandeur de l'observatoire de Brahe à Hven. (b) Kepler était un mathématicien et astronome allemand. Sa découverte des lois fondamentales qui décrivent le mouvement des planètes a donné une base mathématique solide à la cosmologie héliocentrique de Copernic.

À Hven, Brahe enregistra en permanence les positions du Soleil, de la Lune et des planètes pendant près de 20 ans. Ses observations approfondies et précises lui ont permis de constater que les positions des planètes variaient par rapport à celles données dans les tableaux publiés, qui étaient basés sur les travaux de Ptolémée. Ces données étaient extrêmement précieuses, mais Brahe n'avait pas la capacité de les analyser et de développer un meilleur modèle que celui que Ptolémée avait publié. Il était d'autant plus inhibé par son caractère extravagant et acariâtre, et il accumula les ennemis parmi les fonctionnaires du gouvernement.

Lorsque son mécène, Frédéric II, meurt en 1597, Brahe perdit sa base politique et décida de quitter le Danemark. Il s'installa à Prague, où il devient l'astronome de la cour de l'empereur Rodolphe de Bohême. C'est là, l'année précédant sa mort, que Brahe trouva un jeune mathématicien très compétent, Johannes Kepler, pour l'aider à analyser ses nombreuses données planétaires.

### III.1.2. Johannes Kepler

Johannes Kepler est né dans une famille pauvre de la province allemande du Wurtemberg et a vécu une grande partie de sa vie dans la tourmente de la guerre de Trente Ans (voir figure 3.2). Il fréquente l'université de Tubingen et se destine à une carrière de théologien. Il y apprend

les principes du système copernicien et se convertit à l'hypothèse héliocentrique. Finalement, Kepler se rend à Prague pour servir d'assistant à Brahe, qui le met au travail pour essayer de trouver une théorie satisfaisante du mouvement planétaire, compatible avec la longue série d'observations faites à Hven. Brahe hésite à fournir à Kepler beaucoup de matériel à un moment donné, de peur que ce dernier ne découvre lui-même les secrets du mouvement universel, privant ainsi Brahe d'une partie de la gloire. Ce n'est qu'après la mort de Brahe en 1601 que Kepler entre en pleine possession de ces documents inestimables. Leur étude occupe la majeure partie du temps de Kepler pendant plus de 20 ans.

Grâce à son analyse du mouvement des planètes, Kepler élabore une série de principes, aujourd'hui connus sous le nom des trois lois de Kepler, qui décrivent le comportement des planètes en fonction de leur trajectoire dans l'espace. Les deux premières lois du mouvement des planètes ont été publiées en 1609 dans *Astronomia Nova*. Leur découverte a constitué une étape importante dans le développement de la science moderne.

#### III.1.3. Les deux premières lois du mouvement planétaire

La trajectoire d'un objet dans l'espace est appelée son orbite. Kepler a d'abord supposé que les orbites des planètes étaient des cercles, mais cela ne lui a pas permis de trouver des orbites qui correspondaient aux observations de Brahe. En travaillant avec les données relatives à Mars, il a fini par découvrir que l'orbite de cette planète avait la forme d'un cercle quelque peu aplati, ou ellipse. Après le cercle, l'ellipse est la plus simple des courbes fermées, appartenant à une famille de courbes connues sous le nom de sections coniques (figure 3.3).

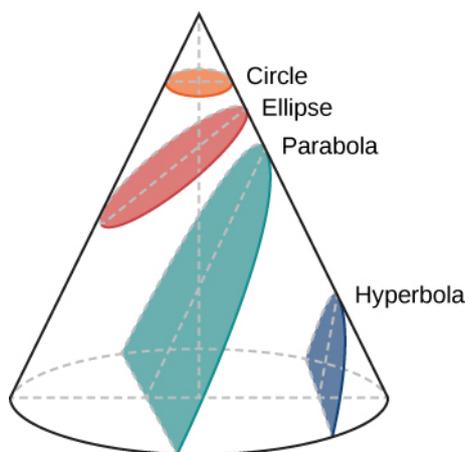


FIGURE III.1.2. – **Figure 3.3 Sections coniques.** Le cercle, l'ellipse, la parabole et l'hyperbole sont tous formés par l'intersection d'un plan avec un cône. C'est pourquoi de telles courbes sont appelées sections coniques.

Vous vous souvenez peut-être de vos cours de mathématiques. Dans un cercle, le centre est un point particulier. La distance entre le centre et n'importe quel point du cercle est exactement la même. Dans une ellipse, la somme des distances entre deux points particuliers à l'intérieur de l'ellipse et n'importe quel point de l'ellipse est toujours la même. Ces deux points à l'intérieur de l'ellipse sont appelés ses *foyers*, un mot inventé à cet effet par Kepler.

Cette propriété suggère une façon simple de dessiner une ellipse (figure 3.4). Nous enroulons les extrémités d'une boucle de ficelle autour de deux punaises enfoncées dans une feuille de papier sur une planche à dessin, de sorte que la ficelle soit détendue. Si nous poussons un crayon contre la ficelle, ce qui la rend tendue, et que nous faisons ensuite glisser le crayon contre la ficelle

### III. Les orbites et la gravité

tout autour des punaises, la courbe qui en résulte est une ellipse. En tout point où se trouve le crayon, la somme des distances entre le crayon et les deux punaises est une longueur constante - la longueur de la corde. Les punaises se trouvent aux deux foyers de l'ellipse.

Le diamètre le plus large de l'ellipse est appelé son **grand axe**. La moitié de cette distance, c'est-à-dire la distance entre le centre de l'ellipse et l'une de ses extrémités, constitue le **demi-grand axe**, qui est généralement utilisé pour préciser la taille de l'ellipse. Par exemple, le demi-grand axe de l'orbite de Mars, qui correspond également à la distance moyenne de la planète par rapport au Soleil, est de 228 millions de kilomètres.

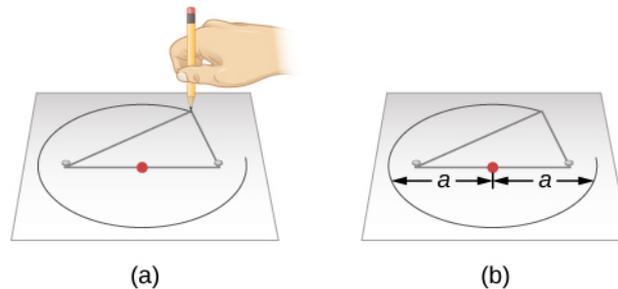


FIGURE III.1.3. – **Figure 3.4 Dessiner une ellipse.** (a) Nous pouvons construire une ellipse en enfonçant deux punaises (les objets blancs) dans une feuille de papier sur une planche à dessin, puis en enroulant une ficelle autour des punaises. Chaque punaise représente un foyer de l'ellipse, l'une des punaises étant le Soleil. Tendez la ficelle à l'aide d'un crayon, puis déplacez le crayon autour des punaises. La longueur de la ficelle reste la même, de sorte que la somme des distances entre un point quelconque de l'ellipse et les foyers est toujours constante. (b) Dans cette illustration, chaque demi-grand axe est désigné par  $a$ . La distance  $2a$  est appelée le grand axe de l'ellipse.

La forme (rondeur) d'une ellipse dépend de la proximité des deux foyers par rapport au grand axe. Le rapport entre la distance entre les foyers et la longueur du grand axe est appelé **excentricité** de l'ellipse.

Si les foyers (ou les points d'attache) sont déplacés au même endroit, la distance entre les foyers sera nulle. Cela signifie que l'excentricité est nulle et que l'ellipse n'est qu'un cercle ; on peut donc appeler un cercle une ellipse d'excentricité nulle. Dans un cercle, le demi-grand axe serait le rayon.

Ensuite, nous pouvons réaliser des ellipses de différentes élongations (ou longueurs étendues) en variant l'espacement des punaises (tant qu'elles ne sont pas plus éloignées que la longueur de la corde). Plus l'excentricité est grande, plus l'ellipse est allongée, jusqu'à une excentricité maximale de 1,0, lorsque l'ellipse devient "plate", c'est-à-dire à l'opposé d'un cercle.

La taille et la forme d'une ellipse sont entièrement spécifiées par son demi-grand axe et son excentricité. En utilisant les données de Brahe, Kepler a découvert que Mars a une orbite elliptique, avec le Soleil à un foyer (l'autre foyer est vide). L'excentricité de l'orbite de Mars n'est que d'environ 0,1 ; son orbite, dessinée à l'échelle, serait pratiquement indiscernable d'un cercle, mais la différence s'est avérée cruciale pour comprendre les mouvements planétaires.

Kepler a généralisé ce résultat dans sa première loi et a affirmé que les orbites *de toutes les planètes sont des ellipses*. C'était un moment décisif dans l'histoire de la pensée humaine : il n'était pas nécessaire de n'avoir que des cercles pour avoir un cosmos acceptable. L'univers pouvait être un peu plus complexe que ce que les philosophes grecs avaient voulu.

La deuxième loi de Kepler concerne la vitesse à laquelle chaque planète se déplace le long de son ellipse, également appelée **vitesse orbitale**. En se basant sur les observations de Mars

### III. Les orbites et la gravité

par Brahe, Kepler découvre que la planète accélère lorsqu'elle se rapproche du Soleil et ralentit lorsqu'elle s'en éloigne. Il a exprimé la forme précise de cette relation en imaginant que le Soleil et Mars sont reliés par une ligne droite et élastique. Lorsque Mars est plus proche du Soleil (positions 1 et 2 de la figure 3.5), la ligne élastique n'est pas autant étirée, et la planète se déplace rapidement. Plus loin du Soleil, comme dans les positions 3 et 4, la ligne est beaucoup étirée, et la planète ne se déplace pas aussi rapidement. Lorsque Mars se déplace sur son orbite elliptique autour du Soleil, la ligne élastique balaie des zones de l'ellipse au fur et à mesure de son déplacement (les régions colorées de notre figure). Kepler a découvert qu'à intervalles de temps égaux ( $t$ ), les zones balayées dans l'espace par cette ligne imaginaire sont toujours égales ; c'est-à-dire que l'aire de la région B de 1 à 2 est la même que celle de la région A de 3 à 4. Si une planète se déplace sur une orbite circulaire, la ligne élastique est toujours étirée de la même façon et la planète se déplace à une vitesse constante autour de son orbite. Mais, comme Kepler l'a découvert, dans la plupart des orbites, la vitesse d'une planète en orbite autour de son étoile (ou d'une lune en orbite autour de sa planète) a tendance à varier parce que l'orbite est elliptique.

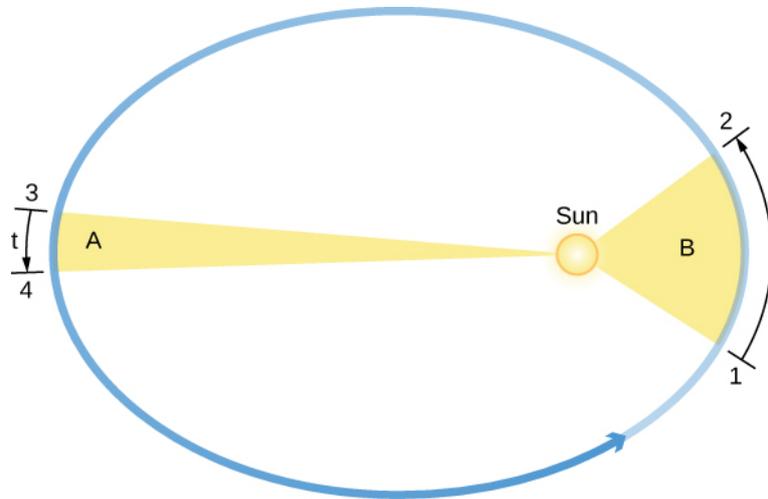


FIGURE III.1.4. – **Figure 3.5 La deuxième loi de Kepler : La loi des aires égales.** La vitesse orbitale d'une planète voyageant autour du Soleil (l'objet circulaire à l'intérieur de l'ellipse) varie de telle sorte qu'à intervalles de temps égaux ( $t$ ), une ligne entre le Soleil et une planète balaie des surfaces égales (A et B). Notez que les excentricités des orbites des planètes dans notre système solaire sont nettement inférieures à celles illustrées ici.

#### III.1.4. La troisième loi de Kepler

Les deux premières lois du mouvement planétaire de Kepler décrivent la forme de l'orbite d'une planète et permettent de calculer la vitesse de son mouvement en tout point de l'orbite. Kepler est heureux d'avoir découvert ces règles fondamentales, mais elles ne satisfont pas sa quête d'une compréhension complète du mouvement des planètes. Il voulait savoir pourquoi les orbites des planètes étaient espacées comme elles le sont et trouver un modèle mathématique dans leurs mouvements - une "harmonie des sphères" comme il l'appelait. Pendant de nombreuses années, il a travaillé à la découverte de relations mathématiques régissant l'espacement des planètes et le temps que chaque planète mettait à faire le tour du Soleil.

En 1619, Kepler a découvert une relation de base permettant de relier les orbites des planètes à leurs distances relatives par rapport au Soleil. Nous définissons la **période orbitale d'une**

### III. Les orbites et la gravité

**planète** ( $P$ ), comme le temps qu'il faut à une planète pour faire une fois le tour du Soleil. Rappelons également que le demi-grand axe d'une planète,  $a$ , est égal à sa distance moyenne du Soleil. Cette relation, connue aujourd'hui sous le nom de *troisième loi de Kepler*, indique que la période orbitale d'une planète au carré est proportionnelle au cube du demi-grand axe de son orbite, soit

$$P^2 \propto a^3$$

Lorsque  $P$  (la période orbitale) est mesurée en années et que  $a$  est exprimé en une quantité appelée **unité astronomique (UA)**, les deux côtés de la formule ne sont pas seulement proportionnels mais égaux. Une UA est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil et est approximativement égale à  $1,5 \times 10^8$  kilomètres. Dans ces unités,

$$P^2 = a^3$$

La troisième loi de Kepler s'applique à tous les objets en orbite autour du Soleil, y compris la Terre, et fournit un moyen de calculer leurs distances relatives par rapport au Soleil à partir du temps qu'ils mettent à orbiter. Prenons un exemple spécifique pour illustrer l'utilité de la troisième loi de Kepler.

Par exemple, supposons que vous calculez le temps que met Mars à faire le tour du Soleil (en années terrestres). La troisième loi de Kepler peut alors être utilisée pour calculer la distance moyenne de Mars par rapport au Soleil. La période orbitale de Mars (1,88 année terrestre) au carré, ou  $P^2$ , est de  $1,88^2 = 3,53$ , et selon l'équation de la troisième loi de Kepler, elle est égale au cube de son demi-grand axe, ou  $a^3$ . Quel nombre doit-on donc cuber pour obtenir 3,53 ? La réponse est 1,52 (puisque  $1,52 \times 1,52 \times 1,52 = 3,53$ ). Ainsi, le demi-grand axe de Mars, en unités astronomiques, doit être de 1,52 UA. En d'autres termes, pour faire le tour du Soleil en un peu moins de deux ans, Mars doit être éloignée d'environ 50 % de plus du Soleil que ne l'est la Terre.

#### Exemple 3.1

##### Calcul des périodes

Imaginez qu'un objet voyage autour du Soleil. Quelle serait la période orbitale de l'objet si son orbite a un demi-grand axe de 50 UA ?

⊙ Contenu masqué n°4

##### Vérifiez vos connaissances

Quelle serait la période orbitale d'un astéroïde (un morceau rocheux situé entre Mars et Jupiter) dont le demi-grand axe est de 3 UA ?

**Réponse :**

⊙ Contenu masqué n°5

Les trois lois de Kepler sur le mouvement des planètes peuvent être résumées comme suit :

- **Première loi de Kepler** : Chaque planète se déplace autour du Soleil sur une orbite qui est une ellipse, avec le Soleil à un foyer de l'ellipse.

### III. Les orbites et la gravité

- **Deuxième loi de Kepler** : La ligne droite reliant une planète et le Soleil balaie des surfaces égales dans l'espace à des intervalles de temps égaux.
- La **troisième loi de Kepler** : Le carré de la période orbitale d'une planète est directement proportionnel au cube du demi-grand axe de son orbite.

Les trois lois de Kepler fournissent une description géométrique précise du mouvement des planètes dans le cadre du système copernicien. Grâce à ces outils, il a été possible de calculer les positions planétaires avec une précision grandement améliorée. Cependant, les lois de Kepler sont purement descriptives : elles ne nous aident pas à comprendre quelles forces de la nature contraignent les planètes à suivre cet ensemble particulier de règles. Cette étape a été laissée à Isaac Newton.

#### Exemple 3.2

##### Application de la troisième loi de Kepler

À l'aide des périodes orbitales et des demi-axes de Vénus et de la Terre fournis ici, calculez  $P^2$  et  $a^3$ , et vérifiez qu'ils obéissent à la troisième loi de Kepler. La période orbitale de Vénus est de 0,62 an, et son demi-grand axe est de 0,72 UA. La période orbitale de la Terre est de 1,00 an, et son demi-grand axe est de 1,00 UA.

##### Solution

⊙ Contenu masqué n°6

##### Vérifiez vos connaissances

À l'aide des périodes orbitales et des demi-axes de Saturne et de Jupiter qui sont fournis ici, calculez  $P^2$  et  $a^3$ , et vérifiez qu'ils obéissent à la troisième loi de Kepler. La période orbitale de Saturne est de 29,46 ans, et son demi-grand axe est de 9,54 UA. La période orbitale de Jupiter est de 11,86 ans, et son demi-grand axe est de 5,20 UA.

##### Réponse :

⊙ Contenu masqué n°7

## Conclusion

*i*

Lien pour apprendre (en anglais)

En l'honneur du scientifique qui a été le premier à élaborer les lois régissant le mouvement des planètes, l'équipe qui a construit le premier vaisseau spatial destiné à rechercher des planètes en orbite autour d'autres étoiles a décidé de nommer la sonde "Kepler". Pour en savoir plus sur la vie de Johannes Kepler et ses lois sur le mouvement des planètes, ainsi que pour obtenir de nombreuses informations sur la mission Kepler, visitez le site Web Kepler de la NASA (<https://science.nasa.gov/solar-system/orbits-and-keplers-laws/> ) et suivez les liens qui vous intéressent.

## Contenu masqué

### Contenu masqué n°4

#### Solution

D'après la troisième loi de Kepler, nous savons que (lorsque nous utilisons des unités d'années et d'UA)

$$P^2 = a^3$$

Si l'orbite de l'objet a un demi-grand axe de 50 UA ( $a = 50$ ), nous pouvons cuber 50 et prendre la racine carrée du résultat pour obtenir P :

$$P = \sqrt{a^3}$$

$$P = \sqrt{50 \times 50 \times 50} = \sqrt{125000} = 353,6 \text{ années}$$

Par conséquent, la période orbitale de l'objet est d'environ 350 ans. Cela placerait notre objet hypothétique au-delà de l'orbite de Pluton. [Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°5

$$P = \sqrt{3 \times 3 \times 3} = \sqrt{27} = 5,2 \text{ années}$$

[Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°6

Nous pouvons utiliser l'équation de la troisième loi de Kepler,  $P^2 = a^3$ . Pour Vénus,  $P^2 = 0,62 \times 0,62 = 0,38$  et  $a^3 = 0,72 \times 0,72 \times 0,72 = 0,37$  (l'arrondi des chiffres entraîne parfois des écarts mineurs comme celui-ci). Le carré de la période orbitale (0,38) est approximativement égal au cube du demi-grand axe (0,37). Par conséquent, Vénus obéit à la troisième loi de Kepler. Pour la Terre,  $P^2 = 1,00 \times 1,00 = 1,00$  et  $a^3 = 1,00 \times 1,00 \times 1,00 = 1,00$ . Le carré de la période orbitale (1,00) est approximativement (dans ce cas, égal) au cube du demi-axe (1,00). Par conséquent, la Terre obéit à la troisième loi de Kepler. [Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°7

Pour Saturne,  $P^2 = 29,46 \times 29,46 = 867,9$  et  $a^3 = 9,54 \times 9,54 \times 9,54 = 868,3$ . Le carré de la période orbitale (867,9) est approximativement égal au cube du demi-grand axe (868,3). Par conséquent, Saturne obéit à la troisième loi de Kepler. [Retourner au texte.](#)

## III.2. La grande synthèse de Newton

### Introduction

*i*

#### Objectifs

A la fin de cette section, vous serez capable de :

- Décrire les trois lois du mouvement de Newton
- Expliquer comment les trois lois du mouvement de Newton sont liées à la quantité de mouvement
- Définir la masse, le volume et la densité et leur différence
- Définir la quantité de mouvement angulaire

C'est le génie d'Isaac Newton qui a trouvé un cadre conceptuel expliquant complètement les observations et les règles rassemblées par Galilée, Brahe, Kepler et d'autres. Newton est né dans le Lincolnshire, en Angleterre, l'année suivant la mort de Galilée (**figure 3.6**). Contre l'avis de sa mère, qui souhaitait qu'il reste à la maison pour aider à la ferme familiale, il entre au Trinity College de Cambridge en 1661 et huit ans plus tard, il est nommé professeur de mathématiques. Parmi les contemporains de Newton en Angleterre figurent l'architecte Christopher Wren, les auteurs Aphra Behn et Daniel Defoe, et le compositeur G. F. Haendel.

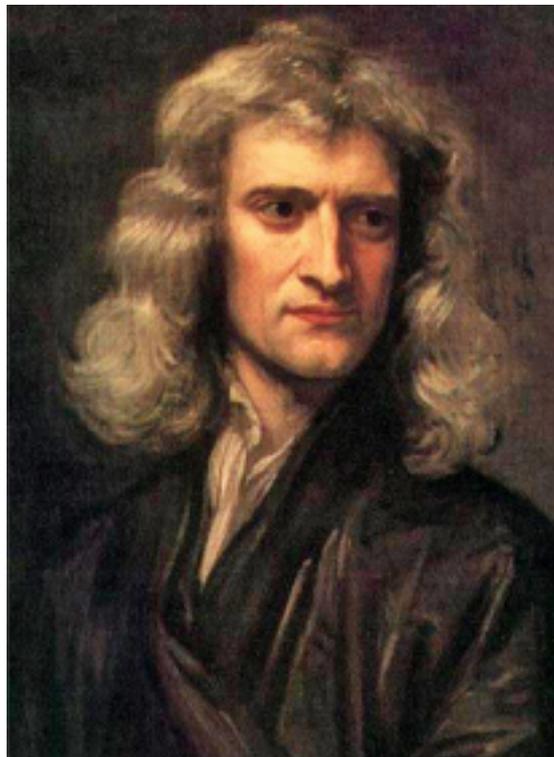


FIGURE III.2.1. – **Figure 3.6 Isaac Newton (1643–1727), portrait de 1689 réalisé par Sir Godfrey Kneller.** Les travaux d'Isaac Newton sur les lois du mouvement, la gravité, l'optique et les mathématiques ont jeté les bases d'une grande partie des sciences physiques.

### III.2.1. Les lois du mouvement de Newton

Jeune homme à l'université, Newton s'est intéressé à la philosophie naturelle, comme on appelait alors la science. Il a élaboré certaines de ses premières idées sur les machines et l'optique pendant les années de peste de 1665 et 1666, lorsque les étudiants ont été renvoyés de l'université. Newton, un homme lunatique et souvent difficile, a continué à travailler sur ses idées en privé, inventant même de nouveaux outils mathématiques pour l'aider à faire face aux complexités impliquées. Finalement, son ami Edmund Halley (présenté dans Comets and Asteroids : Debris of the Solar System) l'a convaincu de rassembler et de publier les résultats de ses remarquables recherches sur le mouvement et la gravité. Le résultat fut un volume qui exposait le système sous-jacent du monde physique, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Les *Principia*, comme le livre est généralement connu, ont été publiés aux frais de Halley en 1687.

Au tout début des *Principia*, Newton propose trois lois qui régiraient les mouvements de tous les objets :

- Première loi de Newton : Chaque objet continuera à être dans un état de repos ou à se déplacer à une vitesse constante en ligne droite à moins qu'il ne soit contraint de changer par une force extérieure.
- Deuxième loi de Newton : Le changement de mouvement d'un corps est proportionnel à et dans la direction de la force qui agit sur lui.
- Troisième loi de Newton : Pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée (ou : les actions mutuelles de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et agissent dans des directions opposées).

Dans le latin original, les trois lois ne contiennent que 59 mots, mais ces quelques mots préparent le terrain pour la science moderne. Examinons-les plus attentivement.

### III.2.2. Interprétation des lois de Newton

La première loi de Newton est une reformulation de l'une des découvertes de Galilée, appelée la *conservation de la quantité de mouvement*. La loi affirme qu'en l'absence de toute influence extérieure, il existe une mesure du mouvement d'un corps, appelée sa **quantité de mouvement**, qui reste inchangée.

La première loi de Newton est parfois appelée *loi d'inertie*, où l'inertie est la tendance des objets à continuer à faire ce qu'ils font déjà. En d'autres termes, un objet stationnaire reste en place et un objet en mouvement continue de bouger à moins qu'une force n'intervienne.

Définissons la signification précise de la quantité de mouvement - cela dépend de trois facteurs :

1. la vitesse - la vitesse à laquelle un corps se déplace (zéro s'il est immobile),
2. la direction de son mouvement
3. la masse - une mesure de la quantité de matière dans un corps, dont nous parlerons plus tard.

Les scientifiques utilisent le terme **vélocité** pour décrire la vitesse et la direction du mouvement. Par exemple, 20 kilomètres à l'heure plein sud est la vélocité, alors que 20 kilomètres à l'heure

### III. Les orbites et la gravité

est la vitesse. La quantité de mouvement peut alors être définie comme la masse d'un objet multipliée par sa vélocité.

Il n'est pas si facile de voir cette règle en action dans le monde de tous les jours en raison des nombreuses forces agissant sur un corps à un moment donné. Une force importante est la friction, qui ralentit généralement les choses. Si vous faites rouler une balle sur le trottoir, elle finit par s'arrêter car le trottoir exerce une force de frottement sur la balle. Mais dans l'espace entre les étoiles, où il y a si peu de matière que les frottements sont insignifiants, les objets peuvent en fait continuer à se déplacer (à dériver) indéfiniment.

La quantité de mouvement d'un corps ne peut changer que sous l'action d'une influence extérieure. La deuxième loi de Newton exprime la **force** en termes de sa capacité à changer la quantité de mouvement avec le temps. Une force (une poussée ou une traction) a à la fois une intensité et une direction. Lorsqu'une force est appliquée à un corps, la quantité de mouvement change dans la direction de la force appliquée. Cela signifie qu'une force est nécessaire pour modifier la vitesse ou la direction d'un corps, ou les deux, c'est-à-dire pour le mettre en mouvement, l'accélérer, le ralentir, l'arrêter ou changer sa direction.

Comme vous l'avez appris dans [Observer le ciel : la naissance de l'astronomie](#) <sup>☞</sup>, le taux de variation de la vitesse d'un objet est appelé **accélération**. Newton a montré que l'accélération d'un corps était proportionnelle à la force qui lui était appliquée. Supposons qu'après une longue période de lecture, vous poussiez un livre d'astronomie loin de vous sur une longue table lisse (nous utilisons une table lisse pour qu'il n'y ait pas de frottements). Si vous poussez le livre régulièrement, il continuera à accélérer tant que vous le pousserez. Plus vous poussez le livre fort, plus son accélération sera importante. Le degré d'accélération d'un objet par une force est également déterminé par la masse de l'objet. Si vous continuez à pousser un stylo avec la même force avec laquelle vous poussiez le livre, le stylo - ayant moins de masse - serait accéléré à une plus grande vitesse.

La troisième loi de Newton est peut-être la plus profonde des règles qu'il a découvertes. Fondamentalement, c'est une généralisation de la première loi, mais cela nous donne aussi un moyen de définir la masse. Si nous considérons un système de deux ou plusieurs objets isolés des influences extérieures, la première loi de Newton dit que la quantité de mouvement totale des objets doit rester constante. Par conséquent, tout changement de quantité de mouvement au sein du système doit être équilibré par un autre changement égal et opposé afin que la quantité de mouvement de l'ensemble du système ne soit pas modifiée.

Cela signifie que les forces dans la nature ne se produisent pas seules : nous constatons que dans chaque situation, il y a toujours une paire de forces qui sont égales et opposées l'une à l'autre. Si une force est exercée sur un objet, elle doit être exercée par quelque chose d'autre, et l'objet exercera une force égale et opposée sur ce quelque chose. Nous pouvons regarder un exemple simple pour le démontrer.

Supposons qu'un étudiant en astronomie casse-cou - et un skateur passionné - veuille sauter de la fenêtre de son dortoir du deuxième étage sur sa planche (nous ne recommandons pas d'essayer cela!). La force qui le tire vers le bas après avoir sauté (comme nous le verrons dans la section suivante) est la force de gravité entre lui et la Terre. Lui et la Terre doivent tous deux subir le même changement total de quantité de mouvement en raison de l'influence de ces forces mutuelles. Ainsi, l'étudiant et la Terre sont accélérés par l'attraction de l'autre. Cependant, l'étudiant fait beaucoup plus de mouvement. Parce que la Terre a une masse énormément plus grande, elle peut subir le même changement de quantité de mouvement en n'accélérant que d'une très petite quantité. Les choses tombent tout le temps vers la Terre, mais l'accélération de notre planète en conséquence est bien trop faible pour être mesurée.

Un exemple plus évident de la nature mutuelle des forces entre les objets est familier à tous

### III. Les orbites et la gravité

ceux qui jouent au tennis. Le recul que vous ressentez lorsque vous frappez avec votre raquette montre que la balle exerce une force sur elle lors de l'impact, tout comme la raquette sur la balle. De même, lorsque vous tirez avec un fusil, la force poussant la balle hors du canon est égale à la force poussant vers l'arrière sur le fusil et sur votre épaule.

C'est le principe des moteurs à réaction et des fusées : la force qui évacue les gaz d'échappement par l'arrière de la fusée s'accompagne de la force qui pousse la fusée vers l'avant. Les gaz d'échappement n'ont pas besoin de pousser contre l'air ou la Terre ; une fusée fonctionne en fait mieux dans le vide (Figure 3.7).



FIGURE III.2.2. – **Figure 3.7 Démonstration de la troisième loi de Newton.** La navette spatiale américaine (ici lançant Discovery), propulsée par trois moteurs à carburant brûlant de l'oxygène liquide et de l'hydrogène liquide, avec deux propulseurs à carburant solide, démontre la troisième loi de Newton. (crédit : modification du travail par la NASA)

*i*

lien pour apprendre

Pour en savoir plus sur la vie et l'œuvre d'Isaac Newton, consultez cette [page chronologique](#) (en anglais) avec des instantanés de sa carrière, produite par la British Broadcasting Corporation (BBC).

### III.2.3. Masse, volume et densité

Avant de continuer à discuter des autres travaux de Newton, nous voulons jeter un bref coup d'œil à certains termes qu'il sera important de définir clairement. Nous commençons par la **masse**, qui est une mesure de la quantité de matière dans un objet.

Le *volume* d'un objet est la mesure de l'espace physique qu'il occupe. Le volume est mesuré en unités cubiques, telles que les centimètres cubes ou les litres. Le volume est la "taille" d'un objet. Un pièce de monnaie et un ballon gonflé peuvent tous deux avoir la même masse, mais ils ont des volumes très différents. La raison à cela est qu'ils ont également des masses volumiques très différentes, qui est la mesure de la quantité de masse par unité de volume. Plus précisément, la **masse volumique** est la masse divisée par le volume. Notez que dans le langage courant, nous utilisons souvent «lourd» et «léger» comme indications de masse volumique (plutôt que de poids) comme, par exemple, lorsque nous disons que le fer est lourd ou que la crème fouettée est légère.

Les unités de masse volumique qui seront utilisées dans ce livre sont les grammes par centimètre cube ( $\text{g/cm}^3$ )<sup>1</sup>. Si un bloc d'un matériau a une masse de 300 grammes et un volume de  $100 \text{ cm}^3$ , sa masse volumique est de  $3 \text{ g/cm}^3$ . Les matériaux familiers couvrent une gamme considérable de densité, des matériaux artificiels tels que la mousse isolante (moins de  $0,1 \text{ g/cm}^3$ ) à l'or ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ). Le tableau 3.1 donne les masses volumiques de certains matériaux familiers. Dans l'univers astronomique, on trouve des masses volumiques bien plus remarquables, depuis la queue d'une comète ( $10^{-16} \text{ g/cm}^3$ ) jusqu'à un « cadavre d'étoile » effondré appelé étoile à neutrons ( $10^{15} \text{ g/cm}^3$ ).

Matériau	masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )
or	19,3
plomb	11,3
fer	7,9
terre (en vrac)	5,5
roche (typique)	2,5
eau	1
bois (typique)	0,8
mousse isolante	2,5
silicagel	0,02

Tableau 3.1 : masse volumique de matériaux courants

Pour résumer, la masse correspond à la quantité, le volume à la taille et la masse volumique à la densité.

---

1. Généralement, nous utilisons des unités métriques standard (ou SI) dans ce livre. L'unité métrique appropriée de densité dans ce système est le  $\text{kg/m}^3$ . Mais pour la plupart des gens,  $\text{g/cm}^3$  fournit une unité plus significative car la densité de l'eau est exactement de  $1 \text{ g/cm}^3$ , et c'est une information utile pour la comparaison.



lien pour apprendre

Vous pouvez jouer avec [une animation simple](#)  démontrant la relation entre les concepts de densité, de masse et de volume, et découvrir pourquoi des objets comme le bois flottent dans l'eau.

### III.2.4. Moment cinétique

Un concept un peu plus complexe, mais important pour comprendre de nombreux objets astronomiques, est le **moment cinétique**, qui est une mesure de la rotation d'un corps lorsqu'il tourne autour d'un point fixe (par exemple, une planète en orbite autour du Soleil). Le moment cinétique d'un objet est défini comme le produit de sa masse, de sa vitesse et de sa distance au point fixe autour duquel il tourne.

Si ces trois quantités restent constantes - c'est-à-dire si le mouvement d'un objet particulier a lieu à une vitesse constante à une distance fixe du centre de rotation - alors le moment cinétique est également une constante. La deuxième loi de Kepler est une conséquence de la *conservation du moment cinétique*. Lorsqu'une planète s'approche du Soleil sur son orbite elliptique et que la distance au centre de rotation diminue, la planète accélère pour conserver le moment cinétique. De même, lorsque la planète est plus éloignée du Soleil, elle se déplace plus lentement.

La conservation du moment cinétique est illustrée par les patineurs artistiques, qui rentrent les bras et les jambes pour tourner plus rapidement, et étendent les bras et les jambes pour ralentir (figure 3.8). Vous pouvez le reproduire vous-même sur un tabouret pivotant bien huilé en commençant à tourner lentement avec les bras tendus, puis en tirant les bras vers l'intérieur. Un autre exemple de conservation du moment cinétique est un nuage de poussière qui rétrécit ou une étoile qui s'effondre sur elle-même (les deux sont des situations que vous découvrirez au fur et à mesure de votre lecture). Au fur et à mesure que le matériau se déplace à une distance moindre du centre de rotation, la vitesse du matériau augmente pour conserver le moment cinétique.



FIGURE III.2.3. – **Figure 3.8 Conservation du moment cinétique.** Lorsqu'une patineuse artistique en rotation ramène ses bras, leur distance par rapport à son centre de rotation est plus petite, donc sa vitesse augmente. Lorsque ses bras sont sortis, leur distance du centre de rotation est plus grande, donc elle ralentit.

## III.3. La loi de l'attraction universelle de Newton

### Introduction

*i*

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez en mesure de :

- Expliquer ce qui détermine la force de gravité
- Décrire comment la loi universelle de la gravitation de Newton élargit notre compréhension des lois de Kepler

Les lois du mouvement de Newton montrent que les objets au repos resteront au repos et que ceux en mouvement continueront à se déplacer uniformément en ligne droite à moins qu'ils ne soient sollicités par une force. Ainsi, c'est la ligne droite qui définit l'état de mouvement le plus naturel. Mais les planètes se déplacent en ellipses, pas en lignes droites ; par conséquent, une certaine force doit courber leurs chemins. Cette force, a proposé Newton, était la **gravité**.

### III.3.1. La loi de l'attraction universelle de Newton

À l'époque de Newton, la gravité était quelque chose d'associé à la Terre seule. L'expérience quotidienne nous montre que la Terre exerce une force gravitationnelle sur les objets à sa surface. Si vous laissez tomber quelque chose, il accélère vers la Terre en tombant. L'idée de Newton était que la gravité de la Terre pouvait s'étendre jusqu'à la Lune et produire la force nécessaire pour courber la trajectoire de la Lune à partir d'une ligne droite et la maintenir sur son orbite. Il a en outre émis l'hypothèse que la gravité ne se limite pas à la Terre, mais qu'il existe une force générale d'attraction entre tous les corps matériels. Si tel est le cas, la force d'attraction entre le Soleil et chacune des planètes pourrait les maintenir sur leurs orbites. (Cela peut sembler faire partie de notre pensée quotidienne aujourd'hui, mais c'était un aperçu remarquable à l'époque de Newton.)

Une fois que Newton a hardiment émis l'hypothèse qu'il y avait une attraction universelle entre tous les corps partout dans l'espace, il a dû déterminer la nature exacte de l'attraction. La description mathématique précise de cette force gravitationnelle devait dicter que les planètes se déplacent exactement comme Kepler les avait décrites (comme exprimé dans les trois lois de Kepler). De plus, cette force gravitationnelle devait prédire le comportement correct des chutes de corps sur Terre, comme l'a observé Galilée. Comment la force de gravité doit-elle dépendre de la distance pour que ces conditions soient remplies ?

La réponse à cette question nécessitait des outils mathématiques qui n'avaient pas encore été développés, mais cela n'a pas découragé Isaac Newton, qui a inventé ce que nous appelons aujourd'hui le calcul différentiel pour traiter ce problème. Finalement, il a pu conclure que l'ampleur de la force de gravité doit diminuer avec l'augmentation de la distance entre le Soleil

### III. Les orbites et la gravité

et une planète (ou entre deux objets) proportionnellement à l'inverse du carré de leur séparation. En d'autres termes, si une planète était deux fois plus éloignée du Soleil, la force serait  $(1/2)^2$ , soit 1/4 moins importante. Mettez la planète trois fois plus loin, et la force est  $(1/3)^2$ , soit 1/9 seulement.

Newton a également conclu que l'attraction gravitationnelle entre deux corps doit être proportionnelle à leurs masses. Plus un objet a de masse, plus l'attraction de sa force gravitationnelle est forte. L'attraction gravitationnelle entre deux objets quelconques est donc donnée par l'une des équations les plus célèbres de toute la science :

$$F_{gravit} = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

où  $F_{gravit}$  est la force gravitationnelle entre deux objets,  $M_1$  et  $M_2$  sont les masses des deux objets et  $R$  est leur distance.  $G$  est un nombre constant connu sous le nom de constante gravitationnelle universelle, et l'équation elle-même résume symboliquement la loi universelle de la gravitation de Newton. Avec une telle force et les lois du mouvement, Newton a pu montrer mathématiquement que les seules orbites autorisées étaient exactement celles décrites par les lois de Kepler.

La loi universelle de la gravitation de Newton fonctionne pour les planètes, mais est-elle vraiment universelle ? La théorie gravitationnelle devrait également prédire l'accélération observée de la Lune vers la Terre alors qu'elle orbite autour de la Terre, ainsi que de tout objet (par exemple, une pomme) tombé près de la surface de la Terre. La chute d'une pomme est quelque chose que nous pouvons mesurer assez facilement, mais pouvons-nous l'utiliser pour prédire les mouvements de la Lune ?

Rappelons que selon la deuxième loi de Newton, les forces provoquent une accélération. La loi universelle de la gravitation de Newton dit que la force agissant sur (et donc l'accélération de) un objet vers la Terre doit être inversement proportionnelle au carré de sa distance par rapport au centre de la Terre. On observe que des objets comme des pommes à la surface de la Terre, à une distance d'un rayon terrestre du centre de la Terre, accélèrent vers le bas à 9,8 mètres par seconde par seconde ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

C'est cette force de gravité à la surface de la Terre qui nous donne notre sens du poids. Contrairement à votre masse, qui resterait la même sur n'importe quelle planète ou lune, votre poids dépend de la force de gravité locale. Vous pèseriez donc moins sur Mars et la Lune que sur Terre, même s'il n'y a pas de changement dans votre masse. (Ce qui veut dire qu'il faudrait quand même y aller doucement avec les desserts à la cafétéria de la fac à votre retour !)

La Lune est à 60 rayons terrestres du centre de la Terre. Si la gravité (et l'accélération qu'elle provoque) s'affaiblit avec la distance au carré, l'accélération subie par la Lune devrait être bien inférieure à celle de la pomme. L'accélération doit être de  $(1/60)^2 = 1/3600$  (ou 3600 fois moins—environ  $0,00272 \text{ m/s}^2$ ). C'est précisément l'accélération observée de la Lune sur son orbite. (Comme nous le verrons, la Lune ne tombe pas sur Terre avec cette accélération, mais tombe autour de la Terre.) Imaginez le frisson que Newton a dû ressentir pour réaliser qu'il avait découvert et vérifié une loi qui s'applique à la Terre, aux pommes, à la Lune et, autant qu'il le savait, à tout dans l'univers.

#### Exemple

Calcul du poids

De quel facteur le poids d'une personne à la surface de la Terre changerait-il si la Terre avait sa masse actuelle mais huit fois son volume actuel ?

Réponse :

### III. Les orbites et la gravité

Avec huit fois le volume, le rayon de la Terre doublerait. Cela signifie que la force gravitationnelle à la surface serait réduite d'un facteur de  $(1/2)^2 = 1/4$ , de sorte qu'une personne ne pèserait qu'un quart de son poids réel.

Vérifiez votre apprentissage

De quel facteur le poids d'une personne à la surface de la Terre changerait-il si la Terre avait sa taille actuelle mais seulement un tiers de sa masse actuelle ?

Réponse :

Avec un tiers de sa masse actuelle, la force gravitationnelle à la surface serait réduite d'un facteur  $1/3$ , de sorte qu'une personne ne pèserait qu'un tiers de son poids réel.

La gravité est une propriété « intégrée » de la masse. Chaque fois qu'il y a des masses dans l'univers, elles interagissent via la force d'attraction gravitationnelle. Plus il y a de masse, plus la force d'attraction est grande. Ici sur Terre, la plus grande concentration de masse est, bien sûr, la planète sur laquelle nous nous tenons, et son attraction domine les interactions gravitationnelles que nous vivons. Mais tout ce qui a une masse attire tout le reste avec une masse partout dans l'univers.

La loi de Newton implique également que la gravité ne devient jamais nulle. Elle s'affaiblit rapidement avec la distance, mais il continue d'agir dans une certaine mesure, quelle que soit la distance à laquelle vous vous trouvez. L'attraction du Soleil est plus forte à Mercure qu'à Pluton, mais elle peut être ressentie bien au-delà de Pluton, où les astronomes ont de bonnes preuves qu'elle fait continuellement bouger un nombre énorme de corps glacés plus petits autour d'énormes orbites. Et l'attraction gravitationnelle du Soleil se joint à l'attraction de milliards d'autres étoiles pour créer l'attraction gravitationnelle de notre Voie lactée. Cette force, à son tour, peut faire orbiter d'autres galaxies plus petites autour de la Voie lactée, et ainsi de suite.

Pourquoi alors, demandez-vous peut-être, pourquoi les astronautes à bord de la navette spatiale semblent n'avoir aucune force gravitationnelle agissant sur eux lorsque nous voyons à la télévision des images des astronautes et des objets flottant dans le vaisseau spatial ? Après tout, les astronautes de la navette ne sont qu'à quelques centaines de kilomètres au-dessus de la surface de la Terre, ce qui n'est pas une distance significative par rapport à la taille de la Terre, donc la gravité n'est certainement pas beaucoup plus faible à beaucoup plus loin. Les astronautes se sentent « en apesanteur » (c'est-à-dire qu'ils ne sentent pas la force gravitationnelle agissant sur eux) pour la même raison que les passagers d'un ascenseur dont le câble est rompu ou d'un avion dont les moteurs ne fonctionnent plus se sentent en apesanteur : ils tombent ( Illustration 3.9).



FIGURE III.3.1. – **Figure 3.9 Astronautes en chute libre.** Dans l'espace, les astronautes tombent librement, ils font donc l'expérience de l'« apesanteur ». Dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du haut à gauche : Tracy Caldwell Dyson (NASA), Naoko Yamazaki (JAXA), Dorothy Metcalf-Lindenburger (NASA) et Stephanie Wilson (NASA). (crédit : NASA)

En tombant, ils sont en chute libre et accélèrent au même rythme que tout ce qui les entoure, y compris leur vaisseau spatial ou un appareil photo avec lequel ils prennent des photos de la Terre. Ce faisant, les astronautes ne ressentent aucune force supplémentaire et se sentent donc « en apesanteur ». Contrairement aux passagers de l'ascenseur qui tombent, cependant, les astronautes tombent autour de la Terre, pas sur Terre ; par conséquent, ils continueront de tomber et sont dits "en orbite" autour de la Terre (voir la section suivante pour en savoir plus sur les orbites).

#### Note

Dans le film Apollo 13, les scènes dans lesquelles les astronautes étaient « en apesanteur » ont en réalité été filmées dans un avion qui tombait. Comme vous pouvez l'imaginer, l'avion n'est tombé que pendant de courtes périodes avant que les moteurs ne se rallument.

### III.3.2. Mouvement orbital et masse

Les lois de Kepler décrivent les orbites des objets dont les mouvements sont décrits par les lois du mouvement de Newton et la loi de la gravité. Sachant que la gravité est la force qui attire les planètes vers le Soleil, Newton a cependant permis de repenser la troisième loi de

### III. Les orbites et la gravité

Kepler. Rappelons que Kepler avait trouvé une relation entre la période orbitale de révolution d'une planète et sa distance au Soleil. Mais la formulation de Newton introduit le facteur supplémentaire des masses du Soleil ( $M_1$ ) et de la planète ( $M_2$ ), toutes deux exprimées en unités de masse du Soleil. La loi universelle de la gravitation de Newton peut être utilisée pour montrer mathématiquement que cette relation est en fait

$$a^3 = (M_1 + M_2) \times P^2$$

où  $a$  est le demi-grand axe et  $P$  est la période orbitale.

Comment Kepler a-t-il manqué ce facteur ? En unités de masse du Soleil, la masse du Soleil est de 1, et en unités de masse du Soleil, la masse d'une planète typique est un facteur négligeable. Cela signifie que la somme de la masse du Soleil et de la masse d'une planète, ( $M_1 + M_2$ ), est très, très proche de 1. Cela fait que la formule de Newton semble presque la même que celle de Kepler ; la masse minuscule des planètes par rapport au Soleil est la raison pour laquelle Kepler ne s'est pas rendu compte que les deux masses devaient être incluses dans le calcul. Cependant, il existe de nombreuses situations en astronomie dans lesquelles nous devons inclure les deux termes de masse, par exemple lorsque deux étoiles ou deux galaxies tournent l'une autour de l'autre.

#### Exemple 3.4

Calcul des effets de la gravité

Une planète comme la Terre se trouve en orbite autour de son étoile à une distance de 1 UA en 0,71 année terrestre. Pouvez-vous utiliser la version de Newton de la troisième loi de Kepler pour trouver la masse de l'étoile ? (Rappelez-vous que comparée à la masse d'une étoile, la masse d'une planète semblable à la Terre peut être considérée comme négligeable.)

Solution

Dans la formule  $a^3 = (M_1 + M_2) \times P^2$ , le facteur  $M_1 + M_2$  serait maintenant approximativement égal à  $M_1$  (la masse de l'étoile), puisque la masse de la planète est si petite en comparaison.

Alors la formule devient  $a^3 = M_1 \times P^2$ , et nous pouvons résoudre pour  $M_1$  :

$$M_1 = \frac{a^3}{P^2}$$

Comme  $a = 1$ ,  $a^3 = 1$ , donc :

$$M_1 = \frac{1}{P^2} = \frac{1}{0,71^2} = \frac{1}{0,5} = 2$$

La masse de l'étoile est donc le double de la masse de notre Soleil. (Rappelez-vous que cette façon d'exprimer la loi a des unités en termes de Terre et de Soleil, donc les masses sont exprimées en unités de la masse de notre Soleil.)

#### Vérifiez votre apprentissage

Supposons qu'une étoile avec deux fois la masse de notre Soleil ait une planète semblable à la Terre qui a mis 4 ans pour orbiter autour de l'étoile. À quelle distance (demi-grand

### III. Les orbites et la gravité

axe) cette planète orbiterait-elle autour de son étoile ?

☉ Réponse

*i*

Lien pour apprendre

Vous aimeriez peut-être essayer une [simulation](#) ↗ qui vous permet de déplacer le Soleil, la Terre, la Lune et la station spatiale pour voir les effets de la modification de leurs distances sur leurs forces gravitationnelles et leurs trajectoires orbitales. Vous pouvez même désactiver la gravité et voir ce qui se passe.

## Contenu masqué

Contenu masqué n°8 :

Réponse

Encore une fois, nous pouvons négliger la masse de la planète. Donc  $M_1 = 2$  et  $P = 4$  ans.

La formule est  $a^3 = M_1 \times P^2$ , donc  $a^3 = 2 \times 4^2 = 2 \times 16 = 32$ .

Donc  $a$  est la racine cubique de 32. Pour trouver cela, vous pouvez simplement demander à Google : « Quelle est la racine cubique de 32 ? » et obtenez la réponse 3,2 AU. [Retourner au texte.](#)

## III.4. Les orbites dans le système solaire

### Introduction

*i*

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez capable de :

- Comparer les caractéristiques orbitales des planètes du système solaire
- Comparer les caractéristiques orbitales des astéroïdes et des comètes du système solaire

Rappelons que la trajectoire d'un objet soumis à l'influence de la gravité dans l'espace s'appelle son orbite, que cet objet soit un vaisseau spatial, une planète, une étoile ou une galaxie. Une fois déterminée, l'orbite permet de calculer les positions futures de l'objet.

Deux points de l'orbite d'une planète de notre système solaire ont reçu des noms particuliers. L'endroit où la planète est la plus proche du Soleil (*hélios* en grec) et se déplace le plus rapidement est appelé le **périhélie** de son orbite, et l'endroit où elle est la plus éloignée et se déplace le plus lentement est l'**aphélie**. Pour la Lune ou un satellite en orbite autour de la Terre (*gee* en grec), les termes correspondants sont **périgée** et **apogée**. (Dans ce livre, nous utilisons le mot *lune* pour désigner un objet naturel qui tourne autour d'une planète et le mot *satellite* pour désigner un objet fabriqué par l'homme qui tourne autour d'une planète).

### III.4.1. Les orbites des planètes

Aujourd'hui, les travaux de Newton nous permettent de calculer et de prédire les orbites des planètes avec une merveilleuse précision. Nous connaissons huit planètes, en commençant par Mercure, la plus proche du Soleil, jusqu'à Neptune. Les données orbitales moyennes des planètes sont résumées dans le **tableau 3.2** (Cérès est le plus grand des *astéroïdes*, aujourd'hui considéré comme une planète naine).

Selon les lois de Kepler, Mercure doit avoir la période orbitale la plus courte (88 jours terrestres) ; elle a donc la vitesse orbitale la plus élevée, avec une moyenne de 48 kilomètres par seconde. À l'opposé, Neptune a une période de 165 ans et une vitesse orbitale moyenne de seulement 5 kilomètres par seconde.

Toutes les planètes ont des orbites assez peu excentriques. L'orbite la plus excentrique est celle de Mercure (0,21) ; les autres ont des excentricités inférieures à 0,1. Il est heureux que, parmi les autres, Mars ait une excentricité supérieure à celle de beaucoup d'autres planètes. Sinon, les observations prételescopiques de Brahe n'auraient pas suffi à Kepler pour déduire que son orbite avait la forme d'une ellipse plutôt que d'un cercle. Les orbites planétaires sont également confinées près d'un plan commun, qui est proche du plan de l'orbite terrestre (appelé *écliptique*). L'étrange orbite de la planète naine Pluton est inclinée d'environ 17° par rapport à l'écliptique, et celle de la planète naine Eris (qui orbite encore plus loin du Soleil que Pluton) de 44°, mais toutes les planètes principales se trouvent à moins de 10° du plan commun du système solaire.



Lien vers l'apprentissage (en anglais)

Vous pouvez utiliser un simulateur orbital (<https://openstaxcollege.org/1/30phetorbsim> ) pour concevoir votre propre système solaire miniature avec jusqu'à quatre corps. Ajustez les masses, les vitesses et les positions des planètes et observez ce qui se passe sur leurs orbites.

### III.4.2. Orbites d'astéroïdes et de comètes

Outre les huit planètes, le système solaire compte de nombreux objets plus petits. Certains d'entre eux sont des lunes (satellites naturels) qui gravitent autour de toutes les planètes, à l'exception de Mercure et de Vénus. En outre, il existe deux catégories d'objets plus petits en orbite héliocentrique : les astéroïdes et les comètes. On pense que les astéroïdes et les comètes sont de petits morceaux de matière issus du processus de formation du système solaire.

En général, les astéroïdes ont des orbites dont le demi-grand axe est plus petit que celui des comètes (**figure 3.10**). La majorité d'entre eux se trouvent entre 2,2 et 3,3 UA, dans la région appelée **ceinture d'astéroïdes** (voir [Comètes et astéroïdes : débris du système solaire](#) ). Comme le montre le **tableau 3.2**, la ceinture d'astéroïdes (représentée par son plus grand membre, Cérès) se trouve au milieu d'un espace entre les orbites de Mars et de Jupiter. C'est parce que ces deux planètes sont si éloignées l'une de l'autre que des orbites stables de petits corps peuvent exister dans la région qui les sépare.

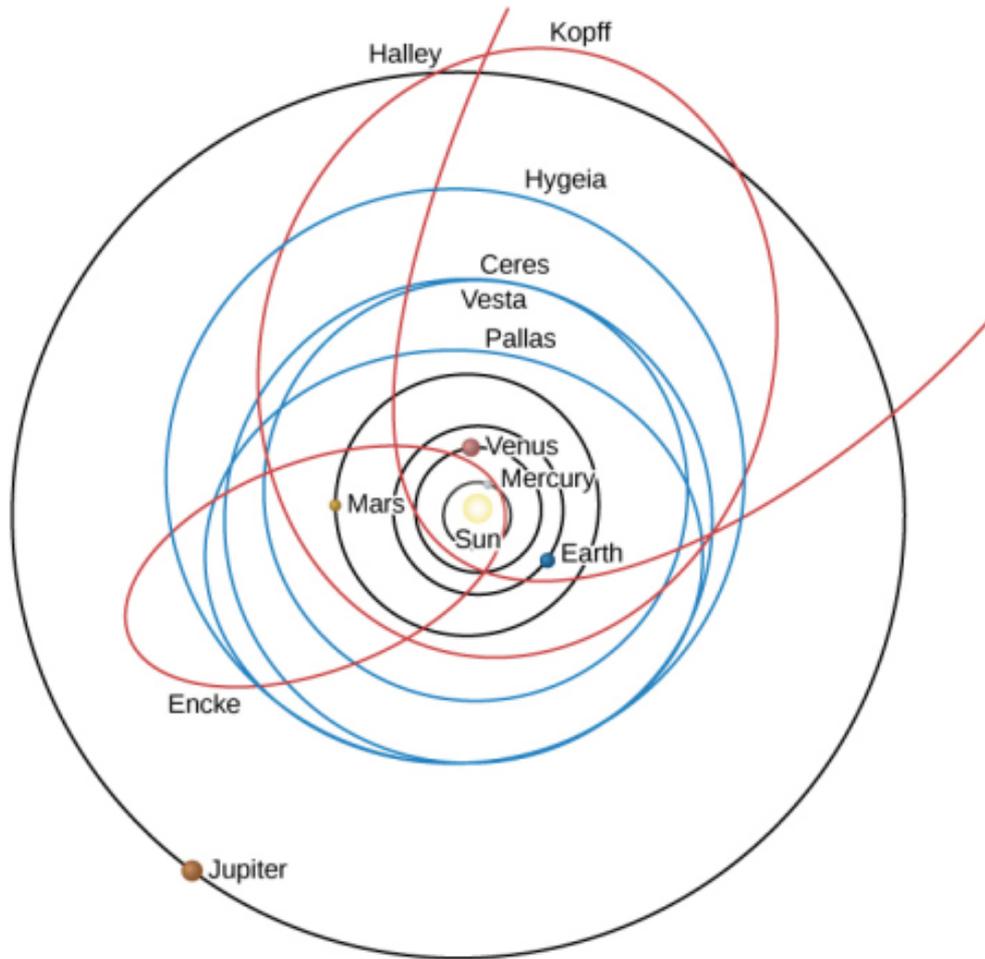


FIGURE III.4.1. – **Figure 3.10 Orbites du système solaire.** Nous voyons les orbites de comètes et d’astéroïdes typiques comparées à celles des planètes Mercure, Vénus, Terre, Mars et Jupiter (cercles noirs). En rouge, trois comètes : Halley, Kopff et Encke. En bleu, les quatre plus gros astéroïdes : Cérès, Pallas, Vesta et Hygeia.

## Conclusion

Planète	Demi-grand axe (UA)	Période (année)	Excentricité
Mercure	0,39	0,24	0,21
Vénus	0,72	0,6	0,01
Terre	1	1,00	0,02
Mars	1,52	1,88	0,09
(Cérès)	2,77	4,6	0,08
Jupiter	5,20	11,86	0,05

### III. Les orbites et la gravité

Saturne	9,54	29,46	0,06
Uranus	19,19	84,01	0,05
Neptune	30,06	164,82	0,01

**TABLE III.4.2. – Tableau 3.2.**

Les comètes ont généralement des orbites plus grandes et plus excentriques que celles des astéroïdes. En général, l'excentricité de leur orbite est de 0,8 ou plus. Selon la deuxième loi de Kepler, elles passent donc la majeure partie de leur temps loin du Soleil, se déplaçant très lentement. À l'approche du périhélie, les comètes accélèrent et traversent plus rapidement les parties internes de leur orbite.

## III.5. Mouvements des satellites et des engins spatiaux

### Introduction

*i*

#### Objectifs

À la fin de cette section, vous serez capable de :

- Expliquer comment un objet (tel qu'un satellite) peut être mis en orbite autour de la Terre
- Expliquer comment un objet (tel qu'une sonde planétaire) peut s'échapper de l'orbite

La loi universelle de la gravitation de Newton et les lois de Kepler décrivent les mouvements des satellites terrestres et des engins spatiaux interplanétaires, ainsi que des planètes. Spoutnik, le premier satellite artificiel de la Terre, a été lancé par ce qui s'appelait alors l'Union soviétique le 4 octobre 1957. Depuis lors, des milliers de satellites ont été placés en orbite autour de la Terre, et des engins spatiaux ont également orbité autour de la Lune, de Vénus, de Mars, de Jupiter, de Saturne et d'un certain nombre d'astéroïdes et de comètes.

### III.5.1. Généralités

Une fois qu'un satellite artificiel est en orbite, son comportement n'est pas différent de celui d'un satellite naturel, comme notre Lune. Si le satellite est suffisamment haut pour s'affranchir des frottements atmosphériques, il restera en orbite pour toujours. Cependant, bien qu'il n'y ait aucune difficulté à maintenir un satellite en orbite, une grande quantité d'énergie est nécessaire pour soulever le vaisseau spatial de la Terre et l'accélérer jusqu'à sa vitesse orbitale.

Pour illustrer le lancement d'un satellite, imaginez un canon tirant une balle horizontalement depuis le sommet d'une haute montagne, comme le montre la **figure 3.11**, adaptée d'un diagramme similaire de Newton. Imaginons en outre que le frottement de l'air puisse être éliminé et que rien ne vienne entraver la trajectoire de la balle. Dans ce cas, la seule force qui agit sur la balle après qu'elle a quitté la bouche du canon est la force gravitationnelle entre la balle et la Terre.

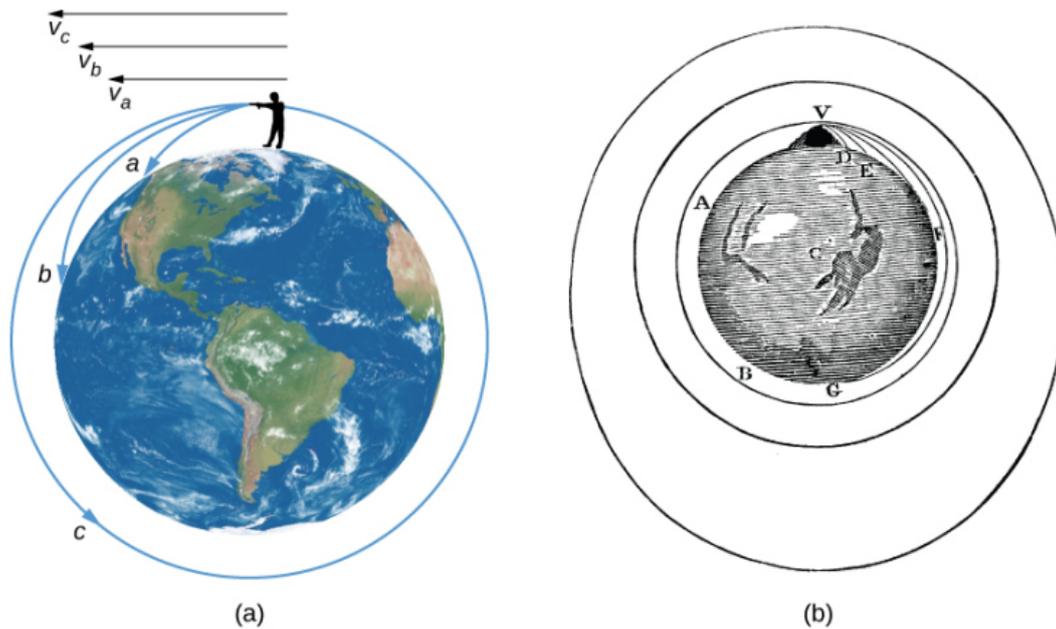


FIGURE III.5.1. – **Figure 3.11 Mise en orbite d'une balle.** (a) Pour les trajectoires a et b, la vitesse n'est pas suffisante pour empêcher la gravité de ramener la balle sur Terre ; dans le cas c, la vitesse permet à la balle de tomber complètement autour de la Terre. (b) Ce diagramme de Newton dans son *De Mundi Systemate*, édition de 1731, illustre le même concept que celui présenté en (a).

Si la balle est tirée à une vitesse que nous pouvons appeler  $V_a$ , la force gravitationnelle qui s'exerce sur elle la tire vers le bas en direction de la Terre, où elle frappe le sol au point  $a$ . Toutefois, si la vitesse initiale est plus élevée,  $V_b$ , cette vitesse plus élevée la porte plus loin avant qu'elle ne frappe le sol au point  $b$ .

Si la vitesse initiale de notre balle est suffisamment élevée,  $V_c$ , la surface incurvée de la Terre fait que le sol reste à la même distance de la balle, de sorte que celle-ci tombe autour de la Terre en décrivant un cercle complet. La vitesse nécessaire pour obtenir ce résultat, appelée vitesse de satellisation minimale, est d'environ 8 kilomètres par seconde, soit environ 28.800 kilomètres par heure en unités plus familières.

Chaque année, plus de 50 nouveaux satellites sont mis en orbite par des pays tels que la Russie, les États-Unis, la Chine, le Japon, l'Inde et Israël, ainsi que par l'Agence spatiale européenne (ESA), un consortium de pays européens (**figure 3.12**). Aujourd'hui, ces satellites sont utilisés pour le suivi météorologique, l'écologie, les systèmes de positionnement global, les communications et les objectifs militaires, pour n'en citer que quelques-uns. La plupart des satellites sont lancés sur une orbite terrestre basse, car cela nécessite un minimum d'énergie de lancement. À la vitesse orbitale de 8 kilomètres par seconde, ils font le tour de la planète en 90 minutes environ. Certaines des orbites terrestres très basses ne sont pas indéfiniment stables car, lorsque l'atmosphère terrestre se gonfle de temps à autre, une traînée de frottement est générée par l'atmosphère sur ces satellites, ce qui conduit finalement à une perte d'énergie et à la "désintégration" de l'orbite.

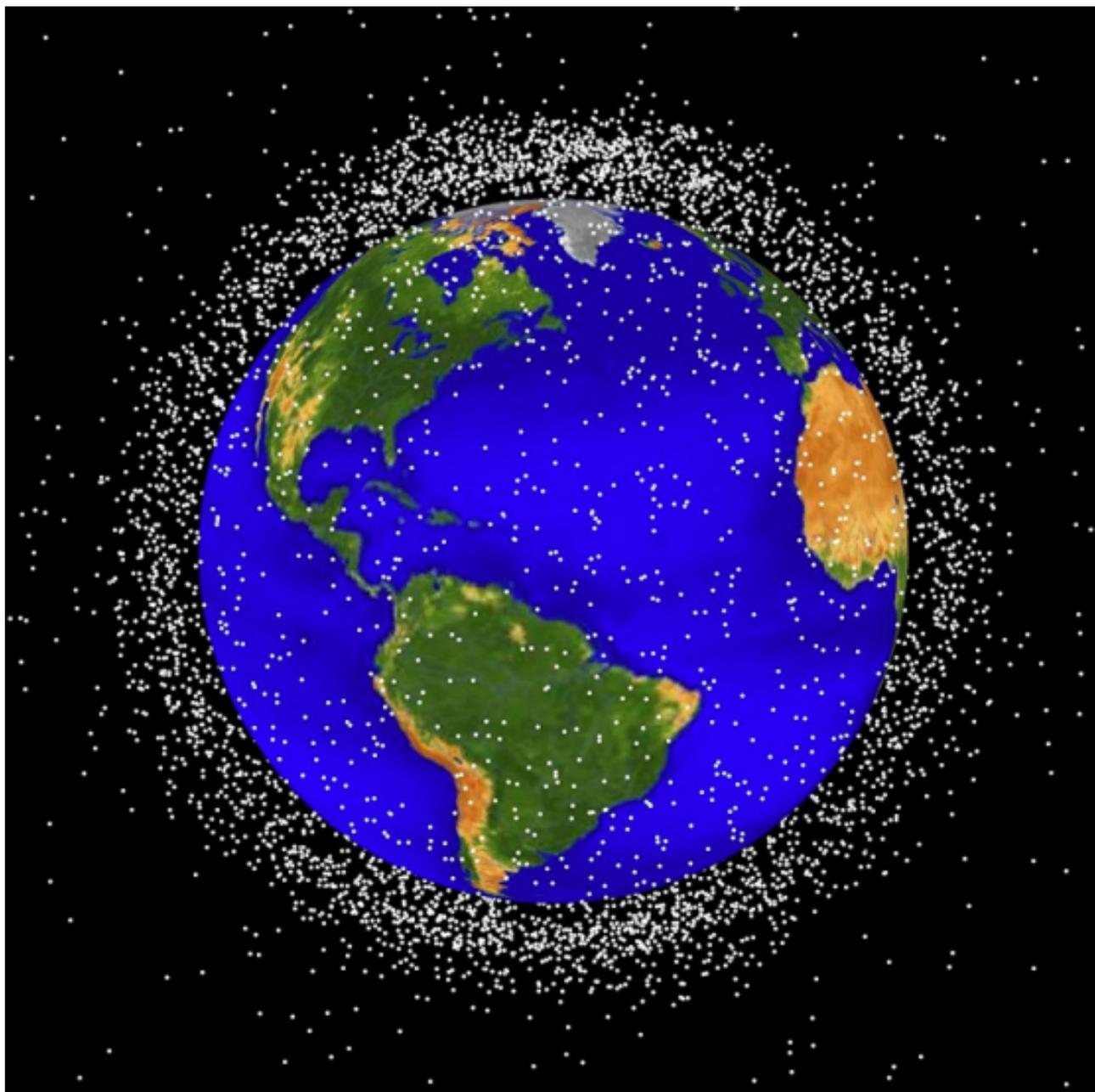


FIGURE III.5.2. – **Figure 3.12 Satellites sur orbite terrestre.** Cette figure montre les plus gros débris orbitaux suivis par la NASA en orbite terrestre. (crédit : NASA/JSC)

### III.5.2. Vaisseau spatial interplanétaire

L'exploration du système solaire a été réalisée en grande partie par des vaisseaux spatiaux robotisés envoyés vers les autres planètes. Pour s'échapper de la Terre, ces engins doivent atteindre la **vitesse de libération**, c'est-à-dire la vitesse nécessaire pour s'éloigner définitivement de la Terre, qui est d'environ 11 kilomètres par seconde (environ 39.600 kilomètres par heure). Après s'être échappés de la Terre, ces engins se dirigent en roue libre vers leurs cibles, sous réserve uniquement d'ajustements mineurs de la trajectoire fournis par de petites fusées de propulsion à bord. En vol interplanétaire, ces engins suivent des orbites autour du Soleil qui ne sont modifiées que lorsqu'ils passent à proximité de l'une des planètes.

### *III. Les orbites et la gravité*

Lorsqu'il s'approche de sa cible, un vaisseau spatial est dévié par la force gravitationnelle de la planète vers une orbite modifiée, ce qui lui permet de gagner ou de perdre de l'énergie. Les contrôleurs des engins spatiaux ont en fait été capables d'utiliser la gravité d'une planète pour rediriger un engin spatial de survol vers une seconde cible. Par exemple, Voyager 2 a utilisé une série de rencontres assistées par la gravité pour effectuer des survols successifs de Jupiter (1979), Saturne (1980), Uranus (1986) et Neptune (1989). Le vaisseau spatial Galileo, lancé en 1989, a survolé Vénus une fois et la Terre deux fois afin d'acquérir l'énergie nécessaire pour atteindre son objectif final, à savoir orbiter autour de Jupiter.

Si nous voulons nous mettre en orbite autour d'une planète, nous devons ralentir le vaisseau spatial à l'aide d'une fusée lorsqu'il est proche de sa destination, ce qui lui permet d'être placé sur une orbite elliptique. Une poussée supplémentaire de la fusée est nécessaire pour faire descendre le véhicule de son orbite et le faire atterrir à la surface. Enfin, si un voyage de retour vers la Terre est prévu, la charge utile au sol doit inclure suffisamment de puissance propulsive pour répéter l'ensemble du processus en sens inverse.

## III.6. La gravité avec plus de deux corps

### Introduction

Jusqu'à présent, nous avons considéré le Soleil et une planète (ou une planète et une de ses lunes) comme rien de plus qu'une paire de corps tournant l'un autour de l'autre. En fait, toutes les planètes exercent également des forces gravitationnelles les unes sur les autres. Ces attractions interplanétaires provoquent de légères variations des orbites auxquelles on pourrait s'attendre si les forces gravitationnelles entre les planètes étaient négligées. Le mouvement d'un corps qui est sous l'influence gravitationnelle de deux ou plusieurs autres corps est très compliqué et ne peut être calculé correctement qu'avec de gros ordinateurs. Heureusement, les astronomes disposent de tels ordinateurs dans les universités et les instituts de recherche gouvernementaux.

### III.6.1. Les interactions de plusieurs corps

A titre d'exemple, supposons que vous ayez un amas d'un millier d'étoiles toutes en orbite autour d'un centre commun (de tels amas sont assez courants, comme nous le verrons dans *Les amas d'étoiles*). Si nous connaissons la position exacte de chaque étoile à un instant donné, nous pouvons calculer la force gravitationnelle combinée de l'ensemble du groupe sur n'importe quel membre de l'amas. Connaissant la force sur l'étoile en question, on peut donc trouver comment elle va accélérer. Si nous savons comment elle se déplaçait au départ, nous pouvons alors calculer comment elle se déplacera dans le futur proche, ce qui permet de suivre son mouvement.

Cependant, le problème est compliqué par le fait que les autres étoiles se déplacent également et modifient ainsi l'effet qu'elles auront sur notre étoile. Il faut donc calculer simultanément l'accélération de chaque étoile produite par la combinaison des attractions gravitationnelles de toutes les autres afin de suivre les mouvements de toutes ces étoiles, et donc d'une seule. Des calculs aussi complexes ont été effectués avec des ordinateurs modernes pour suivre l'évolution d'hypothétiques amas d'étoiles comptant jusqu'à un million de membres (figure 3.13).



FIGURE III.6.1. – **Figure 3.13 Puissance informatique moderne.** Ces supercalculateurs du centre de recherche Ames de la NASA sont capables de suivre les mouvements de plus d'un million d'objets sous leur gravitation mutuelle. (crédit : Centre de recherche Ames de la NASA/Pléiades)

Dans le système solaire, le problème du calcul des orbites des planètes et des vaisseaux spatiaux est un peu plus simple. Nous avons vu que les lois de Kepler, qui ne prennent pas en compte les effets gravitationnels des autres planètes sur une orbite, fonctionnent en réalité assez bien. En effet, ces influences supplémentaires sont très faibles par rapport à l'attraction gravitationnelle dominante du Soleil. Dans ces conditions, il est possible de traiter les effets des autres corps comme de petites **perturbations**. Au cours des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, les mathématiciens ont mis au point de nombreuses techniques élégantes pour calculer les perturbations, ce qui leur a permis de prédire très précisément la position des planètes. De tels calculs ont finalement conduit à la prédiction et à la découverte d'une nouvelle planète en 1846.

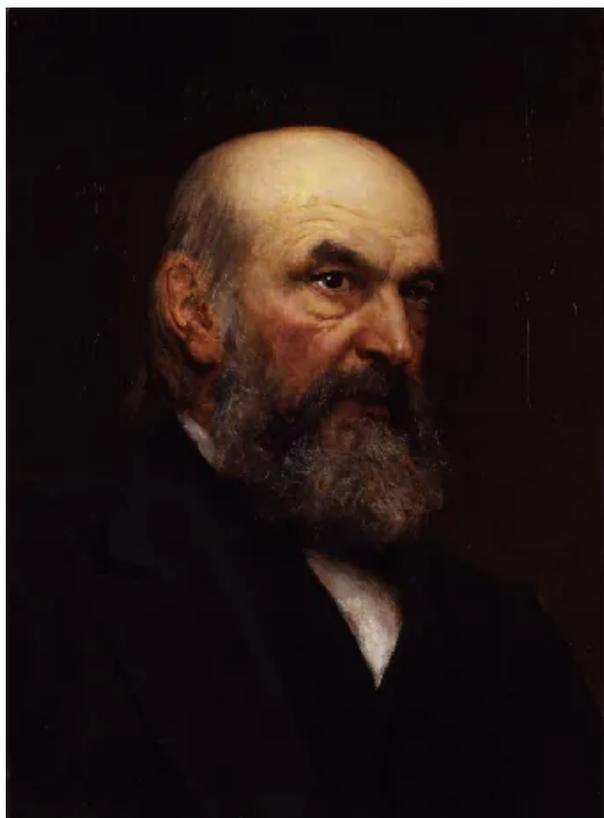
### III.6.2. La découverte de Neptune

La découverte de la huitième planète, Neptune, a été l'un des moments forts du développement de la théorie de la gravitation. En 1781, William Herschel, musicien et astronome amateur, découvre accidentellement la septième planète, Uranus. Il se trouve qu'Uranus avait été observée un siècle auparavant, mais dans aucune de ces observations antérieures, elle n'avait été reconnue comme une planète ; elle avait simplement été enregistrée comme une étoile. La découverte de Herschel a montré qu'il pouvait y avoir dans le système solaire des planètes trop faibles pour être visibles à l'œil nu, mais prêtes à être découvertes avec un télescope si l'on savait simplement où regarder.

### III. Les orbites et la gravité

En 1790, une orbite avait été calculée pour Uranus à partir des observations de son mouvement au cours de la décennie suivant sa découverte. Cependant, même après avoir pris en compte les effets perturbateurs de Jupiter et de Saturne, on s'est aperçu qu'Uranus ne se déplaçait pas sur une orbite qui correspondait exactement aux observations faites depuis 1690. En 1840, l'écart entre les positions observées d'Uranus et celles prédites à partir de son orbite calculée s'élevait à environ  $0,03^\circ$  - un angle à peine perceptible à l'œil nu mais néanmoins supérieur aux erreurs probables des calculs orbitaux. En d'autres termes, Uranus ne semblait tout simplement pas se déplacer sur l'orbite prédite par la théorie newtonienne.

En 1843, John Couch Adams, un jeune Anglais qui venait de terminer ses études à Cambridge, entreprit une analyse mathématique détaillée des irrégularités du mouvement d'Uranus pour voir si elles pouvaient être produites par l'attraction d'une planète inconnue. Il émet l'hypothèse d'une planète plus éloignée du Soleil qu'Uranus, puis détermine la masse et l'orbite qu'elle doit avoir pour expliquer les écarts de l'orbite d'Uranus. En octobre 1845, Adams a remis ses résultats à George Airy, l'astronome royal britannique, en lui indiquant où trouver la nouvelle planète dans le ciel. Nous savons maintenant que la position prédite par Adams pour le nouveau corps était correcte à  $2^\circ$  près, mais pour diverses raisons, Airy n'a pas donné suite immédiatement. Pendant ce temps, le mathématicien français Urbain Jean Joseph Le Verrier, ignorant tout d'Adams ou de ses travaux, s'attaqua au même problème et publia sa solution en juin 1846. Airy, constatant que la position prédite par Le Verrier pour la planète inconnue correspondait à  $1^\circ$  près à celle d'Adams, suggéra à James Challis, directeur de l'Observatoire de Cambridge, de commencer à rechercher le nouvel objet. L'astronome de Cambridge, ne disposant pas de cartes stellaires actualisées de la région du ciel du Verseau où la planète était censée se trouver, a commencé par enregistrer les positions de toutes les étoiles faibles qu'il pouvait observer à cet endroit avec son télescope. Challis avait l'intention de répéter ces relevés à des intervalles de plusieurs jours, dans l'espoir que la planète se distingue d'une étoile par son mouvement. Malheureusement, il a été négligent dans l'examen de ses observations ; bien qu'il ait effectivement vu la planète, il ne l'a pas reconnue. Environ un mois plus tard, Le Verrier propose à Johann Galle, astronome à l'Observatoire de Berlin, de chercher la planète. Galle reçut la lettre de Le Verrier le 23 septembre 1846 et, possédant de nouvelles cartes de la région du Verseau, trouva et identifia la planète la nuit même. C'était à moins d'un degré de la position prédite par Le Verrier. La découverte de la huitième planète, maintenant connue sous le nom de Neptune (le nom latin du dieu de la mer), a été un triomphe majeur pour la théorie gravitationnelle car elle a confirmé de façon spectaculaire la généralité des lois de Newton. L'honneur de la découverte est justement partagé par les deux mathématiciens, Adams et Le Verrier (figure 3.14).



(a)



(b)

FIGURE III.6.2. – **Figure 3.14 Les mathématiciens qui ont découvert une planète.** (a) John Couch Adams (1819–1892) et (b) Urbain J. J. Le Verrier (1811–1877) partagent le mérite de la découverte de la planète Neptune.

Notons que la découverte de Neptune n'a pas été une surprise totale pour les astronomes, qui soupçonnaient depuis longtemps l'existence de la planète en se basant sur le mouvement "désobéissant" d'Uranus. Le 10 septembre 1846, deux semaines avant la découverte effective de Neptune, John Herschel, fils du découvreur d'Uranus, remarque dans un discours devant la British Association : " Nous voyons [la nouvelle planète] comme Colomb a vu l'Amérique depuis les côtes espagnoles. Ses mouvements ont été ressentis en tremblant le long de la ligne de grande portée de notre analyse avec une certitude à peine inférieure à la manifestation apparente." Cette découverte a constitué un grand pas en avant dans la combinaison de la théorie newtonienne avec des observations minutieuses. Ces travaux se poursuivent à notre époque avec la découverte de planètes autour d'autres étoiles.

# Quatrième partie

## Annexes



## IV. Annexes

un jour des formes de vie intelligentes qui n'ont que huit doigts, leur système de comptage sera probablement une notation en puissances de huit !)

Ainsi, dans l'exemple que nous avons commencé, le nombre de mètres entre la Terre et le Soleil est de  $1,5 \times 10^{11}$ . Ailleurs dans le livre, nous mentionnons qu'une corde d'une année-lumière de long ferait 236 millions ou 236 000 000 de fois le tour de l'équateur de la Terre. En notation scientifique, cela donne  $2,36 \times 10^8$ . Si vous aimez exprimer les choses en millions, comme le font les rapports annuels des entreprises prospères, vous pouvez écrire ce nombre  $236 \times 10^6$ . Cependant, la convention habituelle est de n'avoir qu'un seul chiffre à gauche de la virgule.

### IV.1.2. Écrire des petits nombres

Prenons maintenant un nombre comme 0,00347, qui n'est pas non plus dans la forme standard (convenue) de la notation scientifique. Pour le mettre dans ce format, nous devons en transformer la première partie en 3,47 en déplaçant la virgule de trois places vers la droite. Notez que ce déplacement vers la droite est l'opposé du déplacement vers la gauche dont nous avons parlé plus haut. Pour garder une trace, nous appelons ce changement négatif et mettons un signe moins dans l'exposant. Ainsi, 0,00347 devient  $3,47 \times 10^{-3}$ .

Dans l'exemple que nous avons donné au début, la masse de l'atome d'hydrogène s'écrirait alors  $1,67 \times 10^{-27}$  kg. Dans ce système, un s'écrit  $10^0$ , un dixième  $10^{-1}$ , un centième  $10^{-2}$ , etc. Il est à noter que tout nombre, qu'il soit grand ou petit, peut être exprimé en notation scientifique.

### IV.1.3. La multiplication et la division

La notation scientifique n'est pas seulement compacte et pratique, elle simplifie également l'arithmétique. Pour multiplier deux nombres exprimés en puissances de dix, il suffit de multiplier les nombres à l'avant, puis d'ajouter les exposants. S'il n'y a pas de nombres devant, comme dans  $100 \times 100\,000$ , il suffit d'ajouter les exposants (dans notre notation,  $10^2 \times 10^5 = 10^7$ ). Lorsqu'il y a des nombres devant, vous devez les multiplier, mais ils sont beaucoup plus faciles à traiter que les nombres comportant de nombreux zéros.

Voici un exemple :

$$(3 \times 10^5) \times (2 \times 10^9) = 6 \times 10^{14}$$

Et en voici un autre :

$$0,04 \times 6,000,000 = (4 \times 10^{-2}) \times (6 \times 10^6) = 24 \times 10^4 = 2,4 \times 10^5$$

Notez que dans le deuxième exemple, lorsque nous avons additionné les exposants, nous avons traité les exposants négatifs comme nous le faisons en arithmétique normale (-2 plus 6 égaient 4). Remarquez également que notre premier résultat contenait un 24, qui n'était pas dans la forme acceptable, ayant deux places à gauche de la virgule, et que nous l'avons donc remplacé par 2,4 et avons modifié l'exposant en conséquence.

Pour diviser, on divise les nombres avant et on soustrait les exposants. Voici quelques exemples :

$$\frac{1.000.000}{1000} = \frac{10^6}{10^3} = 10^{(6-3)} = 10^3$$

$$\frac{9 \times 10^{12}}{2 \times 10^3} = 4,5 \times 10^9$$

#### IV. Annexes

$$\frac{2,8 \times 10^2}{6,2 \times 10^5} = 0,452 \times 10^{-3} = 4,52 \times 10^{-4}$$

Dans le dernier exemple, notre premier résultat n'était pas sous la forme standard, nous avons donc dû changer 0,452 en 4,52 et changer l'exposant en conséquence.

Si c'est la première fois que vous rencontrez la notation scientifique, nous vous invitons à pratiquer de nombreux exemples en l'utilisant. Vous pouvez commencer par résoudre les exercices ci-dessous. Comme toute nouvelle langue, la notation semble compliquée au début mais devient plus facile à mesure que vous la pratiquez.

1. Fin septembre 2015, la sonde spatiale New Horizons (qui a rencontré Pluton pour la première fois en juillet 2015) se trouvait à 4,898 milliards de km de la Terre. Convertissez ce nombre en notation scientifique. Combien d'unités astronomiques cela représente-t-il ? (Une unité astronomique est la distance de la Terre au Soleil, soit environ 150 millions de km.)

☉ Réponse

2. Au cours des six premières années de son fonctionnement, le télescope spatial Hubble a fait 37 000 fois le tour de la Terre, pour un total de 1 280 000 000 km. Utilisez la notation scientifique pour trouver le nombre de km sur une orbite.

☉ Réponse

3. Dans une grande cafétéria universitaire, un burger soja-légumes est proposé comme alternative aux hamburgers ordinaires. Si 889 875 burgers ont été consommés au cours d'une année scolaire, et que 997 d'entre eux étaient des veggie-burgers, quelle fraction et quel pourcentage des burgers cela représente-t-il ?

☉ Réponse

4. Dans un sondage Kelton Research de 2012, 36 % des adultes américains pensaient que des extraterrestres avaient effectivement atterri sur Terre. Le nombre d'adultes aux États-Unis en 2012 était d'environ 222 000 000. Utilisez la notation scientifique pour déterminer combien d'adultes pensent que des extraterrestres ont visité la Terre.

☉ Réponse

5. Au cours de l'année scolaire 2009–2010, les collèges et universités américains ont décerné 2 354 678 diplômes. Parmi ceux-ci figuraient 48 069 doctorats. Quelle fraction des diplômes étaient des doctorats ? Exprimez ce nombre en pourcentage. (Maintenant, allez trouver un emploi pour tous ces docteurs !)

☉ Réponse

6. On a découvert qu'une étoile à 60 années-lumière avait une grande planète en orbite autour d'elle. Votre oncle veut connaître la distance jusqu'à cette planète en miles à l'ancienne. Supposons que la lumière parcourt 300 000 kilomètres par seconde et qu'il y a 60 secondes dans une minute, 60 minutes dans une heure, 24 heures dans une journée et 365 jours dans une année. À combien de kilomètres se trouve cette étoile ?

☉ Réponse



TODO : vérifier les calculs pour l'exemple 6

## Contenu masqué

### Contenu masqué n°9 :

#### Réponse

4,898 milliards correspond à  $4,898 \times 10^9$  km. Une unité astronomique (UA) est de 150 millions de km =  $1,5 \times 10^8$  km. En divisant le premier nombre par le second, on obtient  $3,27 \times 10^{(9-8)} = 3,27 \times 10^1$  UA.

[Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°10 :

#### Réponse

$$\frac{1.28 \times 10^9 \text{ km}}{3.7 \times 10^4 \text{ orbits}} = 0.346 \times 10^{(9-4)} = 0.346 \times 10^5 = 3.46 \times 10^4 \text{ km per orbit}$$

[Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°11 :

#### Réponse

$$\frac{9.97 \times 10^2 \text{ veggie - burger}}{8.90 \times 10^5 \text{ total burgers}} = 1,126 \times 10^{(2-5)} = 1.12 \times 10^{-3}$$

(soit environ un millième environ) des hamburgers étaient végétariens. % signifie pour cent. Donc :

$$\frac{1.12 \times 10^{-3}}{10^{-2}} = 1,12 \times 10^{((-3)-(-2))} = 1,12 \times 10^{-1} \%$$

[Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°12 :

#### Réponse

36 % correspond à 36 centièmes ou 0,36 ou  $3,6 \times 10^{-1}$ . Multipliez cela par  $2,22 \times 10^8$  et vous obtenez environ  $7,99 \times 10^{(-1+8)} = 7,99 \times 10^7$  soit près de 80 millions de personnes qui croient que des extraterrestres ont atterri sur notre planète. Nous avons besoin de plus de cours d'astronomie pour éduquer tous ces gens. [Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°13 :

#### Réponse

$$\frac{4,81 \times 10^4}{2,35 \times 10^6} = 2,05 \times 10^{4-6} = 2,05 \times 10^{-2} = \text{environ } 2\%$$

(Notez que dans ces exemples, nous arrondissons certains nombres afin de ne pas avoir plus de 2 décimales après la virgule.) [Retourner au texte.](#)

### Contenu masqué n°14 :

#### Réponse

Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en une année. Si la lumière parcourt 300 000 kilomètres par seconde, alors elle parcourra 60 fois plus en une minute, 60 fois en une heure, 24 fois en un jour et 365 fois en un an. Nous avons donc  $3 \times 10^5 \times 6,0 \times 10^1 \times 6,0 \times 10^1 \times 2,4 \times 10^1 \times 3,65 \times 10^2$ . Nous multiplions donc tous les nombres à l'avant et additionnons tous les exposants. Nous obtenons  $94\,608 \times 10^{10} = 9,4608 \times 10^{12}$  kilomètres en une année-lumière (ce qui équivaut à un sacré nombre de kilomètres !). Donc, si l'étoile est à 60 années-lumière, sa distance est de  $6 \times 10^1 \times 9,4608 \times 10^{12} = 56,67 \times 10^{13} = 5,667 \times 10^{14}$  kilomètres. [Retourner au texte.](#)

## IV.2. Annexe G Une sélection de lunes

Remarque : Au moment où ce livre est sous presse, près de deux cents lunes sont maintenant connues dans le système solaire et d'autres sont découvertes régulièrement. Parmi les principales planètes, seules Mercure et Vénus n'ont pas de lunes. En plus des lunes des planètes, il existe de nombreuses lunes d'astéroïdes. Dans cette annexe, nous listons uniquement les objets les plus grands et les plus intéressants qui orbitent autour de chaque planète (y compris les planètes naines). Le nombre donné pour chaque planète correspond aux découvertes jusqu'en 2015. Pour plus d'informations, voir sur Wikipedia [Satellites naturels du Système solaire](#) ↗ .

Planète	Nom du satellite	Découverte	Demi grand axe (1000km)	Période (d)
Terre (1)	Lune		384	27,32
Mars (2)	Phobos	Hall (1877)	9,4	0,32
”	Deimos	Hall (1877)	23,5	1,26
Jupiter (79)	Amalthée	Barnard (1892)	181	0,50
”	Thébé	Voyager (1979)	222	0,67
”	Io	Galilée (1610)	422	1,77
”	Europe	Galilée (1610)	671	3,55
”	Ganymède	Galilée (1610)	1070	7,16
”	Callisto	Galilée (1610)	1883	16,69
”	Himalia	Perrine (1904)	11,46	251
Saturne (82)	Pan	Voyager (1985)	133,6	0,58
”	Atlas	Voyager (1980)	137,7	0,60
”	Prométhée	Voyager (1980)	139,4	0,61
”	Pandore	Voyager (1980)	141,7	0,63
”	Janus	Dollfus (1966)	151,4	0,69
”	Épiméthée	Fountain, Larson (1980)	151,4	0,69
”	Mimas	Herschel (1789)	186	0,94
”	Encelade	Herschel (1789)	238	1,37
”	Téthys	Cassini (1684)	295	1,89

#### IV. Annexes

”	Dione	Cassini (1684)	377	2,74
”	Rhéa	Cassini (1672)	527	4,52
”	Titan	Huygens (1655)	1222	15,95
”	Hypérion	Bond, Lassell (1848)	1481	21,3
”	Iapetus	Cassini (1671)	3561	79,3
”	Ph�eb�e	Pickering (1898)	12,95	550 (R)
Uranus (27)	Puck	Voyager (1985)	86,0	0,76
”	Miranda	Kuiper (1948)	130	1,41
”	Ariel	Lassell (1851)	191	2,52
”	Umbriel	Lassell (1851)	266	4,14
”	Titania	Herschel (1787)	436	8,71
”	Oberon	Herschel (1787)	583	13,5
Neptune (14)	Despina	Voyager (1989)	53	0,33
”	Galatée	Voyager (1989)	62	0,40
”	Larissa	Reitsema, et al (1981)	74	0,55
”	Protée	Voyager (1989)	118	1,12
”	Triton	Lassell (1846)	355	5,88 (R)
”	Nereid	Kuiper (1949)	5511	360
Pluto (5)	Charon	Christy (1978)	19,7	6,39
”	Styx	Showalter et al (2012)	42	20
”	Nix	Weaver et al (2005)	48	24
”	Kerberos	Showalter et al (2011)	58	24
”	Hydra	Weaver et al (2005)	65	38
Eris (1)	Dysnomie	Brown et al (2005)	38	16
Makemake (R)	(MK2)	Parker et al (2016)		
Haumea (R)	Hi’iaka	Brown et al (2005)	50	49
”	Namaka	Brown et al (2005)	39	35

Nota : les corps marqu es (R) ont une rotation rétrograde (inverse de la direction dans laquelle la plupart des objets du système solaire tournent et tournent).

## IV.3. Annexe K : Éléments chimiques

Element	Symbole	Numéro atomique	Masse atomique	
Hydrogène	H	1	1,008	7
Hélium	He	2	4,003	2
Lithium	Li	3	6,94	6
Béryllium	Be	4	9,012	1
Bore	B	5	10,821	1
Carbone	C	6	12,011	0
Azote	N	7	14,007	0
Oxygène	O	8	15,999	1
Fluorine	F	9	18,998	4
Néon	Ne	10	20,180	0
Sodium	Na	11	22,990	0
Magnésium	Mg	12	24,305	0
Aluminium	Al	13	26,982	0
Silicium	Si	14	28,085	0
Phosphore	P	15	30,974	7
Soufre	S	16	32,06	0
Chlore	Cl	17	35,45	1
Argon	Ar	18	39,948	0
Potassium	K	19	39,098	3
Calcium	Ca	20	40,078	0
Scandium	Sc	21	44,956	3
Titanium	Ti	22	47,867	3
Vanadium	V	23	50,942	3
Chrome	Cr	24	51,996	0

IV. Annexes

Manganèse	Mn	25	54,938	8
Fer	Fe	26	55,845	0
Cobalt	Co	27	58,933	3
Nickel	Ni	28	58,693	0
Cuivre	Cu	29	63,546	6
Zinc	Zn	30	65,38	3
Gallium	Ga	31	69,723	1
Germanium	Ge	32	72,630	2
Arsenic	As	33	74,922	8
Sélénium	Se	34	78,971	3
Bromine	Br	35	79,904	7
Krypton	Kr	36	83,798	4
Rubidium	Rb	37	85,468	1
Strontium	Sr	38	87,62	4
Yttrium	Y	39	88,906	7
Zirconium	Zr	40	91,224	5
Niobium	Nb	41	92,906	2
Molybdène	Mo	42	95,95	5
Technétium	Tc	43	(98)	—
Ruthénium	Ru	44	101,07	4
Rhodium	Rh	45	102,906	6
Palladium	Pd	46	106,42	2
Argent	Ag	47	107,868	6
Cadmium	Cd	48	112,414	2
Indium	In	49	114,818	3
Étain	Sn	50	118,710	4
Antimoine	Sb	51	121,760	4
Tellurium	Te	52	127,60	9
Iode	I	53	126,904	1
Xénon	Xe	54	131,293	1
Césium	Cs	55	132,905	8

IV. Annexes

Barium	Ba	56	137,327	1
Lanthane	La	57	138,905	2
Cérium	Ce	58	140,116	1
Praséodyme	Pr	59	140,907	2
Néodyme	Nd	60	144,242	1
Prométhium	Pm	61	(145)	—
Samarium	Sm	62	150,36	5
Europium	Eu	63	151,964	5
Gadolinium	Gd	64	157,25	2
Terbium	Tb	65	158,925	5
Dysprosium	Dy	66	162,500	2
Holmium	Ho	67	164,930	5
Erbium	Er	68	167,259	2
Thulium	Tm	69	168,934	1
Ytterbium	Yb	70	173,054	2
Lutétiun	Lu	71	174,967	1
Hafnium	Hf	72	178,49	7
Tantale	Ta	73	180,948	8
Tungstène	W	74	183,84	5
Rhenium	Re	75	186,207	2
Osmium	Os	76	190,23	3
Iridium	Ir	77	192,217	2
Platinum	Pt	78	195,084	5
Or	Au	79	196,967	6
Mercure	Hg	80	200,592	1
Thallium	Tl	81	204,38	5
Plomb	Pb	82	207,2	1
Bismuth	Bi	83	208,980	7
Polonium	Po	84	(209)	—
Astate	At	85	(210)	—
Radon	Rn	86	(222)	—

IV. Annexes

Francium	Fr	87	(223)	—
Radium	Ra	88	(226)	—
Actinium	Ac	89	(227)	—
Thorium	Th	90	232,038	4
Protactinium	Pa	91	231,036	—
Uranium	U	92	238,029	2
Neptunium	Np	93	(237)	—
Plutonium	Pu	94	(244)	—
Americium	Am	95	(243)	—
Curium	Cm	96	(247)	—
Berkelium	Bk	97	(247)	—
Californium	Cf	98	(251)	—
Einsteinium	Es	99	(252)	—
Fermium	Fm	100	(257)	—
Mendelevium	Md	101	(258)	—
Nobelium	No	102	(259)	—
Lawrencium	Lr	103	(262)	—
Rutherfordium	Rf	104	(267)	—
Dubnium	Db	105	(268)	—
Seaborgium	Sg	106	(271)	—
Bohrium	Bh	107	(272)	—
Hassium	Hs	108	(270)	—
Meitnerium	Mt	109	(276)	—
Darmstadtium	Ds	110	(281)	—
Roentgenium	Rg	111	(280)	—
Copernicium	Cn	112	(285)	—
Niobium	Nh	113	(284)	—
Flérovium	Fl	114	(289)	—
Moskovium	Mc	115	(288)	—
Livermorium	Lv	116	(293)	—
Tennessine	Ts	117	(294)	—

#### IV. Annexes

Oganesson	Og	118	(294)	—
-----------	----	-----	-------	---

#### Masses atomiques

Lorsque les masses atomiques moyennes n'ont pas été bien déterminées, les valeurs de masse atomique des isotopes les plus stables qui sont indiquées entre parenthèses.