

Table des matières

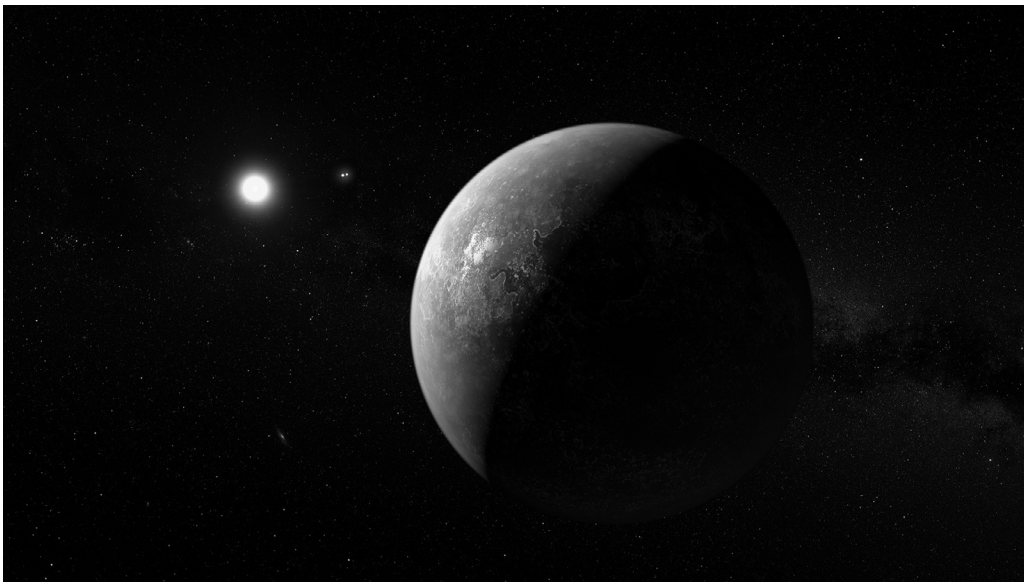
1	Données importantes	15
1.1	Les constantes fondamentales	15
1.2	Les principales unités en astronomie	15
1.2.1	L'unité astronomique de distance	16
1.2.2	L'unité astronomique de temps	16
1.2.3	L'unité astronomique de masse	16
1.2.4	L'année-lumière	17
1.2.5	Les angles	17
1.3	Données stellaires et planétaires	18
1.4	Les principaux symboles astronomiques	20
1.5	Remarques d'ordre général	20
1.6	Exercices	20
2	L'étoile Proxima	23
2.1	Les notions essentielles	23
2.1.1	Les coordonnées équatoriales d'une étoile	23
2.1.2	Séparation angulaire stellaire	25
2.1.3	La taille apparente d'un corps céleste	28
2.1.4	La parallaxe d'une étoile	29
2.1.5	Le parsec	29

2.1.6	La magnitude d'une étoile	30
2.1.7	La relation masse-luminosité des étoiles	33
2.1.8	La température effective d'une étoile	34
2.1.9	La loi de Planck	35
2.1.10	La composition des étoiles	36
2.1.11	La gravité à la surface d'un corps céleste	38
2.2	Applications à Proxima	39
2.2.1	Proxima sur la sphère céleste	39
2.2.2	La visibilité de Proxima depuis la Terre	40
2.2.3	La distance de Proxima au Soleil	42
2.2.4	La taille de Proxima	42
2.2.5	La magnitude de Proxima	43
2.2.6	La classe spectrale de Proxima	45
2.2.7	La masse de Proxima	46
2.2.8	La métallicité de Proxima	47
2.3	Exercices	47
3	Le système stellaire α-Centauri	57
3.1	Les notions essentielles	57
3.1.1	Les trois lois de Kepler	57
3.1.2	La forme newtonienne de la troisième loi de Kepler	59
3.1.3	Centre de masse d'un système binaire	60
3.1.4	Troisième loi de Kepler généralisée à un système binaire	61
3.1.5	Les éléments orbitaux	61
3.1.6	Vitesse de libération	64
3.1.7	Mouvement apparent des étoiles sur la sphère céleste	65
3.1.8	Vitesse radiale d'un système binaire	69
3.1.9	Rotation des étoiles	71

3.2	Applications à α -Centauri	71
3.2.1	Le système binaire α -Centauri AB	72
3.2.2	L'orbite de Proxima autour de α -Centauri AB	75
3.2.3	La visibilité de α -Centauri A et α -Centauri B depuis Proxima	79
3.2.4	Le mouvement apparent de α -Centauri sur la sphère céleste	80
3.2.5	Le mouvement propre de α -Centauri AB en coordonnées horizontales	82
3.3	Exercices	83
4	L'exoplanète Proxima b	99
4.1	Les notions essentielles	100
4.1.1	Vitesse orbitale d'une planète	100
4.1.2	Détection d'une exoplanète	100
4.1.3	Résonance spin-orbite	106
4.1.4	La longueur du jour	106
4.1.5	La limite de roche autour d'une étoile	108
4.1.6	La température d'équilibre d'une planète	109
4.1.7	La zone habitable dans un système planétaire	112
4.1.8	Moment cinétique d'un système planétaire	114
4.2	Applications à Proxima b	116
4.2.1	La vitesse orbitale de Proxima b	116
4.2.2	La masse de Proxima b	117
4.2.3	La durée du jour sur Proxima b	118
4.2.4	Le diamètre apparent de Proxima	118
4.2.5	Quelle est la brillance de α -Centauri AB depuis Proxima b?	119
4.2.6	La température à la surface de Proxima b	120

4.2.7	L'éclairement énergétique au niveau de la planète	124
4.2.8	La gravité à la surface de Proxima b	125
4.2.9	Moment cinétique du système planétaire de Proxima	125
4.2.10	Autres informations sur Proxima b	126
4.3	Exercices	129
5	Le système planétaire de Proxima	135
5.1	Une seconde planète autour de Proxima?	135
5.1.1	L'exoplanète Proxima b	136
5.1.2	L'exoplanète candidate Proxima c	137
5.2	Les configurations planétaires	138
5.2.1	Conjonction et opposition	138
5.2.2	Elongation	140
5.2.3	Application au système planétaire de Proxima	142
5.3	Les éclipses stellaires	142
5.3.1	Conditions d'éclipse totale	142
5.3.2	Application au système planétaire de Proxima	143
5.4	Période synodique d'une planète	145
5.4.1	Définition	145
5.4.2	Application au système planétaire de Proxima	147
5.5	Angle de phase d'une planète	148
6	Exercices supplémentaires	151
6.1	Les raies d'absorption solaire du spectre visible	151
6.2	Analyse d'une courbe de vitesse radiale	152
6.3	Masse des exoplanètes détectées par vitesse radiale	155
6.4	Impact météoritique sur Proxima b	156
6.5	Structure interne de Proxima b	158

6.5.1	Généralités	158
6.5.2	Hypothèse 1 : planète tellurique	159
6.5.3	Hypothèse 2 : planète océan	160
6.6	Des volcans sur Proxima b ?	163
6.7	La durée du jour sur Proxima b	166
6.7.1	La période de révolution est plus grande que la période de rotation	167
6.7.2	La période de révolution est plus courte que la période de rotation	168
6.7.3	Application à Proxima b	168
6.8	Définition bifocale d'une ellipse	169
6.9	Proxima dans la Galaxie	172
6.9.1	Les coordonnées galactiques de Proxima	172
6.9.2	L'orbite galactique de Proxima	174
6.10	La durée de vie de l'étoile Proxima	175
6.10.1	D'où vient l'énergie des étoiles ?	176
6.10.2	Application au Soleil et à Proxima	177
6.11	La parallaxe de α -Centauri AB	179
6.12	Bilan	182



Vue d'artiste de la planète Proxima b en orbite autour de l'étoile Proxima du Centaure. On distingue plus loin les deux étoiles principales du système α -Centaurei. ESO/M. Kornmesser - <https://www.eso.org/public/images/ann16056a/>

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.

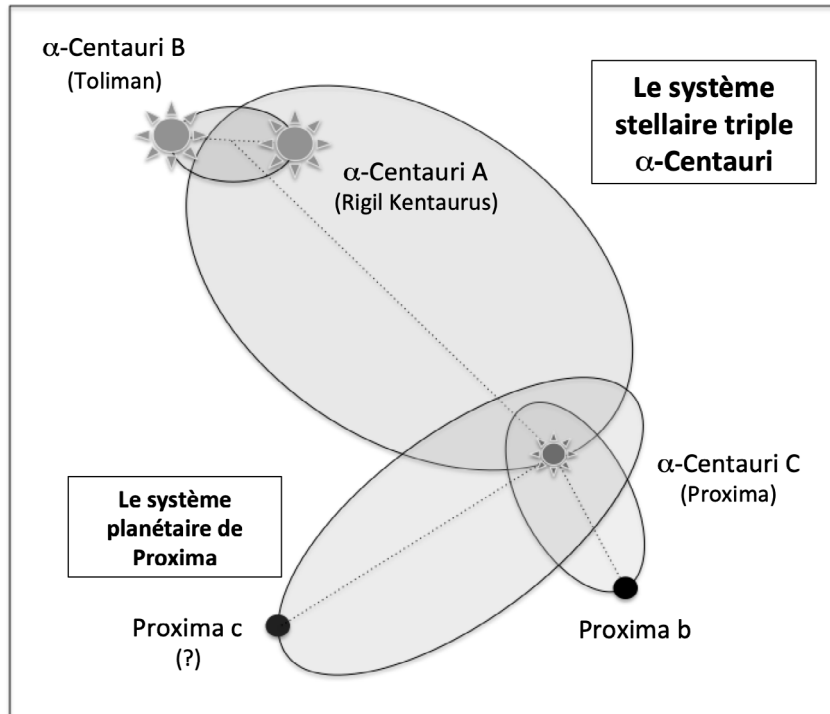


FIGURE 1 – Les objets célestes étudiés dans cet ouvrage. Le système stellaire α -Centauri est composé de trois étoiles : Rigel Kentaurus, Toliman et Proxima. Le système planétaire de Proxima est composé de deux exoplanètes : Proxima b et la planète candidate Proxima c.

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.