

Avant-propos

La découverte d'exoplanètes telluriques, c'est-à-dire de planètes rocheuses sensiblement de la même taille et de la même masse que la Terre, en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil, suscite un intérêt extraordinaire dans la communauté scientifique et dans l'ensemble de la population. C'est sur l'une de ces planètes que nous estimons avoir les plus grandes chances de trouver une forme de vie aussi complexe que la nôtre. Parmi toutes les exoplanètes telluriques déjà découvertes, Proxima b est l'objet d'une attention particulière car elle est en orbite autour de l'étoile actuellement la plus proche du Soleil. Des études spécifiques sur cette planète ont été menées pour déterminer son habitabilité et certains pensent déjà à envoyer une sonde pour lui rendre visite.

Wikipédia est une source d'information extraordinaire¹. Cette encyclopédie en ligne permet à tout un chacun de consulter toutes sortes d'informations, parfois très techniques, sur les sujets les plus variés. C'est devenu, notamment pour les pages anglophones, une référence très utile pour les étudiants en sciences² (et même pour les chercheurs). Un moyen rapide d'avoir des données fiables et référencées par des sources scientifiques (et journalistiques) sur la planète Proxima b par exemple, est de lire la page Wikipédia correspondante. On se rend compte alors que de nombreuses notions ne sont pas faciles à comprendre car elles nécessitent des connaissances en physique et en astronomie qui ne sont étudiées pour la plupart qu'à l'université.

L'un des objectifs de ce cours et des nombreux exercices proposés (une centaine de questions) est de montrer qu'avec le bagage scientifique acquis au cours de la licence de physique, un grand nombre de notions d'astronomie sont abordables. Pour vous les faire découvrir, j'ai choisi de prendre le système α -Centauri comme objet d'étude. Toutes les notions présentées sont appliquées à

1. Un peu comme *Le Guide du voyageur galactique* de D. Adams.
2. Je ne saurais dire pour les autres disciplines.

la planète Proxima b et au système stellaire α -Centauri. Les principales notions importantes de l'astronomie peuvent être découvertes de cette manière dans une approche cohérente concernant un même système.

Ce n'est pas un cours où toutes les relations sont démontrées et expliquées en détail. Il s'agit principalement de les utiliser. Les notions principales sont tout de même suffisamment définies pour les appliquer au système α -Centauri. La plupart des relations et des concepts sont démontrés ou présentés en licence universitaire (les 3 premières années du cursus universitaire), notamment en mécanique du point, en optique géométrique, en optique ondulatoire, en physique des particules et en mécanique des fluides. Quelques démonstrations sont proposées lorsqu'elles sont assez spécifiques de problèmes astronomiques et quand elles permettent de mieux comprendre le concept présenté. Ces démonstrations ne sont pas difficiles en règle générale et ont été vues, pour la plupart, dans les autres cours de physique.

La meilleure méthode pour apprendre des notions nouvelles et pour bien les comprendre est de les pratiquer. De nombreux exercices sont proposés pour chaque chapitre pour assimiler les notions au fur et à mesure. Pour une grande majorité de ces exercices, la solution est dans le cours. Dans le cas contraire, les solutions sont données à la suite de l'exercice. Les étapes de la résolution de ces exercices sont à la portée des étudiants en physique, des indications sont cependant données pour aider à les résoudre rapidement.

Ce cours s'adresse aux étudiants qui souhaitent se diriger vers un master d'astrophysique mais il intéressera aussi tout étudiant de physique qui souhaite appliquer, sur un cas concret et d'actualité, les différentes notions de physique qu'il est en train d'acquérir.

Les données sur les étoiles du système α -Centauri et de la planète Proxima b proviennent des pages Wikipédia (principalement de la version anglaise). Ainsi, le lecteur pourra facilement vérifier leur provenance et trouver les références qui correspondent (articles scientifiques à comité de lecture, livres, etc.). Ce cours leur donnera les notions indispensables pour comprendre l'origine de la plupart des quantités données dans ces pages.

Je pense que ce cours offre aussi de nombreuses informations accessibles aux personnes intéressées par l'astronomie et qui n'ont pas forcément suivi un cursus scientifique universitaire. Les personnes qui aiment les calculs pourront s'amuser à appliquer les relations présentées et comparer leurs résultats avec ceux fournis dans le cours. Les personnes réfractaires aux calculs peuvent sauter les parties trop techniques et s'intéresser aux applications dédiées au système

triple α -Centauri et à l'exoplanète Proxima b. Cet ouvrage est cependant plutôt destiné à des personnes ayant des bases en astronomie ou en physique, plutôt qu'à des néophytes, car les notions de base ne sont pas toujours expliquées.

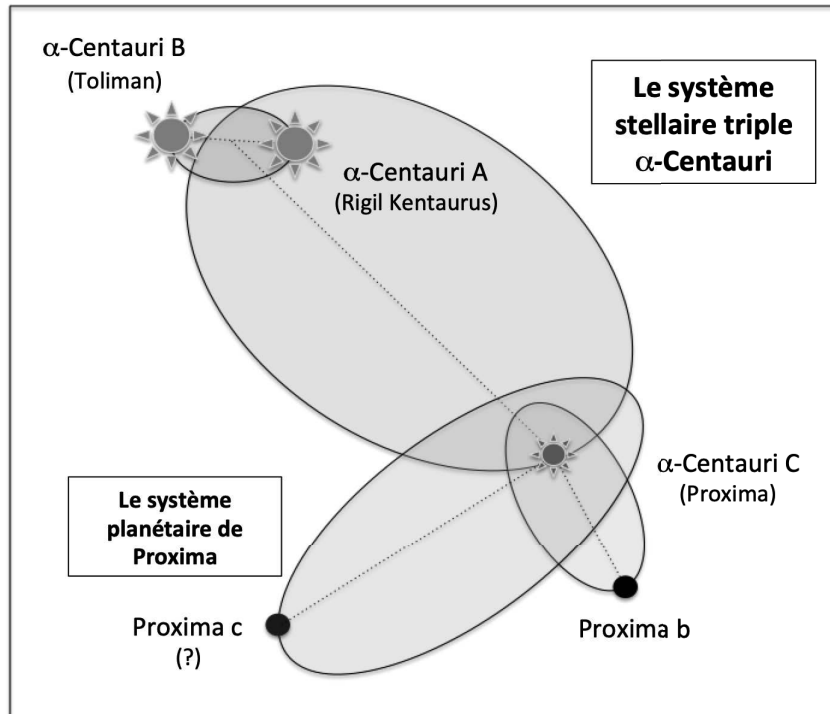


FIGURE 1 – Les objets célestes étudiés dans cet ouvrage. Le système stellaire α -Centauri est composé de trois étoiles : Rigel Kentaurus, Toliman et Proxima. Le système planétaire de Proxima est composé de deux exoplanètes : Proxima b et la planète candidate Proxima c.

La manière dont est organisé l'ouvrage est la suivante. Proxima b est une exoplanète en orbite autour de l'étoile Proxima (appelée aussi α -Centauri C) qui elle-même est en orbite autour d'un système binaire d'étoiles α -Centauri AB (voir la Figure 1). Le système stellaire est présenté en premier : un chapitre est consacré à Proxima, puis un autre à α -Centauri AB. Je présente ensuite le système planétaire de Proxima : un chapitre est dédié à la planète Proxima b et un autre à la planète candidate Proxima c.

Dans chaque chapitre, des notions sont expliquées de manière générale puis appliquées aux objets choisis dans cet ouvrage. Ces applications peuvent donc

être considérées comme des travaux dirigés avec solutions. A la fin de chaque chapitre, une série d'exercices très simples complètent les applications précédentes. Pour la plupart de ces exercices, les solutions sont disponibles dans le chapitre en question. Les solutions numériques (pas le développement du calcul) sont aussi dans les pages Wikipédia des trois objets étudiés ici. Dans un dernier chapitre, des exercices supplémentaires sont proposés utilisant des notions simples. Ces exercices ne nécessitent pas de connaissances poussées en physique.

Les constantes fondamentales et les données indispensables pour effectuer tous les calculs sont présentées dans le premier chapitre. Je pense qu'il est important de bien lire ce chapitre et de faire les quelques exercices associés. Ils permettent notamment de se familiariser avec les notions essentielles de distance et de temps en astronomie.

Dans le livre *L'essayeur* (1623), Galilée écrivit « *La philosophie est écrite dans cet immense livre qui continuellement reste ouvert devant les yeux (je dis l'Univers), mais on ne peut le comprendre si, d'abord, on ne s'exerce pas à en connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit dans une langue mathématique, et les caractères en sont les triangles, les cercles, et d'autres figures géométriques, sans lesquelles il est impossible humainement d'en saisir le moindre mot; sans ces moyens, on risque de s'égarer dans un labyrinthe obscur.* » J'espère que ce cours et les exercices associés sauront vous convaincre qu'avec quelques notions de mathématiques et de physique on peut expliquer et appréhender de nombreux phénomènes astronomiques.

Avertissement : j'ai choisi d'utiliser la notation anglo-saxonne pour les nombres réels. Ainsi j'écris dans la suite 1.5 (et non 1,5) pour $3/2$. Comme il est d'usage, les variables mathématiques ainsi que les constantes physiques sont en italique dans le texte et les figures. Les lettres permettant de positionner des objets dans l'espace ne sont pas en italique. Enfin, j'ai choisi d'utiliser dans tous le cours le terme « astronomie » plutôt que « astrophysique » pour ne pas effrayer certains lecteurs potentiels.

Chapitre 1

Données importantes

L'objectif de ce chapitre est de donner toutes les valeurs indispensables (constantes fondamentales, données physiques et dynamiques des planètes et du Soleil) pour effectuer les calculs proposés tout au long de l'ouvrage. Il présente aussi les unités importantes en astronomie qui doivent être bien maîtrisées. En particulier, les échelles usuelles de distance sur la Terre (mètres ou kilomètres) font place aux unités astronomiques pour les systèmes planétaires et aux années-lumière (ou aux parsecs) pour le milieu interstellaire. Il est indispensable aussi de savoir manipuler les unités d'angle.

1.1 Les constantes fondamentales

Les constantes fondamentales utilisées dans ce cours sont données dans la Table 1.1. Dans la majorité des cas, il n'est pas utile de conserver toutes les décimales dans les calculs. Cependant, si vous trouvez des résultats légèrement différents de ceux annoncés dans ce cours, cela peut être dû à des arrondis effectués sur plusieurs variables qui sont différents de ceux que j'ai utilisés.

1.2 Les principales unités en astronomie

Les unités utilisées dans ce cours sont évidemment les unités du Système International (SI), sauf dans quelques cas particuliers. Cependant, en astronomie, il est d'usage d'utiliser des unités de longueur, de temps et de masse

spécifiques pour limiter l'utilisation de nombres « astronomiques » et favoriser la comparaison entre différents objets célestes.

TABLE 1.1 – Principales constantes fondamentales avec leur valeur et leurs unités dans le système international (SI).

Grandeur	Notation	Valeur	Unités
Célérité de la lumière	c	299 792 458	m.s^{-1}
Constante gravitationnelle	G	6.67430×10^{-11}	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante de Stefan	σ	5.670373×10^{-8}	$\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
Luminosité bolométrique de référence	L_o	3.0128×10^{28}	W.m^{-2}
Constante de Boltzmann	k_B	1.380649×10^{-23}	J.K^{-1}
Constante de Planck	h	$6.62607015 \times 10^{-34}$	J.s
Constante de Rydberg	R_H	1.09737×10^7	m^{-1}

1.2.1 L'unité astronomique de distance

L'unité astronomique de distance pour les systèmes planétaires (appelée simplement « unité astronomique ») est une longueur correspondant approximativement à la distance entre la Terre et le Soleil. D'après la définition adoptée par la XXVIII^{ème} assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale (UAI)¹, l'unité astronomique (1 ua) est une longueur égale exactement à 149 597 870 700 m.

1.2.2 L'unité astronomique de temps

L'unité astronomique de temps est le jour (1 jour = 1 j) qui est égal exactement à 86 400 secondes (1 j = 86 400 s). Les périodes de révolution et de rotation des corps célestes sont souvent exprimées en jours ou en années juliennes (généralement appelées simplement « années »). D'après l'UAI, l'année julienne est égale à 365.25 jours (soit 31.5576 millions de secondes).

1.2.3 L'unité astronomique de masse

L'unité astronomique de masse pour les étoiles est égale à la masse du Soleil, soit $M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{30}$ kg. Pour les planètes, on utilise souvent la masse de

1. IAU 2012 Resolution B2.

la Terre, de Neptune ou de Jupiter comme référence. Dans le cas de Proxima b, c'est la masse de la Terre qui sert de référence ($M_{\oplus} = 5.97237 \times 10^{24}$ kg).

1.2.4 L'année-lumière

L'année-lumière est la distance parcourue par la lumière, dans le vide, en une année julienne. La vitesse de la lumière est $c = 299\,792\,458$ m.s⁻¹ (voir la Table 1.1). On obtient donc : $1 \text{ al} \approx 9.46 \times 10^{15}$ m $\approx 63\,241$ ua.

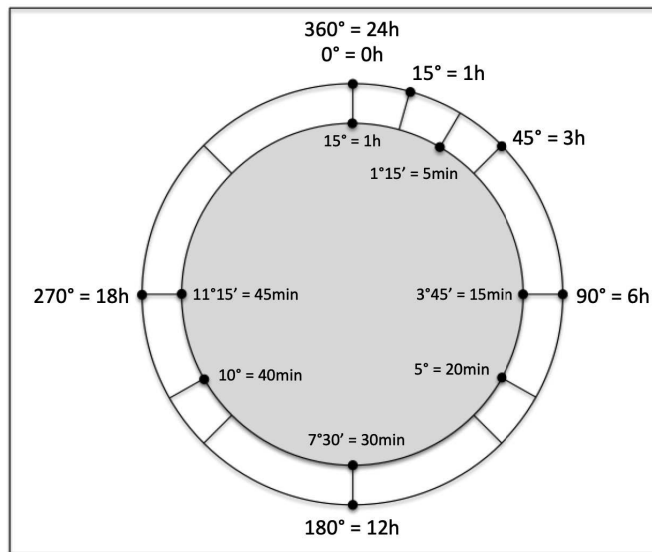


FIGURE 1.1 – Horloge de conversion des angles sur la base $24 \text{ h} = 360^\circ$

1.2.5 Les angles

La plupart des angles utilisés en astronomie sont exprimés en degrés (notés $^\circ$), minutes d'arc (notées $'$) et secondes d'arc (notées $''$) et suivent la correspondance habituelle, c'est-à-dire $60'' = 1'$ et $60' = 1^\circ$. Pour les angles très petits, on utilise les millièmes de seconde d'arc qui sont notés « mas » pour milli-arcseconde ($1 \text{ mas} = 10^{-3}''$).

Certains angles sont exprimés sur une base horaire en heures (notés h), minutes (notées min) et secondes (notées s) telle que $24 \text{ h} = 360^\circ$ (voir la

Figure 1.1). Il est intéressant d'avoir en tête la correspondance suivante pour faire les conversions :

$$\begin{aligned} 1 \text{ h} &= 15^\circ \\ 1 \text{ min} &= 15' \\ 1 \text{ s} &= 15'' \end{aligned}$$

La plupart des calculettes, mêmes celles obligatoires pour les examens universitaires², proposent de faire les conversions de ($^\circ$, $'$, $''$) en degrés décimaux. Ce n'est pas le cas pour la conversion des angles exprimés en temps.

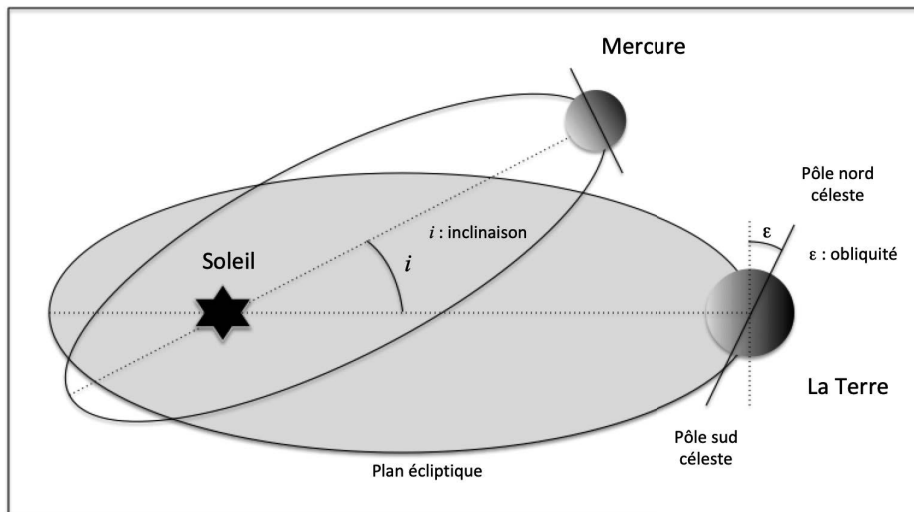


FIGURE 1.2 – Représentation du plan écliptique (plan de l'orbite de la Terre), de l'obliquité (inclinaison de l'axe de rotation d'une planète par rapport à la perpendiculaire à son plan orbital), et l'inclinaison (angle entre le plan orbital d'une planète et l'écliptique). L'axe de rotation de la Terre est dirigé vers les pôles célestes. Les longueurs ne sont pas à l'échelle.

1.3 Données stellaires et planétaires

Certaines quantités physiques comme le rayon, la masse et la luminosité du Soleil servent de références pour décrire les autres étoiles. Ces valeurs sont données dans la Table 1.2.

2. Par exemple : la calculette des collèves utilisée à l'Université de Bordeaux.