

Marc Couture

avec la collaboration de René Lepage, Claire O'Neill et Anik Daigle

Astronomie

histoire et concepts

Guide d'étude

TÉLUQ

Astronomie

histoire et concepts

Marc Couture

avec la collaboration de René Lepage, Claire O'Neill et Anik Daigle

Astronomie

histoire et concepts

Guide d'étude

Télé-université
Université du Québec
Québec (Québec) Canada
Mise à jour : avril 2016

Direction pédagogique et conception	Marc Couture
Collaboration à la conception	Claire O'Neill (édition 1999) René Lepage (module 4) Anik Daigle (édition 2006)
Révision linguistique	Renée Dumas

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation, en tout ou en partie, par quelque moyen que ce soit, sont réservés.

© TÉLUQ, Université du Québec à Montréal, 2006
© TÉLUQ, Université du Québec, 1998, 1999, 2013, 2015

ISBN 978-2-7624-2536-9 (5^e édition)

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015

Édité par :
Télé-université
Université du Québec
455, rue du Parvis
Québec (Québec) G1K 9H6
Canada

TABLE DES MATIÈRES

Introduction au cours	1
L'objet du cours	1
Le but du cours et ses grands objectifs	2
Le contenu du cours et son organisation	3
La démarche pédagogique	4
L'encadrement	11
L'évaluation et la notation	11
Connaissances nécessaires et matériel exigé	13
Module 0 La Terre, un grain de poussière... en mouvement.....	15
Présentation.....	17
Explications.....	21
Résumé et notions importantes	35
Activités	36
Module 1 La perspective cosmique :	41
Présentation.....	43
Explications.....	47
G-1.1 L'astronomie avant l'invention de l'écriture	53
G-1.2 L'astronomie au Moyen Âge	54
Résumé et notions importantes	56
Activités	58
Module 2 Sur la Terre comme au ciel :	63
<i>Partie I : Newton et la gravitation.....</i>	<i>65</i>
Présentation.....	65
Explications.....	67
G-2.1 Cinématique, dynamique et vecteurs	71
G-2.2 La loi de Bode.....	78
G-2.3 Lois et théories	78
Résumé et notions importantes	81
Activités	82
<i>Partie II : L'observation et l'étude de la lumière</i>	<i>88</i>
Présentation.....	88
Explications.....	91

G-2.4 L'énergie	103
G-2.5 Luminosité, intensité et magnitudes	105
G-2.6 Mouvement propre et vitesse effective des étoiles	107
Résumé et notions importantes	109
Activités	111
Module 3 Le grand jeu des étoiles	117
Présentation.....	119
Explications.....	123
G-3.1 La découverte du premier trou noir	133
Résumé et notions importantes	137
Activités	139
Module 4 Un cosmos en évolution	143
Présentation.....	145
Explications.....	148
G-4.1 Qu'est-ce que la cosmologie?	160
G-4.2 Petit historique des modèles d'univers	162
G-4.3 Un autre point de vue sur l'expansion de l'Univers	164
G-4.4 Le nouveau modèle standard	168
Résumé et notions importantes	173
Activités	175
Appendices.....	179
Notation scientifique et opérations algébriques	181
Changements d'unités et rudiments d'algèbre	182
Les graphiques	186
Symboles mathématiques.....	194
Corrigé	195
Module 0	195
Module 1	197
Module 2	201
Module 3	214
Module 4	218
Appendices.....	223

Introduction au cours

L'OBJET DU COURS

L'objet du cours *Astronomie : histoire et concepts* peut se définir en examinant chacun des éléments de son titre.

Astronomie : « science des astres, des corps célestes (y compris la Terre) et de la structure de l'univers* . »

Nous étudierons donc l'Univers. C'est un ambitieux programme qui nous obligera, dans le cadre d'un cours d'introduction de trois crédits, à n'aborder que superficiellement, voire éviter, certains volets pourtant importants de cette vaste discipline. Il nous amènera aussi à considérer les apports d'autres disciplines, car l'astronomie n'est pas isolée des autres sciences. Elle recourt largement aux outils et méthodes mathématiques, elle est concernée à l'occasion par des sciences comme la chimie, la géologie. Mais avant tout, elle s'inscrit dans le cadre plus large de la physique, dont elle s'alimente à même les principaux domaines : mécanique, optique, physique nucléaire, Relativité. C'est encore plus vrai pour l'astronomie moderne, que l'on désigne souvent sous l'appellation d'astrophysique. Un cours d'astronomie digne de ce nom doit nécessairement prendre en compte cette réalité. Le cours *Astronomie : histoire et concepts* le fera d'une façon très accessible, en ne supposant aucune connaissance antérieure en physique et en prenant le temps de présenter d'une façon simple et détaillée toutes les notions qui en relèvent.

Histoire : « étude scientifique d'une évolution, d'un passé. »

Adopter une approche historique pour introduire une discipline, c'est considérer que l'étude de l'évolution de la discipline est indispensable à l'étude de la discipline elle-même. C'est aussi affirmer qu'une science n'est pas un ensemble immuable de faits, de lois et de théories, mais bien le résultat d'une évolution faite d'essais et d'erreurs, d'avances et de reculs, évolution qui reflète aussi les contradictions, tensions et limitations des sociétés dans lesquelles s'inscrit l'activité scientifique.

Concept : « représentation mentale générale et abstraite d'un objet. »

Le contenu d'une science ne consiste pas non plus en des listes interminables d'observations et de mesures touchant les phénomènes naturels, bien que la confection de telles listes en soit un élément important, du moins en matière d'efforts et de temps que l'on doit y consacrer. C'est, bien plus, un mode de représentation de la réalité, qui permet d'unir dans un même cadre des ensembles de phénomènes à première vue fort disparates. C'est là le rôle des lois, théories et modèles scientifiques

* Cette définition ainsi que les suivantes sont tirées du *Petit Robert*.

qui mettent en jeu, en les reliant entre eux, des concepts préalablement définis. Les concepts forment donc la matière première de cette entreprise de rationalisation. Pour vous, ils seront les phares, les balises qui guideront votre démarche d'apprentissage. Il s'agira autant des concepts propres à l'astronomie que des concepts qu'elle a tirés de la physique. Un soin particulier sera porté à la distinction entre les concepts (les représentations mentales) et les aspects de la réalité qu'ils recouvrent.

Il convient d'indiquer qu'il ne s'agit pas ici d'un cours d'astronomie pratique ou d'observation qui serait certes très intéressant, mais qui constituerait un tout autre cours. Nous sommes cependant d'avis que toute personne intéressée par les observations astronomiques devrait aussi être préoccupée par la signification et l'interprétation de ces observations.

LE BUT DU COURS ET SES GRANDS OBJECTIFS

Le but

Par une étude de l'évolution historique d'un domaine particulier des sciences de la matière – l'astronomie – et un examen des concepts et théories qu'elle utilise, on effectuera un premier contact avec la spécificité de la démarche scientifique.

Les objectifs

Ce double but, l'astronomie comme objet d'étude en soi et comme moyen d'initiation à la démarche scientifique, renvoie à un certain nombre d'objectifs généraux.

1. Connaître les principales étapes de l'évolution de l'astronomie comme recueil d'observations d'abord, puis comme méthode d'explication et de prédiction des phénomènes célestes, depuis l'Antiquité jusqu'à la fin du 19^e siècle.
2. Connaître quelques-uns des développements qu'a connus l'astronomie depuis le début du siècle, développements qui lui valent d'être souvent désignée sous l'appellation d'astrophysique.
3. Énoncer les questions auxquelles tente de répondre la cosmologie et présenter les principes et le cadre théorique qui structurent ou limitent les réponses possibles.
4. Prendre conscience de la rupture – intervenue historiquement et nécessaire pédagogiquement – entre les anciens modes d'explication et les nouvelles théories scientifiques d'une part, et entre le sens commun et la démarche scientifique d'autre part.
5. Connaître les principaux éléments de la démarche propre à la science et reconnaître ce qui la distingue d'autres démarches se réclamant du même statut.
6. Reconnaître les concepts physiques de base utilisés en astronomie et effectuer, s'il y a lieu, une distinction entre ces derniers et les notions relevant du sens commun qui leur sont apparentées.

LE CONTENU DU COURS ET SON ORGANISATION

Le manuel

Une partie de l'ouvrage de Marc Séguin et Benoît Villeneuve, *Astronomie et astrophysique*, plus précisément le prologue, les chapitres 0 à 7, ainsi que 9 et 10 et une partie du chapitre 8, constitue un premier élément de contenu. Dans la documentation du cours, nous utiliserons le terme « manuel » lorsque nous ferons référence à ce contenu.

Le guide d'étude

Le guide d'étude, aussi appelé simplement « guide », comprend, outre la présente introduction, cinq modules qui correspondent respectivement au début du manuel (prologue et chapitre 0) et aux quatre premières parties. La majeure partie du chapitre 8 du manuel, de même que les chapitres 11 et suivants, n'ont pas été retenus pour ce cours.

Chaque module du guide correspond à deux ou trois chapitres du manuel; il débute par une *présentation* suivie des *objectifs généraux* et de la *liste des concepts* que nous avons jugé important d'expliquer dans le guide, qu'on les retrouve ou non dans le manuel. Suit la liste des *lectures* à faire dans le manuel ou dans le guide, dans l'ordre où nous vous suggérons de les lire; le tableau G-1 présente la même information, mais pour l'ensemble des modules. Dans certains modules, des *remarques préliminaires* fournissent des avertissements ou des informations utiles avant d'entreprendre votre lecture.

Viennent ensuite des *explications complémentaires* portant sur des concepts précis ou des sujets plus généraux; ce sont de courts textes précisant ou expliquant avec plus de détails des notions abordées dans le manuel. À la suite de celles-ci, on retrouve des *explications supplémentaires* qui présentent des sujets non traités dans le manuel ou élaborent davantage sur des notions qui y sont abordées. Ces explications sont indiquées par la présence, dans la marge du guide, d'une étoile, suivie la plupart du temps du numéro de la page ou de la section correspondant dans le manuel; ce numéro apparaît aussi dans la liste des concepts. Notez que l'emploi des qualificatifs « complémentaire » et « supplémentaire » ne signifie pas que ces sections sont facultatives.

On trouve ensuite une liste de *références ou de textes suggérés* dont la lecture, elle, est facultative, puis un *résumé* du contenu étudié. Chaque module se termine par des *activités*, comprenant la liste des questions et problèmes à faire dans le manuel, et des exercices conçus expressément pour le cours.

Le guide comporte aussi une série d'*appendices* qui présentent des notions préalables au cours, surtout mathématiques, et des activités s'y rapportant. Enfin, le guide se termine par le *corrigé* des exercices des modules et appendices.

Pour éviter toute confusion entre le manuel et le guide, nous utilisons un système de numérotation particulier :

- les numéros des pages du guide sont toujours précédés de la lettre G (exemple : page G-12);
- les numéros des figures, tableaux et équations du guide sont précédés de la lettre G, suivi du numéro du module (exemples : équation G-2.2, tableau G-4.1) ou de la lettre A, pour un appendice (exemple : figure G-A.3).

Le tableau G-2 illustre la structure d'un module du guide; la structure de l'ensemble du guide est clairement exposée par sa table des matières. Vous noterez qu'afin d'équilibrer la quantité de matière entre les deux examens du cours, le module 2 a été scindé en deux parties possédant chacune la structure et les éléments d'un module.

LA DÉMARCHE PÉDAGOGIQUE

Nous avons pensé vous proposer un mode de fonctionnement que vous pourriez adopter pour commencer. La démarche que nous vous suggérons est une démarche dynamique qui utilise au maximum les relations entre le manuel et le guide d'étude. Il sera donc important que vous gardiez toujours à portée de la main le manuel et au moins la partie du guide que vous êtes en train d'étudier. Les consignes concernant la démarche que nous vous suggérons apparaîtront sous forme de commentaires dans le guide d'étude, la première fois que vous rencontrerez chacune des rubriques. Ces consignes sont présentées de la façon suivante :

AVANT DE POURSUIVRE...

Nous vous suggérons d'aller immédiatement souligner...

À des fins de référence, nous avons schématisé cette démarche dans le tableau G-3. Il va sans dire qu'il ne s'agit là que d'une suggestion en vue de permettre une utilisation efficace du matériel pédagogique du cours. Après l'expérience des premières semaines, vous jugerez peut-être avantageux de modifier la démarche proposée afin de l'adapter à vos besoins ou à votre style d'apprentissage. C'est à vous de découvrir ce qui vous convient le mieux.

Nous avons aussi établi un échéancier qui devrait vous aider dans la planification de vos activités et de vos travaux notés. Il apparaît au tableau G-4, c'est la feuille de route.

TABLEAU G-1
Ordre de lecture suggéré

MODULE 0 (prologue et chapitre 0)

1. Prologue (p. 2-11)
2. Annexes et appendices (voir tableau G-0.1)
3. Chapitre 0 (p. 13-34)
4. Compléments :
 - 0.1 *L'altitude de l'étoile Polaire* (p. 38)
 - 0.2 *Les étoiles circumpolaires* (p. 38-39)
 - 0.3 *L'altitude du Soleil* (p. 39)
 - 0.6 *La prédiction des éclipses de Soleil* (p. 44)
5. Explications supplémentaires :
 - G-0.1 *Petite chronologie de l'Univers et de la Terre* (p. G-34)

MODULE 1 (chapitres 1 et 2)

1. Explications supplémentaires :
 - G-1.1 *L'astronomie avant l'invention de l'écriture* (p. G-52)
2. Introduction de la première partie et section 1.1 (p. 52-56)
3. Sujet connexe : *Une critique de l'astrologie* (p. 69-71)
4. Sections 1.2 et 1.3 (p. 56-59)
5. Introduction du chapitre 2, sections 2.1, 2.2 et 2.3 (p. 76-80)
6. Section 1.4 (p. 59-62)
7. Section 2.4 (p. 80-81)
8. Explications supplémentaires :
 - G-1.2 *L'astronomie au Moyen Âge* (p. G-53)
9. Sections 1.5 à 1.7 (p. 62-68)
10. Sections 2.5 à 2.10 (p. 81-93)
11. Compléments :
 - 1.1 *Période sidérale et période synodique* (p. 72-73)
 - 2.3 *La relation intensité-luminosité-distance* (p. 101)

(suite →)

TABLEAU G-1 (SUITE)

Ordre de lecture suggéré

MODULE 2 – PARTIE I (chapitre 3)

1. Introduction de la deuxième partie et sections 3.1 et 3.2 (p. 106-112)
2. Explications supplémentaires
 - G-2.1 *Cinématique, dynamique et vecteurs* (p. G-71 à G-78)
3. Sections 3.3 à 3.6 (p. 112-119)
4. Compléments
 - 3.2 *De la troisième loi de Kepler à la force en $1/r^2$* (p. 131-132)
 - 3.3 *La chute de la Lune* (p. 132-133)
 - 3.4 *La loi de la gravitation universelle* (p. 133)
 - 3.5 *La loi de Kepler généralisée* (p. 133-134)
5. Explications supplémentaires
 - G-2.2 *La loi de Bode* (p. G-78)
 - G-2.3 *Lois et théories* (p. G-78 à G-80)
6. Sujet connexe : *La nature de la science et de la technologie* (p. 205-208)

MODULE 2 – PARTIE II (chapitres 4 et 5)

1. Sections 5.1 à 5.5 (p. 179-191) et 4.1 à 4.2 (p.143-147)
2. Sujet connexe : *L'évolution du télescope* (p. 192-197)
3. Complément 5.1 *Le grossissement d'un télescope* (p. 209-210)
4. Section 3.7 (p. 119-123)
5. Explications supplémentaires
 - G-2.4 *L'énergie* (p. G-103 à G-105)
6. Sections 5.6 à 5.8 (p.198-204)
7. Complément 4.1 *Les magnitudes*
8. Explications supplémentaires
 - G-2.5 *Luminosité, intensité et magnitudes* (p. G-105 et G-106)
9. Sections 4.2 à 4.8 (p. 144-165)
10. Compléments
 - 4.2 *Le rapport I_B/I_V et la température des étoiles* (p. 170-172)
 - 4.4 *L'effet Doppler classique* (p. 173-174)
11. Explications supplémentaires
 - G-2.6 *Mouvement propre et vitesse effective des étoiles* (p. G-106 et G-107)

(suite →)

TABLEAU G-1 (SUITE)
Ordre de lecture suggéré

MODULE 3 (chapitres 6 et 7; chapitre 8, section 8.5)

1. Introduction de la troisième partie et chapitre 6 (p. 216-250)
2. Section 9.7 (p. 384-387)
3. Chapitre 7 (p. 262-300)
4. Explications supplémentaires
G-3.1 *La découverte du premier trou noir* (p. G-131 à G-134)
5. Section 8.5 (p.342-344)
6. Sujet connexe : *La vie du Soleil* (p. 302-303)

MODULE 4 (chapitre 8, sections 8.7 et 8.8; chapitres 9 et 10)

1. Introduction de la quatrième partie (p. 368-369).
 2. Explications supplémentaires
G-4.1 *Qu'est-ce que la cosmologie?* (p. G-158 à G-160)
G-4.2 *Petit historique des modèles d'univers* (p. G-160 à G-162)
 3. Sections 9.1 à 9.2 (p.370-373), 8.6 (p. 345-347) et 9.3 à 9.4 (p. 373-379)
 4. Explications supplémentaires
G-4.3 *Un autre point de vue sur l'expansion* (p. G-162 à G-165)
 5. Sections 9.5 à 9.6 (p.379-383) et 10.1 à 10.4 (p. 395-415)
 6. Explications supplémentaires
G-4.4 *Le nouveau modèle standard* (p. G-166 à G-169)
 7. Compléments
10.4 *Le trajet des photons du rayonnement de fond cosmologique dans le modèle d'Einstein-de Sitter* (p. 418-420)
10.5 *Comparaison des distances et des intensités des objets lointains dans le modèle d'Einstein-de Sitter et dans le nouveau modèle standard* (p. 420-421)
 8. Sujet connexe : *La victoire du Big-Bang* (p. 390-392)
 9. Sections 8.7 à 8.8 (p. 347-353); fin de la section 9.7 à la section 9.8 (p. 387-389)
-

TABLEAU G-2
Structure d'un module type

PRÉSENTATION

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)
concept à souligner dans le manuel	XX [Y]	concept à souligner dans le manuel	X.Y
concept absent du manuel	G-X.Y	concept absent du manuel	XX

AVANT DE POURSUIVRE... (REMARQUES PRÉLIMINAIRES)

LECTURES

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

1.1 TITRE DE LA PREMIÈRE SECTION DU MODULE 1 (P. XX-XX)

Explication globale portant sur certains concepts de la section 1.1.

1.2 TITRE DE LA DEUXIÈME SECTION DU MODULE 1 (P. XX-YY)

Regroupement d'explications distinctes sur des concepts de la section 1.2.

☆24 Explication relative au **concept** apparaissant à la page 24 (du manuel).

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES

☆ G-1.1 PREMIÈRE EXPLICATION SUPPLÉMENTAIRE DU MODULE 1

☆ G-1.2 DEUXIÈME EXPLICATION SUPPLÉMENTAIRE DU MODULE 1

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

ACTIVITÉS (QUESTIONS, PROBLÈMES ET EXERCICES)

Note.– L'étoile dans la marge signifie qu'il y a un renvoi à cette section ou ce passage dans le tableau *Concepts et sujets traités* au début du module.

TABLEAU G-3
Démarche proposée pour l'étude d'un module.

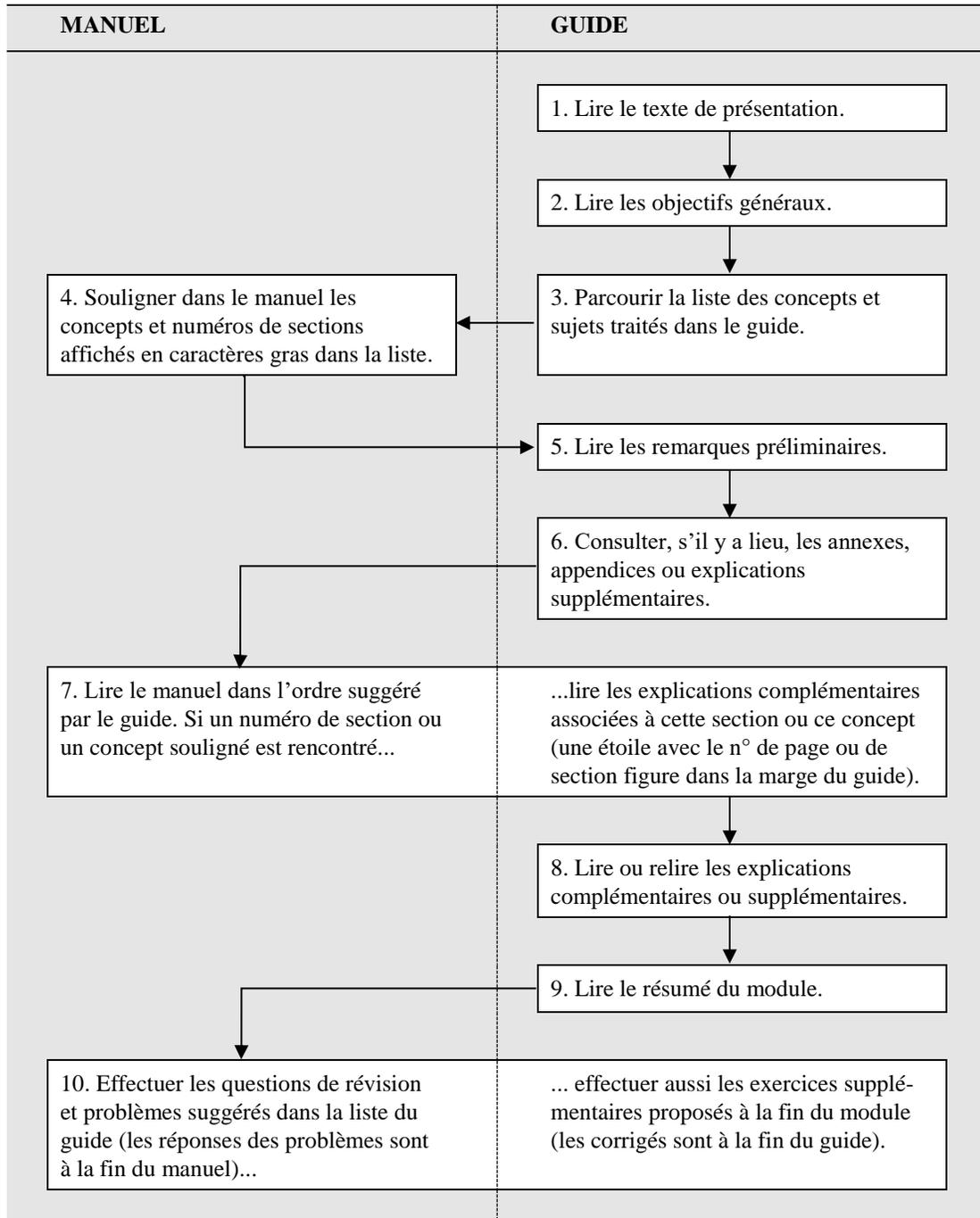


TABLEAU G-4
Feuille de route

semaines	modules	encadrement	travaux notés	dates importantes	
1	module 0	contact de démarrage		_____	
2		disponibilité		_____	
3	module 1			_____	
4				_____	
5	module 2 partie 1			_____	
6				_____	
7	module 2 partie 2			examen 1	_____
8		rétroaction		_____	
9	module 3	disponibilité		_____	
10				_____	
11				_____	
12	module 4				_____
13				activité de synthèse	_____
14					_____
15			examen 2	_____	
		rétroaction			

L'ENCADREMENT

Ce cours est conçu en vue d'une démarche d'étude autonome, selon un rythme qui vous convient. À cette fin, la documentation que vous avez reçue comprend toutes les informations et consignes nécessaires pour faire le cours.

Cependant, pour vous soutenir dans votre démarche, nous vous offrons une formule d'encadrement individuel dont vous bénéficiez pendant toute la durée du cours. Cet encadrement est assuré par une personne tutrice, détenant une formation universitaire en physique et maîtrisant bien le contenu du cours, qui travaille sous la direction pédagogique du professeur responsable.

La formule d'encadrement comporte notamment (voir le tableau G-4) :

- un contact de démarrage, par courriel ou par téléphone, sur l'initiative de la personne tutrice, prévu durant la première ou la deuxième semaine de cours;
- la possibilité de communiquer avec elle pour toute question relative aux aspects administratifs, à la matière, aux activités d'autoapprentissage et aux travaux notés;
- une rétroaction écrite, accompagnée si nécessaire d'un contact personnalisé, sur les travaux notés que vous avez fait parvenir à la personne tutrice aux moments indiqués sur la feuille de route et qu'elle a corrigés;

N'hésitez pas à entrer en contact avec elle lorsque vous en ressentez le besoin. Elle est là pour vous soutenir et répondre à vos questions; vous ne la dérangez pas.

Pour communiquer avec elle, vous pouvez utiliser le téléphone, le courrier postal et le courrier électronique. Vous trouverez ses coordonnées dans la « lettre de tutorat » que vous avez reçue avec votre documentation.

Finalement, nous vous conseillons de commencer vos apprentissages même si le contact de démarrage n'a pas encore eu lieu. Il peut en effet s'écouler un certain délai entre la réception de vos documents de cours et la date officielle de début de votre cours indiquée dans la « lettre de tutorat ».

L'ÉVALUATION ET LA NOTATION

L'évaluation porte sur trois travaux notés :

- deux examens à domicile portant respectivement sur les modules 0, 1 et 2 (première partie), et sur les modules 2 (deuxième partie), 3 et 4;
- une activité de synthèse, portant sur l'ensemble du cours.

Les notes seront réparties de la manière suivante :

Premier examen	35 %
Deuxième examen	40 %
Activité de synthèse	25 %

Les deux examens comporteront des questions ouvertes et à réponses suggérées comme celles que l'on retrouve à la fin des modules. Les questionnaires vous seront expédiés par courrier électronique, ou par la poste si vous le désirez, au milieu et à la fin du cours (voir le tableau G-4). Vous disposerez d'une semaine pour retourner vos questionnaires remplis. À cette fin, chaque questionnaire mentionnera la date limite à laquelle il devra être retourné, le tampon de la poste ou la date d'envoi du courriel avec questionnaire joint faisant foi du respect de cette exigence.

Dans le cas des questions ouvertes, ce ne sera pas la réponse elle-même qui sera évaluée, mais bien la démarche suivie pour y arriver, telle que vous l'exposerez dans votre solution. En fait, aucun point ne sera attribué si seulement la réponse, même correcte, apparaît. Il importera donc que vos solutions indiquent très clairement toutes les étapes de votre raisonnement. Les solutions des exercices, dans la section « Corrigé » à la fin du guide, constituent des exemples de solutions acceptables.

L'activité de synthèse, que vous recevrez trois semaines avant la fin cours, servira à vérifier votre capacité à faire le lien entre des éléments vus dans divers modules du cours. Ce travail noté devra être retourné au plus tard à la date de fin du cours indiquée dans la « lettre de tutorat ».

Tous ces travaux sont individuels : le travail d'équipe n'est pas autorisé dans ce cours.

CONNAISSANCES NÉCESSAIRES ET MATÉRIEL EXIGÉ

Toute étude, qui se veut le moins sérieuse, d'un domaine comme l'astronomie demande de posséder un certain nombre d'« outils » intellectuels ou matériels. Le cours a toutefois été conçu de façon à vous permettre d'effectuer un bon bout de chemin en n'utilisant que des outils très légers.

Les outils intellectuels requis pour le cours sont :

- la notation scientifique;
- quelques rudiments d'algèbre;
- des habiletés reliées à l'utilisation des graphiques;
- la connaissance de certains symboles (grecs ou mathématiques) couramment utilisés en physique et en astronomie.

Afin de vous permettre de vérifier si vous possédez ces outils ou de rafraîchir vos souvenirs, nous avons ajouté, à la fin du guide, quatre appendices correspondant aux quatre outils mentionnés ci-dessus. Ils indiquent le genre d'opérations que ces outils vous permettront d'effectuer et fournissent les explications nécessaires pour vous aider à les maîtriser. Vous y trouverez même des exercices permettant de tester vos habiletés.

Vous pouvez entreprendre immédiatement la lecture de ces appendices, ou attendre le moment où l'on vous indiquera que ces notions sont nécessaires, dans les remarques préliminaires en début de module ou dans des suggestions associées à des exercices.

Par ailleurs, les outils matériels que vous devez posséder sont :

- une règle (métrique),
- un rapporteur d'angle,
- une calculatrice.

Dans ce dernier cas, l'idéal – surtout si vous avez l'intention de suivre d'autres cours de science – consiste en une calculatrice dite « scientifique » qui affiche, entre autres, les fonctions trigonométriques, logarithmiques et exponentielles. On en trouve de nombreux modèles sur le marché, à partir d'une vingtaine de dollars.

Une calculatrice standard, comportant les quatre opérations et la racine carrée ($\sqrt{\quad}$), est toutefois suffisante pour le cours, bien qu'elle vous demandera d'effectuer un peu plus d'opérations mentales.

Module 0

LA TERRE, UN GRAIN DE POUSSIÈRE... EN MOUVEMENT

Manuel

Prologue *Le grand tour*

Chapitre 0 *L'astronomie à l'œil nu*

Cette introduction au cours consiste en une première rencontre avec l'immensité de l'Univers et en une prise de contact avec la réalité des observations astronomiques. Elle vous permettra d'apprécier les dimensions de l'Univers, d'avoir un aperçu général des différents objets qu'on y retrouve et de vous situer par rapport au temps et aux distances en jeu. Ce module introductif sera aussi pour vous l'occasion de vous familiariser avec la façon dont on décrit les positions des objets célestes et de découvrir l'influence des divers mouvements de la Terre sur les observations effectuées à partir d'elle. Il vous amènera à mieux percevoir le lien qu'il est possible d'établir entre les différents points de vue à partir desquels les mouvements célestes peuvent être observés.

MODULE 0

PRÉSENTATION

« Et pourtant, elle bouge... »

En effet, notre planète Terre est un observatoire toujours en mouvement. Ces paroles, attribuées sans doute erronément à Galilée qui les aurait murmurées à la fin de son procès pour hérésie, sont lourdes de signification. Il est difficile de croire aujourd'hui que cette idée ait pu rencontrer une telle opposition avant d'être finalement acceptée, à la fin du 17^e siècle. Mais soyons honnêtes : avez-vous vraiment l'impression que vous tournez actuellement à plus de 1100 km/h sur une sphère qui elle-même fonce à travers le cosmos à plus de 100 000 km/h ?

L'hypothèse de la Terre tournant autour du Soleil (et sur elle-même) a permis de régler nombre de problèmes auxquels l'humanité s'était butée durant des siècles. Elle nous cause toutefois une difficulté énorme : nous sommes sur la Terre ! Nous observons donc l'Univers à partir d'une plate-forme qui tourne et se déplace, ce qui complique énormément l'interprétation des positions observées. En plus de cette difficulté primordiale, d'autres particularités du mouvement de la Terre enveniment encore la situation : l'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport à l'axe de son orbite et son orientation change lentement; la Terre ne tourne pas sur un cercle parfait autour du Soleil; de plus, sa vitesse n'est pas constante. Les mêmes remarques valent pour le mouvement de la Lune autour de la Terre. Toute étude de l'Univers doit donc commencer par cette prise de conscience : une bonne partie des mouvements que nous observons dans le ciel provient des mouvements de la Terre elle-même.

Pour réfléchir à cette question, rien de mieux que de sortir par une nuit claire, hors de la ville si possible, et d'observer le ciel. Faites-le au moins une fois pendant la durée du cours. Nul livre d'astronomie ne peut procurer une telle sensation ! Laissez-vous hypnotiser par la splendeur du spectacle, mais pas trop... essayez de remarquer la position des étoiles les plus connues. La Grande Ourse, par exemple, permet de localiser facilement l'étoile Polaire (voir figure G-0.1). En effet, la ligne prolongeant la droite qui joint les deux étoiles de l'extrémité opposée à la poignée de la « casserole » (Merak et Dubhe) passe très près de l'étoile Polaire, facile à reconnaître car elle est la plus brillante dans ce coin du ciel. Observez le changement de position de ces étoiles à quelques heures d'intervalle. Essayez de distinguer des planètes; elles sont plus brillantes et scintillent beaucoup moins que les étoiles. Prenez le temps qu'il faut.

À la fin du cours, tout ce que vous aurez vu cette nuit-là aura pris un sens nouveau. Bonne observation! Et si un jour l'observation à l'œil nu ne vous suffit plus, sachez qu'il existe de nombreux clubs d'astronomie amateurs; il risque fort d'y en avoir un dans votre région auquel vous pourriez vous joindre.

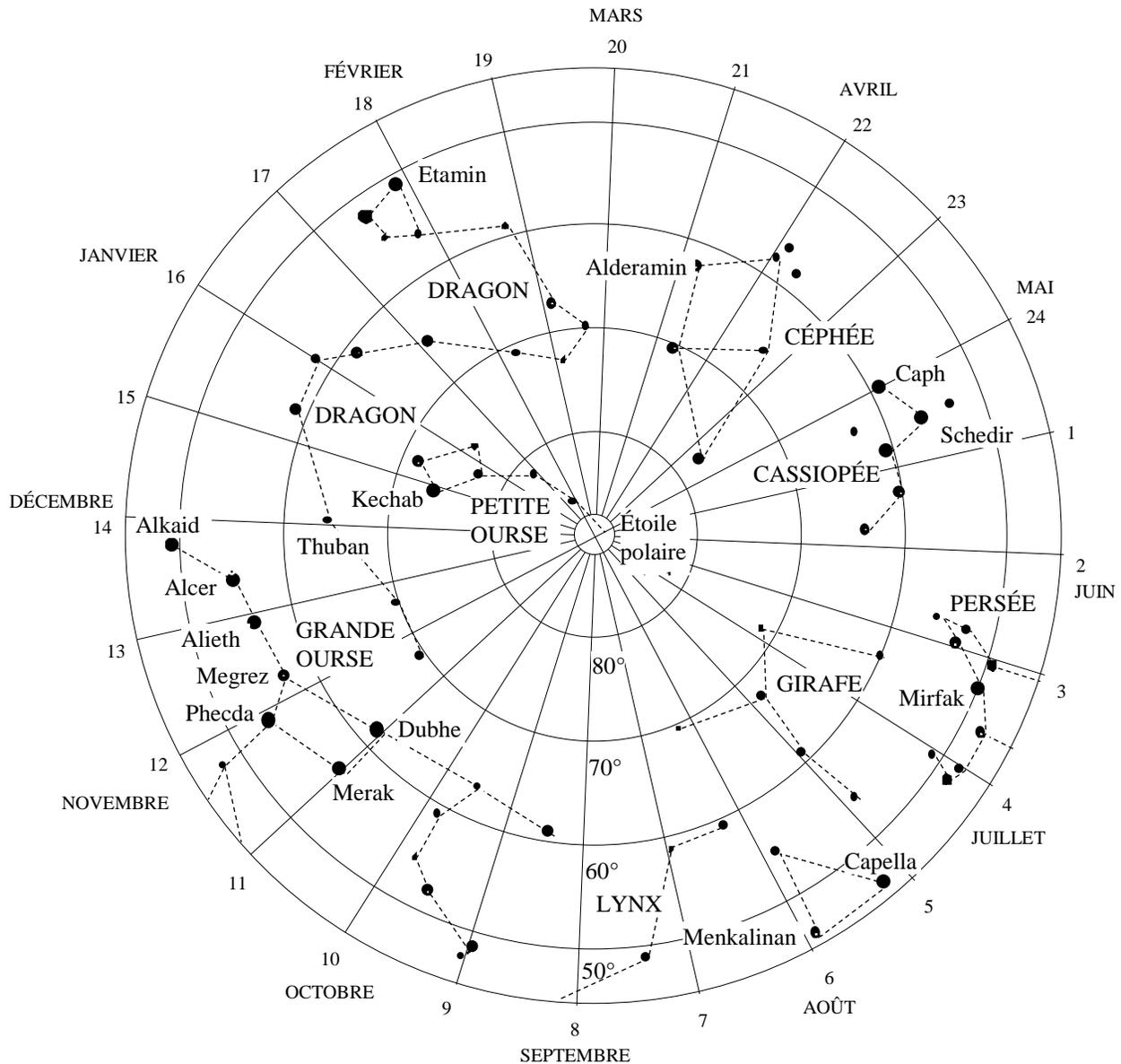


FIGURE G-0.1

Principales étoiles visibles en direction du Nord. Les chiffres autour du cercle indiquent l'ascension droite; la déclinaison est affichée le long du rayon vertical. La position approximative des étoiles à 21 h (heure normale) en un mois donné est obtenue en plaçant le nom du mois au bas de la carte.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

1. Se familiariser avec l'immensité de l'Univers et apprécier les échelles de distances en jeu dans différents systèmes.
2. Connaître la chronologie cosmique et les échelles de temps associées aux différents événements survenus dans l'Univers.
3. Acquérir ou réviser les outils mathématiques nécessaires pour le cours.
4. Reconnaître les phénomènes et les objets célestes visibles à l'œil nu.
5. Décrire la position d'un objet à l'aide d'un ou de plusieurs systèmes de coordonnées (ou repères).
6. Faire le lien entre les différentes composantes des mouvements de la Terre et de la Lune et les phénomènes suivants : la durée du jour et de l'année; les saisons et leur durée; les phases et les positions de la Lune; les éclipses.
7. Connaître les fondements historiques de l'astronomie.

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité^a	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y)^b Guide : section (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : section (G-X.Y)
position	0.2	obliquité de l'écliptique	20
espace	0.2	saisons	23 [2]
définition opérationnelle	0.2	temps	0.6
étalon	0.2	jour solaire	27 [27]
système de coordonnées	0.2	force	27
origine	0.2	attraction gravitationnelle	27
système de coordonnées angulaires	17	révolution de la Lune	27 [-22]
repère	17 [3]	centre de masse	27
altitude	17 [-6]^c	réfraction	0.7
azimut	17	ombre	28 [-1]
zénith	17	pénombre	29 [1]
système de coordonnées équatoriales	17	année sidérale	32 [-25]
déclinaison	17 [17]	année tropique	32 [-18]
ascension droite	41 [17]	précession des équinoxes	31 [15]
point vernal	40 [7]	chronologie de l'Univers et de la Terre	G-0.1
écliptique	20 [-2]		

- a. Les concepts en gras sont ceux que l'on retrouve non seulement dans le guide, mais aussi dans le manuel (à la ligne indiquée); l'ordre d'apparition des concepts est celui du guide et non du manuel.
- b. Les titres des sections et les équations ont été retenus dans le décompte des lignes; les numéros de page ou de section indiqués se retrouvent dans la marge de gauche du guide, précédés d'une étoile.
- c. Une valeur négative signifie que l'on compte à partir de la dernière ligne de la page.

AVANT DE POURSUIVRE

Nous vous invitons maintenant à lire le prologue du manuel. Il s'agit d'une présentation générale des objets et des phénomènes dont le cours traitera; il est donc normal que certains concepts vous apparaissent pour l'instant un peu nébuleux. Ces concepts seront vus plus en profondeur dans les différents chapitres du cours. Après avoir consulté les annexes suggérées, vous pourrez lire le chapitre 0 du manuel, ainsi que les compléments du chapitre retenus pour le cours.

Vous pouvez attendre d'avoir terminé le chapitre avant d'entreprendre la lecture, dans le guide, des explications (complémentaires ou supplémentaires) qui s'y rapportent. Vous pouvez aussi adopter le mode suggéré dans la présentation du cours (voir le tableau G-3), et consulter la section appropriée du guide, chaque fois que vous rencontrez, dans le manuel, une information que vous auriez soulignée au préalable. Si vous optez pour cette possibilité, n'oubliez pas de revenir au guide pour y lire les explications supplémentaires.

LECTURES

1. Prologue (p. 2-11)
2. Si vous n'êtes pas familier avec les mathématiques, consultez maintenant les annexes et appendices placées à la fin du manuel et du guide (tableau G-0.1).
3. Chapitre 0 (p. 13-34)
4. Compléments :
 - 0.1 *L'altitude de l'étoile Polaire* (p. 38)
 - 0.2 *Les étoiles circumpolaires* (p. 38-39)
 - 0.3 *L'altitude du Soleil* (p. 39)
 - 0.6 *La prédiction des éclipses de Soleil* (p. 44)
5. Explications supplémentaires :
 - G-0.1 *Petite chronologie de l'Univers et de la Terre* (p. G-34)

TABLEAU G-0.1

Annexes et notions mathématiques préalables

Notions mathématiques	Manuel	Guide
Notation scientifique	Annexe I, p. 585	Appendice G-1
Unités, facteur de conversion et rudiments d'algèbre	Annexe II, p. 585-588	Appendice G-2
Longitude et latitude	Annexe IV, p. 589	—
Géométrie élémentaire	Annexe V, p. 589-590	—
Les graphiques	—	Appendice G-3
Symboles grecs et mathématiques	Annexe III, p. 588	Appendice G-4

MODULE 0

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

☆ 0.2 LA ROTATION DE LA SPHÈRE CÉLESTE (P. 16-20)

La **position** d'un objet, comme le Soleil ou une étoile, fait intervenir le concept d'**espace**. Ce concept échappe à toute définition formelle : de façon rigoureuse, on ne peut qu'en postuler l'existence, c'est-à-dire l'accepter sans démonstration. On en possède toutefois une intuition naturelle qui suffit dans la plupart des situations. Malgré tout, on peut donner une **définition opérationnelle** au concept d'espace, c'est-à-dire énoncer une méthode permettant d'associer une valeur numérique en fonction d'un **étalon** de longueur (le mètre, pour les distances) et d'une procédure de mesure faisant appel à la notion de **système de coordonnées**. De façon générale, pour déterminer la position d'un objet de façon univoque, il faut faire appel à deux ou trois nombres. Ces nombres dépendent non seulement de l'étalon, dont les unités sont le mètre, le pied, le mille..., mais aussi du système de coordonnées choisi.

Prenons l'exemple d'un avion qui a dû effectuer un atterrissage forcé près du lac Damasse, au nord-est de la ville de Saguenay (figure G-0.2) et dont on doit secourir les passagers. Pour les retrouver, les équipes de secours doivent connaître ou bien la longitude et la latitude du point d'atterrissage (ici, environ $49,8^\circ$ de latitude Nord et $70,25^\circ$ de longitude Ouest), ou encore la distance entre l'avion et son point de départ, ainsi que la direction, par rapport au nord par exemple, vers laquelle il s'est dirigé (ici, environ 180 km, 19° à l'est du nord). Longitudes et latitudes forment un système de coordonnées, dont le point de référence (l'**origine**) est l'équateur pour les latitudes et le méridien de Greenwich (Angleterre) pour les longitudes (voir annexe IV du manuel). Le choix d'une origine différente, l'aéroport dans cet exemple, et d'un axe par rapport auquel on mesure les orientations, ici l'axe sud-nord, définit un autre système de coordonnées, aussi valable que le premier.

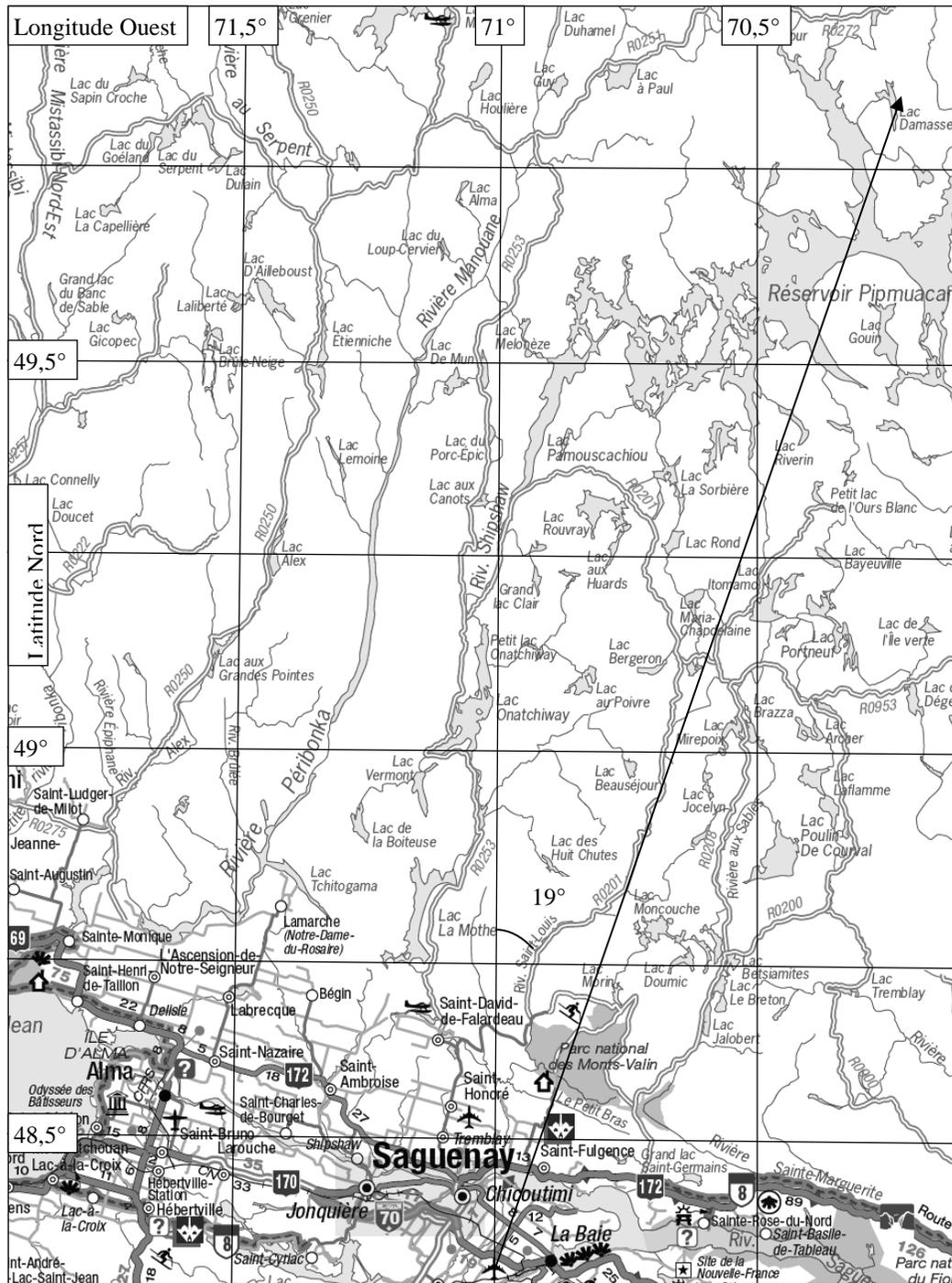


FIGURE G-0.2

Système de coordonnées associé à la carte géographique de la région située au nord de la ville de Saguenay, centré sur l'aéroport de Bagotville. La position indiquée est celle du lac Damasse. L'échelle de la carte est 1 : 1 000 000 (1 cm correspond à 10 km).

- ☆ 17 À la figure 0.7a, lorsqu'on trace un horizon d'observation à l'endroit où se trouve un observateur, on dit qu'on décrit les positions à partir du **repère** de cet observateur. On définit alors un **système de coordonnées locales** (figure G-0.3), c'est-à-dire un ensemble d'axes fixes par rapport à ce repère, donc entraînés avec lui si le repère se déplace. Ces axes servent de référence pour la mesure des positions; ici, ces positions sont des angles et on parle d'un **système de coordonnées angulaires**. Dans le repère d'un observateur situé sur Terre, la position angulaire d'une étoile varie continuellement avec la rotation de la Terre. Cette position est spécifiée à l'aide de deux angles : l'**altitude**, soit l'angle entre la ligne de visée et l'horizontale, et l'**azimut**, qui est l'angle entre la projection de la ligne de visée sur l'horizontale et l'axe sud-nord. Par ailleurs, la droite perpendiculaire à cet horizon d'observation définit un point dans la sphère céleste appelé le **zénith**; c'est le point situé directement au-dessus de la tête d'un observateur.

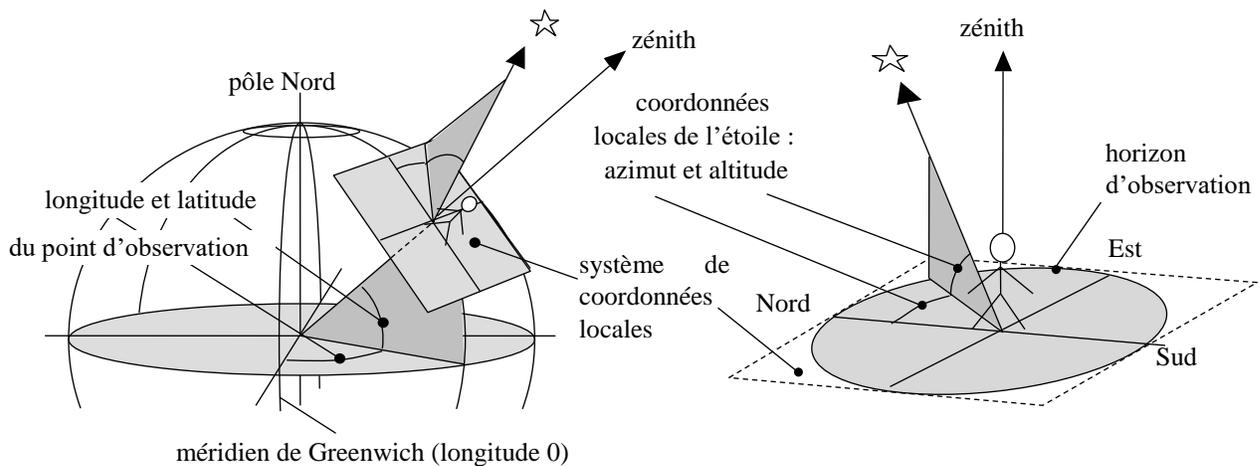


FIGURE G-0.3

Système de coordonnées locales d'un observateur situé à 45° de latitude Nord.

- ☆ 17 Bien que le choix d'un système de coordonnées (et de son origine) soit arbitraire, la communication d'informations est grandement facilitée si tout le monde utilise le même système pour une classe donnée de mesures. Ainsi, les astronomes se sont entendus pour utiliser non pas un système de coordonnées locales, qui serait différent pour chaque lieu d'observation, mais le **système de coordonnées équatoriales**, qui est aussi un système de coordonnées angulaires. Ce système, illustré à la figure G-0.4, a lui aussi recours à deux angles pour spécifier la position des objets sur la sphère céleste. Le premier de ces angles est la **déclinaison** (δ), exprimée en degrés; cet angle est aussi illustré à la figure 0.5 (du manuel).

- ☆ 40 Le deuxième angle associé au système de coordonnées équatoriales est l'**ascension droite** (α), soit l'angle entre le point où le méridien céleste de l'étoile coupe l'équateur, et un point de référence (ou origine du système) appelé **point vernal**, qui est la position du Soleil à l'équinoxe du printemps (figures 0.8, 0.28 et G-0.4). Cet angle est généralement exprimé en heures, minutes et secondes, 24 h correspondant à 360° . Pour un observateur situé au pôle Nord, les deux systèmes de coordonnées coïncident en partie, l'altitude d'une étoile étant alors égale à sa déclinaison.

Notez qu'il n'est question ici que des positions *apparentes* des étoiles; la spécification de leur position réelle nécessite la connaissance d'un troisième nombre, soit la distance entre ces étoiles et la Terre. Nous verrons d'ailleurs plus loin (module 1) comment cette distance peut être déterminée.

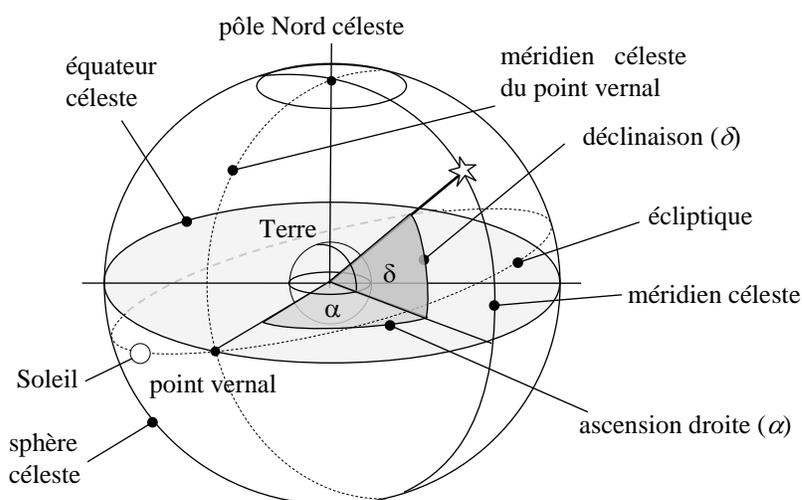


FIGURE G-0.4
Système de coordonnées célestes équatoriales.

0.3 LE MOUVEMENT ANNUEL DU SOLEIL (P. 20)

- ☆ 20 L'**écliptique** est un concept qui peut avoir deux définitions. Premièrement, tel qu'on l'explique dans le manuel, il désigne la trajectoire annuelle apparente du Soleil sur la sphère céleste (figure G-0.4). Deuxièmement, l'écliptique correspond aussi au plan orbital de la Terre autour du Soleil, comme l'illustre la figure 0.11. Sur cette figure, ainsi que dans le manuel, on vous indique que l'angle d'inclinaison de l'écliptique est de 23° . De façon plus précise, cet angle d'inclinaison, parfois appelé **obliquité de l'écliptique**, varie légèrement sur une période de 40 000 ans entre $21^\circ 55'$ et $24^\circ 18'$. Soulignons que si cet angle d'inclinaison avait été beaucoup plus grand, supérieur à 45° par exemple, les variations de température entre les saisons, dont vous verrez le mécanisme à la section suivante, auraient été extrêmes.

0.4 LES SAISONS (P. 21-24)

- ☆ 23 On peut aussi expliquer le phénomène des **saisons** en considérant non pas la grandeur de la surface recevant une quantité de lumière donnée (figure 0.10b), mais plutôt la quantité de lumière* reçue par une *même* surface au sol, disons un mètre carré, autour de midi, en décembre et juin respectivement, sous nos latitudes. Bien que la variation annuelle de la distance Terre-Soleil contribue à augmenter d'environ 7 % la quantité de lumière reçue par la Terre en décembre par rapport à juin, cet effet est plus que compensé par le changement de l'inclinaison de la surface par rapport aux rayons du Soleil (figure G-0.5). Ces deux effets combinés font que la quantité de lumière reçue autour de midi en juin est ainsi plus du double de celle qui est reçue au même moment en décembre. Elle est en fait supérieure à toute heure de la journée, ce à quoi il faut ajouter le fait que le Soleil est présent à peu près deux fois plus longtemps au cours de la journée.

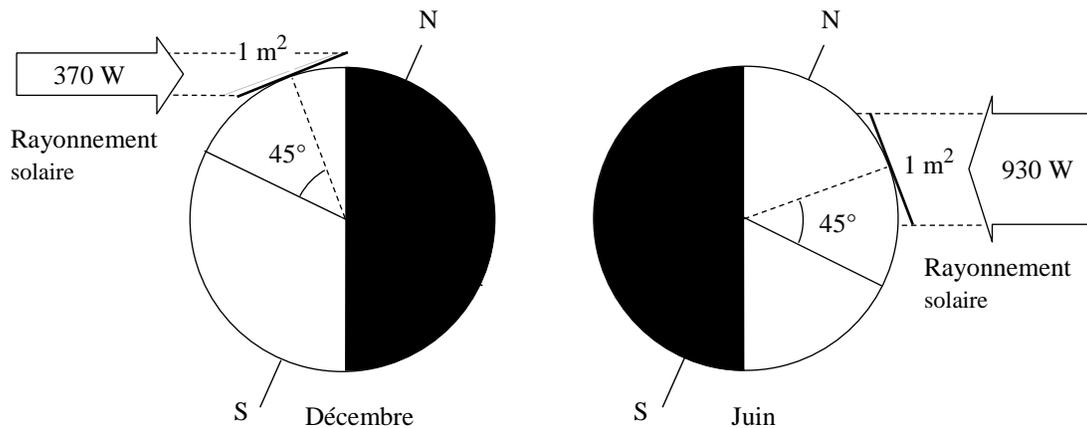


FIGURE G-0.5

Variation saisonnière de la puissance de radiation reçue à midi par une surface de 1 m², à 45° de latitude. On suppose une intensité incidente de 1000 W/m².

Il faut toutefois ajouter que d'autres phénomènes reliés surtout à la circulation des courants chauds ou froids des océans, de même qu'aux déplacements de masses d'air chaud ou froid dans l'atmosphère, viennent modifier les températures, de sorte que des régions recevant la même quantité de lumière solaire peuvent connaître des températures très différentes à la même époque de l'année. Ainsi, le climat de l'Écosse est beaucoup plus doux que celui de la ville de Schefferville dans le nord du Québec, pourtant située à une latitude comparable. La discussion précédente s'applique davantage aux régions non côtières, qui connaissent des variations de température très importantes d'une saison à l'autre.

* On verra, au module 2, les concepts d'intensité et de puissance permettant de mieux définir cette notion.

0.5 LES PHASES DE LA LUNE (P. 24-26)

Le schéma de la figure 0.14, lié à l'exemple 0.3, simplifie le phénomène : la situation illustrée, et les heures mentionnées, ne sont valables que si le jour et la nuit sont à peu près d'égale durée. C'est le cas toute l'année pour un observateur situé près de l'équateur (ce qui correspond au schéma), mais seulement à l'équinoxe (autour du 21 mars et du 21 septembre) pour les autres. Les heures fournies dans les réponses aux problèmes P4 à P7 du manuel ne sont donc valides que dans ces conditions, sauf s'il est question de l'heure où l'astre culmine; celle-ci est à peu près la même à tous les jours (aux environs de midi, pour le Soleil) quelle que soit la latitude.

Par contre, le nombre d'heures s'écoulant entre le lever (ou le coucher) de la Lune et celui du Soleil est à peu près le même, quelles que soient la latitude et l'époque de l'année. Ainsi, toujours d'après la figure 0.14, on peut conclure que la Lune, dans la position indiquée par rapport au Soleil (dernier croissant), se couche et se lève environ trois heures avant que le Soleil en fasse autant; le délai exact varie notamment selon la différence d'altitude (ou de déclinaison) de la Lune par rapport à l'écliptique, qui peut atteindre 5° . De manière équivalente, on peut dire que la Lune précède alors le Soleil de trois heures environ ($1/8$ révolution).

À l'équateur, où le Soleil se lève à 6 h toute l'année; la Lune à son dernier croissant se lèvera donc à $6 \text{ h} - 3 \text{ h} = 3 \text{ h}$. Sous nos latitudes, aux environs du solstice d'été par exemple, le Soleil se lève peu après 4 h pour se coucher peu avant 20 h (une heure de plus à l'heure avancée); la Lune (au dernier croissant toujours) se lèvera donc vers 1 h pour se coucher vers 17 h : elle demeure visible durant environ 16 heures, comme le Soleil.

☆ 0.6 LA DURÉE DU JOUR ET DU MOIS (P. 26-27)

Tout comme le concept d'espace, le concept de **temps** échappe lui aussi à toute définition formelle, mais on peut malgré tout lui associer une définition opérationnelle. Pour ce faire, il faut définir une unité de temps, comme le jour ou la seconde, et une procédure permettant de comparer tout intervalle de temps avec cet étalon, qui doit être suffisamment précis pour répondre à nos besoins. C'est ainsi qu'une bonne partie des efforts des astronomes a consisté à déterminer un étalon de temps le plus précis possible, d'où l'importance de connaître la durée exacte du jour, du mois ou de l'année. Encore de nos jours, la recherche de méthodes permettant d'augmenter la précision avec laquelle on peut définir l'étalon de temps et le comparer avec des intervalles de temps que l'on désire mesurer constitue un champ de recherche très actif.

☆ 27 La période de 24 heures, mentionnée dans le manuel et que nous connaissons tous, est en fait la longueur du **jour solaire moyen**. En effet, l'intervalle entre deux passages du Soleil au même méridien local, plein sud par exemple, varie tout au long de l'année autour de cette valeur moyenne; l'écart maximum est d'environ ± 15 minutes. Cette différence est due à un certain nombre de facteurs. Certains sont d'ordre géométrique, comme le fait que le Soleil se déplace dans son mouvement annuel

apparent, le long de l'écliptique, parfois parallèlement ou presque à l'équateur céleste, parfois en faisant un angle avec ce dernier, allant jusqu'à $23,5^\circ$ aux équinoxes (ce qui réduit la variation journalière de son ascension droite jusqu'à un maximum de 8 %). D'autres facteurs sont reliés à de réelles variations de vitesse, par exemple la vitesse de révolution de la Terre autour du Soleil, qui augmente quand celle-ci, parcourant son orbite elliptique excentrique, se rapproche du Soleil, et diminue dans le cas contraire. Mentionnons également, bien qu'il s'agisse ici d'un effet beaucoup moins important que les deux précédents (on parle de variations de quelques dixièmes de milliseconde), la variation saisonnière de la vitesse de rotation de la Terre (Stromberg, 2014), en raison de mouvements de matière à l'intérieur de la Terre, au sein de la surface du globe (fonte des glaces, courants, marées) et dans son atmosphère (régime des vents).

- ☆ 27 Le type d'orbite décrit par la Lune et par les planètes sera présenté en détail au module 2. Mais puisque certains concepts seront utilisés plus tôt dans le manuel, il importe de savoir que l'orbite de la Lune, de même que celle de la Terre, est un genre de cercle aplati, appelé ellipse, dont la Terre ou le Soleil, selon le cas, n'occupe pas exactement le centre. Ainsi, pendant la révolution de la Lune autour de la Terre, la distance qui nous sépare de notre satellite varie entre 356 000 km et 407 000 km.

De plus, il convient de préciser dès maintenant certains aspects du concept de **force**, qui a été présenté dans le prologue et qui sera approfondi au module 2. À la suite des travaux de Descartes et de Newton, on a admis que si un objet se déplace autrement qu'à vitesse constante le long d'une ligne droite, c'est qu'il y a une force ou des forces qui agissent sur lui. Pour les corps célestes qui se déplacent suivant des ellipses, c'est l'**attraction gravitationnelle** qui est responsable de cette force (fenêtres 3 et 4 du prologue). En effet, tous les objets ont la propriété de s'attirer les uns les autres avec une intensité qui diminue avec la distance qui les sépare.

Pourtant, pourrait-on objecter non sans raison, les objets ne semblent pas se précipiter les uns vers les autres à toute vitesse et rester collés comme des aimants. L'explication est que cette force, qui dépend aussi de la masse des objets, est trop faible, dans le cas des objets qui nous entourent, pour que l'on puisse en remarquer les effets (plus de détails au module 2). Mais alors, qu'est-ce qui nous prouve qu'elle existe vraiment?

Il faut tout d'abord préciser qu'il est possible d'effectuer des expériences très délicates qui démontrent que cette force est présente pour des objets « ordinaires ». Mais la raison principale qui a conduit Newton à proposer sa loi de la gravitation, que nous verrons au chapitre 3, est qu'elle permettait d'expliquer des phénomènes aussi différents que l'orbite de la Lune, les marées et la chute des objets vers le sol. C'est elle qui permet aujourd'hui de calculer avec une précision incroyable la trajectoire d'une sonde spatiale lancée aux confins du système solaire... ou celle des missiles balistiques.

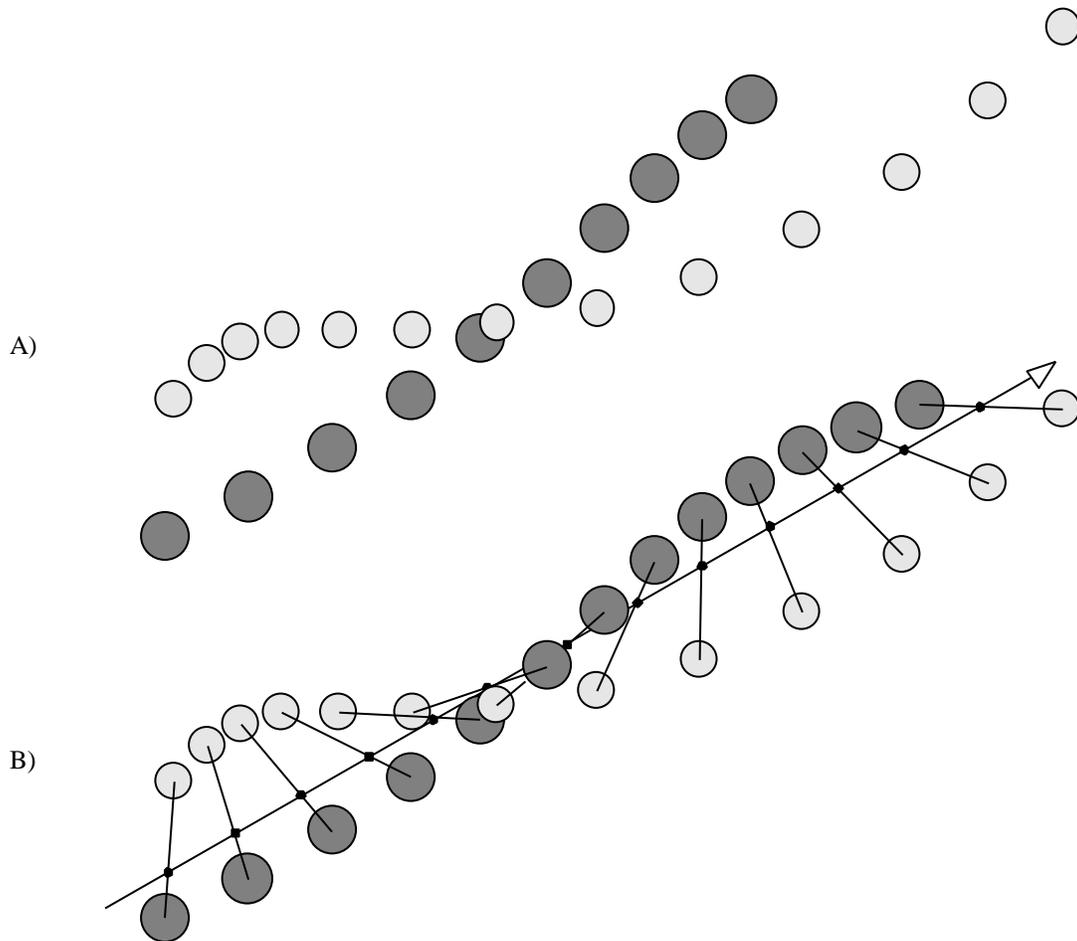
Avec ces notions bien en tête, on peut comprendre pourquoi le fait de dire que la Lune effectue un mouvement de **révolution** autour de la Terre constitue en réalité un abus de langage. En effet, lorsque deux ou plusieurs objets, comme la Terre et la Lune, s'attirent les uns les autres en vertu des forces gravitationnelles ou autres qui s'exercent entre eux, un seul point peut rester immobile ou encore se déplacer sur une trajectoire simple, telle une droite ou une ellipse : c'est le **centre de masse** du système formé par ces objets (figure 6.17, p. 247). Pour un système formé de deux objets, ces derniers décrivent des trajectoires de même forme autour du centre de masse qui, lui, a sa propre trajectoire, par exemple une droite (figure G-0.6).

Le concept de centre de masse est capital en astronomie. En fait, ce point se comporte comme si toute la masse des objets formant le système y était concentrée, et seuls les objets externes au système influencent son mouvement. Il existe une expression mathématique pour déterminer la position de ce point, mais on peut se le représenter comme le résultat des efforts de tous les objets, chacun tendant à attirer ce point vers son centre géométrique avec une efficacité proportionnelle à sa propre masse. Ainsi, pour deux objets dont l'un a une masse deux fois plus grande que l'autre, le centre de masse sera situé sur la ligne joignant les centres des objets, deux fois plus près du centre de l'objet le plus massif.

Si l'un des objets est beaucoup plus massif que l'autre, le centre de masse pourra même se retrouver à *l'intérieur* de cet objet. C'est le cas du centre de masse du système Terre-Lune qui est situé à 4700 km du centre de la Terre, donc à 1700 km sous sa surface. Avec les valeurs fournies aux pages 476 et 477 du manuel, vous pouvez vérifier que, la masse de la Terre étant 81 fois plus grande que celle de la Lune, ce point est bien situé 81 fois plus près du centre de la Terre que de celui de la Lune.

Tout en poursuivant leur course autour du Soleil, la Terre et la Lune tournent autour de ce point en 27,33 d*. En réalité, c'est ce point qui décrit une orbite elliptique autour du Soleil (figure G-0.7), alors que le centre de la Terre (et celui de la Lune) suit plutôt une trajectoire légèrement sinueuse qui la fait osciller de part et d'autre de cette orbite.

* La lettre « d » est le symbole SI pour « jour » (voir appendice G-2).

**FIGURE G-0.6**

Centre de masse. Un mouvement à première vue complexe (A) devient beaucoup plus simple quand on considère le mouvement du centre de masse (B), qui se déplace ici en ligne droite et à vitesse constante, ce qui indique qu'aucun corps céleste externe situé à proximité du système considéré n'exerce une influence sur lui.

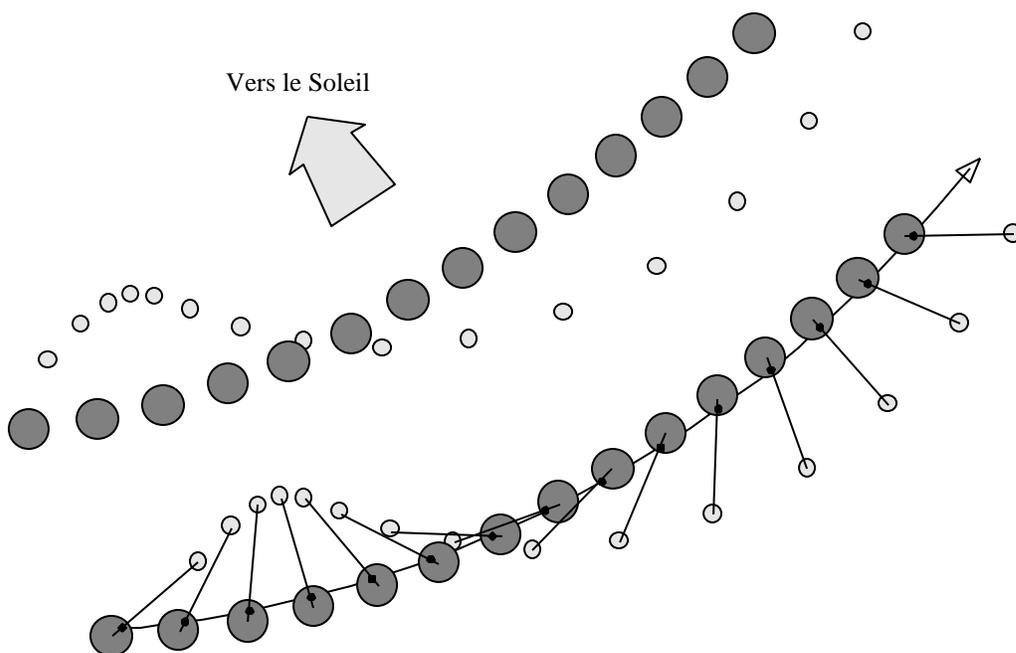


FIGURE G-0.7

Simulation du mouvement du système Terre-Lune. Les proportions ont été modifiées; seule la position du centre de masse est conforme à la réalité.

☆ 0.7 LES ÉCLIPSES DE LUNE ET DE SOLEIL (P. 28-30)

La déviation des rayons du Soleil, qui cause la couleur rougeâtre de la Lune lors d'une éclipse lunaire, est due au phénomène de **réfraction**, en vertu duquel les rayons lumineux changent de direction lorsqu'ils passent d'un milieu à un autre, ou lorsque les propriétés du milieu (température, pression) changent le long du trajet de ces rayons. Plus précisément, en passant d'un milieu d'indice de réfraction moins élevé à un milieu d'indice plus élevé*, les rayons se rapprochent de la perpendiculaire à l'interface séparant les deux milieux. En termes plus courants, ils « piquent du nez ». Cet effet est important surtout lorsque les rayons traversent cette interface en faisant un angle prononcé avec cette perpendiculaire ou, ce qui est équivalent, un angle rasant l'interface. Des exemples bien connus sont la brisure apparente d'un objet à moitié plongé dans l'eau (figure G-0.8) et les mirages (figure G-0.9).

* Ce que l'on entend par indice de réfraction demanderait plus d'explications; il suffit, pour les besoins du présent exposé, de noter que l'indice de l'air est très légèrement supérieur à celui du vide, celui de l'eau supérieur à celui de l'air, et celui du verre plus grand que celui de l'eau.

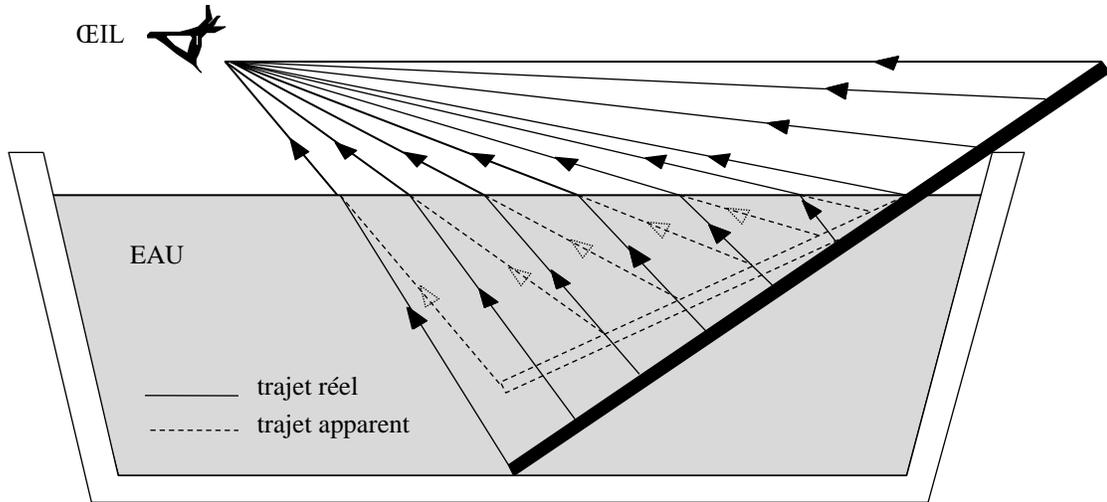


FIGURE G-0.8

Les rayons atteignant l'œil et originaires de la partie submergée de la règle semblent provenir de la région pointillée. La règle paraît donc pliée à l'endroit où elle entre dans l'eau.

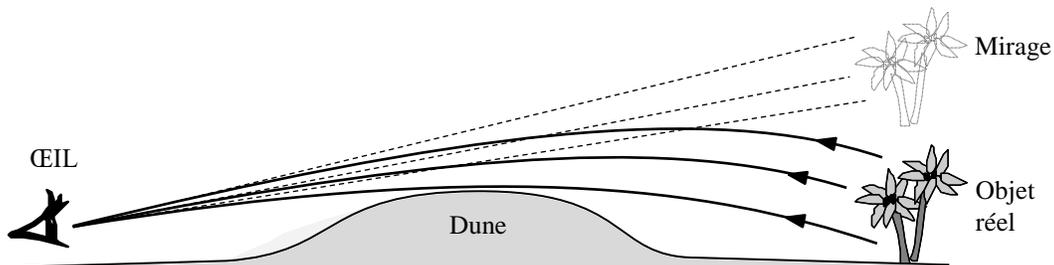


FIGURE G-0.9

Les différences de température et d'humidité entre les couches d'air situées près et loin du sol courbent les rayons et permettent d'observer un objet qui serait normalement dissimulé derrière la dune.

- ☆ 28 Il est de tradition, dans les schémas expliquant les éclipses, de ne représenter que quatre rayons provenant du Soleil (figure 0.18a). Il faut toutefois réaliser que des rayons lumineux partent dans *toutes les directions* à partir de *chaque point* de la surface du Soleil. Vous serez sans doute d'accord qu'il ne servirait à rien de représenter tous ces rayons! On ne conserve donc que ceux qui permettent de

délimiter trois zones importantes : la zone d'**ombre**, où ne parvient aucun rayon provenant du Soleil, la zone de **pénombre**, qu'atteignent des rayons issus d'une partie seulement du Soleil, et le reste de l'espace, où parviennent des rayons provenant de l'ensemble du disque solaire. De plus, ces zones ne sont pas aussi bien délimitées que la figure 0.18 le suggère : la transition entre la zone d'ombre et la zone de pénombre ne se fait pas de manière brusque, et l'intensité n'est pas constante dans la zone de pénombre, mais varie plutôt de manière progressive.

- ☆ 32 L'origine de la différence entre l'**année sidérale** et l'**année tropique**, une des causes du problème du calendrier, est assez subtile. La figure G-0.11 devrait vous aider à mieux comprendre le phénomène.

La partie A de la figure représente le mouvement de la Terre à partir d'un repère où le Soleil est immobile. Supposons qu'au départ (à $t = 0$) le Soleil est au point vernal (c'est le printemps dans l'hémisphère Nord) et que la Terre et le Soleil sont alors en ligne avec une étoile X. À ce moment précis, par définition même du point vernal, l'axe de la Terre (OA) est perpendiculaire à la droite qui la joint au Soleil (OC), et il pointe vers, supposons, l'étoile Polaire. Au bout d'un nombre entier d'années *sidérales* (6 500 dans cet exemple), la Terre, le Soleil et l'étoile X sont de nouveau alignées, en vertu de la définition même de l'année sidérale.

- ☆ 31 Toutefois, à cause de la **précession des équinoxes**, aussi appelée précession luni-solaire, l'axe de la Terre (OB, maintenant) a lentement changé d'orientation et ne pointe plus vers l'étoile Polaire. Par conséquent, l'angle entre cet axe et la droite reliant la Terre au Soleil n'est plus de 90° , mais de 67° ($90^\circ - 23^\circ$). L'hémisphère Nord est en plein été. En fait, l'angle de 90° , qui correspond à $t = 6\,500$ années tropiques, a été atteint 90 d plus tôt, ce qui représente 20 minutes de moins pour chaque année sidérale écoulée. Ceci explique la durée plus courte de l'année tropique, définie comme l'intervalle entre deux passages du Soleil au point vernal.

Vue de la Terre, cette précession se traduit par un lent déplacement du point vernal le long de l'écliptique. C'est ce qu'illustre la partie B de la figure G-0.11 qui montre le même phénomène, mais cette fois dans le repère où la Terre est fixe. On y remarque qu'en 6 500 ans, le point vernal s'est déplacé d'un quart de tour, soit de C à C'.

Prenez le temps de bien comparer les deux parties de la figure et de vous convaincre qu'il s'agit de la même situation. Seul le point de vue – le repère – est différent.

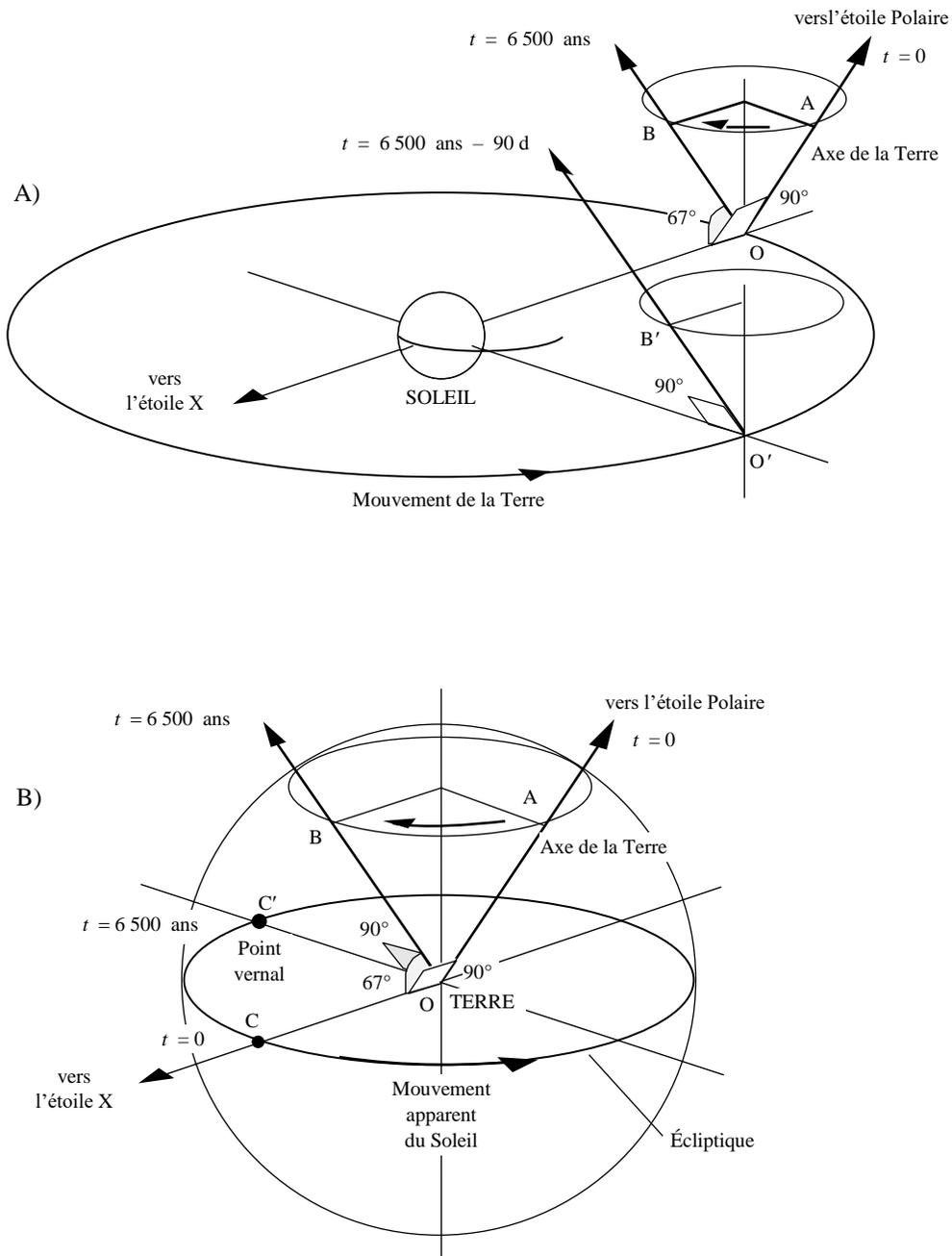


FIGURE G-0.11
Précession des équinoxes, vue du repère du Soleil (A) et du repère de la Terre (B).

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES



G-0.1 PETITE CHRONOLOGIE DE L'UNIVERS ET DE LA TERRE

De la même façon que la Terre n'est en définitive qu'un grain de poussière dans un univers immense, la durée d'une vie humaine n'est qu'un instant fugace à l'échelle de l'histoire de cet univers. Supposons en effet qu'une vie humaine dure une seconde; le tableau G-0.2 présente, à cette échelle, quelques étapes importantes de l'histoire de l'Univers et de la Terre.

TABLEAU G-0.2

Petite chronologie de l'Univers et de la Terre
(une seconde équivaut à la durée d'une vie humaine)

Il y a...	Événement
7 ans	Big-Bang, naissance de l'Univers, premières étoiles
4 ans	Formation de la Voie lactée
21 mois	Formation de la Terre
18 mois	Apparition de la vie sur Terre
10 mois	Premières cellules
2 mois	Apparition des poissons et autres vertébrés
39 jours	Premiers dinosaures
9 jours	Disparition des dinosaures
3 jours	Apparition des primates
7 heures	Premiers humains
20 minutes	Apparition de l' <i>Homo Sapiens</i>
4 minutes	Apparition de l'agriculture
1 minute	Invention de l'écriture
22 secondes	Apogée de l'empire romain
6 secondes	Conquête de l'Amérique par les Européens
1 seconde	Grande dépression; début du cinéma parlant

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

MATHIS, J., B. SAVAGE ET J. CASSINELLI (1984). « L'orbite de la Terre et les périodes glaciaires », *Pour la Science*, n° 78, avril, p. 22-31.

STEPHENSON, R. (1982). « L'historique des éclipses », *Pour la Science*, n° 62, décembre, p. 78.

STROMBERG, J. (2014). « No, this winter solstice wasn't the longest ever. Scientists explain what we got wrong », site *Vox*. Consulté le 21 avril 2015 : <http://www.vox.com/2014/12/23/7441951/earth-rotation>

VERDET, J.-P. (1990). *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, p. 9-26.

MODULE 0

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

La gamme des longueurs caractérisant l'Univers s'étend sur près de 40 ordres de grandeurs (puissances de 10), de l'infiniment petit (10^{-14} m, le noyau atomique) à l'infiniment grand (10^{25} m, les amas de galaxies).

Les positions des objets célestes peuvent être décrites à partir de plusieurs repères, à chacun desquels on associe un système de coordonnées : le repère de l'observateur, qui tourne avec la Terre (système de coordonnées locales : azimut et altitude) et le repère des étoiles « fixes », lié à l'axe de la Terre et au point vernal (système de coordonnées équatoriales : ascension droite et déclinaison).

Le double mouvement de la Terre, rotation sur elle-même et révolution autour du Soleil, nous amène à définir deux types de jours : le jour sidéral et le jour solaire.

Les particularités (forme elliptique de l'orbite, inclinaison de l'axe de rotation, précession des équinoxes, précession planétaire) et les irrégularités du mouvement de la Terre expliquent la durée variable du jour solaire tout au long de l'année et les caractéristiques des saisons.

La précession des équinoxes nous amène à introduire la notion d'année tropique, différente de l'année sidérale. De plus, la précession des équinoxes modifie la position des pôles célestes et du point vernal, ce qui cause un lent changement dans le mouvement diurne des étoiles sur la voûte céleste.

Il existe deux types d'éclipses : l'éclipse solaire et l'éclipse lunaire. Les diverses catégories (partielle, annulaire, etc.) d'éclipses et l'irrégularité de leurs apparitions s'expliquent par les caractéristiques de l'orbite de la Lune autour de la Terre (excentricité, inclinaison par rapport à l'écliptique, précession) et de celle de la Terre autour du Soleil (excentricité).

Le centre de masse d'un système, formé de deux ou plusieurs objets en interaction, suit une trajectoire simple, quel que soit le mouvement individuel de ces objets. Ainsi, c'est le centre de masse du système Terre-Lune qui parcourt une orbite elliptique autour du Soleil, pendant que la Terre et la Lune tournent autour de ce centre de masse.

La réfraction des rayons lumineux par l'atmosphère terrestre entraîne un certain nombre de conséquences en astronomie. Parmi celles-ci, notons le fait que la Lune ne disparaît pas complètement durant les éclipses lunaires, même lorsqu'elle se trouve dans la zone d'ombre.

MODULE 0

ACTIVITÉS

QUESTIONS DE RÉVISION

Prologue : Parcourez l'ensemble des questions; les réponses se trouvent intégralement dans le manuel.

Chapitre 0 : 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 36.

PROBLÈMES DU MANUEL

Chapitre 0 : P1, P2, P3, P4, P10, P11.

Note : Vous trouverez les réponses aux problèmes aux pages 597-600 du manuel.

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

G0.0 Si vous le jugez nécessaire, effectuez les exercices proposés dans les appendices G-1 à G-3 du guide.

- G0.1
- Pourquoi a-t-on jugé utile de définir un jour solaire moyen?
 - Si la Terre tournait sur elle-même *dans l'autre sens*, à la même vitesse, est-ce que la durée du jour sidéral serait plus petite, la même ou plus grande?
 - Même question qu'en b), mais pour le jour solaire.

Suggestion : Pour b) et c), vous pouvez vous inspirer de la figure 0.15 (p. 26).

G0.2 Mercure tourne autour du Soleil en 88 d et sur elle-même en 59 d. Parmi les valeurs suivantes, laquelle correspond à la durée :

- du jour sidéral sur Mercure?
- du jour solaire sur Mercure?

29 d 59 d 74 d 88 d 147 d 176 d 264 d

Suggestion : Faites un schéma semblable à celui de la figure 0.15 (p. 26); tracez successivement les positions de Mercure à chaque quart de révolution autour du Soleil (22 d). Vous pouvez supposer, pour simplifier, que l'orbite de Mercure est circulaire et que, par conséquent, sa vitesse orbitale est constante. Par exemple, après 22 d, Mercure a effectué 22/59 tour sur elle-même, soit

environ 0,37 tour, etc. Pour vous aider à illustrer la rotation de Mercure sur elle-même, placez-y un repère, par exemple une flèche qui pointe initialement vers le Soleil. Faites tourner Mercure autour du Soleil et lorsque cette flèche sera de nouveau orientée vers le Soleil, un jour solaire sera complété.

- G0.3 En utilisant la carte de la figure G-0.2, déterminez le plus précisément possible la position de l'aéroport (indiquée par un petit avion vu de côté) situé au nord du lac Dumau (partie nord-ouest de la carte). Donnez la position selon les deux systèmes de coordonnées mentionnés dans l'exemple de l'atterrissage forcé près du lac Fraye, au début des explications complémentaires, p. G-21

IMPORTANT

Les exercices numérotés en gras et avec soulignement (**G0.4**) demandent une analyse plus poussée. Prenez le temps de bien lire les données et de réfléchir avant d'essayer de les résoudre.

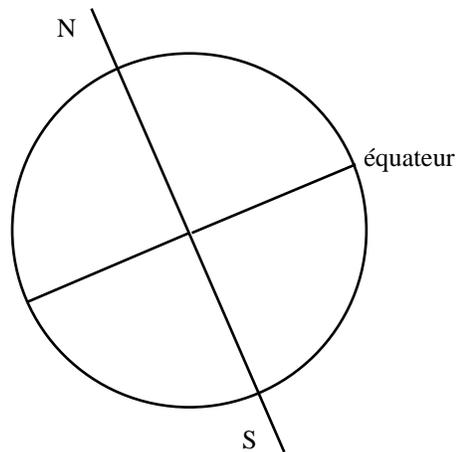
- G0.4** Dans ce chapitre, il est question de deux systèmes de coordonnées célestes : le système de coordonnées locales, décrit à la figure G-0.3 et le système de coordonnées équatoriales, décrit à la figure G-0.4.

- Les coordonnées locales d'une étoile changent-elles durant une journée? Sont-elles les mêmes pour deux personnes observant le ciel en un même instant, mais à partir de points très éloignés l'un de l'autre?
- Répondez aux mêmes questions pour les coordonnées équatoriales.

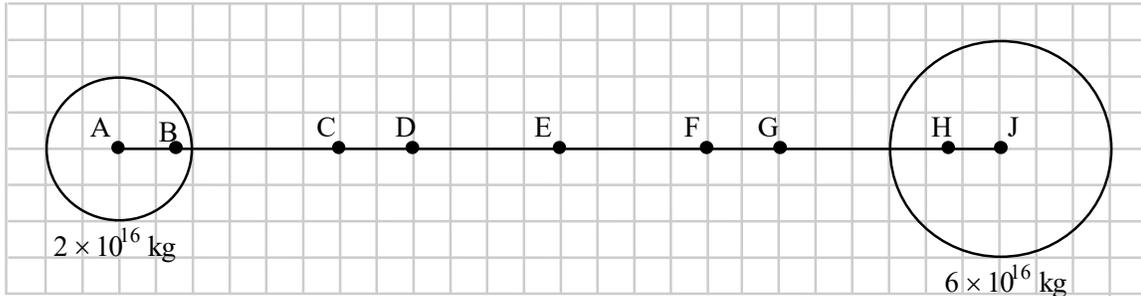
- G0.5 En utilisant la figure ci-dessous et en vous inspirant de la figure 0.11 de la page 23, déterminez les hauteurs maximale et minimale au-dessus de l'horizon atteintes durant l'année par le Soleil. Faites l'exercice pour les trois villes mentionnées, en précisant les mois où ces positions extrêmes sont observées. Servez-vous au besoin d'un rapporteur d'angle, non essentiel si vous connaissez la notion d'angles complémentaires.

- Québec
- São Paulo (Brésil, 23° de latitude Sud).
- Quito (Équateur, 0° de latitude)

Suggestion : Indiquez les positions des trois villes en question. Pour chacune, tracez le plan correspondant à l'horizon et mesurez les angles maximal et minimal que peuvent faire les rayons du Soleil avec ce plan. Ne vous étonnez pas si vos réponses diffèrent d'un degré ou deux de celles que l'on vous propose : c'est le mieux que l'on peut espérer d'une telle construction.



- G0.6 a) Énoncez deux causes de la variation, au cours de l'année, de la durée du jour solaire.
- b) Le jour sidéral a-t-il la même durée pendant toute l'année? Si la réponse est non, identifiez la ou les causes, parmi les trois précédentes, de cette variation.
- G0.7 Aux alentours de quelle(s) date(s), parmi les suivantes, à un ou deux jours près, l'axe de la Terre est-il perpendiculaire à la droite qui va de la Terre au Soleil?
- | | | |
|-------------------------|-------------|--------------|
| 1 ^{er} janvier | 21 décembre | 21 septembre |
| 1 ^{er} juillet | 21 juin | 21 mars |
- G0.8 On a dit que le centre de masse du système Terre-Lune est situé à 1700 km sous la surface de la Terre. Mais est-ce que ce point est situé en un point précis du globe, ou bien est-ce que son emplacement change? Dans l'affirmative, comment quelqu'un pourrait-il déterminer si le centre de masse se trouve à un instant donné au-dessous de ses pieds, si bien sûr la chose est possible?
- G0.9 Deux astéroïdes (petites planètes que l'on retrouve en grand nombre entre Mars et Jupiter) sont en orbite autour de leur centre de masse. Les masses des astéroïdes sont respectivement 2×10^{16} kg et 6×10^{16} kg. (Ces nombres sont exprimés en notation scientifique; si vous n'en comprenez pas la signification, consultez l'appendice G-1.)
- Parmi les points suggérés (A à J), déterminez celui qui correspond le mieux à la position de ce centre de masse.



G0.10 Pourquoi les éclipses du Soleil sont-elles parfois annulaires?

G0.11 Une éclipse de Soleil peut-elle se produire une semaine après une éclipse de Lune? Si la réponse est non, expliquez pourquoi; si la réponse est oui, illustrez la situation.

G0.12 Expliquez, en vous aidant d'un schéma, comment la réfraction des rayons lumineux par l'atmosphère terrestre permet d'expliquer :

- que les positions apparentes du Soleil ou des étoiles sont modifiées lorsque ceux-ci sont très près de l'horizon;
- que la Lune demeure visible même au plus fort d'une éclipse lunaire (examinez la figure 0.18b, page 28).

G0.13 Pour chacune des caractéristiques suivantes du mouvement de la Terre (a à f), indiquez ce qu'un changement dans sa valeur (alors que les autres caractéristiques ne changent pas) modifierait parmi les quantités suggérées (1 à 6).

Par exemple, si l'excentricité de l'orbite terrestre (a) changeait, quelle(s) quantité(s) dans la colonne de droite (1 à 6) serai(en)t modifiée(s)?

- | | |
|---|---|
| a) excentricité de l'orbite | 1. différences de température entre les saisons |
| b) inclinaison (ou obliquité) de l'écliptique | 2. durée des saisons |
| c) précession des équinoxes | 3. durée du jour solaire |
| d) vitesse de rotation sur elle-même | 4. durée du jour sidéral |
| e) période de révolution autour du Soleil | 5. durée de l'année tropique |
| | 6. durée de l'année sidérale |

Module 1

LA PERSPECTIVE COSMIQUE :

DES PREMIERS QUESTIONNEMENTS

À LA CONCEPTION MODERNE DU SYSTÈME SOLAIRE

Manuel

Chapitre 1 *Le système du monde*

Chapitre 2 *La profondeur du ciel*

Cette partie du cours se propose de montrer comment l'évolution de la science elle-même peut être retracée à travers l'histoire de l'astronomie. Des premiers balbutiements, dont témoignent seuls quelques vestiges souvent ambigus, à la prise de conscience de l'immensité de l'Univers et de la place que la Terre y occupe – ou plutôt n'y occupe pas –, c'est à une épopée grandiose que vous êtes convié. Ce sera en même temps l'occasion pour vous d'apprécier comment les réalisations passées ont pavé la voie à l'activité humaine aujourd'hui désignée sous le nom de science.

MODULE 1

PRÉSENTATION

La fumée des usines toujours plus nombreuses... et l'éclairage artificiel s'unissent pour masquer les étoiles. Ces retombées du progrès ont réussi, au-delà des espérances des plus terre-à-terre d'entre nous, à nous isoler de l'Univers, de sorte que de nos jours peu d'enfants de la ville ont la moindre idée de la splendeur des cieux, qui faisait des bergers mésopotamiens des astronomes malgré eux.

Percival Lowell (1900).

Nous affirmons par conséquent [...] que le Soleil est le centre de l'Univers; et qu'alors que le Soleil est au repos, tout mouvement apparent du Soleil peut être mieux expliqué par le mouvement de la Terre. [...] Bien que ce point de vue soit difficile à accepter, contraire à l'intuition et certainement inhabituel, nous verrons plus loin, grâce à Dieu, à le rendre beaucoup plus clair, du moins pour les mathématiciens.

Copernic, *De Revolutionibus* (1543).

Les premiers pas de l'astronomie ont consisté avant tout en une prise de contact avec les astres qui illuminent un ciel nocturne. Quiconque s'est déjà laissé enivrer par le spectacle d'un ciel étoilé, loin de toute « retombée du progrès », peut aisément imaginer que l'observation du ciel est aussi vieille que l'humanité elle-même. Comment ne pas tenter de relier la complexe régularité des mouvements célestes à un ordre caché des choses d'ici-bas? Comment éviter de chercher là-haut des réponses aux questions qui nous assaillent?

Toute une évolution que celle qui mena l'humanité de ces premiers questionnements à la prise de conscience, au début du 20^e siècle, de la dimension de notre galaxie et de la place tout à fait quelconque – pour ne pas dire négligeable – que la Terre et le système solaire y occupent. Cette évolution, loin d'être graduelle, a été marquée par deux moments privilégiés. Le premier fut la naissance, sur les rives orientales de la Méditerranée, entre –600 et –400, d'une nouvelle manière de questionner la nature pour chercher les explications des phénomènes que l'on y observe. Le second fut une véritable révolution, déclenchée par Nicolas Copernic en 1543, et dont le

dénouement, la naissance de la science telle que nous la connaissons aujourd'hui, fut avant tout l'œuvre de ses successeurs, auxquels il avait ouvert la voie.

Entreprenez dès maintenant ce long voyage dans le temps qui vous fera découvrir quelques grandes étapes de l'histoire de l'astronomie.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

1. Décrire des exemples de vestiges archéologiques auxquels on peut prêter une signification astronomique.
2. Énumérer les principales contributions à l'astronomie des Mésopotamiens, des Égyptiens et des Chinois.
3. Décrire des critères permettant de distinguer la science des autres types d'activités humaines.
4. Décrire les principales contributions des Grecs à l'évolution de l'astronomie et de la science en général.
5. Établir les différences entre l'approche des astronomes grecs et celle des astronomes mésopotamiens.
6. Expliquer le rôle joué Moyen Âge par les savants musulmans et européens dans la transition entre l'astronomie de Ptolémée et celle de Copernic.
7. Présenter les principales caractéristiques du modèle proposé par Copernic, ses conséquences sur le plan de l'observation et la part relative d'éléments traditionnels et novateurs qu'il contient.
8. Expliquer pourquoi on considère généralement Galilée comme le fondateur de la physique moderne.
9. Décrire les méthodes utilisées pour mesurer la distance entre la Terre et le Soleil, ainsi que la distance qui nous sépare des autres étoiles.
10. Expliquer comment on a déterminé que le Soleil n'est pas situé au centre de notre Galaxie.

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)
astrologie	54 [19]	astronomie grecque	1.4
science	54 [21]	luminosité	76 [9]
pseudo-science	69 [11]	révolution copernicienne	1.5
parascience	69	contributions de Galilée en physique	1.6
astronomie préhellénique	1.2	femmes en astronomie	2.10
cosmologie	1.3	astronomie préhistorique	G-1.1
mouvement circulaire uniforme	59 [18]	archéoastronomie	G-1.1
vitesse angulaire	59	astronomie au Moyen Âge	G-1.2
mouvement rectiligne	59		

AVANT DE POURSUIVRE...

Nous vous suggérons d'effectuer votre lecture du manuel et du guide dans l'ordre indiqué ci-dessous.

LECTURES

1. Explications supplémentaires :
G-1.1 *L'astronomie avant l'invention de l'écriture* (p. G-52)
2. Introduction de la première partie et section 1.1 (p. 52-56)
3. Sujet connexe : *Une critique de l'astrologie* (p. 69-71)
4. Sections 1.2 et 1.3 (p. 56-59)
5. Introduction du chapitre 2, sections 2.1, 2.2 et 2.3 (p. 76-80)
6. Section 1.4 (p. 59-62)
7. Section 2.4 (p. 80-81)
8. Explications supplémentaires :
G-1.2 *L'astronomie au Moyen Âge* (p. G-53)
9. Sections 1.5 à 1.7 (p. 62-68)
10. Sections 2.5 à 2.10 (p. 81-93)
11. Compléments :
 - 1.1 *Période sidérale et période synodique* (p. 72-73)
 - 2.3 *La relation intensité-luminosité-distance* (p. 101)

MODULE 1

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

1.1 L'INVENTION DE L'ASTROLOGIE (P. 54-56)

- ☆ 54 L'**astrologie** a survécu aux diverses révolutions scientifiques survenues durant l'histoire et semble très bien se porter de nos jours. Mais toute réflexion sur la nature de cette activité débouche sur une discussion concernant la nature de la **science** elle-même. En considérant l'ampleur du débat – encore actuel – entourant cette question, il ne sera possible ici que d'effleurer cette problématique, qui est d'ailleurs abordée un peu plus loin (module 2) et qui est traitée beaucoup plus en détail dans d'autres cours des programmes de sciences de la Télé-université.

Il faut tout d'abord établir clairement ce que l'on entend par science. Bien qu'il ne soit pas facile de trouver une réponse simple ou d'établir une liste exhaustive de conditions, on peut à tout le moins esquisser un certain nombre de critères. C'est ainsi que l'on peut dire qu'une science comprend les éléments suivants.

1. Un ensemble structuré de concepts et de méthodes s'appliquant à un objet d'étude bien défini et partagé par les membres d'un groupe se réclamant d'une même discipline et formant ce qu'on appelle une communauté scientifique.
2. Un mode de représentation et d'explication de la réalité permettant de réunir en un même schéma les descriptions de phénomènes souvent distincts en apparence. Ces schémas, qui comprennent en plus des concepts, des modèles et des théories, servent à établir des liens de cause à effet entre les phénomènes.
3. Dans le cas des sciences de la nature surtout, et dans une moindre mesure dans celui des sciences sociales, la faculté de prédire l'occurrence de certains phénomènes à partir de la présence des conditions appropriées, tout en contrôlant et en vérifiant le degré de réalisation de ces prédictions.
4. La possibilité d'évoluer, c'est-à-dire d'ajouter de nouvelles classes de phénomènes à son objet d'étude, ou encore d'incorporer les acquis d'autres disciplines, et ce même s'il lui faut adapter ou modifier ses propres concepts, modèles ou théories.
5. La présence au sein de la communauté de moyens permettant la communication, la critique et, éventuellement, la validation des propositions ou prétentions de ses membres.

Comment se situe l'astrologie par rapport à ces critères de scientificité? Elle répond assurément au premier d'entre eux : l'astrologie constitue bel et bien un ensemble structuré de méthodes et de concepts communs à toute une communauté, celle des

astrologues. On y retrouve, entre autres, les concepts de signe astrologique, d'ascendant, les façons d'établir les cartes du ciel, etc. Elle satisfait aussi le second : l'astrologie est certainement une façon de décrire et de représenter un aspect de la réalité – les comportements humains et certains événements en apparence fortuits –, en établissant des liens de causalité entre ces derniers et les positions des planètes. Bien entendu, elle n'explique pas le pourquoi des liens qu'elle établit. En cela toutefois, elle ne se distingue pas particulièrement des sciences « officielles », qui ne font, somme toute, qu'élaborer des modèles et des schémas explicatifs de plus en plus généraux, sans pour autant chercher à répondre à la question du pourquoi ultime des phénomènes qu'elles étudient. Ainsi, en physique, on a raffiné à travers les siècles la description du phénomène d'attraction gravitationnelle, sans jamais répondre à la question : pourquoi les objets s'attirent-ils?

☆ 69 Vous trouverez aux pages 69 à 71 du manuel quelques éléments permettant de juger l'astronomie en regard des trois autres critères. Après cette lecture, vous serez peut-être d'accord qu'il vaut mieux, pour désigner l'astrologie, employer des termes comme **pseudoscience** ou **parascience**, que l'on associe aux entreprises qui, tout en présentant plusieurs des caractéristiques des sciences reconnues comme telles, ne peuvent prétendre à ce statut.

☆ 1.2 LES OBSERVATIONS MÉSOPOTAMIENNES (P. 56-57)

La question de la nature scientifique de l'**astronomie préhellénique**, c'est-à-dire d'avant les Grecs, demande d'adopter une attitude prudente. En particulier, la distinction inexistante dans les sociétés mésopotamienne, égyptienne et chinoise entre l'astrologie et l'astronomie renvoie à une structure sociale où le civil et le sacré sont inséparables, où les corps célestes sont considérés comme des dieux. Dans ces sociétés, l'astronomie était avant tout une démarche pragmatique. Ainsi, les efforts des astronomes mésopotamiens (à partir de 3000 avant notre ère jusqu'aux environs de l'an 100 de notre ère) ont surtout consisté à consigner des événements célestes, que ce soit pour l'établissement d'un calendrier fiable ou pour la prédiction des éclipses, ou encore pour la préparation des horoscopes. Ils ont également mis au point des formules empiriques, c'est-à-dire construites par essais et erreurs à partir de l'examen des données brutes, donnant la durée du jour et de la nuit tout au long de l'année, et introduit la notion de degré comme mesure angulaire. Ces travaux furent surtout l'œuvre des astronomes de Babylone, ville de Mésopotamie devenue centre intellectuel majeur vers -1800, de sorte que l'on parle souvent d'astronomie babylonienne.

Contrairement aux Mésopotamiens, les Égyptiens ont peu contribué à l'astronomie et ne pratiquaient pas l'astrologie, les étoiles n'étant pas considérées par eux comme des dieux. On leur doit essentiellement la division de l'année en 365 jours, mesure qui fut établie vers l'an -3000 et qui fut raffinée plus tard à 365,25 jours. En Chine, l'astronomie s'est développée, entre -2000 et -500, à peu près de la même manière qu'en

Mésopotamie; elle visait d'ailleurs les mêmes objectifs : établissement du calendrier, astrologie, prédiction des éclipses.

Malgré les instruments rudimentaires utilisés par ces astronomes, les mesures recueillies étaient suffisamment précises pour que l'on puisse beaucoup plus tard, surtout dans le cas des Mésopotamiens, en tirer des renseignements précieux sur les mouvements à long terme de la Terre et des autres astres. Cependant, il n'était aucunement question de représenter ou d'expliquer ces mouvements à l'aide de modèles ou de théories. Cette absence peut être reliée au fonctionnement même de ces sociétés centralisées, dont la gestion exigeait la tenue d'une comptabilité exhaustive; en fait, c'est tout le savoir créé par ces sociétés qui se présentait sous forme de listes.

☆1.3 UN UNIVERS GÉOCENTRIQUE (P. 57-59)

Les premiers penseurs grecs qui se sont interrogés sur les phénomènes naturels terrestres et célestes, autrement qu'en invoquant les attitudes et comportements des dieux, vivaient en Ionie, sur la rive est de la mer Égée (côte ouest de l'actuelle Turquie, appelée Asie Mineure à l'époque). Ainsi Thalès, un des plus célèbres représentants de l'École de Milet (ville d'Ionie), qui vécut entre -600 et -575, est le premier à proposer une **cosmologie** (explication du monde) d'où les dieux sont exclus. Selon Thalès, l'eau est la base de tout ce qui existe. La Terre, plate, flotte comme un bouchon de liège au milieu d'une mer parfois houleuse (figure G-1.1) où se meuvent les étoiles et les planètes; celles-ci sont formées par l'évaporation de l'eau. La pluie tombe directement de cette mer dont les vagues expliquent les tremblements de terre.

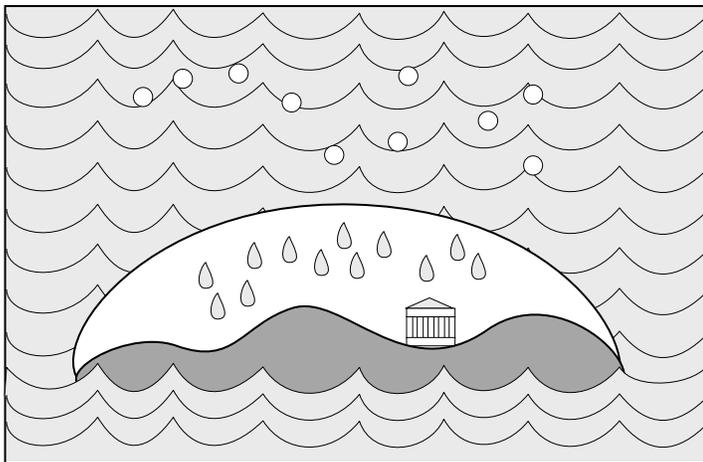


FIGURE G-1.1

Le cosmos selon Thalès : la Terre flotte sur une mer dont les vagues causent les tremblements de terre; l'eau de la mer est la source de la pluie et des étoiles (formées de vapeur d'eau).

D'autres penseurs comme Anaximandre et Anaximène, des disciples de Thalès, proposent des variantes de ce point de vue, où la matière de base est remplacée par

l'air ou par une substance primordiale appelée *apeiron* (l'Infini ou l'Illimité). Ce n'est que plus tard, vers les années -500, que naquit la conception d'une Terre sphérique occupant le centre de l'Univers, n'ayant pas besoin d'être soutenue parce que n'ayant nulle part où tomber.

☆ 59 Par **mouvement circulaire uniforme**, on entend un déplacement à vitesse constante sur un cercle. Pour décrire de façon commode un tel mouvement, il faut utiliser le concept de **vitesse angulaire** qui est l'analogue, pour un mouvement circulaire, de la vitesse pour un mouvement linéaire, appelé aussi **mouvement rectiligne**. On représente la vitesse angulaire par le symbole ω . De la même façon que les positions apparentes des objets célestes sont décrites à l'aide d'angles, la vitesse des objets se déplaçant sur des cercles est exprimée en angles par unité de temps. L'unité de vitesse angulaire utilisée le plus souvent en physique est le radian par seconde (rad/s). Comme on le mentionne à l'appendice G-2, un tour vaut 2π radians, et un radian environ $57,3^\circ$ ($360^\circ/2\pi$), de sorte que la vitesse angulaire d'un objet effectuant un tour par seconde est égale à 6,28 rad/s.

☆ 1.4 LE SYSTÈME DE PTOLÉMÉE (P. 59-62)

On le voit, l'**astronomie grecque**, avec ses explications naturelles et ses modèles géométriques sophistiqués, diffère fondamentalement de celle qui était pratiquée par les astronomes (ou astrologues) des civilisations mentionnées précédemment, qui se contentaient d'établir des listes d'observations systématiques. Cette différence peut en partie s'expliquer par l'organisation sociale totalement différente de la Grèce antique, formée de communautés à la fois très autonomes et très ouvertes sur l'extérieur, où œuvraient des philosophes relativement indépendants s'entourant de disciples et fondant des écoles de pensée. Un tel contexte était beaucoup plus propice à ce type d'investigation que la rigidité du système centralisé des sociétés comme les sociétés mésopotamienne, égyptienne ou chinoise qui, par contre, favorisaient la tenue de registres systématiques couvrant de longues périodes.

☆ 1.5 LE SYSTÈME DE COPERNIC (P. 62-66)

La période allant de la publication de l'œuvre de Nicolas Copernic à l'acceptation de son modèle héliocentrique, dans le siècle qui suivit, est une étape cruciale de l'histoire des sciences, étape que l'on n'a d'ailleurs pas hésité à nommer « **révolution copernicienne** ». Pourtant, tout bien considéré, l'œuvre de Copernic n'apparaît pas tellement révolutionnaire. Si Copernic remet en question le modèle de Ptolémée, c'est d'abord pour des raisons philosophiques, dans la stricte ligne de pensée aristotélicienne. Il accuse en effet Ptolémée d'avoir trahi les idéaux de ses prédécesseurs, Platon notamment, en abandonnant le mouvement circulaire uniforme, le seul susceptible, d'après lui, de s'appliquer aux mouvements célestes. Les avantages pratiques de son modèle ne sont pas évidents non plus : comme on le souligne dans le manuel, celui-ci ne se révèle ni plus précis, ni finalement plus simple que celui auquel il s'oppose (figure G-1.2). Que reste-t-il donc de révolutionnaire

alors? Comment expliquer l'impact de son hypothèse qui a permis de lui attribuer le titre d'initiateur d'une révolution scientifique?

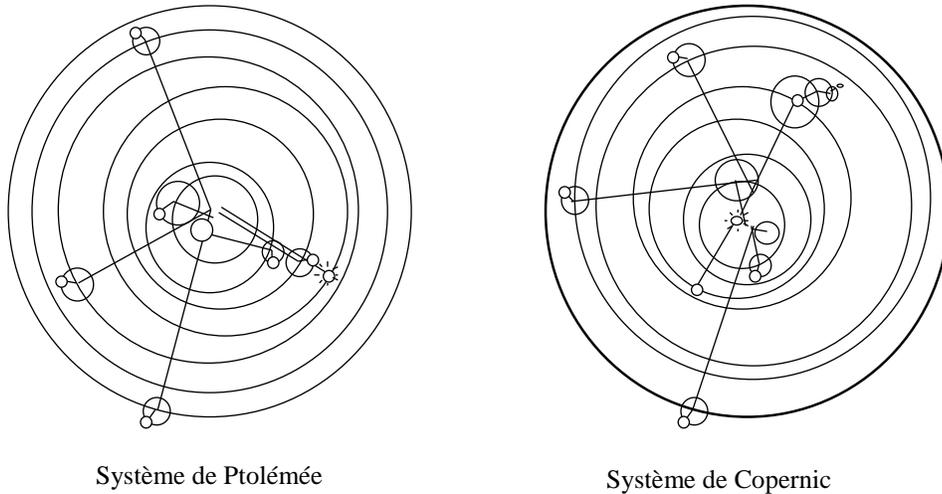


FIGURE G-1.2

Le système de Copernic (à droite) n'est finalement pas plus simple que celui de Ptolémée (à gauche).

Cette question a fait l'objet de nombreux débats en histoire des sciences. Une réponse intéressante est celle de T. S. Kuhn (1957), qui suggère que la contribution de Copernic se situe à deux niveaux. Tout d'abord, il a été le premier à examiner systématiquement, à l'aide des mathématiques, toutes les conséquences d'un modèle héliocentrique sur les observations astronomiques. Il a ainsi réussi à montrer que l'on pouvait rendre compte, à l'aide de son modèle, des mouvements des planètes avec moins d'hypothèses artificielles, du moins à ses yeux, qu'avec celui de Ptolémée. Plus important encore, il a défini une nouvelle direction vers laquelle pourraient s'orienter les efforts des astronomes qui allaient lui succéder. Or, et c'est là le point important, les travaux de ces derniers, tout en ne retenant que le strict minimum des idées émises dans le *De Revolutionibus*, allaient déboucher sur une description infiniment plus simple et plus précise que toutes celles qui avaient prévalu jusqu'alors. De ce point de vue, la valeur d'une hypothèse, d'une théorie ou d'un modèle réside d'abord dans sa capacité à définir de nouvelles orientations de recherche qui se révèlent, à terme, fructueuses.

Ce ne sont donc pas tant les travaux de Copernic, mais les résultats qu'obtiendront ses successeurs à partir de son hypothèse de départ, qui en consacreront le caractère réellement révolutionnaire. L'œuvre de Copernic appartient ainsi à la fois à la tradition et à l'avenir et, à ce titre, marque un tournant majeur dans le développement de la pensée astronomique. Ce sont donc les travaux des successeurs de Copernic – Tycho Brahé, Kepler, Galilée et Newton – qui constitueront l'essence de la révolution copernicienne (les travaux de Tycho Brahé et de Kepler seront vus au module suivant). D'ailleurs, celle-ci débordera largement le cadre de l'astronomie pour se qualifier comme véritable révolution *scientifique*.

☆ 1.6 LES OBSERVATIONS DE GALILÉE (P. 66-68)

Les **contributions de Galilée en physique** ne se limitent pas au domaine de l'astronomie. Galilée a également innové en mécanique, notamment par ses études sur la chute des corps et sur le mouvement des projectiles. Ce volet de ses travaux n'étant pas jugé dangereux par l'Église, il put le poursuivre même après sa condamnation et sa mise en résidence surveillée. En fait, l'apport essentiel de Galilée à l'évolution de ce qui allait devenir la physique est le recours à la rigueur mathématique, ainsi que la reconnaissance du rôle que doit jouer l'expérience comme juge ultime de la validité des hypothèses et des théories. Bien que Galilée lui-même n'ait pas toujours été en mesure (ou qu'il n'ait pas jugé bon dans certains cas) de soumettre ses propres hypothèses au test de l'expérience, l'attitude et la méthode qu'il a proposées sont devenues le fondement d'une nouvelle discipline scientifique, voire d'une nouvelle conception de la science. À ce titre, il mérite d'être appelé le fondateur de la physique moderne.

☆76 Le concept de **luminosité** est défini et décrit un peu plus loin dans le manuel, à la section 2.8, p. 87-88.

☆2.8 LA RELATION INTENSITÉ-LUMINOSITÉ-DISTANCE (P. 87-88)

Le manuel indique que la valeur de la constante C dans la relation intensité-luminosité-distance :

$$I = C \times \frac{L}{D^2}$$

dépend des unités choisies. La valeur qu'il fournit suppose que l'on emploie comme unités pour I , L et D les sirius (sir), la luminosité solaire (L_{\odot}) et les années-lumière (a.l.), respectivement.

Mais si l'on utilise plutôt, pour les mêmes quantités, les unités SI de base, soient des watts par mètre carré (W/m^2) pour l'intensité, des watts (W) pour la luminosité et des mètres (m) pour la distance, la relation s'écrit :

$$I = \frac{L}{4\pi D^2} = 0,0796 \times \frac{L}{D^2} \quad (\text{G-1.1})$$

Dans cette formule, l'absence d'unités entre parenthèses après les variables signifie que cette relation est valable si elles sont toutes exprimées en unités SI de base.

☆2.10 L'ÉTENDUE DE LA VOIE LACTÉE (P. 91-93)

Caroline Herschel est le premier exemple dans le manuel de la présence des **femmes en astronomie**. Il semble bien d'ailleurs qu'il s'agisse là du domaine de la physique où elles ont été (et sont toujours) le plus visibles, comme on peut le constater, entre autres, en effectuant un relevé des noms apparaissant dans les articles de vulgarisation

portant sur l'astronomie. Pourtant, Herschel est la seule (avec Henrietta Leavitt) à être mentionnée dans le manuel. En fait, sauf exception (voir Roy, 1982), cet apport des femmes ne trouve que peu d'échos dans les ouvrages traitant de l'histoire de l'astronomie. Ainsi, on mentionne rarement que Caroline Herschel n'a pas fait qu'assister son frère William, mais qu'elle a exercé une activité scientifique autonome. Par exemple, dans un article de vulgarisation portant sur son frère (Hoskin, 1986), la seule allusion à Caroline Herschel est la suivante :

[...] tout en balayant méthodiquement le ciel bande par bande, il annonçait en criant la position et la description des nébuleuses à sa sœur Caroline qui fut son assistante dévouée tout au long de sa carrière d'astronome.

Cette question pose tout le problème de la place des femmes en sciences et de l'objectivité de l'histoire. Si personne ne nie le fait que les femmes ont de tout temps été reléguées à un rôle subalterne, en sciences comme dans tous les domaines de l'activité humaine, tous et toutes ne sont pas d'accord pour réviser l'interprétation de leur rôle historique. Bien entendu, tout comme dans le cas de l'évaluation de la nature scientifique des travaux des siècles passés, il faut éviter de juger les situations à l'aide de critères qui n'ont de sens que pour notre époque.

Malgré tout, des chercheuses – scientifiques ou historiennes – se sont fixé comme objectif de redonner aux femmes la place qui d'après elles leur revient, appliquant ainsi une forme d'« action positive ». Ce faisant, elles n'ont pas manqué de provoquer des débats houleux au sein de leur communauté, débats aux allures parfois plus politiques que scientifiques, bien que les deux aspects soient souvent difficiles à départager. Peut-on qualifier la science de sexiste? Cette question a-t-elle même un sens? Est-elle « scientifique »? Elle bouscule en tout cas nos conceptions de la science. C'est une histoire à suivre, mais l'auteur de ces lignes ne peut qu'encourager cette démarche dont il partage entièrement les objectifs. Et vous?

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES



G-1.1 L'ASTRONOMIE AVANT L'INVENTION DE L'ÉCRITURE

Il n'est pas difficile d'imaginer que de tout temps les humains ont observé, interrogé et tenté de comprendre le ciel. La recherche de vestiges de cette **astronomie pré-historique** présente toutefois une difficulté majeure dans le cas des civilisations qui ne disposaient pas de l'écriture ou dont l'écriture demeure indéchiffrée. Ces vestiges consistent surtout en des restes d'édifices ou de monuments dans lesquels on tente de découvrir des intentions de nature astronomique. Ainsi, on essaie de relier les orientations des alignements de pierres (menhirs, dolmens) que l'on trouve dans les pays celtiques (Écosse, Bretagne), ou encore les orientations de monuments érigés par les autochtones d'Amérique du Nord (roues médicinales) avec des positions caractéristiques du Soleil, de la Lune ou d'étoiles brillantes. Parmi ces positions, mentionnons les positions extrêmes des levers et couchers de la Lune et du Soleil, les levers hé-

liaques (apparition des étoiles peu avant le lever du Soleil) des étoiles les plus brillantes. De même, on tente de retrouver ce même type de correspondance dans l'orientation de certains édifices imposants, comme les sites mayas; ces derniers sont les seuls où l'on ait observé des orientations reliées aux positions des planètes. D'autres indices prennent la forme d'inscriptions sur des murs d'édifices ou de cavernes, que l'on croit être des représentations d'objets célestes.

Toutefois, ces tentatives d'accorder une signification astronomique sont souvent traitées de pure spéculation. Ainsi, l'**archéoastronomie** demeure encore le théâtre d'âpres débats concernant le caractère astronomique de certaines orientations plus ou moins précises, constatées parmi ces ruines, ou des inscriptions que l'on y a découvertes. En effet, les débats sur le sujet prennent rapidement une allure très technique, qui a plutôt tendance à obscurcir le fond de la question et à décourager les profanes. Dans le cas des Mayas, par exemple, la découverte de documents écrits et partiellement déchiffrés fournit une base solide confirmant leur connaissance très précise de cycles comme ceux des éclipses (cycle de Saros) et de Vénus. Pour ce qui est des peuples autochtones d'Amérique, les indices sont beaucoup plus subtils et la polémique d'autant plus facile. À titre d'illustration, on pourra consulter la critique que Zuiderwijk (1984) adressait aux thèses d'Aveni (1984) portant sur les ruines amérindiennes.

☆ G-1.2 L'ASTRONOMIE AU MOYEN ÂGE

Comme les autres sciences, l'astronomie s'est développée au Moyen Âge dans le respect à peu près intégral des principes et méthodes hérités des Grecs. Entre 800 et 1100, ce travail de redécouverte, de préservation et, parfois, d'approfondissement est l'œuvre des savants musulmans, dont le territoire s'étend de l'Espagne aux confins du Moyen-Orient, en passant par la Sicile. Les œuvres de Platon, d'Aristote et de Ptolémée sont traduites en arabe, commentées et améliorées. Par exemple, au 9^e siècle, Albumasar (Abu ma'shar) rédige une *Introduction à la science de l'astrologie*, ouvrage dans lequel il fusionne la philosophie naturelle d'Aristote et les principes de l'astrologie de Ptolémée. On perfectionne également le modèle des épicycles et de l'équant de Ptolémée. Les savants islamiques ont également remis à l'ordre du jour les mesures en astronomie, en inventant l'astrolabe, appareil permettant à la fois de déterminer l'altitude d'un astre et d'effectuer des calculs de position. Finalement, mentionnons que c'est de cette époque que date l'invention de l'algèbre, une des innovations mathématiques majeures des savants musulmans. L'algèbre est toutefois demeurée peu utilisée au Moyen Âge, en astronomie comme ailleurs.

Ces connaissances ont été récupérées en Europe à partir du 12^e siècle, en partie par des échanges intellectuels entre les centres musulmans proches de l'Europe, en partie à la faveur des Croisades. Les savants européens se contentent d'abord de traduire de l'arabe au latin les œuvres des Grecs, dont une bonne partie était tombée dans l'oubli après la chute de l'empire romain en 476. Puis, comme les musulmans avant eux, ils commencent à les « commenter ». Avec le temps, les contestations du modèle de

Ptolémée et de la physique d'Aristote, tant de la part des Européens que des musulmans, se font plus sérieuses. Toutefois, elles prennent généralement la forme d'hypothèses prudentes avancées comme objets de discussion. Une réforme de l'astronomie ne pouvait réellement avoir lieu avant qu'un modèle novateur ne soit proposé pour remplacer celui de Ptolémée. C'est Copernic qui, le premier, osera lancer le débat.

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

AVENI, A. F. (1984). « Native American astronomy », *Physics Today*, vol. 37, n° 6, juin, p. 25. (voir le site anthonyfaveni.com pour plus de détails)

GINGERICH, O. (1982). « L'affaire Galilée », *Pour la Science*, n° 60, octobre, p. 68-79.

GINGERICH, O. (1986). « Islamic astronomy », *Scientific American*, vol. 254, n° 4, avril, p. 74 (traduit dans *Pour la Science*, n° 102, avril 1986, p. 60).

GINGERICH, O. (1993). « L'astronomie au temps de Christophe Colomb », *Pour la Science*, n° 183, janvier.

HOSKIN, M. (1986). « William Herschel and the making of modern astronomy », *Scientific American*, vol. 254, n° 2, février, p. 106 (traduit dans *Pour la Science*, n° 104, juin 1986, p. 81).

HURÉ, Jean-Marc (1996), « L'astrologie », *La Recherche*, n° 293, décembre, p. 84.

KUHN, T. S. (1957). *The Copernican revolution*, Cambridge, Harvard University Press.

ROY, J.-R. (1982). *L'astronomie et son histoire*, Québec, Presses de l'Université du Québec et Paris, Masson.

VERDET, J.-P. (1990). *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, p. 27-70.

ZUIDERWIJK, E. J. (1984). « Mayan astronomy », *Physics Today*, vol. 37, n° 11, novembre, p. 148.

MODULE 1

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

Même s'il est facile d'imaginer que l'être humain a toujours interrogé les cieux, les preuves tangibles de cette préoccupation, dans le cas des civilisations qui ne possédaient pas l'écriture, sont rares et sujettes à interprétation.

Les premières traces indéniables d'un intérêt pour les phénomènes astronomiques nous viennent des Mésopotamiens, qui ont effectué des relevés systématiques des positions d'objets célestes et mis au point des formules permettant de prédire l'occurrence de certains phénomènes. Comme les Égyptiens et les Chinois de la même époque, ils n'ont toutefois pas proposé de modèle explicatif des mouvements célestes.

La distinction entre la science et les autres activités humaines dépend étroitement du contexte social et historique qui en constitue le théâtre, de sorte que les discussions portant sur la nature scientifique des travaux des civilisations qui nous ont précédés sont très délicates. Par contre, il est possible de dresser une liste de critères permettant d'établir ce qui caractérise la science *de nos jours*. Malgré tout, les zones grises demeurent nombreuses.

En inventant les modèles explicatifs et en utilisant des mesures pour obtenir des résultats numériques, les Grecs ont donné une direction nouvelle à l'investigation des phénomènes naturels; cette orientation allait demeurer inchangée pendant plus d'un millénaire.

La théorie des épicycles de Ptolémée représente une des grandes réalisations scientifiques grecques. Elle réussit, au prix d'une relative complexité, à représenter correctement (compte tenu de la précision des mesures de l'époque) l'ensemble des mouvements célestes.

La science grecque a été préservée de l'oubli par les travaux des savants musulmans, qui traduisirent en arabe, vers le milieu du Moyen Âge, les œuvres des principaux auteurs grecs. Elles furent par la suite traduites en latin par les savants européens. À partir de cette époque, tant les savants musulmans que leurs confrères européens commencèrent à émettre des doutes (souvent sous forme d'hypothèses prudentes) sur le modèle de Ptolémée et sur la physique d'Aristote.

La parution en 1543 de l'ouvrage de Nicolas Copernic, *De Revolutionibus orbium cœlestium*, qui attaque de front un des principaux postulats de la pensée grecque, déclenche une véritable révolution, à l'issue de laquelle l'astronomie et la physique en général vont repartir sur de nouvelles bases. Malgré tout, l'hypothèse de Copernic est entachée de beaucoup d'éléments traditionnels. Ce sont ses successeurs, Tycho

Brahé, Kepler et surtout Galilée, qui vont contribuer à en faire triompher le caractère révolutionnaire.

Avec ses observations au télescope, conjuguées à l'importance qu'il accorde à la vérification expérimentale des théories, Galilée se présente comme le défenseur acharné du modèle de Copernic.

Au 19^e siècle, la mesure de la parallaxe des étoiles a permis de déterminer de manière purement géométrique la distance des étoiles les plus proches de nous (jusqu'à quelques centaines d'années-lumière).

Au 20^e siècle, la découverte de la relation période-luminosité des céphéides et l'amélioration des télescopes a permis de déterminer les distances des étoiles jusqu'à 100 Ma.l. Cela permet de définir de nouveaux étalons de luminosité (l'étoile la plus brillante d'une galaxie, certains types de galaxies, certaines supernovæ) qui étendent notre capacité de déterminer les distances à des Ga.l., avec cependant une précision décroissante.

Les travaux de Shapley sur les amas globulaires, fondés sur l'observation de céphéides, ont permis de démontrer que le Soleil, à son tour, n'était pas au centre de notre Galaxie.

MODULE 1

ACTIVITÉS

QUESTIONS DE RÉVISION

Chapitre 1 : 1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

Chapitre 2 : 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 23

PROBLÈMES DU MANUEL

Chapitre 1 : P1, P2, P3, P4, P8.

Chapitre 2 : P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P12, P13, P14.

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

Répondez à deux questions parmi les trois suivantes.

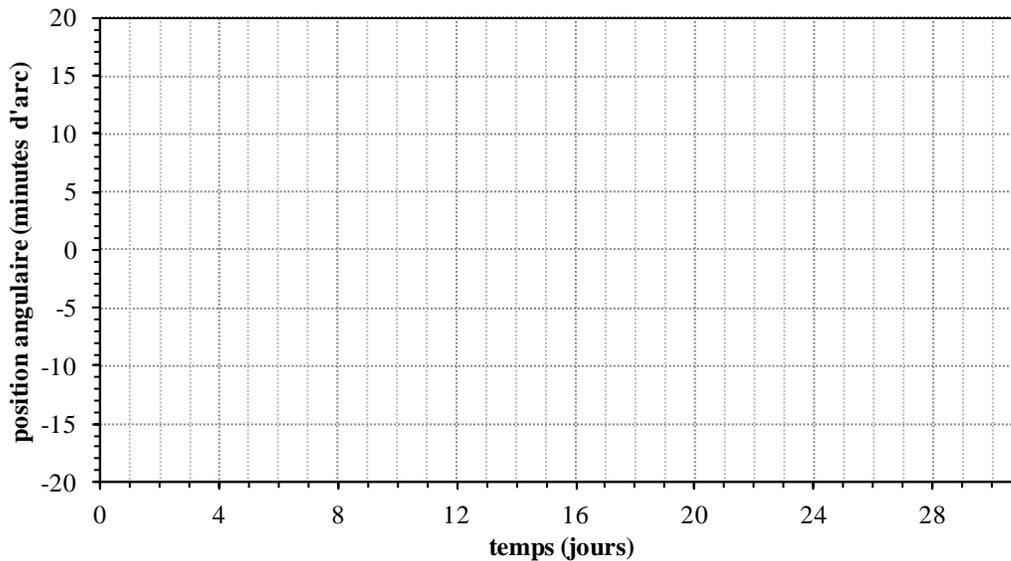
- G1.1 Confrontez une science sociale que vous connaissez (histoire, sociologie, économique, science politique, anthropologie, psychologie, etc.) avec les critères de scientificité énoncés dans ce module. Que concluez-vous?
- G1.2 L'acupuncture est-elle une science? Vous devez bien sûr justifier votre réponse, qui n'a pas besoin d'être « oui » ou « non ». Si vous ne possédez pas suffisamment d'informations sur cette discipline, préparez les questions que vous poseriez à quelqu'un qui affirmerait que l'acupuncture est une science.
- G1.3 Essayez de trouver un site Web traitant d'une « science » non officielle (autre que l'astrologie ou l'acupuncture) qui prétend au statut de science. La présence de termes se terminant en « logie », comme chiologie, numérologie, réflexologie, constitue un des indices permettant de reconnaître ce phénomène. Confrontez les affirmations (ou les omissions) du site en ce qui a trait au caractère scientifique de la discipline décrite, avec les critères présentés dans le guide. Pouvez-vous réellement prouver qu'il ne s'agit pas d'une science? Ou plutôt, si vous croyez que le fardeau de la preuve leur revient, est-ce que les auteurs appuient leur prétention à la scientificité sur une argumentation pertinente?

- G1.4 Expliquez pourquoi la découverte par Hipparque de la précession des équinoxes suggère qu'il possédait des relevés (probablement d'origine mésopotamienne) des positions des astres couvrant une période de plusieurs siècles.
- G1.5 Décrivez deux éléments traditionnels et deux éléments révolutionnaires dans l'œuvre de Copernic.
- G1.6** Un des exploits accomplis par Galilée est d'avoir réussi à déterminer assez précisément la période de révolution des satellites de Jupiter après moins d'un mois d'observation. Imaginez que vous êtes un Galilée extraterrestre, vivant dans un autre système solaire. Vous êtes la première personne à observer les quatre satellites de Xantzi, la planète la plus importante de votre système solaire. Le tableau suivant présente le relevé de vos 30 premiers jours d'observation, qui, comme par hasard, ont la même durée que chez nous!

TABLEAU G-1.1
Positions des satellites de Xantzi pendant un mois.

temps (jours)	positions (minutes d'arc)				temps (jours)	positions (minutes d'arc)			
1	-15,5	-7,1	-4,5	7,4	17	-15,5	-5,3	12,7	18,6
2	-14,4	-9,6	6,2		18	-14,4	2,7	10,9	16,8
3	-13,9	-11,1	-1,4	5,6	19	-11,1	6,2	7,9	13,5
4	-17,0	-6,0	-7,5	10,6	20	-6,0	5,1	9,2	
5	-18,7	-6,0	12,7		21	-6,7	-2,9	4,0	
6	-18,8	1,6	5,4	11,3	22	-11,2	-7,9	-1,5	5,8
8	-14,4	5,8	14,3		23	-12,7	-6,8	-4,8	10,9
9	-10,2	-6,0	-1,9	15,5	25	-15,4	-5,8	8,0	15,5
10	-10,8	-7,7	-5,2	14,4	26	-17,9	4,6	14,4	
12	-11,1	2,2	5,9		27	-18,9	-3,4	7,0	11,1
14	-5,8	5,5	14,7		28	-18,3	-8,0	6,0	11,4
15	-10,9	2,4	6,3	17,5	30	-12,6	-5,8	3,7	10,5
16	-14,3	-7,8	11,0	18,8					

Vous remarquerez que les satellites ne sont pas toujours visibles tous les quatre – lorsqu'ils sont trop près l'un de l'autre ou de Xantzi – et que certaines nuits n'étaient pas propices à l'observation... ou que vous avez pris, à l'occasion, un petit repos! Êtes-vous en mesure de déterminer, à l'aide de ces données, la période de révolution de quelques-uns des quatre satellites de Xantzi?



Note: On a choisi le centre de la planète comme origine du système de coordonnées. Les valeurs négatives correspondent à un satellite aperçu d'un côté de la planète; les valeurs positives correspondent à l'autre côté.

Suggestion : Tracez sur le graphique plus haut les positions des satellites pour l'ensemble des jours d'observation. Pour chacun des satellites, en commençant par celui qui s'éloigne le plus de Xantzi, essayez de joindre les points faisant partie de la courbe (une sinusoïde) correspondant aux positions successives d'un objet qui se déplace sur un cercle et que l'on observe par la tranche. Si vous n'êtes pas familier avec de tels graphiques, vous pouvez consulter la section 1 de l'appendice G-3.

G1.7 Le tableau des deux pages suivantes présente (dans la colonne de gauche) un certain nombre de civilisations ou d'individus qui ont contribué de façon significative à l'évolution de l'astronomie, ainsi que (sur la première ligne) différentes catégories dans lesquelles on peut classer leurs contributions. Chacune des cases du tableau relie donc une civilisation (ou un personnage) et une catégorie de contribution.

On a hachuré les cases pour lesquelles le manuel ou le guide ne fournissent aucune information, même si, dans quelques cas, il serait possible de les remplir.

Essayez de remplir le tableau. Vous devrez toutefois attendre au prochain module pour remplir ou terminer les lignes qui concernent Galilée, Tycho Brahé, Kepler et Newton.

ACTIVITÉ G-1.7

	Observations ou instruments d'observation	Calculs ou outils mathématiques	Lois E : empiriques F : fondamentales D : dérivées
Mésopotamiens			
Grecs			
Musulmans			
Copernic			
Tycho Brahé			
Kepler			
Galilée			
Newton			

ACTIVITÉ G-1.7

	Modèle du système solaire	Utilisation ou critique de travaux antérieurs	Contribution(s) marquante(s)
Mésopotamiens			
Grecs			
Musulmans			
Copernic			
Tycho Brahé			
Kepler			
Galilée			
Newton			

Module 2

SUR LA TERRE COMME AU CIEL :

L'UNIFICATION DE LA PHYSIQUE

TERRESTRE ET CÉLESTE

PAR LA GRAVITATION... ET L'ÉTUDE DE LA LUMIÈRE

Manuel

Chapitre 3 *La gravitation*

Chapitre 4 *Les codes de la lumière*

Chapitre 5 *Les yeux artificiels*

Cette partie du cours vise d'abord à vous aider à saisir toute la portée de la contribution de Newton au développement de notre compréhension de l'Univers, par le biais de la présentation de ses célèbres lois, toujours aussi pertinentes, après plus de trois siècles, pour l'étude des mouvements célestes. On y traite ensuite d'un autre domaine de la physique que le même Newton a contribué à développer, l'optique, qui étudie la lumière, véritable messagère des secrets de l'Univers.

MODULE 2

PARTIE I : NEWTON ET LA GRAVITATION

PRÉSENTATION

Et la même année [1666] j'ai commencé à imaginer que l'effet de la gravité pouvait s'étendre jusqu'à l'orbite de la Lune, et [...] par conséquent j'ai comparé la force requise pour maintenir la Lune sur son orbite avec la force gravitationnelle à la surface de la Terre; j'ai trouvé que les deux réponses étaient presque identiques.

Isaac Newton.

On peut affirmer que c'est Newton qui écrit le chapitre final de la révolution déclenchée par Copernic. En effet, si la publication, en 1543, du *De Revolutionibus* en avait donné le signal de départ, celle des *Principia* de Newton, en 1667, en constitue l'aboutissement. Il ne faut tout de même pas surestimer les mérites de Newton : entre l'époque de Copernic et celle de Newton, de nombreux scientifiques ont contribué à définir une nouvelle façon d'interroger le monde et d'évaluer les réponses obtenues. Pourtant, la synthèse magistrale que réalise Newton, à l'aide d'outils mathématiques (calcul différentiel et intégral) qu'il a lui-même élaborés, le place parmi les plus grands noms de la science. Ses successeurs dans le domaine de la mécanique ne feront qu'appliquer le cadre théorique qu'il leur aura fourni, le raffinant à l'occasion. Il faudra attendre le 20^e siècle, avec les travaux d'Einstein, pour que les limites d'application de la théorie de Newton soient mises en évidence. Il demeure malgré tout que, dans l'immense majorité des situations qui nous entourent, la mécanique de Newton demeure encore de nos jours l'outil d'analyse par excellence.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

1. Expliquer comment les travaux de Tycho Brahé, Kepler et Galilée ont pavé la voie à une acceptation du modèle héliocentrique de Copernic.
2. Expliquer comment la synthèse de la physique terrestre et céleste qu'effectua Newton permit d'écrire le chapitre final de la révolution copernicienne.
3. Appliquer qualitativement la cinématique et les lois de Newton aux mouvements des corps célestes.
4. Reconnaître les divers statuts des lois en physique et expliquer leur rôle dans l'évolution de cette science.

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)
principe d'inertie	112 [-3]	dynamique	G-2.1
force	112 [-2]	accélération	G-2.1
gravitation universelle	115 [31]	mouvement rectiligne uniforme	G-2.1
masse	116 [-6]	mouvement circulaire uniforme	G-2.1
poids	3.5	vecteur	G-2.1
définition conceptuelle	3.5	loi de Bode	G-2.2
définition opérationnelle	3.5	loi empirique	G-2.3
action	3.5	loi dérivée	G-2.3
réaction	3.5	loi fondamentale	G-2.3
cinématique	G-2.1	théorie	G-2.3

LECTURES

1. Introduction de la deuxième partie et sections 3.1 et 3.2 (p. 106-112)
2. Explications supplémentaires
G-2.1 *Cinématique, dynamique et vecteurs* (p. G-71 à G-78)
3. Sections 3.3 à 3.6 (p. 112-119)
4. Compléments
3.2 *De la troisième loi de Kepler à la force en $1/r^2$* (p. 131-132)
3.3 *La chute de la Lune* (p. 132-133)
3.4 *La loi de la gravitation universelle* (p. 133)
3.5 *La loi de Kepler généralisée* (p. 133-134)
5. Explications supplémentaires
G-2.2 *La loi de Bode* (p. G-78)
6. Explications supplémentaires
G-2.3 *Lois et théories* (p. G-78 à G-80)
7. Sujet connexe : *La nature de la science et de la technologie* (p. 205-208)

MODULE 2, PARTIE I

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

3.3 LA PHYSIQUE DES ORBITES (P. 112-114)

Avant d'entreprendre la lecture de la section 3.3, nous vous invitons à lire les explications supplémentaires G-2.1, qui présentent les notions fondamentales de cinématique et de dynamique, ainsi que le concept mathématique de vecteur, qui sont à la base de l'étude du mouvement.

- ☆112 Le **principe d'inertie** affirme que, en l'absence de forces exercées sur eux, les objets conservent leur état de repos ou de mouvement en ligne droite à vitesse constante. Ce principe a d'abord été énoncé par Galilée, avec cette différence que Galilée songeait à un mouvement parallèle à la surface de la Terre, donc en forme de cercle, plutôt qu'à un mouvement en ligne droite. Pour une balle qu'on lance, ça ne fait pas beaucoup de différence, mais pour un satellite, c'est tout autre chose. Ce principe a été par la suite mis dans sa forme définitive par Descartes, pour être repris plus tard par Newton.

Il convient par la même occasion de se pencher un peu plus sur le concept de **force**, dont nous possédons tous une certaine intuition : on parle de personnes plus fortes que d'autres, de quelqu'un qui « force sur un objet », etc. La définition que donne la physique du concept de force est reliée à cette notion, tout en étant beaucoup moins restrictive. Elle peut, car ce n'est pas la seule possibilité, s'énoncer ainsi : une force est tout *effet* susceptible, lorsqu'il est appliqué sur un objet, d'en modifier la vitesse.

La grande différence avec le sens usuel de force, c'est qu'il n'est pas nécessaire qu'il y ait une action visible effectuée sur un objet (quelqu'un qui pousse ou un ressort étiré), ou encore que l'objet subisse un changement perceptible (forme ou position) pour que l'on conclue qu'il y a une ou des forces appliquées sur cet objet. Certaines forces n'ont pas de cause évidente ou, encore, peuvent être masquées par d'autres forces. C'est souvent le recours aux lois de Newton qui oblige en quelque sorte à conclure à la présence d'une force qui, autrement, risquerait de passer inaperçue. Ainsi, une situation où, pour le commun des mortels, il « ne se passe rien », comme un livre immobile sur une table, sera vue avec la lunette de la mécanique de Newton comme le théâtre de la lutte entre deux forces opposées qui s'exercent sur le volume : l'attraction gravitationnelle et une force exercée par... la table et qui l'empêche de tomber.

De la même manière, dans le cas de planètes, d'étoiles ou de galaxies, des forces d'origine inconnue sont révélées par la confrontation des mouvements observés et des

lois de Newton (voir plus loin). Certes, le défi demeure entier de découvrir la cause de ces forces, mais on a acquis la certitude de leur existence.

Finalement, il faut souligner qu'une force n'est connue entièrement, dans le sens où l'on peut en prédire l'effet, que si l'on connaît à la fois sa grandeur et la direction dans laquelle elle s'exerce. On peut de plus montrer par une expérimentation que deux ou plusieurs forces agissant en même temps sur un objet causent le même effet qu'une force unique égale au résultat de l'addition des *vecteurs* correspondant à ces forces. La force est donc elle aussi, comme le déplacement et la vitesse, un vecteur.

☆115 La loi de la **gravitation universelle** s'écrit mathématiquement ainsi :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \text{G-2.1}$$

où m_1 et m_2 sont les masses des objets et r la distance qui les sépare. Elle signifie que deux objets quelconques s'attirent avec une force dont la grandeur peut être calculée à l'aide de cette relation. Pour les objets qui nous entourent, cette force est certainement très faible, comme on le mentionnait au module 1. Cela se traduit par la très petite valeur de la constante de la gravitation universelle G , soit $6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$. En effet, cette valeur implique que deux objets de 1 kg, placés à un mètre de distance l'un de l'autre, exercent chacun une force d'environ 10^{-10} N (symbole du newton, l'unité de la force, ainsi nommée en l'honneur de... vous devinez qui!). Cette force, cent milliards de fois plus faible que le poids de l'un des objets, ne peut évidemment avoir aucun effet notable. Pourtant, Henry Cavendish réussit au 18^e siècle à la mesurer. Pour ce faire, il a utilisé un objet très lourd en forme d'haltère, suspendu en son centre à un long fil. Il a pu ainsi observer la légère rotation de l'haltère causée par la présence de sphères très massives placées près de chaque extrémité de celle-ci.

Soulignons qu'en toute rigueur, l'expression G-2.1 n'est exacte que pour des objets infiniment petits. Elle constitue toutefois une bonne approximation, d'autant plus précise que les objets sont petits en comparaison de la distance r qui les sépare. De plus, Newton a montré qu'un objet de forme sphérique produit (ou subit, selon le cas) la même force gravitationnelle qu'un objet infiniment petit de même masse placé au centre de la sphère.

Ce résultat, qui n'est pas la moindre des réussites du savant anglais, permet d'élargir considérablement le domaine d'application de la loi. Par exemple, on peut l'utiliser pour calculer la force exercée par la Terre (ou tout autre corps céleste sphérique) sur un objet quelconque : il suffit que l'objet soit beaucoup plus petit que la distance qui le sépare du centre de la Terre. Ainsi, les objets situés près de la surface de la Terre peuvent être considérés comme attirés par une petite « Terre » située à 6400 km sous la surface de la planète.

☆3.5 LA MASSE DES OBJETS CÉLESTES (P. 116-118)

La théorie de la gravitation universelle et les trois lois de Newton, présentées brièvement au complément 3.4, sont parmi les plus célèbres de la physique, en même temps que les plus simples peut-être.

Rappelons que les trois lois de Newton sont les suivantes. La première ne fait que réaffirmer, sous une forme plus absolue, la loi d'inertie proposée par Galilée et mise au point par Descartes. La seconde est mieux connue sous sa transcription mathématique, $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, qui fait apparaître les concepts clés de la dynamique de Newton, soit la force, la masse et l'accélération. Quant à la troisième, appelée aussi loi d'action-réaction, c'est en même temps la plus lourde de conséquences et la plus mal comprise. Examinons ici, un peu plus en détail, ces deux dernières.

- ☆116 Il convient d'abord de préciser le sens des concepts qu'elles font intervenir. On a dit dans ce chapitre que les objets possédaient la propriété de résister, à des degrés divers, à toute tentative de changer leur vitesse, c'est-à-dire de les accélérer. La quantité qui permet de chiffrer cette plus ou moins grande difficulté s'appelle la **masse**. On dit ainsi que la masse est une mesure de l'inertie*.

Bien que dans la vie de tous les jours on utilise indistinctement les termes *masse* et *poids*, il est essentiel, pour bien comprendre les lois de Newton, de distinguer les deux concepts. Le poids est la mesure de la force que la Terre (ou tout autre corps céleste sur lequel vous pourriez vous trouver!) exerce sur un objet ou, de façon presque équivalente, la force qu'il faut exercer pour tenir un objet immobile au-dessus du sol. Ainsi, lorsque l'on pèse un objet sur une balance à ressorts, ce n'est pas la masse de l'objet que l'on mesure de cette façon, mais son **poids**. Bien sûr, notre expérience nous enseigne qu'il y a un lien entre les deux; il est clair que plus un objet est lourd, plus il est difficile à accélérer. En pratique, la mesure du poids d'un objet nous permet, si l'on prend certaines précautions, de connaître également sa masse.

Un petit effort de réflexion suffit toutefois pour nous convaincre que ce lien n'est pas une nécessité, mais bien un fait expérimental. Il est possible, bien que difficile, d'imaginer que sur une autre planète, par exemple, les objets plus faciles à soulever soient plus difficiles à accélérer et vice versa. Mais jusqu'à preuve du contraire, rien de tel ne semble se produire : la physique semble être la même partout, et c'est très bien ainsi! Sinon, comment pourrait-on s'en servir pour comprendre l'Univers?

L'importance de cette distinction entre la masse (mesure de l'inertie d'un objet) et le poids (force qu'il faut exercer pour tenir un objet immobile) tient dans le fait que la masse d'un objet représente une de ses propriétés intrinsèques, alors que son poids

* Dans certains ouvrages, on définit plutôt la masse d'un objet comme la mesure de la quantité de matière. Cette définition n'est pas contradictoire avec celle que nous proposons ici, mais de l'avis de l'auteur de ces lignes, elle est beaucoup moins féconde. Comment, avec une telle optique, arriverait-on à définir la masse de manière opérationnelle?

dépend d'une série de facteurs *externes*. Ainsi, les objets sont un peu (0,5 %) plus légers à l'équateur qu'aux pôles et leur poids diminue avec l'altitude; sur la Lune, le poids des objets est six fois plus faible que sur la Terre. Dans une station spatiale en orbite, ce poids est strictement *nul*, si on le définit comme la force qu'il faut exercer pour le garder immobile. Dans tous les cas toutefois, les objets présentent la même résistance à l'accélération : ils gardent la même masse.

Voici une petite expérience qui vous aidera sans doute à mieux comprendre la distinction entre le poids et la masse. Remplissez d'eau un évier ou un plat à vaisselle. Remplissez également d'eau un petit bocal de verre dont vous refermez le couvercle; il doit être suffisamment rempli pour ne pas flotter. Tenez-le juste au-dessous du niveau de l'eau. Vous paraît-il aussi lourd que lorsqu'il est hors de l'eau? Sortez-le pour vous en convaincre! Si vous avez déjà déplacé des pierres dans une rivière ou un lac, vous devez connaître ce phénomène.

Maintenant, plongez de nouveau le bocal dans l'eau et essayez de l'accélérer le plus rapidement possible. Une bonne façon de procéder est de lui faire subir, à l'aide du poignet, un mouvement de va-et-vient le plus rapide possible. Répétez l'expérience avec le bocal hors de l'eau. Vous paraît-il alors plus difficile à accélérer?

Tout ceci n'est qu'une simulation, bien sûr. Elle vous permet toutefois d'expérimenter ce que l'on pourrait ressentir si l'on se trouvait sur une autre planète, Mars par exemple. Dans notre expérience, l'eau de l'évier exerce une poussée vers le haut sur le bocal, ce qui diminue son poids apparent, tout comme un objet qui nous est familier pèserait moins sur Mars que sur Terre, à cause de la dimension plus petite de la planète. Toutefois, cette réduction du poids ne modifie en rien la masse. Dans tous les cas, les objets sont aussi difficiles à accélérer. Il s'agit là d'une propriété intrinsèque des objets, insensible à tout phénomène extérieur.

La seule façon de mesurer *directement* la masse d'un objet serait donc de le soumettre à une force donnée, de mesurer son accélération, puis de comparer cette accélération avec celle d'une masse étalon, le kilogramme par exemple, soumise à la même force. Si l'accélération de l'objet est, disons, deux fois plus grande que celle de l'étalon, on conclura que sa masse est deux fois plus petite, soit 0,5 kg.

On voit dans ce qui précède un exemple des deux types de définition d'un même concept physique, ici la masse :

- la **définition conceptuelle** (ou tout simplement définition) : la masse comme mesure de l'inertie;
- la **définition opérationnelle** : la masse comme résultat d'une procédure de comparaison avec un étalon fournissant une valeur numérique précise.

Les deux types de définition sont complémentaires et servent toutes deux à mieux saisir la nature exacte du concept étudié. Ainsi, la définition de force qui a été donnée plus haut était une définition conceptuelle; une définition opérationnelle de la force

mentionnerait plutôt le choix d'un étalon, un ressort donné étiré de telle longueur par exemple, et une méthode de comparaison de ce dernier avec une force quelconque.

La troisième loi, quant à elle, est quelque peu mystérieuse. Elle affirme que les objets ne sont pas isolés les uns des autres, qu'ils sont tous en interaction. Elle affirme que toute force appliquée sur un objet trouve sa contrepartie dans une autre force, égale et opposée, appliquée sur un autre objet. Elle affirme également que les forces dont on constate ou déduit la présence peuvent toujours être attribuées à un objet, si lointain soit-il, qui subit aussi une force de même grandeur, mais de sens opposé. On appelle souvent **action** et **réaction** ces paires de forces qui, faut-il le rappeler, sont appliquées sur des objets différents. L'attribution du terme *action* ou *réaction* à l'un ou l'autre des membres de chacune de ces paires dépend du contexte et nous ramène souvent au problème de la poule et de l'œuf.

Mais comment cette loi s'applique-t-elle aux planètes? On a déjà parlé au chapitre 0 de la rotation des corps célestes comme la Terre et la Lune autour de leur centre de masse commun. Pour chaque corps, la force dirigée vers le centre de masse de l'autre corps qui le maintient sur son orbite est un membre d'une paire action-réaction, chacun des deux corps exerçant une force sur l'autre (figure G-2.1). Ces forces, d'égale grandeur et de sens opposés, forment une paire action-réaction.

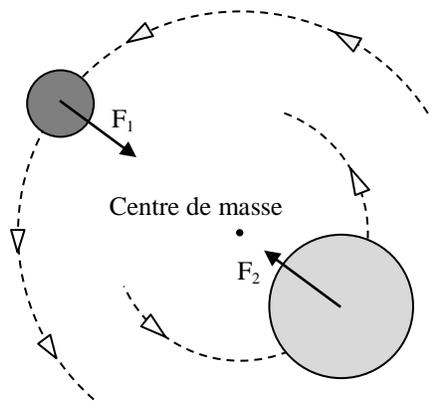


FIGURE G-2.1

Application de la 3^e loi de Newton : \mathbf{F}_1 et \mathbf{F}_2 sont des forces de même grandeur et de sens opposés.

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES



G-2.1 CINÉMATIQUE, DYNAMIQUE ET VECTEURS

Il convient d'introduire et de distinguer deux concepts touchant l'étude du mouvement : la **cinématique** et la **dynamique**. Bien que les deux termes désignent l'étude du mouvement, ils s'attachent à en décrire des aspects différents, mais complémentaires. La cinématique décrit, à l'aide des mathématiques, les *caractéristiques* de différents types de mouvements (rectilignes, circulaires, elliptiques, etc.) observés ou

hypothétiques. Elle définit d'abord précisément ce que signifient des termes comme vitesse, accélération, etc. Elle se demande ensuite comment varie, pour les différents types de mouvements possibles, la position ou la vitesse d'un objet en fonction du temps, ou la vitesse en fonction de la position. Les lois de Kepler que vous avez vues à la section 3.2 du manuel en sont un bon exemple.

La dynamique, elle, s'intéresse avant tout aux *causes* du mouvement. Elle tente de spécifier les conditions qui entraînent tel ou tel type de mouvement, ou encore d'étudier la façon dont des agents extérieurs (forces) influent sur les trajectoires. La cinématique pourra alors être invoquée pour connaître les détails de cette trajectoire. Ainsi, la loi de l'inertie de Galilée, par exemple, relève avant tout de la dynamique.

L'inertie est d'ailleurs un des concepts clés de la mécanique. Pour bien le comprendre, il faut aussi connaître la signification du concept d'accélération. Tout le monde a une notion intuitive de l'accélération : on a entendu parler de courses d'accélération; la publicité des voitures de sport vante leur accélération, chiffres à l'appui; on a tous déjà ressenti les effets de l'accélération dans une voiture, le métro ou un avion. Accélération signifie de toute évidence vitesse qui varie, c'est-à-dire une vitesse dont la grandeur augmente ou diminue ou, encore, une vitesse dont la direction change, comme vous le verrez un peu plus loin.

De son côté, l'inertie est la propriété qu'ont les objets de s'opposer à toute tentative visant à modifier leur vitesse, c'est-à-dire les accélérer. Vous pouvez ressentir son existence lorsque vous faites l'épicerie : plus votre panier est plein, plus votre chariot devient difficile à mettre en mouvement ou à immobiliser.

La loi de l'inertie va plus loin : elle affirme qu'en l'absence de force, les objets conservent indéfiniment la même vitesse ou leur état de repos, selon le cas. Cette propriété ne saute pas aux yeux, on vous l'accorde. Selon toute évidence, les objets que l'on met en mouvement, tels les paniers d'épicerie, ont plutôt tendance... à s'arrêter. C'était d'ailleurs le point de vue d'Aristote, et c'est probablement le vôtre aussi. Ici encore, comme pour la rotation de la Terre, ce n'est pas l'accord avec l'intuition qui déterminera le bien-fondé de la loi de l'inertie, mais plutôt sa capacité à fournir un cadre explicatif englobant un ensemble de situations considérées auparavant comme distinctes.

Vue sous cet angle, la loi de l'inertie a connu un succès impressionnant. Elle nous force toutefois à remettre en question une bonne partie de nos intuitions – que l'on appelle aussi préconceptions – touchant le mouvement. On ne s'interrogera plus sur ce qui entretient un mouvement qui perdure, tel celui des planètes par exemple. On cherchera plutôt à découvrir ce qui fait que les objets que l'on observe ne se déplacent pas à vitesse constante en ligne droite. Au lieu de chercher la cause des mouvements, on essaie de découvrir ce qui les empêche d'être de simples mouvements rectilignes uniformes, c'est-à-dire à vitesse constante, qui eux ne demanderaient aucune explication autre que de savoir ce qui a démarré le mouvement.

Ainsi, si les objets ont tendance à s'arrêter, c'est parce que des forces extérieures s'opposent à leur déplacement. En l'absence de ces forces, le mouvement durerait éternellement. L'affirmation « il faut un moteur pour faire avancer une voiture » devient synonyme de « un moteur est nécessaire pour contrer l'effet des forces tendant à freiner une voiture ». Il s'agit là d'un changement de perspective radical, mais indispensable.

On utilise aussi le concept d'inertie pour comparer les objets entre eux. On dira qu'un objet possède plus d'inertie qu'un autre s'il est plus difficile de l'accélérer ou de le freiner, ce qui est équivalent.

Une fois cette notion acquise, il faut l'intégrer à l'étude du mouvement des planètes, car bien que celles-ci ne s'arrêtent jamais, elles ne se déplacent pas en ligne droite à vitesse constante, selon un **mouvement rectiligne uniforme**, mais bien sur des orbites courbes, des ellipses. Suivant en cela l'exemple de Hooke, la plupart des études élémentaires sur les mouvements des corps célestes commencent par remplacer les orbites elliptiques par des orbites circulaires (comme on le fait au complément 3.2), que les planètes parcourent à vitesse (angulaire) constante, effectuant ainsi un **mouvement circulaire uniforme**. Pour la plupart des planètes, il s'agit d'une bonne approximation.

Mais comment s'applique la loi de l'inertie à ce type de mouvement? Quelques dizaines d'années avant Hooke, Galilée s'était buté à ce problème. Une force est-elle nécessaire pour maintenir un objet à vitesse constante sur un cercle, s'est-il demandé? Dans l'affirmative, quelle est la grandeur et quelle est la direction de cette force?

La réponse à ces questions n'est pas celle que Galilée avait proposée, car pour lui un objet laissé à lui-même devait effectuer naturellement un mouvement circulaire uniforme; la réponse passe par une série de raisonnements esquissés au complément 3.2 et aussi dans les paragraphes qui suivent. La clé de voûte est la prise de conscience qu'un mouvement circulaire, même uniforme, est un mouvement accéléré, nécessitant donc l'action d'une force qui, d'après Newton, devrait être dirigée dans la même direction que cette accélération, soit vers le centre de l'orbite. Mais comment un mouvement à vitesse constante peut-il être en fait accéléré? Le paradoxe disparaît lorsque l'on examine plus en profondeur les notions de vitesse et d'accélération.

Comme pour la notion d'accélération, nous avons aussi une notion intuitive de la vitesse : par exemple, c'est ce que l'on peut lire sur l'odomètre d'une voiture. Les unités les plus utilisées et avec lesquelles nous sommes les plus familiers sont les km/h, qui indiquent bien qu'il s'agit d'un quotient, le rapport entre une distance parcourue et le temps pris pour franchir cette distance. Plus on va vite, moins on mettra de temps à effectuer un trajet donné ou, encore, plus on parcourra de distance en un temps donné.

Jusqu'ici, rien de bien nouveau, direz-vous. La physique demande toutefois plus que d'être simplement capable de dire s'il y a ou non accélération, c'est-à-dire si la

vitesse varie; elle demande que l'on définisse certains concepts mathématiquement, de façon à les spécifier complètement, en leur associant une valeur numérique, par exemple.

Réfléchissez bien à ce qui suit : la seule donnée de la vitesse d'un objet suffit-elle pour décrire de façon complète le comportement de cet objet? Si l'on vous dit qu'un avion quitte un aéroport donné et vole à 500 km/h, pourrez-vous placer sur une carte l'endroit où il sera rendu au bout d'une heure? À 500 km de son point de départ bien sûr, mais où exactement? Il est clair que pour répondre à cette question, il faut aussi connaître la direction qu'a prise l'avion. On peut donc dire que la vitesse n'est entièrement spécifiée que si l'on possède deux nombres : sa grandeur (nombre de km/h ou de m/s) et sa direction (20° à l'est du nord, par exemple).

Les quantités physiques qui nécessitent plus d'un nombre pour être spécifiées complètement sont appelées **vecteurs**. Elles doivent obéir, en outre, à certaines lois algébriques simples; ne vous inquiétez pas, cette condition sera remplie pour toutes les quantités de ce type que vous verrez dans le cours. Même si dans la langue courante – et souvent aussi en physique – on a l'habitude de dire : la vitesse de cet objet est de tant de km/h, il faut être conscient que l'on parle alors uniquement de la grandeur du vecteur vitesse. En toute rigueur, il faudrait dire : « la grandeur de la vitesse de cet objet est de tant de km/h » ou encore « la vitesse de cet objet est de tant de km/h, à tant de degrés par rapport au nord ». Si vous vous souvenez de la discussion du chapitre 0 portant sur le concept de position, vous réaliserez que la position est également un vecteur.

Sur un schéma, on représente une quantité vectorielle par une flèche (figure G-2.2) dont l'orientation correspond à la direction du vecteur et dont la longueur représente, à l'échelle, la grandeur du vecteur. De plus, dans le texte ou dans les équations, le symbole mathématique représentant un vecteur est en caractère gras ou surmonté d'une flèche; on représente sa grandeur par le symbole en italique. Ainsi, les expressions « \mathbf{v} ou \vec{v} est constant » et « v est constant » ne signifient pas la même chose.

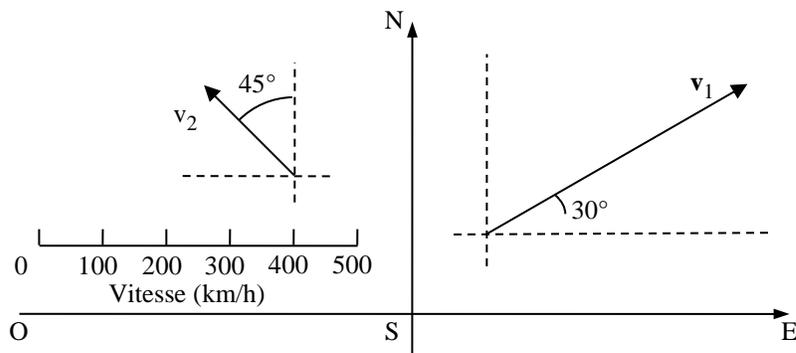


FIGURE G-2.2

Les vecteurs \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 représentent les vitesses de deux avions. Le premier se déplace à 400 km/h à 30° au nord de l'est, le second à 200 km/h à 45° à l'ouest du nord.

Vous vous demandez sans doute à quoi rime cette digression et quel est son lien avec le problème qui nous occupe, soit la physique des orbites et le mouvement circulaire uniforme. Eh bien! On a dit jusqu'à maintenant que dans le langage courant un objet est dit accéléré si sa vitesse augmente. En physique, on parle d'accélération lorsque la vitesse change, quelle que soit la nature de ce changement. Ainsi, une voiture qui freine subit aussi une accélération; évidemment, il existe une façon de distinguer cette accélération de celle d'une voiture dont la vitesse augmente, mais là n'est pas notre propos.

En vertu de ce qui vient d'être établi, une vitesse comporte une grandeur et une direction; si la direction de la vitesse change, ce n'est plus la même vitesse. Une vitesse qui change est donc une vitesse dont la grandeur *ou* la direction change, ou encore les deux à la fois. Or, dans un mouvement circulaire à vitesse constante – on devrait dire « à une vitesse de grandeur constante » –, la direction de la vitesse change continuellement. On en conclut que la vitesse, en tant que vecteur, change aussi continuellement. Il s'agit donc bien d'un mouvement accéléré.

C'est une chose de déterminer si un objet est accéléré ou non, mais c'en est une autre de déterminer, à partir de la connaissance de sa vitesse en différents instants, la grandeur et la direction de cette accélération, car, vous vous en doutiez, l'accélération est aussi un vecteur. Comment, par exemple, démontrer que l'accélération d'une planète se déplaçant sur un cercle de rayon r à vitesse constante v est égale à v^2/r et est dirigée vers le centre du cercle? Il faut tout d'abord définir *quantitativement* ce que l'on entend par accélération, notée \mathbf{a} ou a , selon qu'il s'agit du vecteur ou de sa grandeur.

L'accélération est définie comme le taux de variation de la vitesse en fonction du temps, c'est-à-dire la variation (ou différence) de vitesse durant un intervalle de temps, divisée par la longueur de cet intervalle. Selon la situation, un intervalle de temps quelconque ou un intervalle infiniment bref seront considérés. Si \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 sont les vitesses aux temps t_1 et t_2 , et Δt l'intervalle de temps ($\Delta t = t_2 - t_1$), l'accélération s'écrira, en vertu de sa définition :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{\Delta t} \quad \text{G-2.2}$$

Il existe une façon simple de se faire une idée des caractéristiques du vecteur accélération. En utilisant les lois de l'algèbre élémentaire, qui s'appliquent aussi aux vecteurs, on peut récrire l'équation G-2.2 de la façon suivante :

$$\mathbf{a}\Delta t = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 \quad \text{G-2.3}$$

ce qui signifie que le vecteur $\mathbf{a}\Delta t$ est égal à la différence entre les vecteurs vitesse \mathbf{v}_2 (au temps t_2) et \mathbf{v}_1 (au temps t_1). Cette expression peut à son tour être transformée :

$$\mathbf{v}_1 + \mathbf{a}\Delta t = \mathbf{v}_2 \quad \text{G-2.4}$$

et interprétée de la façon suivante : $\mathbf{a}\Delta t$ est le vecteur qu'il faut additionner à la vitesse \mathbf{v}_1 (au temps t_1) pour obtenir la vitesse \mathbf{v}_2 (au temps t_2). Le facteur Δt n'agissant ici que comme un facteur d'échelle entre la vitesse et l'accélération, parler de la direction du vecteur $\mathbf{a}\Delta t$ ou de celle du vecteur \mathbf{a} revient au même. Il devrait être possible de déterminer ainsi, à tout le moins, la direction de l'accélération.

Il reste une difficulté toutefois : \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 sont des vecteurs et l'on cherche le vecteur qu'il faut ajouter à \mathbf{v}_1 pour obtenir \mathbf{v}_2 . Comment fait-on pour additionner des vecteurs? Tout simplement en les plaçant bout à bout, en respectant leur orientation et leur grandeur. Le résultat de l'addition de deux vecteurs (ou plus) se représente par la flèche qui part du premier vecteur que l'on a placé et qui aboutit à l'extrémité du dernier vecteur tracé. Les figures G-2.3 et G-2.4 illustrent le résultat de l'addition de deux vecteurs et l'application de ce principe à la détermination de l'accélération.

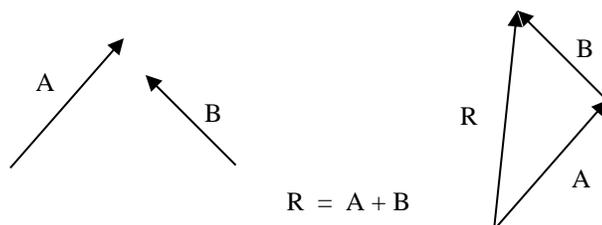


FIGURE G-2.3
Addition de 2 vecteurs : $\mathbf{R} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$.

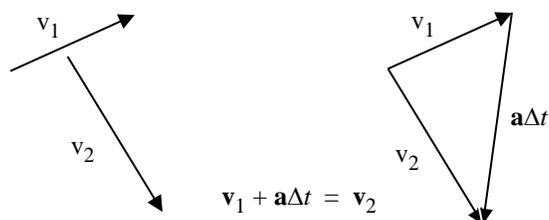


FIGURE G-2.4
Connaissant \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 , il est facile de déterminer $\mathbf{a}\Delta t$ tel que $\mathbf{v}_1 + \mathbf{a}\Delta t = \mathbf{v}_2$.

Par ailleurs, la figure G-2.5 montre comment un mouvement circulaire uniforme est en fait un mouvement accéléré vers le centre d'un cercle. Pour être rigoureux, il faudrait mentionner que ce n'est exact que pour un intervalle de temps Δt *infinitement bref*. Tant que Δt est suffisamment court, si l'objet ne parcourt qu'une petite partie de la circonférence par exemple, il s'agit d'une bonne approximation. On parle alors d'une accélération – et d'une force causant cette accélération – dirigée radialement, c'est-à-dire le long d'un rayon, vers l'intérieur du cercle.

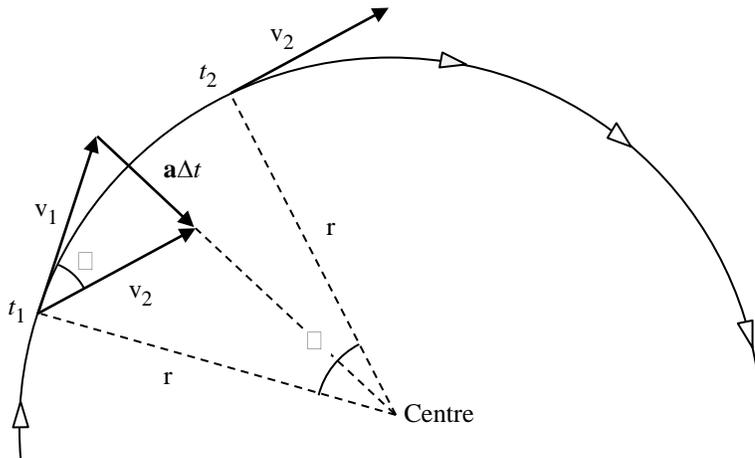


FIGURE G-2.5

Dans un mouvement circulaire uniforme ($v_1 = v_2$), l'accélération est dirigée vers le centre du cercle.

Si l'on désire maintenant calculer la *grandeur* de cette accélération, un peu de géométrie est nécessaire. On peut montrer que, dans le cas d'un triangle « pointu », la valeur du petit angle, en radians, est à peu près égale à la longueur du petit côté divisée par celle du grand côté. On appelle cette relation « formule des petits angles » ou « relation du triangle étroit » (voir l'annexe V). Plus l'angle est petit, meilleure est la précision : pour un angle de 10° , l'erreur n'est déjà plus que d'environ 1 %.

On peut écrire cette formule de la façon suivante :

$$\text{angle} = \frac{\text{petit côté}}{\text{grand côté}} \quad \text{G-2.5}$$

Pourquoi utiliser cette expression? Tout simplement parce que la quantité que l'on cherche ici, \mathbf{a} , se retrouve dans l'expression du petit côté du triangle formé de \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 et $\mathbf{a}\Delta t$ (figure G-2.5). Le grand côté, lui, est égal à la grandeur des vecteurs \mathbf{v}_1 ou \mathbf{v}_2 (ils sont de même grandeur); on la désigne par v tout simplement. Le « petit » angle, lui, est illustré dans la figure; il est appelé θ . La loi des petits angles s'écrit donc ici :

$$\theta = \frac{a\Delta t}{v} \quad \text{G-2.6}$$

Mais en même temps, l'angle correspond au changement de direction durant l'intervalle Δt ; en vertu de la définition du radian, sa valeur est donnée par :

$$\text{angle} = \frac{\text{distance parcourue le long du cercle pendant } \Delta t}{\text{rayon du cercle}} \quad \text{G-2.7}$$

La distance en question est égale au produit de la vitesse et de l'intervalle de temps, soit $v\Delta t$; le rayon du cercle est désigné par r . On trouve donc :

$$\theta = \frac{v\Delta t}{r} \quad \text{G-2.8}$$

Combinant les équations G-2.6 et G-2.8, on obtient :

$$\frac{a\Delta t}{v} = \frac{v\Delta t}{r} \quad \text{G-2.9}$$

En isolant l'accélération a , on obtient, après simplification des facteurs Δt , l'expression de l'accélération d'un objet qui décrit un mouvement circulaire uniforme en fonction de la vitesse et du rayon de l'orbite :

$$a = \frac{v^2}{r} \quad \text{G-2.10}$$

Comparez cette équation avec l'équation 3.14 que vous retrouvez au complément 3.2.

☆ G-2.2 LA LOI DE BODE

En 1772, Johann Elbert Bode publiait le résultat de ses recherches et de celles d'un autre astronome, Titius, recherches portant sur les rayons des orbites des planètes. Rappelons que si les lois de Kepler prévoyaient un lien entre les demi-grands axes de ces orbites et la période de révolution des planètes, rien ne permettait d'expliquer pourquoi les planètes connues alors se trouvaient sur ces orbites plutôt que sur d'autres. Bode suggéra que les demi-grands axes des orbites des planètes suivent la loi suivante, appelée **loi de Bode** ou loi de Titius-Bode :

$$a = 0,4 + 0,3 \times 2^{(n-1)} \quad \text{G-2.11}$$

où a est exprimé en unités astronomiques (UA).

En posant $n = 1$ pour Vénus à $n = 8$ pour Pluton (reléguée depuis 2006 au rang de planète naine), on retrouve les distances de toutes les planètes, sauf Neptune. Il faut toutefois poser $a = 0,4$ pour Mercure (ce qui revient à supposer $n = -\infty$). La précision obtenue est impressionnante, comme on peut le constater à la lecture du tableau G-2.1.

☆ G-2.3 LOIS ET THÉORIES

Nous avons vu, jusqu'à maintenant dans ce chapitre, plusieurs exemples de lois physiques : lois de l'inertie, lois de Kepler, lois de Newton, loi de la gravitation universelle, loi de Bode. Or, toutes ces lois n'ont pas le même statut, bien que chacune ait contribué utilement à l'évolution des connaissances en physique et en astronomie. Certaines sont très générales d'application, d'autres ne s'adressent qu'à des phénomènes particuliers; certaines sont reliées étroitement à l'expérience, d'autres sont déduites d'autres lois.

TABLEAU G-2.1
La loi de Bode

n	a théorique (UA)	Planète	a observé (UA)
$-\infty$	0,4	Mercure	0,39
1	0,7	Vénus	0,73
2	1,0	Terre	1
3	1,6	Mars	1,53
4	2,8	astéroïdes*	2,3 à 3,3
5	5,2	Jupiter	5,22
6	10,0	Saturne	9,6
7	19,6	Uranus	19,3
–	–	Neptune	30,2
8	38,8	Pluton**	39,5

* L'existence des astéroïdes et des planètes situées au-delà de Saturne n'était pas connue à l'époque de Bode.

** Maintenant considérée comme une planète naine.

La loi de Bode est un exemple parfait de **loi empirique**. Au moment où elle fut avancée, elle possédait le même statut que celles de Kepler à l'origine : il ne s'agissait que d'une simple systématisation de régularités constatées dans les caractéristiques des planètes. À l'époque de leur conception, aucune théorie ne pouvait les expliquer. Ce type de lois possède son utilité autant sur le plan pratique que comme guide pour de futures recherches. La loi de Bode a ainsi été utilisée par les astronomes dans leur calcul de la position hypothétique de Neptune. Elle a permis, en dépit du résultat erroné qu'elle fournissait dans ce cas particulier, d'obtenir une bonne approximation de la position angulaire hypothétique de la nouvelle planète.

Lorsque Newton, à l'aide des lois qu'il avait développées, retrouva les lois de Kepler, celles-ci perdirent leur statut de lois empiriques pour devenir des **lois dérivées**, c'est-à-dire que l'on pouvait dorénavant les considérer comme des conséquences de l'application de lois plus **fondamentales** : la loi de la gravitation universelle et la deuxième loi de Newton.

On reconnaît souvent aux lois fondamentales et aux lois dérivées une valeur supérieure à celle des lois empiriques. On aspire toujours d'ailleurs à expliquer les régularités constatées empiriquement à l'aide de lois plus générales. Quoi qu'il en soit, les lois empiriques ont joué historiquement, et jouent encore, un rôle très important dans l'orientation de la recherche scientifique.

Pour ce qui est de la loi de Bode, on n'est pas parvenu à ce jour à lui trouver une justification : elle conserve toujours son statut de loi empirique. Si plusieurs doutent même de sa pertinence et y voient une pure coïncidence, d'autres croient qu'une théo-

rie satisfaisante de la formation ou de l'évolution du système solaire, qui reste encore à mettre au point, permettra de la justifier, de la même façon que les lois de Kepler ont été justifiées par les lois de Newton (voir « Bode's law lives », 2010).

Pour terminer, vous aurez peut-être remarqué qu'on parle tout aussi bien de **loi** que de **théorie** lorsqu'on mentionne la gravitation universelle. Une théorie est un cadre général d'explication qui englobe de nombreux phénomènes et qui, de ce fait, recouvre généralement plusieurs lois; ces lois s'appliquent à des phénomènes ou à des conditions plus ou moins spécifiques. Par exemple, la théorie de l'électromagnétisme est formée d'un certain nombre de lois, certaines fondamentales, d'autres dérivées ou empiriques, s'appliquant à des phénomènes divers (forces électriques et magnétisme, courants, induction, aimantation, etc.). La théorie de la gravitation universelle ne comprend que quelques éléments de plus que la loi portant le même nom. Mentionnons, en guise d'exemples, le principe de superposition selon lequel la force due à plusieurs masses est la somme des forces dues à chacune, ou encore l'équivalence, démontrée à l'aide de ce dernier principe, entre la force gravitationnelle due à un objet sphérique de taille quelconque et celle qui est produite par un objet infiniment petit de même masse, situé à la même distance que le centre de l'objet sphérique. Si un ensemble, dont le contenu essentiel se résume à une seule loi fondamentale, peut se voir attribuer le statut de théorie, c'est en vertu de sa très grande généralité. En effet, la loi de la gravitation universelle s'applique à tous les objets de l'Univers, quels que soient leur nature et leur état.

Le sujet connexe *La nature de la science et de la technologie* (p. 205-208) traite aussi, entre autres questions, des concepts de loi et de théorie.

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

« Bode's law lives » (2010), blogue Babbage, *The Economist*, 24 avril. Consulté le 21 avril 2015 : http://www.economist.com/blogs/babbage/2010/08/planet_hunting

JAKI, Stanley L. (1972). « The early history of the Titius-Bode law », *American Journal of Physics*, vol. 40, n° 7, juillet p. 1014-1023.

NIETO, Michael Martin (1985). « The letters between Titius and Bonnet and the Titius-Bode law of planetary distances », *American Journal of Physics*, vol. 53, n° 1, janvier, p. 22-25.

VERDET, J.-P. (1990). *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, p. 175-188.

MODULE 2, PARTIE I

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

Le grand mérite de Newton est d'avoir synthétisé toutes les connaissances acquises depuis Galilée en réussissant, à l'aide des trois lois qui portent son nom et de la loi de la gravitation universelle, à réunir dans un même cadre d'explication autant les phénomènes terrestres que les mouvements célestes.

Certaines quantités physiques, comme la position, la vitesse et l'accélération, ont besoin de deux nombres ou plus (la grandeur et la direction) pour être complètement spécifiées. On appelle ces quantités *vecteurs*. Elles obéissent à des lois différentes de celles régissant les nombres, en particulier en ce qui concerne l'addition.

Un objet est accéléré lorsque la grandeur *ou* la direction de sa vitesse change dans le temps. Un objet se déplaçant sur un cercle avec une vitesse dont la grandeur est constante est en fait accéléré vers le centre du cercle. On peut montrer que la grandeur de cette accélération, définie comme le taux de changement de la vitesse dans le temps, est égale à v^2/r , où v est la grandeur de la vitesse et r , le rayon du cercle.

Les trois lois de Newton (loi de l'inertie, loi $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ et loi d'action-réaction), utilisées avec la loi de la gravitation universelle, permettent d'expliquer l'ensemble des mouvements célestes. En particulier, on peut en déduire les trois lois de Kepler ou calculer, à l'aide d'ordinateurs, la position future des membres du système solaire ou des sondes interplanétaires avec une précision impressionnante.

Après Newton, et jusqu'au début du 20^e siècle, les progrès dans le domaine de la mécanique n'ont consisté qu'en un raffinement des méthodes mathématiques permettant d'aborder des problèmes de plus en plus complexes. Un exemple est le calcul de la position d'une planète hypothétique à partir d'irrégularités dans l'orbite d'une planète connue. C'est ainsi que Neptune a été découverte.

La loi de Bode constitue un exemple de loi empirique restée inexpliquée jusqu'à ce jour. Bien que son statut réel (loi ou simple coïncidence) fasse encore l'objet de débats, elle a eu son utilité dans le développement de l'astronomie. Certains espèrent toujours arriver à la dériver, à partir des lois fondamentales de la mécanique, dans le cadre d'une théorie de la formation et de l'évolution du système solaire.

MODULE 2, PARTIE I

ACTIVITÉS

QUESTIONS DE RÉVISION

Chapitre 3 : 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26.

Chapitre 5 (sujet connexe) : 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48.

PROBLÈMES DU MANUEL

Chapitre 3 : P3, P4, P5, P6, P7, P11, P12, P13, P15, P16.

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

- G2.1 Comparez les contributions de Tycho Brahé et de Kepler au développement de l'astronomie, en faisant ressortir leur complémentarité.
- G2.2 Pourquoi dit-on que Kepler faisait de la *cinématique* planétaire, alors que Galilée est présenté comme le fondateur de la *dynamique* ?
- G2.3 Indiquez si les énoncés suivants relèvent de la cinématique, de la dynamique ou des deux à la fois.
- La vitesse des planètes augmente lorsque leur distance au Soleil diminue.
 - Dans le vide, les objets tombent vers le sol avec une accélération constante.
 - En l'absence de forces exercées sur un objet, celui-ci se déplace à vitesse constante sur une droite.
 - L'orbite d'une planète est une ellipse dont le Soleil occupe un des foyers.
 - Un objet soumis à l'attraction gravitationnelle peut décrire une orbite correspondant à une des courbes de la famille des coniques (ellipse, cercle, hyperbole, parabole).
- G2.4 Voici les données concernant les périodes et les distances moyennes des quatre satellites de Jupiter que Galilée a découverts. Vérifiez si la troisième loi de Kepler généralisée est valide pour ce système.

TABLEAU G-2.4

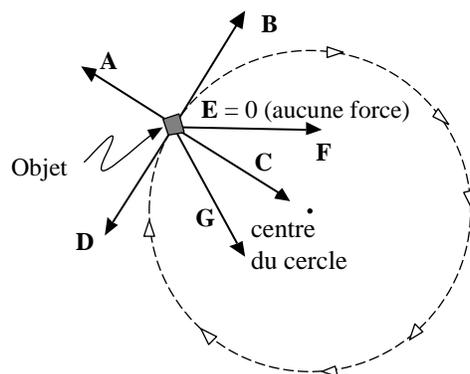
Périodes et distances des quatre satellites de Jupiter

nom du satellite	distance moyenne (10^6 km)	période (d)
Io	0,422	1,77
Europa	0,671	3,55
Ganymède	1,07	7,15
Callisto	1,88	16,7

Suggestion : Calculez le rapport (quotient) demandé et arrondissez le résultat à trois chiffres, car les données du tableau n'offrent que cette précision.

G2.5 Les objets pesants tombent-ils plus vite que les objets légers? Attention, la question n'est pas si simple qu'elle le paraît! Faites quelques expériences. Par exemple, laissez tomber une feuille de papier et une gomme à effacer, ou deux gommes à effacer de tailles différentes, ou encore une feuille roulée en boulette et une feuille intacte. Essayez de répondre en une phrase, en précisant bien les limites de validité de votre énoncé.

G2.6 Lequel des vecteurs suggérés (**A** à **G**) représente le mieux la force nécessaire pour faire tourner, à vitesse constante, l'objet illustré?

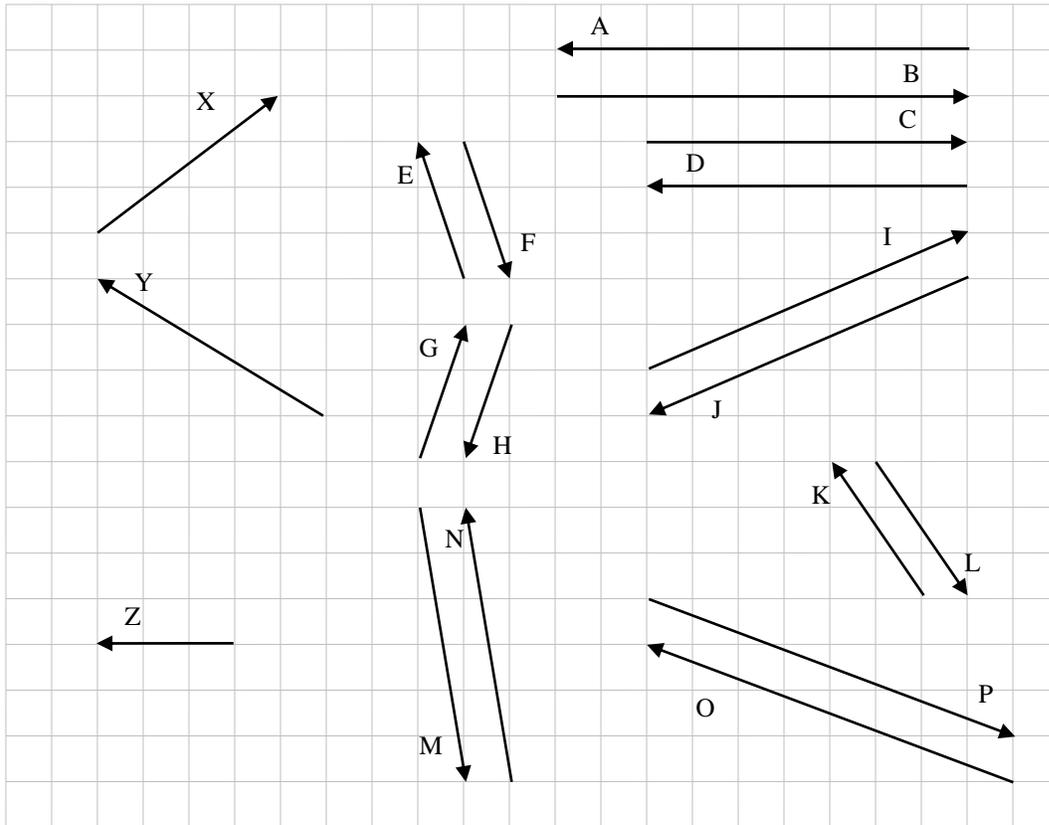


G2.7 On sait qu'une accélération correspond à une variation dans le temps de la vitesse. Comment expliquer qu'une planète qui se déplace à vitesse constante sur une orbite circulaire est en fait accélérée?

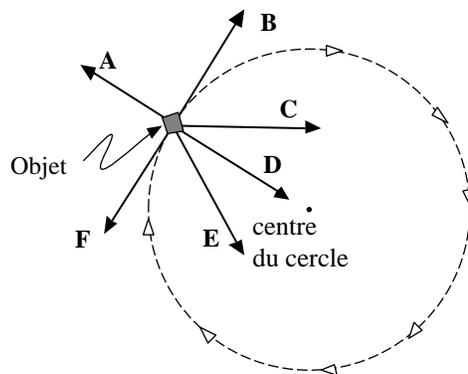
G2.8 Parmi les vecteurs suggérés (**A** à **P**), lequel représente le mieux :

- l'addition de **X** et de **Z**?
- l'addition de **X** et de **Y**?

c) le vecteur qu'il faut ajouter à \mathbf{Z} pour obtenir \mathbf{Y} ?

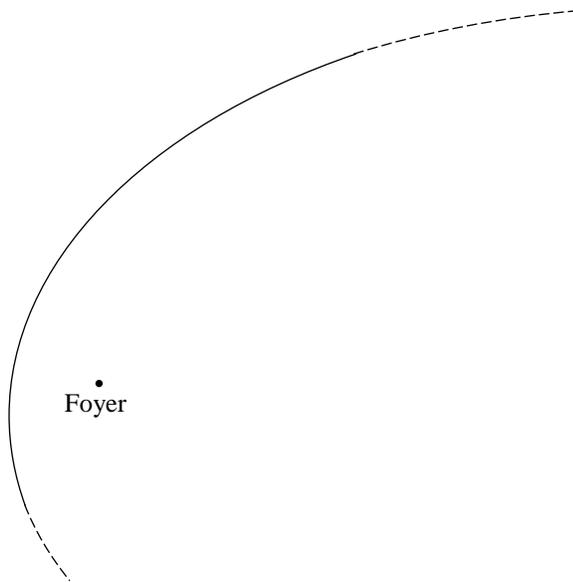


G2.9 Quel vecteur (**A** à **F**) représente le mieux l'accélération d'un objet qui se déplace sur un cercle, mais avec une vitesse dont la grandeur augmente?



Suggestion : Un examen de la figure G-2.5 pourrait vous mettre sur la bonne piste. Comment serait modifié le schéma si la grandeur de la vitesse (et donc la longueur du vecteur vitesse) augmentait entre t_1 et t_2 ?

G2.10 La figure suivante montre une partie d'une orbite elliptique très excentrique. À l'aide d'une construction du type de celle de la figure G-2.5, montrez que l'hypothèse d'une force (donc une accélération, selon la 2^e loi de Newton) dirigée vers le foyer de l'ellipse est compatible avec l'idée d'une vitesse dont la grandeur diminue lorsque la planète est plus loin du Soleil, comme le soutenait Kepler.



G2.11 La valeur de l'accélération d'un objet en mouvement circulaire uniforme, soit v^2/r , peut aussi s'écrire $a = \omega^2 r$, où ω est la vitesse angulaire exprimée en radians par seconde, comme on l'a vu au module 1. On exprime souvent l'accélération en terme de g , c'est-à-dire son rapport avec l'accélération d'un objet en chute libre ($9,8 \text{ m/s}^2$). Ainsi, une accélération de 20 m/s^2 vaut environ $2 g$ ($20/9,8$).

L'intérêt de cette nouvelle unité est que la force centrifuge subie par un objet (ou une personne), exposé par exemple à une accélération de $2 g$, vaut 2 fois le poids de l'objet, etc.

Calculez, en m/s^2 et en g , l'accélération :

a) d'une voiture qui prend une courbe de 500 m de rayon à 110 km/h;

- b) d'une personne assise dans un manège de 20 m de diamètre qui tourne à 10 tours/min.

Attention : Assurez-vous que les données sont exprimées avec les unités SI de base, sinon transformez-les. Il y a aussi une subtilité en b); relisez attentivement la question.

G2.12 La loi de l'inertie (reprise par Newton dans sa première loi) implique que si aucune force n'est appliquée sur un objet, celui-ci continuera indéfiniment à se déplacer à vitesse constante sur une droite.

- a) Pourquoi alors les voitures ont-elles besoin d'un moteur, même lorsqu'elles n'ont pas de côte à monter?
- b) De temps en temps, un satellite artificiel, jusque-là en orbite autour de la Terre – ou du moins ce qui en reste après la traversée de l'atmosphère –, s'écrase au sol. Cela est-il causé par l'épuisement de la réserve de carburant du satellite? Sinon, quel pourrait être le facteur déterminant dans cette chute? *Un indice* : ce sont surtout des satellites à l'orbite très excentrique qui tendent à retomber sur Terre.

G2.13 Expliquez pourquoi une question comme « Quel est le poids de la Terre? » n'a pas de sens.

G2.14 Les questions qui suivent portent sur la distinction entre le poids et la masse.

- a) Lors de la mission Apollo 14, l'astronaute américain Al Shepard a apporté avec lui sur la Lune... une balle de golf! Employant un outil de géologue ressemblant à un bâton de golf, il a frappé ce qu'il a d'abord cru être le plus long coup d'envoi jamais réalisé par un Terrien (il s'écria alors « *miles and miles and miles* »)! Croyez-vous que sa balle pouvait vraiment être plus rapide que lorsqu'il jouait au golf en Floride?
- b) Voici une petite histoire de science-fiction. Nous sommes en 2050. Les deux premiers astronautes québécois sont en route pour Mars où, on le sait, l'attraction gravitationnelle est environ 40 % de ce qu'elle est sur Terre. Désireux de figurer au livre des records sportifs, ils ont tous deux amené dans leurs bagages ce qu'ils croyaient nécessaire. Jean, qui a toujours rêvé de devenir un grand joueur de hockey, a apporté un bâton et une rondelle, espérant réussir le lancer le plus rapide de l'histoire. Louise, qui a toujours fait un peu de culturisme, a choisi pour sa part un ensemble de poids et haltères, convaincue de pouvoir battre tous les records, même ceux qui sont détenus par les hommes! Discutez des chances de chacun de nos deux compatriotes de voir son vieux rêve se réaliser.

- G2.15 À quelle distance du Soleil, exprimée en UA, s’attendrait-on à trouver une dixième « planète » (ou planète naine), selon la loi de Bode? On a cru, en 2003, que cette dixième planète avait été découverte, quand on a observé pour la première l’objet céleste Sedna. Après de nombreuses discussions au sein de la communauté astronomique, Sedna a finalement été consacrée astéroïde. Fait à noter, l’orbite elliptique très excentrée de Sedna fait varier sa distance au Soleil entre 900 UA, à l’aphélie, et 76 UA, au périhélie. Peut-on établir un lien entre cette dernière valeur et la loi de Bode?
- G2.16 Les lois de Kepler étaient-elles des lois empiriques, fondamentales ou dérivées? Expliquez.
- G2.17 À partir des données que vous retrouvez à l’annexe VIII du manuel, calculez la valeur du diamètre angulaire de Jupiter, tel qu’on l’observe de la Terre quand les deux planètes sont le plus éloignées l’une de l’autre (elles sont alors de part et d’autre du Soleil) et dans le cas inverse, lorsqu’elles sont du même côté. Exprimez votre réponse en minutes d’arc.
- Suggestion* : Utilisez la formule des petits angles.
- G2.18 Remplissez les lignes du tableau de l’exercice supplémentaire G1.7 concernant les contributions de Tycho Brahé, Kepler, Galilée et Newton à l’astronomie.
- G2.19 Examinez la figure G-0.6 qui pourrait représenter le trajet de deux étoiles en orbite autour de leur centre de masse commun dans une région isolée du cosmos. Expliquez qualitativement (sans rien calculer) comment les trois lois de Newton, ainsi que sa loi de la gravitation universelle, s’appliquent aux mouvements de ces deux étoiles.

MODULE 2

PARTIE II : L'OBSERVATION ET L'ÉTUDE DE LA LUMIÈRE

PRÉSENTATION

Newton ayant réglé définitivement (ou presque) la question des mouvements célestes, les astronomes ne tardèrent pas à s'attaquer à d'autres questions. Par exemple, quelles sont les caractéristiques (masse, composition, température, etc.) des corps célestes? Qu'est-ce qui détermine ces caractéristiques pour un corps céleste donné? De quelle façon ces caractéristiques évoluent-elles?

Pour arriver à répondre à ces questions, une difficulté considérable a dû être surmontée : celle d'arriver à acquérir des informations sur des objets situés à une telle distance de nous, et qui nous ne livrent d'eux que la lumière qu'ils émettent.

C'est justement dans cette lumière que résidait la clé du problème : depuis le 19^e siècle, de nouveaux développements en physique ont permis de relier bon nombre des caractéristiques des objets, comme leur température, leur vitesse, leur pression, aux propriétés de la lumière qu'ils émettent. Il ne restait plus qu'à appliquer ces nouvelles méthodes d'analyse aux objets bien particuliers que sont les astres, planètes, étoiles ou galaxies. Cette seconde étape dans l'unification de la physique terrestre et céleste a donné naissance à ce qu'on appelle aujourd'hui l'astrophysique.

En même temps, cette évolution dans les possibilités d'investigation à distance s'est accompagnée d'un progrès fantastique dans les performances des instruments d'observation. On a ainsi augmenté tant la précision, la sensibilité que l'étendue des observations recueillies par le télescope, l'appareil même qui avait joué un rôle si important au cœur de la révolution copernicienne.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

1. Décrire les caractéristiques des différents instruments d'observation utilisés par les astronomes.
2. Énoncer les principales limitations de l'observation à partir de la Terre, limitations qui justifient la construction de télescopes toujours plus grands, installés le plus haut possible ou placés sur orbite.

3. Distinguer les aspects (ondulatoire et corpusculaire) à la fois contradictoires et complémentaires du comportement de la lumière telle qu'elle est représentée par la physique.
4. Distinguer les notions d'énergie, de puissance et d'intensité.
5. Expliquer comment les découvertes du 19^e siècle dans le domaine de la spectroscopie et leur application aux observations astronomiques ont donné naissance à l'astrophysique.
6. Distinguer et appliquer les lois décrivant la radiation émise par un corps noir.
7. Reconnaître les principales caractéristiques d'un spectre comme celui du Soleil ou d'une étoile.
8. Décrire les renseignements que fournissent sur les étoiles les mesures photométriques et spectroscopiques.
9. Expliquer comment on détermine, de façon directe, la vitesse de certaines étoiles par rapport à la Terre.

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)
diffraction	181 [29]	quanta	4.4
limite de résolution	181 [13]	spectre continu	155 [8]
aberration chromatique	193 [5]	effet Doppler	159 [-3]
dispersion	193	luminosité surfacique	150 [4]
aberration sphérique	193 [12]	constante solaire	150, G-2.5
particule	143 [17]	vitesse radiale	160 [26]
onde	143 [-4]	énergie cinétique	G-2.4
longueur d'onde	144 [3]	énergie thermique	G-2.4
onde électromagnétique	145 [8]	chaleur	G-2.4
photon	144 [-23]	énergie potentielle	G-2.4
spectre électromagnétique	144 [-10]	énergie potentielle élastique	G-2.4
énergie	146 [-18]	énergie potentielle gravitationnelle	G-2.4
intensité	149 [-5]	conservation de l'énergie	G-2.4
puissance	C4.1 ^a	énergie potentielle chimique	G-2.4
luminosité	150 [4]	énergie électrique	G-2.4
spectre	147 [16]	énergie de rayonnement	G-2.4
température	147 [-15]	énergie « au repos » (nucléaire)	G-2.4
corps noir	148 [16]	luminosité, intensité et magnitudes	G-2.5
valeurs discrètes d'énergie	4.4	composante d'un vecteur	G-2.6
		vitesse effective	G-2.6

a. La lettre C renvoie aux compléments du manuel, ici le complément 4.1.

LECTURES

1. Sections 5.1 à 5.5 (p. 179-191) et 4.1 à 4.2 (p.143-147)
2. Sujet connexe : *L'évolution du télescope* (p. 192-197)
3. Complément 5.1 *Le grossissement d'un télescope* (p. 209-210)
4. Section 3.7 (p. 119-123)
5. Explications supplémentaires
G-2.4 *L'énergie* (p. G-103 à G-105)
6. Sections 5.6 à 5.8 (p.198-204)
7. Complément 4.1 *Les magnitudes*
8. Explications supplémentaires
G-2.5 *Luminosité, intensité et magnitudes* (p. G-105 et G-106)
9. Sections 4.2 à 4.8 (p. 144-165)
10. Compléments
4.2 *Le rapport I_B / I_V et la température des étoiles* (p. 170-172)
4.4 *L'effet Doppler classique* (p. 173-174)
11. Explications supplémentaires
G-2.6 *Mouvement propre et vitesse effective des étoiles* (p. G-106 et G-107)

MODULE 2, PARTIE II

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

5.1-5.3 LES TROIS FONCTIONS DU TÉLESCOPE (P. 179-187)

N'oubliez pas de consulter l'annexe V du manuel au sujet de la relation du triangle étroit, ainsi que le complément 5.1 au sujet du grossissement d'un télescope.

Comme l'illustre la figure 5.8, l'image se forme en fait dans un plan qui passe par le foyer de l'instrument, par exemple sur la rétine lorsqu'il s'agit de l'œil et sur une pellicule photographique pour une caméra. La dimension de cette image dépend de la dimension de l'objet, de son éloignement et des caractéristiques des lentilles ou miroirs responsables de la formation de l'image. Cependant, plusieurs facteurs limitent la dimension minimale que peut atteindre une image, pour un objet très petit ou très distant. Examinons particulièrement trois d'entre eux : la diffraction, l'aberration chromatique et l'aberration sphérique.

- ☆ 181 La **diffraction** est un phénomène complexe qui modifie la propagation en ligne droite de la lumière lorsque celle-ci rencontre un obstacle sur son parcours, comme une ouverture ou le bord d'un objet. On peut observer des manifestations de la diffraction dans la vie de tous les jours. C'est ce qui fait que les ombres ne sont jamais parfaitement nettes, même si la source de lumière est très petite ou très éloignée. Vous apercevrez un autre effet de diffraction si vous observez une source de lumière à travers un rideau très fin ou une moustiquaire : celle-ci vous paraîtra fragmentée.

Une des principales conséquences de ce phénomène, en astronomie, est que, aussi petit ou distant que puisse être un objet observé, son image dans un télescope ne peut jamais, pour un télescope d'ouverture circulaire, être plus petite qu'un cercle appelé disque ou figure d'Airy (figure G-2.6). Le rayon de ce cercle, noté a dans la figure, dépend de la longueur d'onde et du diamètre de l'ouverture; on peut la réduire en diminuant la longueur d'onde ou en augmentant le diamètre de l'ouverture.

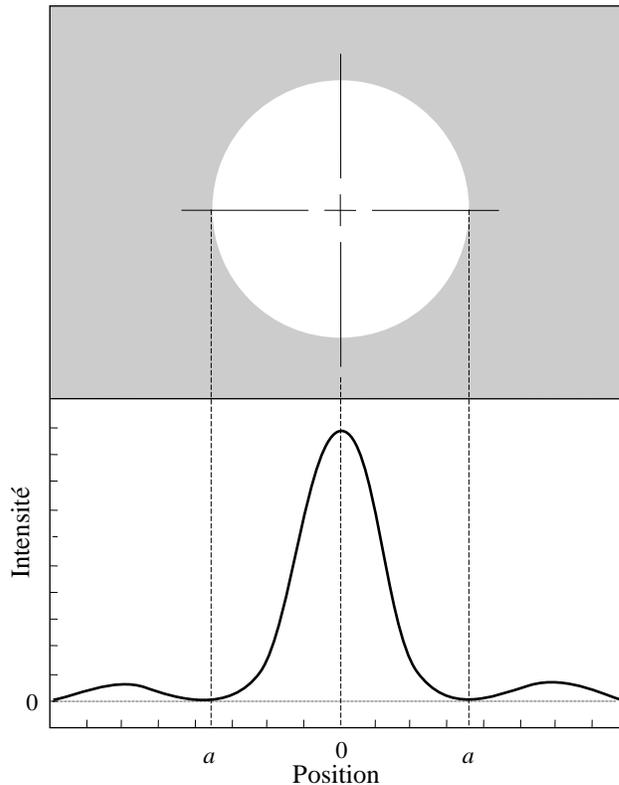


FIGURE G-2.6

Figure et disque d’Airy. La partie du bas (figure d’Airy) illustre comment varie, dans l’image d’une étoile, l’intensité en fonction de la position, c’est-à-dire de la distance au centre. Cette figure, de même que les suivantes (G-2.7 et G-2.8), illustrent le lien entre l’image elle-même (disque d’Airy, en haut) et la distribution en intensité (en bas).

Ainsi, lorsqu’un objet observé, une étoile par exemple, est suffisamment petit ou éloigné de sorte que l’image qui serait formée en l’absence de diffraction serait plus petite que le disque d’Airy, c’est ce dernier qui prend le dessus. La distribution de l’intensité au foyer épouse dans ce cas la forme de la figure d’Airy, quelles que soient la forme ou la dimension de l’objet.

On a vite constaté que toutes les étoiles sont suffisamment éloignées de la Terre pour qu’il soit impossible d’observer, même avec les plus grands télescopes, autre chose que le disque d’Airy.

- ☆ 181 L’emploi de l’expression **limite de résolution** – on utilise aussi dans certains ouvrages l’expression « pouvoir séparateur » – est facile à justifier quand on réalise que, si deux objets très éloignés sont séparés d’une distance telle que leurs disques d’Airy se recoupent presque entièrement (figure G-2.7A), il sera impossible de distinguer les deux images. On admettra facilement que la séparation minimale requise (la limite de résolution) est de l’ordre du rayon du disque d’Airy (figure G-2.7B). C’est d’ailleurs ce raisonnement qui permet de dériver l’expression $\alpha (") = 0,15 / D (m)$ (équation 5.1) pour la limite de résolution, lorsque l’on observe la lumière visible

émise par un objet. De façon générale, (équation 5.2), la limite de résolution est directement proportionnelle à la *longueur d'onde* (λ) observée :

$$\alpha (") = 2,5 \times 10^5 \lambda/D \quad \text{G-2.12}$$

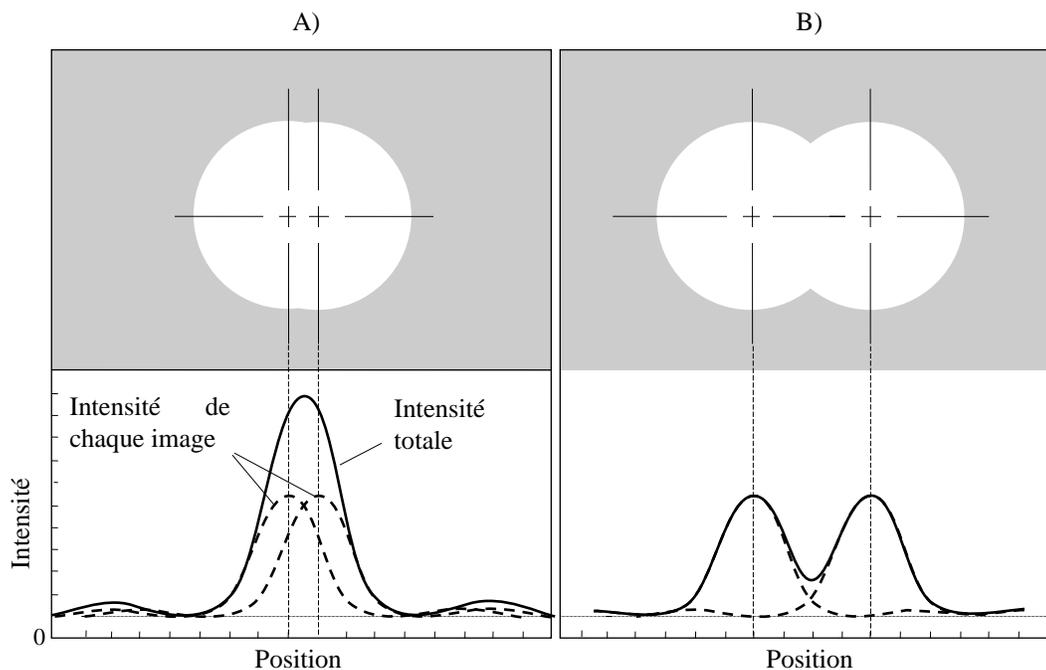


FIGURE G-2.7

Figure d'Airy et pouvoir de résolution théorique. En A, la séparation ($1/4$ du rayon du disque d'Airy) ne permet pas de distinguer les deux images. En B, une séparation quatre fois plus grande est clairement suffisante.

En plus de la diffraction, inévitable parce qu'elle est liée à la nature même de la lumière, d'autres phénomènes empêchent, dans la plupart des cas, d'atteindre ce pouvoir de résolution qualifié pour cette raison de « théorique » dans le manuel. La qualité des composantes optiques, les caractéristiques des plaques photographiques ou des détecteurs, mais surtout la turbulence atmosphérique limitent à environ un tiers à une demi-seconde d'arc, dans les meilleures conditions, la résolution des plus grands télescopes. C'est donc la résolution, résultat d'un ensemble de facteurs liés autant à la dimension ou à la qualité de l'instrument qu'aux conditions dans lesquelles il est utilisé, qui décrit la finesse réelle des images que peut fournir un télescope*.

Les phénomènes décrits ci-dessus permettent d'expliquer une particularité des photographies prises à l'aide d'un télescope. Observez une des nombreuses photographies d'étoiles contenues dans le manuel, celle de la page 266, par exemple. Remarquez les

* Dans ces conditions, la figure d'Airy est remplacée par une distribution analogue, mais plus large. Le raisonnement évoqué dans ce qui précède reste malgré tout entièrement valable.

différences dans les diamètres des images des étoiles. Pourtant, on affirme plus haut que celles-ci sont suffisamment éloignées pour que dans tous les cas leur image se réduise au plus petit cercle permis par la résolution du télescope, cercle dont le diamètre est le même quelle que soit l'étoile. Comment expliquer les différences observées?

La réponse réside dans une caractéristique des plaques photographiques et des capteurs CCD, qui les ont largement remplacées en astronomie : ils possèdent une plage de sensibilité pour laquelle ils enregistrent une image proportionnelle à l'intensité de la lumière incidente (ou au logarithme de celle-ci, dans le cas des plaques photographiques). Si l'intensité dépasse la limite supérieure de cette plage, l'image ne sera pas plus marquée; on parle alors de saturation. Par contre, si l'intensité est plus basse que la limite inférieure de la plage, la plaque ou le détecteur n'enregistre rien du tout. Le diamètre observé sur une photographie n'est rien d'autre que le diamètre au-delà duquel l'intensité tombe sous le seuil, et donc devient trop faible pour être enregistrée. La figure G-2.8 montre le résultat de l'enregistrement de deux images d'étoiles d'intensité différente mais avec des figures d'Airy de même taille. Il apparaît clairement que les différences de diamètre de l'image correspondent à des différences d'intensité des étoiles.

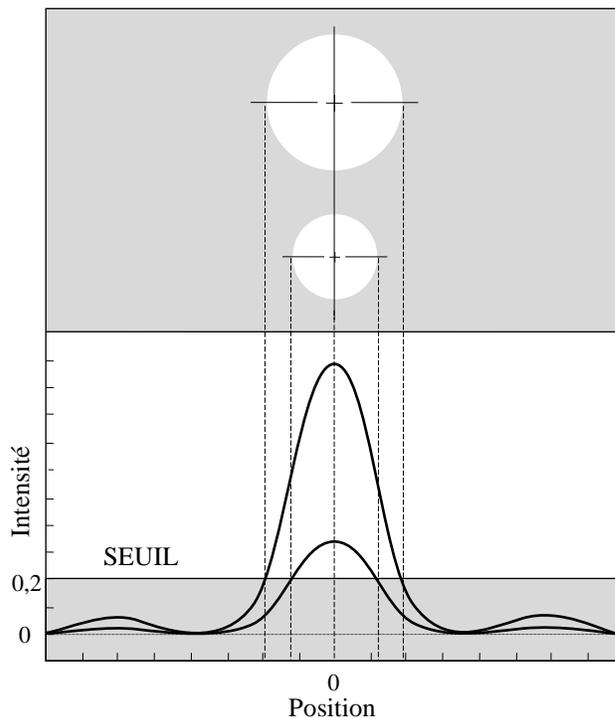


FIGURE G-2.8

Lien entre l'intensité et la dimension des images enregistrées par une plaque photographique ou un capteur CCD. Dans cet exemple, on suppose que rien n'est enregistré si l'intensité est inférieure à 0,2.

- ☆ 193 **L'aberration chromatique** est due au phénomène de **dispersion**, selon lequel les ondes de diverses longueurs d'onde (ou couleurs) se propagent à des vitesses différentes. Une des manifestations les plus connues de ce phénomène est le fait que les différentes couleurs ne sont pas déviées du même angle lorsque la lumière est réfractée, c'est-à-dire qu'elle passe d'un milieu à un autre. Tout le monde a déjà vu (songez à la pochette de *Dark side of the Moon*, de Pink Floyd!) l'image d'un prisme qui décompose la lumière blanche en toutes ses couleurs (figure G-2.9). C'est le même phénomène qui est responsable des couleurs de l'arc-en-ciel (figure G-2.10).

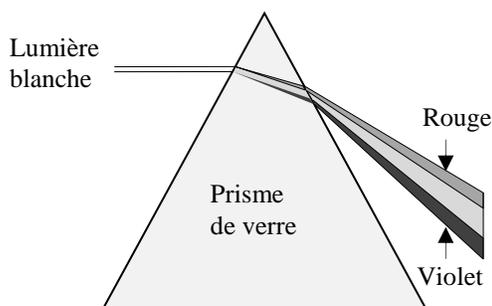


FIGURE G-2.9

Dispersion de la lumière par un prisme : les couleurs sont déviées d'un angle variable.

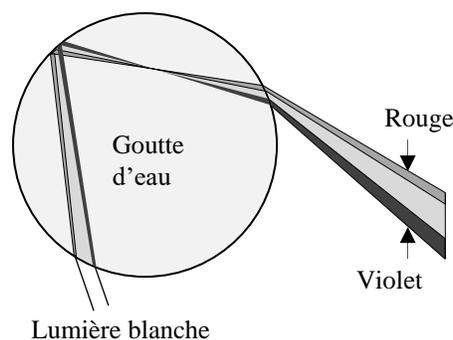


FIGURE G-2.10

Origine des couleurs de l'arc-en-ciel.

C'est la réfraction qui est responsable de la formation des images par une lentille, en déviant les rayons de manière à ce qu'ils se concentrent en une position de l'axe appelée foyer (ou plan focal). Il est donc facile de comprendre que les diverses couleurs qui composent la lumière des étoiles, par exemple, seront déviées à des angles différents, produisant des images dans des plans focaux différents. Il suffit pour cela de considérer le bord de la lentille qui joue, en quelque sorte, le rôle d'un prisme (figure G-2.11).

Ainsi, cette présence simultanée de plusieurs images dans des plans différents fait en sorte que dans chaque plan, où se forme une image nette à une longueur d'onde précise, celle-ci est brouillée par les images floues (hors foyer) produites par les autres longueurs d'onde. Par contre, dans le cas d'un miroir, la dispersion est

inexistante : il n'y a pas de changement de milieu, et tout rayon incident à un certain angle est réfléchi au même angle, quelle que soit la longueur d'onde.

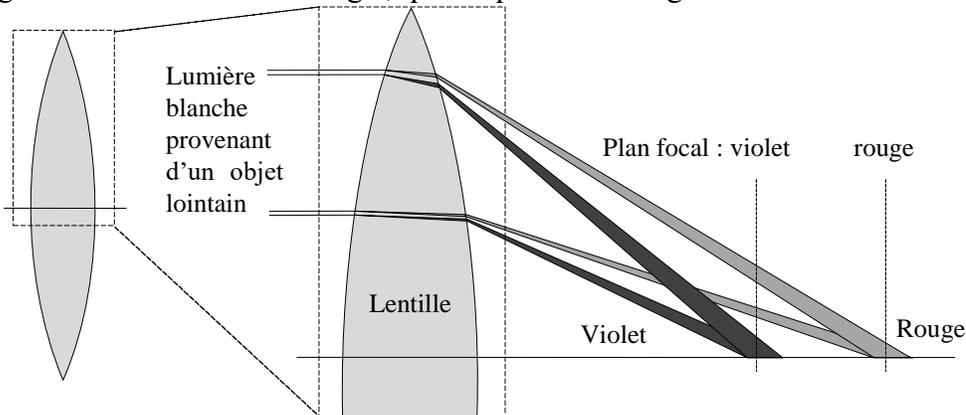


FIGURE G-2.11

Origine de l'aberration chromatique : le plan focal a une position différente selon la couleur.

- ☆ 193 L'**aberration sphérique** est au contraire présente tant avec les lentilles qu'avec les miroirs. Pour une lentille, on peut réduire les effets des deux types d'aberration en utilisant des combinaisons de lentilles, mais on ne peut les éliminer complètement. C'est ce que l'on fait pour les objectifs de caméras, qui comportent souvent cinq ou six lentilles. Dans le cas d'un miroir, on peut faire disparaître totalement l'aberration sphérique en lui donnant la forme d'une parabole, comme on le précise à la page 195 du manuel. La courbure moins progressive de la courbe parabolique (en comparaison de celle du cercle) permet à tous les rayons, quel que soit l'endroit où ils frappent le miroir, d'aboutir en un même point, le foyer (figure G-2.12).

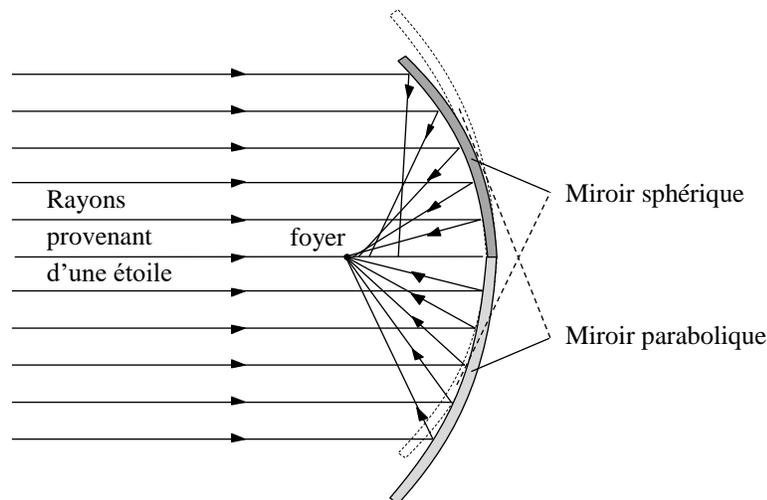


FIGURE G-2.12

L'aberration sphérique. Les rayons provenant d'une étoile et réfléchis par un miroir sphérique (partie supérieure, et en pointillés dans la partie inférieure) ne se coupent pas en un même point. Mais si le miroir est parabolique (partie inférieure), les rayons se rencontrent en un même point, le foyer.

Cette propriété a permis d'envisager un miroir d'un type nouveau : le miroir liquide (Gamma, 2013). L'idée remonte au 19^e siècle, mais elle n'a été reprise et exploitée qu'au milieu des années 1980 par un professeur-chercheur de l'Université Laval (Borra, 1984). Fondée sur le fait que la surface d'un liquide en rotation, comme l'avait démontré Newton, épouse exactement la forme parabolique requise, cette nouvelle conception a fait l'objet de tests concluants réalisés avec des miroirs d'un diamètre allant jusqu'à 6 mètres (Hickson, 2007). Selon son promoteur, elle pourrait conduire à la mise au point de miroirs d'un diamètre allant jusqu'à 30 mètres, soit trois fois le diamètre du miroir principal du plus grand télescope existant. On propose même leur installation sur la Lune, où la gravité réduite permettrait d'atteindre un diamètre de 100 mètres.

Le principal inconvénient de ces miroirs est qu'ils doivent nécessairement être horizontaux. Ils ne peuvent donc examiner que la bande du ciel qui passe exactement ou assez près du zénith. Ils présentent malgré tout un intérêt certain, notamment pour la cosmologie, à cause de leur immense pouvoir de captation.

4.1 LA NATURE DE LA LUMIÈRE (P.143-144)

☆ 143 Il est relativement aisé d'imaginer la matière comme étant constituée d'un assemblage d'éléments très petits (les atomes). À leur tour, ceux-ci pourraient très bien (pourquoi pas?) être formés de composantes encore plus élémentaires, et ainsi de suite. Bien que cette idée ne soit pas nouvelle, ce n'est qu'au 20^e siècle qu'elle a finalement été acceptée comme la représentation la plus satisfaisante de la réalité à l'échelle microscopique. Même s'ils ne permettent pas de rendre compte de tous les phénomènes observés à cette échelle, les modèles bien connus d'atomes, ressemblant à de minuscules systèmes solaires, fournissent une bonne idée de la structure de la matière. Derrière cette idée, il y a la notion de **particule**, idéalisation d'une bille infiniment petite et impossible à briser, qui se trouve à la base du mode de représentation de toute une partie de la physique.

Un autre aspect de la nature est représenté par le concept d'**onde**. L'illustration la plus immédiate en est la succession de vagues produites par un objet jeté à l'eau. Le mouvement de l'objet frappant la surface de l'eau est transmis, par l'intermédiaire de l'ensemble des particules d'eau qui, elles, ne se déplacent pratiquement pas dans la direction de l'onde, jusqu'à de grandes distances et dans toutes les directions.

L'onde est ainsi l'antithèse de la particule : alors que la particule est localisée et possède un mouvement dont la direction est bien définie, l'onde est partout et se dirige dans toutes les directions à la fois. Le son, la lumière, les tremblements de terre possèdent ces propriétés; ils sont correctement représentés comme des phénomènes ondulatoires.

Pourtant, dans certaines situations, la lumière semble posséder plutôt les propriétés d'une particule. C'est en 1923 que Compton propose cette réinterprétation radicale de la nature de la lumière, idée qui sommeillait depuis les travaux d'Einstein sur l'effet

photoélectrique, travaux réalisés 20 ans auparavant. Il s'agissait d'une rupture totale : au siècle précédent, les développements de l'optique avaient imposé l'interprétation ondulatoire de la lumière proposée par Thomas Young au début du 19^e siècle. Ces propriétés sont à la base du fonctionnement des détecteurs modernes comme les photomètres et les CCD.

Depuis lors, force nous est d'admettre que les deux schémas d'explication sont nécessaires *en même temps* pour rendre compte de la complexité de la réalité. Non seulement la lumière, mais toute la matière est à la fois onde et particule. Ces deux aspects sont inséparables. Cependant, dans les situations pratiques, un des deux aspects est généralement prédominant, de sorte que l'on parlera quand même de particules ou d'ondes.

4.2 LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE (P. 144-147)

- ☆ 144 Dans le cas de la lumière, on parlera d'**ondes électromagnétiques** dans certaines situations et de **photons** (particules de lumière) dans d'autres, tout en demeurant conscient qu'il s'agit là des deux faces d'une même pièce. La lumière visible ne représente qu'une infime partie du **spectre électromagnétique**, comme vous pouvez le constater à la figure 4.3 du manuel. Pourtant, c'est elle qui a permis, jusqu'au développement de détecteurs sensibles aux autres longueurs d'onde, de tirer tous les renseignements dont nous disposons sur l'Univers.

Dans le domaine du visible, les différentes longueurs d'onde se traduisent par différentes couleurs. La perception des couleurs est toutefois un phénomène complexe, variant selon les individus, de sorte qu'il est impossible de prédire quelle sera la couleur exacte perçue par une personne dont l'œil reçoit, par exemple, la radiation décrite par la courbe identifiée 5000 K, à la figure 4.5 (page 148).

Il est toutefois possible de s'entendre sur un nombre limité de couleurs qu'à peu près tout le monde reconnaîtra correctement. Ce sont les couleurs de l'arc-en-ciel, présentées dans le tableau G-2.3, avec les gammes de longueurs d'onde correspondantes. Ce tableau complète le tableau 4.1 du manuel, en associant à chaque couleur une bande du spectre visible, comme l'illustre la figure 4.3, plutôt qu'une longueur d'onde moyenne. Les légères contradictions que l'on peut observer entre les deux tableaux, par exemple 450 nm correspond à bleu selon le manuel et à violet selon le guide, sont le reflet de la difficulté à tracer des frontières nettes entre les couleurs : où finit le violet et où commence le bleu?

- ☆ 146 De façon simplifiée, on peut dire que l'**énergie** est associée au mouvement lui-même, ainsi qu'à la capacité d'acquérir ou de générer un mouvement. Un objet en mouvement possède donc de ce fait de l'énergie; on peut dire la même chose d'un objet soulevé qui peut acquérir une vitesse en retombant, d'un ressort comprimé qui peut projeter un objet à une certaine vitesse, d'un litre d'essence, d'une onde électromagnétique qui peut mettre en mouvement les électrons dans une antenne réceptrice,

d'un photon, etc. Les explications supplémentaires G-2.4 vous fournissent plus de détails sur ce sujet.

TABLEAU G-2.3
Couleurs et longueurs d'onde

couleur	longueur d'onde	
	μm	nm
violet	0,39 – 0,46	390 – 460
bleu	0,46 – 0,49	460 – 490
vert	0,49 – 0,58	490 – 580
jaune	0,58 – 0,60	580 – 600
orange	0,60 – 0,62	600 – 620
rouge	0,62 – 0,76	620 – 760

☆ 147 Le terme **spectre** est utilisé dans ce cours dans deux sens voisins. Il peut désigner l'éventail des longueurs d'onde (ou fréquences) possibles pour un type d'ondes, comme les ondes électromagnétiques, d'où l'expression « spectre électromagnétique », comme il a été vu à la page 145. Il peut aussi signifier l'ensemble des longueurs d'onde émises par une substance ou un objet donnés et leurs intensités relatives, ce qui constitue en quelque sorte la « signature » de l'objet ou de la substance en question, comme on le verra dans ce chapitre. On parle alors du spectre du Soleil, d'une étoile ou de l'hélium, par exemple.

☆ **C4.1 LES MAGNITUDES (P. 166-170)**

☆ 149 Au complément 2.3, à la page 101 du manuel, vous avez vu que l'**intensité** est définie comme la quantité d'énergie qui frappe une surface par seconde par unité de surface éclairée. Les unités SI de l'intensité, le watt par mètre carré (W/m^2) vous ont peut-être fait penser à une unité que l'on utilise quotidiennement, soit le *watt* (W), qui est associée au concept de **puissance**.

Il convient de distinguer les notions de puissance et d'intensité. La puissance (P) est la quantité d'énergie (ΔE), de quelque forme que ce soit, produite ou transformée par unité de temps (Δt). Mathématiquement, on a :

$$P = \Delta E / \Delta t \quad \text{G-2.13}$$

Une ampoule électrique de 60 W consomme donc 60 joules à chaque seconde; pour une ampoule incandescente, cette énergie étant surtout transformée en chaleur, seulement 10 % environ se retrouvant sous forme d'énergie de rayonnement visible.

De son côté, l'intensité (I) est associée seulement à l'énergie transportée par une onde : c'est l'énergie (ΔE) qui pourrait être absorbée, par unité de temps (Δt), par une

surface placée perpendiculairement au chemin de l'onde, le tout divisé par l'aire (S) de cette surface, soit :

$$I = \frac{\Delta E / \Delta t}{S} \quad \text{G-2.14}$$

On voit ainsi que l'intensité peut être vue comme la puissance associée à une onde par unité de surface, c'est-à-dire :

$$I = P/S \quad \text{G-2.15}$$

L'intensité du rayonnement solaire mesurée à la surface de la Terre est d'environ 1 kW/m^2 , ce qui signifie, par exemple, qu'un panneau solaire d'un mètre carré, placé face au Soleil, reçoit environ 1000 J d'énergie de rayonnement à chaque seconde.

Toujours au complément 2.3, vous avez vu que la luminosité est définie comme la quantité d'énergie émise par une source lumineuse par unité de temps. La luminosité d'une étoile est donc, en d'autres termes, la puissance totale qu'elle émet. À la section 4.3, vous verrez comment calculer cette quantité pour une étoile dont on connaît la température et le rayon; pour le moment, si toutes ces notions vous paraissent un peu confuses, vous pouvez consulter les explications supplémentaires G-2.5, qui devraient vous aider à y mettre un peu d'ordre.

4.3 LUMIÈRE ET TEMPÉRATURE

- ☆ 147 Soulignons tout d'abord que la **température** de 0 K (égale à $-273,16^\circ\text{C}$) est la température la plus basse qui puisse (même théoriquement) être atteinte. On la désigne pour cette raison sous le nom de « zéro absolu ».
- ☆ 148 Dans le manuel, on présente trois lois qui décrivent le rayonnement d'un corps noir. Spécifions d'abord ce que l'on entend par ce concept. Comme tout concept, il s'agit bien sûr d'une abstraction. Un **corps noir** est un « objet » qui aurait la propriété d'absorber *toute* la radiation qui tombe sur lui. On pourrait croire, à première vue, qu'un tel objet devrait paraître parfaitement noir. Il n'en est rien : on peut prouver à l'aide de lois très générales qu'un parfait absorbant serait aussi... parfait émetteur. Mais un tel objet n'existe pas dans la nature. D'où provient cette appellation et, surtout, quel est l'intérêt de ce concept?

On peut montrer, à partir de considérations théoriques, qu'un corps noir – qui n'existe pas, ne l'oubliez pas! –, porté à une température donnée, émet une radiation dont les caractéristiques sont complètement indépendantes du matériau dont il est formé. De plus, la puissance totale qu'il émet augmente avec sa température, en même temps que se modifie la partie du spectre où se retrouve la majeure partie de cette puissance. En fait, s'il est suffisamment chaud, il ne sera plus noir du tout. En fait, c'est à la température de la pièce ($\approx 300 \text{ K}$) qu'un corps noir... est noir! Ce qui ne veut pas dire qu'il n'émet pas : s'il paraît noir à nos yeux, il émet pourtant, mais surtout dans l'infrarouge. En fait, *tous* les objets émettent de la radiation, quelle que soit leur tempéra-

ture. C'est d'ailleurs un des facteurs importants à considérer lorsque l'on étudie la construction des serres, par exemple, ou l'isolation des édifices.

On peut calculer théoriquement les caractéristiques de la radiation d'un corps noir : elles sont décrites par les lois de Wien, Stefan-Boltzmann et par la loi de Planck que vous avez vue à la section 4.2 (équation 4.4). En fait, ces lois ont d'abord été des lois empiriques, avant que Planck ne réussisse à dériver sa loi de lois plus générales, et à montrer que les deux autres lois en étaient des conséquences immédiates. Ces lois nous renseignent sur :

- la longueur d'onde λ_{pic} à laquelle l'émission est maximale (Wien; équation 4.5) :

$$\lambda_{pic}(m) = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{T(K)} \quad \text{ou encore} \quad \lambda_{pic}(nm) = \frac{2,9 \times 10^6}{T(K)} \quad G-2.16$$

- ☆ 150 – la **luminosité surfacique** ℓ , soit la puissance émise par unité de surface du corps (Stefan-Boltzmann, équation 4.7) :

$$\ell = \sigma T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4) \quad G-2.17$$

- la répartition de la puissance (ou de l'intensité) émise à travers le spectre électromagnétique (Planck, illustrée aux figures 4.5 et G-2.13).

C'est bien beau tout ça, mais on a dit qu'un corps noir, ça n'existait pas réellement! Cette étude n'est-elle qu'un pur jeu intellectuel, du type discussion sur le sexe des anges? Pas du tout! Elle prend tout son sens si l'on sait que la plupart des objets (noirs ou non), lorsqu'on les chauffe, émettent une radiation qui ressemble beaucoup à celle d'un corps noir. C'est le cas des filaments d'ampoules électriques, des éléments de cuisinière électrique, et même des étoiles. Dans la plupart des situations, il suffit d'appliquer une légère correction* aux lois mentionnées ci-dessus. Le corps noir constitue en quelque sorte le modèle de base représentant tout objet émetteur de radiation. En ce sens, il s'agit d'un concept indispensable.

Il vous sera maintenant plus facile de comprendre le lien évoqué dans le manuel entre la température des étoiles et leur couleur, ou encore de découvrir ce qui se cache sous des affirmations de la vie courante comme « fer rouge », « chauffé à blanc » ou « un éclair bleuté ». La figure G-2.13 suggère bien, à l'aide de la loi de Planck, qu'un objet paraîtra plutôt rouge, plutôt bleu ou tout simplement blanc, selon qu'en fonction de sa température, la position du maximum de la courbe d'intensité tombe dans l'infrarouge, l'ultraviolet ou le visible.

* La principale différence réside dans la puissance totale émise qui n'est généralement qu'une fraction de ce qui est prédit par la loi de Stefan-Boltzmann. Cette fraction est appelée émissivité, et sa valeur se situe entre 0,1 (pour un métal poli) et 0,9 (pour la suie). Quant à la *forme* de la distribution d'intensité (figures 4.5 ou G-2.13), elle ne varie pas beaucoup d'un matériau à l'autre.

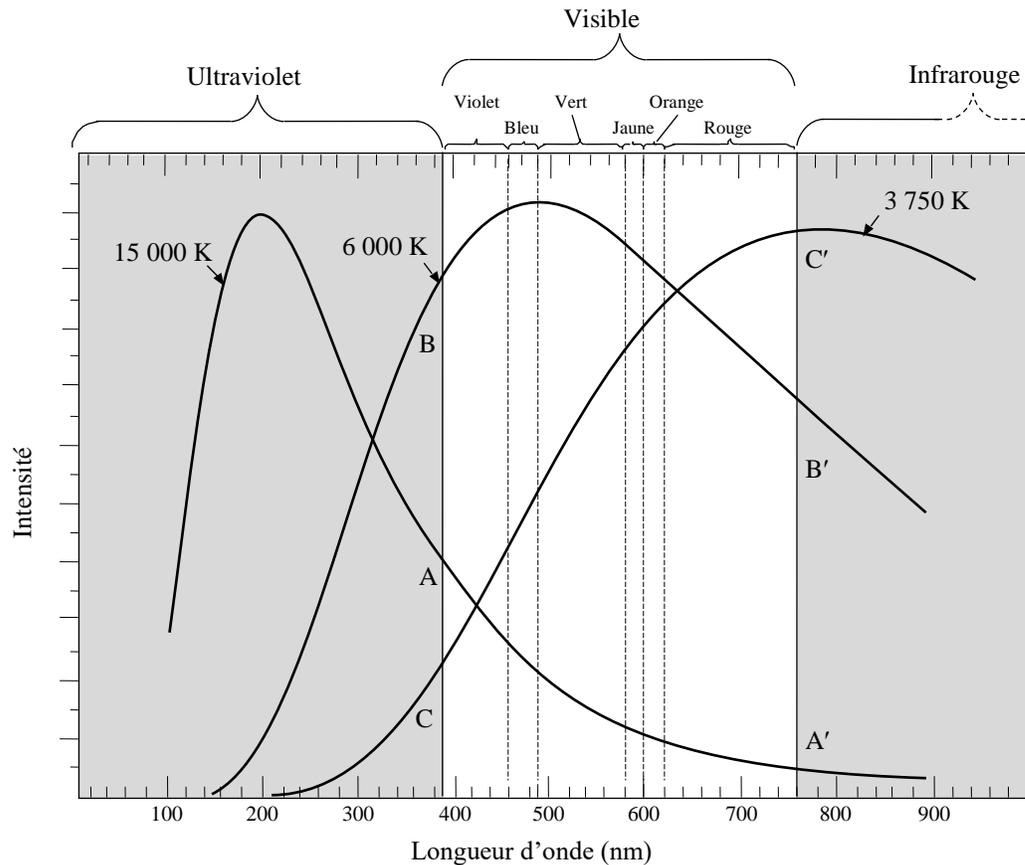


FIGURE G-2.13

Couleur et température. La courbe de l'intensité en fonction de la longueur d'onde d'un corps noir explique qu'à 15 000 K, il paraît bleu (AA'); à 6 000 K, blanc (BB') et à 3 750 K, rouge (CC'). Notez que pour les trois températures, on a tracé l'intensité relative à la valeur maximale; or, cette valeur maximale augmente avec la température.

Ces lois fournissent deux façons de déterminer la température de surface du Soleil :

- si l'on connaît la longueur d'onde du maximum de la courbe d'émission de Soleil, la loi de Wien permet immédiatement de déterminer cette température;
- si l'on connaît la quantité d'énergie en provenance du Soleil que reçoit la haute atmosphère de la Terre par unité de surface (ou **constante solaire**), on peut employer la loi de Stefan-Boltzmann pour en déduire cette température; le calcul fait intervenir la distance Terre-Soleil et la taille de celui-ci.

Historiquement, c'est la deuxième méthode qui, en 1894, a permis à l'astronome irlandais W. E. Willson et son collègue P. L. Gray de déterminer la première valeur fiable de cette température (quelques centaines de degrés de plus que la valeur actuellement acceptée).

☆ 4.4 LE PHOTON ET L'ATOME

La double nature de la lumière – onde et particule – apparaît ici avec toutes ses conséquences. Lorsque l'on parle de l'émission du rayonnement par des atomes dont les valeurs possibles d'énergie potentielle sont **discrètes**, c'est-à-dire que seules certaines valeurs précises sont possibles, on parlera de **quanta** ou de photons, particules possédant une énergie correspondant exactement à la différence entre deux valeurs possibles de l'énergie de l'atome. De ce point de vue, une plus grande intensité de rayonnement correspondra simplement à un plus grand nombre de photons émis par unité de temps, tandis que la longueur d'onde trouvera son équivalent dans l'énergie de chaque photon.

- ☆ 155 Par contre, lorsque l'on considère l'émission d'un objet chauffé, tel un élément de cuisinière électrique, on parlera d'ondes électromagnétiques émises simultanément à toutes les longueurs d'onde, formant un continu aussi appelé **spectre continu**. Dans ce cas, l'intensité sera reliée à l'amplitude des ondes émises.

Malgré les apparences, il n'y a rien de contradictoire ici, car tout est question de commodité; il est possible, mais plus compliqué et moins intuitif, de décrire chacun de ces phénomènes à l'aide de l'autre modèle. On pourrait tenir le même discours sur les récepteurs de lumière, car certains sont mieux décrits en supposant l'arrivée de photons possédant des énergies précises et d'autres en considérant la lumière comme une onde.

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES

☆ G-2.4 L'ÉNERGIE

Si les notions d'onde et de particule servent à décrire l'état de la matière, l'énergie, elle, est associée aux transformations qu'elle subit ou qu'elle est susceptible de subir. Ainsi, au déplacement de la matière est associée une forme d'énergie, appelée **énergie cinétique**, dont la valeur dépend de la masse qui se déplace et de la vitesse à laquelle s'effectue ce déplacement; mathématiquement, on a $E_c = 1/2 mv^2$.

La température d'un corps est directement reliée au mouvement (rotation ou déplacement pour les gaz, vibration pour les gaz et les solides) des atomes ou molécules qui le composent : cette forme d'énergie cinétique est qualifiée d'**énergie thermique** ou de **chaleur**. Un ressort, un liquide ou un gaz comprimé possède la capacité de propulser un objet lorsqu'il se détend : on dit qu'il possède de l'**énergie potentielle**, qualifiée dans ce cas d'**élastique**; cette énergie est proportionnelle à la longueur de compression du ressort, ou encore à la pression du liquide ou du gaz. Même chose pour un objet que l'on soulève et qui pourrait acquérir une certaine vitesse si on le laissait tomber : on dira qu'il a une **énergie potentielle gravitationnelle** proportionnelle à son altitude, donc qui augmente lorsqu'il s'élève.

La notion d'énergie est inséparable de celle de *transformation* : toutes ces formes d'énergie sont interchangeable, elles se transforment les unes en les autres. Par exemple, lorsque le ressort ou le gaz se détend ou que l'objet soulevé retombe vers le sol, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique.

On a systématisé ces idées en énonçant le principe de **conservation de l'énergie**. Ce principe stipule qu'en dépit de toutes les transformations que peut subir un système isolé (ou fermé), son énergie totale (énergie cinétique + somme des énergies potentielles de toutes formes) restera constante.

Prenons un exemple courant : imaginons une voiture qui s'est arrêtée avant d'entreprendre une longue montée. On dit que l'essence est une source d'énergie, plus précisément qu'elle possède une **énergie potentielle chimique**. En effet, à l'issue de la réaction chimique que constitue la combustion de l'essence et qui la transforme en d'autres substances, une partie de cette énergie se retrouve sous d'autres formes.

Ainsi, lorsque la voiture atteint le haut de la côte, le niveau du réservoir d'essence a baissé, si légèrement soit-il. On dira qu'il y avait une certaine quantité d'énergie potentielle chimique dans l'essence maintenant disparue. Attention : même si l'on utilise un langage qui prête à cette interprétation, l'énergie n'est pas une substance, mais bien une propriété d'un objet ou d'un système; il n'y a donc pas de l'énergie mélangée à de l'essence, mais bien de l'essence qui possède la propriété d'accroître, lorsqu'on la brûle, l'énergie des objets avec lesquels elle est en contact. En vertu du principe de conservation de l'énergie, cette énergie « disparue » *doit* se retrouver sous d'autres formes. Mais lesquelles?

D'abord sous forme de chaleur ou énergie thermique, car le moteur, les gaz d'échappement, les pneus, le revêtement de la route et l'air qui a passé autour du moteur ont été réchauffés; puis sous forme d'énergie cinétique, car la voiture se déplace maintenant à une certaine vitesse; également sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle, car elle est à une altitude plus grande qu'à son point de départ. D'autres formes d'énergie contribuent aussi au bilan, quoique de façon moins importante : l'**énergie électrique** faisant fonctionner la radio et les phares, rechargeant la batterie; l'**énergie de rayonnement** associée aux faisceaux lumineux de ces phares, dont la valeur est donnée par l'équation 4.4. Même le bruit fait par la voiture contribue au bilan énergétique : les ondes sonores, associées à l'oscillation des molécules d'air, transportent de l'énergie cinétique (qu'on peut qualifier **d'acoustique**).

Quel que soit le détail de toutes ces transformations, une chose est sûre : la somme de toutes les énergies qui peuvent être associées au système, formé ici de la voiture et de son environnement (pavage de la route, air ambiant) reste rigoureusement constante.

L'unité d'énergie est le *joule* (J)*, tel qu'on le mentionne à l'annexe II du manuel. Un joule correspond à l'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un millilitre d'eau de 1/4°C, ou bien pour soulever de un mètre un objet de 100 g, ou encore à l'énergie de rayonnement reçue pendant dix secondes par une surface de 1 cm² placée face au Soleil. Ce qu'Hydro-Québec nous facture, c'est l'énergie électrique que nous consommons pendant deux mois. Elle est indiquée sur notre relevé en kilowatts-heures (kWh), quantité correspondant à 3,6 millions de joules.

Il est possible de pousser encore plus loin l'application du concept d'énergie. Au début du siècle, Einstein, eh oui! encore lui, émettait l'hypothèse qu'un objet, même immobile, possède une certaine énergie, proportionnelle à sa masse. Cette énergie, dite « énergie au repos », est une **énergie potentielle nucléaire** qui peut elle aussi se transformer, à la suite de réactions nucléaires, en d'autres formes d'énergie. La quantité d'énergie ainsi « contenue » dans les objets qui nous entourent est impressionnante. Pour un objet de 1 kg, on parle de 9×10^{16} J, ou 25 milliards de kWh, ce qui suffirait à alimenter tout le Québec en électricité pendant plus d'un mois, si l'on pouvait transformer toute cette énergie en énergie électrique!

On en vient ainsi à parler d'*équivalence masse-énergie*. C'est là le sens de la relation si justement célèbre $E = mc^2$, qui recèle en son sein à la fois le secret de la vie et celui de la mort. Cette énergie, comme on le verra en détail au module 4, est en effet celle qui fait briller le Soleil... et exploser les bombes nucléaires. Cette idée allait hanter Einstein jusqu'à la fin de sa vie.

☆ G-2.5 LUMINOSITÉ, INTENSITÉ ET MAGNITUDES

Luminosité, luminosité surfacique, intensité, magnitude absolue, magnitude apparente, sirius, luminosité solaire, watts : il y a de quoi perdre son latin dans toute cette faune. On peut faire un peu d'ordre dans tout ça en classant ces concepts, qui sont tous reliés à la quantité d'énergie lumineuse émise par les étoiles, en deux catégories : valeurs apparentes et valeurs absolues.

Valeurs apparentes. Ce sont les valeurs qui dépendent autant de l'étoile que de son éloignement et des conditions d'observation. On y retrouve :

- L'intensité (symbole : I) : énergie lumineuse traversant par unité de temps une surface de 1 m² située au point d'observation et perpendiculaire au trajet de la lumière. Elle est exprimée en W/m² ou en sirius (1 sir = $1,69 \times 10^{-7}$ W/m²). Par exemple, l'intensité de la radiation provenant du Soleil et atteignant la haute atmosphère, ou **constante solaire**, est égale à 1 360 W/m².

* Une unité souvent utilisée en physique, pour les phénomènes faisant intervenir des particules élémentaires (électrons, photons, etc.), est l'*électron-volt* (eV). Un eV est défini comme l'énergie cinétique acquise par un électron qui a été accéléré entre deux plaques soumises à une tension de 1 volt. Il est égal à $1,6 \times 10^{-19}$ J.

- La magnitude apparente (symbole : m) : intensité relative d'une étoile dans le visible, telle qu'on la mesure sur Terre, exprimée sur une échelle logarithmique inversée, soit :

$$m = -1,46 - 2,5 \log (I_{\text{étoile}} / I_{\text{Sirius}}) \quad \text{G-2.18}$$

- La magnitude bolométrique apparente (symbole : m_{bol}) : intensité relative d'une étoile dans l'ensemble du spectre électromagnétique, telle qu'elle pourrait être mesurée hors de l'atmosphère terrestre, exprimée aussi sur une échelle logarithmique inversée. On a :

$$m_{\text{bol}} = -2,06 - 2,5 \log (I_{\text{étoile}} / I_{\text{Sirius}}) \quad \text{G-2.19}$$

où les intensités, mesurées pour l'ensemble du spectre, sont différentes (la plupart du temps légèrement) de celles de l'équation G-2.18.

On peut aussi écrire :

$$m_{\text{bol}} = m + \text{correction} \quad \text{G-2.20}$$

où la correction, presque nulle pour une étoile comme le Soleil, devient importante, atteignant jusqu'à trois magnitudes, pour les étoiles les plus chaudes ou les plus « froides ».

Valeurs absolues. Ce sont les valeurs qui ne dépendent que de l'étoile, et non de son éloignement ou des conditions sous lesquelles on l'observe. On y retrouve :

- La puissance (symbole : P) : quantité d'énergie lumineuse émise par unité de temps par l'étoile, exprimée en W.
- La luminosité (symbole : L) : même chose que la puissance, mais généralement exprimée en luminosités solaires (L_{\odot}), avec $L_{\odot} = 3,83 \times 10^{26}$ W.
- La luminosité surfacique (symbole : ℓ) : c'est la puissance émise par chaque unité de surface de l'étoile, qui peut être calculée à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann (équation G-2.17); ses unités sont les W/m².
- La magnitude bolométrique absolue (symbole : M_{bol}) : magnitude bolométrique apparente qu'aurait une étoile si elle était située à 32,6 a.l. de la Terre. L'effet des distances différentes des étoiles étant ainsi annulé, cette quantité est directement reliée à la luminosité (voir l'équation 4.28).

Pour terminer, mentionnons qu'une échelle logarithmique est une échelle basée sur le *logarithme* des nombres que l'on veut ordonner. Le logarithme d'un nombre correspond, avec une erreur maximale de 0,5, à l'exposant du nombre exprimé en notation scientifique, arrondi à l'entier supérieur lorsque le premier chiffre est 3 ou plus. Ainsi, $\log (2,3 \times 10^7) \approx 7$ et $\log (3,6 \times 10^3) \approx 4$. Pour une valeur plus précise, on doit recourir à une calculatrice scientifique; dans notre exemple, les valeurs, avec une précision de cinq chiffres, sont respectivement 7,3617 et 3,5563.

L'avantage principal des échelles logarithmiques est qu'elles permettent de présenter dans un domaine restreint une gamme impressionnante de valeurs. C'est le cas de la brillance des étoiles, où des facteurs d'intensité de l'ordre du milliard se trouvent comprimés sur une échelle, celle des magnitudes, allant de 0 à 25 environ.

☆ G-2.6 MOUVEMENT PROPRE ET VITESSE EFFECTIVE DES ÉTOILES

- ☆ 160 L'effet Doppler est un des outils d'investigation majeurs de l'astronomie moderne. En effet, si l'on connaît la valeur du décalage spectral δ , on peut déterminer facilement la vitesse de l'étoile, par rapport à la Terre, le long de la ligne de visée. Toutefois, il ne s'agit là que de la **vitesse radiale**, notée v_r dans ce guide, c'est-à-dire une **composante** de la vitesse totale ou **vitesse effective** (v_e) de l'étoile, l'autre composante étant la vitesse tangentielle (v_T). Il faut se rappeler que ces trois vitesses, soit la vitesse effective et ses deux composantes, sont des vecteurs et que combiner des vecteurs signifie les additionner. Les trois vitesses mentionnées plus haut forment ainsi un triangle rectangle (figure G-2.14).

Pour un certain nombre d'étoiles, il est possible de déterminer la valeur de la vitesse tangentielle. Il faut pour cela connaître la distance de l'étoile et observer son mouvement propre, c'est-à-dire son déplacement angulaire annuel par rapport aux étoiles plus lointaines, excluant bien sûr l'effet de la parallaxe. Si θ est la parallaxe, exprimée en secondes d'arc, et μ le mouvement propre, exprimé en secondes d'arc par année, la vitesse tangentielle sera donnée, en km/s, par :

$$v_T = 4,74 \mu / \theta \text{ (km/s)} \quad \text{G-2.21}$$

En combinant cette valeur avec la vitesse radiale obtenue par l'effet Doppler, on peut déterminer la vitesse effective (v_e) à l'aide du théorème de Pythagore, soit :

$$v_e^2 = v_T^2 + v_r^2 \quad \text{G-2.22}$$

d'où l'on tire :

$$v_e = \sqrt{v_T^2 + v_r^2} \quad \text{G-2.23}$$

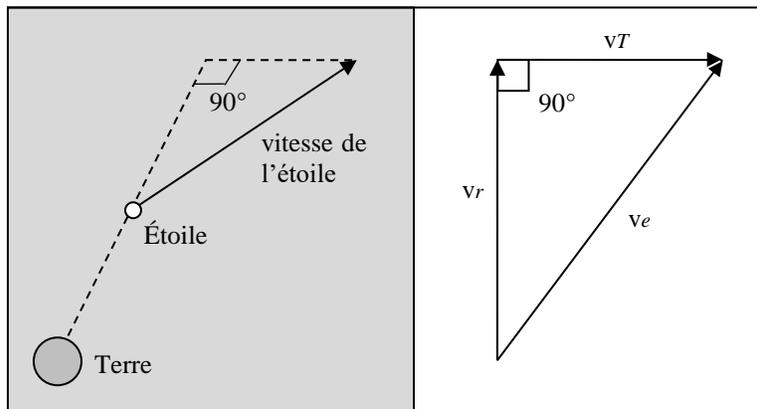


FIGURE G-2.14

La vitesse effective (v_e) d'une étoile et ses composantes, les vitesses radiale (v_r) et tangentielle (v_T).

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

- BORRA, E. F. (1984). « Des miroirs liquides pour la cosmologie », *La Recherche*, n° 161, décembre, p. 1600-1601.
- GAMMA, E. (2013). « Liquid astronomy », *Sky & Telescope*, n° 346, avril, p. 26-31.
- GILMOZZI, R. (2006). « Les télescopes géants du futur », *Pour la Science*, n° 346, août.
- HICKSON, P. (2007). « Liquid-mirror telescopes. An old idea for astronomical imaging is undergoing a technology-driven renaissance ». *American Scientist*, vol. 95, n° 3, p. 216.
- LIVIO, M. (2006). « Les exploits de Hubble », *Pour la Science*, n° 346, août.
- VERDET, J.-P. (1990). *Une histoire de l'astronomie*, Paris, Seuil, p. 175-188.

MODULE 2, PARTIE II

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

La propagation de la lumière peut être modifiée de diverses façons, décrites par les concepts de réfraction, dispersion et diffraction. Tous ces effets sont importants pour la conception des instruments optiques.

Les outils d'observation de l'astronomie n'ont cessé de se perfectionner depuis les premières observations de Galilée. Les caractéristiques importantes pour ces instruments sont :

- le pouvoir de captation, proportionnel au carré du diamètre de l'ouverture du télescope;
- le pouvoir séparateur, lié à la longueur d'onde et aux dimensions du télescope;
- la résolution, qui dépend aussi de la qualité des composants et des conditions d'utilisation;
- la partie du spectre couverte;
- la sensibilité et la taille des détecteurs.

La lumière, comme toute la matière, présente des caractéristiques qui tiennent à la fois de la particule et de l'onde, les deux représentations privilégiées par la physique. Par conséquent, selon les situations, on parlera soit de la longueur d'onde ou de la fréquence de la lumière (vue sous son aspect onde électromagnétique), soit de l'énergie des photons qui composent la lumière (vue comme formée de particules). Toutes ces quantités sont d'ailleurs reliées les unes aux autres : plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence de l'onde et l'énergie des photons sont grandes.

L'énergie est associée au mouvement. Il peut s'agir d'un mouvement réel (énergie cinétique ou thermique), ou encore de la possibilité de se transformer en d'autres formes d'énergie, donnant lieu éventuellement à un mouvement.

Le principe de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale d'un système fermé est constante, quelles que soient les transformations de certaines formes d'énergie en d'autres formes. Une liste partielle des formes d'énergie possibles comprend, outre l'énergie cinétique, l'énergie thermique (ou chaleur), l'énergie électrique, l'énergie de rayonnement, l'énergie potentielle élastique, chimique, gravitationnelle et nucléaire.

Les concepts de puissance (énergie produite ou consommée par unité de temps) et d'intensité (puissance transportée par une onde par unité de surface perpendiculaire

au trajet de celle-ci) rendent compte du rythme auquel s'effectuent les transformations ou le transport d'énergie.

Le développement de la spectroscopie, au cours du 19^e siècle, donna le premier élan à l'astrophysique. Les nouvelles découvertes théoriques (lois du rayonnement, conservation de l'énergie) furent vite mises à contribution dans ce nouveau champ d'étude.

Les lois du rayonnement sont fondées sur l'étude du corps noir, modèle représentant assez bien, moyennant quelques corrections, les propriétés de tout objet émettant de la lumière lorsqu'il est chauffé. Ces lois sont au nombre de trois :

- la loi de Wien, qui indique, pour une température donnée, la longueur d'onde autour de laquelle est émise la plus grande partie du rayonnement;
- la loi de Stefan-Boltzmann, qui relie la température à la puissance irradiée par chaque unité de surface d'un corps noir;
- la loi de Planck, qui décrit la contribution relative de chacune des longueurs d'onde dans le spectre d'émission d'un corps noir.

La magnitude (ou magnitude apparente) est une unité utilisée pour décrire la brillance des étoiles. Il s'agit d'une échelle logarithmique inversée : une grande magnitude signifie une faible brillance et une même différence de magnitude correspond à un même *rapport* d'intensité. Pour comparer les puissances irradiées par différentes étoiles (leur luminosité), il faut éliminer l'effet des distances très diverses qui nous séparent d'elles. À cette fin, on a introduit le concept de magnitude absolue, soit la magnitude qu'aurait l'étoile si elle se trouvait à 10 parsecs de nous.

Pour les fins de l'observation à partir de la Terre, on décompose le vecteur vitesse (vitesse effective) des étoiles en deux composantes : la vitesse tangentielle, que l'on peut déterminer en mesurant la parallaxe et le mouvement propre de l'étoile, et la vitesse radiale, qui est évaluée à l'aide de l'effet Doppler.

MODULE 2, PARTIE II

ACTIVITÉS

QUESTIONS DE RÉVISION

Chapitre 4 : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 38, 39.

Chapitre 5 : 2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 26, 30, 31, 33, 34.

PROBLÈMES DU MANUEL

Chapitre 5 : P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9.

Chapitre 4 : P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P20, P21.

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

G2.20 a) La _____ est le phénomène responsable de la déviation des rayons lumineux qui se produit lorsque la lumière frappe un obstacle (ouverture ou bord).

b) La _____ décrit le changement de direction qui survient lorsque la lumière change de milieu, ou lorsque les propriétés du milieu où elle se propage changent d'un endroit à l'autre.

c) La _____ rend compte du fait que les diverses longueurs d'onde (ou couleurs) ne sont pas déviées du même angle lorsque la lumière change de milieu.

G2.21 Distinguez *limite de résolution théorique* (aussi appelé pouvoir séparateur) et *valeur réelle de la limite de résolution* (aussi appelée résolution), en indiquant les phénomènes qui en fixent la valeur pour un système d'observation donné.

G2.22 Combien de fois le pouvoir de captation d'un télescope de 10 m de diamètre est-il plus grand que celui d'un télescope de 2 m?

2 5 10 20 25 50 100

- G2.23 Donnez trois raisons pour lesquelles le télescope spatial, même avec son ouverture modeste (2,4 m), fournit des images plus nettes que tout autre télescope existant.
- G2.24 Calculez la limite de résolution théorique d'un télescope de 4 m de diamètre devant lequel on a placé un filtre qui ne laisse passer que la lumière verte.
- G2.25 Calculez le pouvoir séparateur d'un radiotélescope de 50 m de diamètre :
- à la longueur d'onde de 21 cm;
 - à la fréquence de 20 GHz.
- G2.26 Parmi les caractéristiques suivantes, identifiez celles qui se rapportent aux particules, celles qui sont reliées aux ondes et celles qui s'appliquent aux deux concepts :
- localisées en une région bien délimitée de l'espace
 - possèdent une énergie
 - possèdent une fréquence
 - se propagent dans une seule direction
 - peuvent se rencontrer sans modifier leurs mouvements
- G2.27** Énumérez quelques transformations d'énergie présentes dans les situations suivantes.
- Une cycliste descend une pente raide en serrant les freins; sa bicyclette est munie d'une dynamo et ses feux sont allumés.
 - Un haltérophile soulève ses haltères, puis les laisse retomber au sol.
 - Deux étoiles orbitent l'une autour de l'autre. L'une est une étoile semblable au Soleil et l'autre est une étoile morte (appelée étoile à neutrons) très petite et très dense qui réussit, à cause de la force de son attraction gravitationnelle, à arracher à sa compagne d'énormes quantités de matière. En tombant vers l'étoile dense, cette matière est tellement comprimée qu'elle devient extrêmement chaude, au point d'émettre de grandes quantités de rayons X. Ces rayons X sont détectés à l'aide de satellites en orbite autour de la Terre.
- G2.28 a) Calculez la longueur d'onde émise par la station MF dont l'indicatif est 89,1. *Suggestion* : Regardez sur le cadran d'un poste radio pour en savoir plus sur la signification de ce chiffre.

- b) Déterminez la fréquence (approximative) émise par un laser hélium-cadmium (He-Cd) qui produit un faisceau bleu. *Suggestion* : Consultez le tableau G-2.3.

G2.29 Calculez les valeurs suivantes :

- l'énergie d'un photon appartenant à la raie $H\alpha$ de la série Balmer;
- la longueur d'onde autour de laquelle se retrouve la plus grande partie de la radiation émise par la surface d'une planète, dont la température est 200°C ;
- la fréquence autour de laquelle la plus grande partie de la radiation solaire est émise.

Note : Si des informations supplémentaires sont nécessaires, elles se trouvent dans le manuel.

G2.30 Calculez les valeurs suivantes :

- la longueur d'onde d'un photon de $6,2\text{ keV}$ détecté par un satellite astronomique observant les sources à rayons X extragalactiques;
- la fréquence correspondant à la raie de l'hydrogène à 21 cm , une des longueurs d'onde importantes en radioastronomie;
- la longueur d'onde autour de laquelle se retrouve la plus grande partie de la radiation produite par le corps humain, dont la température est de $37,5^{\circ}\text{C}$.

G2.31 Supposons qu'une ampoule de 100 W (puissance électrique consommée) émet 50% de cette puissance sous forme de radiation électromagnétique, le reste chauffant l'air autour d'elle.

- Quelle est l'énergie électrique consommée par cette ampoule en deux heures?
- Quelle est l'intensité de la radiation mesurée à 25 m de l'ampoule?

Suggestion : Comme l'ampoule émet dans toutes les directions, on peut considérer que la puissance totale irradiée est uniformément répartie sur une sphère (imaginaire) centrée sur celle-ci.

G2.32 Énumérez les trois composantes du spectre du Soleil.

- G2.33 La température d'une naine blanche (étoile très petite et très chaude) nouvellement formée peut atteindre 57 000 K. Calculez la puissance émise par un mètre carré de la surface d'une telle étoile. Comparez cette valeur avec celle qui est produite par une centrale électrique moyenne, soit 1 GW.
- G2.34** a) Calculez la puissance totale émise par une étoile de 4 millions de km de rayon, dont la radiation est émise surtout dans le bleu.
- b) Supposez qu'une planète se trouve à une distance d'une unité astronomique de l'étoile décrite en a). Quelle est l'intensité de radiation reçue sur cette planète?
- c) La vie telle que nous la connaissons sur Terre est-elle possible sur cette planète?
- G2.35 Quelle est l'origine de l'unité de brillance, la magnitude? Pourquoi a-t-on choisi de faire correspondre *grande magnitude* et *faible brillance*, ce qui est un peu mêlant au début?
- G2.36 À quelle distance doit être située une étoile pour que sa magnitude bolométrique absolue égale sa magnitude bolométrique apparente?
- G2.37 Expliquez pourquoi une étoile froide possède un grand indice $B - V$ positif.
- G2.38 Les étoiles les plus susceptibles d'afficher un mouvement propre observable sont celles qui présentent une grande parallaxe (voir page 83). Supposons que vous vous intéressiez à une étoile en particulier et que vous observiez un changement dans sa position par rapport aux étoiles lointaines. Comment pourriez-vous savoir si ce déplacement est dû à la parallaxe ou s'il s'agit du mouvement propre de l'étoile?
- G2.39 a) Laquelle des deux composantes de la vitesse d'une étoile demande, pour être calculée, de connaître la distance de l'étoile?
- b) Laquelle exige généralement plusieurs années d'observation?
- G2.40** On vient de découvrir une étoile dont la parallaxe est 0,50 " et le mouvement propre 4,5 " par année.
- a) Déterminez la vitesse tangentielle de l'étoile.
- b) Déterminez la vitesse effective (par rapport au Soleil) de cette étoile, si l'on a observé que la raie $H\alpha$ de Balmer apparaît dans son spectre à 656,42 nm au lieu de 656,31 nm.
- c) Est-ce que cette étoile s'éloigne ou se rapproche de la Terre?

- d) Que faut-il supposer au sujet du mouvement de la Terre au moment de l'observation, si l'on désire que la réponse de c) donne réellement la vitesse par rapport au Soleil?

Suggestion : Faites un schéma semblable à celui de la partie droite de la figure G-2.14.

G2.41 Supposons que l'on vous charge de décider du type et de la dimension du télescope dont doit être équipé un satellite devant être lancé prochainement en orbite. Le critère auquel doit répondre ce télescope est le suivant : il doit résoudre un système d'étoiles double possédant les caractéristiques suivantes :

- température des étoiles : 9700 K (la même pour les deux étoiles)
- dimensions : respectivement 2 et 6 R_{\odot} (R_{\odot} : rayon du Soleil)
- distance entre les deux étoiles : 725 millions de km
- distance de la Terre : 50 années-lumière

Déterminez le genre et la dimension minimale du télescope nécessaire pour obtenir une photographie où les deux étoiles apparaissent séparément. Calculez aussi l'intensité totale, observée à partir du satellite, de la radiation en provenance des deux étoiles.

Module 3

LE GRAND JEU DES ÉTOILES

Manuel

Chapitre 6 *Les caractéristiques des étoiles*

Chapitre 7 *Vie et mort des étoiles*

Ce quatrième module couvre les chapitres 6 et 7 du manuel. Il présente une synthèse des connaissances acquises depuis le début du siècle sur les étoiles. Leurs propriétés bien sûr, que l'on connaît de façon détaillée en dépit des distances immenses qui nous séparent d'elles, mais aussi leur évolution, de leur naissance à leur mort..., car les étoiles meurent elles aussi.

MODULE 3

PRÉSENTATION

Songez un instant à la légende des Éphémères, insectes remarquables qui habitaient une immense forêt. Ces nobles créatures jouissaient d'une grande intelligence, mais la durée de leur vie, tragiquement brève, ne dépassait pas une journée.

Aux yeux des Éphémères, la forêt semblait éternelle et immuable. De génération en génération, ils vivaient sans jamais remarquer le moindre changement au feuillage environnant. Néanmoins, à force d'observation attentive et de raisonnements judicieux, certains Éphémères vinrent à supposer que la forêt pouvait changer. Ils commencèrent à soupçonner que les petites pousses vertes pouvaient grandir et devenir de grands arbres; que ceux-ci, ayant atteint leur maturité, finissaient par mourir et retomber au sol, troncs pourris souillant la forêt, mais en même temps engrais enrichissant le sol pour les arbres à venir. Bien que ne pouvant être eux-mêmes témoins de ces transformations, les Éphémères prirent conscience de la réalité de ces cycles vitaux, s'étendant sur des périodes, infiniment longues, de plusieurs années.

Les astronomes se retrouvent dans une situation analogue...

W. J. KAUFMANN III, *Universe*.
(traduction libre)

Les premières décennies du 20^e siècle ont permis de réunir toutes les pièces du grand puzzle de la structure des étoiles. Il ne manquait que la clé permettant d'assembler toutes ces données en un cadre théorique solide. C'est la formulation d'une nouvelle théorie physique aux développements prodigieux – la mécanique quantique – qui permet, au début des années 30, d'apporter une réponse satisfaisante aux questions non encore résolues. Les modèles de génération d'énergie alors proposés montrent un enchaînement complexe, mais ordonné de réactions nucléaires. Ces modèles rendent compte à la fois de la formidable réserve d'énergie dont disposent les étoiles et de la

formation de tous les éléments connus à partir des éléments les plus simples – et plus répandus – dans l’Univers : l’hydrogène et l’hélium.

L’histoire de l’astronomie, comme celle de toute science, peut être vue comme l’alternance entre deux processus distincts. Tout d’abord, comme on a pu l’entrevoir au module 2, il y a l’accumulation d’informations, avec un souci d’en accroître la quantité ou la précision. Pas n’importe quelle information toutefois : celle qui paraît pertinente compte tenu de la vision partagée par les membres d’une communauté scientifique et des théories qu’elle endosse. L’objectif demeure toutefois limité à cet accroissement, bien encadré, des connaissances.

Puis, de temps à autre, un ou des individus proposent un nouveau cadre, une nouvelle interprétation de la réalité ou, du moins, d’une partie de celle-ci. Cette nouvelle vision s’appuie, bien sûr, sur les connaissances existantes. Pourtant, elle permet de franchir un pas important vers une meilleure représentation du réel. Elle établit des liens entre des données que l’on croyait jusqu’alors totalement indépendantes. Elle suggère aussi de nouvelles voies dans lesquelles l’effort scientifique pourra dorénavant s’engager.

Bien entendu, tout ceci se passe dans une société dont le fonctionnement impose de lourdes contraintes à l’activité scientifique. Au sein même des communautés scientifiques comme à l’extérieur de celles-ci, des jeux complexes de persuasion sont à l’œuvre, fixant en bonne partie le sort des nouvelles propositions. C’est dans ce cadre qu’une science se transforme, évolue.

L’astronomie est passée elle aussi par de telles transformations. Ainsi après les travaux d’Hertzsprung et Russell et les développements qui ont suivi, les étoiles, du moins pour les spécialistes en astrophysique, sont devenues plus que des objets sur lesquels on accumule une gamme impressionnante de données. Les étoiles sont maintenant des points sur un diagramme, points dont la position résume à peu près tout ce que l’on connaît d’elles et permet de prédire leur évolution, leur destin même. C’est ainsi qu’un jour ou l’autre, une question nous vient fatalement à l’esprit : le Soleil a-t-il toujours brillé? brillera-t-il toujours? Une certaine angoisse est associée à ces interrogations. Plus encore, il y a l’incrédulité : comment peut-on savoir? C’est la cohérence de l’entreprise scientifique, qui unit en un même cadre d’analyse l’infiniment petit et l’infiniment grand, et son pouvoir de prédiction qui nous amènent à lui accorder notre confiance. Mais comment vérifier la validité des théories et modèles relatifs à des phénomènes s’étendant sur des milliards d’années? Les expériences sont de toute évidence impossibles : pas question de créer des étoiles en laboratoire!

La réponse réside dans la complexité de l’Univers qui s’étend devant nous. S’il nous est impossible d’observer la vie entière d’une étoile, nous avons par contre sous les yeux des étoiles qui viennent de naître, d’autres ayant atteint la maturité et d’autres qui sont dans la phase terminale, parfois bouleversée, de leur vie. On ne demande à nos théories que de rendre compte de la variété des phénomènes dont on perçoit simultanément l’existence. Et elles passent très bien le test, même si les astronomes accompagnent la plupart de leurs énoncés de « on croit que » ou « probablement » et

nous rappellent qu'il s'agit, comme pour tous les énoncés scientifiques, de conclusions tirées de théories qui pourraient bien être remises en question plus tard.

Mais le Soleil, dans tout cela? Rassurons-nous! Nous n'avons rien à craindre. Selon toute évidence, nous pouvons dormir tranquilles... pendant les cinq ou six prochains milliards d'années! Le principal danger pour l'humanité ne semble pas devoir venir de ce côté.

Pourtant, autant les étoiles semblent immuables leur vie durant, brûlant leur combustible pendant des millions ou des milliards d'années à un rythme qui ne change que très lentement, autant elles peuvent connaître une fin rapide et spectaculaire. Les mêmes modèles expliquant la remarquable longévité des étoiles permettent de tracer les scénarios possibles de leur fin parfois tragique. Encore une fois, l'observation vient confirmer la justesse de ces prédictions. Une des plus étranges d'entre elles, l'existence des trous noirs, fait encore l'objet de débats qui tendent toutefois à s'amenuiser.

Mais le plus fascinant, aux yeux de l'auteur de ces lignes, reste la troublante prise de conscience que tout n'est qu'éternel recommencement, que la vie s'alimente à même la mort. En définitive, ne sommes-nous pas tous et toutes, pour reprendre une expression du célèbre Hubert Reeves, que « poussière d'étoiles depuis longtemps refroidies ».

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

1. Énumérer les différents processus de génération d'énergie à l'œuvre dans les étoiles et montrer comment ceux-ci rendent compte de l'abondance relative des éléments que l'on retrouve dans l'Univers.
2. Connaître les informations nécessaires pour déterminer la position d'une étoile sur le diagramme de Hertzsprung-Russell (HR) et, réciproquement, les conclusions que l'on peut tirer à partir de la connaissance de cette position.
3. Décrire les principales étapes de la vie d'une étoile, de sa formation à son effondrement, et l'influence de la masse de l'étoile sur cette évolution.
4. Décrire les différentes fins possibles pour les étoiles et prédire, pour une étoile donnée, lesquelles sont susceptibles de se réaliser.

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)
gradient	6.1	flash de l'hélium	275 [-5]
équilibre	273 [6]	branche horizontale	276 [8]
numéro atomique	6.2	loi (ou principe) de conservation	7.5
fusion	221 [-9]	quantité de mouvement	7.5
fission	221 [-7]	loi (ou principe) de conservation	
modèle du volcan	222 [-9]	de la quantité de mouvement	281 [-15]
série principale	240 [-11]	loi (ou principe) de conservation	
type spectral	243 [5]	du moment cinétique	292 [8]
classe de luminosité	243 [-14]	découverte du premier trou noir	G-3.1
série principale d'âge zéro	273 [-16]		

LECTURES

1. Introduction de la troisième partie et chapitre 6 (p. 216-250; les compléments sont exclus)
2. Section 9.7 (p. 384-387)
3. Chapitre 7 (p. 262-300; les compléments sont exclus)
4. Explications supplémentaires
G-3.1 *La découverte du premier trou noir* (p. G-133 à G-136)
5. Section 8.5 (p.342-344)
6. Sujet connexe : *La vie du Soleil* (p. 302-303)

MODULE 3

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

☆ 6.1 LE PARADOXE DE L'ÂGE DU SOLEIL (P. 218-220)

L'énergie produite au centre d'une étoile tend à se diriger vers sa surface à cause de l'existence d'un **gradient** de température. La notion de gradient est liée de très près à celle d'équilibre (hydrostatique ou thermique).

Gradient signifie « variation dans l'espace ». Quand on dit qu'il y a un gradient de température dans une pièce, cela signifie que la température n'est pas la même dans toute la pièce; en hiver par exemple, elle est plus basse près des fenêtres ou du plancher.

- ☆ 273 La conséquence d'un gradient est une tendance à l'écoulement – de chaleur ou de matière, selon qu'il s'agit d'un gradient de température ou de pression – vers les régions où la température ou la pression est plus basse. Cette tendance peut conduire à un écoulement réel; en fait, pour qu'il y ait écoulement, un gradient est nécessaire. Par exemple, lorsque vous utilisez un boyau d'arrosage, la pression doit être plus élevée au début du tuyau qu'à la sortie, sinon l'eau ne coulera pas. Cette tendance à l'écoulement peut, dans certaines situations, être annulée par une force agissant dans le sens contraire; il n'y a pas alors d'écoulement. C'est dans ce dernier cas que l'on parle d'**équilibre**.

Deux exemples peuvent nous aider à comprendre. Tout d'abord, on peut considérer que l'atmosphère terrestre est en équilibre. En effet, la couche d'air qui entoure la Terre n'est pas en train de quitter notre planète. Pourtant, la pression atmosphérique diminue à mesure que l'on s'élève; la preuve : les cabines des avions doivent être pressurisées et les alpinistes doivent se munir de bouteilles d'oxygène pour les hautes ascensions. Il y a donc un gradient de pression qui devrait causer un écoulement de l'air en direction du cosmos. Heureusement pour nous, la force gravitationnelle attirant l'air vers la Terre empêche cet écoulement, de sorte qu'il y a effectivement situation d'équilibre (hydrostatique), du moins en ce qui concerne la direction verticale.

On ne peut en dire autant sur le plan horizontal, car il peut exister des gradients de pression entre différentes régions situées à la même altitude. Cette fois, pas de force gravitationnelle pour empêcher l'écoulement de l'air. Il y a donc écoulement : c'est

l'explication des vents, déplacements de masses d'air provenant de régions où la pression est plus élevée vers d'autres où elle est inférieure.

Prenons un autre exemple : l'intérieur d'un four. Les différentes parties d'un four ne sont pas toutes à la même température. Si vous faites la cuisine, vous avez probablement remarqué que les tartes cuisent plus vite au fond du four que près de la porte. La chaleur est également plus intense au niveau de la grille supérieure que près du fond. Différents transferts de chaleur ont lieu entre les diverses parties du four, en même temps qu'a lieu un important écoulement de chaleur vers l'extérieur du four, soit dans la cuisine où la température est beaucoup plus basse. Dans ce cas, il n'y a pas à proprement parler d'équilibre thermique, même si un thermostat se charge de faire fonctionner régulièrement l'élément électrique du four, de façon à empêcher que sa température ne diminue avec le temps.

Vous devriez maintenant être en mesure de faire le lien avec la situation régnant à l'intérieur des étoiles : *équilibre hydrostatique*, car le gradient de *pression* est annulé par l'attraction gravitationnelle et *déséquilibre thermique*, car le gradient de *température* cause un écoulement continu de chaleur vers l'extérieur de l'étoile. Nous reviendrons toutefois sur ce point à la section 6.5. Cette chaleur constitue, rappelons-le, une forme d'énergie* et celle-ci est éventuellement évacuée et transmise à grandes distances sous forme de photons, c'est-à-dire d'énergie de rayonnement. Cette énergie perdue doit être continuellement remplacée. La source de cette énergie : la masse même de l'étoile; c'est la célèbre relation d'Einstein, $E = mc^2$, qui est à l'œuvre ici.

☆ 6.2 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE (P. 220-224)

Comme vous le verrez plus loin, on utilise une notation particulière pour distinguer les éléments et leurs divers isotopes : après le symbole de l'élément (par exemple, H pour hydrogène, He pour hélium, C pour carbone, etc.), on place en indice le nombre de protons Z , aussi appelé **numéro atomique**, et en exposant le nombre de masse A . Ainsi, les trois isotopes du carbone, dont les atomes possèdent 6 protons et entre 6 et 8 neutrons selon le cas, sont désignés par C_6^{12} , C_6^{13} et C_6^{14} . Toutefois, le numéro atomique en indice est souvent omis, car l'information est déjà contenue dans le symbole de l'élément : le numéro atomique d'un atome de carbone ne peut pas être différent de 6, car ce ne serait plus alors du carbone. Cette omission est nécessaire lorsqu'on désigne une molécule; l'indice indique alors plutôt le nombre d'atomes du même type isotopique dans la molécule. De plus, le nombre de masse (en exposant) peut être omis quand il s'agit de l'isotope le plus répandu.

Par exemple, on désignera normalement les molécules de dioxyde de carbone, formées d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène, par l'expression CO_2 ,

* Historiquement, on a d'abord considéré la chaleur comme un fluide, d'où le recours, encore aujourd'hui, à un terme comme « écoulement ».

où l'indice 2 signifie ici qu'il y a deux atomes d'oxygène dans une molécule, et où l'absence d'exposant indique qu'il s'agit des isotopes les plus répandus, soit les nombres de masse 12 et 16 respectivement. Si l'un ou l'autre des atomes est un autre isotope, on indiquera tous les nombres de masse, comme ci-dessous :



- ☆ 221 La **fusion** et la **fission** sont deux phénomènes qui se produisent dans les étoiles. La fusion constitue leur source d'énergie durant presque toute leur existence; la fission, comme nous le verrons plus loin, se manifeste seulement dans les derniers moments de la vie de certaines étoiles. Ces deux mêmes réactions peuvent être produites artificiellement sur Terre. Les réactions de fission ont été les premières à être générées. Contrôlées, elles alimentent les centrales d'énergie nucléaire. Laisseries à elles-mêmes, elles peuvent donner lieu à une réaction en chaîne : c'est la bombe atomique, responsable de la destruction d'Hiroshima et de Nagasaki, durant la Seconde Guerre mondiale. Après la guerre, on a rapidement mis au point des bombes, beaucoup plus puissantes que les premières, mettant à profit la fusion nucléaire. Toutefois, malgré des efforts intenses menés depuis quelques dizaines d'années, on ne croit pas être en mesure d'utiliser cette source d'énergie à des fins civiles, telle la production d'énergie électrique, avant le milieu du 21^e siècle. Mentionnons en passant que depuis la signature de traités interdisant les essais nucléaires, les recherches sur l'utilisation de la fusion à des fins de production d'énergie intéressent au plus haut point les militaires, qui y trouvent une façon de continuer à développer leurs modèles et connaissances en matière de fusion. Il y a dans tout cela matière à réflexion, surtout en ce qui a trait à la subtile distinction entre recherche civile et recherche militaire.
- ☆ 222 Le **modèle du volcan** illustre bien que même si les réactions de fusion produisent de l'énergie, elles ne peuvent s'amorcer que si les composants nécessaires sont suffisamment rapprochés. En effet, la force d'attraction nucléaire, celle qui, dans le modèle, fait tomber les protons dans le trou, ne s'exerce que sur de très faibles distances; au-delà, ce sont les forces électriques *répulsives* entre les protons, celles qui leur font dévaler la pente, qui dominent. Les protons doivent donc posséder une très grande vitesse, soit une très grande énergie cinétique, pour être en mesure de vaincre cette répulsion. L'énergie cinétique moyenne des atomes d'un gaz étant proportionnelle à sa température, on comprendra l'importance, évoquée dans le manuel, de températures extrêmes pour le déclenchement des réactions de fusion.6.4

LA NUCLÉOSYNTÈSE STELLAIRE (P. 226-231)

Le détail des réactions nucléaires se produisant dans les étoiles n'est pas tellement important. Ce qu'il faut retenir, c'est le principe de la progression en masse et en numéro atomique de ces réactions, allant de celles qui mettent en cause les noyaux les

plus simples à celles qui génèrent les éléments plus complexes (jusqu'au fer). Cette succession de réactions permet très bien de rendre compte de l'abondance relative des éléments observée dans l'Univers.

6.7 LA CLASSIFICATION DES ÉTOILES (P. 240-244)

La grande majorité des étoiles se retrouve sur la **série principale**, aussi appelée « branche principale »; ce fait est évident si l'on place sur un diagramme Hertzsprung-Russell (HR) les étoiles les plus proches de la Terre (cercles noirs sur le diagramme de la figure G-3.1). On constate aussi une autre caractéristique importante : la plupart des étoiles sont moins lumineuses que le Soleil. Remarquez que l'on applique encore ici le principe cosmologique, selon lequel les étoiles les plus proches de la Terre ne se distinguent pas de l'ensemble des étoiles de l'Univers.

Afin d'illustrer l'ensemble des positions possibles sur le diagramme, on y a ajouté les 20 étoiles les plus brillantes; ce sont les cercles noirs ou blancs accompagnés du nom de l'étoile. Remarquez que trois d'entre elles font aussi partie des étoiles les plus proches.

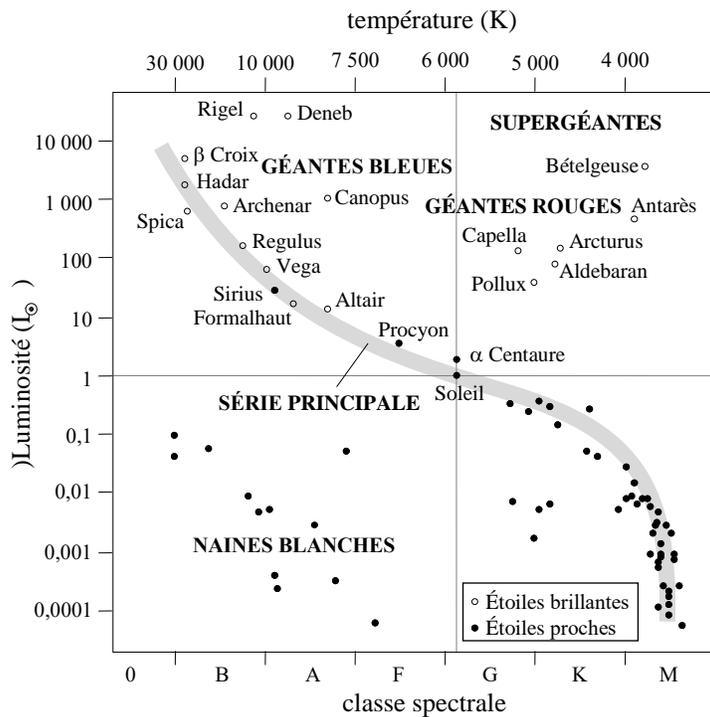


FIGURE G-3.1

Diagramme HR présentant les étoiles les plus proches de la Terre (cercles noirs) et les plus brillantes (cercles blancs ou noirs accompagnés d'un nom d'étoile).

☆ 243 Il est important de bien distinguer **type** (ou classe) **spectral** et **classe de luminosité**.

Le type (ou classe) spectral (OBAFGKM et leurs subdivisions de 0 à 9) est relié directement à la température de l'étoile; on le détermine à l'aide de l'intensité relative de certaines raies, tel qu'on l'explique dans le manuel.

De son côté, la classe de luminosité (I, II, III, IV, V) dépend surtout de la pression régnant dans l'atmosphère de l'étoile. Cette pression est elle-même fonction du rayon de l'étoile : plus une étoile est grande, plus la pression régnant dans son atmosphère est faible. Pour une même température, donc un même type spectral ou un même indice B – V, plusieurs classes de luminosité sont possibles. Elles correspondent à différentes régions du diagramme HR (figure G-3.2). Ici encore, c'est l'intensité de raies particulières – qui se traduit, comme on le souligne dans le manuel, par la netteté – qui permet de déterminer l'appartenance d'une étoile à telle ou telle classe de luminosité.

6.10 L'INTERPRÉTATION DU DIAGRAMME HR (P. 248-250)

Le diagramme HR peut afficher trois autres informations sur les étoiles qui y sont représentées : leur rayon (pour toute étoile), leur masse et leur durée de vie (pour les étoiles de la série principale). Pour ce qui est du rayon, comme on l'explique dans le manuel, la luminosité d'une étoile dépend essentiellement de sa température et de sa surface, laquelle est proportionnelle au carré du rayon. On obtient ainsi l'équation 6.2, qui permet de définir sur le diagramme HR des lignes correspondant à des étoiles de même rayon. Si les deux échelles du diagramme sont logarithmiques (ce qui n'est cependant pas le cas des diagrammes HR du manuel) ces lignes sont des droites. Les figures G-3.2 et G-3.3 illustrent quelques-unes de ces droites.

On voit facilement sur la figure G-3.3 que le rayon des étoiles de la série principale varie très peu, en comparaison de leur température et, surtout, de leur luminosité. Pour ce qui est de la masse, on utilise plutôt une loi empirique obtenue par la mesure des masses d'un grand nombre d'étoiles faisant partie de systèmes binaires. Cette relation, valide pour les étoiles de la série principale, s'écrit :

$$M = M_{\odot} \times (L / L_{\odot})^{\alpha}$$

où α varie entre 0,25 et 0,3. Finalement, la durée de séjour sur la série principale dépend de la masse et de la luminosité; elle est donnée par l'équation 7.1.

Toujours dans la figure G-3.3, la position approximative de quelques étoiles, dont les masses sont comprises entre $0,5 M_{\odot}$ et $15 M_{\odot}$, est indiquée sur la série principale; on y indique également la durée de leur séjour sur la série principale. On se rappellera que la droite qui apparaît sur ce diagramme correspond en fait au centre de la bande qui constitue la série principale (voir les figures G-3.1 et G-3.2, ainsi que les diagrammes HR du manuel).

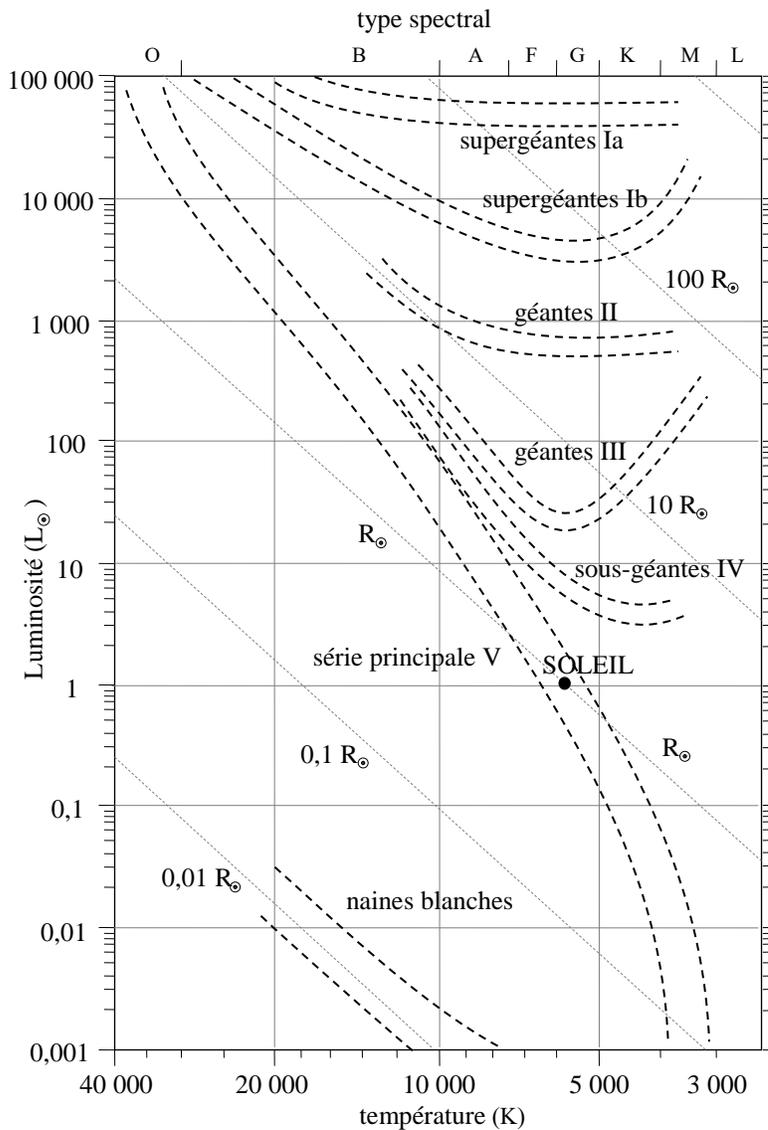


FIGURE G-3.2

Types d'étoiles : classes de luminosité et étoiles naines.

7.4 L'ÉVOLUTION POSTSÉRIE PRINCIPALE DES ÉTOILES DE FAIBLE MASSE (P. 273-280)

- ☆ 273 La figure G-3.4 complète les figures 7.12 et 7.14. La partie gauche illustre quelques-unes des trajectoires initiales des étoiles qui définissent la **série principale d'âge zéro**; il faut souligner, comme on le mentionne dans le manuel, que les étoiles massives prennent beaucoup moins de temps à atteindre la série principale que les étoiles peu massives. La partie droite montre l'évolution de quelques étoiles à partir du milieu de leur existence – ou du centre de la série principale.

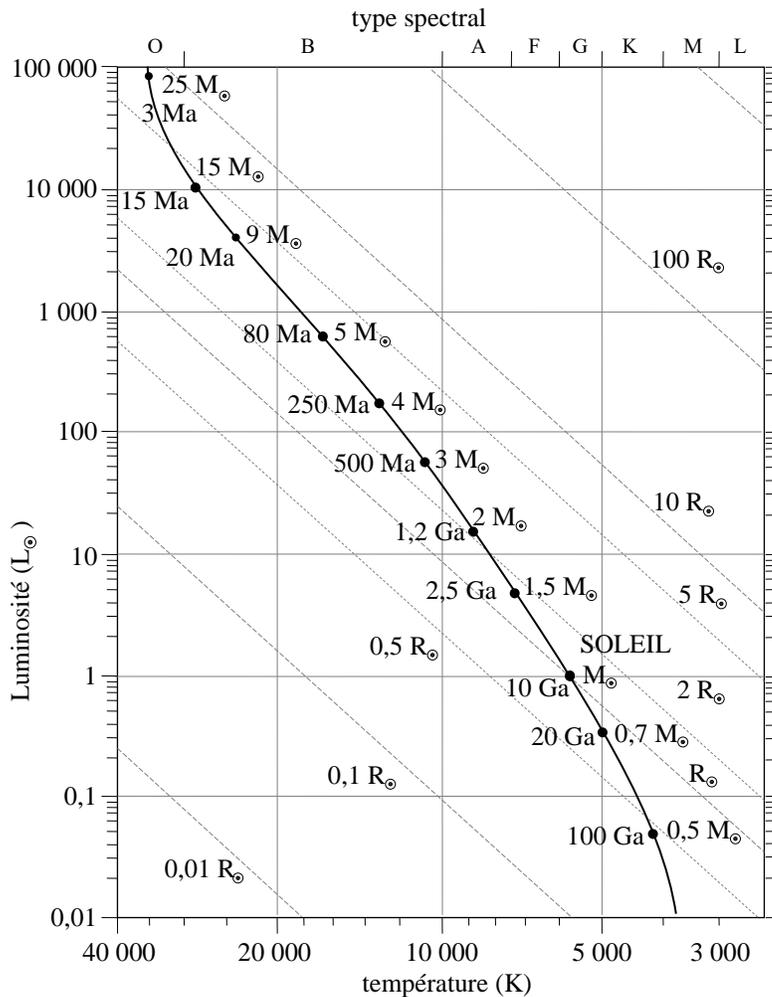


FIGURE G-3.3

Le diagramme HR : rayon des étoiles (lignes pointillées obliques); pour la série principale : durée du séjour et masse.

En comparant les deux diagrammes, vous remarquerez qu'il y a peu de différence entre le tracé évolutif d'une étoile qui arrive sur la série principale et celui d'une étoile semblable qui la quitte. Cette différence est par contre majeure si l'on considère non pas seulement le comportement d'une étoile à l'arrivée et au départ de la série principale, mais l'ensemble de son évolution, du début de l'effondrement gravitationnel à la période de lent refroidissement menant au stade de naine noire. Pour une étoile semblable au Soleil, on a prolongé en pointillé les trajets correspondants jusqu'aux limites de chaque diagramme; les figures 7.12 et 7.14 montrent ces trajets dans leur totalité.

- ☆ 276 La **branche horizontale** du diagramme HR est une bande horizontale, comme son nom l'indique, située au-dessus de la partie gauche de la série principale (dans la région 50-100 L_{\odot}). On croit généralement qu'elle est composée d'étoiles peu

massives qui, après le **flash d'hélium**, consomment en même temps de l'hélium (au centre) et de l'hydrogène (dans une mince couche près du centre). Il s'agit d'une phase relativement courte de l'évolution des étoiles qui, ayant quitté la série principale, sont devenues des géantes rouges; après cette phase, elles retournent vers la région des géantes rouges (voir le trajet en pointillé dans le diagramme de droite de la figure G-3.4).

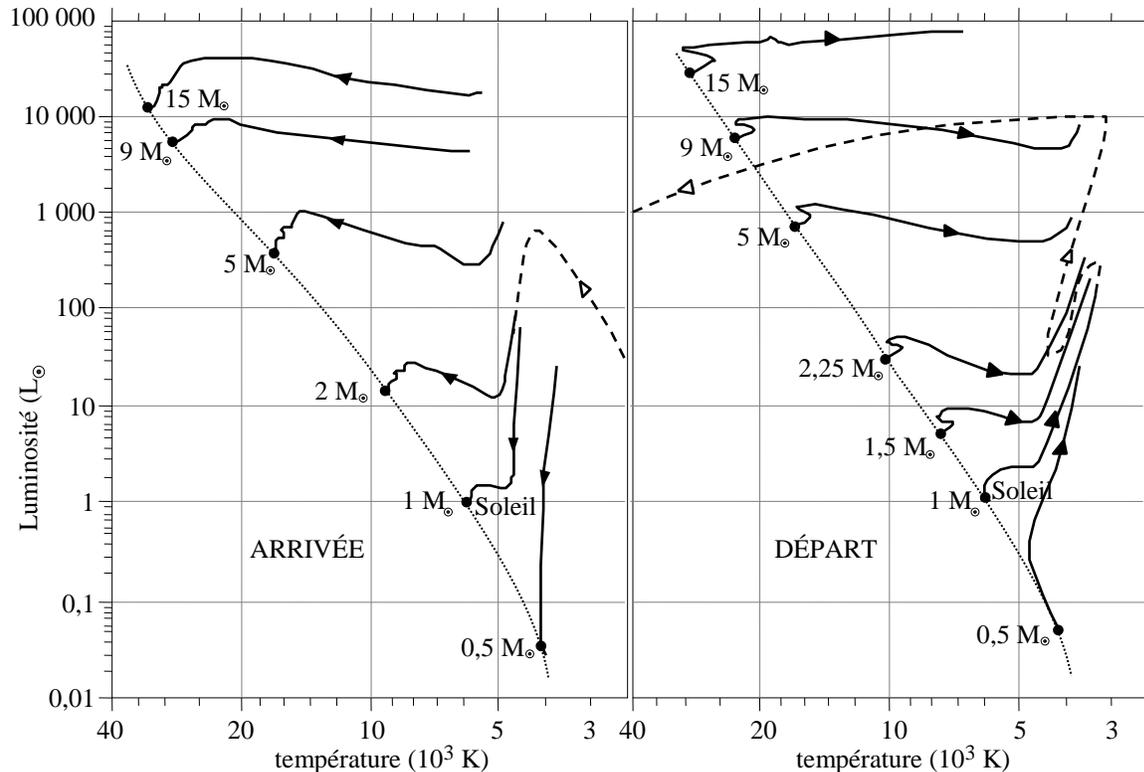


FIGURE G-3.4

Position des étoiles sur le diagramme HR avant leur arrivée sur la série principale (à gauche) et après leur départ (à droite); on a prolongé en pointillé le trajet d'une étoile semblable au Soleil.

☆7.5 L'ÉVOLUTION POSTSÉRIE PRINCIPALE DES ÉTOILES MASSIVES (P. 280-287)

Les lois de Newton constituent un outil de choix pour l'étude des mouvements des objets ou des systèmes. Toutefois, dans bien des situations, notamment pour l'étude des systèmes complexes, on obtient certaines réponses beaucoup plus facilement si l'on a plutôt recours aux **lois de conservation**. Ces lois sont, en un sens, tout à fait équivalentes aux lois de Newton; on peut d'ailleurs les démontrer à partir de celles-ci. Elles sont cependant d'une telle importance qu'on leur attribue souvent le statut de principes, ce qui nous permet de les généraliser aux autres domaines de la physique. On peut même les poser comme point de départ de la mécanique et retrouver, à partir d'elles et de quelques autres principes, les lois de Newton qui acquièrent alors, selon ce nouveau point de vue, le statut de lois dérivées.

Une **loi (ou principe) de conservation** est l'affirmation que, dans certaines conditions assez générales, une quantité obtenue en sommant diverses contributions gardera toujours la même valeur quels que soient les phénomènes qui pourraient faire varier certaines de ces contributions (on en verra des exemples plus loin). On dit alors que cette quantité est *conservée*.

- ☆ 281 **La loi (ou principe, selon le point de vue adopté) de conservation de la quantité de mouvement** est une des lois de conservation importantes de la physique. La **quantité de mouvement** d'un objet est simplement égale au produit de sa masse par sa vitesse; c'est donc une quantité vectorielle. La quantité conservée est la quantité de mouvement totale d'un système, soit la somme (vectorielle) des quantités de mouvement de tous les objets qui font partie du système. La condition pour qu'il y ait conservation de la quantité de mouvement totale est que le système soit *fermé* ou *isolé*, c'est-à-dire que les objets qui le composent ne subissent aucun effet notable provenant d'objets situés l'extérieur du système.

Cette loi signifie que si la vitesse d'un objet faisant partie d'un système isolé change, alors celle d'un ou de plusieurs autres objets du même système doit changer aussi, de manière que la somme des quantités de mouvement reste constante. Ainsi, un objet en mouvement qui vient frapper un objet au repos va ressortir de la collision avec une vitesse inférieure à celle qu'il avait au départ; on dit qu'il aura perdu un peu de sa quantité de mouvement. De son côté, l'objet qui a été frappé acquiert une vitesse et, si les deux objets forment un système isolé, cette vitesse est telle que la somme des quantités de mouvement des deux objets après la collision est exactement égale à la quantité de mouvement de l'objet qui est venu frapper l'autre.

Tout se passe comme si le premier objet avait simplement transféré à l'autre une partie de sa quantité de mouvement. On peut réellement appliquer, à propos de la quantité de mouvement, l'adage bien connu : « rien ne se perd, rien ne se crée ».

7.7 LES ÉTOILES À NEUTRONS (P.291-294)

- ☆ 292 **La loi (ou principe) de conservation du moment cinétique**, aussi appelé **moment angulaire**, est une autre des lois (ou principes) de conservation fondamentales de la mécanique. Cette fois, c'est le moment cinétique total du système qui est la quantité conservée.

La valeur du moment cinétique total est obtenue en sommant des termes qui tiennent compte de tous les mouvements de rotation présents dans un système donné. Certains de ces termes dépendent de la vitesse de rotation des objets sur eux-mêmes. Mathématiquement, ces termes sont de la forme $L = I\omega$, où L représente le moment cinétique, ω est la vitesse de rotation, aussi appelée vitesse angulaire, et I dépend de la masse de l'objet et de la façon dont cette masse est distribuée. D'autres termes dépendent des vitesses de rotation des objets autour d'un axe et de leur éloignement de cet axe. Dans ce cas, on a $L = mR^2\omega$, où R est la distance entre l'objet et l'axe de

rotation. Dans les deux cas, plus la masse de l'objet – ou du système – se trouve éloignée en moyenne de l'axe de rotation, plus le terme L est important.

Ainsi, pour un système qui peut être considéré comme isolé, tel le système Terre-Lune si on néglige la présence du Soleil ou un amas en rotation, le moment cinétique total sera conservé. La conservation du moment cinétique est d'ailleurs présente dans plusieurs phénomènes naturels, comme dans les ouragans et les tornades, ainsi que dans les tourbillons qui se forment lorsque l'on vide un évier ou une baignoire.

Si vous disposez d'une chaise pivotante, telle une chaise de secrétaire, et d'objets lourds que vous pouvez tenir d'une main, tels des dictionnaires ou des briques, vous pouvez effectuer une expérience étonnante. Prenez place sur la chaise avec un objet dans chaque main. Étendez les bras pour éloigner les objets au maximum. En poussant avec vos pieds, faites tourner la chaise (et vous avec!). Enlevez vos pieds du sol puis, sans attendre, rapprochez les deux objets le plus près possible de vous, puis éloignez-les, et ce à plusieurs reprises. Si vous avez réussi à demeurer sur la chaise, vous devriez avoir ressenti la conservation du moment cinétique dans toute sa splendeur!

Avez-vous remarqué si votre vitesse variait lorsque vous rapprochiez ou éloigniez les objets? Dans la négative, refaites l'expérience ou, mieux encore, demandez à quelqu'un de la faire sous vos yeux et observez la scène avec attention.

En voici l'interprétation physique. Lorsque vous rapprochez les objets, vous diminuez la quantité R (la distance au centre) dans l'expression du moment cinétique (du type $mR^2\omega$) des objets que vous tenez; les termes correspondant à ce moment cinétique ont donc tendance à diminuer. Si aucun changement de vitesse de rotation n'intervenait, le moment cinétique total diminuerait.

Cependant, si aucune influence *externe* ne tend à modifier la rotation du système, formé ici de vous et des deux objets, celui-ci peut être considéré comme fermé. Le moment cinétique doit donc être conservé, c'est-à-dire demeurer constant à partir du moment où vos pieds quittent le sol. Comme certains termes, on l'a vu, tendent à diminuer, d'autres quantités qui contribuent aussi au moment cinétique total doivent augmenter afin d'en préserver la valeur. Ici, c'est la vitesse de rotation (ω) qui augmente, compensant pour la diminution de la distance (R) des objets; lorsque vous éloignez les objets, c'est tout simplement le contraire qui se produit.

Il faut avouer qu'ici le système n'est pas réellement fermé : le frottement et la résistance de l'air, des effets externes, tendent à vous ralentir, à diminuer lentement le moment cinétique total. Malgré tout, si vous avez réussi à augmenter et diminuer une ou deux fois votre vitesse, vous pouvez admettre que l'effet de conservation du moment cinétique était bien présent, superposé à un effet beaucoup moins marqué d'une lente diminution de cette quantité.

Comme on le mentionne dans le manuel, les athlètes de disciplines comme le plongeon, le patinage artistique, la gymnastique et le ballet ont régulièrement recours

(même sans le savoir!) à la conservation du moment cinétique. Ils ou elles réussissent sans trop d'effort à augmenter de façon spectaculaire leur vitesse de rotation, simplement en ramenant leurs jambes ou leurs bras le plus près possible de l'axe de rotation de leur corps.

7.8 LES TROUS NOIRS (P.295-296)

- ☆ 295 On explique dans le manuel que les étoiles dont la masse initiale sur la série principale est $8 M_{\odot}$ ou plus vont exploser à la fin de leur vie, laissant un « cadavre stellaire » qui deviendra un trou noir si sa masse excède $3 M_{\odot}$. On pense généralement que pour que le résidu de l'explosion atteigne cette masse, la masse initiale de l'étoile doit être supérieure à $20-25 M_{\odot}$.

Par ailleurs, une étoile de masse initiale supérieure à $40 M_{\odot}$ peut se transformer directement en un trou noir, sans donner lieu à une supernova. La masse du trou noir sera alors égale à celle de l'étoile à la fin de sa vie. Cette masse peut cependant être passablement inférieure à la masse initiale de l'étoile, car les étoiles très massives sont susceptibles de perdre une partie importante de leur masse durant leur vie.

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES

☆ G-3.1 LA DÉCOUVERTE DU PREMIER TROU NOIR

Les trous noirs sont probablement les « objets » les plus curieux que la physique contemporaine ait pu imaginer. Une étude de ce sujet fascinant demanderait d'aborder les notions d'espace et de temps telles que la Relativité générale les a modifiées, ce qui est impossible dans le cadre de ce cours. Il nous a toutefois semblé intéressant de vous proposer le texte suivant, dont l'auteur est Claude Shields, qui relate l'histoire de la découverte du premier candidat sérieux à ce titre.

Durant les décennies 60 et 70, les études théoriques portant sur les trous noirs se sont multipliées très rapidement, sans que l'on puisse confirmer avec certitude l'existence de tels objets. Comment peut-on déceler un objet qui emprisonne la lumière?

Une prédiction théorique vient cependant à notre secours. Les trous noirs attirent la matière. En tombant dans l'abîme, celle-ci devrait être suffisamment chauffée par la friction et la compression pour atteindre des températures élevées, de l'ordre de 10^{10} K. Or, la matière portée à ces températures génère un intense rayonnement X. C'est donc de ce côté qu'il fallait chercher.

L'observation de ces rayons X à partir de la Terre est compliquée par l'absorption atmosphérique. Pour vaincre cette difficulté, la NASA et l'Italie ont mis en orbite le 12 décembre 1970 le satellite Uhuru. Ce satellite, entièrement consacré à l'observation du rayonnement X (2 à 20 keV), révolutionnait notre compréhension des rayons X d'origine cosmique. Avant sa mise hors de service en mars 1973, il avait identifié plus de 300 sources de rayons X. Plusieurs de ces sources ont été associées à

des galaxies ou à des quasars. Parmi les autres candidats, certains faisaient partie de systèmes binaires rapprochés, dont le compagnon orbital éclipe périodiquement l'étoile principale.

Six de ces sources ont pu être associées de façon certaine à des systèmes binaires. Le rayonnement reçu variait périodiquement avec la rotation du système et l'intensité de ces variations dépend de plusieurs facteurs : l'inclinaison de l'orbite, le type spectral, la distance séparant les composantes, etc.

Ces sources pouvaient être regroupées selon la variation de leur émission :

- a) les sources pulsantes, telles Her X-1 et Cen X-3, qui présentent des émissions pulsées extrêmement stables;
- b) les sources explosives, telle Cygnus X-1, dont l'intensité du rayonnement varie rapidement.

Le tableau G-3.1 nous donne des informations sur ces sources.

TABLEAU G-3.1
Sources de rayonnement X appartenant à un système binaire

source de rayons X	période orbitale (d)	caractéristiques de l'émission	composante optique	distance (a.-l.)
Hercules X-1 3U 1653 +35	1,7	rayons X à éclipse durée : 0,24 d pulsation : 1,238 s	HZ Hercules $M = 2 M_{\odot}$ $m = 14$	$1,6 \times 10^4$
Centaurus X-3 3U 1118 -60	2,087	rayons X à éclipse durée : 0,49 d pulsation : 4,842 s	géante bleue $M = 16 M_{\odot}$ $m = 13,4$	$2,5 \times 10^4$
SMC X-1 3U 0115 -37	3,89	rayons X à éclipse durée : 0,6 d pulsation : 0,716 s	Sk 160 $M = 25 M_{\odot}$ $m = 13,3$	$1,9 \times 10^4$
Vela X-1 3U 0900 -40	8,95	rayons X à éclipse durée : 1,7 d pulsation : 282,9 s	HD 77581 $M = 25 M_{\odot}$ $m = 6,3$	$0,8 \times 10^4$
3U 1700 37	3,412	rayons X à éclipse durée : 1,5 d	HD 15319 $M = 30 M_{\odot}$ $m = 6,6$	$0,9 \times 10^4$
Cygnus X-1 3U 7956 35	5,6	irrégulière variation = 10^{-3} s	HDE 226868 $M = 20 M_{\odot}$ $m = 8,9$	$1,0 \times 10^4$

M : masse; m : magnitude

Pour certaines sources, le rayonnement régulier présente des éclipses périodiques. La durée relative de l'éclipse varie du dixième au tiers de la période, prouvant hors de tout doute que la source de rayonnement est très compacte. C'est le cas de Centaurus X-3, Hercules X-1, SMC X-1 et Vela X-1, dont les rayons X arrivent très régulièrement. Les périodes de pulsation sont respectivement 4,84 s, 1,24 s, 0,716 s et 282,9 s. Aucun processus associé au trou noir ne peut expliquer cette régularité. Les composantes invisibles de ces sources sont reconnues comme étant des étoiles à neutrons (pulsars).

Il ne restait que deux candidats possibles : 3U 1700 –37 et Cygnus X-1. Ici, le nombre 3U 1700 –37 fait référence au troisième catalogue Uhuru avec 17 h 00 d'ascension droite et –37 degrés de déclinaison.

Dans le premier cas, l'observation optique nous révèle que le membre principal du système binaire est une supergéante bleue, une étoile située près de l'extrémité gauche de la série principale. Le rayonnement X est éclipsé chaque fois que l'étoile principale passe entre la Terre et le compagnon invisible. Ainsi, on peut associer de façon définitive le rayonnement X à la composante invisible.

Par contre, la source Cygnus X-1 ne présente pas de telle éclipse : il s'agit plutôt d'un système binaire spectroscopique, c'est-à-dire un système détecté grâce au changement de longueur d'onde (effet Doppler) associé à la vitesse relative des étoiles, laquelle est dirigée tantôt vers nous, tantôt dans le sens opposé.

Le compagnon optique de Cygnus X-1 est également une supergéante bleue numérotée HDE 226868 (n° 226 868 de l'extension du catalogue de Henry Draper). De plus, si l'on observe attentivement le tableau G-3.2, seule la masse (M) de l'objet compact associé à Cygnus X-1 excède de façon significative la limite supérieure possible pour une étoile à neutrons (2 à 3 M_{\odot}).

TABLEAU G-3.2

Masse de la composante compacte de sources X

Source de rayons X	Masse du compagnon invisible (masses solaires)
Hercules X-1	0,2 à 1,2
Centaurus X-3	0,2 à 0,3
SMC X-1	0,8 à 1,5
Vela X-1	1,5 à 2,0
3U 1700 -37	0,6
Cygnus X-1	9 à 15

Voici donc les conclusions obtenues au sujet de Cygnus X-1.

1. Cygnus X-1 possède un compagnon visible : HDE 226868.
2. Cygnus X-1 possède une masse comprise entre 9 et 15 M_{\odot} .

3. Cygnus X-1 est un objet très compact, d'un diamètre inférieur à 300 km. Cette limite est fixée par la période de pulsation de l'émission. En effet, un processus physique touchant l'ensemble d'un objet ne peut varier plus rapidement que le temps mis par la lumière pour traverser l'objet. Or, la lumière parcourt 300 km en 10^{-3} s.

Le mécanisme de production du rayonnement X dans ce système est probablement le même que dans les systèmes à pulsation constante : l'objet compact orbite autour d'une étoile normale (supergéante bleue) et aspire le gaz de l'étoile. Les rayons X sont émis lorsque le gaz qui tombe vers l'objet compact est fortement comprimé et atteint des températures extrêmes.

Cygnus X-1 était donc un candidat idéal pour un trou noir. Cette interprétation a été confirmée par la détection, depuis, de plusieurs dizaines de systèmes binaires semblables. De plus, les résultats de l'analyse du rayonnement X émis par le centre de nombreuses galaxies et de l'étude des mouvements des étoiles autour de ce centre suggèrent que la majorité des galaxies abritent un trou noir géant en leur centre. On ne s'entend toutefois pas sur le mode de formation de ces trous noirs : ont-ils précédé la formation de la galaxie qui les héberge, contribuant même à la formation des étoiles qui la composent, ou se sont-ils formés après celle-ci, en absorbant une partie de sa matière?

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

BLANDFORD, R. et N. GEHRELS (1999). « Revisiting the black hole », *Physics Today*, vol. 52, n° 6, juin, p. 40.

CHABRIER, G. (1996). « Les nouvelles planètes. Entre étoiles et planètes : les naines brunes », *La Recherche*, n° 290, septembre, p. 51.

« Dossier : trous noirs et autres singularités de l'Univers extrême » (2008). *Pour la Science*, n° 372, octobre.

LASOTA, J. -P. (2010). *La science des trous noirs*, Paris, Odile Jacob, 192 p.

VAUCLAIR, Sylvie (1996). « Du Big-Bang aux étoiles : la genèse de la matière », *La Recherche*, n° 287, mai, p. 46.

MODULE 3

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

Le problème de l'origine de l'énergie responsable du rayonnement des étoiles et du Soleil n'a pu être résolu qu'à l'aide de la loi d'équivalence masse-énergie ($E = mc^2$), conséquence de la théorie de la Relativité d'Einstein. Le mécanisme qui permet à une étoile de transformer sa masse en énergie est la fusion thermonucléaire. Les noyaux d'hydrogène se combinent pour former des noyaux d'hélium, puis lorsque les réserves d'hydrogène sont épuisées, ceux-ci se combinent à leur tour pour former des éléments plus lourds, etc. Tous les éléments connus proviennent de réactions nucléaires (fusion, fission, capture de neutrons) dont on peut suivre la trace, dans un graphique de l'abondance relative des éléments dans l'Univers. La contraction gravitationnelle joue un rôle de déclencheur pour toutes ces réactions.

Les étoiles se forment à partir de la condensation de nuages de gaz interstellaires. Cette condensation est déclenchée par une instabilité quelconque, comme l'arrivée d'une onde de choc provenant de l'explosion d'une supernova. L'étoile en formation se contracte d'abord rapidement, puis plus lentement, jusqu'à ce que, si la masse de l'étoile est suffisante, l'augmentation de la température interne déclenche la fusion de l'hydrogène.

La grande majorité des étoiles se retrouve dans une mince bande du diagramme HR, appelée *série principale*. La position d'une étoile sur la série principale ainsi que le temps qu'elle y reste dépendent essentiellement de sa masse.

Autant les études empiriques que les calculs théoriques ont montré que c'est la masse d'une étoile qui détermine son évolution et son destin. Cette vie est faite d'une succession de périodes d'équilibre de plus en plus brèves (la plus longue étant celle où l'étoile se retrouve sur la série principale), entrecoupées de périodes de contraction ou d'instabilité. Plus une étoile est massive, plus vite elle brûle son combustible et plus elle évolue rapidement.

Selon leur masse, les étoiles peuvent connaître diverses fins. Elles peuvent :

- s'éteindre sans avoir jamais enclenché le processus de fusion;
- devenir, après avoir épuisé leurs réserves d'hydrogène et (ou) d'hélium, des géantes rouges, puis, après s'être transformées en naines blanches, se refroidir lentement;
- perdre des quantités appréciables de matière, soit de façon continue (nébuleuses planétaires), soit de façon brusque (novæ), ou encore accroître leur masse en arrachant de la matière à une compagne;

- exploser (supernovæ);
- devenir des étoiles à neutrons ou des trous noirs.

Les supernovæ sont à l'origine de tous les éléments plus lourds que le fer, qui sont produits par capture de neutrons suivie de désintégration. Même s'il survient en moyenne deux supernovæ par siècle dans une galaxie, il a fallu attendre près de quatre siècles, après celle qui avait été observée par Kepler, avant de pouvoir observer, en 1987, une supernova dans le voisinage de notre galaxie.

MODULE 3

ACTIVITÉS

QUESTIONS DE RÉVISION

Chapitre 6 : 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 18, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 40, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 55, 58, 59, 60, 61.

Chapitre 7 : 2, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 52, 53, 54.

Chapitre 9 : 24, 27.

PROBLÈMES DU MANUEL

Chapitre 6 : P3.

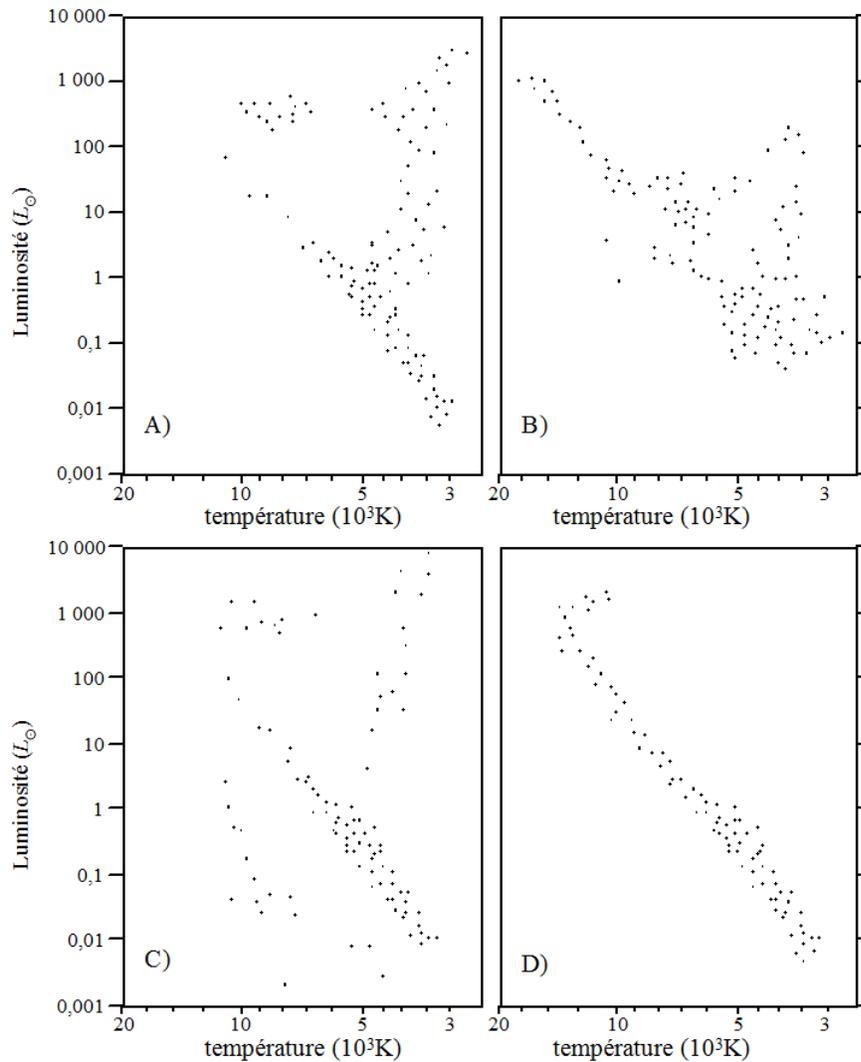
Chapitre 7 : P1.

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

- G3.1 La _____ est le phénomène par lequel deux noyaux se combinent pour former un noyau plus lourd. La _____ est le phénomène par lequel un noyau lourd se brise en deux noyaux plus petits.
- G3.2 Un électron et un positon, qui possèdent la même masse, peuvent se combiner et s'annihiler complètement; seul un rayon gamma est alors émis.
- Combien d'énergie est produite lors de cette réaction?
 - Quel est son rendement énergétique? Comment se compare-t-il à celui des réactions qui ont lieu au cœur des étoiles?
- G3.3 Expliquez pourquoi le fer est beaucoup plus abondant dans l'Univers que les autres éléments un peu plus lourds ou un peu plus légers que lui; ceci se traduit par la présence d'un « pic du fer » sur les graphiques d'abondance des éléments dans l'Univers.
- G3.4 Pourquoi les réactions de fusion nucléaire dans les étoiles se produisent-elles uniquement près de leur centre?

- G3.5 Les géantes rouges ont-elles nécessairement une masse supérieure à celle des étoiles de la série principale? Sinon, qu'est-ce qui les distingue des étoiles de même masse situées sur la série principale?
- G3.6 a) Quelle est la luminosité d'une naine blanche dont la température est 8000 K?
b) Quelle est la température d'une étoile de la série principale dont la luminosité est 10 fois moindre que celle du Soleil?
- G3.7 Quelle est la masse approximative (en unités de masses solaires, M_{\odot}) d'une étoile de la série principale :
a) dont la température est 9000 K ?
b) dont la luminosité est $100 L_{\odot}$?
- G3.8 À quelle classe de luminosité appartient une étoile dont la température est 4000 K et la luminosité $200 L_{\odot}$?
- G3.9 Classez les propriétés suivantes des étoiles en commençant par celle dont l'éventail des valeurs, pour l'ensemble des étoiles, est le plus faible, jusqu'à celle dont l'éventail est le plus important.
a) rayon b) température
c) masse d) luminosité
- Suggestion* : Utilisez comme critère le quotient de la valeur maximale sur la valeur minimale. Afin de déterminer de façon approximative ces valeurs maximale et minimale, consultez les différents diagrammes présentés dans ce module, ainsi que les tableaux 6.4 et 6.5.
- G3.10 a) Combien de fois une naine blanche dont la température est 5000 K est-elle moins lumineuse qu'une étoile de même température, mais située sur la série principale?
b) Comment s'explique cette différence puisque, à même température, la loi de Stefan-Boltzmann ($\ell = \sigma T^4$) prévoit une même valeur de ℓ ?
- G3.11 Est-il possible de distinguer facilement, à l'aide de leurs diagrammes HR, deux amas, l'un très jeune (où toutes les étoiles n'ont pas encore atteint la série principale) et l'autre beaucoup plus vieux (où la même proportion d'étoiles a quitté la série principale). On suppose que les amas sont suffisamment lointains, de sorte que des naines blanches n'ont pu être observées dans aucun des deux.

G3.12 Classez les amas suivants par ordre croissant d'âge.



G3.13 Expliquez pourquoi une étoile de $1 M_{\odot}$, lors de la période précédant son arrivée sur la série principale, peut voir sa luminosité décroître considérablement, alors que sa température ne change pratiquement pas.

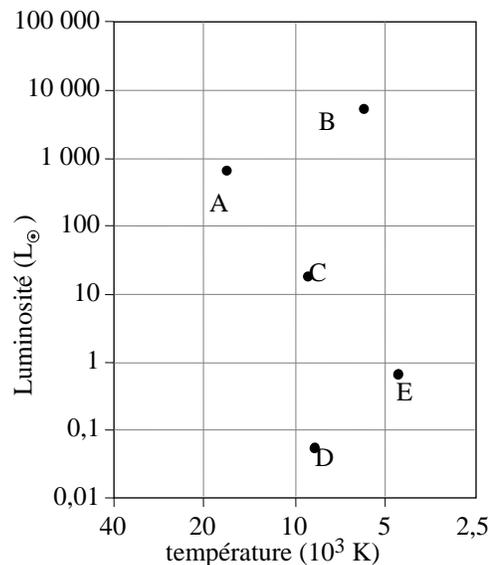
G3.14 Pourquoi des observations dans l'infrarouge sont-elles nécessaires pour observer les étoiles en formation?

G3.15 Distinguez les naines blanches et les étoiles à neutrons en ce qui concerne :

- leurs dimensions,
- leurs densités,
- l'étoile qui peut en être à l'origine.

G3.16 Déterminez, si c'est possible, parmi les quatre étoiles (A à E) qui apparaissent sur le diagramme HR ci-contre, celle qui est :

- la plus chaude
- la plus froide
- la plus lumineuse
- la moins lumineuse
- la plus massive
- la moins massive
- la plus grande
- la plus petite



G3.17 Indiquez les différences entre les phénomènes des *novæ* et des *supernovæ* de type II en ce qui a trait :

- aux conditions nécessaires pour qu'ils se produisent;
- à leur intensité et leur durée;
- à ce qu'il advient de l'étoile où ils surviennent.

G3.18 Pourquoi s'attendrait-on à ce que les naines blanches tournent sur elles-mêmes plus rapidement que les étoiles dont elles sont issues, et que les étoiles à neutrons tournent encore beaucoup plus vite?

Note : En fait, on a découvert que les naines blanches ne tournent pas plus vite que les autres étoiles, et l'on a dû expliquer cette situation. L'explication généralement acceptée fait malheureusement appel à des processus physiques dont la description dépasse le niveau de ce cours, tels des processus relevant de la magnéto-hydrodynamique, l'effet des champs magnétiques sur le mouvement des fluides, etc.

G3.19 Décrivez six façons dont les étoiles peuvent perdre une partie de leur masse.

G3.20 À quelle condition une étoile, à la fin de sa vie, (a) donne lieu à une supernova (b) devient un trou noir?

Module 4

UN COSMOS EN ÉVOLUTION

Manuel

Chapitre 8 Section 8.7 *La superstructure de l'Univers* et
section 8.8 *L'Univers invisible*

Chapitre 9 *La théorie du Big-Bang*

Chapitre 10 *Les modèles d'Univers*

Cette partie du cours vous propose un survol d'un des domaines les plus fascinants de l'astronomie, et même de la science en général. La cosmologie est la discipline qui tente de répondre aux questions suivantes. De quoi est fait l'Univers? Quelle est sa dimension? Quelle est notre place dans cet univers? A-t-il eu un commencement, aura-t-il une fin? Ces questions ont-elles même un sens?

Le but de ce module est de montrer comment les observations des confins du cosmos et certaines notions géométriques apparues à la fin du 19^e siècle peuvent nous éclairer sur ces questions, bien qu'elles ne soient pas suffisantes pour y répondre d'une manière définitive.

MODULE 4

PRÉSENTATION

Depuis le début de ce cours, vous avez appris à considérer l'existence d'objets que vous ne connaissiez pas ou que vous connaissiez mal. Des termes comme planète, système solaire ou étoile évoquent maintenant chez vous des notions plus précises. Orbite, parallaxe, spectre, masse, luminosité sont des concepts que vous savez leur associer. Avant d'analyser en détail les caractéristiques des étoiles, une autre étape, cruciale, reste à franchir afin d'atteindre une compréhension suffisante de cette partie de la réalité : celle de réunir tous ces éléments en un ensemble cohérent et de découvrir comment toute cette « ménagerie » trouve sa place dans un ensemble plus grand. C'est une lourde tâche que de tenter d'appréhender l'Univers dans sa totalité ! Cet univers semble si vaste et si varié dans son contenu qu'il paraît bien difficile de s'en forger une image à la fois simple, claire et cohérente.

Nous ne sommes pas seuls cependant à tenter un tel projet, ni même les premiers. Nombreux sont ceux qui, avant nous, ont imaginé des modèles, des représentations de l'Univers. Avant d'entreprendre ce passionnant voyage dans le temps et l'histoire, il sera nécessaire tout d'abord de bien s'entendre sur la signification des mots que nous utiliserons et d'établir les distinctions qui s'imposent.

Nous verrons ensuite que des modèles d'univers avec un centre ont dominé l'histoire. Cette conception n'a été rejetée que récemment, soit vers la fin du 19^e siècle. Pourtant des univers sans centre, sans position privilégiée, ont été imaginés dès l'Antiquité grecque. Ils ont même pris le devant de la scène après les travaux de Newton, mais seulement pour une période de temps très courte si on la compare à ce qu'a duré la domination des modèles avec centre. On peut comprendre que cela ait laissé des traces. De nos jours, par contre, l'intérêt s'est déplacé vers de nouvelles interrogations. Comme cette question renvoie davantage à d'anciennes conceptions, nous effectuerons tout d'abord, dans ce guide, un survol historique des modèles qui ont dominé les siècles passés, avant d'étudier dans le manuel la question d'un univers fini ou infini.

Nous verrons aussi comment les observations astronomiques ont contraint à déplacer constamment le centre de l'Univers et à en repousser toujours plus loin les limites. Nous verrons enfin que les modèles cosmologiques plus récents sont tous dominés par une découverte fondamentale réalisée vers le premier quart du 20^e siècle : l'expansion de l'Univers.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

1. Présenter l'objet d'étude de la cosmologie et les bases sur lesquelles elle s'appuie, en mettant en évidence son caractère scientifique.
2. Décrire les principales étapes de l'évolution de la cosmologie, de l'univers à deux sphères, avec la Terre au centre, à un univers infini, homogène et isotrope, en expliquant le rôle qu'y ont joué les observations et le développement des théories physiques.
3. Énoncer le principe cosmologique et en souligner les principales conséquences.
4. Énoncer la loi de Hubble et en tirer certaines conséquences sur le plan de l'observation.
5. Décrire le phénomène de l'expansion de l'Univers à l'aide des concepts de facteur d'échelle et de paramètre de Hubble.
6. Décrire les grandes caractéristiques des univers de Friedmann-Lemaître, en particulier celles qui sont reliées à des paramètres que l'on peut déterminer à partir de l'observation de l'Univers.
7. Distinguer les trois sources de décalage vers le rouge cosmique.
8. Décrire en quoi consiste le rayonnement de fond cosmologique (RFC) et expliquer son importance pour la cosmologie.
9. Expliquer ce que l'on entend par « Big-Bang » et présenter les indices qui militent en faveur des univers commençant de cette façon.

CONCEPTS ET SUJETS TRAITÉS

Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)	Guide : concept / sujet traité	Manuel : page [ligne] ou section (X.Y) Guide : explic. suppl. (G-X.Y)
limites de l'Univers	9.1	univers oscillant	10.2
univers isotrope	9.2	univers plat	398 [4]
position privilégiée	9.2	période de Hubble	10.3
principe cosmologique	373 [1]	sphère de Hubble	10.3
univers homogène	9.2	terme de décélération	10.3
expansion de l'espace	374 [1]	décalages vers le rouge cosmiques	10.3
vitesse de récession	345 [-22]	Univers et univers	G-4.1
paramètre ou constante de Hubble	345 [-16]	cosmologie	G-4.1
diagramme de Hubble	345	cosmogonie	G-4.1
univers de Einstein-de Sitter	400 [-23]	cosmogénèse	G-4.1
univers fermé de Friedmann	400 [3]	historique des modèles d'univers	G-4.2
univers ouvert de Friedmann	400 [10]	un autre point de vue sur l'expansion	G-4.3
		nouveau modèle standard	G-4.4

LECTURES

1. Introduction de la quatrième partie (p. 368-369).
2. Explications supplémentaires
 - G-4.1 *Qu'est-ce que la cosmologie?* (p. G-158 à G-160)
 - G-4.2 *Petit historique des modèles d'univers* (p. G-160 à G-162)
3. Sections 9.1 à 9.2 (p.370-373), 8.6 (p. 345-347) et 9.3 à 9.4 (p. 373-379)
4. Explications supplémentaires
 - G-4.3 *Un autre point de vue sur l'expansion* (p. G-162 à G-165)
5. Sections 9.5 à 9.6 (p.379-383) et 10.1 à 10.4 (p. 395-415)
6. Explications supplémentaires
 - G-4.4 *Le nouveau modèle standard* (p. G-166 à G-169)
7. Complément 10.4 *Le trajet des photons du rayonnement de fond cosmologique dans le modèle d'Einstein-de Sitter* (p. 418-420)
8. Complément 10.5 *Comparaison des distances et des intensités des objets lointains dans le modèle d'Einstein-de Sitter et dans le nouveau modèle standard* (p. 420-421)
9. Sujet connexe : *La victoire du Big-Bang* (p. 390-392)
10. Sections 8.7 à 8.8 (p. 347-353); fin de la section 9.7 à la section 9.8 (p. 387-389)

MODULE 4

EXPLICATIONS

EXPLICATIONS COMPLÉMENTAIRES

☆9.1 UN UNIVERS FINI OU INFINI (P. 370-372)

La question des limites de l'Univers, un des sujets intéressant la cosmologie, a fait couler beaucoup d'encre, avant et après Newton.

Ainsi, un Romain du nom de Lucrèce (98-55 avant J.-C.) avait énoncé clairement le problème. « Supposons que l'espace est limité et que quelqu'un, après un long voyage, en atteigne les limites et lance un javelot en direction de cette limite. Selon vous, qu'arrive-t-il au javelot? Croyez-vous que le javelot traversera les limites de l'Univers? Ou croyez-vous plutôt que quelque chose l'arrêtera? » Selon Lucrèce, si l'on croit l'espace limité, il faut choisir : soit que le javelot dépasse la limite, soit qu'il en est empêché. Lucrèce croyait à un espace infini, sans limites, seul type d'univers à son avis qui pouvait apporter une solution vraisemblable à la question de la frontière de l'Univers.

Des gens comme Kepler ont cru à une limite de l'Univers ayant la forme d'un mur. Au Moyen Âge, on pouvait imaginer, par exemple, que la sphère des étoiles était solide et que les étoiles étaient fixées sur cette surface. L'Italien Giordano Bruno (1548-1600) a cherché à infirmer cette façon de voir. Si donc la frontière de l'Univers prend la forme d'une surface quelconque, qu'y a-t-il de l'autre côté? Si l'on répond qu'il n'y a rien, que de l'autre côté c'est le néant, alors il faut se demander ce qu'est le néant et s'il a une dimension. Il semble absurde d'imaginer que le néant puisse avoir une dimension, qu'il y ait un néant plus grand qu'un autre. Le néant est nécessairement sans dimension. Mais il est difficile d'imaginer une surface qui a une dimension, une grandeur d'un côté, mais qui n'en a pas de l'autre. Aux yeux de Bruno, c'est encore plus difficile que d'imaginer un espace infini.

Le modèle d'Aristote (manuel, p. 58-59 et explications supplémentaires G-4.2 de ce module) apportait une réponse qui déjouait le problème de Lucrèce en introduisant

une frontière graduelle. Dans son modèle, les lois de la physique varient selon la position. Qu'arriverait-il à un javelot que l'on enverrait dans l'espace, selon Aristote? De deux choses l'une. D'abord, le javelot étant fait d'éléments terrestres, son mouvement naturel ne peut être que vertical et vers le bas; après être monté d'une certaine hauteur, il doit nécessairement retomber en ligne droite vers le centre de la Terre, et ce avant de franchir l'orbite de la Lune. Si par contre le javelot traversait la sphère lunaire (!), il se transmuterait en éléments éthériques. Son mouvement naturel deviendrait alors semblable à celui de la Lune et des planètes, c'est-à-dire circulaire, ce qui lui rendrait inaccessible l'autre frontière, la sphère des étoiles.

Cette solution est inacceptable de nos jours. Aussi loin que l'on puisse voir, les lois de la physique sont les mêmes. L'intervalle de longueur d'onde entre les raies spectrales du plus éloigné des quasars est le même que celui que l'on peut mesurer entre les raies d'un spectre obtenu dans un laboratoire terrestre, une fois soustrait le décalage vers le rouge, comme nous le verrons plus loin.

D'autres personnes, comme Herschel et Kapteyn (manuel, p. 92), ont imaginé une région de l'espace occupée par de la matière; cette région, correspondant à notre galaxie, est entourée d'espaces vides infinis. Selon cette conception, lancer un javelot dans le vide entourant l'Univers agrandit ce dernier et en repousse les limites. Mais, comme on l'a vu au chapitre 2, la découverte de l'étendue de notre galaxie n'a été qu'une étape de plus dans notre prise de conscience de la dimension de l'Univers. Chaque fois qu'un télescope plus puissant est mis en service, de nouveaux objets lointains, dont l'intensité était trop faible pour qu'on ait pu les percevoir auparavant, sont découverts. Chaque fois, les limites de l'Univers sont repoussées.

Pourtant, cette façon de représenter l'Univers se rencontre encore fréquemment. On voit parfois l'Univers dépeint comme un nuage de matière dans un espace vide. Cette façon de voir ne correspond pas à ce que nous croyons être la réalité. Si l'espace fait partie de l'Univers, il ne peut y avoir de point de vue externe d'où l'on puisse observer l'Univers.

☆9.2 L'INTERPRÉTATION DE L'EXPANSION DE L'UNIVERS (P. 372-373)

L'étude de la distribution de matière dans l'Univers nous apprend donc que l'on peut observer une organisation, une structure dans la distribution de la matière jusqu'à une distance de quelques centaines de millions d'années-lumière (échelle des amas de galaxies). Mais au-delà de 1 Ga.l., soit 1/30 de l'Univers observable, toute structure s'abolit, disparaît. À suffisamment grande échelle, l'Univers est **isotrope**, c'est-à-dire que l'on ne constate pas de différence quelle que soit la direction dans laquelle on observe. Devons-nous pour autant en conclure que nous sommes au centre de l'Univers (point A dans la figure G-4.1)?

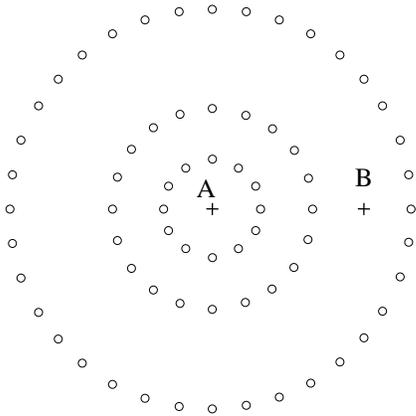


FIGURE G-4.1

Univers non homogène, isotrope vu de A, mais non isotrope vu de tout autre point, B par exemple.

☆ 373 La révolution copernicienne a fait de la Terre une planète comme les autres. Celle de Newton a fait du Soleil une étoile comme les autres*. Depuis Hubble, nous savons que la Voie lactée est une galaxie comme les autres. L'histoire semble nous enseigner que nous n'occupons pas de **position privilégiée** dans l'Univers. Ce serait donc faire fi des leçons de l'histoire que de redonner une position privilégiée à la Terre. Mais si l'on veut que la Terre n'ait pas de position privilégiée, il faut supposer que si elle était ailleurs, l'Univers nous paraîtrait aussi isotrope. Il faut donc supposer que, peu importe où l'on se place dans l'Univers, celui-ci paraît toujours isotrope. C'est ce qu'on appelle le **principe cosmologique**, que l'on peut aussi énoncer de la façon suivante : il n'y a pas de position privilégiée dans l'Univers. Selon ce principe**, tous les points de l'espace sont équivalents. De cette façon, si l'Univers est isotrope, vu d'une position donnée, il doit l'être aussi à partir de toute autre position. Est-ce possible?

Oui, c'est possible, mais alors l'Univers doit aussi être homogène. Un univers homogène est un univers tel que, quelle que soit la région où l'on se trouve, un volume donné contiendra toujours la même quantité de matière (figure G-4.2). On peut en effet démontrer que l'isotropie, à partir de tous les points de l'espace, implique nécessairement l'homogénéité. Autrement dit, un univers peut très bien être homogène sans être isotrope (figure G-4.3a), mais s'il est isotrope à partir de n'importe quel point de vue, il est nécessairement homogène (figure G-4.3b). Or, selon les observations, l'Univers, vu de la Terre, est isotrope à grande échelle. Notre foi au principe cosmologique nous amène à croire qu'il l'est vu de n'importe quel point. L'Univers est donc homogène dès que l'on considère une échelle suffisamment grande.

* La dernière étape de cette évolution a été la découverte de planètes hors du système solaire.

** Un principe est une idée à laquelle nous accordons foi et qui sert de source d'inspiration et d'orientation. Si l'on peut vérifier la validité d'une hypothèse au moyen d'une expérience, il est impossible d'en faire autant pour un principe. Sa valeur repose essentiellement sur le succès des lois et théories qu'il nous amène à formuler.

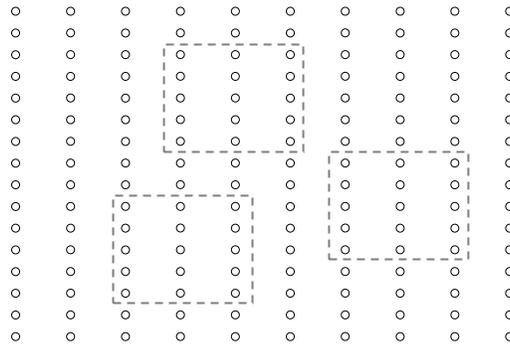


FIGURE G-4.2

Univers homogène : dans toutes les régions, un volume donné contient la même quantité de matière.

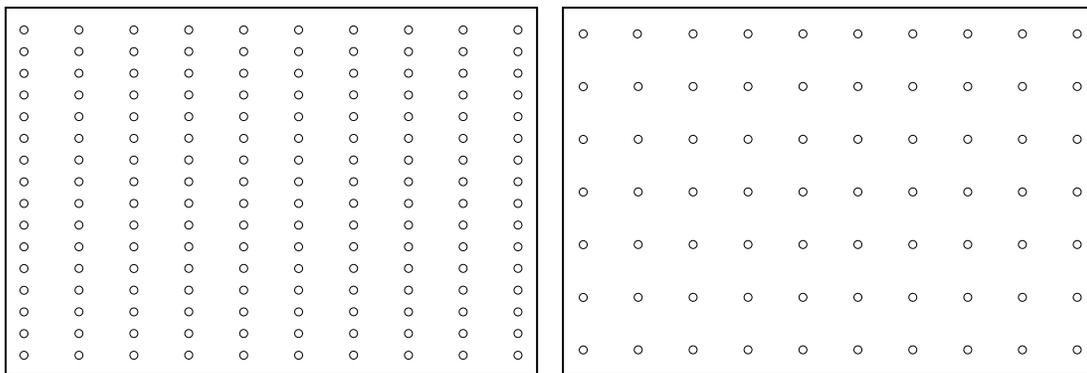


FIGURE G-4.3

a) Univers homogène, mais non isotrope. b) Univers isotrope à partir de tout point, donc homogène.

- ☆ 374 Une autre façon simple de visualiser l'**expansion de l'espace** est d'imaginer une surface élastique suffisamment grande pour que l'on n'ait pas à se préoccuper de ses frontières. Afin d'avoir des points de repère, dessinons des triangles sur cette surface (figure G-4.4a).

Faisons maintenant se dilater uniformément cette surface. Par dilatation uniforme, nous entendons une dilatation qui a le même taux ou, en d'autres termes, qui se produit à la même vitesse en chaque point de la surface. Si l'expansion est uniforme, chaque triangle grandit, mais conserve sa forme et sa grandeur relative aux autres triangles (figure G-4.4b). C'est de ce genre d'expansion dont il est question quand on parle d'expansion de l'Univers : une expansion uniforme.

Maintenant, au lieu de triangles, dessinons des galaxies sur notre surface élastique. Que constate-t-on quand la surface prend de l'expansion? Nous voyons les galaxies s'agrandir avec l'Univers. Dessinons la Terre : elle participe à l'expansion aussi. Tout ce que nous dessinons sur notre surface participe à l'expansion. Nous éprouvons ici une difficulté : si tous les objets participent à l'expansion, il n'y a aucun moyen de la détecter. Mesurer une longueur, c'est la comparer à une longueur étalon. Affirmer

qu'une longueur a grandi, c'est parler de deux comparaisons successives avec notre étalon, la deuxième comparaison donnant un rapport de longueurs plus grand que la première. Il faut donc disposer d'un étalon de longueur que l'on peut considérer comme fixe pour observer un accroissement des longueurs.

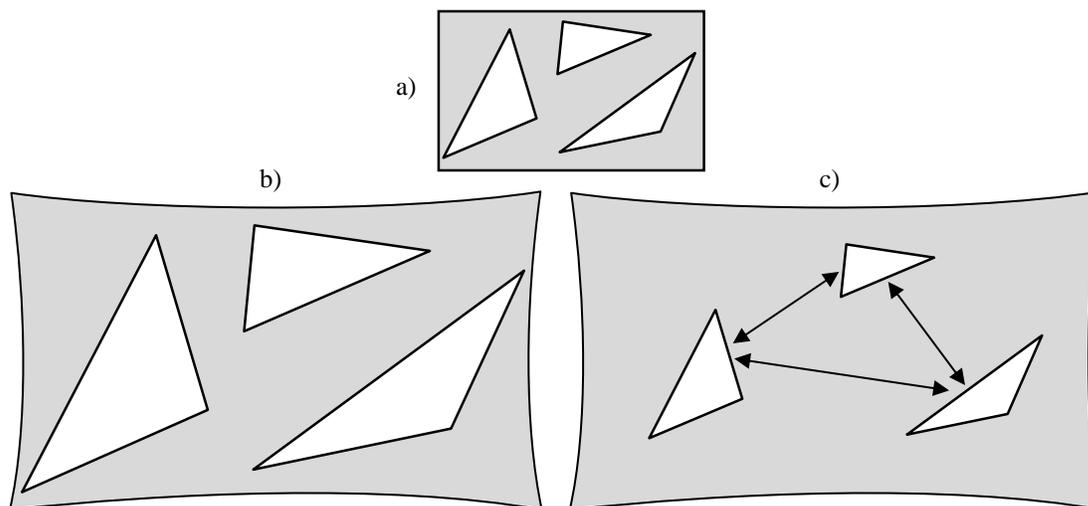


FIGURE G-4.4

Expansion de l'Univers représentée par l'étirement d'une bande élastique; les triangles représentent des galaxies ou amas de galaxies. En b) tout grandit avec l'expansion; cette représentation est incorrecte : ce sont uniquement les distances d'ordre cosmologique (c) qui changent avec l'expansion.

Il faut donc admettre, comme on le souligne dans le manuel, que nos règles et instruments de mesure ne participent pas à l'expansion de l'Univers. C'est la même chose pour la Terre, le système solaire, notre Galaxie. L'expansion est un phénomène qui ne touche que les structures à grande échelle, celles que l'on observe aux distances où l'Univers devient homogène; on appelle d'ailleurs ces dernières distances d'ordre cosmologique.

Pour représenter ce comportement sur notre surface élastique, il faut non pas dessiner les galaxies, mais les découper dans une feuille de papier et les coller sur la surface élastique en expansion. De la sorte, les galaxies ne sont pas en expansion et leurs dimensions n'augmentent pas avec le temps (figure G-4.4c). Par contre, les distances entre elles s'accroissent constamment.

Ici, une remarque s'impose. Il est intéressant de constater que d'un point de vue géométrique – ou plus précisément cinématique – il serait équivalent de dire que l'Univers n'est pas en expansion, mais que ce sont les galaxies ou même, pourquoi pas, les atomes qui rétrécissent. Mais du point de vue de la dynamique, les choses sont très différentes. Les lois de la gravitation nous disent que l'Univers doit être soit en expansion, soit en contraction. Ces mêmes lois nous disent au contraire que les galaxies ont des dimensions fixes, car les étoiles qui les composent sont liées par la gravitation. Quant aux atomes, rien ne permet de croire qu'ils rétrécissent.

8.6 LA LOI DE HUBBLE (P. 345-347)

Il est utile de parler davantage du parallèle entre les observations et les modèles proposés ici pour aider à visualiser l'expansion de l'Univers. Avec une surface élastique où sont fixées des galaxies de papier ou avec le modèle d'un pain aux raisins, nous jouissons d'un point de vue qui n'est donné à personne dans l'Univers : nous voyons l'univers (notre modèle) de l'extérieur.

Ce point de vue n'est pas conforme à la réalité. Pour avoir le point de vue d'un observateur terrestre, il faut s'asseoir sur une galaxie de papier ou sur un raisin – du moins en pensée – et observer. Nous voyons alors toutes les autres galaxies s'éloigner de nous à des vitesses d'autant plus grandes qu'elles sont plus loin de nous. En refusant de croire que nous sommes le centre de l'Univers, ou que toutes les galaxies nous fuient, nous invoquons le principe cosmologique et affirmons que des observateurs situés sur ces mêmes galaxies doivent tous observer la même chose.

Quelques précautions s'imposent cependant quant aux termes choisis. On a employé le terme de vitesse pour parler de la récession des galaxies, mais il faut remarquer que ce terme n'est pas tout à fait exact. Sur notre surface élastique, ou dans le pain aux raisins, les galaxies ne se déplacent pas; c'est la croissance de l'espace entre les galaxies qui est responsable de la récession observée. Nous y reviendrons. Pour l'instant, il faut retenir qu'il ne s'agit pas d'une vitesse ordinaire et que, pour éviter toute confusion, nous utilisons l'expression vitesse de récession pour en parler.

- ☆ 345 Voyons maintenant le **paramètre de Hubble**, appelé aussi **constante de Hubble**. Cette dernière appellation prête à confusion, car le paramètre de Hubble peut changer avec le temps. Tout ce que le principe cosmologique exige, c'est qu'il soit constant dans l'espace en un instant donné. Rien n'interdit que l'expansion ait pu être plus rapide ou plus lente dans le passé. Remarquons cependant qu'une variation dans le temps du paramètre de Hubble pourrait être observée sur Terre, car nous disposons d'une vision de l'Univers étalée dans le temps. Dans un graphique de la vitesse de récession en fonction de la distance (figure 8.30), aussi appelé diagramme de Hubble, il est possible en principe, mais très difficile en pratique, de vérifier si la relation entre vitesse et distance est une droite ou, au contraire, s'il s'agit d'une courbe, ce qui serait le cas si le taux d'expansion de l'Univers variait dans le temps. Enfin, il faut aussi préciser de quelle distance il est question. Dans un univers en expansion, la distance actuelle d'une galaxie est plus grande que celle à laquelle elle était quand elle a émis la lumière que l'on voit aujourd'hui (figures 10.3 et G-4.5). Pour définir correctement la relation entre vitesse de récession et distance, il faut utiliser les distances et vitesses de récession actuelles, comme on le dit dans la présentation de l'équation 9.1 (p. 375).

Un aspect reste à préciser : comment décrire mathématiquement cette expansion? La notion de système de référence sera encore une fois mise à contribution, avec une importante variante toutefois : le système de référence. Celui-ci, qui est lui-même en expansion, nous amène à définir une quantité primordiale : le facteur d'échelle

(noté e), un paramètre sans dimension caractérisant, à un instant donné, les distances entre les objets non liés par la gravitation, telles les galaxies lointaines situées dans des amas différents.

☆ 10.2 LES MODÈLES DE FRIEDMANN ET D'EINSTEIN-DE SITTER (P. 399-402)

En 1922 et 1924, un professeur de mathématique de l'Université de Leningrad publia, dans une revue scientifique importante, deux articles qui passèrent alors complètement inaperçus. Dans ces publications, Alexandre Friedmann proposait des modèles de l'Univers qui ne faisaient pas appel à la constante cosmologique. Depuis ce temps et en son honneur, les modèles d'univers sans constante cosmologique sont dits univers de Friedmann.

En 1927, un membre du clergé catholique du nom de Georges Lemaître publia ce qu'il croyait être une conception originale des univers en expansion. Ses travaux reprenaient cependant les grandes lignes des univers de Friedmann. Pour cette raison, on nomme les équations avancées de façon indépendante par ces deux auteurs « équations de Friedmann-Lemaître ». Ces équations sont la base des modèles cosmologiques actuellement dominants.

On peut distinguer plusieurs types d'univers de Friedmann, selon les valeurs des différents paramètres tels que la courbure de l'espace ou la variation du taux d'expansion. Examinons-en quelques-uns.

- ☆ 400 a) *L'univers d'Einstein-de Sitter.* Le plus simple des univers de Friedmann, donc un univers où la constante cosmologique tend vers zéro, est celui dit d'Einstein-de Sitter, parce qu'il a été proposé par ces deux auteurs dans la foulée des idées lancées par Friedmann. On le qualifie aussi d'univers marginalement ouvert. Dans cet univers, le paramètre de Hubble vaut $2/(3t)$, où t est l'âge de l'univers, comme on le verra à la section suivante.
- b) *Les univers ouverts de Friedmann.* Dans ce modèle, l'expansion se poursuivra indéfiniment et la masse volumique moyenne de l'univers, aussi appelée densité moyenne, diminuera constamment. Dans cette géométrie, un rayon lumineux qui ne serait pas absorbé s'éloignerait toujours de son point de départ. C'est la raison pour laquelle on parle d'univers ouvert.
- c) *Les univers fermés de Friedmann.* Dans ce modèle, l'univers poursuivra son expansion jusqu'à ce que le facteur d'échelle atteigne un maximum. Il commencera alors une contraction qui le ramènera à son état initial. Les univers fermés de Friedmann ont donc une durée d'existence finie; ils ont un début et une fin des temps. Dans ces univers, un rayon lumineux qui ne serait pas absorbé parviendrait après un certain temps à revenir à son point de départ; de là vient le terme d'univers fermé. Contrairement aux deux univers précédents, qui sont – et ont été dès leur origine – infinis, cet univers a une taille finie, proportionnelle au facteur d'échelle.

- d) *Les univers oscillants.* Ce sont en fait des variantes des univers fermés de Friedmann, possédant un comportement cyclique; l'univers oscillant retrouve à la fin des temps les conditions qui régnaient à son origine, il modifie le sens de son évolution et recommence son expansion. De la sorte, après une période d'expansion suivie d'une période de contraction, le cycle recommencerait. Si l'idée est amusante, il est difficile de pousser plus loin l'analyse et de déterminer, par exemple, si nous en sommes à la première oscillation ou à un cycle ultérieur.

L'évolution dans le temps du facteur d'échelle pour chacun de ces quatre univers est représentée à la figure G-4.5.

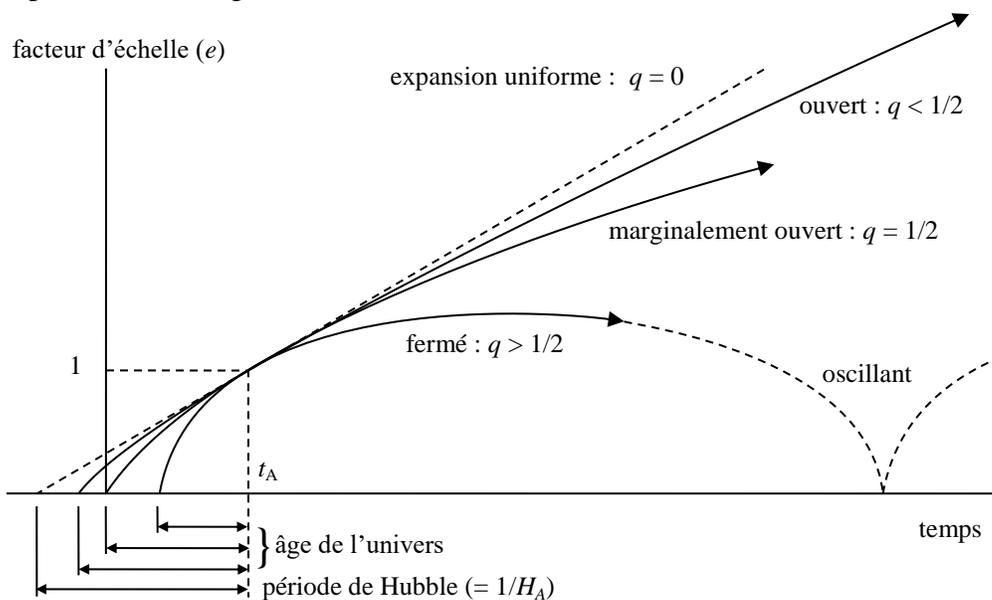


FIGURE G-4.5

Variation du facteur d'échelle dans les quatre univers de Friedmann, dont l'univers d'Einstein-de Sitter (marginale-ment ouvert, avec une courbe $e(t)$ qui tend vers l'horizontale, sans redescendre par la suite).

☆ 10.3 L'EXPANSION DE L'ESPACE DANS L'UNIVERS D'EINSTEIN-DE SITTER (P.402-408)

- ☆ L'inverse de la valeur actuelle du paramètre de Hubble, soit $1/H_A$, a les dimensions d'un temps, on appelle ce temps **période de Hubble**. On peut aisément visualiser la période de Hubble sur un graphique de l'évolution du facteur d'échelle : il suffit de prolonger vers la gauche, jusqu'à l'axe horizontal, une droite qui se confond au temps t_A avec la courbe représentant le facteur d'échelle. Cette droite est illustrée en pointillé dans la figure G-4.5. Avec la valeur actuelle du paramètre de Hubble retenue par les auteurs du manuel, soit $H_A = 65 \text{ (km/s) / Mpc}^*$, la période de Hubble vaut 15 Ga (giga-années ou milliards d'années). Ce temps serait égal à l'âge de l'Univers,

* Les valeurs les plus récentes obtenues pour la valeur de H_A se situent, selon les méthodes utilisées pour la déterminer, entre 67 et 74 (km/s)/Mpc (Watson, 2013).

soit le temps écoulé à partir de $e = 0$, si l'expansion était uniforme, c'est-à-dire si elle s'était toujours effectuée à son rythme actuel; la droite pointillée représenterait alors l'évolution du facteur d'échelle.

Par contre, si l'on suppose un univers de Friedmann, alors le taux d'expansion diminue avec le temps et l'âge de l'Univers est inférieur à la période de Hubble. La figure G-4.5 illustre trois possibilités, selon la façon dont le taux d'expansion diminue. Pour un univers d'Einstein-de Sitter, autrement dit un univers de Friedmann marginalement ouvert, on obtient la relation 10.6, qui indique que l'âge de l'Univers est égal aux $2/3$ de la période de Hubble, soit 10 Ga; c'est la valeur intermédiaire parmi les trois qui sont illustrées sur le graphique.

Par ailleurs, la distance parcourue par la lumière pendant une période de Hubble, égale à c/H , est appelée **sphère de Hubble**. Comme le montre l'exemple 10.4 (p. 419), cette distance, appelée distance critique dans le manuel, est celle à laquelle un objet possède une vitesse de récession égale à la vitesse de la lumière.

☆351 On constate que tous les univers de Friedmann sont des univers commençant par un Big-Bang, c'est-à-dire un état de densité infinie, lorsque $e = 0$; cette question est examinée en détail dans le sujet connexe *La victoire du Big-Bang* (p. 392). Ils commencent donc tous leur existence par une phase d'expansion rapide, durant laquelle la **masse volumique** ρ (appelée **densité** dans le manuel), qui varie comme $1/e^3$, diminue avec le temps. Mais à cause de la gravité, il est plausible de penser que cette expansion ne peut que ralentir. L'évolution précise de ces univers, c'est-à-dire la façon dont varie l'expansion, est liée à la valeur d'un paramètre appelé **terme de décélération**; ce paramètre, noté q , est relié à la masse volumique ρ et au paramètre de Hubble H par la relation suivante :

$$q = \frac{4\pi G\rho}{3H^2} \tag{G-6.1}$$

Le terme de décélération est sans dimensions (sans unités). Comme pour le paramètre de Hubble, le terme de décélération peut changer dans le temps; il est toutefois lui aussi constant dans l'espace par respect du principe cosmologique. Il est également utile pour classifier les différents modèles cosmologiques, car il y a un lien direct entre le terme de décélération q , la densité ρ et le fait que l'univers soit ouvert ou fermé. L'univers d'Einstein-de Sitter, avec $q = 1/2$ ou, de manière équivalente avec $\rho = \rho_{crit}$, où $\rho_{crit} = 3H^2/(8\pi G)$, trace la frontière entre les univers ouverts et les univers fermés, comme l'illustre la figure G-4.5.

Notons que les critères qui distinguent respectivement les univers de Friedmann fermés, ouverts et marginalement ouvert, soit $q > 1/2$, $q < 1/2$ et $q = 1/2$ (que l'on peut aussi écrire $\rho > \rho_{crit}$, $\rho < \rho_{crit}$ et $\rho = \rho_{crit}$), sont équivalents aux expressions 10.3a, b et c du manuel, si l'on pose la constante k dans ces expressions égale à $8\pi G/3$.

☆ 405 Rappelons qu'il y a, comme on l'a vu à la section 4.7, trois phénomènes physiques connus qui peuvent être responsables des décalages spectraux. Ce sont l'*expansion de l'Univers*, responsable du décalage vers le rouge cosmologique que nous venons d'étudier, l'*effet Doppler*, relativiste ou non selon la vitesse de la source, et la *gravitation*. Le décalage provoqué par l'effet Doppler dépend, comme on l'a vu, du mouvement propre de l'objet qui émet la radiation et des mouvements de la Terre, du Soleil et de la Voie lactée.

Le décalage spectral mesuré lors de l'observation d'une galaxie est le produit de la combinaison de ces trois phénomènes. Pour déterminer la portion du décalage provoquée par la gravité, il faut connaître la masse de l'objet émetteur de lumière. Pour obtenir la contribution due à l'effet Doppler, il faut connaître :

- la vitesse de la galaxie dans son amas;
- la vitesse de la Voie lactée dans l'amas de la Vierge;
- la vitesse du Soleil dans notre galaxie.

Ce n'est qu'une fois toutes ces contributions déduites que le décalage spectral d'origine cosmologique peut être connu. Nous sommes alors habituellement intéressés à connaître des quantités comme la distance actuelle de la source, le temps qu'a pris la lumière pour nous parvenir et l'âge de l'Univers au moment de l'émission de celle-ci. Mais pour les galaxies lointaines, comme on le souligne dans le manuel, ces informations ne peuvent être obtenues directement à partir de la mesure du décalage vers le rouge. Nous devons d'abord connaître comment varie dans le temps le facteur d'échelle. Cela signifie que pour répondre à de telles questions, il est nécessaire de choisir un modèle de l'Univers, comme l'ont fait les auteurs du manuel quand ils ont opté pour le modèle d'un univers d'Einstein-de Sitter avec $H_A = 65(\text{km/s}) / \text{Mpc}$.

Pour vous aider à répondre vous aussi à ces questions, nous avons préparé trois graphiques sur lesquels vous pouvez lire les valeurs recherchées. Les graphiques des parties supérieures des figures G-4.6 et G-4.7, qui reproduisent avec des échelles et pour des gammes de valeurs différentes, les courbes bleue et verte de la figure 10.4 du manuel, donnent, pour l'univers d'Einstein-de Sitter, la distance et l'âge de l'Univers à l'émission, en fonction du décalage vers le rouge*.

* Si vous êtes à l'aise en algèbre, vous pouvez aussi consulter et utiliser, pour faire les exercices, les équations du tableau G-4.1, qui décrivent les mêmes relations que les courbes de ces graphiques.

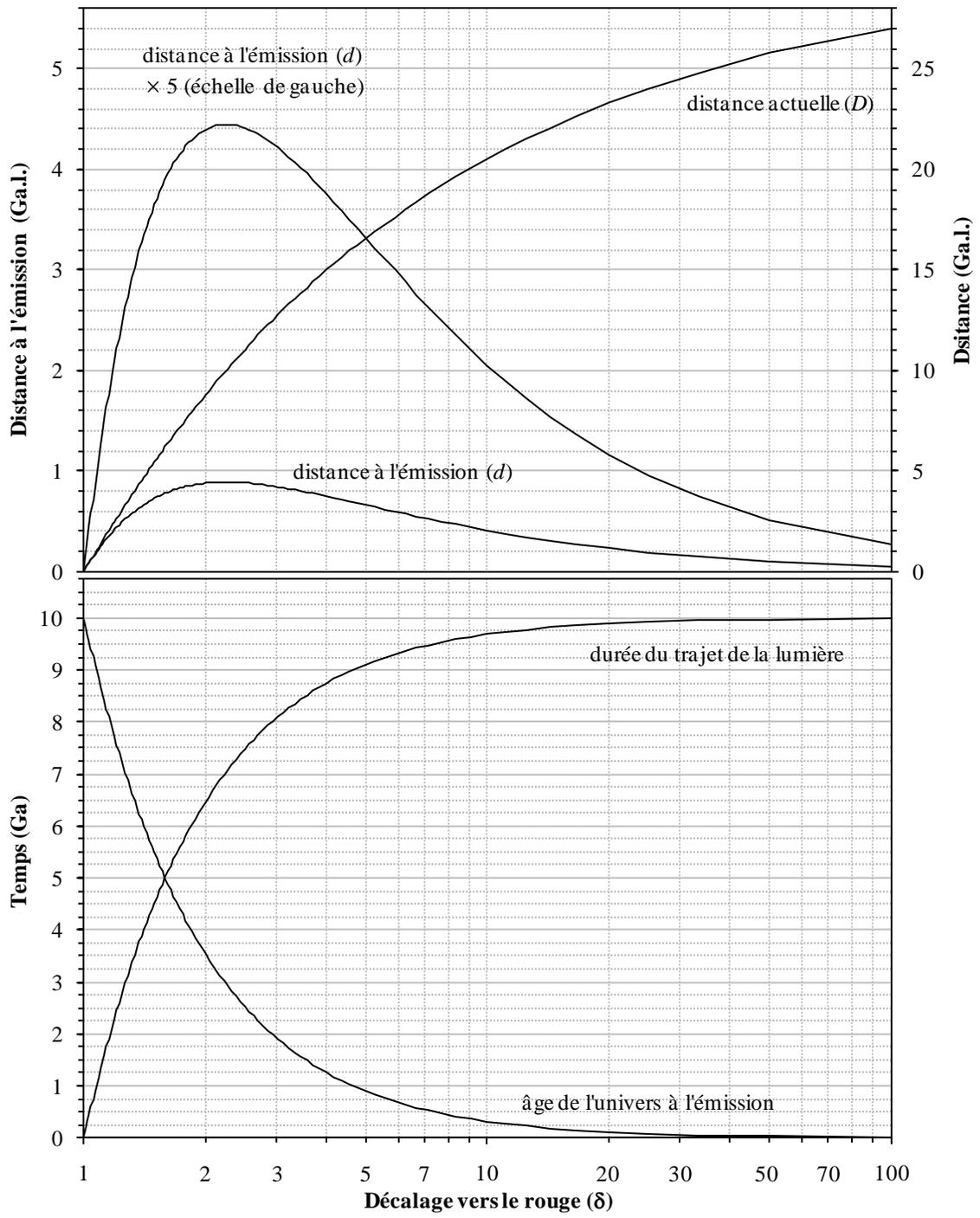


FIGURE G-4.6

En haut : distances actuelle et à l'émission de la source d'un photon reçu actuellement. En bas : durée du trajet de la lumière et âge de l'Univers à l'émission. On suppose un univers d'Einstein-de Sitter avec une valeur actuelle de la constante de Hubble (H_A) de 65 (km/s)/Mpc.

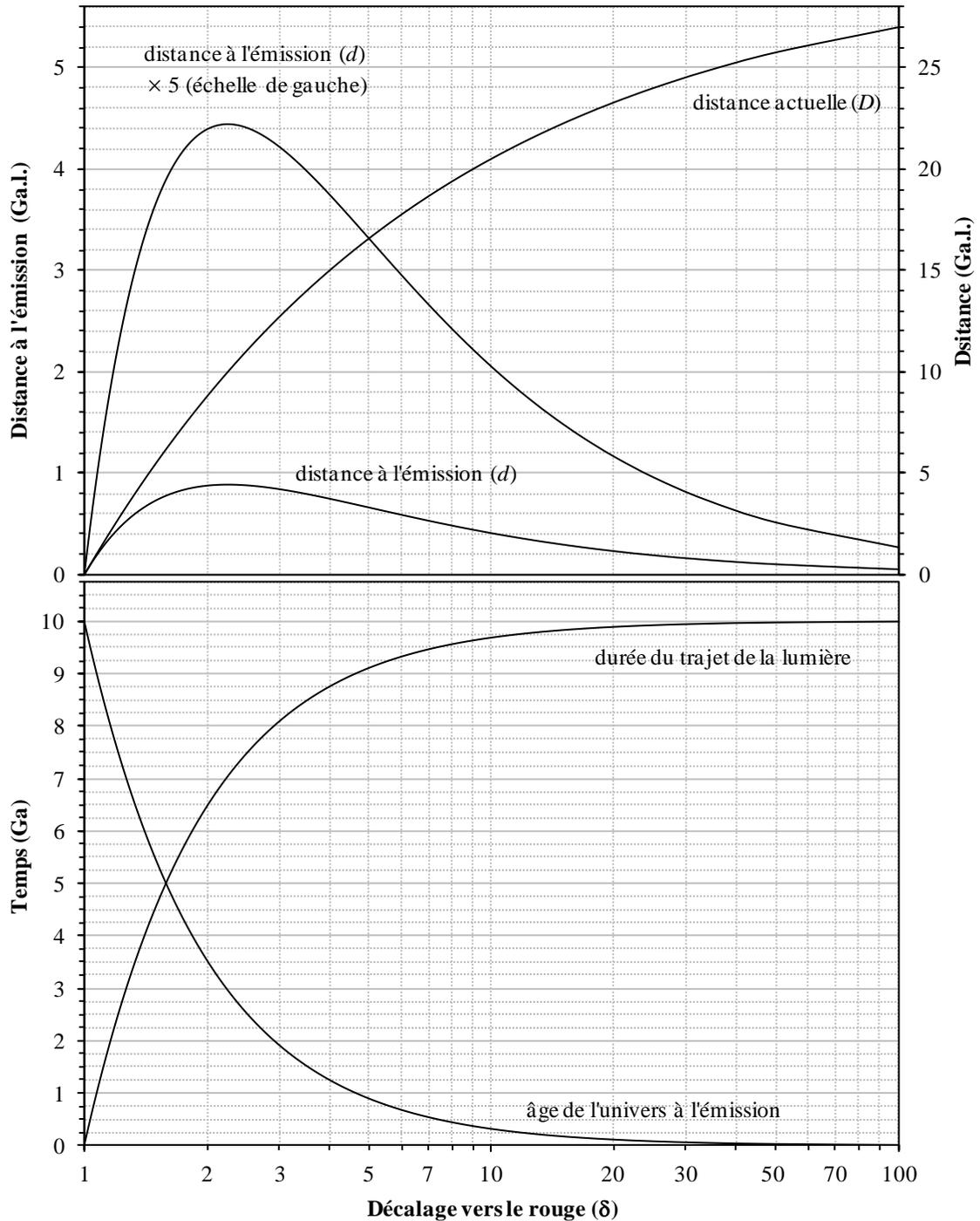


FIGURE G-4.7

En haut : distances actuelle et à l'émission de la source d'un photon reçu actuellement. En bas : durée du trajet de la lumière et âge de l'Univers à l'émission (détail des deux graphiques précédents). On suppose un univers d'Einstein-de Sitter avec une valeur actuelle de la constante de Hubble (H_A) de 65 (km/s)/Mpc.

De leur côté, les graphiques des parties inférieures des figures indiquent la durée du trajet de la lumière et l'âge de l'Univers au moment de l'émission de celle-ci (la somme de ces deux valeurs étant égale à l'âge actuel de l'Univers). La gamme de valeurs de décalage vers le rouge de la figure G-4.7 correspond à la grande majorité des objets que l'on peut observer à l'aide des instruments actuels (l'objet le plus lointain observé jusqu'à maintenant possédait un décalage vers le rouge d'environ 10).

EXPLICATIONS SUPPLÉMENTAIRES

☆ G-4.1 QU'EST-CE QUE LA COSMOLOGIE?

Vous avez probablement remarqué que le concept d'*Univers* est écrit avec un « u » majuscule dans le manuel. Dans ce guide, nous parlons aussi des *modèles* de l'Univers en les nommant « *univers* », avec un « u » minuscule. Notre démarche visera ensuite à confronter ces univers à l'Univers, soit celui des *observations*, de l'*expérience*. Cette distinction vous paraît peut-être un peu trop subtile, voire inutile. Chose certaine, elle n'est pas toujours facile à établir; parfois, on peut interpréter la même affirmation comme s'appliquant à l'Univers des observations ou au modèle qui tente de le décrire. Mais cette distinction est d'une importance capitale en cosmologie, où l'on peut constater, beaucoup plus facilement que dans d'autres domaines, que les observations et leur interprétation dépendent étroitement du modèle privilégié. Ainsi, des affirmations comme « On a observé une étoile située à des millions d'années-lumière de la Terre », ou encore « L'âge de l'Univers est de 10 Ga », sont basées sur une série d'hypothèses et de modèles concernant les propriétés des étoiles ou l'évolution de l'univers. Dans ce module, « observation » devra donc être compris comme l'interprétation de cette observation, interprétation qui fait l'objet d'un consensus parmi la communauté scientifique.

Ainsi, l'âge de l'Univers est une notion qu'il faut interpréter avec prudence : il existe un grand nombre d'univers possibles, avec des âges différents, qui peuvent tous s'accorder avec notre connaissance actuelle de l'Univers. Seuls l'évolution des théories physiques et le raffinement des observations permettront de restreindre l'éventail de réponses possibles. Rien ne sera jamais définitivement acquis toutefois, car de nouveaux modèles, radicalement différents, pourront toujours surgir. Ainsi va la science, pourrions-nous dire!

Nous vous suggérons donc, dans ce guide, de bien remarquer la façon dont le mot « univers » est écrit et d'en faire un sujet de réflexion.

Comme la plupart des auteurs qui se sont intéressés à la question, nous parlons de l'Univers comme d'une réalité plus ou moins palpable et partagée jusqu'à un certain point par l'ensemble des êtres humains au cours de l'histoire. Bref, nous supposons que malgré la diversité des événements somme toute uniques qui ont constitué et constituent encore pour chacun de nous notre existence, il existe quelque chose d'englobant, quelque chose que personne n'a pu percevoir dans son entier et qui assure la

pérennité de l'existence, en étant conservé d'une génération à l'autre. Ce pourrait être par exemple l'espace, l'écoulement du temps, la matière, les étoiles; enfin tout ce que l'on peut imaginer comme faisant partie d'un univers.

L'histoire nous fournit toute une panoplie de modèles de l'Univers : l'univers aristotélicien, l'univers pythagoricien, celui de Ptolémée, les modèles plus récents de Friedmann, etc. Chacun est la synthèse plus ou moins réussie d'une vision particulière de la réalité. Malgré leur diversité, certains modèles ont plusieurs points en commun et peuvent être regroupés selon les réponses qu'ils apportent à certaines questions. L'espace d'un univers est-il fini ou infini? Cet univers a-t-il un début des temps ou est-il censé avoir toujours existé? Aura-t-il une fin? A-t-il une frontière? La **cosmologie** s'est donné pour but de répondre à ce type de questions.

La cosmologie est le domaine de l'activité humaine qui tente d'imaginer ou d'étudier des modèles de l'Univers. Faire de la cosmologie, c'est se questionner sur les limites et les dimensions de l'Univers, sa forme et l'endroit où est situé son centre (s'il en a un), son âge, sa structure, bref sur tout ce qui caractérise l'Univers dans son ensemble. Dans un sens large, la cosmologie concerne les sciences, la philosophie, la religion, les arts. Dans ce cadre plus général, parce qu'il n'est pas toujours facile de dissocier modèle et réalité, des univers sont devenus de grands supports idéologiques. Il devint parfois difficile de proposer une nouvelle conception de l'Univers sans porter atteinte à l'idéologie dominante, sans s'attaquer aux valeurs fondamentales de la société. Pour cette raison, les débats d'ordre cosmologique ont, dans certains cas, été très durs. Que l'on pense au sort de Galilée qui voulait défendre un univers héliocentrique devant les représentants de l'Église, adeptes quant à eux d'un modèle géocentrique.

Quant à nous, dans ce guide, tout comme l'ont fait les auteurs du manuel, nous essayons de nous restreindre au discours scientifique sur l'Univers. L'histoire a donné raison à Galilée parce que ses affirmations étaient fondées sur des observations accessibles à ses détracteurs comme à ses partisans. Il est en effet parfois possible de vérifier des hypothèses de nature cosmologique par l'observation ou à l'aide d'expériences. De plus, la cosmologie se situe d'emblée dans le cadre plus général de la physique, dont elle tire la majorité de ses concepts et méthodes. Les lois qui régissent un univers doivent aussi s'appliquer dans d'autres domaines, l'infiniment petit par exemple. C'est ce qui permet à la cosmologie de participer à la connaissance scientifique, de s'inscrire dans le discours de la science. Il n'est malheureusement pas possible de confronter toutes nos hypothèses aux observations. Dans certains cas, nous devons faire des choix, des suppositions que nous ne pouvons vérifier. Nous tâchons cependant, dans ce guide d'indiquer clairement ces choix et d'expliquer les principes qui les sous-tendent.

La **cosmogonie**, quant à elle, est l'étude des structures matérielles dans l'Univers, telles les planètes, les étoiles, les galaxies, etc. Nous n'abordons pas ces questions dans ce cours. Il est toutefois intéressant de remarquer que la cosmogonie peut venir

en aide aux cosmologistes désireux de vérifier un modèle de l'Univers. Par exemple, si je privilégie un univers qui se serait formé il y a 10 milliards d'années, je peux vérifier s'il existe quelque chose dans l'Univers (étoile ou atome) qui semble plus âgé (voir à ce sujet Casoli et Gerin, 1993).

La **cosmogénèse** est la partie de la cosmologie qui s'intéresse aux questions relatives à l'origine de l'Univers. Certains modèles cosmologiques ont en effet une origine, un début des temps. Lorsque c'est le cas, quelles conditions initiales doivent-ils supposer? On lit parfois que la question de l'origine de l'Univers n'est pas abordable de façon scientifique, car elle contraint à émettre des hypothèses qui ne sont pas vérifiables par des expériences ou des observations. Mais la science se nourrit d'observations et il est des phénomènes observables qu'on peut interpréter comme des indices de l'origine de l'Univers. Pour les cosmologistes, le problème lié à l'origine de l'Univers est de déterminer les conditions qui régnaient à cet instant. Une des idées les plus puissantes et les plus riches de la cosmologie veut que les conditions initiales de l'Univers soient le plus simples possible. Voyons un exemple.

La Bible énonce que l'Univers a été créé en six jours. Au début du 17^e siècle, James Usher, un évêque irlandais, a même évalué que cela s'était produit en l'an 4004 avant J.-C. D'un autre côté, on peut observer de nos jours des objets dont la distance est évaluée à plusieurs millions d'années-lumière, donc dont la lumière a mis des millions d'années à nous parvenir. Cette observation est-elle compatible avec l'âge donné à l'Univers par Usher? Rien ne l'interdit. On peut en effet penser que l'Univers a été créé dans un état fort complexe. Que des objets ont été créés très loin de la Terre et que la lumière se dirigeant vers nous a été créée au même moment. Qu'une étoile a vu le jour à plusieurs millions d'années-lumière de la Terre dans un stade déjà avancé de son évolution et que de la lumière se dirigeant vers nous a été créée en même temps, entre nous et elle, de façon que les humains puissent observer cette étoile et croire qu'elle a déjà suivi tous les stades de l'évolution normale d'une étoile, stades que l'on étudiera au prochain module. Cela suppose donc que l'Univers a été créé avec tout ce qu'il fallait pour paraître plus âgé qu'il ne l'est vraiment.

Une telle attitude est contraire à un principe jugé important en science : le **principe de simplicité**, appelé aussi « rasoir d'Ockham », du nom d'un philosophe du Moyen-Âge. Ce principe stipule qu'entre deux hypothèses parvenant toutes deux à décrire des phénomènes observés, on choisisse la plus simple. Dans notre cas, il est plus attrayant de supposer que l'Univers, s'il a connu une origine, est apparu dans un état initial simple. La complexité observée de nos jours devrait s'expliquer à partir de l'évolution de cet état initial, évolution qui peut être expliquée par les lois de la physique.



G-4.2 PETIT HISTORIQUE DES MODÈLES D'UNIVERS

Comme nous l'avons vu au module 1, les Grecs ont imaginé toutes sortes d'univers. Dans ce domaine comme dans d'autres, ils ont fait preuve d'une imagination remar-

quable. Le monde médiéval a surtout retenu d'eux les univers à sphères concentriques. Au départ, ils étaient essentiellement constitués de deux sphères. La Terre sphérique occupait le lieu privilégié par excellence : le centre de l'Univers. Elle était entourée par la sphère des étoiles qui tournait sur elle-même en 24 heures. Plus tard, on ajouta les sphères portant les planètes. On imaginait ces sphères formées de cristal, afin d'expliquer pourquoi on pouvait voir les planètes lointaines à travers les sphères des planètes plus proches. Diverses combinaisons de sphères animées de mouvement de rotation à vitesse appropriée et selon des axes judicieusement choisis permettaient de reproduire sommairement le mouvement apparent des planètes et des étoiles.

À partir de ce qui au début n'était qu'une représentation commode de nature essentiellement cinématique, Aristote construisit un modèle d'univers qui incluait un aspect dynamique et qui répondait, à sa façon, à des questions d'ordre cosmologique. Dans son univers, les lois de la physique différaient selon l'endroit. À l'intérieur de la sphère lunaire, le mouvement naturel d'un objet, c'est-à-dire celui qui s'établit lorsqu'il cesse de subir l'effet de la force qui l'a mis en mouvement, était vertical et rectiligne, vers le haut pour certains, vers le bas pour d'autres. Au-delà de cette sphère, seuls les mouvements parfaitement circulaires devenaient possibles (figure G-4.8). De la sorte, l'univers aristotélicien était limité, contenu à l'intérieur de la sphère des étoiles.

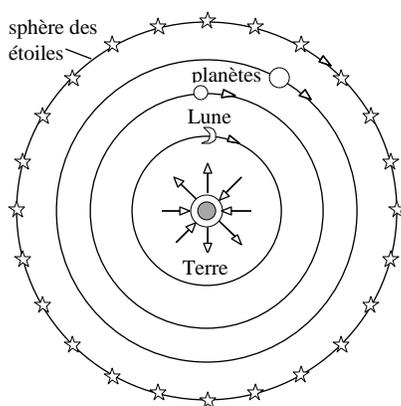


FIGURE G-4.8
L'univers d'Aristote et les mouvements qui y sont permis.

L'impossibilité des mouvements rectilignes au-delà de la sphère de la Lune assurait qu'aucun corps ne puisse quitter l'Univers. Les mouvements rectilignes, ou même la ligne droite comme telle, étaient vus comme imparfaits parce que nécessairement limités, ce qui les accordait bien, selon les conceptions de l'époque, aux réalités terrestres.

L'univers d'Aristote avait une qualité importante : il était associé à une physique, c'est-à-dire qu'il constituait une sorte de synthèse des forces de la nature telles qu'elles étaient comprises à l'époque. Il domina tout le Moyen Âge sous la forme améliorée que lui donna Ptolémée.

Avec le temps cependant, il devint de plus en plus difficile d'accorder l'univers géocentrique avec les observations et, en particulier, d'expliquer le mouvement des planètes. En se complexifiant, le modèle prenait aussi de plus en plus de liberté avec les principes physiques qui le justifiaient. C'est dans un souci de simplicité que Copernic proposa l'univers héliocentrique. Comme nous l'avons déjà vu, Galilée ébranla irrémédiablement les anciennes conceptions en s'attaquant aux principes physiques à la base du modèle géocentrique et en introduisant de nouvelles observations au moyen de la lunette astronomique devenue le télescope. L'univers héliocentrique devait par contre faire face à un problème de taille : l'absence de parallaxe stellaire. Soit que le modèle héliocentrique était à rejeter, soit que la sphère des étoiles était à une distance immensément plus grande que tout ce que l'on avait imaginé jusqu'alors.

Malgré ce problème, on a vu que l'hypothèse héliocentrique permit à Kepler d'expliquer le mouvement des planètes par l'introduction d'orbites elliptiques et de lois géométriques simples. Ce résultat marquait le point culminant de l'univers héliocentrique.

La transformation entamée avec l'entrée en scène de l'univers héliocentrique était trop fondamentale pour s'arrêter en si bon chemin. En s'attaquant à la physique d'Aristote, l'univers héliocentrique jeta les bases d'une révolution qui devait le dépasser. En 1576, soit à peine 33 ans après la publication du *De Revolutionibus* de Copernic, l'astronome et mathématicien Thomas Digges faisait éclater la sphère des étoiles et dispersait ces dernières dans un espace infini. Là encore, des Grecs – Leucippe et Démocrite, les instigateurs de la théorie atomiste de la matière – l'avaient précédé.

Il est possible qu'au 16^e siècle le problème de la parallaxe ait eu un rôle à jouer dans cette évolution. Pour que les parallaxes soient inobservables, les étoiles devaient être si loin que leur luminosité pouvait se comparer à celle du Soleil. Le Soleil ne donnant pas l'impression d'être fixé sur une sphère, pourquoi les étoiles le seraient-elles si elles sont semblables au Soleil? C'est donc de cette époque que nous vient l'idée voulant que les étoiles soient des astres comme le Soleil. Si elles nous paraissent si petites et si peu brillantes, c'est à cause des distances considérables qui nous séparent d'elles. Mais pour prouver cette hypothèse, il faut mesurer les parallaxes des étoiles et montrer à quelles distances elles sont situées. Deux cents ans seront nécessaires pour y parvenir.



G-4.3 UN AUTRE POINT DE VUE SUR L'EXPANSION DE L'UNIVERS

Le manuel présente le phénomène de l'expansion de l'Univers selon le point de vue d'une personne située sur Terre, ou sur n'importe quelle planète en vertu du principe cosmologique, et observant l'Univers aujourd'hui à partir de ce repère. De ce point de vue, l'Univers, si bien sûr il est marginalement ouvert, et même s'il est infini, paraît en réalité fini, car la lumière des étoiles situées au-delà de 30 Ga.l. n'a pas encore eu le temps de nous parvenir. Mais elle nous parviendra un jour, que ce soit dans

x millions ou milliards d'années; ici, il nous faut bien comprendre ce qu'inclut, ou plutôt exclut, ce « nous »...

On peut aussi adopter un second point de vue, théorique parce qu'impossible à recréer, mais qu'on peut très bien imaginer en se demandant de quoi a l'air l'Univers en ce moment et à quel moment « nous » pourrions observer la lumière que les étoiles plus ou moins éloignées émettent au moment même où vous lisez ces lignes.

Considérons pour commencer la lumière émise actuellement par une étoile située à la limite de notre sphère de Hubble – ou distance critique, dans les termes du manuel –, soit à 15 Ga.l. À cause de l'expansion, cette étoile s'éloigne actuellement de nous à une vitesse de récession égale à la vitesse de la lumière. Si l'expansion était uniforme, notre sphère de Hubble grandirait à la vitesse de la lumière, et la vitesse de récession de l'étoile demeurerait toujours égale à cette même vitesse. L'étoile resterait ainsi toujours à la limite de notre sphère de Hubble et sa lumière ne nous atteindrait jamais. Pour reprendre une analogie employée dans le manuel, les photons seraient comme quelqu'un qui court à contresens sur un tapis roulant, mais qui nous paraît immobile parce qu'il va exactement à la même vitesse que le tapis.

Mais, l'expansion n'est pas uniforme, elle ralentit. Dans ces conditions, notre sphère de Hubble grandit plus vite que la vitesse de la lumière – une fois et demie plus vite dans les faits –, ce qui est équivalent à dire que la vitesse de récession de l'étoile diminue avec le temps. Ce phénomène est illustré dans la partie du haut de la figure G-4.9 qui présente, sur un même graphique, l'évolution dans le temps du facteur d'échelle, du paramètre de Hubble et de la vitesse de récession d'un objet quelconque en fonction de l'âge de l'Univers. Dans les deux graphiques de cette figure, on suppose un univers d'Einstein-de Sitter avec une valeur actuelle de la constante de Hubble (H_A) de 65 (km/s) / Mpc.

Remarquez que toutes les valeurs sont des valeurs *relatives*, la valeur de référence étant fixée à la valeur actuelle; pour le facteur d'échelle, il s'agit donc, par définition, de l'unité. Ainsi, lorsque l'Univers aura 30 Ga, le facteur d'échelle vaudra environ 2,1, la vitesse de récession d'une étoile 0,7 fois sa valeur actuelle, et le paramètre de Hubble 0,35 fois sa valeur actuelle, soit environ 23 (km/s) / Mpc.

Ainsi, les photons émis actuellement par des étoiles situées au-delà de notre sphère de Hubble et qui, pour cette raison, n'arrivent pas en quelque sorte à « remonter le courant » à l'époque actuelle, se retrouveront un jour à l'intérieur de notre sphère de Hubble, ce qui signifie qu'ils finiront par nous parvenir. Évidemment, le temps qu'ils mettront sera largement supérieur à ce qu'il serait dans un univers non en expansion, c'est-à-dire une année pour chaque année-lumière de distance. C'est ce qu'illustre le graphique du bas de la figure G-4.9, qui décrit le temps que mettra pour nous atteindre la lumière émise actuellement par une étoile située à une distance r . On y constate, par exemple, qu'un photon, émis actuellement à 50 Ga.l. de nous, atteindra notre galaxie dans près de 180 Ga, car notre système solaire aura cessé d'exister

depuis longtemps; son trajet sera donc trois fois plus long que s'il n'y avait pas d'expansion.

Encore une fois, le tableau G-4.1 présente, sous forme d'équations, les mêmes relations (si l'on pose $t_A = 10$ Ga).

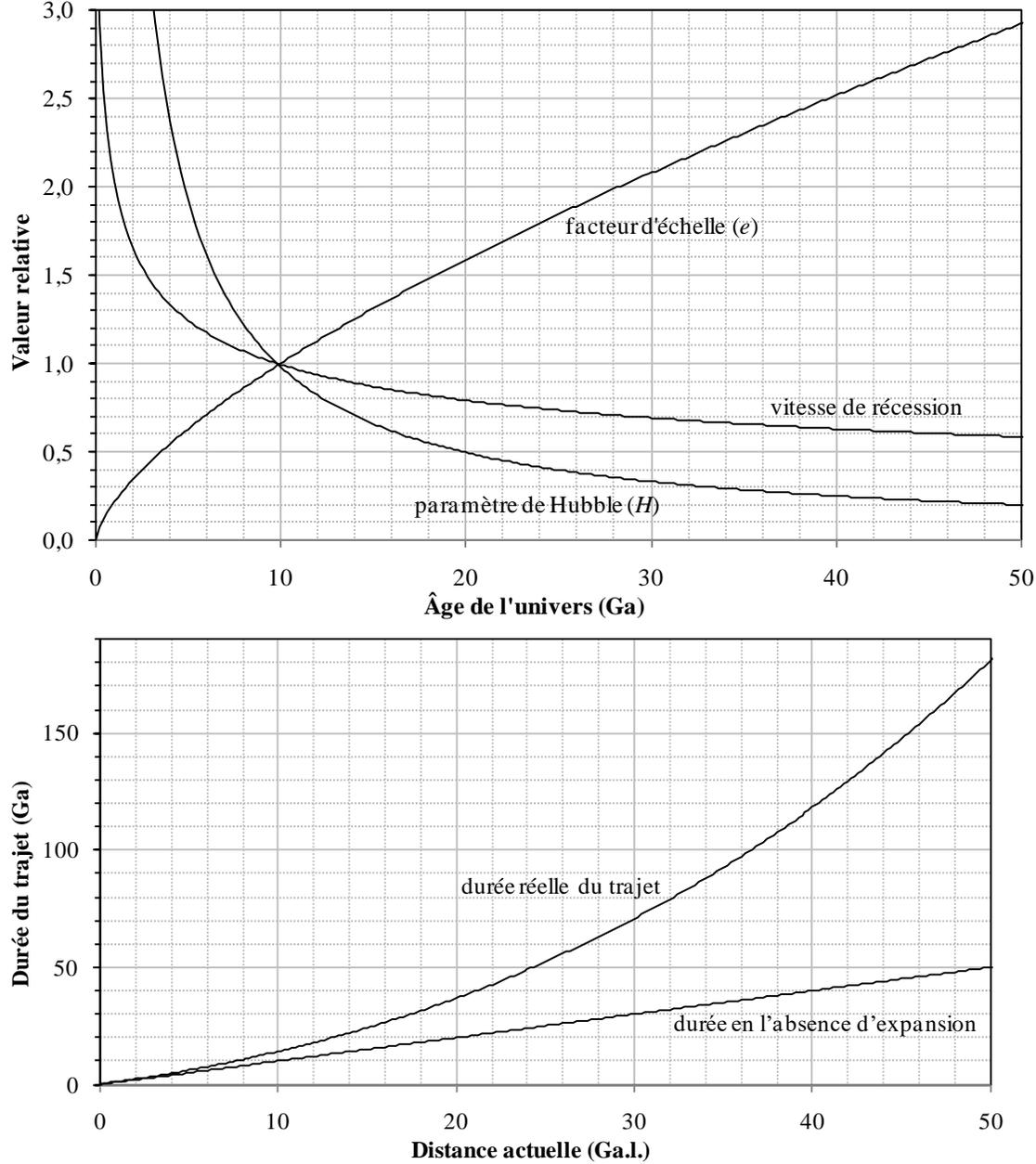


FIGURE G-4.9
Graphique du haut : variation dans le temps du facteur d'échelle, du paramètre de Hubble et de la vitesse de récession. Graphique du bas : temps mis par un photon émis actuellement à une distance r pour « nous » parvenir. Univers d'Einstein-de Sitter avec $H_A = 65$ (km/s)/Mpc.

TABLEAU G-4.1

Les deux points de vue sur l'expansion, en équations.

	Photon reçu actuellement avec un décalage δ		Photon émis actuellement à une distance r_A	
	à l'émission	à la réception	à l'émission	à la réception
Facteur d'échelle	$e_E = 1/\delta$	$e_R = 1$	$e_E = 1$	$e_R = \left(1 + \frac{r_A}{3ct_A}\right)^2$
Décalage vers le rouge	1	δ	1	e_R
Âge de l'univers	$t_E = \frac{t_A}{\delta^{3/2}}$	t_A	t_A	$t_R = t_A \left(1 + \frac{r_A}{3ct_A}\right)^3$
Paramètre de Hubble	$H_E = \frac{2\delta^{3/2}}{3t_A}$	$H_A = \frac{2}{3t_A}$	$H_A = \frac{2}{3t_A}$	$H_R = \frac{2}{3t_R}$
Distance de la source	$r_E = e_E r_A$ $= \frac{3ct_A}{\delta} \left(1 - \sqrt{1/\delta}\right)$	$r_A = 3ct_A \left(1 - \sqrt{1/\delta}\right)$	r_A	$r_R = r_A e_R$ $= r_A \left(1 + \frac{r_A}{3ct_A}\right)^2$
Vitesse de récession de la source	$v_{\text{réc}} = r_E H_E$ $= 2c\sqrt{\delta} \left(1 - \sqrt{1/\delta}\right)$	$v_{\text{réc}} = r_A H_A$ $= 2c \left(1 - \sqrt{1/\delta}\right)$	$v_{\text{réc}} = r_A H_A$ $= \frac{2r_A}{3t_A}$	$v_{\text{réc}} = r_R H_R$ $= \frac{2c}{\left(1 + 3ct_A/r_A\right)}$
Temps mis par le photon pour nous parvenir	$\Delta t = t_A \left(1 - \frac{1}{\delta^{3/2}}\right)$		$\Delta t = t_A \left(e_R^{3/2} - 1\right) = t_A \left[\left(1 + \frac{r_A}{3ct_A}\right)^3 - 1\right]$	

☆ G-4.4 LE NOUVEAU MODÈLE STANDARD

Tout comme le manuel, le Guide adopte le modèle d'Einstein-de Sitter comme référence pour la détermination des valeurs reliées à l'expansion de l'Univers. Ce modèle présente l'avantage de permettre de calculer les diverses quantités à l'aide de formules algébriques relativement simples (tableau G-4.1).

Mais comme on l'explique dans le manuel, un consensus s'est formé récemment autour d'un modèle un peu plus complexe, caractérisé par l'existence d'une masse volumique du vide (Ω_V) non nulle. Ce modèle, couplé avec une valeur actualisée de la constante de Hubble (H_A), soit 71 (km/s)/Mpc, conduit à des valeurs passablement différentes pour l'âge actuel de l'Univers (13,7 Ga au lieu de 10 Ga) et la distance des objets très lointains.

Malheureusement, avec ce modèle, ces quantités ne peuvent être calculées par de simples formules algébriques. Cependant, on peut toujours lire les données sur des graphiques. De plus, un calculateur cosmologique en ligne, qui permet d'obtenir les principales valeurs associées au nouveau modèle standard, a été conçu par le professeur Edward (Ned) Wright (2009), de l'Université de Californie à Los Angeles. Son site contient également des explications détaillées (Wright, 2010), d'un niveau un peu plus avancé que celui de ce cours, de ce que signifient vraiment les notions de distance et de temps dans un univers courbe en expansion. Ainsi, on y explique que l'on peut définir la distance d'un objet lointain de quatre façons différentes; les valeurs de trois d'entre elles sont fournies par sa calculatrice.

Pour les fins de ce cours, vous pouvez vous en tenir aux graphiques des pages suivantes, qui montrent, en fonction du décalage vers le rouge, les différences entre les deux modèles (en tenant également compte de la différence de la valeur de H_A) pour :

- les distances actuelle et à l'émission (figure G-4.10);
- la durée du trajet de la lumière et l'âge de l'univers à l'émission (figure G-4.11);
- l'évolution du facteur d'échelle (figure G-4.12).

La distance actuelle retenue est celle qui est désignée sous l'appellation *comoving radial distance* (distance radiale comobile) dans le site du professeur Wright. Notez que cette distance n'est pas égale à celle que l'on obtient par les calculs fondés sur la luminosité observée; cette autre distance, aussi donnée par la calculatrice, est la distance de luminosité (*luminosity distance*).

Attention. – Il existe deux définitions du décalage vers le rouge. Celle du manuel (et du Guide), où le décalage est représenté par δ et vaut 1 lorsque les raies sont à leur emplacement habituel, n'est pas la plus employée en astronomie. On utilise le plus souvent une autre définition, selon laquelle le décalage est nul quand... il n'y a pas de décalage justement. Cet autre décalage vers le rouge, noté z , est simplement égal à

$\delta - 1$, d'où, inversement, $\delta = z + 1$. C'est ce décalage z qui est employé dans la calculatrice de Ned Wright.

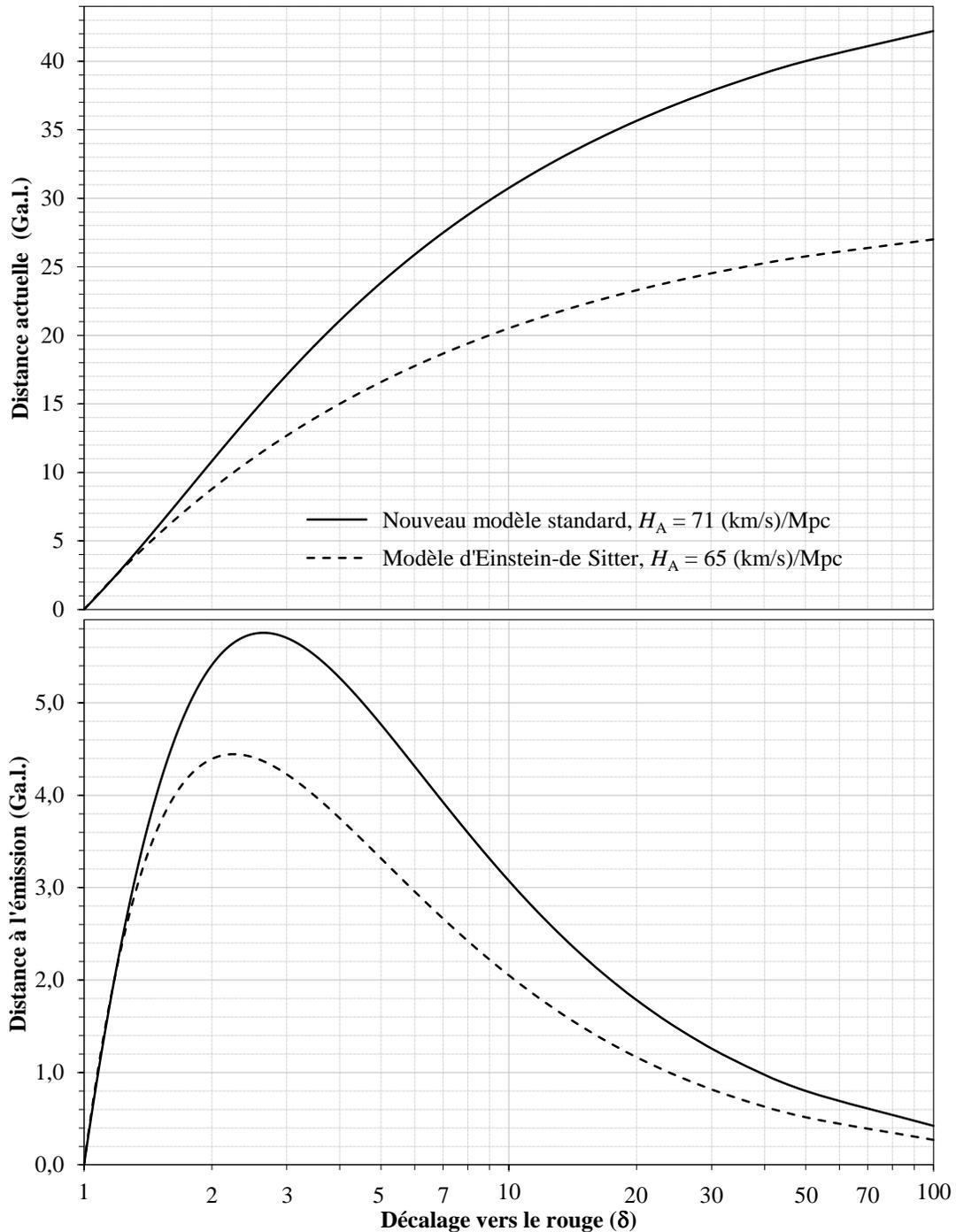


FIGURE G-4.10

Comparaison des distances actuelles et à l'émission pour le modèle d'Einstein-de Sitter, avec $H_A = 65$ (km/s)/Mpc et le nouveau modèle standard avec $H_A = 71$ (km/s)/Mpc, $\Omega_M = 0,27$ et $\Omega_V = 0,73$.

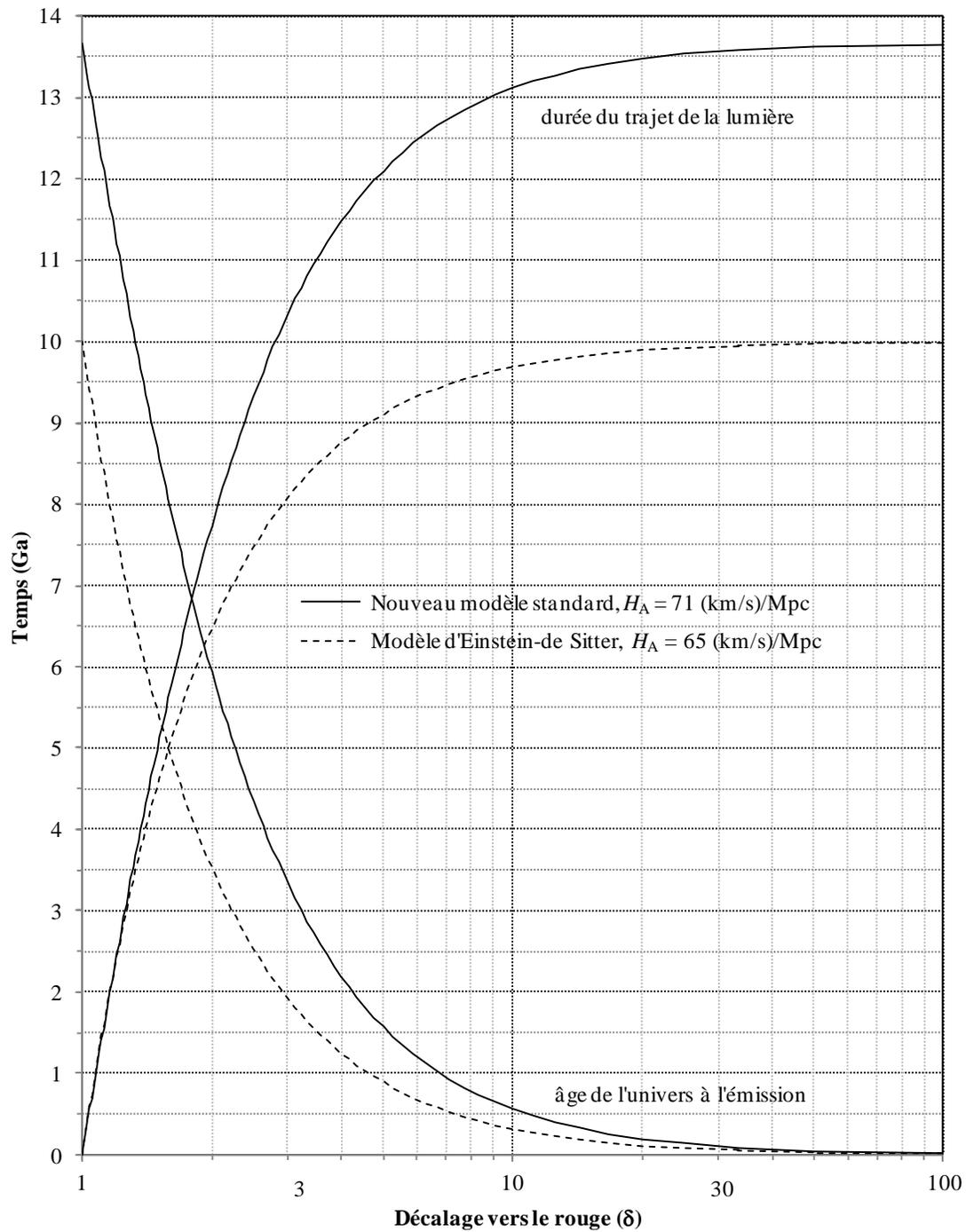


FIGURE G-4.11

Âge de l'univers à l'émission et durée du trajet pour le modèle d'Einstein-de Sitter, avec $H_A = 65$ (km/s)/Mpc et le nouveau modèle standard avec $H_A = 71$ (km/s)/Mpc, $\Omega_M = 0,27$ et $\Omega_V = 0,73$.

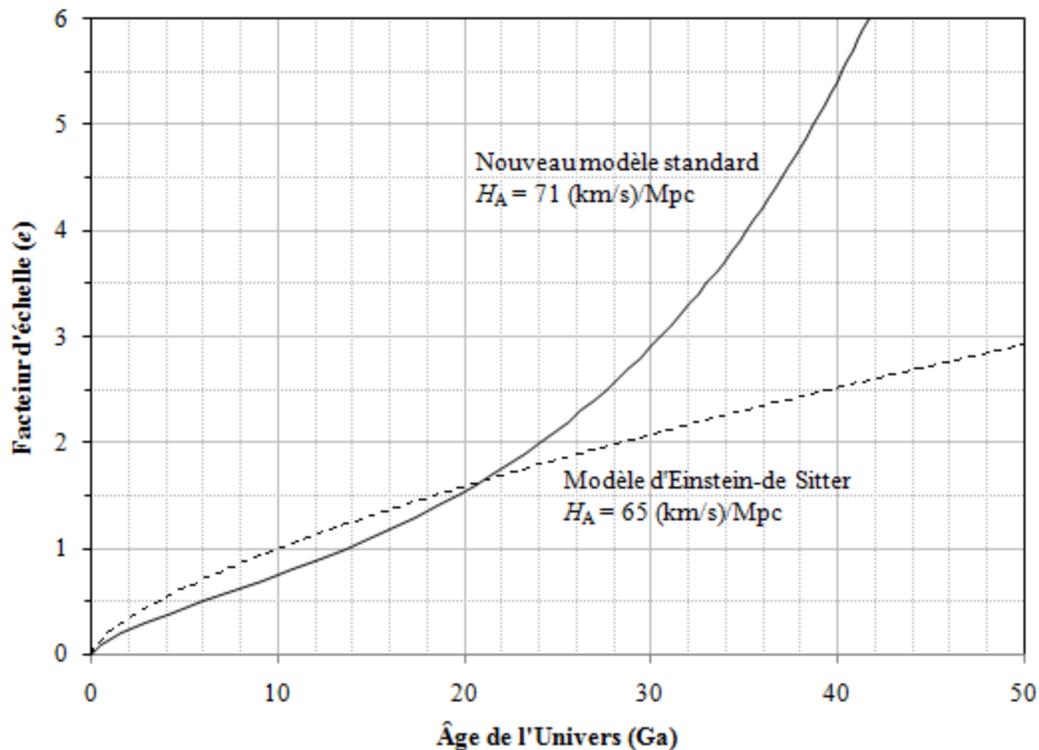


FIGURE G-4.12

Évolution du facteur d'échelle dans le modèle d'Einstein-de Sitter, avec $H_A = 65$ (km/s)/Mpc, et dans le nouveau modèle standard, avec $H_A = 71$ (km/s) / Mpc, $\Omega_M = 0,27$ et $\Omega_V = 0,73$.

RÉFÉRENCES ET TEXTES SUGGÉRÉS

- CARIGNAN, C. (1996). « Lumière sur la matière sombre de l'univers », *Interface*, vol. 17, n° 6, novembre-décembre, p. 28-38.
- CASOLI, F. et M. GERIN (1993). « La Voie Lactée, cette inconnue », *La Recherche*, n° 260, décembre, p. 1363.
- CONSELICE, C. (2007). « La main invisible de l'Univers », *Pour la Science*, n° 353, mars.
- HARRISON, E. R. (1986). « Newton and the infinite universe », *Physics Today*, vol. 39, n° 2, février, p. 24-30.
- LACHIÈZE-REY, M. (1988). « Comment dater l'Univers », *La Recherche*, n° 195, janvier, p. 100-101.
- LACHIÈZE-REY, M. et J.-P. LUMINET (1996). « La topologie de l'Univers », *Pour la Science*, décembre.

PETER, P. (2007). « Le nouvel élan de la cosmologie », *Pour la Science*, novembre.

WATSON, D. (2013). « The Hubble-constant wars, 2013 », site du cours Astronomy 142, Université de Rochester. Consulté le 21 avril 2015 : http://www.pas.rochester.edu/~dmw/ast142/Lectures/Journal_club_04-11-2013_dmw.pdf

WRIGHT, E. L. (mise à jour novembre 2014). « Cosmology calculator », site de l'auteur. Consulté le 21 avril 2015 : <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>. À noter que Wright emploie H_0 plutôt que H_A , pour désigner la valeur actuelle du paramètre de Hubble; c'est d'ailleurs la convention la plus répandue en cosmologie.

WRIGHT, E. L. (mise à jour mars 2015). « Cosmology tutorial », site de l'auteur. Consulté le 21 avril 2015 : <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>. Des versions plus anciennes de certains textes de ce site sont disponibles en français sous le titre *La cosmologie par Ned Wright* (J. Fric., trad.), site de la Commission de cosmologie de la Société astronomique de France. Consulté le 20 avril 2015 : <http://www-cosmosaf.iap.fr/Wright.htm>

MODULE 4

RÉSUMÉ ET NOTIONS IMPORTANTES

La cosmologie est l'étude des modèles d'univers et de leur lien avec l'Univers des observations. Bien qu'elle partage son objet d'étude avec des domaines relevant d'autres activités humaines, comme la philosophie ou la religion, la cosmologie est bel et bien une science.

Depuis la révolution copernicienne, qui a détrôné la Terre du centre de l'Univers, l'évolution de la cosmologie s'est traduite par la disparition graduelle de la croyance en l'existence d'une position privilégiée dans l'Univers et l'extension jusqu'à l'infini de sa dimension. C'est la découverte du fait que l'Univers est isotrope, en particulier si l'on considère le rayonnement de fond cosmologique, combinée au principe cosmologique, qui a amené à supposer l'Univers homogène à grande échelle.

L'univers contient tout ce qui existe, incluant l'espace et le temps. C'est la notion d'espace courbe, empruntée à la Relativité générale, qui constitue le cadre théorique privilégié grâce auquel on étudie et interprète les différents modèles d'univers. La principale conséquence de ce nouveau point de vue est qu'un univers peut être homogène, sans centre et sans limites, tout en étant de dimension finie.

La découverte de l'expansion de l'Univers constitue un autre fait saillant de l'évolution de la cosmologie. Cette expansion est décrite mathématiquement à l'aide du facteur d'échelle (e), dont la variation dans le temps indique comment sont modifiées les distances d'ordre cosmologique ou, de façon équivalente, l'espace même entre les galaxies.

La loi de Hubble ($v_{\text{réc}} = HD$) représente le lien observé expérimentalement entre la distance aux galaxies (D) et leur vitesse de récession ($v_{\text{réc}}$). La valeur actuelle du paramètre de Hubble (H_A), évaluée à 71 (km/s) / Mpc, est reliée au taux actuel de variation du facteur d'échelle, donc au taux actuel d'expansion de l'Univers.

La principale manifestation de l'expansion de l'Univers est l'existence de décalages vers le rouge dus à l'expansion qu'a subie l'espace pendant que la lumière provenant des galaxies lointaines faisait route vers nous. Il faut distinguer ce décalage de ceux qui sont causés par les mouvements propres des galaxies, du Soleil et de la Terre (effet Doppler) ou par la masse de l'objet émetteur (décalage gravitationnel). Une autre conséquence de l'expansion est que l'Univers, même s'il est infini, possède une limite au-delà de laquelle il nous est impossible d'observer quoi que ce soit.

Il est impossible de répondre à des questions sur l'origine ou l'avenir de l'Univers si l'on n'a pas d'abord choisi un modèle d'univers. Celui-ci permet d'identifier les quantités qu'il faudra mesurer et la façon dont on pourra en tirer des réponses.

L'existence du rayonnement de fond cosmologique (RFC) constitue un très fort argument en faveur des univers commençant par un Big-Bang. Ce rayonnement, dont le spectre est celui d'un corps noir à 3 K, serait ce qui reste de la radiation qui s'est mise à parcourir l'Univers au moment où celui-ci est devenu transparent. Sa découverte a donné le coup de grâce aux univers stationnaires, qui n'arrivaient pas à en rendre compte de façon satisfaisante.

Il existe un consensus actuellement au sujet d'un modèle d'univers où le vide est doté d'une masse volumique, ce qui a pour conséquence un âge de l'Univers plus élevé, pour une valeur donnée de la constante de Hubble, que celui que fournit le modèle d'Einstein-de Sitter qui prévalait jusque-là. Ce nouveau modèle prévoit également que le taux d'expansion, proportionnel au paramètre de Hubble, tend à long terme vers une limite non nulle, ce qui résulte en une courbe $e(t)$ dont la croissance devient exponentielle.

MODULE 4**ACTIVITÉS**

QUESTIONS DE RÉVISION

Chapitre 8 : 28, 29, 30.

Chapitre 9 : 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 22, 23, 33, 34, 35, 36, 37, 38.

Chapitre 10 : 9, 13, 14, 15, 17.

PROBLÈMES DU MANUEL

Chapitre 8 : P2, P3, P4.

Chapitre 9 : P5.

Chapitre 10 : P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7.

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

G4.1 Pour chacune des expressions suivantes, montrez comment l'emploi de la majuscule ou de la minuscule, dans le mot « univers », peut être accordé avec la distinction établie dans ce module.

- a) L'univers est infini.
- b) Les étoiles ne forment que 10 % de la masse totale de l'Univers.
- c) L'expansion de l'Univers...
- d) L'expansion de l'univers...
- e) Un modèle de l'Univers...
- f) Un modèle d'univers...
- g). L'univers est homogène.
- h) L'Univers est isotrope.
- i) L'univers d'Einstein-de Sitter...

G4.2 Complétez les phrases qui suivent.

- a) Étudier ou imaginer les limites, les dimensions, la forme, le centre, l'âge, la structure de l'Univers, c'est faire de la _____.
- b) S'interroger sur la façon dont l'Univers a débuté, c'est faire de la _____.
- c) Se demander comment se sont mis en place les divers éléments qui ont donné naissance au système solaire, aux galaxies, c'est faire de la _____.
- G4.3 Présentez, puis réfutez deux des réponses apportées au cours de l'histoire à la question de Lucrèce au sujet du sort ultime d'un javelot se déplaçant dans l'Univers. Ensuite, donnez le point de vue contemporain sur la même question.
- G4.4 Comment Aristote expliquait-il que la Lune et les planètes, qui selon lui tournaient toutes autour de la Terre, ne tombaient pas sur celle-ci?
- G4.5 On affirme, dans ce module, que c'est un souci de simplicité qui a amené Copernic à proposer son système héliocentrique. Mais en réalité, le principe de simplicité permettait-il de trancher clairement en faveur de ce nouveau modèle? Si la réponse est non, à partir de quelle époque a-t-il été possible de trancher définitivement?
- G4.6** Parmi les valeurs suivantes :
- 3 cm, 10 cm, 30 cm, 1 m, 3 m, 10 m, 30 m, 100 m, 300 m, 1 km, 3 km, 10 km, 30 km, 100 km, 300 km, 1 000 km,
- laquelle correspond le mieux à l'échelle minimale où chacune des distributions qui suivent peut être considérée comme homogène (ignorez la question des frontières)?
- a) Les arbres dans une forêt.
- b) Les personnes assistant à un spectacle en plein air.
- c) Les maisons dans une petite ville ou une banlieue.
- d) Les villes et villages situés au sud du Saint-Laurent, entre Montréal et Québec (consultez une carte).
- G4.7 a) Les affirmations « l'Univers est isotrope » et « l'univers est homogène » signifient-elles la même chose? Expliquez.

- b) Rigoureusement parlant, ces affirmations sont incomplètes. Que faut-il leur ajouter pour qu'elles aient véritablement un sens, tout en étant conformes aux observations?

G4.8 Qu'est-ce que nous suggère le principe cosmologique comme réponses aux questions suivantes.

- a) Y a-t-il d'autres systèmes solaires que le nôtre dans l'Univers?
- b) L'Univers a-t-il un centre?
- c) Sommes-nous les seuls êtres dans l'Univers à nous poser de telles questions?

G4.9 a) Énoncez la loi de Hubble.

- b) Qu'est-ce que le paramètre de Hubble?

G4.10 En dépit de la loi de Hubble, on observe dans certains cas des décalages vers le bleu. Sachant que ces décalages vers le bleu sont beaucoup plus faibles que les plus grands décalages vers le rouge connus, que peut-on supposer quant à leur origine? De telles observations remettent-elles en question l'hypothèse de l'expansion de l'Univers?

G4.11 Parmi les quantités suivantes, lesquelles sont touchées par l'expansion de l'Univers :

- a) la distance Terre-Soleil;
- b) la distance entre la Voie lactée et une lointaine galaxie;
- c) la dimension des atomes;
- d) la longueur d'onde maximale à laquelle est émise la radiation isotrope dans laquelle baigne l'Univers;
- e) la longueur d'onde de la raie $H\alpha$ de Balmer.

G4.12 a) Qu'est-ce que la période de Hubble? Quel est son lien avec l'âge de l'Univers?

- b) Qu'est-ce que la sphère de Hubble? Comment varie sa taille dans un univers d'Einstein-de Sitter?
- G4.13 Un quasar présente un décalage vers le rouge (δ) égal à 5,4.
- a) Combien de fois ce quasar est-il plus éloigné de nous que lorsqu'il a émis la lumière que nous observons aujourd'hui?
- b) Combien de fois le volume d'une galaxie située dans la même région que le quasar est-il plus grand que ce qu'il était à la même époque?
- G4.14 On observe une raie d'émission à 700 nm dans le spectre d'une lointaine galaxie, alors que la longueur d'onde de cette raie, en laboratoire, est normalement de 200 nm.
- a) Quelle est la valeur du décalage vers le rouge (δ) d'origine cosmique correspondant?
- b) En supposant que les décalages gravitationnel et Doppler sont négligeables, à quelle distance se trouve actuellement cette galaxie? À quelle distance se trouvait-elle lorsque la lumière que nous observons d'elle a été émise? Comparez les réponses que vous obtenez en utilisant les graphiques des figures G-4.6 et G-4.7 avec celles que vous trouvez à l'aide des équations 10.8 et 10.9.
- c) Combien de temps (en années) a mis la lumière pour nous parvenir?
- d) Répondez aux mêmes questions, mais cette fois à l'aide des graphiques fondés sur le nouveau modèle standard et la valeur actualisée de la constante de Hubble (figures G-4.10 et G-4.11).
- G4.15 Combien de temps a mis pour nous parvenir la lumière émise par une étoile lorsque celle-ci était à 3,5 Ga.l. de la Terre? À quelle distance se trouve-t-elle actuellement? Quel est le décalage vers le rouge de cette lumière?
- G4.16 a) Quelle est la vitesse de récession (en km/s) d'une galaxie située actuellement à 20 Ga.l. de nous? Compte tenu que la vitesse de la lumière est de $3,0 \times 10^5$ km/s, la réponse que vous avez obtenue est-elle possible?
- b) Dans combien de temps la lumière émise actuellement par cette galaxie nous parviendra-t-elle?
- c) Quel sera alors le décalage vers le rouge de cette lumière?

Appendices

Appendice G-1 *Notation scientifique et opérations algébriques*

Appendice G-2 *Changements d'unités et rudiments d'algèbre*

Appendice G-3 *Les graphiques*

Appendice G-4 *Symboles mathématiques*

APPENDICE G-1

NOTATION SCIENTIFIQUE ET OPÉRATIONS ALGÈBRIQUES

Les exposants obéissent à des règles algébriques qui rendent l'usage de la notation scientifique encore plus agréable. Sans plus attendre :

Règle 1 : $10^m \times 10^n = 10^{m+n}$ *exemple :* $10^2 \times 10^5 = 10^{2+5} = 10^7$

Règle 2 : $10^m / 10^n = 10^{m-n}$ *exemples :* $10^8 / 10^5 = 10^{8-5} = 10^3$
 $10^5 / 10^8 = 10^{5-8} = 10^{-3}$

Règle 3 : $(10^m)^n = 10^{m \times n}$ *exemple :* $(10^4)^2 = 10^{4 \times 2} = 10^8$

Note.— Ces règles peuvent être utilisées avec nos nombres « mixtes »; un peu de travail supplémentaire est nécessaire à l'occasion.

Exemples :

$$(2,34 \times 10^2) \times (3,81 \times 10^5) = (2,34 \times 3,81) \times (10^2 \times 10^5) = 8,92 \times 10^7$$

$$(3,17 \times 10^4) \times (1,84 \times 10^{-6}) = (3,17 \times 1,84) \times (10^4 \times 10^{-6}) = 5,83 \times 10^{-2}$$

$$(3,17 \times 10^4) / (1,84 \times 10^{-6}) = (3,17 / 1,84) \times (10^4 / 10^{-6}) = 1,72 \times 10^{10}$$

[car $4 - (-6) = 4 + 6 = 10$]

Pour les prochains cas, il faut vous exercer un peu. En notation scientifique, on peut écrire la même quantité de plusieurs façons, en déplaçant la virgule décimale et en modifiant en même temps l'exposant.

Examinez bien ces exemples de transformations :

$$\begin{array}{l} 345,7 \times 10^6 = 34,57 \times 10^7 = 3,457 \times 10^8 \\ 2\,405 \times 10^{-6} = 240,5 \times 10^{-5} = 24,05 \times 10^{-4} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{virgule vers la gauche,} \\ \text{l'exposant augmente;} \end{array}$$

et, inversement :

$$\begin{array}{l} 0,0423 \times 10^6 = 0,423 \times 10^5 = 4,23 \times 10^4 \\ 0,0065 \times 10^{-6} = 0,065 \times 10^{-7} = 0,65 \times 10^{-8} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{virgule vers la droite,} \\ \text{l'exposant diminue.} \end{array}$$

Ce procédé doit être utilisé lorsque vous présentez une réponse, pour ramener le premier chiffre entre 1,0 et 9,99999...

Exemples :

$$8,34 \times 10^2 \times 5,81 \times 10^5 = 48,5 \times 10^7 = 4,85 \times 10^8$$

$$5,34 \times 10^2 / 8,81 \times 10^5 = 0,606 \times 10^{-3} = 6,06 \times 10^{-4}$$

$$(4,71 \times 10^3)^3 = 4,71^3 \times 10^{3 \times 3} = 104,5 \times 10^9 = 1,045 \times 10^{11}$$

EXERCICES

Note : Le corrigé se trouve à la suite de celui des exercices des modules, à la fin du guide.

A1.1 Exprimez les nombres suivants en notation scientifique.

- a) 32 876,3 b) 0,0076 c) 220 000 000 d) 0,0000321

A1.2 Transformez les nombres suivants de façon à ce que le premier chiffre soit compris entre 1,0 et 9,9999...

- a) 231×10^5 b) $0,000643 \times 10^8$
c) 459×10^{-7} d) $0,047 \times 10^{-6}$
e) $29\,450 \times 10^{-2}$ f) $0,0619 \times 10^2$
g) $3\,614 \times 10^{-2}$

A1.3 Effectuez les opérations suivantes et exprimez la réponse de la même façon qu'en A1.2.

- a) $8,64 \times 10^{-2} \times 5,8 \times 10^5$ b) $2,81 \times 10^4 \times 6,7 \times 10^{-7}$
c) $3,22 \times 10^6 / 8,123 \times 10^{-9}$ d) $1,7 \times 10^{-2} / 2,32 \times 10^{-1}$
e) $2,39 \times 10^{-5} / 3,25 \times 10^2$ f) $(8,42 \times 10^3)^3$
g) $(5,73 \times 10^{-2})^2$

APPENDICE G-2

CHANGEMENTS D'UNITÉS ET RUDIMENTS D'ALGÈBRE

Étant donné l'absence de préalable mathématique de ce cours, le recours à l'algèbre a été réduit au strict minimum. On n'a conservé que trois exigences qui relèvent autant de l'algèbre proprement dite que de son utilisation en physique.

Pour faire certains exercices du cours, voici donc quelques types précis d'opérations que vous devez être capable d'effectuer.

PREMIER TYPE D'OPÉRATION

Rendre cohérentes les unités des données d'un problème de façon à pouvoir obtenir une réponse dont on connaît a priori les unités.

La question des unités est d'une importance primordiale en astronomie, comme dans tous les domaines de la science. Si l'on vous dit que la température à la surface d'une planète est de 300, croirez-vous que la vie y est possible?

Il existe plusieurs façons d'éviter les difficultés reliées aux unités; dans la plupart des cas, la meilleure consiste à *utiliser uniquement les unités de base du système SI* (système international d'unités, dont la liste est présentée à l'annexe II du manuel). Ainsi, vos réponses seront automatiquement exprimées dans les unités de base de ce même système. Il vous sera toujours possible d'exprimer par la suite votre réponse dans une autre unité de votre choix.

Pour ce faire, vous devrez d'abord transformer les unités de certaines données. La technique la plus simple est de multiplier la quantité par un ou plusieurs rapports d'unités valant *un* et contenant à la fois les unités de la donnée et celles que vous désirez obtenir. Vous n'avez alors qu'à simplifier les unités et à effectuer les produits et quotients indiqués.

Exemples :

- Pour exprimer 5 minutes en secondes :

$$5 \text{ min} = 5 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 5 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 300 \text{ s}$$

Remarquez que le quotient $\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$ est égal à l'unité.

- Pour exprimer 90 km/h en m/s :

$$90 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{90 \text{ km}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \frac{90\,000 \text{ m}}{3\,600 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

Si une unité est élevée à une puissance, le quotient égal à un doit être élevé à la même puissance.

- Pour exprimer 2 g/cm² en kg/m² :

$$\begin{aligned} 2 \text{ g/cm}^2 &= \frac{2 \text{ g}}{\text{cm}^2} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2 \\ &= \frac{2 \text{ g}}{\text{cm}^2} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2 = \frac{20\,000 \text{ kg}}{1000 \text{ m}^2} = \frac{20 \text{ kg}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Il y a une exception à cette règle. Par commodité, certaines formules employées fréquemment ont été « arrangées » pour que les réponses qu'elles fournissent soient dans des unités particulières. Ces formules comprennent généralement, en plus des symboles, un chiffre seul et indiquent quelles sont les unités requises pour les données et celles dans lesquelles la réponse est exprimée.

Exemple :

- L'énergie E d'un photon, en électronvolt (eV), est reliée à sa longueur d'onde λ (en nm) de la façon suivante :

$$E \text{ (eV)} = \frac{1240}{\lambda \text{ (nm)}}$$

Note : eV et nm ne sont pas des unités de base du système SI.

Les auteurs du manuel utilisent presque exclusivement le système d'unités SI. Si vous êtes déjà familier avec certaines de ces unités, comme « km » pour kilomètre ou « h » pour heure, d'autres vous sont probablement inconnues ou peuvent être une source de confusion. Rappelons que vous trouverez à l'annexe II du manuel les principales quantités et unités (SI de base et autres) utilisées dans le cours.

Toujours en ce qui concerne les unités, trois avertissements s'imposent.

- Le symbole « m » signifie *mètre*; attention de ne pas le confondre avec minute (« min ») ou mille qui ne fait pas partie du système SI.
- Le symbole « d » utilisé dans certains ouvrages et dans le guide signifie *jour*, dans le sens d'*exactement 24 h*. Cette distinction est essentielle, car la longueur du jour est souvent ambiguë en astronomie. Il y a bien sûr les notions, pour la Terre, de jour sidéral et de jour solaire, décrites au module 0; on peut aussi songer au « jour » sur Mars ou sur Vénus, qui n'a pas la même durée que sur Terre. L'utilisation du symbole « d » permet d'éviter toute ambiguïté.
- À l'annexe II du manuel, l'unité d'angle proposée, soit le degré, n'est pas l'unité de base du système international. L'unité de base SI est le **radian** (rad), défini de telle sorte que la circonférence d'un cercle de rayon 1 est égale à 2π rad; un angle de 1 rad vaut donc $360^\circ / 2\pi$, ou $180^\circ / \pi$, soit environ $57,3^\circ$.

Dans les formules mathématiques utilisées en physique, les valeurs des angles sont en radians à moins d'avis contraire. Un tel avis apparaît normalement dans le texte ou est signifié par l'ajout d'une unité différente du radian, entre parenthèses, après le symbole représentant l'angle. Ainsi, la relation du triangle étroit s'écrit normalement :

$$\frac{D}{d} = \frac{1}{\theta} \quad (\text{A.1})$$

ou encore :

$$d = D\theta \quad (\text{A.2})$$

où l'angle θ est exprimé en radians.

DEUXIÈME TYPE D'OPÉRATION

Transformer une expression constituée uniquement de produits ou quotients de façon à pouvoir exprimer n'importe quel facteur de l'expression en termes de ses autres facteurs. On appelle souvent cette opération « isoler un facteur ».

Par exemple, vous devez pouvoir transformer une expression comme $d = vt$, où d est exprimé en termes de v et t , de façon à exprimer soit v en termes de d et t , soit encore t en termes de v et d .

Ainsi, $d = vt$ peut s'écrire $v = \frac{d}{t}$, ou encore $t = \frac{d}{v}$.

La règle générale est la suivante : lorsqu'une expression n'est composée que de produits ou quotients, on peut déplacer un facteur d'un côté à l'autre du signe d'égalité (=) en inversant son rôle. Ainsi, un facteur qui multiplie va diviser de l'autre côté, et vice versa.

Exemple : $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ devient $\frac{a \cdot d}{b} = c$, d'où $c = \frac{ad}{b}$.

ou encore $\frac{a}{d} = \frac{b \cdot c}{d}$, d'où $a = \frac{bc}{d}$.

TROISIÈME TYPE D'OPÉRATION

Isoler, dans une expression algébrique représentant une loi physique, la variable dont vous recherchez la valeur et calculer cette valeur en substituant les valeurs numériques correspondant aux données qui vous sont fournies.

Les deux types d'opérations décrits plus haut devraient vous permettre de résoudre des problèmes comme celui qui suit. Par exemple, si l'on considère l'expression $d = vt$, où d est la distance parcourue, v la vitesse moyenne et t le temps, vous devez être capable de répondre à une question du genre : quel est le temps que mettra une balle de baseball pour franchir 30 cm si sa vitesse est 150 km/h?

Il s'agira tout d'abord d'isoler t dans l'expression $d = vt$, puis d'exprimer les données en unités de base SI (distance en m et vitesse en m/s). La substitution de ces valeurs dans l'expression donnera automatiquement le temps en unités de base SI, soit ici en secondes.

EXERCICES

A2.1 Exprimez les quantités suivantes à l'aide d'unités de base SI. Au besoin, utilisez la notation scientifique.

- a) 30 km/h c) 0,135 MW/cm²
b) 980 cm/s² d) 2 400 kW•h

A2.2 Dans les expressions suivantes, exprimez t en termes des autres facteurs.

- a) $v = at$ b) $T = c/t$
c) $c = \frac{at}{2b}$ d) $\frac{vt}{2} = ac$
e) $\frac{d}{t} = \frac{a}{3T}$

A2.3 Essayez de répondre à la question concernant la balle de baseball, qui se trouve dans la section « Troisième type d'opération ».

A2.4 Supposons que dans les expressions de l'exercice A2.2, t représente le temps. En utilisant les données suivantes :

$$\begin{aligned} a &= 20 \text{ cm/s}^2 & d &= 622 \text{ km/h}^2 \\ b &= 0,25 \text{ mm/min}^3 & v &= 10 \text{ km/h} \\ c &= 2,2 \text{ h}^2 & T &= 1 \text{ min } 30 \text{ s} \end{aligned}$$

calculez la valeur de t dans chacune des expressions (a à e de l'exercice A2.2). Indiquez les unités de la réponse.

A2.5 Quel est le temps mis par la lumière pour parcourir 150 millions de kilomètres, soit la distance Terre-Soleil?

APPENDICE G-3**LES GRAPHIQUES**

Vous avez sûrement déjà examiné des graphiques. Les journaux s'en servent couramment pour illustrer l'évolution de données économiques comme l'inflation ou le

taux de chômage; les revues de vulgarisation, tout comme celles qui s'adressent à un public spécialisé, en font aussi un usage intensif.

En astronomie, comme dans toutes les sciences, les graphiques jouent un rôle capital. Dans le cadre d'un cours d'introduction, ils revêtent une importance encore plus grande, car ils permettent de représenter certains phénomènes sans avoir à recourir au langage mathématique, qui demande un long apprentissage. Mais, pour les utiliser d'une façon efficace, il faut bien connaître leurs possibilités... et leurs limites.

Les graphiques remplissent deux fonctions principales. Premièrement, ils fournissent rapidement à la personne qui les examine des informations provenant d'un grand nombre d'observations ou de résultats. D'un seul coup d'œil, on peut se faire une idée de l'ensemble des valeurs représentées : les plus grandes ou les plus petites, le domaine qui contient la majeure partie des éléments représentés, etc. Des pages et des pages de valeurs numériques peuvent ainsi être évaluées d'un seul regard. En second lieu, et c'est là leur rôle le plus important, les graphiques constituent de formidables outils d'analyse. Ils permettent de mettre en évidence des relations entre les quantités qu'ils présentent. Ces relations apparaissent comme des droites, des courbes ou des régions délimitées. Il est même possible de faire apparaître l'histoire de ces quantités, c'est-à-dire la succession des valeurs qu'elles ont revêtues dans le temps.

Le désavantage des graphiques? Leur précision limitée, de sorte que pour certaines applications, les longues listes ont toujours leur intérêt, d'autant plus que de nouveaux outils informatiques, telles les bases de données, peuvent en faciliter considérablement l'utilisation.

Nous allons maintenant voir deux types de graphiques qui ressemblent à ceux que vous aurez à utiliser dans le cours. Prenez le temps de bien les examiner.

COURBES EMPIRIQUES ET COURBES THÉORIQUES

Supposons que vous êtes assis sur le siège arrière d'une voiture qui roule sur une autoroute. Pour passer le temps (!), vous décidez de noter la vitesse indiquée par l'odomètre à toutes les cinq secondes. Le tableau G-A.1 contient les valeurs que vous avez lues; le temps $t = 0$ correspond à la première lecture que vous avez faite.

Ces valeurs ont été reportées sur le graphique de la figure G-A.1. Chaque lecture est représentée par un point; on a relié ces points représentant les résultats expérimentaux obtenus par une courbe continue. Une telle courbe, que l'on qualifie d'**expérimentale** ou d'**empirique**, représente ce que l'on s'attendrait à obtenir si l'on avait mesuré la vitesse plusieurs fois par seconde, de sorte que les points successifs se toucheraient les uns les autres. Cette courbe est **régulière**, c'est-à-dire qu'elle ne montre pas de changements brusques de direction, ce qui serait le cas si l'on traçait des droites reliant les points successifs, car on a estimé que la vitesse avait dû varier de façon régulière entre les mesures.

TABLEAU G-A.1
Vitesse d'une voiture en fonction du temps

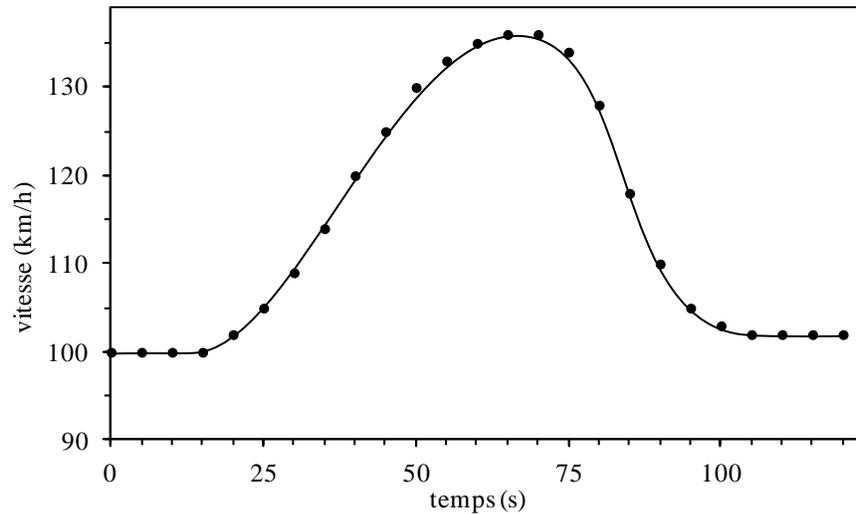
temps (s)	vitesse (km/h)	temps (s)	vitesse (km/h)
0	100	65	136
5	100	70	136
10	100	75	134
15	100	80	128
20	102	85	118
25	105	90	110
30	109	95	105
35	114	100	103
40	120	105	102
45	125	110	102
50	130	115	102
55	133	120	102
60	135		

Bien sûr, il ne s'agit ici que d'une interpolation : nous ne connaissons pas réellement la vitesse à $t = 108$ s, par exemple. Dans l'intervalle entre 105 s et 110 s, la voiture a peut-être augmenté sa vitesse jusqu'à 110 km/h pour redescendre à 102 km/h à la fin de l'intervalle. C'est notre jugement qui nous guide dans ces situations : c'est lui qui nous porte à croire que, ici, d'après l'allure générale de la distribution des points, un tel changement de vitesse n'a sans doute pas eu lieu.

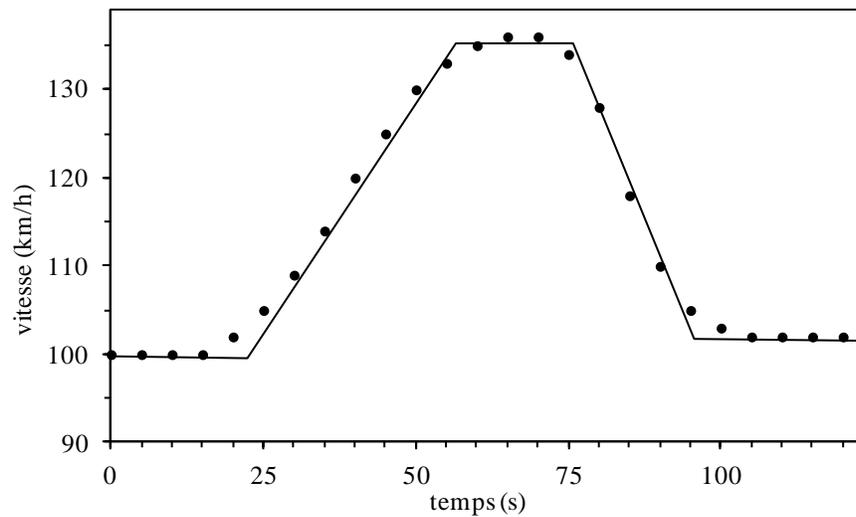
Sur le graphique de la figure G-A.2, qui affiche les mêmes points expérimentaux, on a tracé une seconde « courbe ». Cette fois, la courbe ne passe pas par tous les points expérimentaux : c'est une courbe **théorique**, qui représente la vitesse en fonction du temps, calculée à l'aide des lois mathématiques de la cinématique, pour une voiture dont on connaîtrait la vitesse à $t = 0$ et l'accélération durant tout l'intervalle allant de $t = 0$ à $t = 120$ s. On a tenté ici de déterminer les valeurs à placer dans les équations pour que la vitesse obtenue ressemble à ce que l'on a mesuré expérimentalement.

Clairement, l'accord n'est pas parfait. Une théorie, plus précisément un modèle dans ce cas, n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité – des accélérations constantes dans ce cas-ci – qui ne tient pas compte de tous les facteurs qui peuvent jouer un rôle dans le phénomène. Dans cet exemple, entre autres, on ne reproduit pas en détail la façon dont la personne conduisant la voiture a pu actionner les freins ou l'accélérateur. Malgré tout, cette courbe théorique nous fournit une image assez satisfaisante de la réalité.

Les graphiques des figures G-A.1 et G-A.2 constituent un exemple de situation où il existe une relation simple entre les deux variables représentées. Pour chaque valeur de la variable (t), c'est-à-dire à chaque instant, la voiture possédait une vitesse déterminée avec une bonne précision, de sorte que la position de chaque point est bien définie sur le graphique.

**FIGURE G-A.1**

Vitesse d'une voiture en fonction du temps : points expérimentaux et courbe empirique.

**FIGURE G-A.2**

Vitesse d'une voiture en fonction du temps : points expérimentaux et courbe théorique.

Dans un tel cas, un seul phénomène est susceptible de brouiller la relation que l'on désire illustrer. Il s'agit de l'imprécision de l'appareil de mesure, comme un odomètre dont l'aiguille oscillerait par exemple, qui pourrait avoir pour effet de rendre la position de chaque point beaucoup plus aléatoire. Dans de telles conditions, illustrées à la figure G-A.3, la distribution des points est plus irrégulière, de sorte que même la courbe empirique, que l'on a voulue aussi régulière que la précédente, ne passe pas par tous les points. Ici, le tracé d'une courbe, qu'elle soit empirique ou théorique, exige une bonne connaissance de la situation, afin de distinguer les fluctuations dues à l'imprécision de l'appareil des véritables variations de vitesse.

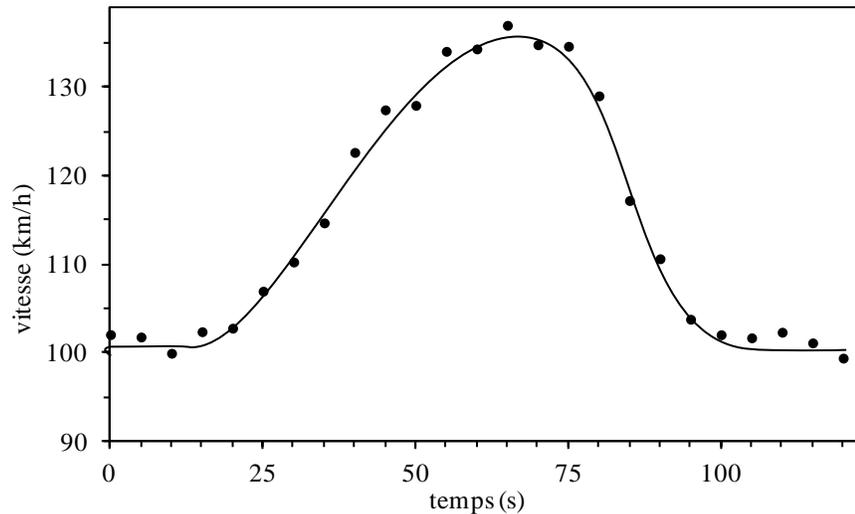


FIGURE G-A.3

Vitesse d'une voiture en fonction du temps : mesures effectuées avec un odomètre de faible précision.

Il existe d'autres situations où une telle dispersion n'est pas reliée à la précision des mesures, mais fait partie intégrante du phénomène que le graphique représente. Dans ces cas, la relation entre les variables possède un sens beaucoup moins strict. C'est ce que tente d'illustrer la prochaine section.

GRAPHIQUES ET VISUALISATION DE RELATIONS ENTRE VARIABLES

Le graphique de la figure G-A.4 présente un échantillon des mesures de consommation d'essence de voitures neuves, tirées du site l'Office de l'efficacité énergétique (Ressources naturelles Canada). On y illustre la consommation en fonction de la cylindrée du moteur, pour les modèles équipés d'un moteur standard, pour les deux principales catégories de transmissions, ainsi que pour les modèles équipés d'un moteur hybride ou diesel. Les droites apparaissant sur le graphique sont des courbes de tendance linéaires, c'est-à-dire les droites qui passent le plus près des points en moyenne, tel que déterminé par une méthode statistique dite des moindres carrés.

Remarquez ici que, pour une même valeur de la quantité sur l'axe horizontal (la cylindrée), plusieurs valeurs de consommation sont possibles, même si l'on s'en tient à un seul type de transmission. Rien de plus normal : de nombreux facteurs autres que la cylindrée ou le type de transmission influencent la consommation d'essence. La masse de la voiture, les caractéristiques du moteur (nombre de cylindres, dispositifs turbo, etc.), le nombre de vitesses, l'aérodynamique en sont autant d'exemples.

Malgré tout, le graphique permet tirer certaines conclusions :

- plus la cylindrée augmente, plus la consommation tend à s'accroître (d'environ 1 L/100 km pour chaque litre de cylindrée);

- les voitures hybrides (surtout) et à moteur diesel se distinguent nettement par leur faible consommation;
- la consommation des voitures munies de transmissions manuelles et automatiques est assez semblable; tout au plus observe-t-on pour les premières un léger avantage (à peine 3-4 %) aux faibles cylindrées, qui disparaît autour de 4 litres.

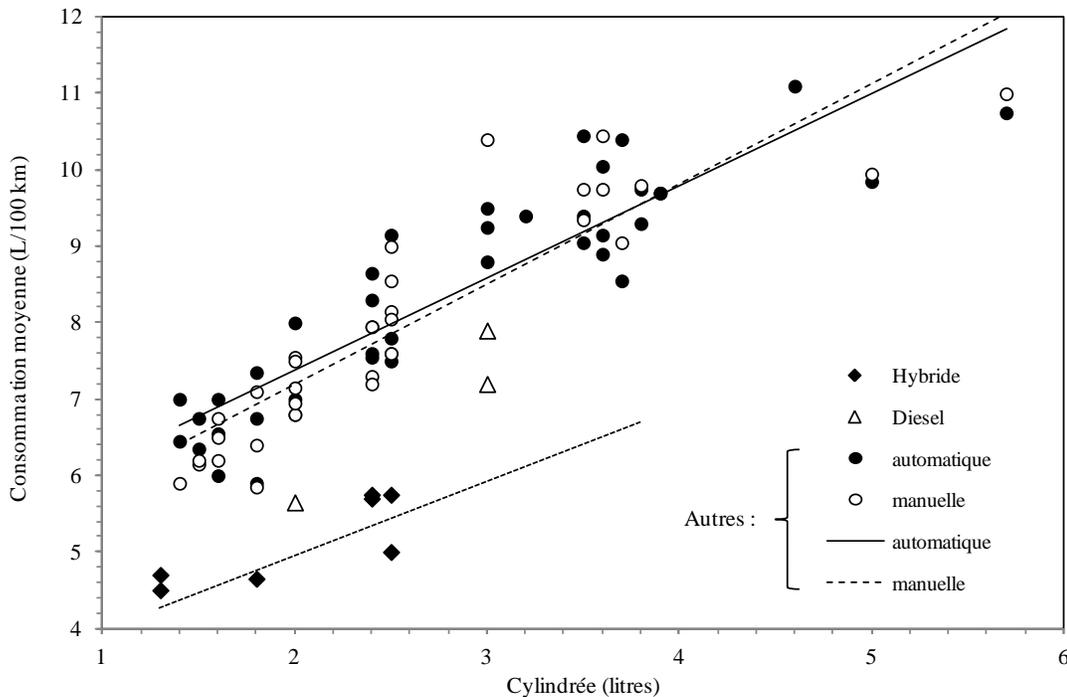


FIGURE G-A.4

Consommation d'essence, en fonction de la cylindrée, de voitures munies de divers types de moteur et de transmission (année 2010). Source des données : site de l'Office de l'efficacité énergétique (Ressources naturelles Canada) : <http://oee.nrcan.gc.ca/transports/outils/cotescarburant/cotes-recherche.cfm>

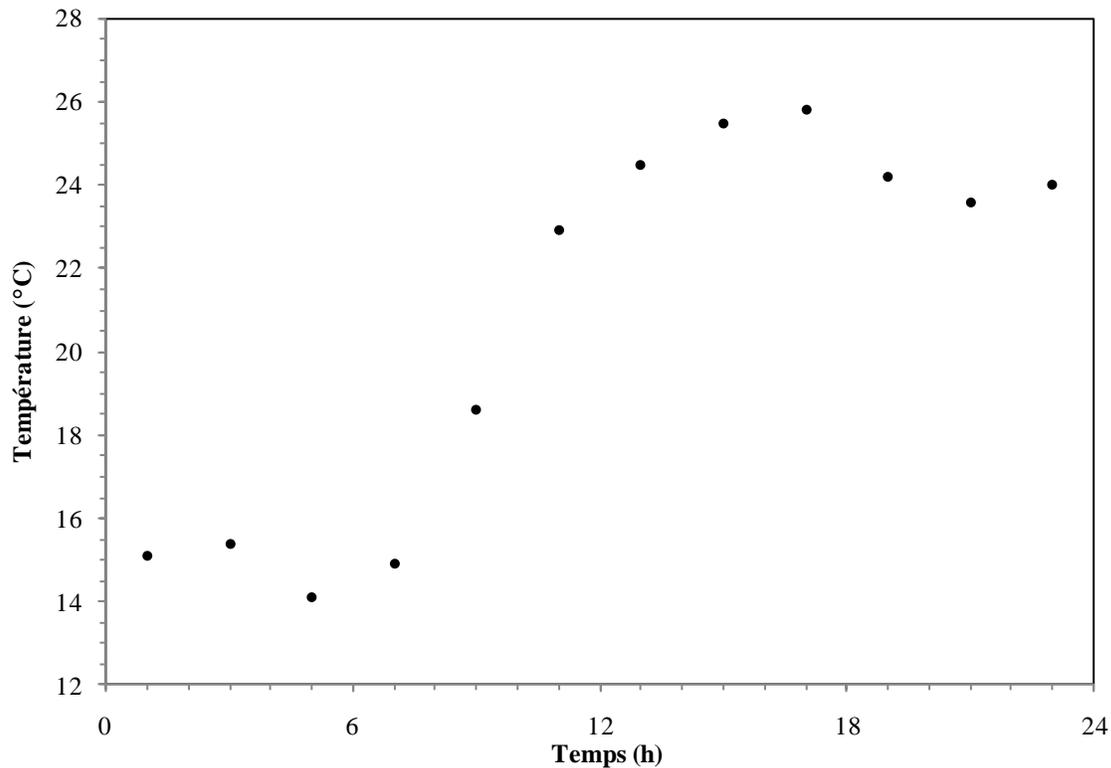
Un tel graphique ne fournit donc pas une réponse très précise à des questions comme « Quelle est la consommation d'une voiture équipée d'un moteur de 1,6 litre? ». Il garde toutefois toute son utilité, car il permet de se faire rapidement une idée globale des valeurs possibles de consommation pour les différentes catégories de voitures illustrées, et ce beaucoup plus facilement (et agréablement) qu'une lecture approfondie de la liste complète d'où ces valeurs ont été tirées.

EXERCICES

A3.1 À l'aide du graphique de la figure G-A.1, déterminez :

- la vitesse de la voiture à $t = 78$ s;
- à quel(s) moment(s) la vitesse de la voiture atteignait 116 km/h;
- la vitesse maximale atteinte et le moment où cela s'est produit.

A3.2 Le graphique ci-dessous illustre la température enregistrée à toutes les deux heures (à partir d'une heure du matin) à Montréal le 1^{er} août 2010 (données tirées du site *Météo* d'Environnement Canada : <http://www.meteo.gc.ca>).



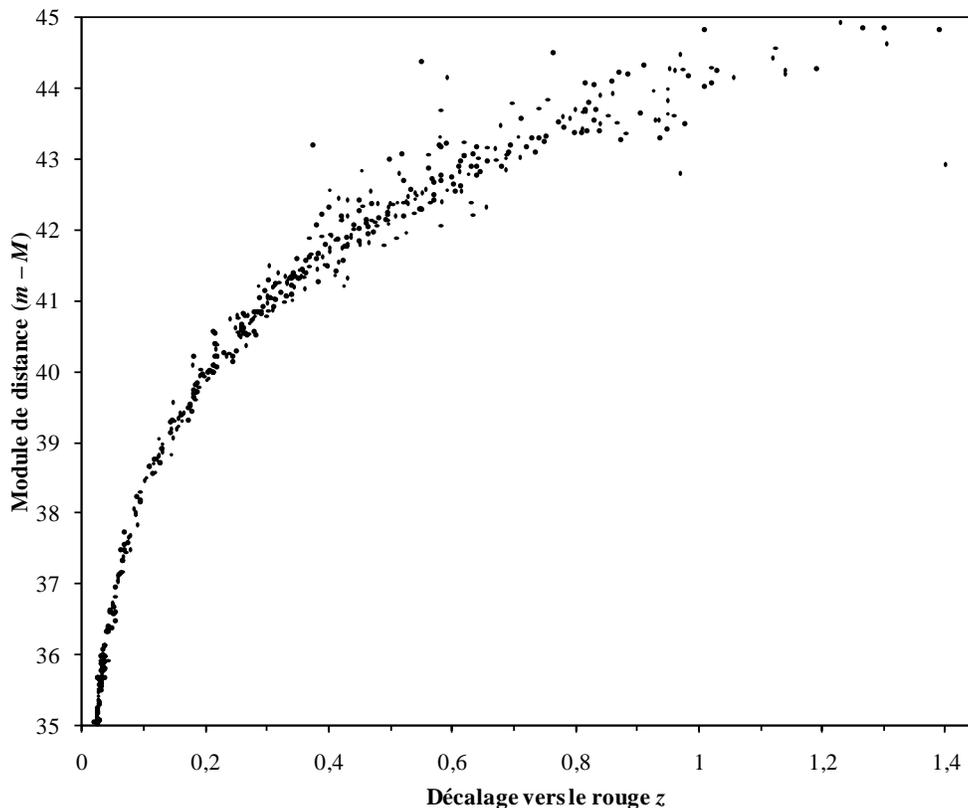
- Tracez la courbe expérimentale décrivant la température en fonction du temps.
- Quelle a été la température minimale atteinte au cours de la journée? À quelle heure?
- Mêmes questions pour la température maximale.
- Quelle était la température à 7 h 30? À 23 h 30?

- e) Qu'est-ce que le graphique permet de prédire pour la journée qui a suivi celle où ont été effectuées les observations?

A3.3 À l'aide du graphique de la figure G-A.4, déterminez :

- a) pour chacune des variables, l'éventail des valeurs apparaissant dans le graphique;
- b) la consommation d'essence d'une voiture équipée d'un moteur de 3,5 litres.

A3.4 Le graphique ci-dessous présente, pour plusieurs centaines de supernovæ de type Ia, les deux valeurs suivantes : (1) le module de distance (la différence entre les magnitudes apparente m et absolue M , liée à la distance de l'objet); (2) le décalage vers le rouge (z). Source des données : site *Supernova Cosmology Project* (<http://supernova.lbl.gov/Union>).



- a) Décrivez en une courte phrase le lien entre les deux variables qu'illustre ce graphique.
- b) Tracez la courbe empirique qui décrit, au mieux de votre jugement, la relation entre ces variables.

- c) Supposons que, pour une supernova de type Ia donnée, on mesure un module de distance égal à 38. Que peut-on dire du décalage vers le rouge de cette supernova?
- d) Même question pour un module de distance égal à 44.
- e) Qu'est-ce que ces deux derniers résultats nous disent en ce qui concerne la capacité de déterminer précisément le décalage vers le rouge des supernovæ de type Ia à partir de la valeur de leur module de distance?

APPENDICE G-4

SYMBOLES MATHÉMATIQUES

Voici quelques symboles mathématiques employés couramment en physique :

=	égal à	>	plus grand que
≡	défini comme	≥	plus grand ou égal à
≅	à peu près égal à	»	beaucoup plus grand que
≈	du même ordre de grandeur que	<	plus petit que
∝	proportionnel à	≤	plus petit ou égal à
∞	l'infini	«	beaucoup plus petit que
±	plus ou moins (3,5 ± 0,5 signifie « entre 3 et 4 »)		

Corrigé

MODULE 0

- G0.1 a) Parce que la durée du jour solaire varie légèrement tout au long de l'année.
b) La même. À la figure 0.15, la position où se trouve la Terre, 23 h 56 min plus tard, est indépendante du sens de rotation.
c) Plus petite, car un point donné à la surface de la Terre reviendrait au même endroit par rapport au Soleil avant qu'un jour sidéral ne soit complété.
- G0.2 a) 59 d : par définition du jour sidéral.
b) 176 d. Il s'agit d'un phénomène dit de résonance : Mercure complète trois tours sur elle-même dans le même temps qu'elle effectue deux révolutions autour du Soleil.
- G0.3 Coordonnées standards : $49,9^\circ$ latitude Nord; $71,2^\circ$ longitude Ouest (la fraction de degré a été estimée à l'œil).
Coordonnées angulaires centrées sur Chicoutimi : 180 km; $5,5^\circ$ à l'ouest du nord.
- G0.4 a) Le système de coordonnées locales est « attaché » au point d'observation : les coordonnées locales d'une étoile changent donc au cours d'une journée, à cause de la rotation de la Terre sur elle-même, et elles sont différentes pour deux personnes situées à des endroits différents, car celles-ci n'ont pas le même zénith ni le même horizon.
b) Le système de coordonnées célestes est déterminé par les positions du pôle Nord céleste et du point vernal : les coordonnées d'une étoile sont donc les mêmes quel que soit le point d'observation et elles ne changent pas au cours d'une journée – si l'on néglige l'effet, minime pendant une journée, de la précession des équinoxes.
- G0.5 a) *Québec* – Minimum : 22° (décembre); maximum : 68° (juin)

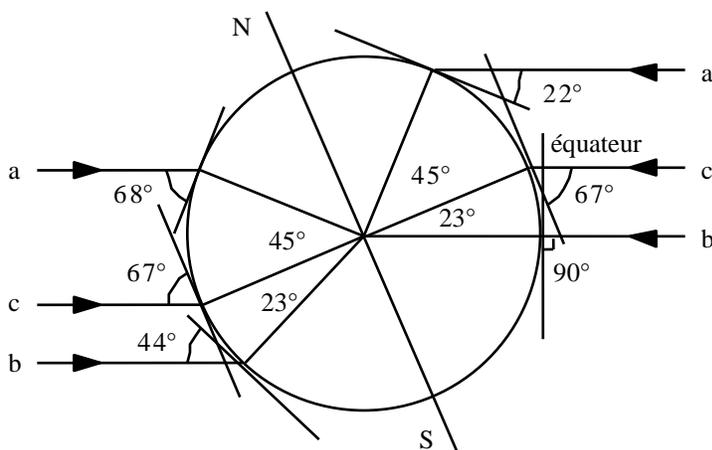
À l'aide de la notion d'angles complémentaires, on retrouve les équations 0.2c et 0.2a, où L est égal à 45° .

- b) *São Paulo* – Minimum : 44° (juin); maximum : 90° (décembre)

Encore une fois, la notion d'angles complémentaires permet de retrouver les équations 0.2c et 0.2a, où L est cette fois-ci égal à 23° .

- c) *Quito* – Minimum : 67° (juin, décembre); maximum : 90° (mars, septembre)

Ces valeurs peuvent aussi être obtenues à l'aide des équations 0.2, où L est égal à 0° .



G0.6 a) L'inclinaison (ou obliquité) de l'écliptique, qui modifie la variation journalière de l'ascension droite du Soleil. La variation de la vitesse de la Terre sur son orbite, en fonction inverse de sa distance au Soleil.

- b) Non, il varie très légèrement à cause de l'irrégularité de la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même.

G0.7 21 septembre et 21 mars (équinoxes).

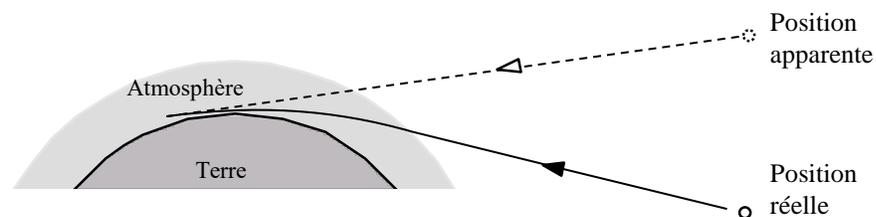
G0.8 Évidemment, à cause de la rotation de la Terre sur elle-même et de celle de la Lune autour de la Terre, cet emplacement change continuellement. Ce centre de masse se trouve directement sous les pieds de quelqu'un lorsque la Lune est directement au-dessus de sa tête, ce qui n'est évidemment pas possible à nos latitudes.

G0.9 C'est le point G, car la masse du gros astéroïde étant trois fois celle de l'autre, ce point est situé trois fois plus près du centre du gros astéroïde que du centre du petit.

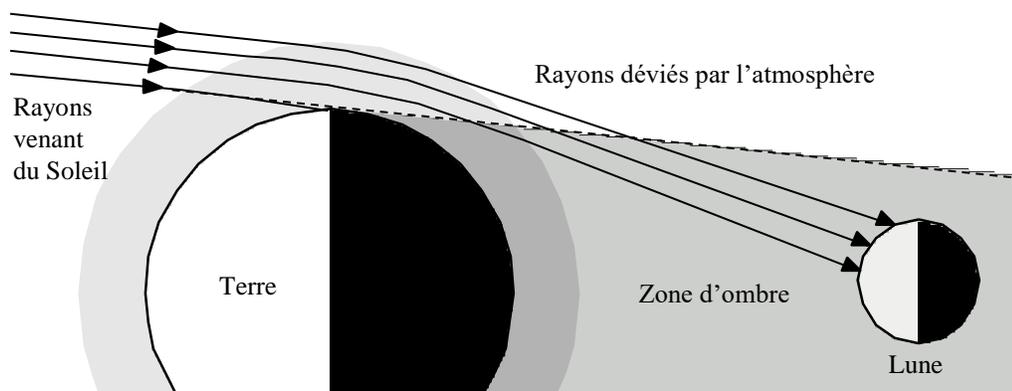
G0.10 Parce qu'en raison de l'excentricité de l'orbite de la Lune, celle-ci est parfois trop loin de la Terre, de sorte que son diamètre angulaire est trop petit pour cacher entièrement le Soleil. De plus, comme le Soleil est lui aussi parfois plus près de la Terre, son diamètre angulaire est alors plus grand, ce qui peut contribuer à accroître cet effet.

G0.11 Non, car la Lune met environ 15 d à passer de la position permettant une éclipse de Soleil à celle qui permet une éclipse lunaire (figure 0.18b).

G0.12 a)



b)



G0.13 a) 1, 2, 3

b) 1, 3

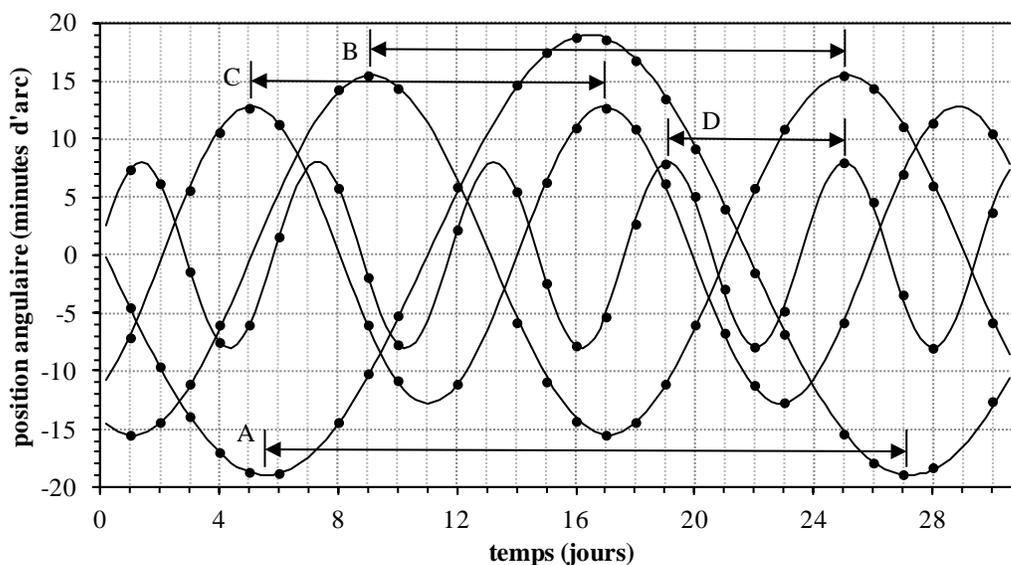
c) 5

d) 3, 4

e) 2, 3, 5, 6

MODULE 1

- G1.1 Les questions à poser (ou à se poser) sont les suivantes. La discipline fait-elle à appel à des concepts et méthodes utilisés par une communauté qui partage le même objet d'étude? Tente-t-elle de construire une représentation/explication de la réalité, sous la forme de relations de causalité? Prédit-elle l'occurrence de phénomènes? Dans l'affirmative, ces prédictions se réalisent-elles effectivement? La discipline a-t-elle évolué, notamment par l'emprunt de certains acquis d'autres disciplines dont l'objet d'étude est voisin?
- G1.3
- G1.4 Parce que la précession est tellement lente (environ 1° par siècle) qu'il fallait, compte tenu de la précision des mesures de l'époque, plusieurs siècles pour noter un changement dans la position du point vernal sur la sphère céleste.
- G1.5 *Éléments traditionnels* : nécessité du mouvement circulaire uniforme; recours aux épicycles. *Éléments révolutionnaires* : le Soleil au centre de l'Univers; étude, à l'aide des mathématiques, de toutes les conséquences d'un modèle sur les observations.
- G1.6 Il y a deux minima pour le satellite qui s'éloigne de le plus de Xantzi (environ 19 min d'arc), à environ 5,5 d et 27 d, donc séparés de 21,5 d (A); on peut alors tracer la courbe qui les relie en passant par le maximum autour de 16-17 d. La satellite suivant, dont l'éloignement atteint 15 min d'arc, présente deux maxima séparés de 16 d (B). On continue ainsi avec les deux autres satellites, dont les périodes sont 12 d (C) et 6 d (D).



- G1.7 Voir les tableaux des deux pages suivantes.

G1.7

	Observations ou instruments d'observation	Calculs ou outils mathématiques	Lois E : empiriques F : fondamentales D : dérivées
Musulmans	Mesure des positions du Soleil, de la Lune et des planètes	- Introduction du degré d'arc - Prédiction des éclipses	Lois arithmétiques prédisant la durée du jour et de la nuit tout au long de l'année (E)
Grecs	Précession des équinoxes	- Sphéricité et rayon de la Terre - Distances Terre-Lune et Terre-Soleil	Lois du mouvement d'Aristote (F)
Musulmans	Astrolabe	Algèbre	
Copernic		Calcul des conséquences de son modèle sur les observations	
Tycho Brahé	Mesures très précises à l'aide d'instruments de sa fabrication		
Kepler		Périodes de révolution et vitesses des planètes	Les trois lois du mouvement planétaire (E)
Galilée	- Découverte des satellites de Jupiter et de leur période - Phases de Vénus - Télescope		Loi de l'inertie (F)
Newton		Dérivation des trois lois de Kepler	- Trois lois de Newton (F) - Loi de la gravitation universelle (F)

G1.7 (suite)

	Modèle du système solaire	Utilisation ou critique de travaux antérieurs	Contribution(s) marquante(s)
Mésopotamiens			Premières consignations de mesures astronomiques
Grecs	<ul style="list-style-type: none"> - Géocentrique - Héliocentrique 	Utilisation des mesures des Mésopotamiens	<ul style="list-style-type: none"> - Invention des théories et des modèles - Premiers calculs basés sur des observations
Musulmans	Géocentrique	<ul style="list-style-type: none"> - Perfectionnement du modèle de Ptolémée - Critique de Ptolémée et Aristote 	Préservation de l'héritage grec
Copernic	Héliocentrique	Critique de Ptolémée	Modèle héliocentrique
Tycho Brahé	Géo-héliocentrique	Critique de Copernic	Mesures d'une précision sans précédent
Kepler	Héliocentrique	Utilisation des mesures de Tycho Brahé	Les trois lois de Kepler
Galilée	Héliocentrique	Critique de Ptolémée et d'Aristote	<ul style="list-style-type: none"> - Loi de l'inertie (F) - Importance des observations pour juger les théories
Newton	Héliocentrique	Synthèse des travaux de Kepler et Galilée	Synthèse de la mécanique céleste et terrestre

MODULE 2

G2.1 *Tycho Brahé*. Il effectue des mesures d'une grande précision qui mettent encore plus en évidence les limites du système de Ptolémée.

Kepler. Il utilise les données de Tycho Brahé, qu'il arrive à expliquer grâce à ses trois lois, à la condition d'abandonner les orbites circulaires et le mouvement circulaire uniforme.

G2.2 Kepler n'a fait que décrire par des lois mathématiques les caractéristiques du mouvement des planètes (lien entre période, vitesse et distance au Soleil), alors que Galilée a tenté, avec sa loi de l'inertie (qui s'applique aussi aux mouvements des objets sur Terre), d'expliquer la cause de ce mouvement. En fait, la loi affirme qu'il n'y a pas nécessairement de cause à un mouvement qui perdure.

G2.3 a) Cinématique.

b) Cinématique.

c) Cinématique et dynamique : cet énoncé concerne autant la cause du mouvement que ses caractéristiques.

d) Cinématique.

e) Cinématique et dynamique, pour la même raison qu'en c).

G2.4 La troisième loi de Kepler sera vérifiée si la valeur de la masse de Jupiter (calculée comme il a été fait à l'exemple 3.3 pour le satellite Ganymède) est la même pour tous les satellites de ce système. En premier lieu, on doit convertir les unités pour exprimer les données en UA et en années.

nom du satellite	distance moyenne (10^{-3} UA)	période (10^{-3} année)
Io	2,82	4,85
Europa	4,50	9,72
Ganymède	7,18	19,6
Callisto	12,6	45,7

En calculant le rapport a^3/T^2 pour Io, Europa et Callisto, on trouve les valeurs de $9,64 \times 10^{-4} M_{\odot}$, $9,64 \times 10^{-4} M_{\odot}$ et $9,58 \times 10^{-4} M_{\odot}$ respectivement. La troisième loi de Kepler est donc valide.

On peut aussi vérifier la validité de la troisième loi de Kepler sans au préalable convertir les unités. On s'assure que le rapport a^3/T^2 (ou T^2/a^3) est

constant pour chaque satellite. Notez bien que, dans ce cas, le rapport obtenu ne nous donne pas directement la masse du corps central autour duquel tournent les satellites.

Exemple : Pour Io,

$$T^2 = 1,77^2 = 3,133 \text{ d}^2$$
$$a^3 = (0,422 \times 10^6 \text{ km})^3 = 0,07515 \times 10^{18} \text{ km}^3$$

d'où : $T^2/a^3 = 4,17 \times 10^{-17} \text{ d}^2/\text{km}^3$

Pour les autres satellites, on obtient des résultats presque identiques : 4,17, 4,17 et $4,20 \times 10^{-17} \text{ d}^2/\text{km}^3$.

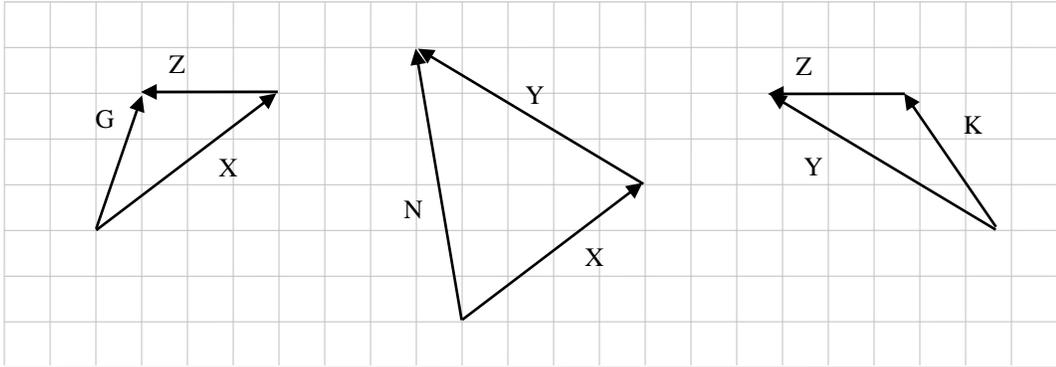
G2.5 Il existe une infinité d'énoncés possibles, selon ce que l'on considère important de préciser. La nature des expériences que l'on réalisera dépendra aussi de ce que l'on estime significatif dans la situation. Voici trois exemples d'énoncés, aussi vrais les uns que les autres :

- Des objets de poids différents vont tomber à la même vitesse s'ils respectent la condition suivante : être suffisamment compacts pour que la résistance de l'air influence très peu leur mouvement.
- Des objets de poids différents tombent à la même vitesse dans le vide; c'est la formulation de Galilée.
- Des objets de même forme et de même dimension vont tomber à une vitesse qui augmente légèrement, mais pas proportionnellement, avec leur poids.

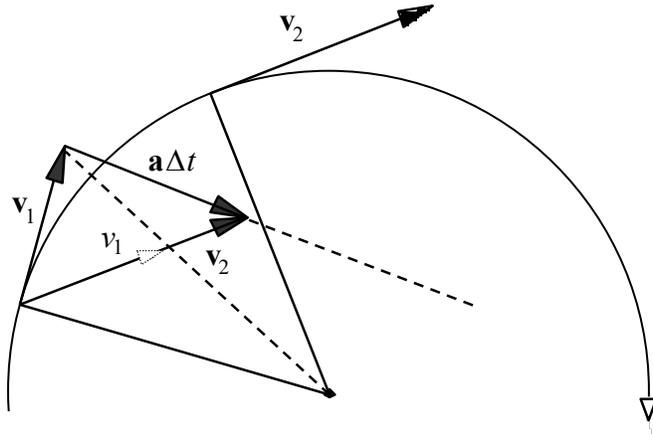
G2.6 C, force dirigée vers le centre du cercle.

G2.7 Comme la vitesse est un vecteur, une variation de vitesse peut correspondre autant à un changement de grandeur qu'à un changement de direction, ce qui est le cas dans un mouvement circulaire uniforme.

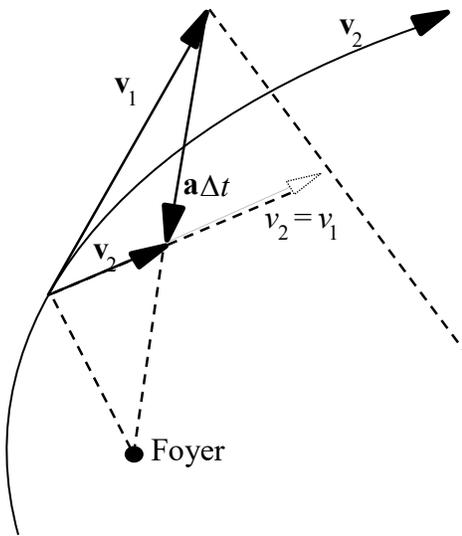
G2.8 a) **G** b) **N** c) **K**



- G2.9 **C**, car si v_2 est plus grand que v_1 , le vecteur $\mathbf{a}\Delta t$ ne se dirige plus vers le centre du cercle, mais vers un point situé à droite de celui-ci (quand l'objet est à la position illustrée).



- G2.10 Si la vitesse ne diminuait pas, le vecteur \mathbf{a} ne serait pas dirigé vers le foyer comme le montre la figure ci-dessous.



- G2.11 a) 110 km/h est égal à 30,6 m/s (voir appendice G-2) :

$$a = v^2/r = 30,6^2 / 500 = 1,87 \text{ m/s}^2$$

ou encore

$$a = 1,87 / 9,8 = 0,19 \text{ g}$$

- b) On exprime les tours/min en rad/s de la façon suivante :

$$10 \frac{\text{tours}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ tour}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1,05 \text{ rad/s}$$

L'accélération est donc égale à :

$$a = \omega^2 r = 1,05^2 \times 10 = 11 \text{ m/s}^2$$

ou encore, $a = 11/9,8 = 1,1 g$.

Note. Pourquoi 10? Parce que c'est le *diamètre*, et non le rayon, qui est égal à 20 m.

- G2.12 a) Pour deux raisons. Premièrement, une force est nécessaire pour accélérer les voitures, lorsqu'elles se mettent en mouvement pour atteindre leur vitesse de croisière. Deuxièmement, une force est aussi nécessaire pour les maintenir à vitesse constante, car il faut lutter contre les forces qui tendent à les ralentir : résistance de l'air, frottements divers (pneus, roulements), accessoires à faire fonctionner (alternateur, pompes, etc.).

- b) Tout comme la Lune qui tourne autour de la Terre depuis des milliards d'années, un satellite artificiel n'a pas besoin de moteur pour rester en orbite, car rien ne tend à diminuer sa vitesse. Rien, sauf s'il s'approche trop de la Terre – c'est le cas si son orbite est très excentrique –, et que l'atmosphère, bien que très ténue à cette altitude, cause une légère force tendant à le ralentir, si bien qu'il peut effectivement finir par retomber sur Terre.

- G2.13 Le poids d'un objet représente la force qu'il faut exercer pour le soulever, sur Terre ou sur une autre planète. Peut-on soulever la Terre? Au-dessus de quoi?

- G2.14 a) Bien que le poids de la balle de golf soit plus faible sur la Lune (de sorte que la balle est plus facile à soulever, ce qui, vous l'admettrez, ne présente pas beaucoup d'intérêt!), sa masse demeure la même. Comme la balle présente la même résistance à l'accélération, il ne sera pas plus facile que sur Terre de la mettre en mouvement. Vous serez d'autant plus d'accord si vous songez au costume des astronautes qui ne se prête pas tellement à l'exercice d'un sport comme le golf. En fait, l'astronaute en question a, semble-t-il, battu tous les records non parce qu'il a projeté la balle plus vite que sur Terre, mais bien parce que les objets tombent moins vite sur la Lune que sur Terre, à cause justement de leur poids plus faible, ce qui a permis à sa balle d'aller beaucoup plus loin que sur Terre.

- b) Le texte qui précède devrait vous convaincre que c'est Louise qui a eu la meilleure idée. Meilleure chance la prochaine fois, Jean!

G2.15 La loi est : $a = 0,4 + (0,3 \times 2^{n-1})$; $n = 8$ pour Pluton, d'où $n = 9$ pour la dixième planète. On a donc :

$$a = 0,4 + (0,3 \times 2^8) = 0,4 + (0,3 \times 256) = 0,4 + 76,8 = 77,2 \text{ UA}$$

Bien que cette valeur est étrangement proche de celle du périhélie de Sedna, elle ne permet pas d'ajouter une autre confirmation de la loi de Bode, car c'est le demi-grand axe qui apparaît dans l'équation, et ce paramètre est beaucoup plus grand que 78 UA pour Sedna. On pourrait toujours invoquer que Sedna aurait pu posséder une orbite circulaire à l'origine, et être propulsé sur une orbite elliptique à la suite d'une collision avec un autre corps céleste, mais c'est une hypothèse plutôt gratuite.

G2.16 Sur le plan historique, ce sont des lois empiriques, car elles ont été tirées directement de l'observation, sans qu'une théorie ne les explique. Après Newton, elles sont devenues des lois dérivées, que l'on peut déduire de lois fondamentales : loi de la gravitation universelle et deuxième loi de Newton.

G2.17 La formule des petits angles nous dit que la valeur (en radians) du diamètre angulaire d'un objet est égale au diamètre de l'objet divisé par la distance qui nous sépare de lui.

On exprime en premier lieu les données contenues à l'annexe VIII du manuel à l'aide des unités SI ou, encore, en km. Le rayon de Jupiter est de 71 456 km; son diamètre est donc de 142 912 km.

La distance entre le Soleil et Jupiter est de $778,4 \times 10^6$ km; celle entre le Soleil et la Terre est de $149,6 \times 10^6$ km. Les distances minimale et maximale entre la Terre et Jupiter sont respectivement :

$$(778,3 - 149,6) \times 10^6 \text{ km} = 628,7 \times 10^6 \text{ km}, \quad (\text{distance minimale})$$

$$(778,3 + 149,6) \times 10^6 \text{ km} = 927,9 \times 10^6 \text{ km} \quad (\text{distance maximale})$$

Le diamètre angulaire minimal de Jupiter est donc égal à :

$$\text{diamètre angulaire} = \frac{142\,912}{927,9 \times 10^6} = 1,54 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

On peut exprimer cette valeur en minutes d'arc :

$$1,54 \times 10^{-4} \text{ rad} \times \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \times \frac{60'}{1^\circ} = 0,53'$$

De la même façon, on trouve que la valeur maximale est 0,78'.

G2.18 Consultez la solution de l'exercice supplémentaire G1.7.

G2.19 Pour orienter votre raisonnement, considérez les questions suivantes.

Quelle trajectoire suit le centre de masse des deux étoiles? Est-il accéléré? Relisez, si nécessaire, les explications du module 0 concernant le centre de masse. En plus du mouvement du centre de masse, quel type de mouvement décrivent les deux étoiles? Sont-elles accélérées? Une force est-elle appliquée sur chaque étoile? Dans quelle direction est-elle dirigée? D'où provient-elle? Quelle est sa nature? A-t-elle la même grandeur pour les deux étoiles?

Voici la solution.

D'après la figure G-0.6, le centre de masse des étoiles se déplace en ligne droite à vitesse constante. Or, on sait que seuls les effets extérieurs à un système peuvent influencer le mouvement de ce centre de masse. Les étoiles sont dans une région isolée du cosmos : il n'y a donc aucun corps céleste dans leur voisinage qui pourrait influencer le mouvement de leur centre de masse. Tout ceci est conforme à la première loi de Newton qui dit qu'en l'absence de force, un objet se déplace en ligne droite à vitesse constante.

En plus du mouvement de leur centre de masse, les étoiles effectuent un mouvement circulaire uniforme autour de ce centre de masse; elles sont donc toutes deux accélérées vers ce point. La deuxième loi de Newton ($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$) implique que chacune d'elles subit une force dirigée également vers le centre de masse.

Pour chaque étoile, cette force est dirigée en même temps vers l'autre étoile; en fait, elle est causée par l'autre étoile. Elle est due à l'attraction gravitationnelle entre les étoiles : chaque étoile attire l'autre, avec une force dont la grandeur est donnée par la loi de la gravitation universelle : $F = Gm_1m_2 / r^2$, où m_1 et m_2 sont les masses des étoiles et r , la distance qui les sépare.

La grandeur de cette force est la même pour les deux étoiles, les facteurs de l'expression étant les mêmes dans les deux cas, mais la direction de cette force n'est pas la même : les forces subies par les deux étoiles sont égales en grandeur, mais sont dirigées dans des sens opposés (voir la figure G-2.1). On retrouve ainsi la troisième loi de Newton.

G2.20 a) Diffraction b) Réfraction c) Dispersion

G2.21 La limite de résolution théorique est la limite imposée par la diffraction à la séparation angulaire que peut résoudre un instrument optique. La valeur réelle de la limite de résolution est celle que l'on obtient lorsque l'on tient compte également des autres facteurs qui peuvent limiter la résolution : qualité de l'optique utilisée, turbulence de l'atmosphère, précision des détecteurs, etc.

G2.22 25 fois, car le pouvoir de captation est proportionnel au carré du diamètre : $10^2/2^2 = 100/4 = 25$.

G2.23 1. Il n'y a pas de turbulence atmosphérique : la résolution est presque égale au pouvoir de résolution théorique.

2. En l'absence d'absorption par l'atmosphère, une plage beaucoup plus grande de longueurs d'onde peut être observée.

3. La noirceur du ciel permet d'observer des objets beaucoup plus faibles.

G2.24 a) Le pouvoir séparateur ou limite de résolution α , en secondes d'arc, est donné par l'équation 5.2 : $\alpha = 2,5 \times 10^5 \lambda/D$.

Puisque l'on place devant le télescope un filtre qui ne laisse passer que la lumière verte, la longueur d'onde de la lumière détectée par ce télescope est $\lambda = 500 \times 10^{-9}$ m (tableau 4.1).

Puisque $D = 4$ m, la limite de résolution est égale à :

$$\alpha = 2,5 \times 10^5 \times 500 \times 10^{-9} / 4 = 3,1 \times 10^{-2} \text{ secondes d'arc}$$

G2.25 a) Le pouvoir séparateur ou limite de résolution α , en secondes d'arc, est donnée par l'expression suivante : $\alpha = 2,5 \times 10^5 \lambda/D$.

Ici : $\lambda = 0,21$ m et $D = 50$ m :

d'où : $\alpha = 2,5 \times 10^5 \times 0,21 / 50 = 1050$ secondes (ou 17 minutes) d'arc

b) La longueur d'onde associée à 20 GHz s'obtient par $\lambda = c/f$.

On a : $\lambda = 3 \times 10^8 / 20 \times 10^9 = 1,5 \times 10^{-2}$ m

Le pouvoir séparateur vaut donc :

$$\alpha = 2,5 \times 10^5 \times 1,5 \times 10^{-2} / 50 = 72 \text{ secondes d'arc.}$$

G2.26 a) Particules

b) Les deux

c) Ondes

d) Particules

e) Ondes

G2.27 Pour chaque situation, on pourrait décrire une suite infinie de transformations d'énergie. Nous nous contenterons d'en mentionner quelques-unes parmi les plus évidentes.

- a) L'énergie potentielle gravitationnelle que perd la cycliste se retrouve en *énergie cinétique* (si elle ne freine pas suffisamment, de sorte que sa vitesse augmente), en *énergie thermique* (les freins et les jantes chauffent), en *énergie électrique* (la dynamo). Cette dernière forme d'énergie se transforme à son tour en énergie de rayonnement (feux de la bicyclette) et en énergie thermique (car les ampoules chauffent aussi), etc.
- b) L'énergie chimique contenue dans les aliments qu'a dû absorber l'athlète, énergie qui se retrouve dans son sang et ses muscles, est transformée en *énergie potentielle gravitationnelle* (les haltères sont soulevés) et en *énergie thermique* (notre champion sue abondamment!). Lorsqu'il laisse retomber les haltères, l'énergie potentielle gravitationnelle qu'ils ont acquise se transforme en énergie cinétique, puis se retransforme en diverses formes d'énergie : thermique, sonore, etc.
- c) Une partie de l'énergie au repos ($E = mc^2$) de la première étoile se transforme, par réaction de fusion, en chaleur et en énergie de rayonnement. La masse arrachée de la même étoile perd de l'énergie potentielle gravitationnelle en tombant sur l'autre étoile. Cette énergie est d'abord transformée en énergie cinétique (la matière tombe vers l'étoile), puis, par compression, en chaleur et en rayonnement (rayons X). L'énergie des photons de ce rayonnement est transformée en énergie électrique par les détecteurs du satellite, etc.

G2.28 L'équation 4.3, soit $c = \lambda f$, peut aussi s'écrire $c/\lambda = f$ ou $c/f = \lambda$; voir la section 2 de l'appendice G-2.

- a) $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 89,1 \times 10^6 = 3,37 \text{ m}$
- b) D'après le tableau G-2.3, la longueur d'onde du bleu se situe autour de 475 nm; on a donc :

$$f = c/\lambda \approx 3 \times 10^8 / 475 \times 10^{-9} = 6,3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

G2.29 a) Raie $H\alpha$ de Balmer : $\lambda = 656,5 \text{ nm}$; voir le manuel, page 153.

L'équation 4.4, $E = hf$, peut aussi s'écrire :

$$E = hc/\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 656,5 \times 10^{-9}$$

$$E = 3,03 \times 10^{-19} \text{ J},$$

ou encore :

$$E = 3,03 \times 10^{-19} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1,89 \text{ eV}$$

- b) Ici, $T = 200 + 273 = 473 \text{ K}$ (équation 4.6),

$$\text{d'où : } \lambda_{\text{pic}} = 2,9 \times 10^6 / 473 = 6\,131 \text{ nm ou } 6,13 \mu\text{m}$$

- c) Température de la surface du Soleil : 5800 K; voir le manuel, page 148.

$$\text{On a donc : } \lambda_{\text{max}} = 2,9 \times 10^6 / 5800 = 500 \text{ nm}$$

$$\text{et } f = c / \lambda = 3 \times 10^8 / 500 \times 10^{-9} = 6,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

- G2.30 a) $2,0 \times 10^{-10} \text{ m}$ ou 0,20 nm; il fallait transformer les eV en J :
 $6,2 \text{ keV} = 9,92 \times 10^{-16} \text{ J}$.

- b) $1,4 \times 10^9 \text{ Hz}$ ou 1,4 GHz

- c) $9,34 \times 10^{-6} \text{ m}$ ou 9,34 μm

- G2.31 a) La puissance est définie par $P = \Delta E / \Delta t$, donc $\Delta E = P \times \Delta t$.

Ici, $P = 100 \text{ W}$ et $\Delta t = 2 \text{ h} = 2 \times 60 \times 60 = 7200 \text{ s}$, d'où :

$$\Delta E = 100 \times 7200 = 7,2 \times 10^5 \text{ J, ou encore :}$$

$$\Delta E = 0,1 \text{ kW} \times 2 \text{ h} = 0,2 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

- b) L'intensité est définie par $I = P/S$, où P est la puissance qui traverse la surface S (perpendiculaire au trajet de l'onde). Ici, $P = 50 \text{ W}$ (puissance totale irradiée) et S est la surface de la sphère de 25 m de rayon, qui est bien perpendiculaire au trajet de l'onde.

$$\text{On a : } S = 4 \times 3,1416 \times 25^2 = 7854 \text{ m}^2$$

$$\text{d'où : } I = P/S = 50 / 7854 = 6,37 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

- G2.32 Un spectre continu, des raies d'émission et des raies d'absorption.

- G2.33 La loi de Stefan-Boltzmann fournit la luminosité surfacique, soit la puissance émise par un mètre carré de surface. On trouve :

$$P (1 \text{ m}^2) = \ell = \sigma T^4 = 5,672 \times 10^{-8} \times (57\,000)^4 = 6,0 \times 10^{11} \text{ W}.$$

Il s'agit d'une puissance 600 fois plus grande que celle qui est produite par une centrale électrique moyenne.

- G2.34 a) Le bleu correspond à une longueur d'onde de 475 nm environ. Il n'y pas d'expression simple qui relie λ_{pic} à la puissance émise, mais la loi de Wien permet de trouver la température.

En effet, si $475 = 2,9 \times 10^6 / T$, on trouve :

$$T = 2,9 \times 10^6 / 475 = 6105 \text{ K}$$

Cette valeur permet de calculer (loi de Stefan-Boltzmann) la puissance émise par unité de surface, soit :

$$\ell = 5,672 \times 10^{-8} \times 6105^4 = 7,88 \times 10^7 \text{ W/m}^2.$$

On peut maintenant calculer la puissance totale émise, soit :

$$P = \ell \times S = 7,88 \times 10^7 \times 4\pi \times (4 \times 10^9)^2 = 1,58 \times 10^{28} \text{ W}.$$

- b) À une distance d'une unité astronomique, cette puissance totale est répartie sur toute la surface d'une sphère imaginaire d'une unité astronomique de rayon. L'intensité est donc :

$$I = P/S = 1,58 \times 10^{28} / 4\pi \times (1,496 \times 10^{11})^2 = 5,6 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

- c) C'est peu probable, car cette valeur est beaucoup plus élevée (environ 50 fois) que l'intensité de la radiation que nous recevons du Soleil, qui est de l'ordre de 1000 W/m².

G2.35 Dans l'Antiquité, comme on l'a vu à la section 0.1, on avait classé les étoiles de 1 à 6 en magnitude, d'après leur brillance perçue par l'œil. La première magnitude correspondait aux étoiles les plus brillantes. Lorsqu'on a voulu définir mathématiquement une échelle de brillance, on a fait en sorte que la nouvelle échelle corresponde le mieux possible à l'ancienne.

G2.36 Cette distance est de 32,6 a.l. (10 pc), par définition de la magnitude absolue.

G2.37 Une étoile froide émet moins dans le bleu que dans les autres longueurs d'onde du visible. Sa brillance dans le bleu (360-550 nm) est donc inférieure à sa brillance dans le visible (480-680 nm); par conséquent, sa magnitude dans le bleu (B) est *supérieure* à celle dans le visible (V). Comme $B > V$, l'indice $B - V$ est positif.

G2.38 Le mouvement apparent dû à la parallaxe se produit dans un sens pendant six mois et dans l'autre sens pendant les six mois qui suivent, de sorte qu'au bout d'un an, l'étoile est revenue à la même position apparente. Il suffit donc de comparer la position d'une étoile à la même période de l'année, à plusieurs années d'intervalle, pour observer le changement de position dû au mouvement propre.

G2.39 a) La vitesse tangentielle, car le mouvement propre donne le déplacement angulaire de l'étoile, qu'il faut multiplier par la distance à l'étoile pour obtenir la distance parcourue par celle-ci.

- b) La vitesse tangentielle, car le mouvement propre est en général trop faible pour être observé sur une période d'une année, alors que la vitesse radiale

s'obtient à partir d'un simple spectre de l'étoile, qui ne demande qu'une nuit d'observation.

G2.40 a) On a : $v_T = 4,74 \mu / \theta$

Ici, $\mu = 4,5'' / \text{an}$ et $\theta = 0,50''$.

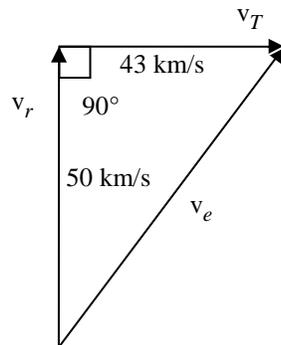
On a donc : $v_T = 4,74 \times 4,5 / 0,50 = 43 \text{ km/s}$.

b) Pour trouver la vitesse effective, il faut déterminer aussi la vitesse radiale. C'est le facteur de décalage Doppler qui fournit cette information (équation 4.10) : $\delta_D = 1 + v_r/c$, où $\delta_D = \lambda_{\text{obs}}/\lambda_{\text{norm}}$.

$$v_r = (\delta_D - 1) c = (\lambda_{\text{obs}}/\lambda_{\text{norm}} - 1) c$$

$$v_r = \left(\frac{656,42}{656,31} - 1 \right) \times 3,0 \times 10^8 = 5,0 \times 10^4 \text{ m/s} = 50 \text{ km/s}$$

Si l'on construit la figure correspondant à l'addition des deux composantes de la vitesse :



on peut calculer la vitesse effective v_e de l'étoile à l'aide du théorème de Pythagore; on obtient :

$$v_e = \sqrt{v_r^2 + v_T^2} = \sqrt{50^2 + 43^2} = \sqrt{2500 + 1849} = \sqrt{4349}$$

soit $v_e = 66 \text{ km/s}$.

On pouvait aussi faire le schéma à l'échelle et mesurer la longueur du vecteur v_e .

c) L'étoile s'éloigne de la Terre, car la longueur d'onde modifiée par l'effet Doppler est plus grande que la longueur d'onde habituelle; voir la figure 4.14.

- d) Il s'agit ici de la vitesse par rapport à la Terre; c'est en même temps la vitesse par rapport au Soleil si, au moment de l'observation de l'effet Doppler, la Terre ne se déplace pas dans la direction de la ligne qui la joint à l'étoile.

G2.41 Avant de consulter la solution, considérez les éléments suivants.

La température des étoiles permet de calculer la longueur d'onde autour de laquelle la majeure partie de leur radiation est émise. Quel est ce domaine de longueur d'onde? Quelle conséquence cela a-t-il sur le type de télescope nécessaire? La distance entre les étoiles et entre celles-ci et la Terre permet de calculer leur séparation angulaire (attention aux unités!). Cette séparation doit être égale à la résolution du télescope; on connaît une expression reliant la longueur d'onde, le diamètre du télescope et la limite de résolution théorique; est-ce la même chose que la résolution? On peut obtenir ainsi le diamètre du télescope requis.

Pour calculer l'intensité observée à partir du satellite, il faut d'abord calculer la puissance totale émise par les étoiles. On calcule d'abord la puissance émise par unité de surface; est-ce la même pour les deux étoiles? La puissance totale est ensuite calculée à l'aide de la valeur de la surface de chacune des étoiles. Cette puissance est répartie, à 50 années-lumière des étoiles, sur une sphère de ce rayon, ce qui permet de calculer l'intensité à cette distance.

Voici la solution.

La loi de Wien permet de calculer la longueur d'onde autour de laquelle la majeure partie de la radiation est émise.

$$\text{On a : } \lambda_{\text{pic}} = 2,9 \times 10^6 / 9700 = 299 \text{ nm}$$

Cette longueur d'onde fait partie des ultraviolets. Or, cette radiation ne traverse pas le verre; un télescope réflecteur devra être utilisé.

Le diamètre du télescope doit être assez grand pour pouvoir résoudre les images des deux étoiles. On peut d'abord calculer quelle est la séparation angulaire entre les étoiles : la limite de résolution devra être au moins égale à cet angle. La formule du triangle étroit (annexe V) permet d'écrire :

$$\theta = \frac{d}{D}$$

où d est la distance entre les étoiles, et D la distance qui nous sépare d'elles; θ est l'angle en radians.

Il faut que les deux distances soient exprimées à l'aide des mêmes unités.

On a :

$$d = 725 \text{ millions de km} = 725 \times 10^6 \text{ km} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 7,25 \times 10^{11} \text{ m}$$

et :

$$D = 50 \text{ a.l.} = 50 \times 9,46 \times 10^{15} \text{ m} = 4,73 \times 10^{17} \text{ m.}$$

On obtient alors :

$$\theta = \frac{7,25 \times 10^{11}}{4,73 \times 10^{17}} = 1,533 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

Pour la suite des calculs, il convient de transformer cette valeur en secondes d'arc; on a :

$$1,533 \times 10^{-6} \text{ rad} \times \frac{57,3 \text{ degrés}}{\text{rad}} \times \frac{60'}{1 \text{ degré}} \times \frac{60''}{1'} = 0,32''$$

Il est impossible sur Terre d'atteindre cette résolution, qui est limitée par la turbulence atmosphérique à environ 1"; par contre, dans l'espace, la résolution peut être égale à la limite de résolution théorique α . Cette dernière est reliée au diamètre du télescope de la façon suivante (équation 5.2) :

$$\alpha (\text{en}'') = 2,5 \times 10^5 \lambda / D_t$$

où le diamètre du télescope est noté D_t , pour éviter de le confondre avec le symbole D qui représente la distance qui nous sépare des étoiles. On peut maintenant isoler la quantité que nous recherchons ici, soit D_t :

$$D_t = 2,5 \times 10^5 \lambda / \alpha$$

On trouve :

$$D_t = 2,5 \times 10^5 \times 299 \times 10^{-9} / 0,32 = 0,234 \text{ m, ou environ } 23 \text{ cm.}$$

De son côté, l'intensité dépend de la luminosité de l'étoile et de sa distance, comme l'indique la relation intensité-luminosité-distance, dans sa forme convenant aux unités SI de base (équation G-1.1) :

$$I = \frac{L}{4\pi D^2} = 0,0796 \frac{L}{D^2}$$

Pour déterminer la luminosité, on commence par calculer la puissance émise par les étoiles par unité de surface (ou luminosité surfacique), à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\ell = \sigma T^4 = 5,672 \times 10^{-8} \times (9700)^4 = 5,02 \times 10^8 \text{ W/m}^2$$

Cette valeur est la même pour les deux étoiles; la luminosité, c'est-à-dire la puissance totale irradiée par chacune, est le produit de cette valeur par la surface de l'étoile ($4\pi R^2$); si l'on appelle R_1 et R_2 les rayons des étoiles, et S_1 et S_2 leurs surfaces, on trouve d'abord pour l'étoile n° 1 :

$$R_1 = 2 R_{\odot} = 2 \times 696\,000 \text{ km} = 2 \times 696 \times 10^6 \text{ m} = 1,392 \times 10^9 \text{ m}$$

d'où :

$$S_1 = 4 \times \pi \times (1,392 \times 10^9)^2 = 2,43 \times 10^{19} \text{ m}^2$$

et donc :

$$L_1 = \ell \times S_1 = (5,02 \times 10^8) \times (2,43 \times 10^{19}) = 1,22 \times 10^{28} \text{ W.}$$

Pour l'étoile n° 2, il n'est pas nécessaire de refaire le calcul : comme R_2 est 3 fois plus grand que R_1 , S_2 sera donc 9 (3^2) fois plus grand que S_1 , et l'étoile produira 9 fois plus de puissance et sera donc 9 fois plus lumineuse, soit :

$$L_2 = 9 \times 1,22 \times 10^{28} = 1,10 \times 10^{29} \text{ W}$$

La luminosité totale est égale à la somme de ces deux quantités; elle vaut aussi 10 fois la luminosité de l'étoile n° 1 :

$$L_{\text{totale}} = L_1 + L_2 = 1,22 \times 10^{29} \text{ W}$$

On obtient finalement la valeur de l'intensité :

$$I = 0,0796 \frac{L_{\text{totale}}}{D^2} = 0,0796 \frac{1,22 \times 10^{29}}{(4,73 \times 10^{17})^2} = 4,35 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

MODULE 3

G3.1 Fusion, fission.

G3.2 a) Puisque toute la masse initiale est transformée en énergie lors de l'annihilation d'un électron et d'un positon, l'énergie produite E est égale à :

$$\begin{aligned} E &= mc^2 = (2 \times 9,11 \times 10^{-31}) \times (3 \times 10^8)^2 = (1,82 \times 10^{-30}) \times (3 \times 10^8)^2 \\ &= 1,64 \times 10^{-13} \text{ J ou } 10^6 \text{ eV} \end{aligned}$$

b) Le rendement énergétique R , donné par l'équation 6.1, est de :

$$R = \left(\frac{m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}}{m_{\text{avant}}} \right) c^2 = \left(\frac{m_{\text{avant}} - 0}{m_{\text{avant}}} \right) c^2$$

$$= c^2 = (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16} \text{ J/kg}$$

Nous avons vu à la page 225 du manuel que le rendement de la fusion de l'hydrogène en hélium est de $6,17 \times 10^{14} \text{ J/kg}$. Le rendement énergétique de l'annihilation d'un électron et d'un positon est donc 145 fois supérieur à celui de la fusion de l'hydrogène en hélium.

- G3.3 Parce que c'est le produit final de la dernière réaction de fusion possible dans les étoiles et que les neutrons libres nécessaires au processus de capture de neutrons sont peu abondants.
- G3.4 Parce que c'est le seul endroit où la température est suffisamment élevée pour que la vitesse des noyaux leur permette de vaincre la force de répulsion électrique (voir le module 0) et que, par conséquent, ces réactions puissent se déclencher.
- G3.5 Non, car ce sont des étoiles qui étaient auparavant sur la série principale. Ce qui les distingue, c'est qu'elles sont plus froides, plus grandes et (ou) plus lumineuses que les étoiles de la série principale, ce qui implique un grand volume et, par le fait même, une faible densité.
- G3.6 a) $0,001 L_{\odot}$
b) Un peu moins de 5000 K
- G3.7 a) Environ $2 M_{\odot}$
b) Environ 3 ou $4 M_{\odot}$
- G3.8 La figure G-3.2 permet de placer cette étoile dans la classe III (géantes).
- G3.9 Notez que les valeurs minimale et maximale utilisées, ainsi que celle du rapport max/min, sont indiquées entre parenthèses. L'ordre est : b, c, a et d.
b (3 000 à 40 000 K; 13,3), **c** (0,2 à $25 M_{\odot}$; 125),
a (0,01 à $700 R_{\odot}$; 7×10^4), **d** (0,001 à $100\,000 L_{\odot}$; 10^8)
- G3.10 a) Le rapport est d'environ 1000.
b) Le symbole ℓ représente la luminosité surfacique, soit la puissance émise par *unité de surface* d'un corps noir. La naine blanche étant plus petite qu'une étoile de la série principale (d'où son nom), la puissance totale

qu'elle émet (luminosité globale) est donc moindre. Dans cet exemple, la naine blanche doit avoir une surface 1000 fois plus petite que l'étoile de la série principale, ce qui signifie un rayon environ 30 fois plus petit.

G3.11 On sait que les étoiles massives atteignent en premier la série principale et la quittent également en premier. Un amas très jeune montrerait surtout des étoiles massives sur la série principale et peu massives hors de celle-ci, tandis que pour un amas très vieux, les plus massives seraient situées hors de la série principale, alors que les moins massives s'y retrouveraient en grand nombre.

G3.12 En ordre croissant :

- B) Surtout des étoiles très massives ont atteint la série principale.
- D) Les étoiles peu massives sont sur la série principale; les étoiles les plus massives commencent à la quitter.
- A) Une bonne partie des étoiles ont quitté la série principale, mais il n'y a pas encore de naines blanches.
- C) Il n'y a presque plus d'étoiles sur la série principale, et de nombreuses naines blanches.

G3.13 La température étant presque la même, la loi de Stefan-Boltzmann ($\ell = \sigma T^4$) prévoit que la puissance émise par unité de surface (ℓ) demeure à peu près inchangée. Cependant, la dimension de l'étoile (voir la figure G-3.2) diminue considérablement. Comme la luminosité globale irradiée par l'étoile est égale au produit de ℓ et de la surface de l'étoile, une diminution de surface se traduit par une diminution correspondante de la luminosité.

G3.14 Parce que la formation d'étoiles se produit au milieu de nuages de gaz et de poussières opaques à la radiation visible.

G3.15 a) Les naines blanches sont à peu près de la même dimension que la Terre ($r \approx 10^4$ km); les étoiles à neutrons sont beaucoup plus petites (une dizaine de kilomètres de rayon).

b) La densité des naines blanches est 10^6 fois plus grande que celle de l'eau; celle des étoiles à neutrons 10^{14} fois plus grande que la densité de l'eau.

c) Les naines blanches proviennent d'une étoile d'une masse inférieure à $1,4 M_{\odot}$, sur la série principale, ou encore d'une étoile dont la masse initiale était comprise entre $1,4$ et $8 M_{\odot}$ et qui en a perdu une bonne partie avant sa phase de contraction ultime, de façon que son noyau résiduel ait une masse de moins de $1,4 M_{\odot}$.

Les étoiles à neutrons viennent des étoiles dont la masse initiale sur la série principale dépassait $8 M_{\odot}$ et dont le noyau résiduel (après la phase supernova) a une masse comprise entre $1,4$ et $3 M_{\odot}$.

G3.16 a) A b) E c) B d) D

e) et f) On pourrait le savoir seulement si toutes les étoiles étaient sur la série principale.

g) B h) D

G3.17 a) Les novæ se produisent lorsqu'une étoile membre d'un système binaire aspire de l'hydrogène de sa compagne, et que cet hydrogène est suffisamment chauffé par compression pour que la réaction de fusion se déclenche.

Une étoile explose, devenant une supernova, lorsque les réactions de son cœur de carbone s'emballent ou lorsque, tout le carburant nucléaire ayant été transformé en fer, l'impossibilité de nouvelles réactions de fusion entraîne l'effondrement de l'étoile et l'apparition d'ondes de choc.

b) La luminosité des novæ peut atteindre 10^6 fois la luminosité du Soleil pendant quelques semaines; la luminosité d'une supernova peut atteindre $10^{10} L_{\odot}$ et cette augmentation peut durer plusieurs mois.

c) L'étoile nova perd une petite partie de sa masse à chaque « explosion » qu'elle subit; la supernova perd la majeure partie de sa masse, quand elle ne disparaît pas complètement.

G3.18 En vertu de la loi de conservation du moment cinétique, plus une étoile se contracte, plus sa vitesse de rotation doit augmenter.

G3.19

1. À cause du vent stellaire, ou vent solaire dans le cas particulier du Soleil.
2. En expulsant une partie de l'hydrogène « emprunté » au préalable à une compagne (phénomène des novæ et des supernovæ de type I).
3. En éjectant une nébuleuse planétaire, lorsque l'étoile est devenue une supergéante rouge.
4. En explosant (phénomène des supernovæ).
5. En se faisant arracher une partie de sa masse par une compagne, qui peut être un trou noir.
6. Toutes les étoiles perdent une partie de leur masse lors de leur fonctionnement « normal » : leur énergie provient de la transformation de matière en énergie lors des réactions de fusion.

G3.20 Une étoile donne lieu à une supernova si sa masse initiale est comprise entre $8-10 M_{\odot}$ et $40 M_{\odot}$. Elle devient un trou noir si sa masse initiale est supérieure à $20-30 M_{\odot}$.

MODULE 4

- G4.1
- a) Il est impossible de prouver par des observations que l'Univers est fini ou infini; seuls les modèles d'univers seront soit finis, soit infinis.
 - b) Lorsque l'on parle de masse totale de l'Univers, c'est celle que l'on peut déduire des observations des mouvements des galaxies; il s'agit d'une propriété de l'Univers et non des modèles que l'on peut concevoir (qui peuvent même être sans masse!).
 - c) Ce sont des observations (décalages vers le rouge) qui ont amené l'idée de l'expansion de l'Univers.
 - d) Cette phrase, isolée, est difficile à interpréter : il faut supposer qu'elle fait partie d'un texte qui décrit un univers quelconque, en expansion. Il est donc question ici de l'expansion de l'univers que l'on est en train de décrire.
 - e) Un modèle de l'Univers est un modèle qui doit s'accorder avec nos observations de l'Univers.
 - f) Un modèle d'univers (on peut dire tout simplement « un univers ») est tout modèle que l'on peut imaginer, qu'il ait ou non un lien avec l'Univers observable.
 - g) Il est impossible de démontrer, à moins de pouvoir se déplacer partout dans un univers (ce qui implique un nombre infini de déplacements si l'Univers est infini), que l'univers est homogène. C'est le principe cosmologique qui nous amène à considérer que l'univers est homogène.
 - h) Ce sont les observations qui montrent que l'Univers est isotrope.
 - i) Il s'agit évidemment du modèle que construisit Einstein, qui n'a pas nécessairement de lien avec notre Univers.
- G4.2
- a) Cosmologie.
 - b) Cosmogénèse et, possiblement, de la cosmologie en même temps.
 - c) Cosmogonie.

- G4.3
1. On a imaginé que la limite de l'univers pouvait être un mur, donc que le javelot rebondirait vers l'intérieur de l'univers. Le problème de cette conception est qu'elle oblige à admettre qu'un mur ait une dimension d'un côté, le nôtre, mais pas de dimension de l'autre, car de l'autre côté c'est le néant, et le néant ne peut avoir de dimension, semble-t-il.
 2. D'après Aristote, tout objet lancé vers le haut doit retomber, sauf s'il se transmute en éléments éthériques, ce qui lui permet de franchir la sphère lunaire. Il adopte alors le mouvement naturel dans cette région de l'univers, soit le mouvement circulaire uniforme. Il ne pourra donc jamais atteindre quelque limite que ce soit. L'évidence expérimentale que les lois de la nature sont les mêmes partout dans l'Univers a mis au rancart de telles conceptions, qui demandent que les lois physiques soient différentes en différents lieux.
 3. On a aussi pensé que le javelot, en franchissant la frontière de l'univers, augmenterait par le fait même la dimension de ce dernier. Le problème est qu'il faut alors supposer qu'il y a un espace en dehors de l'univers, espace où le javelot peut se déplacer; or, ceci contredit l'idée que l'espace fait partie de l'univers, et que l'on ne peut donc observer ce dernier de l'extérieur pour voir venir le javelot.

Selon le point de vue contemporain, l'univers n'a pas de frontières; il est soit fini mais replié sur lui-même comme la surface d'un ballon, soit infini.

G4.4 Pour Aristote, les mouvements au-delà de la sphère lunaire étaient d'un autre type que ceux que l'on pouvait observer sur Terre. Sur cette dernière, le mouvement naturel des objets était le mouvement vertical, vers le haut ou le bas selon la nature des objets. Au-delà de la sphère lunaire, c'était le mouvement circulaire uniforme qui devenait le seul mouvement possible.

G4.5 La réponse est non. On a dû ajouter au modèle de Copernic, afin d'expliquer les mouvements des planètes avec la même précision que celui de Ptolémée, des « trucs » comme des épicycles et des orbites (bien que circulaires) décentrées par rapport au Soleil. C'est la découverte des lois de Kepler qui a permis d'offrir une solution de rechange réellement plus simple.

- G4.6
- a) 10 m (3 m pour une forêt très dense formée de petits arbres)
 - b) 3 m
 - c) 300 m (100 m dans certains nouveaux développements)
 - d) 30 km

- G4.7 a) L'isotropie de l'Univers signifie que peu importe la direction dans laquelle on observe l'Univers, on trouve toujours le même genre d'objets, en même quantité. L'homogénéité implique que peu importe où l'on se place, on trouve toujours, dans un volume donné, à peu près le même genre et le même nombre d'objets.
- b) Il faut ajouter que l'isotropie et l'homogénéité n'ont de sens que si l'on considère de grandes échelles de distance (pour l'isotropie) ou de grands volumes (pour l'homogénéité), soit plus de 100 millions de parsecs (pc).
- G4.8 a) Il n'y a aucune raison pour que notre système solaire soit le seul dans l'Univers.
- b) Il n'y a pas de centre dans l'Univers.
- c) Si l'on pousse la fidélité au principe cosmologique jusqu'au bout, nous devons conclure que d'autres êtres sont probablement en train de faire la même démarche que nous.
- G4.9 a) La vitesse de récession des galaxies est proportionnelle à la distance qui nous sépare d'elles.
- b) C'est le paramètre (noté H) qui relie la vitesse de récession ($v_{\text{réc}}$) et la distance (D) : $v_{\text{réc}} = H \times D$
- G4.10 Les galaxies peuvent posséder aussi des vitesses dues à leur interaction avec d'autres galaxies; par exemple, deux galaxies peuvent tourner autour de leur centre de masse commun. Si cette vitesse est plus grande que la vitesse de récession – ce qui risque d'arriver surtout pour les galaxies proches de nous, dont la vitesse de récession est faible – et qu'elle est dirigée vers nous, la galaxie en question va en fait se rapprocher de nous, d'où le décalage vers le bleu. Ces observations ne remettent donc aucunement en question l'hypothèse de l'expansion de l'Univers.
- G4.11 Les réponses sont **b** et **d**. La réponse **e** pourrait aussi être acceptable si l'on pense à la radiation que l'on observe en provenance des galaxies lointaines – ou la radiation émise de la Terre et qui pourrait être observée, dans des millions d'années, par quelqu'un vivant dans une autre galaxie...
- G4.12 a) C'est l'inverse du paramètre de Hubble ($1/H$). La période de Hubble serait égale à l'âge de l'univers dans un univers où l'expansion est uniforme. Or, cette expansion a pu varier depuis le début des temps.
- b) La sphère de Hubble correspond à la distance parcourue par la lumière pendant une période de Hubble. Sa taille dans un univers d'Einstein-de

Sitter augmente avec le temps, selon la relation $3ct/2$, où t est l'âge de l'univers.

G4.13 a) On peut calculer la réponse selon les trois méthodes suivantes.

En premier lieu, on l'obtient directement si l'on considère que la longueur d'onde de la lumière émise et le facteur d'échelle (et donc toutes les distances d'ordre cosmologique) ont été multipliés durant cet intervalle par le même facteur, soit 5,4.

On peut aussi déterminer les valeurs de la distance à l'émission (d) et de la distance actuelle (D) à l'aide des figures G-4.6 ou G-4.7. Le graphique du haut de la figure G-4.6 peut être utilisé directement, mais celui de la figure G-4.7 peut l'être aussi, et fournit une meilleure précision, même si les courbes sont données pour un décalage vers le rouge allant jusqu'à 5. En effet, on peut extrapoler les valeurs des deux distances pour un décalage égal à 5,4 en prolongeant légèrement les courbes illustrées au graphique du haut de la figure G-4.7 selon leur allure générale. On obtient ainsi les valeurs de 17 Ga.l. et 3,1 Ga.l. pour les distances actuelle et à l'émission, soit un rapport de 5,5 environ.

Enfin, on peut aussi calculer ces distances à l'aide des équations 10.8 et 10.9. Avec un facteur d'échelle e de 0,185 ($e = 1/\delta$), on trouve :

$$d = 30e(1 - \sqrt{e}) = 30 \times 0,185(1 - \sqrt{0,185}) = 3,16 \text{ Ga.l.}$$

et :

$$D = 30(1 - \sqrt{e}) = 30(1 - \sqrt{0,185}) = 17,1 \text{ Ga.l.}$$

b) La galaxie n'a pas augmenté de volume, car les galaxies sont composées d'étoiles liées entre elles par la gravitation et que, par conséquent, elles ne participent pas à l'expansion de l'Univers.

G4.14 a) $\delta = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{norm}} = 700 / 200 = 3,5$ (voir équation 9.3)

b) D'après le graphique du haut de la figure G-4.7, ces distances sont environ $D = 14$ Ga.l. (distance actuelle) et $d = 4$ Ga.l. (distance à l'émission). Avec un facteur d'échelle ($e = 1/\delta$) de 0,29, on obtient à l'aide des équations 10.8 et 10.9 des valeurs comparables :

$$d = 30e(1 - \sqrt{e}) = 30 \times 0,29(1 - \sqrt{0,29}) = 4 \text{ Ga.l.}$$

$$D = 30(1 - \sqrt{e}) = 30(1 - \sqrt{0,29}) = 13,8 \text{ Ga.l.}$$

- c) D'après le second graphique de la figure G-4.7, environ 8,4 milliards d'années.

On obtient une valeur comparable à l'aide de l'équation suivante (voir tableau G-4.1) :

$$\Delta t = t_A \left(1 - \frac{1}{\delta^{3/2}} \right) = 10 \left(1 - \frac{1}{(3,5)^{3/2}} \right) = 8,47 \text{ Ga}$$

- d) D'après le graphique de la figure G-4.11, ces distances sont (approximativement) $D = 19,2 \text{ Ga.l.}$ (distance actuelle) et $d = 5,5 \text{ Ga.l.}$ (distance à l'émission). D'après celui de la figure G-4.12, le temps mis à la lumière pour nous parvenir est de 11,0 Ga. En guise de comparaison, le calculateur en ligne de Ned Wright donne $D = 19,3 \text{ Ga.l.}$, et 11,0 Ga pour la durée du trajet.

- G4.15 Selon le graphique du haut de la figure G-4.7, la lumière émise par une étoile alors située à une distance de 3,5 Ga.l. de la Terre peut présenter l'un ou l'autre des décalages vers le rouge suivants : 1,5 ou 4,5.

Dans le premier cas, selon le même graphique, cette étoile se trouve actuellement à une distance d'environ 5,5 Ga.l., et selon le graphique du bas de la même figure, la lumière que l'on reçoit a mis environ 4,7 Ga pour nous parvenir. On peut vérifier ces valeurs à l'aide des équations suivantes (où $e = 1/\delta = 0,67$) :

$$D = 30(1 - \sqrt{e}) = 30(1 - \sqrt{0,67}) = 5,4 \text{ Ga.l.}$$

$$\Delta t = t_A \left(1 - \frac{1}{\delta^{3/2}} \right) = 10 \left(1 - \frac{1}{(1,5)^{3/2}} \right) = 4,6 \text{ Ga}$$

Dans le second cas ($\delta = 4,5$ et $e = 0,22$), les valeurs lues sur le graphique sont respectivement 16 Ga.l. et 9,0 Ga, et le calcul donne :

$$D = 30(1 - \sqrt{e}) = 30(1 - \sqrt{0,22}) = 15,9 \text{ Ga.l.}$$

$$\Delta t = t_A \left(1 - \frac{1}{\delta^{3/2}} \right) = 10 \left(1 - \frac{1}{(4,5)^{3/2}} \right) = 9,0 \text{ Ga}$$

- G4.16 a) $v_{\text{rec}} = HD$; en exprimant la distance actuelle en parsecs ($20 \text{ Ga.l.} = 6,13 \times 10^3 \text{ Mpc}$), on obtient $v_{\text{rec}} = 65 \times 6,13 \times 10^3 = 3,98 \times 10^5 \text{ km/s}$. Cette vitesse est supérieure à celle de la lumière, mais elle est tout de

même possible puisque la limite de vitesse relativiste ne s'applique pas lorsque l'on considère l'expansion de l'Univers. La vitesse de récession n'est pas une vitesse ordinaire; elle n'est pas due au mouvement de la galaxie à travers l'espace, mais est plutôt associée à l'expansion de l'espace entre les galaxies.

- b) Puisqu'il est question de la lumière émise actuellement par une galaxie, il faut utiliser le graphique du bas de la figure G-4.9; d'après celui-ci, cette lumière nous parviendra dans environ 35 Ga.
- c) Selon le tableau G-4.1, le décalage vers le rouge est égal au facteur d'échelle à la réception; il vaut :

$$e_R = \left(1 + \frac{r_A}{30}\right)^2 = \left(1 + \frac{20}{30}\right)^2 = 2,78$$

On peut aussi à partir de cette valeur calculer le temps mis par les photons émis par cette galaxie pour nous parvenir :

$$\Delta t = t_A (e_R^{3/2} - 1) = 10 (2,78^{3/2} - 1) = 36 \text{ Ga}$$

APPENDICES

- A1.1 a) $3,28763 \times 10^4$ b) $7,6 \times 10^{-3}$
 c) $2,2 \times 10^8$ d) $3,21 \times 10^{-5}$
- A1.2 a) $2,31 \times 10^7$ b) $6,43 \times 10^4$
 c) $4,59 \times 10^{-5}$ d) $4,7 \times 10^{-8}$
 e) $2,945 \times 10^2$ f) 6,19 (10^0 ne s'utilise pas)
 g) Cas problème : on devrait écrire $3,614 \times 10^1$, mais 10^1 ne s'utilise pas. On écrit donc 36,14.
- A1.3 a) $5,01 \times 10^4$ b) $1,88 \times 10^{-2}$
 c) $3,964 \times 10^{14}$ d) $7,3 \times 10^{-2}$
 e) $7,35 \times 10^{-8}$ f) $5,97 \times 10^{11}$
 g) $3,28 \times 10^{-3}$

A2.1 a) 8,3 m/s (Voir la première série d'exemples pour le premier type d'opération.)

$$b) 980 \frac{\cancel{\text{cm}}}{\text{s}^2} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \cancel{\text{cm}}} = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$c) 0,135 \frac{\cancel{\text{MW}}}{\text{cm}^2} \times \frac{10^6 \text{ W}}{1 \cancel{\text{MW}}} \times \frac{(100 \cancel{\text{cm}})^2}{(1 \text{ m})^2} = \frac{1,35 \times 10^5 \text{ W}}{\cancel{\text{cm}^2}} \times \frac{10^4 \cancel{\text{cm}^2}}{1 \text{ m}^2}$$

$$= 1,35 \times 10^9 \text{ W/m}^2 \text{ ou } 1,35 \text{ GW/m}^2$$

$$d) 2\,400 \cancel{\text{kW} \cdot \text{h}} \times \frac{1\,000 \text{ W}}{1 \cancel{\text{kW}}} \times \frac{3\,600 \text{ s}}{1 \cancel{\text{h}}} = 8,64 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{s} \text{ (ou J)}$$

A2.2 a) $t = \frac{v}{a}$ c) $t = \frac{2bc}{a}$ e) $t = \frac{3Td}{a}$

b) $t = c/T$ d) $t = \frac{2ac}{v}$

A2.3 On isole d'abord l'inconnue : $d = vt$ devient $t = d/v$.

On exprime ensuite les données à l'aide d'unités de base SI :

$$30 \cancel{\text{cm}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \cancel{\text{cm}}} = 0,30 \text{ m}$$

$$150 \frac{\cancel{\text{km}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{1\,000 \text{ m}}{1 \cancel{\text{km}}} \times \frac{1 \cancel{\text{h}}}{3\,600 \text{ s}} = 41,7 \text{ m/s}$$

On effectue enfin le calcul :

$$t = d/v = 0,30 / 41,7 = 7,2 \times 10^{-3} \text{ s ou } 7,2 \text{ ms}$$

La réponse est automatiquement exprimée en unités de base SI, des secondes dans ce cas.

A2.4 Il faut d'abord exprimer les données du problème à l'aide des unités de base SI (voir la section 1) :

$$a = 0,2 \text{ m/s}^2 \qquad d = 4,80 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$b = 1,16 \times 10^{-9} \text{ m/s}^3 \qquad v = 2,78 \text{ m/s}$$

$$c = 2,85 \times 10^7 \text{ s}^2 \qquad T = 90 \text{ s}$$

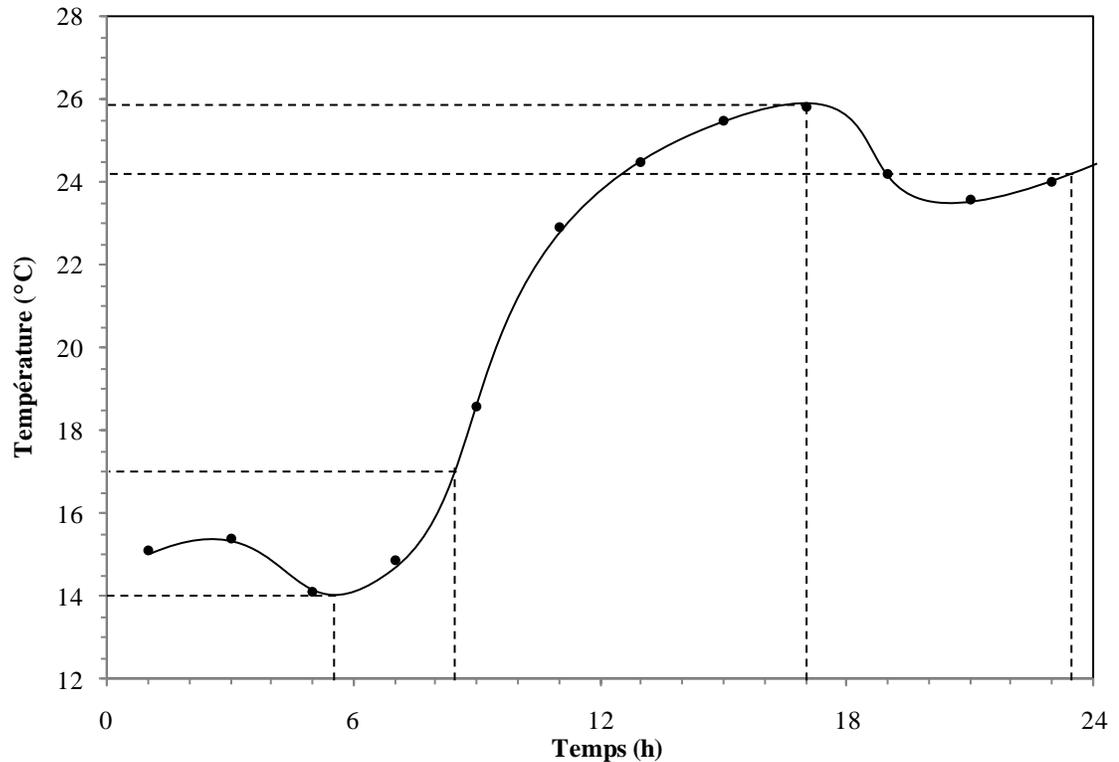
En substituant ces valeurs dans les expressions de l'exercice A2.2, on obtient pour chacune la valeur de t en *secondes*. On peut par la suite, si on le désire, exprimer cette valeur à l'aide d'autres unités.

- a) $t = 13,9$ s b) $t = 3,17 \times 10^5$ s (ou 88 h)
 c) $t = 0,33$ s d) $t = 4,1 \times 10^6$ s (ou 47 d) e) $t = 64,8$

A2.5 La vitesse de la lumière est de $3,0 \times 10^8$ m/s. En exprimant la distance à l'aide des unités de base SI et en suivant la méthode présentée à l'exercice A2.3, on obtient $t = 500$ s ou 8,3 min.

- A3.1 a) Environ 132 km/h c) 136 km/h à $t = 68$ s environ
 b) À $t = 37$ s et 86 s, environ.

A3.2 a) Voir le graphique qui suit.



- b) Environ 14,0 °C vers 5 h 20.
 c) Environ 25,8 °C vers 17 h
 d) 17,0 °C à 7 h 30 et 24,2 °C à 23 h 30.

- e) Elle devrait être plus beaucoup plus chaude, car la température à 24 h (minuit) est d'environ 10°C plus élevée que la veille à la même heure (près de 24,5°C au lieu de 14,5°C).

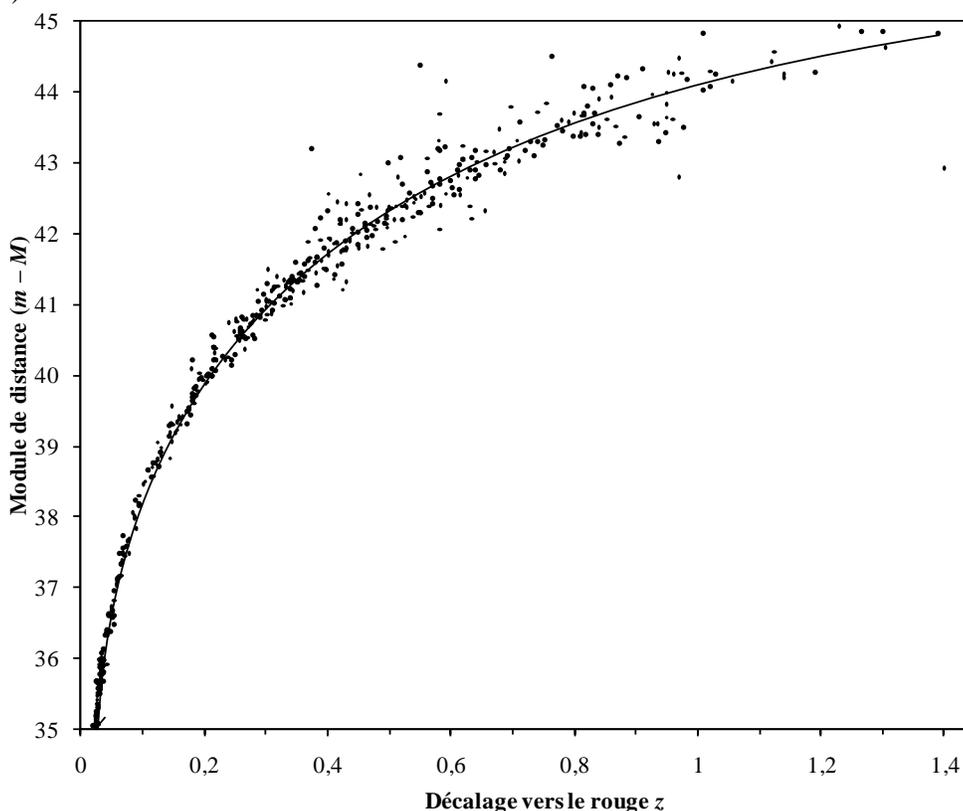
A3.3 a) Cylindrée : 1,3 litre à 5,6 litres.

Consommation : 4,4 L/100 km à 11,0 L/100 km.

- b) Elle devrait se situer entre 8,5 L/100 km et 10,5 L/100 km pour un moteur à essence, moins de 8 L/100 km pour un moteur diesel et autour de 6 L/100 km pour une motorisation hybride.

A3.4 a) Plus le décalage vers le rouge est élevé, plus le module de distance augmente; l'augmentation, très rapide aux faibles décalages (inférieurs à 0,2), devient beaucoup plus faible aux décalages supérieurs à 1.

b)



- c) Environ 0,09; la valeur est certainement comprise entre 0,085 et 0,095.
- d) Autour de 0,96, mais sa valeur pourrait en fait très bien se situer n'importe où entre 0,8 et 1,2.
- e) La précision est bonne pour de faibles décalages mais diminue beaucoup à partir d'un décalage d'environ 0,5.

TÉLUQ
PHY 2001

ISBN 978-2-7624-2467-6



9 782762 424676