



Cahier
d'exploration
du ciel Yaël NAZÉ



2.
Mesurer
l'Univers

Introduction

Déjà parus* :

- *Sur la piste des planètes*, Yaël **NAZÉ**
- *Lentilles gravitationnelles*, Jean **SURDEJ**
- *Cahier d'exploration du ciel I. Découvrir l'Univers*, Yaël **NAZÉ**
- *La cuisine du cosmos. Cahier de (G)astronomie*, Yaël **NAZÉ**

*Plus d'informations sur le site de Réjou**sciences**

Références

Nazé (Yaël), *L'Astronomie des Anciens*, Paris, Belin, 2009.

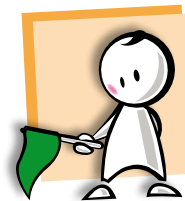
Nazé (Yaël), *Cahier d'exploration du ciel I. Découvrir l'Univers*, Liège, Réjou**sciences**, 2009 (réédition 2011).

Universe at your fingertips, édité par l'Astronomical Society of the Pacific

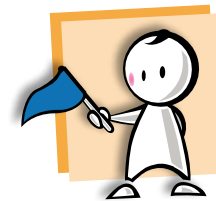
Ce deuxième cahier d'exploration du ciel se concentre sur des activités liées à la mesure. Taille, durée, distance,... constituent en effet les bases qui permettent aux astronomes de comprendre l'Univers.

Le public-cible est identique à celui du premier cahier : les élèves de 10 à 15 ans et leurs professeurs, ainsi que le grand public désireux de savoir «comment ça marche». La pédagogie est également similaire : textes, expériences, bricolages et questionnaires se succèdent, vous permettant de jouer le rôle de l'astronome, antique ou moderne. Comparés à ceux du premier cahier, les textes de ce deuxième manuel sont plus courts, laissant encore plus de place aux bricolages et aux expériences.

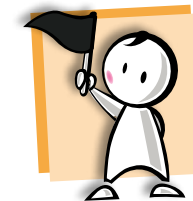
Pour les fans de science, certains exercices pratiques sont de niveau plus avancé que les expériences du premier cahier. Ils sont repérés par un drapeau noir, les expériences simples étant signalées par un vert et celles de niveau moyen par un bleu.



Niveau facile



Niveau moyen



Niveau difficile

Remerciements

L'auteure tient particulièrement à remercier C. Morrisset pour des discussions « solaires » ; C. Cattelain et P. Demoulin pour leurs photos spectroscopiques ; R. Godefroid et G. Ghistelincq pour leur relecture ; l'équipe de Réjou**sciences** et M. Housen pour la réalisation de ce cahier et bien sûr M. Vanherck, pour son soutien sans faille... Ses remerciements vont également à la DG06 (Service Public de Wallonie), sans le soutien financier de laquelle ce second cahier d'exploration du ciel n'aurait pu voir le jour.

Prérequis : notions de base de géométrie (savoir ce qu'est un cercle, son diamètre, son rayon, son aire et sa circonférence ; un triangle, un angle, la perpendicularité) et de géographie (latitude et longitude).

Table des matières

1. Mesurer notre position

Bricolage	1.1 > Navigation celeste	10
Expérience	1.2 > Oh, la Polaire !	12
Questionnaire		13

2. Mesurer l'heure, l'année, et même la Terre

Bricolage	2.1 > Le cadran solaire	17
Bricolage	2.2 > La montre-boussole	21
Bricolage	2.3 > Mon calendrier-horloge perpétuel	23
Expérience	2.4 > Le temps de la Terre	26
Expérience	2.5 > Ombre ou pas ombre	28
Expérience	2.6 > Grande comment, la Terre ?	29
Questionnaire		31

3. Mesurer la Lune

Calculs	3.1 > La taille, la distance et la vitesse de la Lune	36
Expérience	3.2 > Et pourtant, elle tourne !	39
Questionnaire		41

4. Mesurer le relief des planètes

Calculs	4.1 > Calculs lumineux	46
Expérience	4.2 > La lumière comme outil	47
Expérience	4.3 > Cartographier la planète mystère	48
Questionnaire		49

5. Mesurer les autres planètes

Expérience	5.1 > Délicat équilibre	55
Expérience	5.2 > Ça ne tourne pas rond !	56
Expérience	5.3 > La ronde planéto-stellaire	57
Exercice	5.4 > Tu bouges ou tu bouges pas ?	58
Exercice	5.5 > Un bon transit	59
Questionnaire		63

6. Mesurer la distance des étoiles

Calculs	6.1 > Le bon angle	67
Expérience	6.2 > Une étoile qui a la bougeotte	68
Questionnaire		69

7. Mesurer la lumière

Bricolage	7.1 > L'analyseur de lumière	74
Questionnaire		77

8. Prendre la mesure de l'univers

Bricolage	8.1 > Petit pois ou gros ballon ?	80
Bricolage	8.2 > Un mètre de Système solaire	81
Calculs	8.3 > Échelon supérieur	82
Expérience	8.4 > La ronde planéto-stellaire	83
Questionnaire		85
Calculs	8.5 > Le calendrier cosmique	87

9. Solutions

A satellite view of the Mediterranean region, showing Sicily and the Italian peninsula. A green square highlights the text '1. Mesurer notre position'.

1. Mesurer notre position

*Fig. 1.1 La Sicile et la botte de l'Italie, vues depuis l'espace.
Le volcan Etna, en éruption, est facilement repérable par son panache de fumée. © NASA*

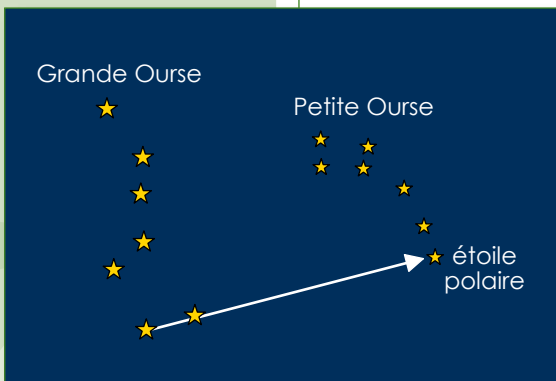
1. Mesurer notre position

A l'heure des systèmes de positionnement par satellite (par ex. GPS), savoir où l'on se trouve ne pose plus aucun problème. Il n'en a pourtant pas toujours été ainsi. Alors comment faisait-on sans jouer « high-tech » pour se repérer? Le seul outil dont disposaient les « anciens », était... le ciel. Il leur a bien servi, puisqu'on ne compte plus les explorations, en mer ou sur terre, faites par nos ancêtres.

Les champions de l'exploration et de la navigation étaient les Polynésiens. Ces derniers devaient être capables de naviguer sans se tromper dans l'immense Océan Pacifique parsemé ci et là de petites îles. Pour y arriver, les Polynésiens ont étudié les courants marins et les positions des étoiles... Tout cela leur a permis de développer un commerce intense entre Hawaï et Tahiti, l'Île de Pâques ou encore la Nouvelle-Zélande.

Par une nuit bien claire, les astres montrent tout leur éclat: c'est le bon moment pour les regarder de plus près! Au bout d'un instant, une étoile peu brillante vous semblera avoir un comportement étrange: elle semble fixe alors que tous les autres astres paraissent tourner autour d'elle. C'est l'étoile polaire. D'un jour à l'autre, cette brave compagne se montre fidèle: elle apparaît toujours au même endroit du ciel... Une propriété bien pratique pour retrouver le Nord, que cet astre indique sans faillir.

Fig. 1.2 Étoile polaire

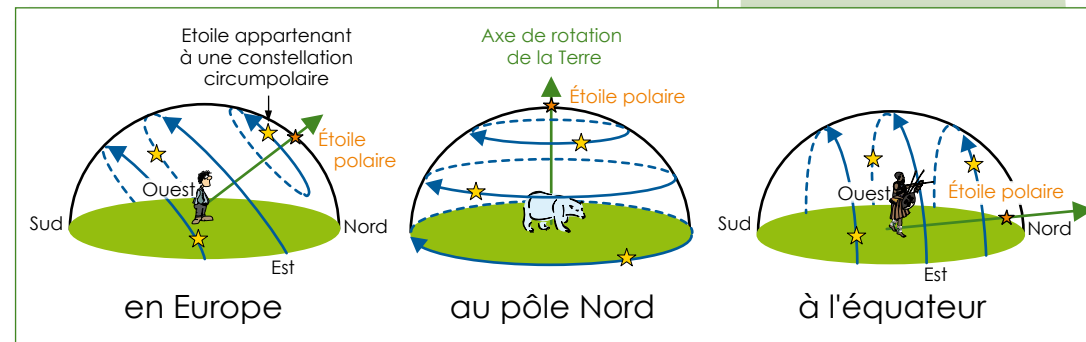


Comment trouver l'étoile polaire sans devoir attendre des heures pour repérer le seul astre qui ne bouge pas? Facile, il suffit de trouver les étoiles brillantes de la Grande Ourse, qui forment une espèce de casserole et de prolonger le bord de celle-ci.

Pour savoir pourquoi l'étoile polaire reste fixe, voir Cahier I, Exp. 3.1

1. Mesurer notre position

Toutefois, si l'on voyage, on se rend vite compte que l'étoile polaire bouge. Elle se trouve plus haut quand on voyage vers le Nord ou plus bas sur l'horizon quand on voyage vers le Sud. En fait, sa hauteur sur l'horizon indique la latitude du lieu où l'on se trouve (voir Bric. 1.1). La Polaire est donc bien une alliée précieuse des voyageurs (Fig. 1.3 et Exp. 1.2).



Évidemment, tout ceci n'est valable que pour l'hémisphère Nord. Existe-t-il une « étoile polaire » australe? Hélas non! Il existe pourtant bien l'équivalent du pointeur de la Polaire (la Grande Ourse, qui indique la direction de l'étoile polaire): c'est la Croix du Sud (Fig. 1.4). Il n'y a par contre aucun astre repérable facilement à la position du pôle (céleste) Sud...

Fig. 1.3 Du pôle Nord (90° de latitude) l'équateur (0°), la position de l'étoile polaire change.



Fig. 1.4 La croix du Sud © Y. Beletsky



Bricolage 1.1 > Navigation céleste

Matériel:

- Une feuille de carton
- Des ciseaux
- Du papier collant
- Une grosse paille
- Un bout de ficelle de 15 centimètres environ
- Une grosse boule de papier mâché ou un petit poids
- Une nuit claire

CONSTRUCTION

Reproduire le triangle ci-dessous (Fig. 1.5) sur la feuille de carton. Percer un trou en haut du triangle et nouer à cet endroit une des extrémités de la ficelle. À l'autre bout de la ficelle, attacher le poids ou le papier mâché. À l'aide du papier collant, coller la paille sur un des côtés du triangle: le viseur polaire est prêt.

Fig. 1.5 Plan du viseur polaire

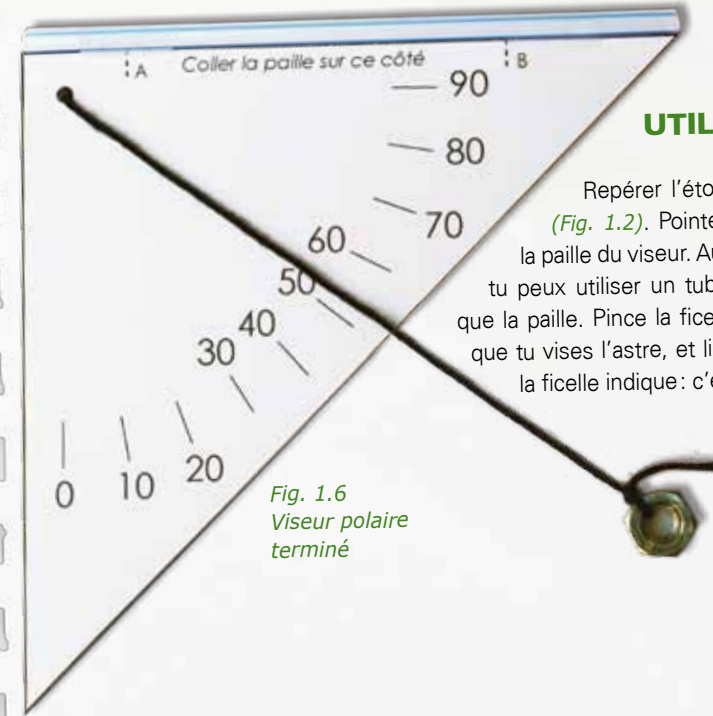
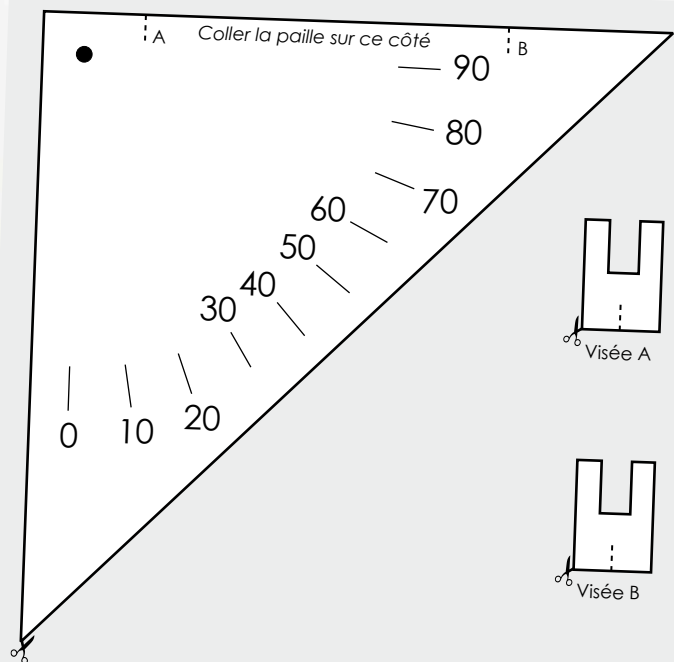


Fig. 1.6 Viseur polaire terminé

UTILISATION

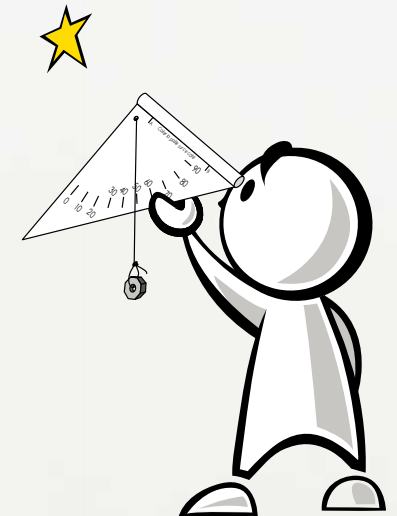
Repérer l'étoile polaire dans le ciel (Fig. 1.2). Pointer ensuite l'étoile avec la paille du viseur. Au début, pour t'exercer, tu peux utiliser un tube en carton plus gros que la paille. Pince la ficelle sur le triangle alors que tu vises l'astre, et lis ensuite la valeur que la ficelle indique: c'est ta latitude.

ALTERNATIVE

À la place de la paille, on peut utiliser les deux petits « U » du système de visée fourni ci-contre (Fig. 1.5), à installer aux endroits indiqués.

ATTENTION

Viser directement le Soleil avec cet appareil provoque des lésions irréparables aux yeux! Pour prendre la hauteur du Soleil avec ce viseur: tourner le dos au Soleil, tenir le triangle au-dessus de l'épaule (pour qu'il soit éclairé) et mettre sa main près de l'appareil, à l'opposé du Soleil. Incliner l'appareil jusqu'à minimiser son ombre sur la main et obtenir des rayons solaires qu'ils passent par le trou de la paille. On repérera ainsi que la hauteur du Soleil varie avec l'heure de la journée et le moment de l'année (voir Chapitre suivant).





Expérience 1.2 > Oh, la Polaire!

Matériel:

- Un globe terrestre
- Des bonshommes lego (ou des pailles pliées dont on a raccourci les deux parties pour en faire un bonhomme et son bras)
- Du papier collant
- Une étoile de couleur (par ex. découpée dans un carton coloré)
- Une pièce haute de plafond

CONSTRUCTION

Coller au plafond de la pièce l'étoile de couleur (elle jouera le rôle de l'étoile polaire). Disposer le globe en-dessous, avec l'axe terrestre bien dirigé vers l'étoile. Disposer ensuite des bonshommes à diverses latitudes (Pôle, Europe, Équateur,...) à l'aide du papier collant. Indiquer avec leur bras la direction de la Polaire (Fig. 1.7).

Étoile polaire

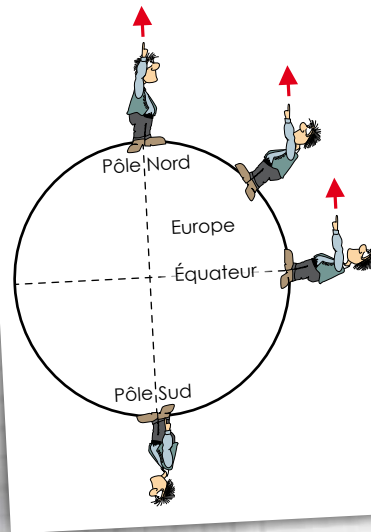


Fig. 1.7

La direction de la Polaire varie avec la position sur Terre - les personnes de l'hémisphère Sud ne pouvant même pas la voir du tout.

CONCLUSION

Au pôle Nord, la Polaire apparaît au-dessus de la tête du bonhomme (un point que l'on appelle le zénith); à l'équateur, elle se trouve pile sur l'horizon (le bras du bonhomme est horizontal, soit parallèle au sol); en Europe, l'étoile se trouve à mi-chemin entre le zénith et l'horizon.



EXTENSION

On peut également construire le petit bricolage se trouvant en pages 2 et 3 de www.planetarium-provence.com/instrumentsgrandesdecouvertes2.pdf et expliqué en page 1 de www.planetarium-provence.com/instrumentsgrandesdecouvertes1.pdf

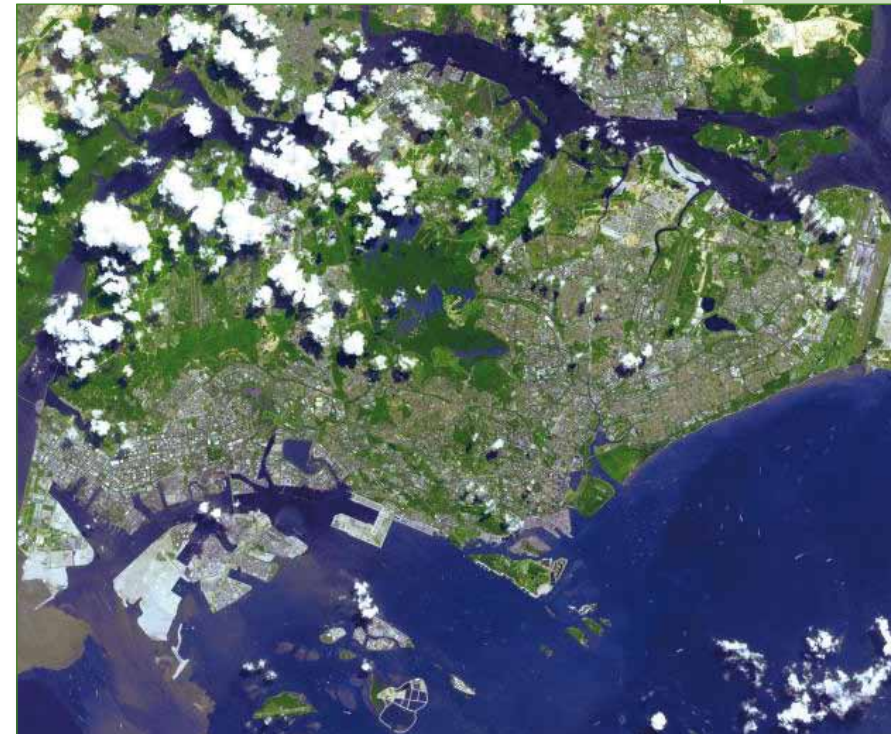
Questionnaire: Vrai ou faux?

1. Sans GPS, impossible de trouver la latitude.
Vrai - Faux
2. L'étoile polaire ne change pas de position au cours de la nuit.
Vrai - Faux
3. L'étoile polaire change de position au cours de l'année.
Vrai - Faux
4. L'étoile polaire indique toujours le Nord.
Vrai - Faux
5. Les anciens utilisaient les étoiles pour voyager.
Vrai - Faux

1. Mesurer notre position

Fig. 1.8
Singapour vu depuis l'espace

© NASA



A photograph of the Stonehenge monument at sunrise. The sun is a large, bright yellow circle in the upper right, partially obscured by a large white number '2' with a red square background. The sky is a gradient of orange and red, with silhouettes of trees and the Stonehenge stones in the foreground.

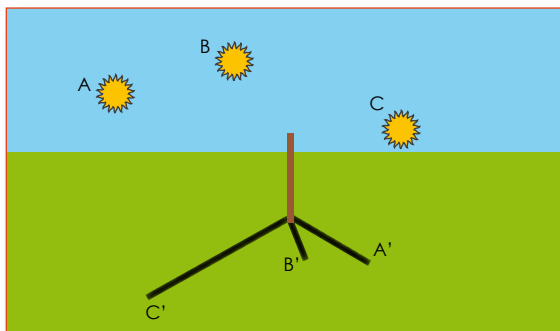
2. Mesurer l'heure, l'année et même la Terre

2. Mesurer l'heure, l'année et même la Terre

Le temps est un repère aussi indispensable que la latitude ou la longitude. Qui veut le mesurer utilise une horloge, et la plus simple est 100% naturelle et 100% gratuite !

Par une journée ensoleillée, on trouve facilement ce repère temporel : il s'agit du Soleil. Notre astre du jour se situe en effet côté Est le matin, au Sud à midi¹ et côté Ouest le soir : il change donc de direction (Fig. 2.3) ! Du coup, puisque la lumière solaire produit des ombres, celles-ci changent aussi de direction au fil du temps et du périple céleste du Soleil (Fig. 2.2). On peut donc utiliser le Soleil pour mesurer le temps qui passe : c'est le principe du cadran solaire (Bric. 2.1).

Fig. 2.2 L'ombre d'un bâton planté dans le sol (ce que l'on appelle un gnomon) suit le soleil et change donc de direction au cours de la journée. À noter que le Soleil ne change pas seulement de direction mais aussi de hauteur : du coup, les ombres à midi (B') sont plus courtes que celles du matin (A') ou celles du soir (C').



Il existe de nombreux cadrans solaires dans nos régions. Diverses associations les recensent et parfois les restaurent. Pour la Wallonie, citons le catalogue élaboré par la Société Astronomique de Liège, disponible sur www.societeastronomiquedeliege.be.

Fig. 2.3 Positions du Soleil observées au cours d'une journée depuis la Scandinavie à l'été 2005. Le Soleil change de hauteur et de direction.

© A. Berckerky



¹ Dans l'hémisphère Nord ; au Nord dans l'hémisphère Sud.



Bricolage 2.1 > Le cadran solaire

Matériel:

- Une feuille légèrement cartonnée
- Des ciseaux
- Une paille
- Du papier collant
- Une journée ensoleillée

CONSTRUCTION

Reproduire le schéma ci-dessous (Fig. 2.4) sur la feuille de carton. Recopier les heures du cadran au verso du carton. Découper suivant les indications et plier le long des lignes pointillées. Coller le rabat A sur le repère A, le B sur le B, etc. Faire un trou de la taille de la paille (on peut s'aider d'une perforatrice) au niveau du cercle noir. Faire ensuite passer la paille par le trou et glisser l'autre extrémité sur le petit embout replié.

UTILISATION

Poser le cadran solaire sur une table bien horizontale et positionner le côté ouvert du cadran vers le Sud dans un endroit ensoleillé (la paille indique alors la direction de l'étoile polaire) ; l'ombre portée par la paille indique l'heure solaire.

Fig. 2.4 Plan du cadran solaire équatorial

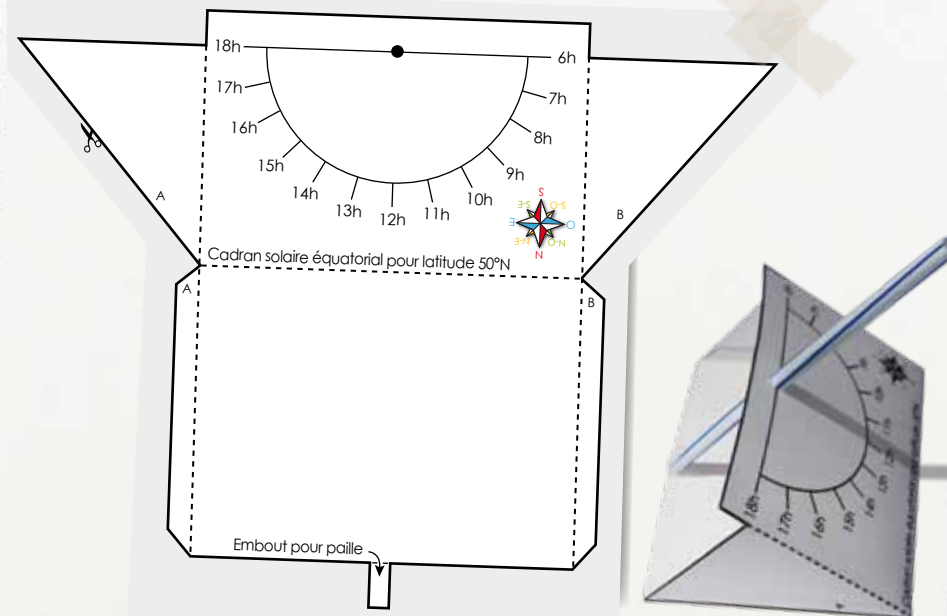


Fig. 2.5 Cadran solaire équatorial terminé



EXTENSION

Quelques autres cadrans solaires à reproduire sur papier cartonné.

- **Cadran plat:** Couper selon les indications le cadran de la Fig. 2.6. Couper ensuite deux côtés du triangle central et plier suivant le 3^e côté. Placer le cadran horizontalement en l'orientant selon les points cardinaux en s'aidant de la rose des vents.

Fig. 2.6 Plan du cadran plat

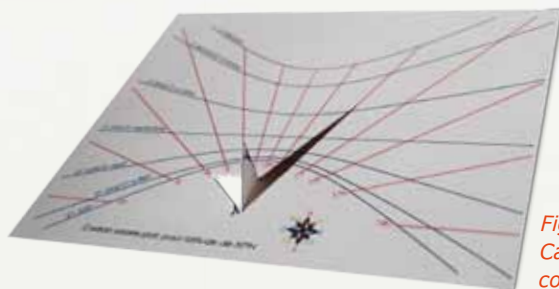
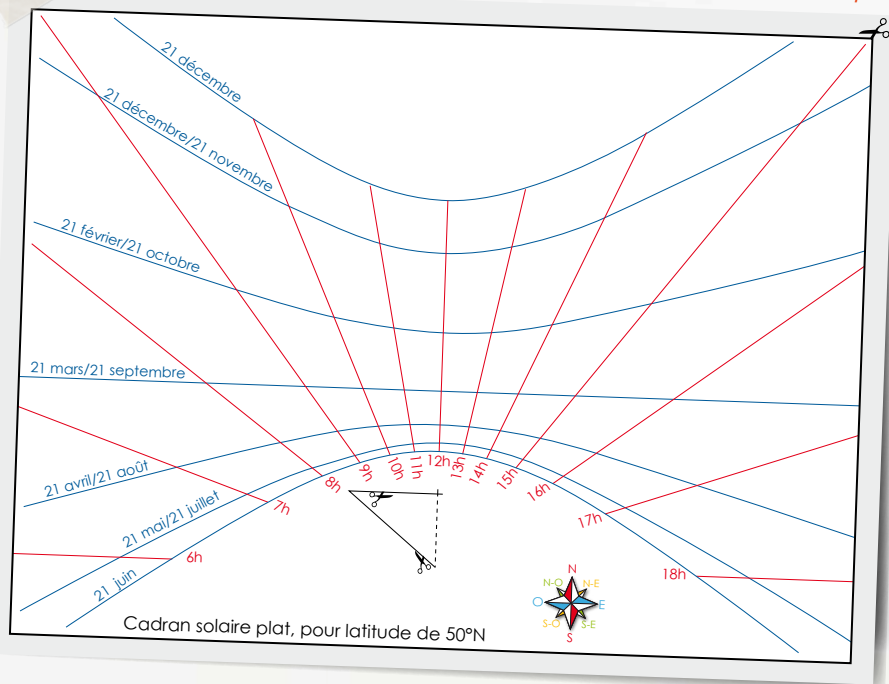


Fig. 2.7
Cadran plat
construit

- **Cadran de berger:** Couper selon les indications le cadran de la Fig. 2.8. Rouler le cadran pour en faire un cylindre ou coller le plan sur un rouleau de papier toilette. Positionner le triangle repère sur la partie supérieure, à la date du jour. Orienter le cadran pour que l'ombre soit la plus courte et la plus droite possible (c'est-à-dire mettre le repère pile en face du Soleil).

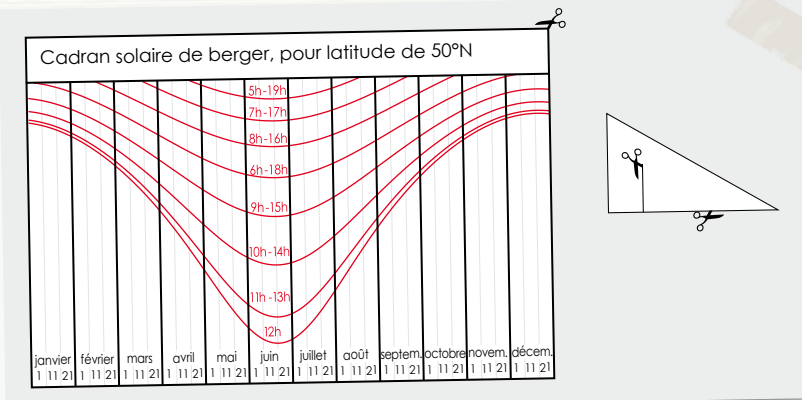


Fig. 2.8 Plan du cadran de berger

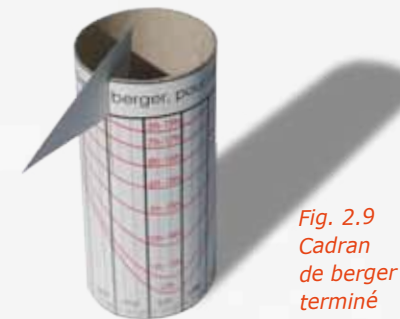


Fig. 2.9
Cadran
de berger
terminé

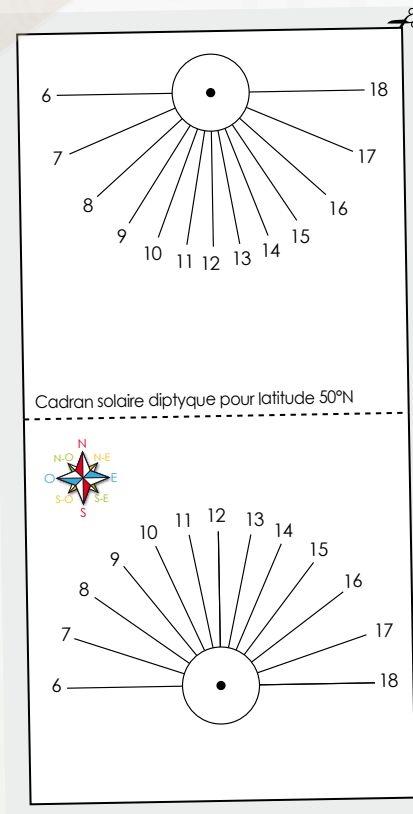


Fig. 2.10 Plan du cadran diptyque

- **Cadran diptyque:** Couper et plier selon les indications (Fig. 2.10). Attention, les deux faces doivent être bien perpendiculaires! Faire passer un fil à travers les deux points noirs, orienter le cadran ainsi formé selon les points cardinaux à l'aide de la rose des vents.

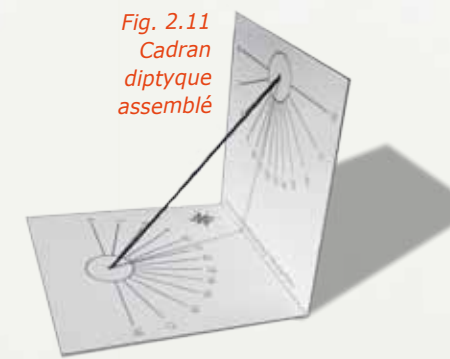


Fig. 2.11
Cadran
diptyque
assemblé

NOTE 1

Attention, ces cadrans sont faits pour une latitude de 50 degrés (Belgique, nord de la France). Si vous vous trouvez à une autre latitude, il faut les modifier et des logiciels gratuits peuvent alors être utiles (*Voir liens Page 24, Ext. 2*).

NOTE 2

L'heure solaire indiquée par les cadrans ci-dessus n'est pas l'heure de la montre, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous n'avons pas les mêmes heures en été et en hiver, alors que le Soleil ne fait pas un bond soudain dans le ciel les jours de changement d'heure ! Il faut donc ajouter une heure en hiver et deux heures en été à l'heure indiquée par le Soleil pour trouver l'heure de la montre. Ensuite, la Terre est divisée en 24 fuseaux horaires (*Cahier I, Exp. 1.3*). Dans chacun de ces fuseaux, l'heure est la même partout, même si elle n'est en réalité valable qu'au centre du fuseau. Comme nous ne nous trouvons pas exactement sur le méridien de référence (Greenwich pour l'Europe occidentale), l'heure donnée par un cadran solaire ne correspond donc pas parfaitement à l'heure de la montre. Il faut retirer ou ajouter à l'heure solaire 4 minutes par degré de longitude Est ou Ouest, soit par exemple retrancher vingt minutes pour la ville de Liège située à 5° de longitude Est par rapport au méridien de Greenwich. Enfin, non seulement la Terre est inclinée sur son orbite mais celle-ci n'est pas parfaitement circulaire. Le Soleil avance donc parfois vite, parfois lentement dans le ciel. Une horloge régulière (comme une montre) ne reflète pas ces changements (les heures ont la même durée quel que soit le moment de l'année) et il faut alors tenir compte d'une correction appelée « l'équation du temps » pour obtenir l'heure exacte.

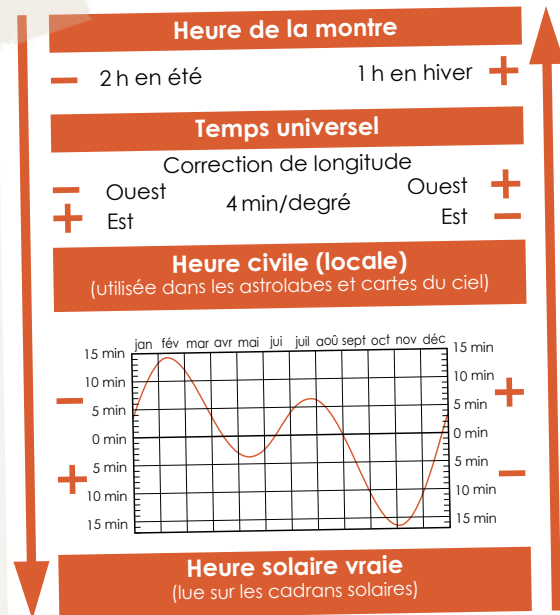


Fig. 2.12
Lien entre l'heure de la montre et celle du cadran solaire. Utiliser les signes côté gauche pour passer de l'heure de la montre à l'heure solaire vraie, et ceux du côté droit pour l'opération inverse.



Bricolage 2.2 > La montre-boussole

Matériel:

- Une montre à aiguilles
- Une brindille

À midi, heure solaire (Fig. 2.12), le Soleil se trouve au Sud. À la place de donner l'heure, le Soleil peut donc donner les directions cardinales (Nord, Sud, Est, Ouest) ! Deux possibilités s'offrent à vous. Tout d'abord, noter la longueur de l'ombre d'un bâton planté verticalement (Fig. 2.2). À midi, l'ombre sera la plus courte, et son tracé indiquera le Sud. Autre possibilité, plus expéditive : utiliser sa montre...

UTILISATION

Régler la montre sur l'heure solaire (Fig. 2.12, *flèche de gauche*) et ensuite la pointer vers le Soleil, de manière à ce que la petite aiguille indique la direction solaire. On peut s'en assurer en tenant une brindille verticalement : son ombre doit s'aligner avec la petite aiguille (Fig. 2.13). Il suffit alors de tracer mentalement la bissectrice entre la petite aiguille et le chiffre 12 : le Sud se trouve sur cette ligne, côté gauche du cadran le matin, côté droit l'après-midi (Fig. 2.14). Pourquoi couper l'angle en deux ? Simplement parce que le Soleil revient à la même position dans le ciel après 24h (car la Terre tourne sur elle-même en 24h) alors que la petite aiguille fait un tour de cadran en 12h... Si les cadrans de montre étaient divisés en 24 au lieu de 12, il suffirait de pointer le Soleil avec la petite aiguille, et le Sud se trouverait toujours dans la direction du 12...

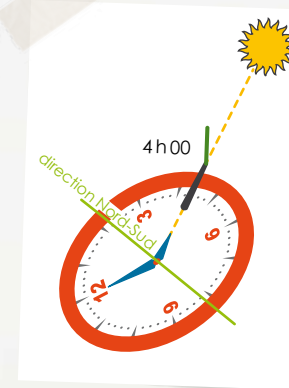


Fig. 2.13
Le Soleil et une montre, le minimum pour s'orienter de jour

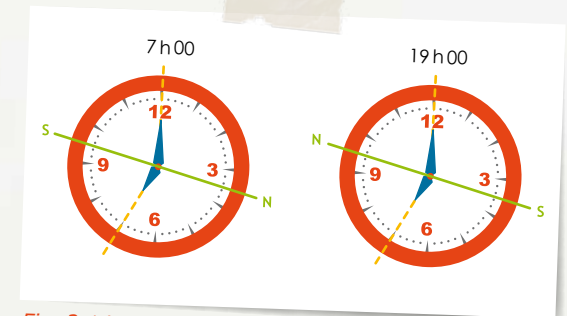


Fig. 2.14
Attention à ne pas confondre 7h et 19h...

2. Mesurer l'heure, l'année et même la Terre

Fig. 2.15 Plus le gnomon (bâton planté dans le sol, voir plus haut) est grand, plus son ombre sera grande et donc plus facilement mesurable avec précision. Les champions dans cette discipline sont les Chinois, qui ont bâti, dès le Moyen-Âge, un gnomon géant (12 m de haut, graduation pour l'ombre de plus de 30 m de long) à Gaocheng. Un repère était installé au sommet de la tour, et son ombre à midi était repérée sur la graduation, donnant ainsi très précisément la date du jour. Cela permettait de repérer les moments des solstices et équinoxes avec exactitude. Ce dispositif a ainsi permis d'évaluer la durée de l'année avec une précision de 30 secondes dès le XIII^e siècle.

© Takwing.Kwong



Ce jeu d'ombres peut également servir à indiquer le moment de l'année. En effet, le Soleil monte plus haut dans le ciel en été qu'en hiver. Les ombres sont donc plus courtes en juin qu'en décembre. Si l'on prend la peine de repérer ce petit manège, on dispose alors d'un calendrier perpétuel (Bric. 2.3 et Fig. 2.15)!

Pour en savoir plus sur les changements du jour au cours de l'année, voir Cahier I, Exp. 1.4



Bricolage 2.3 > Mon calendrier-horloge perpétuel

CONSTRUCTION

Enfoncer le bâton perpendiculairement au sol (on peut s'assurer de la verticalité à l'aide d'une équerre si le sol est horizontal ou grâce à un fil à plomb).

1. Par une journée ensoleillée, dessiner la direction de l'ombre à différentes heures de la journée et noter l'heure à côté – on obtient ainsi un cadran solaire (Fig. 2.16).
2. Chaque même jour du mois, à une heure donnée, marquer la position du bout de l'ombre du bâton et indiquer la date à côté – on obtient ainsi le calendrier perpétuel (Fig. 2.17 et Fig. 2.6).

Matériel:

- Un long bâton bien droit
- Une craie (ou tout autre moyen de noter quelque chose au sol)
- Des journées ensoleillées

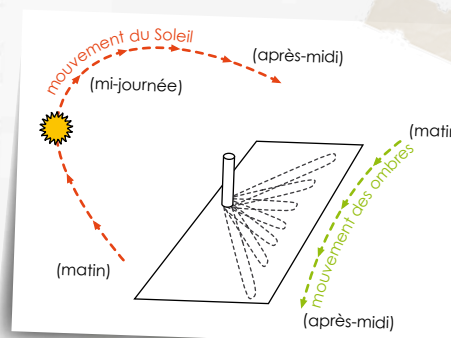


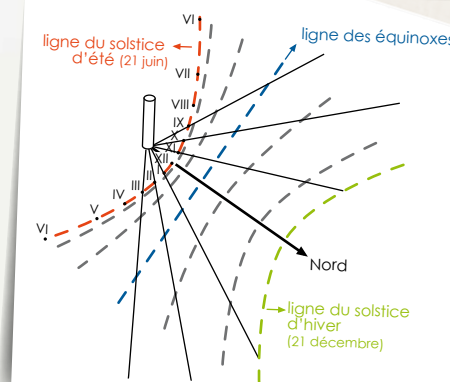
Fig. 2.16 Au cours de la journée, l'ombre du bâton change de direction et de longueur.

Pas le temps ? Si l'on veut juste montrer ce phénomène sans attendre des jours ou des mois, on peut reproduire cette expérience en remplaçant le Soleil par une lampe que l'on bouge pour reproduire le trajet solaire au cours d'une journée (éclairer le bâton de gauche à droite) ou au cours de l'année (ne pas changer la direction de la lampe, mais la monter ou descendre pour indiquer la même heure en été ou hiver).

UTILISATION

Pour connaître l'heure, il faut repérer le chiffre romain intercepté par l'ombre; pour connaître la date, il faut alors repérer la ligne de date que touche le bout de l'ombre.

Fig. 2.17 En repérant la position du bout de l'ombre du bâton au cours de la journée et de l'année, on peut construire un calendrier-horloge.





EXTENSION 1

Si l'on observe pile à midi (heure civile locale, c.à.d. en tenant compte uniquement des corrections dues à l'heure d'été/hiver et à la longitude, voir *ci-dessus*, Page 20), on peut voir en outre le bout du bâton se balader un peu à gauche, un peu à droite : cela s'appelle une analemme et cela montre l'effet de l'équation du temps.

De même, si l'on prend une photo du Soleil tous les jours à une heure donnée, on verra aussi cette figure en forme de « huit » (Fig. 2.18).



Fig. 2.18
Analemme photographié
à Veszprem, Hongrie

© T. Ladanyi



EXTENSION 2

Si l'on désire un cadran solaire déjà gradué en heures et en date, voire incorporant les corrections de longitude et d'équation du temps, divers logiciels sont disponibles sur internet :

- Un logiciel en anglais fonctionne sur la plupart des browsers sauf Internet Explorer : <http://www.jamesriverstudio.com/sundials/calculator/Dial.xhtml>
- Un logiciel en français (version simple gratuite, version complète payante) est également disponible : <http://www.shadowspro.com>

Si l'on change d'endroit, ce type d'horloge fonctionne-t-il toujours ? Oui, mais la situation changera un peu (Exp. 2.4). Ainsi, à une heure et une date données, les ombres seront plus longues dans les pays du Nord (Suède, Danemark, Islande) car le Soleil y apparaît plus bas sur l'horizon. Au contraire, les ombres seront plus petites dans les pays méridionaux (Grèce, Maroc, Égypte, Congo) car le Soleil y culmine plus haut. Cet effet est similaire à celui évoqué au chapitre précédent pour l'étoile polaire, mais avec un décalage de 90° : le Soleil apparaît ainsi proche de l'horizon au pôle Nord, et du zénith dans les zones équatoriales.

D'autre part, si l'on ne considère que des endroits situés à la même latitude, les ombres ont la même longueur le même jour à une heure donnée, mais le moment de la journée dépend du lieu d'accueil : c'est le matin à Vancouver quand il est midi à Paris ou à Liège et que le soir tombe sur Kiev (Exp. 2.4).

Pour en savoir plus sur les fuseaux horaires, voir Cahier I, Exp. 1.3



Fig. 2.19
Cadran solaire horizontal situé
à Frassem (Arlon, Belgique)

© SAL 2005



Expérience 2.4 > Le temps de la Terre!

CONSTRUCTION

- Effet de la longitude:** Disposer, à l'aide du papier collant, les bouts de paille en différents endroits situés à la même latitude, mais à des longitudes différentes (par ex. Liège, Vancouver, Kiev) (Fig. 2.20, droite). Veiller à ce que les pailles soient bien perpendiculaires au globe terrestre. Mettre celui-ci en plein Soleil (ou dans une pièce sombre et l'éclairer alors avec une très grosse lampe située le plus loin possible).
- Effet de la latitude:** Disposer à l'aide du papier collant les bouts de paille en différents endroits situés à la même longitude mais à des latitudes différentes (par ex. Liège, Bergen en Norvège et Sao Tomé) (Fig. 2.20, milieu). Veiller à ce que les pailles soient bien perpendiculaires au globe terrestre. Mettre celui-ci en plein Soleil (ou, dans une pièce sombre, l'éclairer avec une très grosse lampe située le plus loin possible).

Dans les deux cas, observer les ombres projetées par les pailles. Éventuellement, faire tourner le globe dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et observer les changements (Fig. 2.20, gauche).

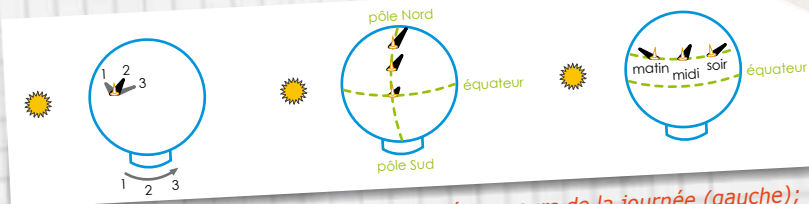


Fig. 2.20 Un cadran solaire en un lieu donné, au cours de la journée (gauche); cadrans solaires observés au même instant, en des lieux de latitudes différentes (milieu) ou de longitudes différentes (droite).

CONCLUSION:

- Effet de la longitude:** Les ombres des pailles se projettent dans des directions différentes: elles n'indiquent donc pas la même heure en même temps. Par contre, si l'on mesure la taille de l'ombre lorsque le Soleil est en face du lieu (midi local), on obtient la même valeur.
- Effet de la latitude:** Les ombres des pailles apparaissent dans la même direction: elles indiquent donc la même heure en même temps. Par contre, la longueur des ombres est différente d'un endroit à l'autre.

Matériel:

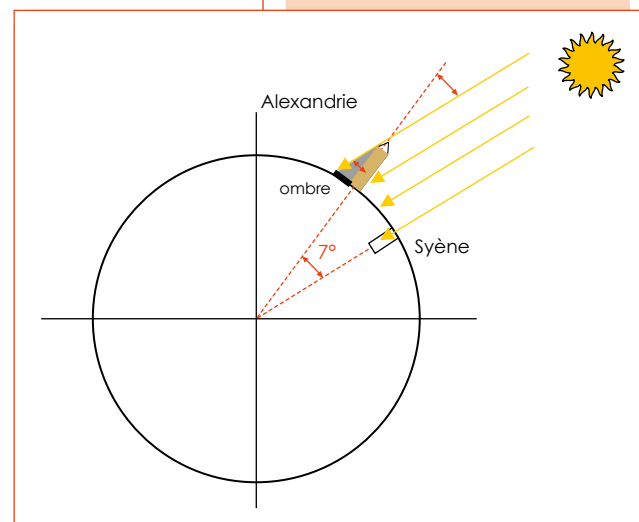
- Un grand globe terrestre
- Des petits bouts de paille de même longueur (5 cm)
- Une journée ensoleillée

Ces variations des ombres forment un spectacle fascinant et utile pour mesurer l'heure ou la date, mais aussi... la taille de la Terre! Cela peut sembler surprenant, mais c'est pourtant une expérience très ancienne, faite en 205 avant notre ère par un astronome gréco-égyptien appelé Eratosthène (vers 276-194 av. J.-C.). Ce dernier savait que, dans sa ville d'Alexandrie, le Soleil projetait, le 21 juin, des ombres courtes, mais non nulles: il les avait mesurées. L'astronome a alors appris qu'à Assouan, appelée Syène à l'époque (une ville proche du Tropique du Cancer), le fond d'un puits était éclairé ce jour-là. Le Soleil était donc bien au zénith à cet endroit le 21 juin. En se renseignant, il a obtenu la distance entre Alexandrie et Assouan, estimée par le temps mis par les caravanes pour rejoindre les deux villes. En supposant que la Terre était ronde (Fig. 2.21 et Exp. 2.5), il en a déduit une circonférence pour la Terre de 250 000 stades (une ancienne unité de mesure), ce qui correspondrait à 39 375 kilomètres (pas loin de la valeur acceptée actuellement) (Exp. 2.6).

Fig. 2.21
Le 21 juin, alors qu'un puits profond est éclairé à Assouan, les obélisques d'Alexandrie portent des ombres. Les rayons solaires y font avec le sol un angle égal au cinquantième d'un tour complet (soit environ 7°). Postulant que le Soleil est si éloigné de la Terre que l'on peut considérer ses rayons parallèles, Eratosthène en a déduit que ces 7° correspondaient à la différence de latitude entre Alexandrie et Assouan et donc que la circonférence terrestre valait cinquante fois la distance entre Alexandrie et Assouan.

Pour se convaincre du parallélisme des rayons solaires (et donc des ombres projetées), il suffit de planter quelques bâtons dans le sol d'une pièce sombre (ou quelques crayons sur un carton) et de les éclairer avec une lampe: plus la lampe est proche, plus les ombres divergent; plus la lampe est lointaine, plus les ombres deviennent parallèles.

Si l'on regarde son environnement, on verra d'ailleurs que les ombres des arbres, des bâtiments, etc. sont bien parallèles, prouvant ainsi la grande distance du Soleil. Pour se convaincre de l'égalité des angles (ombre de l'obélisque et différence de latitude), il suffit de reproduire le dessin ci-dessus en grand, et de décalquer l'angle au centre de la Terre puis de reporter ce dessin sur l'angle lié à l'ombre: on constate alors qu'ils sont identiques.



2 Mesurer
l'heure,
l'année et
même la Terre



Expérience 2.5 > Ombre ou pas ombre?

Matériel:

- Une bande de carton (éventuellement décoré de la carte d'Égypte)
- Un crayon
- Une gomme à coller
- Un cutter
- Un capuchon
- Une journée ensoleillée

CONSTRUCTION

En utilisant la gomme à coller, planter le crayon bien droit à une extrémité du carton. À l'autre extrémité, tracer une petite croix avec le cutter et y planter le capuchon. Le capuchon et le crayon doivent être bien perpendiculaires au carton (Fig. 2.22, haut). Se mettre ensuite en plein Soleil et placer le carton bien en face de manière à éclairer le fond du capuchon. Si l'expérience est correctement réalisée, le crayon ne doit alors porter aucune ombre. Ensuite, pour obtenir simultanément une ombre pour le crayon et un capuchon éclairé, bouger le carton en laissant dériver l'imagination (Fig. 2.22, bas)...

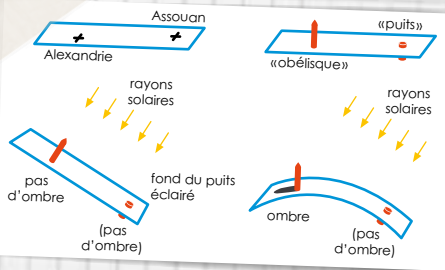


Fig. 2.22 Haut: montage à réaliser
Bas: expérience à réaliser

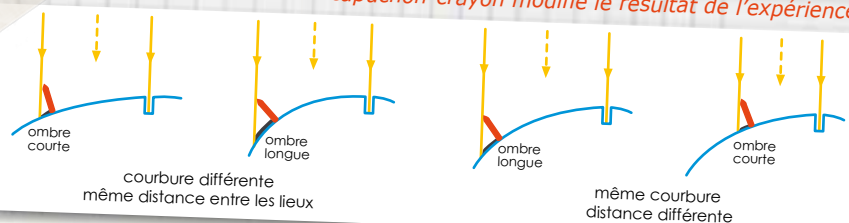
CONCLUSIONS

Pour éclairer le puits-capuchon d'un côté alors qu'il existe une ombre à l'obélisque-crayon, il faut absolument courber la terre-carton!

Envie d'aller plus loin? Tout d'abord, on peut observer que plus le carton est courbé, plus l'ombre à l'obélisque-crayon, il faut absolument courber la terre-carton!

plus proche du puits-capuchon, son ombre est plus petite que pour le premier (Fig. 2.23, droite). Cela indique que la grandeur de l'ombre (et donc l'angle fait par les rayons) dépend de deux choses: la courbure de la Terre (donc son rayon) et la distance entre les sites d'observation. Eratosthène a donc pu se faire une idée de la courbure terrestre puisqu'il connaissait la distance entre Assouan et Alexandrie...

Fig. 2.23 Changer la courbure du carton ou changer la distance capuchon-crayon modifie le résultat de l'expérience.



Expérience 2.6 > Grande comment, la Terre?

Il existe plusieurs manières de reproduire l'expérience d'Eratosthène. Un exemple simple est donné ci-dessous, mais il faut également mentionner des projets plus ambitieux comme :

- le projet européen Eratosthène où de nombreuses écoles mesurent les ombres, et l'ensemble des réponses permet de mesurer la Terre <http://www.eaae-astronomy.org/eratosthenes/>
- la même démarche est proposée par « la Main à la Pâte » <http://lamap.inrp.fr/eratos>
- une variante sur le site web de Christophe Morrisset, ne nécessite pas la coopération de plusieurs groupes : <http://132.248.1.102/Donde/>

CONSTRUCTION

- Mesures:** Installer le bâton bien droit, par exemple en le plantant dans le sol (vérifier sa verticalité avec un fil à plomb) ou en le posant sur une table bien horizontale (vérifier l'horizontalité de la table avec un niveau à bulles et la verticalité du bâton avec une équerre). En découpant un trou de la taille du bâton, poser le papier autour du bâton. Le 21 juin, indiquer sur le papier la position du sommet de l'ombre entre 11 h 30 et 15 h (faire une mesure toutes les 10 minutes, voire toutes les deux minutes lorsque l'ombre se rapproche le plus du bâton). Une fois toutes les mesures prises, chercher celle qui donne la distance la plus courte au bâton. Mesurer aussi la taille du bâton, le plus précisément possible et de préférence avec la même règle graduée que pour la mesure sur le papier.

Matériel:

- Un bâton (une variante au bâton, en utilisant une ficelle et des nœuds, peut être trouvée sur le site de C. Morrisset)
- Du papier
- Un crayon
- Une règle graduée
- Un atlas ou un ordinateur

- Exploitation des mesures:** Dessiner sur du papier millimétré un segment de la taille du bâton et un segment perpendiculaire à celui-ci de la taille de l'ombre minimale (Fig. 2.24). Si le bâton et/ou l'ombre sont trop grands, les reproduire à l'échelle, par exemple en divisant toutes les mesures par 2. Mesurer ensuite l'angle au sommet du triangle ainsi construit et le diviser par 360°: cette valeur vaut le rapport entre la circonférence de la Terre et votre distance au tropique du Cancer (où le Soleil est au zénith le 21 juin).

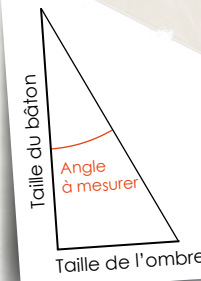


Fig. 2.24 Mesure de l'angle trouvé

3. Calculs finaux: Pour terminer l'expérience, il faut déterminer la distance du lieu au tropique du Cancer. Plusieurs méthodes sont possibles mais nous n'utiliserons cependant pas celle des caravanes d'Eratosthène ! On peut par exemple utiliser un atlas (Fig. 2.25) : il suffit de repérer sa propre position et de tracer la ligne passant par ce point et perpendiculaire au tropique (et à l'équateur). Connaissant l'échelle de la carte, on détermine alors la distance lieu-tropique. Autre possibilité : utiliser Google Earth. Pour ce faire, sélectionner view>grid, actionner l'outil « règle » via tools>ruler, et choisir sous l'onglet « line » l'unité en « kilomètres ». Ajuster la vue pour voir une bonne partie de la Terre. Cliquer à l'endroit où vous êtes et sur le point du tropique du Cancer situé sur le même méridien : la boîte de dialogue donne alors la distance désirée en kilomètres.

CONCLUSIONS

La circonférence de la Terre vaut le rapport déterminé plus haut multiplié par la distance au tropique : on trouve 40 075 kilomètres. En géométrie, la circonférence est liée au rayon car elle vaut $2\pi R$. La valeur trouvée plus haut implique donc un rayon terrestre de 6 378 kilomètres.



EXTENSION

L'expérience peut être aussi effectuée aux équinoxes (21 mars et 23 septembre), mais il faut alors utiliser la distance à l'équateur, car le Soleil est au zénith de l'équateur ce jour-là ; ou au solstice d'hiver (21 décembre) en utilisant la distance au tropique du Capricorne.



Fig. 2.25
Mesure de la distance
au Tropique
à l'aide d'un atlas.

Questionnaire:

- À midi, le Soleil culmine
 - au Nord
 - au Sud
 - à l'Est
 - à l'Ouest
- Le Soleil se lève côté
 - Nord
 - Sud
 - Est
 - Ouest
- Le Soleil se couche côté
 - Nord
 - Sud
 - Est
 - Ouest
- Le Soleil paraît plus haut dans le ciel
 - en hiver
 - en été
 - au printemps
 - en automne
- Le grec qui a mesuré la circonférence de la Terre se nomme
 - Aristote
 - Eratosthène
 - Platon
- Avoir simultanément des ombres en un endroit et aucune ombre ailleurs est-il possible ?
- Un cadran solaire indique
 - la direction du Soleil
 - l'heure
 - la phase de la Lune
- Pour des villes situées à la même latitude, l'heure est toujours
 - identique
 - différente
- Pour des villes situées à la même latitude, le Soleil culmine à midi
 - au même endroit
 - à des hauteurs différentes
- Pour des villes situées à la même longitude, le Soleil apparaît
 - au même endroit
 - à des hauteurs différentes



3. Mesurer la Lune

Fig. 3.1 Notre unique satellite naturel, la Lune, à la surface criblée de cratères. © Galileo

La Lune, compagne de nos nuits, semble parfois si proche qu'on croit pouvoir la toucher. Mais qu'en est-il exactement ? Est-elle proche ou lointaine, grande ou petite ? On peut le savoir simplement en l'observant. Pas n'importe quand cependant : il faut attendre une éclipse lunaire...

À ce moment précis, la Terre vient s'intercaler exactement entre le Soleil et la Lune. Cette dernière passe alors dans l'ombre de la Terre, et semble presque disparaître à nos yeux. En première approximation, l'ombre de la Terre a la même taille que notre planète quelle que soit la distance car le Soleil est très loin (Fig. 3.2). Dès lors, comme on peut assez aisément confronter la Lune à l'ombre de la Terre (Calculs 3.1), il devient facile de comparer les tailles de ces dernières. L'astronome gréco-turc Aristarque de Samos (vers 310-230 av. J.-C.) a été le premier à faire ce calcul vers 250 avant notre ère, et il en a profité pour estimer la distance entre la Terre et la Lune.



Une fois cette valeur calculée, une constatation s'impose : la Lune n'est pas si petite, son diamètre vaut un peu plus du quart du diamètre terrestre ! En fait, de toutes les planètes, la Terre est celle qui possède la plus grosse lune, toutes proportions gardées. Cela est lié à la formation du Système solaire. Autour du bébé-Soleil, des morceaux de roches et des poches de gaz se sont agglutinés pour donner naissance aux planètes. Les lunes sont, quant à elles, nées des morceaux restants, en général assez petits comparés aux planètes. Le bébé-Terre, n'ayant pas réussi à capturer un morceau pour lui servir de compagnon, n'avait pas de Lune au départ. Un jour, le bébé-Terre est entré en collision avec un autre bébé-planète, plus petit mais suffisamment gros pour lui arracher une partie de sa substance (Fig. 3.3). Celle-ci s'est alors agglutinée aux alentours de la Terre, donnant finalement naissance à notre Lune. Celle-ci est donc en fait une partie de la Terre !

Pour en savoir plus sur les éclipses, voir Cahier I, Exp. 1.7

Fig. 3.3 Vue d'artiste de la collision ayant donné naissance à la Lune © NASA

Fig. 3.2
La Terre, son ombre et la Lune
lors d'une éclipse lunaire
(le schéma n'est pas à l'échelle)

La liste des prochaines éclipses est disponible sur <http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/phenomenes/eclipses/lune/>





Calculs 3.1 >

Calculons ensemble

... la taille de la Lune

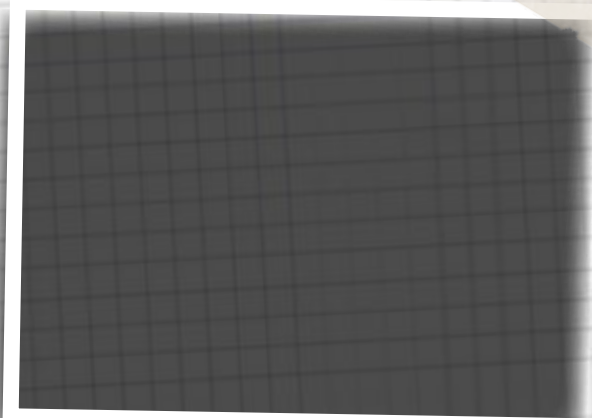


Fig. 3.4
Voici une éclipse lunaire. Il s'agit d'une série de photos de la Lune durant l'éclipse, superposées pour montrer que la partie ombrée a une forme circulaire.

© TWAN

1. Sur l'image ci-dessus (Fig. 3.4), dessiner un cercle autour d'une des images de la Lune et mesurer son diamètre en centimètres: centimètres
2. Dessiner également un cercle autour de l'ombre de la Terre et en mesurer le diamètre, en centimètres: centimètres
3. Le rapport de ces deux diamètres, lunaire et terrestre, vaut
4. Le rayon de la Lune vaut donc rayon terrestre.
5. Sachant qu'un rayon terrestre vaut 6 371 kilomètres (Exp. 2.6), que vaut le rayon lunaire en kilomètres? kilomètres

... la distance de la Lune

6. Observer la Lune un soir, et la comparer à un doigt tendu à bout de bras: la Lune mesure la largeur du doigt.

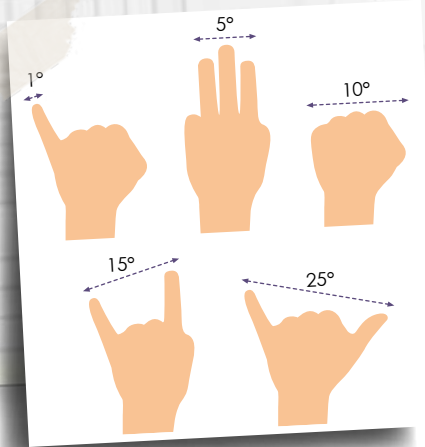


Fig. 3.5
Un doigt tendu à bout de bras sous-tend un angle d'un degré.

7. Sachant qu'un doigt tendu à bout de bras couvre un angle d'un degré (Fig. 3.5), que vaut la taille angulaire de la Lune?
..... degrés

8. Il s'agit de son diamètre, que vaut donc son rayon?
A= degrés

9. La Lune tourne autour de la Terre suivant un grand cercle. Combien de degrés faut-il pour faire un tour complet?
B= degrés

10. Sachant combien de degrés il y a dans une circonférence et combien de degrés couvre la Lune, combien de rayons lunaires y a-t-il dans cette circonférence?
C=

11. Que vaut la circonférence du cercle orbite lunaire si la distance Terre-Lune vaut D?
B=

12. Sachant cela et connaissant le nombre de rayons lunaires dans une circonférence (voir C ci-dessus), que vaut la distance Terre-Lune en rayons lunaires?
D= rayons lunaires

13. Au point 4, on a déterminé la valeur du rayon lunaire par rapport au rayon terrestre. Que vaut donc la distance Terre-Lune en rayons terrestres?
D= rayons terrestres

14. Au point 5, on a également déterminé la valeur du rayon lunaire en kilomètre. Que vaut donc la distance Terre-Lune en kilomètre?
D= kilomètres

... la vitesse de la Lune

15. Observer la Lune un soir et repérer sa position par rapport aux étoiles proches. Bien marquer l'endroit où l'on se trouve (on peut dessiner la forme des pieds avec une craie, par exemple). Vingt minutes plus tard, réobserver du même endroit: la Lune a-t-elle bougé?

16. Recommencer l'observation toutes les vingt minutes: combien de temps faut-il pour que la Lune se déplace d'une distance à peu près égale à son diamètre (soit une fraction de doigt, voir Exp. ci-dessus)?
E=

17. Que vaut le diamètre de la Lune, en kilomètres (voir calcul du rayon au point 5)?

..... kilomètres

18. Puisque la Lune se déplace d'un diamètre en un temps E, que vaut sa vitesse?

..... kilomètres/heure



EXTENSION

Si l'on désire faire des mesures simples et précises, il suffit d'un peu d'observation. Une première possibilité est de placer une petite balle (ping-pong, tennis...) sur un appui de fenêtre ou un mur, depuis un endroit où la lune est visible. S'éloigner jusqu'à ce que la lune et la balle aient la même taille apparente. Mesurer alors la distance à la fenêtre ou au mur : le rapport entre la diamètre de la balle et cette distance est égale au rapport entre la diamètre de la lune et la distance de cet astre. La taille de la lune ayant été calculée page 36, on trouve ainsi la distance Terre-Lune.

On peut également remplacer la mesure en « doigts » (point 6 ci-dessus). Il suffit de prendre un papier cartonné et y faire un trou avec une perforatrice (son diamètre devrait être d'environ 0,5 cm). Essayer ensuite de mettre toute la Lune dans le trou en éloignant ou approchant le carton. Mesurer alors son éloignement du carton, et trouver l'angle en utilisant la table ci-dessous. Si tout va bien, on devrait trouver que, pour un adulte, la Lune rentre dans le trou si le carton est tenu à bout de bras.

Taille angulaire de la Lune	Distance au carton
10°	2,8 centimètres
5°	5,7 centimètres
1°	29 centimètres
0,5°	57 centimètres
0,25°	1,1 mètres
0,1°	2,8 mètres



Expérience 3.2 > Et pourtant, elle tourne!

La lune tourne-t-elle sur elle-même? Une expérience simple permet de le savoir.

Matériel:

- Un grand miroir (ou un mur-repère)
- Deux personnes

CONSTRUCTION

Disposer le miroir sur un mur, à hauteur des yeux, et placer une première personne quelques mètres plus loin – elle représente la Terre. La seconde personne, elle, joue le rôle de la Lune et tourne donc autour de la première. Deux cas seront étudiés (Fig. 3.6).

1. Ne pas tourner sur soi-même implique de ne pas changer son orientation. Après s'être installée face au miroir, la personne-Lune va donc tourner autour de la Terre en continuant de regarder vers le miroir. Que peut-on alors observer au cours de son mouvement autour de la Terre?

2. Cette fois, la personne-Lune s'installe face à la Terre, et tourne autour en continuant de la regarder. Peut-elle toujours voir le miroir à n'importe quel moment? Si non, combien de tours autour de la Terre fait-elle entre deux fois où elle se retrouve face au miroir?

CONCLUSIONS

La plupart des gens pensent que notre compagne ne tourne tout simplement pas sur elle-même. La première partie de l'expérience montre que si c'était le cas, la Lune ne montrerait pas toujours le même côté à la Terre. Par contre, la seconde partie de l'expérience reproduit la situation réelle: la Lune, qui présente toujours la même face à la Terre, tourne sur elle-même (on ne voit plus le miroir en continu), mais elle doit alors effectuer un tour autour de la Terre lorsqu'elle fait un tour sur elle-même.

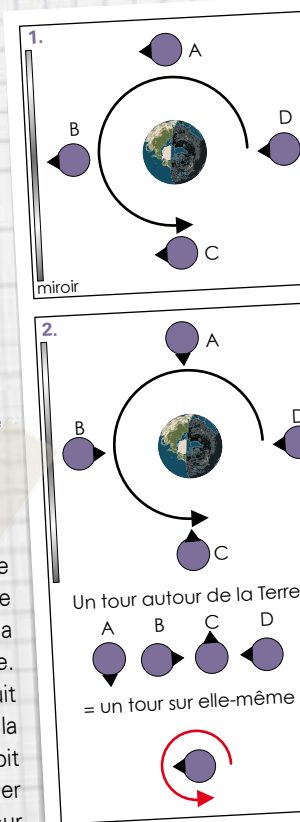


Fig. 3.6 La Lune tourne sur elle-même, mais d'une façon un peu particulière...



EXTENSION

L'expérience peut être reproduite si l'on est seul. Dans ce cas, la tête joue le rôle de la Terre et la main celle de la Lune. Essayer de faire tourner la main paume vers le miroir: la Terre voit alors différentes facettes de la Lune (dos de la main, paume, profil). Essayer ensuite de garder la paume tournée vers la tête, et observer la synchronisation des rotations (Fig 3.7).

En effet, si l'on se met face au miroir pour commencer cette nouvelle expérience, la paume de la main est dirigée vers la tête et le dos vers le miroir; un demi-tour plus loin, la paume est toujours vers la tête, mais elle est aussi face au miroir – la main a bien fait un demi-tour sur elle-même! Pour s'en convaincre, on peut arrêter de tourner autour de la Terre et simplement faire tourner la main sur elle-même, face au miroir, et observer alors le renversement paume/dos après un demi-tour...

Fig. 3.7 Rotation de la Lune : réponse avec les mains!



Questionnaire:


- Lors d'une éclipse lunaire, la pleine Lune devient soudainement sombre
 - parce qu'elle passe dans l'ombre de la Terre
 - parce qu'on voit alors une zone sombre de la surface lunaire
 - parce que le Soleil s'éteint
- Lors d'une éclipse lunaire sont alignés
 - Soleil-Lune-Terre
 - Soleil-Terre-Lune
 - Lune-Soleil-Terre
- La Lune est très grosse, son rayon vaut environ
 - quatre rayons terrestres
 - un rayon terrestre
 - un quart du rayon terrestre
- La Lune est née
 - lors de la formation du Système solaire
 - lors de la formation de l'empire romain
 - lors de la formation du premier gouvernement belge
- La Lune est née
 - en même temps que la Terre
 - peu après la Terre
 - en même temps que Jupiter



Fig. 3.8 La mission européenne SMART-1 a étudié la Lune de 2004 à 2006

© ESA





4. Mesurer le relief des planètes

Fig. 4.1 Le volcan vénusien Maat Mons est presque aussi haut que l'Everest © NASA



Fig. 4.2 Vénus et son voile de nuages impénétrables.

© NASA

Certains objets célestes sont timides. Prenez la planète Vénus : couverte d'épais nuages (Fig. 4.2), elle cache sa surface à tout observateur terrestre, même le plus doué. Un problème similaire existe pour Titan, l'une des lunes de la planète Saturne. Dans les deux cas, pas la peine d'espérer une éclaircie, une trouée dans les nuages qui permettrait de jeter un œil indiscret sur la surface : il n'y en a jamais !

Étant des gens très curieux, les astronomes ont malgré tout trouvé une solution à ce problème, deux même ! Tout d'abord, aller voir sur place, par exemple avec un robot. Cependant, les nuages cachent parfois des dangers innombrables : sur Vénus, il faut ainsi subir non seulement des pluies d'acide sulfurique, mais aussi une chaleur étouffante (plus de 450°C de jour comme de nuit) et une pression atmosphérique écrasante (plus de mille fois celle que nous subissons tous les jours). Sur Titan, la pression est moindre, mais la température atteint... -180°C ! Même les robots les plus solides résistent mal à ces conditions infernales.

Autre possibilité : rester au-dessus des nuages et utiliser le radar... En effet, les ondes radar ont la particularité de traverser les nuages sans être arrêtées, en se réfléchissant seulement sur les durs rochers en surface. On sonde ainsi la planète, de manière à en mesurer le relief, simplement en chronométrant les ondes radar (Fig. 4.3, Calculs 4.1 et Exp. 4.2) : plus ces ondes mettent longtemps à revenir au satellite, plus le sol est éloigné (il s'agit donc d'une vallée) ; par contre, si le signal radar revient rapidement, c'est qu'il a touché le sommet d'une montagne, haute et donc plus proche du satellite. En répétant cette mesure un peu partout au-dessus de la planète ou de la lune, on peut alors construire une carte topographique complète (Fig. 4.4 et Exp. 4.3). C'est ce qu'ont fait la sonde Magellan pour Vénus et la sonde Cassini pour Titan.

Fig. 4.3
Le principe de mesure du relief avec le radar.
Lorsque la sonde passe au-dessus d'une montagne, le trajet sonde-sol est plus court, et les ondes radar reviennent plus vite : on trouve donc l'altitude du sol en chronométrant les signaux radar envoyés par la sonde.

Les cartes ainsi construites ressemblent aux cartes du relief terrestre que l'on voit dans les atlas... Ce n'est pas un hasard ! On reconnaît ainsi facilement les vallées de Titan et les volcans de Vénus.

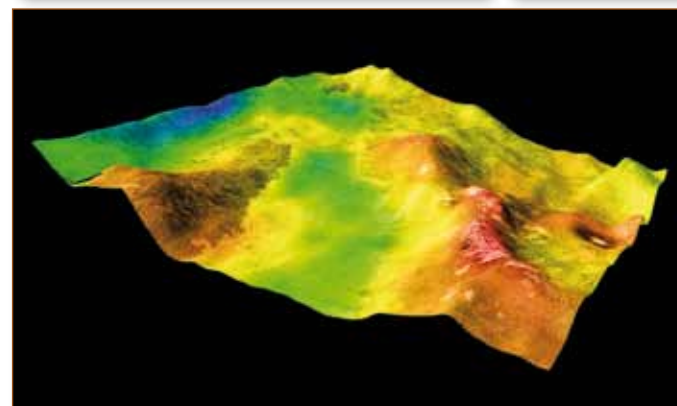
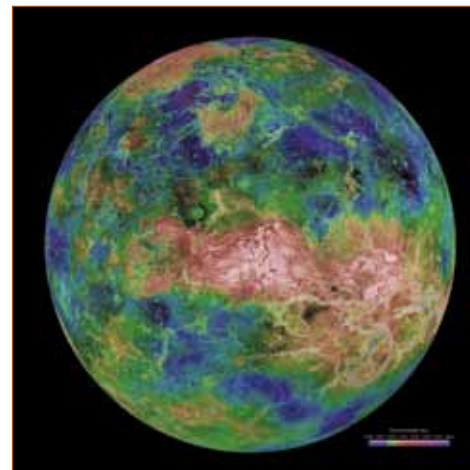


Fig. 4.4
Carte du relief de Vénus (en haut à gauche, © NASA), à comparer à une carte similaire pour l'Europe (en haut à droite, © Wikipedia), et reconstruction en 3D de la surface vénusienne grâce à ces données (en bas à gauche, © NASA). Le bleu représente les zones de faible altitude (vallées) et le rouge-blanc les zones d'altitude élevée (montagnes, volcans). Les altitudes intermédiaires sont représentées par les autres couleurs (vert, jaune, brun par ordre croissant d'altitude).

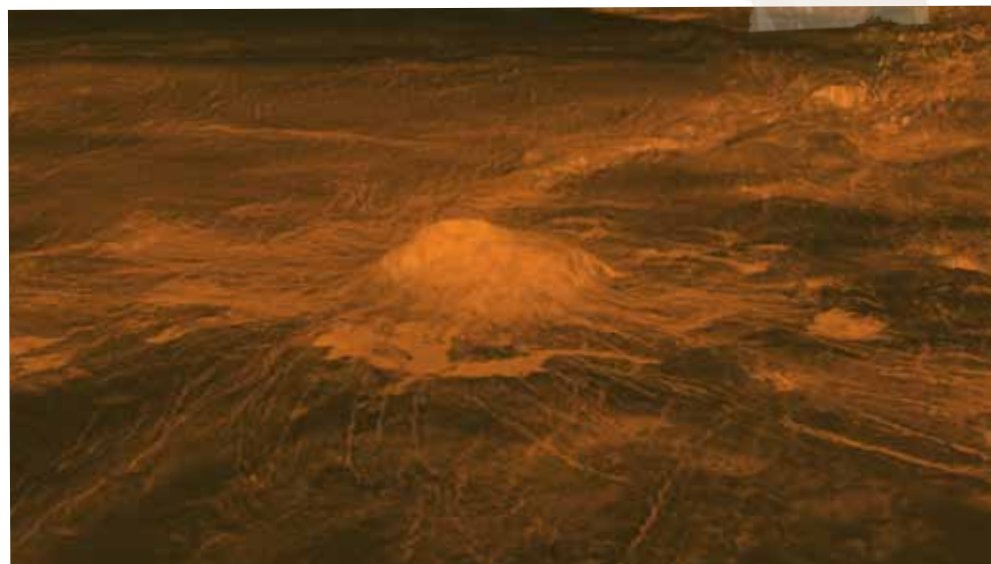


Calculs 4.1 > Calculs lumineux

Ferdinand se balade à pied dans la campagne avec un ami. Leur vitesse est de 5 kilomètres/heure. Arrivés près d'un rocher, ils voient un grand arbre au loin et Ferdinand veut en connaître la distance. Il propose alors à son ami de le chronométrer. Le départ est donné à 9h20, et Ferdinand revient à 11 h20.

1. Combien de temps a mis Ferdinand pour aller jusqu'à l'arbre et revenir?
2. Combien de kilomètres a-t-il parcouru?
3. Cette distance est-elle la distance rocher-arbre?
4. Que vaut la distance rocher-arbre?
5. L'ami de Ferdinand repère un 2^e arbre, et il met 3h pour le rejoindre et en revenir. Ce deuxième arbre est-il situé plus près ou plus loin du rocher?
6. À quelle distance se situe-t-il?

Fig. 4.5 Idunn Mons, un volcan de 2.5 km de haut, a déversé de la lave sur les environs (on la repère ici grâce aux couleurs claires) © NASA



Expérience 4.2 > La lumière comme outil

CONSTRUCTION

Installer les éléments contre le mur de manière à créer une surface planétaire avec des zones proches et d'autres éloignées du mur (Fig. 4.6). Les recouvrir de couvertures ou draps opaques pour que les creux et bosses n'apparaissent pas de manière évidente. Aligner dix personnes à une dizaine de carreaux de cette installation, sur une même ligne de départ – ils joueront le rôle des ondes radar; à chaque signal (battement de main ou coup de sifflet) chaque personne passe au carrelage suivant; quand il ou elle rencontre le drap ou la couverture, il ou elle se retourne et repart dans l'autre sens. Mesurer combien de signaux ont été nécessaires pour que les personnes reviennent au point de départ, puis leur montrer l'installation « de profil » pour qu'ils comprennent la raison du retard de certains.

Matériel:

- Une pièce au carrelage assez grand (30 cm de côté minimum)
- Divers éléments (tables, chaises, coussins,...)
- Des draps ou couvertures
- Au moins 11 personnes

CONCLUSION

Plus la surface de la planète se trouve loin, plus il faut longtemps aux ondes radar pour revenir – le délai donne donc directement l'éloignement, et permet de savoir s'il existe des creux ou des bosses.

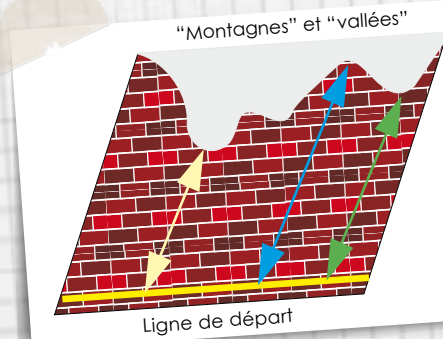


Fig. 4.6 Exemple de « montagnes » et de vallées sur du carrelage...

EXTENSION

Pour obtenir une carte en couleurs comme à l'expérience 4.3, on peut attribuer une couleur à chaque équipe – brun foncé pour la personne qui revient en premier, jaune, vert, et bleu pour les suivantes...



Expérience 4.3 > Cartographier la planète-mystère

Matériel :

- Une boîte à chaussures
- Du papier mâché ou du papier journal
- Un crayon ou un bâton fin
- Une «carte» vierge ci-jointe
- Des crayons de couleur
- Du papier collant
- Bandes collantes de différentes couleurs (bleu, vert, jaune, rouge/orange, brun, blanc/noir, par exemple, bandes isolantes pour fils électriques)

PRÉPARATION

Aménager à l'intérieur de la boîte une «surface» avec des creux et des bosses grâce au papier mâché ou au papier journal bien tassé – il faut une différence d'altitude de 10 centimètres environ entre les deux pour avoir une planète bien réussie. Préparer le «sondeur» en enroulant des bandes colorées autour du crayon ou bâton : l'ordre des couleurs doit être bleu, vert, jaune, rouge/orange, brun, blanc/noir, et chaque zone colorée doit avoir environ 2 centimètres de hauteur. Percer dans le couvercle de la boîte des trous de manière régulière tous les 3-4 centimètres (Fig. 4.7 : il faut une case par trou) – le sondeur doit pouvoir passer par ces trous. Fermer ensuite le couvercle avec du papier collant.

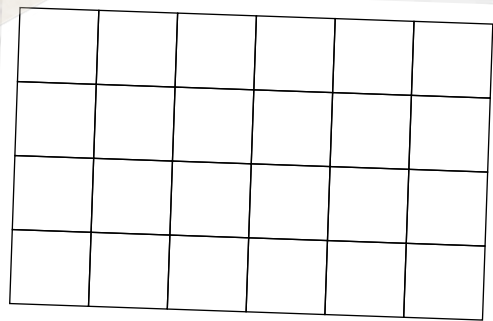


Fig. 4.7 Carte vierge pour une boîte comportant 24 trous (à adapter en fonction de votre choix)

UTILISATION

Donner la boîte et le sondeur à un explorateur, et le laisser «sonder» la planète (en enfonçant le côté blanc du sondeur en premier). Quand il ne peut plus avancer, noter la couleur du sondeur au niveau du trou et l'utiliser pour colorer la case associée. Une fois le travail de cartographie terminé, laisser l'explorateur imaginer ce qu'il y a dans la boîte (vallée, montagne,...) et ouvrir finalement la boîte pour lever le mystère.

CONCLUSION

Une carte du relief peut être faite en «sondant» la planète, même si la surface reste invisible.

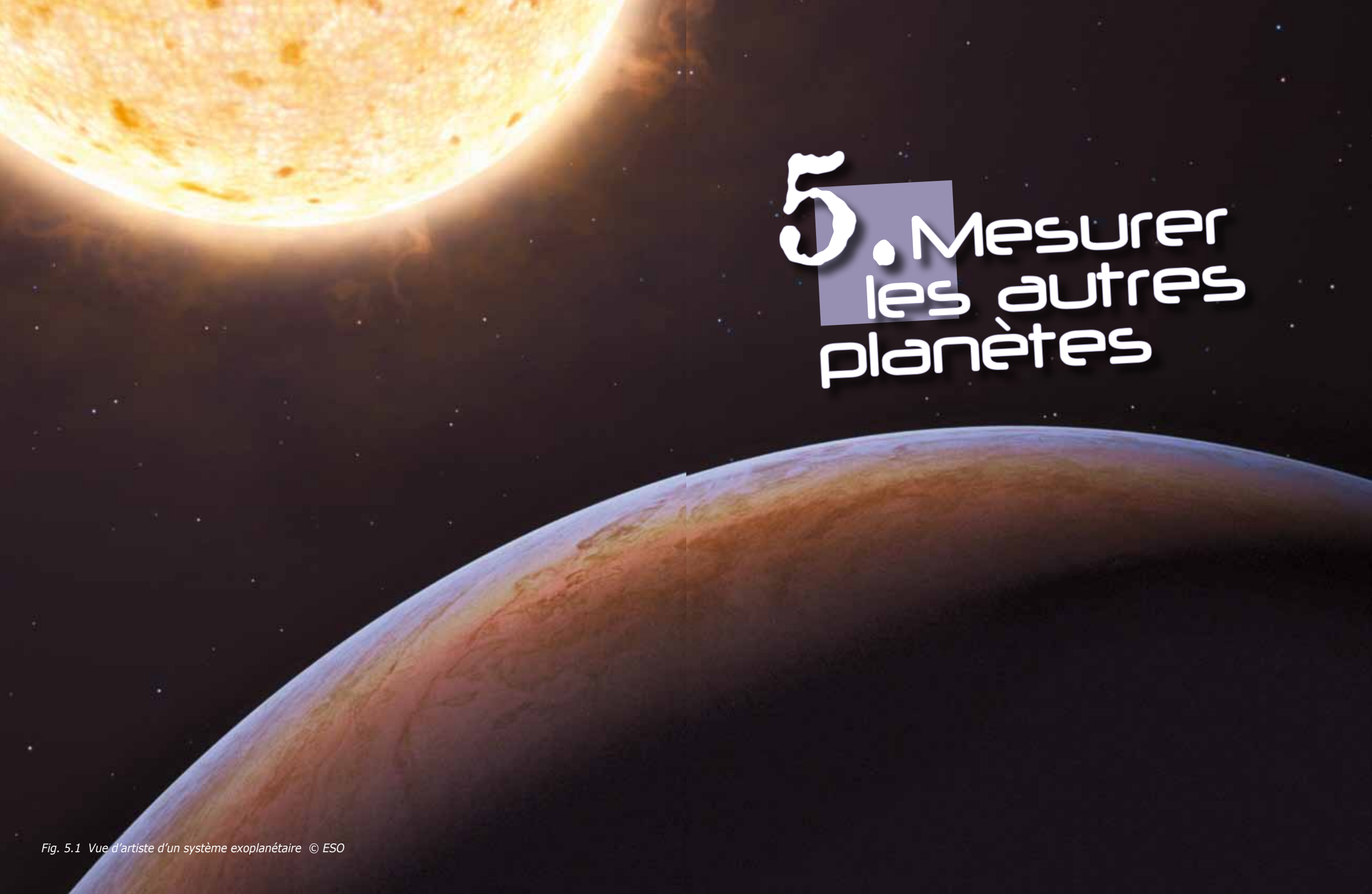


EXTENSION

Cela peut paraître surprenant, mais le travail scientifique est souvent affaire de compromis. Un bel exemple est illustré par cette expérience. Construire 3 planètes identiques, mais aux couvercles différents : pour la première boîte, faire des trous dans le couvercle tous les 15 centimètres (c'est-à-dire 4-5 trous sur la boîte), pour la deuxième, tous les 5 centimètres, et pour la dernière, tous les 1,5 centimètres. Produire une carte du relief caché par la même méthode que ci-dessus, mais cette fois en mesurant le temps mis pour chaque analyse : au final, la carte sera bien plus précise pour la 3^e boîte, mais la mesure aura pris beaucoup plus de temps... On ne peut pas tout avoir en même temps !

Questionnaire: Vrai ou faux?

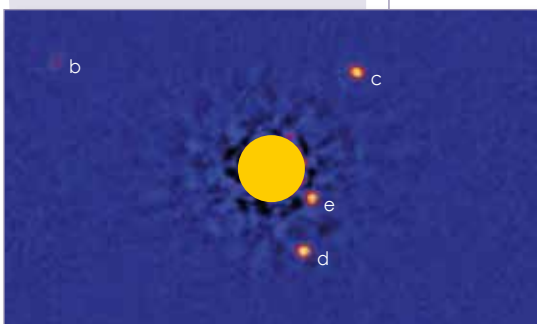
1. On peut voir la surface de toutes les planètes et de toutes les lunes.
Vrai - Faux
2. Les ondes radar peuvent traverser les nuages.
Vrai - Faux
3. Quand les ondes radar mettent plus de temps à revenir, c'est que le satellite passe au-dessus d'une montagne.
Vrai - Faux
4. Il est facile de survivre sur toutes les planètes et lunes.
Vrai - Faux
5. On peut mesurer le relief en chronométrant la durée nécessaire aux ondes radar pour effectuer un aller-retour entre le satellite et la surface.
Vrai - Faux

An artist's rendering of an exoplanetary system. In the upper left, a large, bright yellow star with visible surface activity is partially shown. In the lower right, the curved horizon of a reddish-brown planet is visible against the dark background of space, which is sparsely populated with distant stars.

5. Mesurer les autres planètes

Fig. 5.2
Photo de famille
d'un autre Système solaire :
l'étoile HR8799
(dont la position est
indiquée par le disque jaune)
et ses quatre planètes
baptisées
b, c, d, et e

© Nature/Keck telescope



Notre système solaire se compose d'une étoile, le Soleil, de huit planètes et de milliers de petits corps (astéroïdes, comètes) gravitant autour de celui-ci. Depuis longtemps, l'homme se demande s'il existe d'autres planètes dans l'Univers. Depuis une vingtaine d'années, on peut enfin répondre clairement « oui » à cette question : plus de 700 autres planètes ont été découvertes autour des étoiles proches du Soleil (Fig. 5.2). On les appelle des exoplanètes.

S'il a fallu attendre notre époque pour les trouver, c'est que leur détection n'est pas simple ! En effet, une (exo) planète est à la fois proche de son étoile, petite, peu massive et peu brillante². Ainsi, sa distance à l'étoile vaut quelques millions à quelques milliards de kilomètres. Cela peut paraître beaucoup, mais il faut savoir qu'un tel système se trouve éloigné du système solaire d'au moins quarante mille milliards de kilomètres (pour le cas le plus proche). Vue depuis la Terre, l'exoplanète se trouve donc juste à côté de son étoile.

En outre, la taille d'une planète est environ dix à cent fois moindre que celle du Soleil, étoile assez moyenne. Enfin, la masse d'une planète ne dépasse pas un centième de la masse solaire et sa luminosité vaut entre un million et un milliard de fois moins que celle du Soleil. En résumé, c'est un peu comme si l'on cherchait à détecter, depuis nos contrées, un petit papillon de nuit voletant près d'un puissant phare situé à Athènes, en Grèce. Pas impossible, certes, mais extrêmement difficile. Comment détecter un tel objet, alors ?

Considérons un exemple proche de nous, en athlétisme. Avant de lancer un disque ou un marteau, le sportif fait tourner ce poids. Se produit alors une chose étrange : l'athlète non seulement tourne sur lui-même, mais en plus il oscille de gauche à droite ! Il se produit la même chose pour les exoplanètes. En effet, on dit souvent que « la Terre tourne autour du Soleil », et l'on imagine donc un Soleil fixe. Il faudrait plutôt dire que « la Terre et le Soleil tournent tous deux autour d'un même point »... La grande majorité des exoplanètes a d'ailleurs été découverte de cette manière. Il s'agit d'une méthode indirecte car on ne détecte pas la planète elle-même mais bien l'effet (le mouvement, dans ce cas-ci) que cette dernière produit sur son étoile.

² Rappelons que les planètes n'émettent pas de lumière visible par elles-mêmes : elles réfléchissent simplement la lumière de leur étoile.

L'amplitude de ce mouvement latéral dépend de la masse des objets impliqués. Deux objets de masse identique bougeront de manière égale. Dans le cas d'un couple disproportionné (athlète et poids, adulte et enfant, étoile et planète), l'objet le plus massif bouge beaucoup moins que son petit compagnon (Exp. 5.3). Ainsi, la Terre se démène le long d'une grande orbite alors que le Soleil bouge à peine – d'où l'approximation usuelle d'un Soleil fixe et d'une Terre qui lui tourne autour.

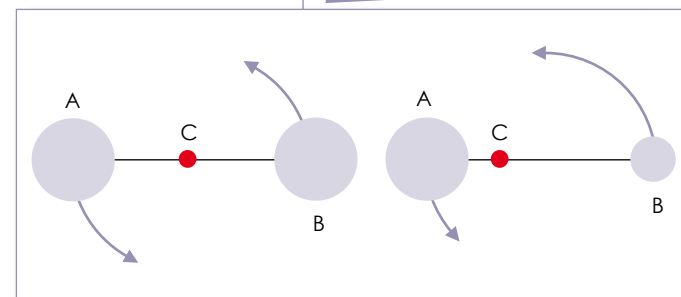


Fig. 5.3
Divers couples en rotation – le centre de masse est en fait le point d'équilibre entre ces deux masses, en considérant un effet de levier (Exp. 5.1).

Pour ceux qui aiment les maths, sa position se calcule par la formule :

$$d_C \times (M_A + M_B) = d_A \times M_A + d_B \times M_B$$

avec M les masses des objets impliqués (A et B)

et d les distances de ceux-ci et du centre de masse (C) à un point quelconque. Le centre de masse est donc plus proche de l'objet le plus massif.

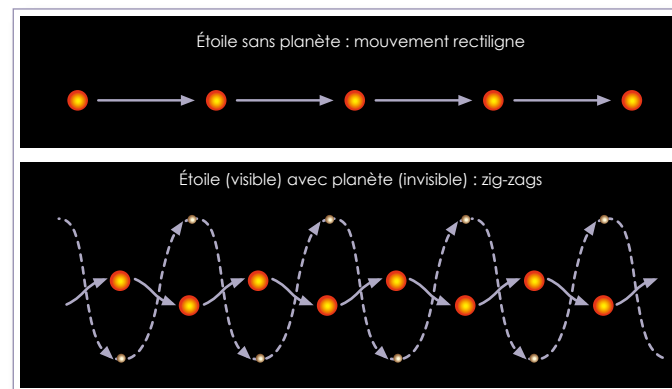
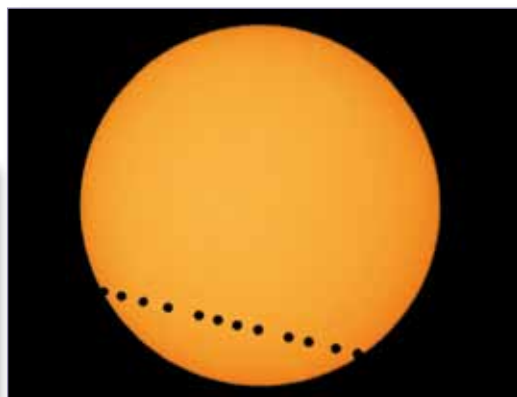


Fig. 5.4
Une étoile seule aux envies baladeuses se déplace en ligne droite alors qu'une collègue avec exoplanète fera des zigzags... d'amplitude hélas très faible : pour une étoile proche, ce serait comme détecter depuis la Terre les zigzags d'un ivrogne se baladant sur la Lune !

Récapitulons. Une étoile seule ne peut que rester en place ou se déplacer en ligne droite. Par contre, si elle est accompagnée, elle effectuera un mouvement de zigzag autour d'un point ou d'une ligne droite (Fig. 5.4, Exp. 5.2 et Ex. 5.4). Ce mouvement oscillant d'une étoile possédant des (exo)planètes est faible mais plus facilement détectable que la planète elle-même car les astronomes sont aujourd'hui capables de mesurer avec précision la vitesse d'une étoile ou son changement de position.

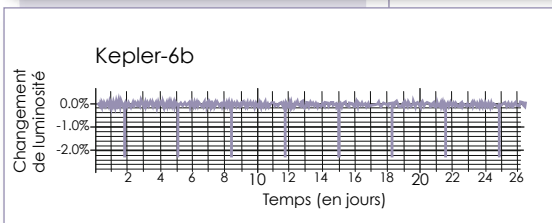
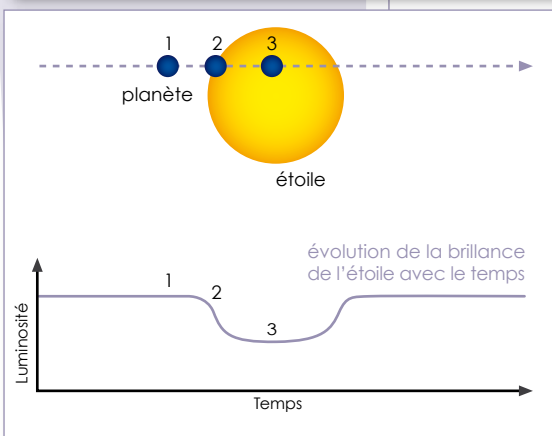


Figs. 5.5 Transit de Mercure (à gauche, © NASA) et de Vénus (à droite © 2004 F. A. Rodriguez) devant le Soleil (Mercure est si petit que les taches solaires apparaissent plus grosses!).

Les étoiles, même proches, sont si lointaines que l'on ne peut voir les détails, comme sur cette image: on ne voit pas le disque stellaire entier avec un point noir baladeur lorsque l'exoplanète passe devant.

Par contre, la planète cache alors une partie de la surface stellaire, provoquant une diminution de la luminosité enregistrée sur Terre (illustration et exemple concret ci-contre). De telles mesures donnent la durée de l'année exoplanétaire (c'est l'intervalle entre deux transits), mais aussi la taille de la planète.

Pour ceux qui aiment les maths, celle-ci est facile à calculer: le disque stellaire couvre une surface πR_s^2 alors que le disque exoplanétaire couvre une surface πR_p^2 ; pour une étoile de luminosité uniforme, la diminution relative de luminosité vaut donc la fraction de surface cachée par la planète, soit R_p^2/R_s^2 . Une diminution de luminosité de 1% signale une planète ayant un rayon égal à 1/10 du rayon de l'étoile (car $1/10^2 = 1\%$).



Il existe une autre preuve indirecte de l'existence de compagnons planétaires. Ainsi, certaines exoplanètes passent devant leur soleil, vu depuis la Terre. Il se produit alors une mini-éclipse, que l'on appelle « transit » (Fig. 5.5). La lumière de l'étoile semble soudain diminuer, et cela recommence à chaque passage de l'exoplanète – soit à chaque tour de celle-ci autour de son étoile: l'intervalle entre deux transits correspond donc à une « année » exoplanétaire. L'avantage de ce phénomène, c'est qu'il permet d'évaluer la taille de la planète par rapport à son étoile (Ex. 5.5).



Expérience 5.1 >

Délicat équilibre

CONSTRUCTION

Couper un bout de ficelle de 20 centimètres environ, faire une boucle lâche à chaque extrémité et enfiler le bâton sur l'une des boucles, de manière à pouvoir le suspendre. À chaque extrémité du bâton, fixer un bout de ficelle de 10 centimètres dont l'autre côté est une boucle enserrant les paquets de sucre – attention, les deux ficelles doivent être identiques. Tâtonner pour trouver où doit être le point de suspension pour que l'ensemble soit en équilibre. Recommencer après avoir vidé un des paquets de moitié puis en retirant encore une moitié du reste.

Matériel:

- Un bâton
- De la ficelle
- Deux paquets d'un kilo de sucre

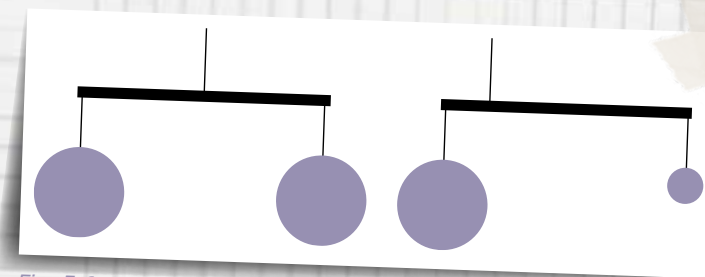


Fig. 5.6 Dispositif expérimental

CONCLUSION

Quand les paquets sont identiques, le point de suspension assurant l'équilibre se trouve exactement au milieu du bâton. À mesure qu'un des paquets se vide, le point de suspension s'en éloigne. Ce point d'équilibre est appelé centre de masse: il est plus proche de la masse la plus grande.



Expérience 5.2 > Ça ne tourne pas rond!

CONSTRUCTION

Coller avec la glu une bille (l'exoplanète) à l'extrémité d'un bâton. Enfoncer l'autre extrémité au milieu d'une balle en mousse (l'étoile). Recommencer jusqu'à épuiser le nombre de billes (utiliser un cure-dent plutôt qu'un bâton pour la bille de silicagel). Faire tourner ces systèmes exoplanétaires, ainsi qu'une étoile isolée (une balle de mousse sans aucune « addition »).

Matériel:

- Des balles en mousse
- De la colle forte
- Des bâtons de 10 centimètres (par exemple en bambou)
- Des billes de différentes tailles (y compris une petite bille de silicagel)



Fig. 5.7

Exemple de maquettes de système exoplanétaire :

- en jaune, un système sans planète,
- en rouge, avec une petite planète,
- en bleu, avec une grosse planète

CONCLUSION

Les étoiles accompagnées ne « tournent pas rond » – leur centre de rotation est décalé par rapport au centre de l'étoile. De plus, les planètes les plus grosses sont celles qui provoquent la perturbation la plus importante.



EXTENSION

On peut tenter d'utiliser des billes identiques et des bâtons plus ou moins longs. On observera alors que la perturbation la plus importante est obtenue pour les exoplanètes les plus proches de leur étoile.



Expérience 5.3 > La ronde planéto-stellaire

CONSTRUCTION

Grouper les personnes par deux; leur faire tendre les bras et agripper les mains de leur compagnon (main gauche de l'un dans main droite de l'autre); les faire tourner rapidement (Fig. 5.8).

Matériel:

- Quatre personnes – trois de même corpulence et un de corpulence nettement différente (plus gros ou plus petit, ou un adulte si les trois autres sont des enfants)



Fig. 5.8 Un système exoplanétaire personnifié

CONCLUSION

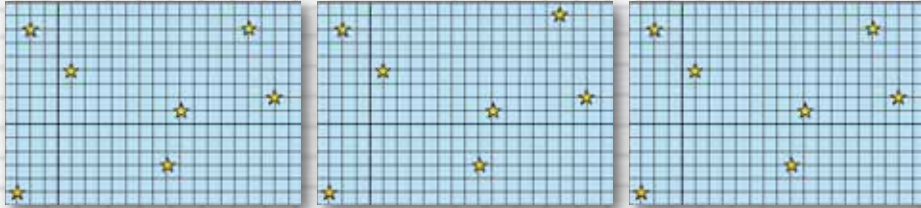
Lors de la rotation, les personnes de corpulence similaire bougent de manière identique; dans le cas contraire, le plus petit doit bouger davantage que le plus grand. En aucun cas, une des personnes ne reste immobile ou ne tourne parfaitement sur elle-même. Une planète a donc de l'influence sur son étoile, mais si sa masse est faible, son influence sera moindre.



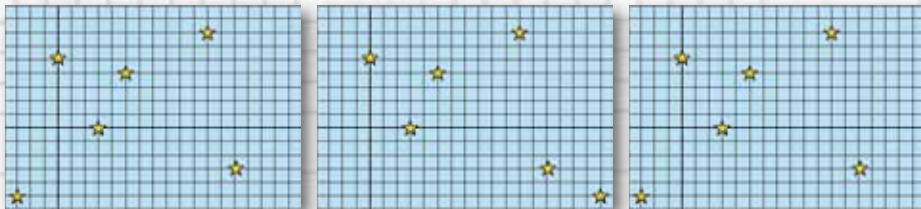
Exercice 5.4 > Tu bouges ou tu ne bouges pas?

Les cartes ci-dessous montrent chacune un coin du ciel différent observé à trois reprises. Quelles étoiles possèdent des planètes? Des lignes de repère ont été tracées pour vous aider à les dénicher...

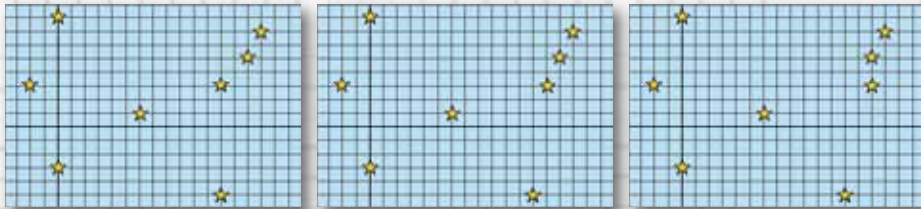
ZONE 1



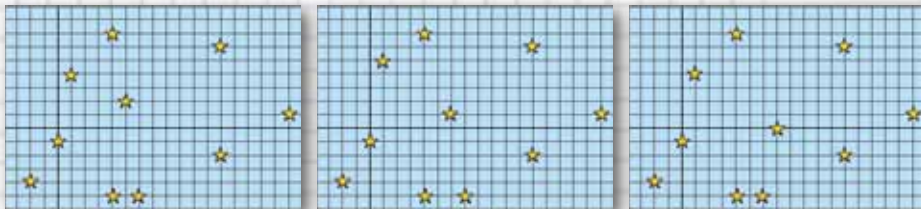
ZONE 2



ZONE 3



ZONE 4



ZONE 5

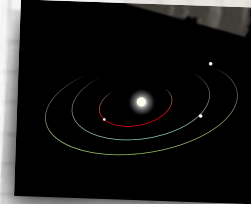


Exercice 5.5 > Un bon transit

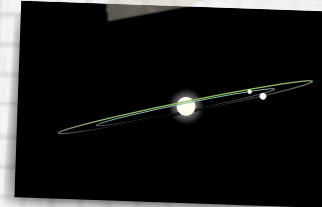
Nous voyons la luminosité d'une étoile diminuer si son exoplanète vient s'intercaler entre elle et la Terre, provoquant une mini-éclipse.

1. Voici trois systèmes exoplanétaires tels qu'observés depuis la Terre. Lesquels présentent un transit?

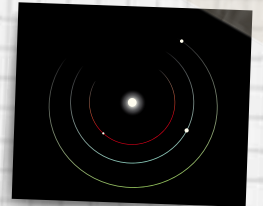
A.



B.



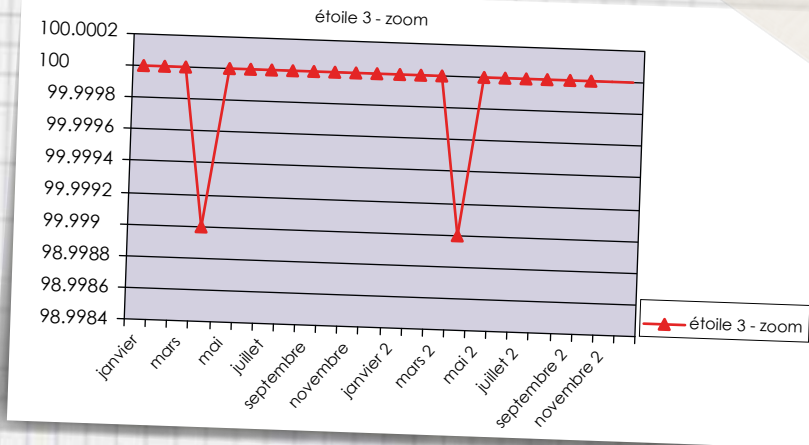
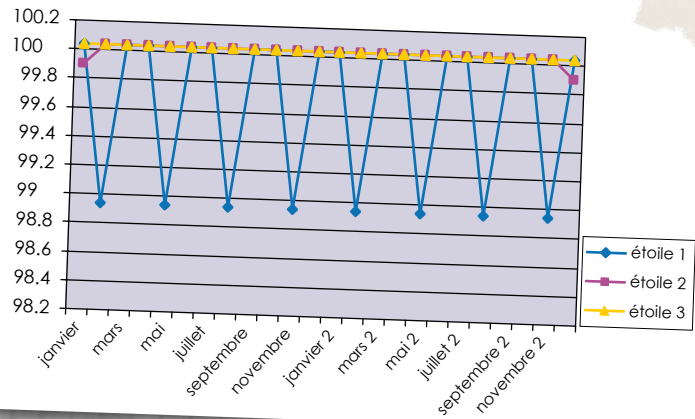
C.



2. D'après les changements de luminosité des étoiles ci-dessous, observées pendant deux ans, trouver à quelle planète de notre Système solaire l'exoplanète observée ressemble le plus...

POUR INFORMATION :

Planètes de notre Système solaire	Année = Temps mis pour faire un tour autour du Soleil	Changement de luminosité si la planète passait devant le Soleil, en %
Mercure	88 jours (soit environ 3 mois)	0,0012
Vénus	225 jours (soit environ 7 mois et demi)	0,0076
La Terre	1 an	0,0084
Mars	1,9 an	0,0024
Jupiter	11,9 ans	1,1
Saturne	29,5 ans	0,75
Uranus	84 ans	0,14
Neptune	165 ans	0,13

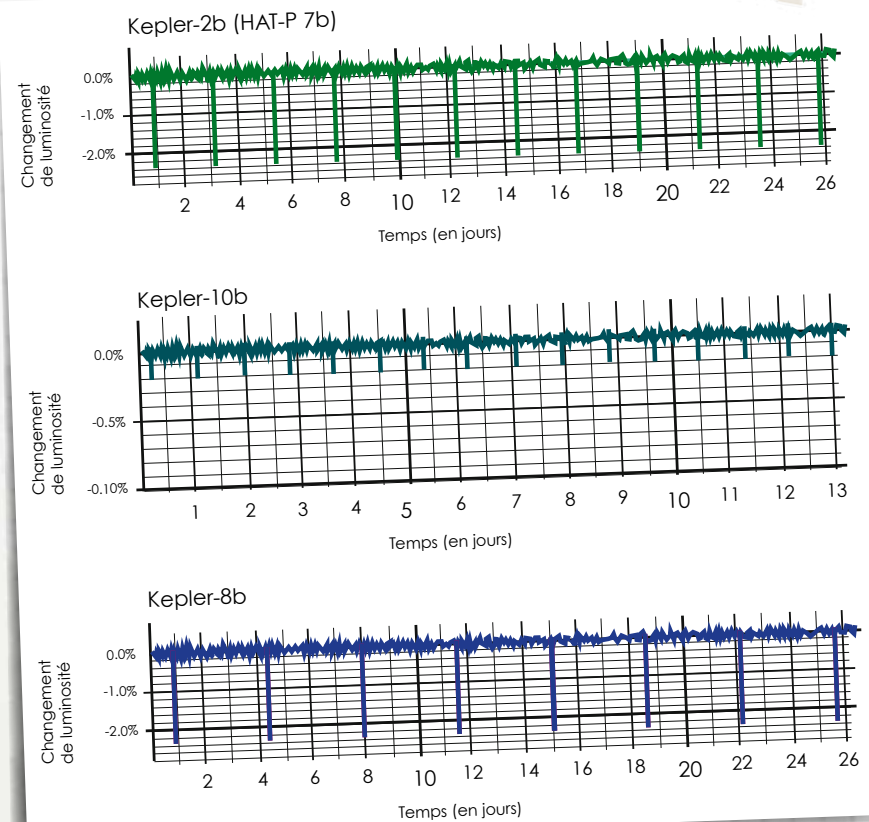


- a. Quelle diminution de luminosité subit l'étoile 1 ?
 l'étoile 2 ?
 l'étoile 3 ?
- b. En comparant à la table ci-dessus, quelle étoile possède une exoplanète dont la taille est semblable à celle de Mercure ?
 de Vénus ?
 de la Terre ?
 de Mars ?
 de Jupiter ?
 de Saturne ?
 d'Uranus ?
 de Neptune ?

- c. Après quel intervalle de temps se produisent les diminutions pour l'étoile 1 ?
 l'étoile 2 ?
 l'étoile 3 ?

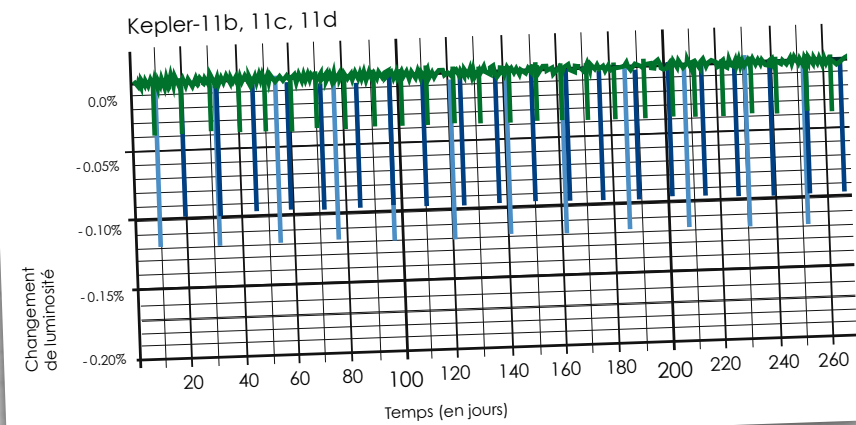
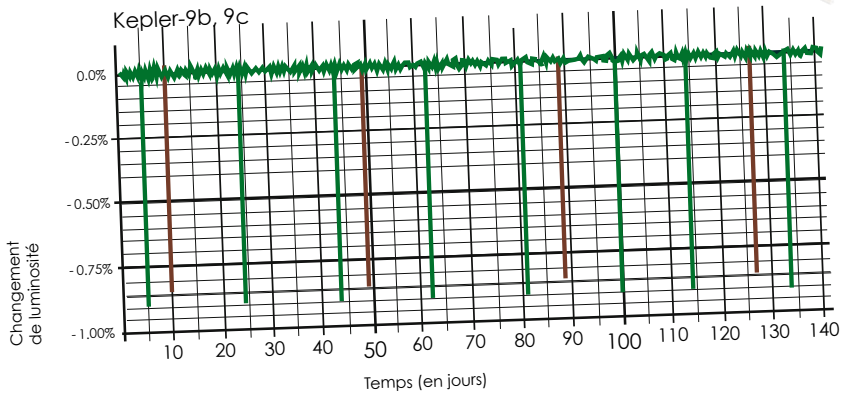
- d. En comparant aux valeurs des « années » pour le Système solaire (voir tableau Page 59), quelle étoile possède une exoplanète dont l'orbite ressemble à celle de Mercure ?
 de Vénus ?
 de la Terre ?
 de Mars ?
 de Jupiter ?
 de Saturne ?
 d'Uranus ?
 de Neptune ?

3. Voici des données réelles :



Questionnaire: Vrai ou faux?

- Il n'existe pas de planètes en dehors de notre Système solaire.
Vrai - Faux
- La plupart des exoplanètes ont été détectées de manière indirecte.
Vrai - Faux
- Plus une planète est petite, plus elle perturbe son étoile.
Vrai - Faux
- Le centre de masse est toujours proche de l'objet le moins massif.
Vrai - Faux
- Une planète qui passe devant son étoile provoque une mini-éclipse appelée transit.
Vrai - Faux



Une fois les « années » et les diminutions de luminosité mesurées, que constate-t-on ?

.....

.....

.....



EXTENSION

Pour ceux qui aiment les mathématiques, voici comment calculer la taille d'une planète en observant son transit. Si l'étoile-hôte est de type solaire : la diminution de luminosité (Z pourcent) vaut $Z/100 = \pi R_p^2 / \pi R_*^2$; sachant que $R_* \sim R_{\text{Soleil}} \sim 100 \times R_{\text{Terre}}$, la taille de la planète, en rayons terrestres, vaut donc $R_p = 10 \sqrt{Z}$.



Fig. 5.9 Vue d'artiste du système planétaire entourant l'étoile epsilon Eridani
© NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC)

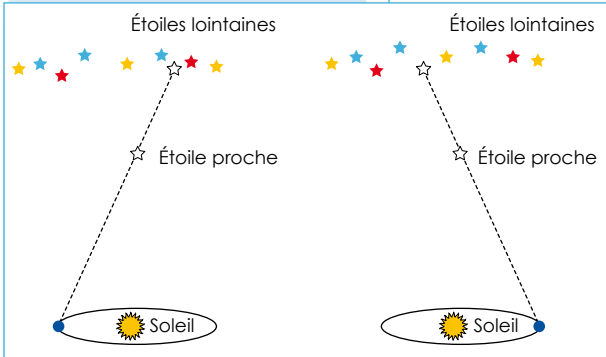




6. Mesurer la distance des étoiles

Fig. 6.1 La «boîte à bijoux» est un amas d'étoiles, soit un groupe d'étoiles toutes nées en même temps du même nuage - des jumelles célestes, en quelque sorte. © ESO

Fig. 6.2
Triangulation céleste.
En observant l'étoile à différents moments de l'année, on voit la position d'une étoile proche varier sur le fond de ciel lointain.



Par une belle nuit, le regard est inmanquablement attiré vers les myriades d'étoiles qui parsèment le ciel. Ces points brillants semblent si petits comparés au grandiose Soleil... Pourtant, ce dernier n'est qu'une étoile parmi d'autres: ni particulièrement plus grand, ni plus gros ou plus massif qu'un autre astre. Notre Soleil figure plutôt dans la moyenne! Pourquoi les étoiles nous paraissent-elles alors si minuscules? Simplement parce qu'elles se trouvent beaucoup, beaucoup plus loin.

La distance Terre-Soleil vaut 150 millions de kilomètres: cela peut nous paraître énorme, mais c'est peu en comparaison des quarante mille milliards de kilomètres (soit presque 300 000 fois plus!) qui nous séparent de l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure. Une distance aussi considérable, ni robot ni homme ne l'a parcourue: comment peut-on la connaître, alors?

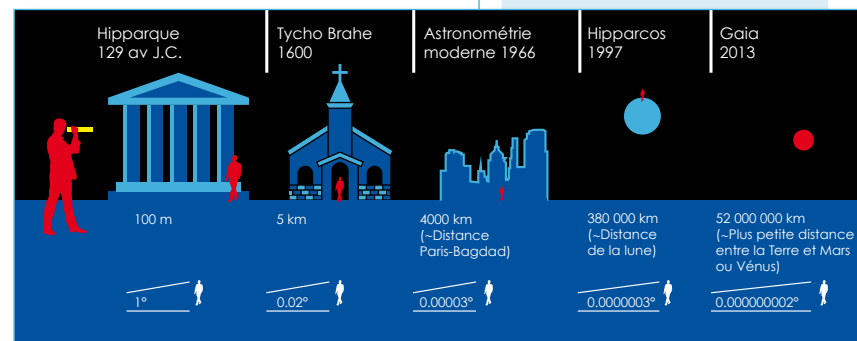
La réponse tient en un mot: la triangulation. Traditionnellement, cette méthode implique de viser une cible depuis deux endroits différents: si l'on connaît la séparation entre ces deux endroits, la mesure des angles de visée donne directement la distance de la cible. En astronomie, on opère de manière similaire, mais à grande échelle, puisque les étoiles sont lointaines (Fig. 6.2). Ainsi, les deux endroits différents sont deux positions de la Terre sur son orbite – cela veut dire qu'on étudie l'étoile en question en janvier et juillet, par exemple.

Que verra-t-on alors? Cette étoile n'apparaîtra pas à la même position vis-à-vis de ses consœurs lointaines: c'est l'effet dit de « parallaxe ». On peut facilement montrer (voir expériences ci-dessous) que plus l'étoile est proche, plus sa position variera au cours de l'année.

Toutefois, le changement de position se révèle infime, même pour les étoiles proches car les distances en jeu sont énormes. Ainsi, pour Proxima du Centaure, il est d'environ trois quarts de seconde d'arc, soit deux dix-millièmes de degré! Mesurer de tels angles est difficile: prévu depuis l'Antiquité, l'effet de parallaxe n'a été observé qu'il y a deux cents ans, au début du 19^e siècle.

Les choses se sont améliorées lentement (Fig. 6.3): seules quelques centaines de parallaxes stellaires avaient été mesurées avant 1989. Heureusement, le satellite européen Hipparcos est alors entré en scène: il a permis de mesurer la parallaxe de vingt mille étoiles! Son successeur, qui sera lancé en 2013, s'appelle Gaia. Encore plus précis, ce satellite européen sera capable de localiser précisément plus de deux cent millions d'étoiles!

Fig. 6.3
Au cours du temps, la précision des mesures angulaires est grandement améliorée, ce qui a permis de mesurer la distance de plus en plus d'étoiles.



Calculs 6.1 > Le bon angle COMMENT FONCTIONNE LA TRIANGULATION?

Essayons de comprendre...

1. Sur une feuille, dessiner deux points A et B. À l'aide d'un rapporteur, chercher où se trouve le point C tel que la droite AC fait un angle de 30° avec la droite AB et la droite BC fait un angle de 50° avec la droite AB.
2. Y a-t-il plusieurs solutions?
3. Mesurer les distances AC et BC. Dessiner ensuite deux nouveaux points A' et B' plus rapprochés l'un de l'autre que A et B, et recommencer le positionnement du (des) point(s) C. Même chose avec A'' et B'' plus éloignés l'un de l'autre que A et B. Que valent alors les distances à C, par rapport aux distances précédentes?
4. Revenons aux deux points A et B de départ. Ajoutons un point C' situé plus près du segment AB que C et un point C'' plus éloigné. Mesurer les angles vers C' et C'' à partir de A et de B ainsi que les angles en C, C' et C'' vers A et B, que peut-on constater?
5. Quelle conclusion en tirer?



Expérience 6.2 > Une étoile qui a la bougeotte

CONSTRUCTION

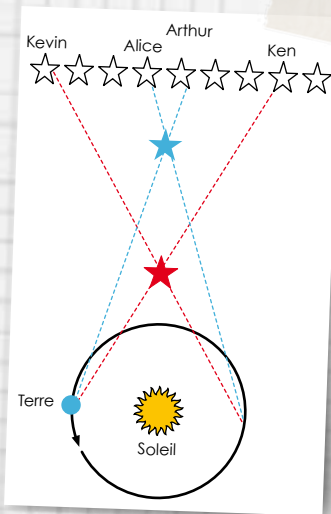
Distribuer les trois masques à trois personnes qui joueront les rôles du Soleil, de la Terre et d'une étoile proche. Installer le Soleil puis disposer le reste du groupe sur une ligne à environ 10 m de lui. Installer l'étoile proche devant la ligne, à 3 m environ du Soleil. Faire tourner la Terre autour du Soleil (à environ 1,5 m de celui-ci) et demander à la Terre de citer sur quelle personne se projette l'étoile proche au cours de sa course autour du Soleil (il est particulièrement important qu'il ou elle cite les personnes situées à l'extrémité de la course) (Fig. 6.4). Recommencer l'expérience en éloignant l'étoile proche de 2 m environ.

Matériel:

- Trois masques ou diadèmes (un avec le Soleil, un avec la Terre, un avec une grosse étoile)
- Un groupe de minimum 15 personnes

Fig. 6.4

Quand la Terre tourne autour du Soleil, elle voit une étoile proche se déplacer énormément sur le fond de ciel, entre Ken et Kevin dans ce cas-ci, tandis qu'une étoile lointaine semble moins avoir la bougeotte, avec des déplacements limités à l'espace entre Alice et Arthur.



CONCLUSION

Plus une étoile est proche, plus son excursion sur le fond du ciel est importante.

NOTE

En principe, la Terre doit non seulement tourner autour du Soleil mais aussi tourner sur elle-même (en profiter pour se rappeler la définition du jour et de l'année). On peut demander à la Terre de le faire une ou deux fois, mais pour éviter de lui donner le tournis, on se contentera ici de son mouvement annuel autour du Soleil.



ALTERNATIVE / EXTENSION

Pour les plus grands ou ceux qui n'ont pas de groupe à disposition, l'expérience peut se faire en solitaire. Il s'agit ici de s'installer confortablement sur une chaise, un fauteuil ou un canapé, de tendre le bras devant soi en mettant le pouce vers le haut et enfin de regarder ce pouce en fermant alternativement un œil puis l'autre. On peut alors observer le déplacement du pouce sur le mur du fond. Recommencer l'expérience en pliant le bras à demi: l'excursion sera plus grande pour ce pouce-étoile plus proche.



Fig. 6.5
Illustration de l'alternative proposée

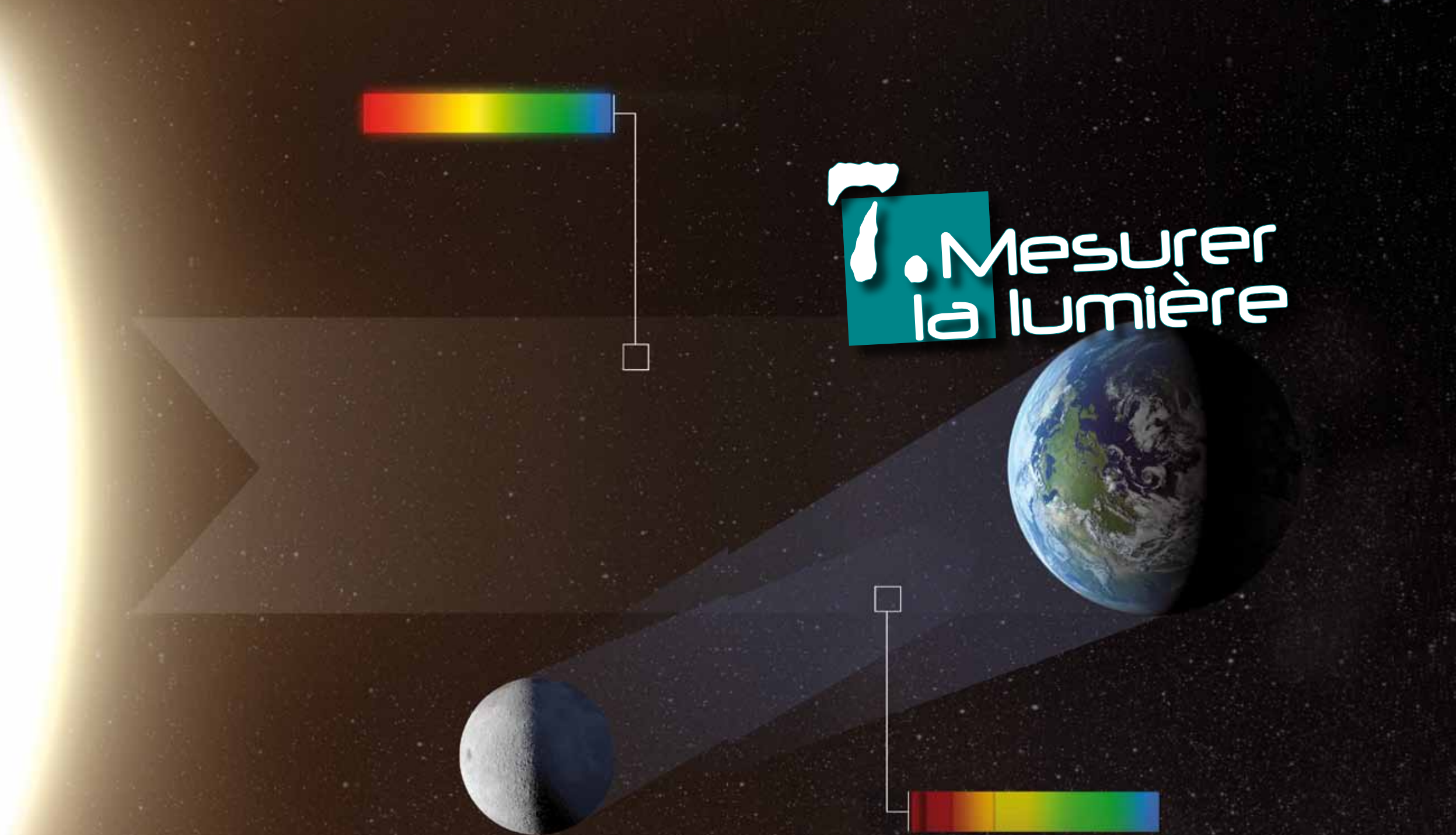
Questionnaire:

- Les étoiles ressemblent au Soleil
 à une planète
 à une lune
- L'étoile la plus proche se trouve à des millions de kilomètres
 des milliards de kilomètres
 des milliers de milliards de kilomètres
- L'Homme est capable de mesurer les distances des étoiles depuis l'Antiquité
 le Moyen-Âge
 le 19^e siècle
- Plus une étoile est proche, plus son déplacement vis-à-vis des étoiles lointaines est grand
 petit
 inchangé
- La nouvelle mission européenne de mesure des étoiles s'appelle Gaia
 Anthony
 Grominet



Fig. 6.6 L'amas des Arches est un groupe d'étoiles jeunes situé près du centre de notre Galaxie

© ESO



Mesurer la lumière

Fig. 7.1 La lumière du Soleil éclaire la Terre, qui en réfléchit une partie vers la Lune, éclairant son côté sombre. Lors de cette réflexion, la Terre ajoute ses propres signatures à la lumière solaire, de sorte que, lorsque la Lune renvoie cette lumière (appelée «lumière cendrée»), on peut y déceler notre signature céleste, notamment la trace de la vie terrestre. © ESO/L. Calçada

Fig. 7.2 Un arc-en-ciel

L'astronomie est une science très spéciale, puisque les astronomes ne « touchent » pas l'objet de leur convoitise³. Contrairement à la chimie, la biologie et la physique, il n'y a ici aucun soleil en éprouvette, aucune dissection de galaxie, aucune expérience reproduisant le Big Bang...

L'astronome doit donc se contenter de regarder le ciel ! A priori, on se dit que c'est bien peu. Pourtant, la lumière recèle de nombreux secrets. Pour qui sait les repérer, cela représente une mine d'informations !



³Il existe quelques rares exceptions : les météorites tombées sur Terre, les quelques échantillons que l'on a ramenés (roches lunaires, poussières de comètes ou d'astéroïdes, échantillon du vent solaire). On a également envoyé des robots visiter quelques objets proches. Ces exceptions sont limitées au Système solaire, car les étoiles se situent trop loin de la Terre pour les explorer avec les moyens actuels (voir chapitre précédent).

Comment faire pour décoder la lumière ? Simplement en utilisant un « analyseur de lumière » baptisé spectroscopie. Sa fonction principale est de « disperser » la lumière. Vous connaissez bien ce phénomène au nom compliqué, car vous l'avez déjà vu à l'œuvre lorsqu'un arc-en-ciel apparaît (Fig. 7.2). Dans ce cas, la lumière du Soleil est décomposée par les gouttelettes de pluie, faisant ressortir les couleurs qui la composent. On peut reproduire ce phénomène naturel en remplaçant les gouttes d'eau par un DVD (Bric. 7.1), un prisme,...



Fig. 7.3
Les spectres du sodium,
du mercure et du néon

© Ph. Demoulin

L'arc-en-ciel ainsi produit porte le nom de spectre. Lorsqu'on le regarde en détail – ce que ne permet pas l'arc-en-ciel naturel mais bien le spectroscopie – on remarque des choses bizarres : pour certaines sources de lumière (une lampe économique, par exemple), on observe des lignes colorées sur fond noir ; pour d'autres (comme le Soleil), on voit plutôt des lignes noires sur fond coloré. Ces lignes brillantes ou sombres s'appellent des raies, et ce sont les signatures secrètes de la lumière.

Le « truc », c'est que chaque ensemble de lignes est typique de la matière à l'intérieur de l'objet observé. Chaque gaz, liquide ou solide possède en effet son propre « code-barres lumineux » (Fig. 7.3). Pas besoin de toucher donc : il suffit d'analyser la lumière que l'on reçoit pour découvrir, à distance, la composition des étoiles... ou de l'acier en fusion, ou d'un magma très chaud (car il n'y a pas que les astronomes qui utilisent ce type d'outil !)

L'histoire n'est pas finie : la composition de l'objet émetteur n'est qu'une information parmi d'autres. Les raies peuvent également renseigner sur la vitesse de l'objet, sa température, sa pression, son taux de rotation, etc. Finalement, ce n'est pas si mal de rester à distance !



Bricolage 7.1 >

L'analyseur de lumière

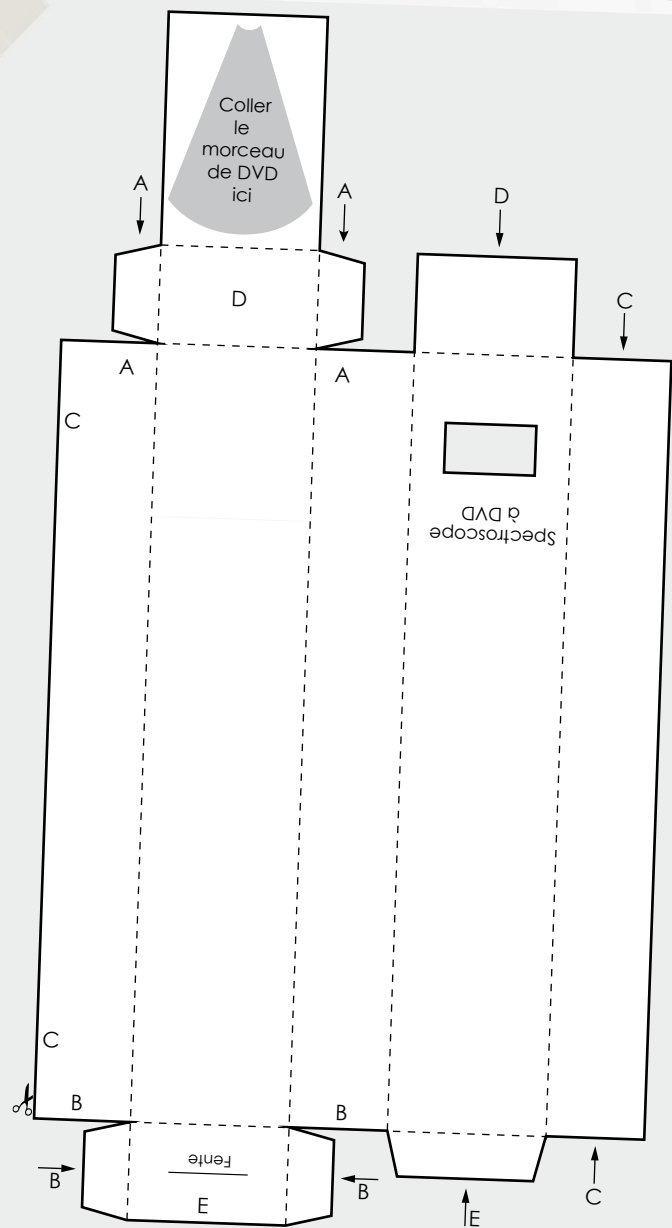


Fig. 7.4 Plan du spectroscopie



Fig. 7.5 Étapes de la découpe du DVD

Matériel:

- Une paire de ciseaux
- Un cutter
- Du papier collant
- Un DVD
- Une feuille de papier cartonné et non transparente sur laquelle est imprimé le plan de la Fig. 7.4 (le papier cartonné le plus sombre donne les meilleurs résultats)

CONSTRUCTION

Découper le plan fourni (Fig. 7.4) suivant les lignes extérieures, de manière à éliminer toutes les zones grisées. Couper la fente au cutter d'un trait unique et droit. Plier ce qui reste suivant les lignes intérieures. Couper le DVD en deux, écartez les deux couches en partant du milieu, coupez chaque moitié en quatre (Fig. 7.5) et fixer à l'aide du papier collant un 8^e de DVD réfléchissant à l'endroit indiqué (s'il dépasse, le découper encore un peu). Fixer à l'aide du papier collant les rabats en suivant les indications lettrées (rabat indiqué par les flèches A sur le côté A, rabat B sur côté B, etc.) de manière à construire une petite boîte allongée. Attention, ces rabats doivent impérativement être collés à l'extérieur de la boîte et non à l'intérieur, pour éviter que la lumière n'entre par les côtés (Fig. 7.7). Veiller à ne pas mettre de papier collant sur la fente ou sur le morceau de DVD !

Un dossier très complet sur le spectroscopie, pour différents niveaux scolaires, est accessible sur http://www.gaphe.ulg.ac.be/HRT/outreach_f.html : il reprend le bricolage ci-dessous, mais il fournit également bien d'autres bricolages, expériences et informations.

UTILISATION

Tourner la boîte ainsi construite, fente vers une source de lumière (il vaut mieux se placer dans une pièce sombre où la lampe est la seule allumée). La lumière révélera ses secrets en positionnant l'œil juste devant le trou à la base de l'instrument (Fig. 7.6). Au cas où trop peu de lumière passe par la fente, élargir un peu celle-ci en introduisant le cutter et en le faisant osciller un peu – ne pas élargir en coupant une 2^e fois au cutter et veiller à ce que la fente reste assez fine quelles que soient les circonstances ! Observer diverses sources lumineuses avec cet appareil et comparer leur signature lumineuse. Par exemple : le Soleil (attention utiliser le reflet du Soleil sur un mur blanc plutôt que le Soleil lui-même), une lampe à incandescence, un tube fluorescent (tube dit « néon ») ou une lampe munie d'une ampoule économique, une lampe orange d'éclairage public, ou encore la flamme d'une bougie chauffe-plat dans laquelle on jette du sel ou le bout soufré d'une allumette (Fig. 7.8). Comparer l'apparence du spectre dans les différents cas : noter s'il existe des lignes colorées sur fond noir, ou noires sur fond coloré et, quand elles existent, si ce sont toujours les mêmes.

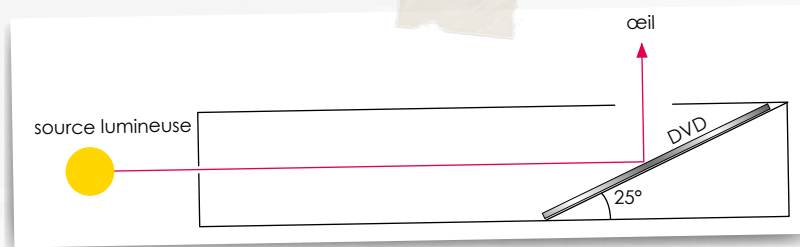


Fig. 7.6
Utilisation du spectroscopie à réflexion

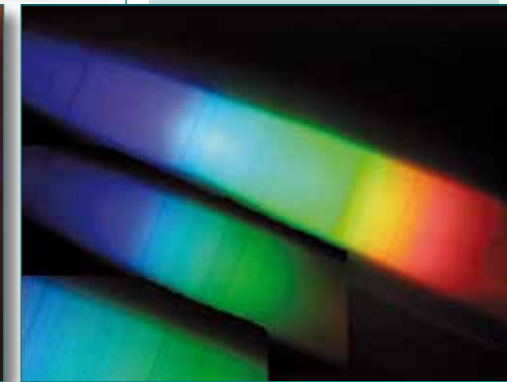


Fig. 7.8
En haut, spectre d'un tube fluorescent (à comparer au spectre de la Fig. 7.3) dit tube « néon »

En bas à gauche, spectre d'une lampe d'éclairage public

En bas à droite, spectre du Soleil (le spectre d'une lampe à incandescence est similaire, mais sans les fines lignes noires)

© C. Cattelain

Questionnaire: Vrai ou faux ?

1. Les astronomes reproduisent les étoiles en laboratoire pour pouvoir les étudier.
Vrai - Faux
2. L'arc-en-ciel est un spectre.
Vrai - Faux
3. Les raies servent à identifier la composition des objets lumineux.
Vrai - Faux
4. La lumière du Soleil ne comporte qu'une seule couleur.
Vrai - Faux
5. On ne peut pas trouver d'informations sur un objet distant en utilisant sa lumière.
Vrai - Faux



Fig. 7.7 Photos du bricolage :
à gauche : boîte ouverte (montrant la position du morceau de DVD),
en dessous : zoom sur le positionnement de la partie accueillant le DVD,
à droite : zoom sur la boîte fermée, pour montrer comment se placent les rabats.

© GAPHE



8. Prendre la mesure de l'univers

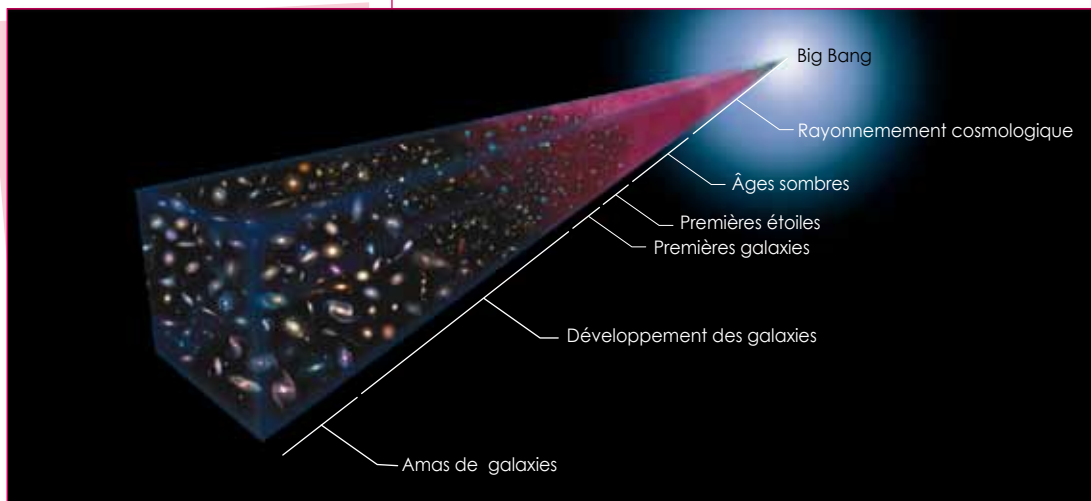


Fig. 8.2 L'histoire de l'Univers, résumée graphiquement

© HST

Difficile de concevoir les énormes distances et les tailles gigantesques des astres dans l'Univers, ou d'imaginer la façon dont les planètes tournent. Voici quelques petits « trucs » pour vous y aider...



Bricolage 8.1 > Petit pois ou gros ballon?

Matériel:

- Des sphères de diverses grandeurs (billes, grains de poivre, ballon de plage, balle de tennis,...)
- Un mètre

CONSTRUCTION

Mesurer le diamètre des différentes sphères et essayer de reproduire les systèmes suivants :

1. Terre-Lune: la Lune est trois à quatre fois plus petite que la Terre et elle en est éloignée de trente diamètres terrestres (ou soixante rayons terrestres).
2. Soleil-Terre: la Terre est cent fois plus petite que le Soleil et elle en est éloignée de cent diamètres solaires.



Bricolage 8.2 > Un mètre de Système solaire

CONSTRUCTION

Faire un trait à une extrémité de la bande de papier et y noter « Soleil ». Recommencer à l'autre extrémité en notant cette fois « ceinture de Kuiper – Pluton ». Pour représenter les planètes géantes: plier en deux, faire un trait de crayon à la pliure et noter « Uranus ». Plier ensuite chaque moitié en deux, y noter « Saturne » côté Soleil et « Neptune » de l'autre. Plier ensuite la bande Soleil-Saturne en deux et écrire au milieu « Jupiter ».

Passons au système solaire interne: plier la bande Soleil-Jupiter en deux et écrire au milieu « ceinture d'astéroïdes – Cérès ». Plier la bande Soleil-Cérès en deux et écrire « Mars » sur la pliure. Plier ensuite la bande Soleil-Mars en deux et y indiquer « Vénus ». Plier enfin chaque moitié de la bande Soleil-Mars en deux et noter « Mercure » côté Soleil et « Terre » à l'autre.

NOTE

Seules les distances relatives (approximatives) sont ici représentées, pas les tailles du Soleil, des planètes ou des astéroïdes.

Pour plus d'informations sur le Système solaire et pour en construire un parfaitement à l'échelle, voir Cahier 1, Chap. 2.

Matériel:

- Un crayon
- Une bande de papier d'un mètre de long (par exemple un rouleau de papier pour caisse enregistreuse)

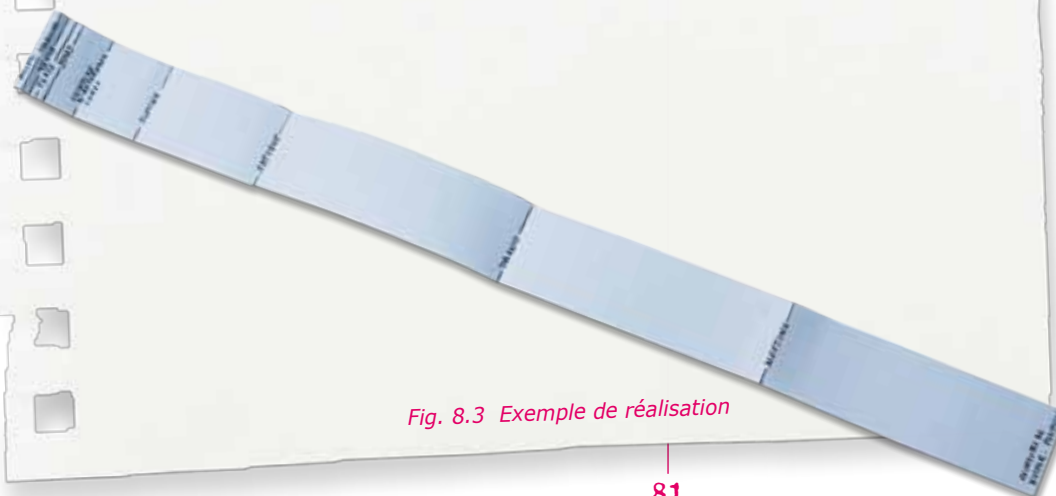


Fig. 8.3 Exemple de réalisation



Calculs 8.3 > Échelon supérieur

Notre Soleil est loin d'être unique dans l'Univers. Si l'on s'éloigne du Système solaire, on verra les étoiles s'organiser petit à petit en une grande structure appelée galaxie. Notre Galaxie s'appelle la Voie Lactée et contient environ 200 milliards d'étoiles...

Pour se représenter la Taille de notre Galaxie, faisons un petit calcul en prenant une échelle où 1 centimètre représente 2,5 milliards de kilomètres.

1. La Terre étant éloignée de 150 millions de kilomètres du Soleil, quelle serait le diamètre de l'orbite terrestre à cette échelle ?
2. Uranus est situé vingt fois plus loin du Soleil que la Terre. À l'échelle choisie, son orbite a la taille : d'une pièce de un cent, d'une pièce d'un euro ou d'une médaille olympique ?
3. La Voie Lactée a un diamètre d'un milliard de milliards de kilomètres. À l'échelle choisie, quelle taille a-t-elle (en cm, m ou km) ?
4. Prendre un atlas : qu'est-ce qui correspond à cette taille ?

CONCLUSION

Si l'on réduit la majeure partie du Système solaire à la taille d'une pièce d'un euro, la Voie Lactée a la taille d'un continent !



Fig. 8.4 Illustration de la conclusion

© ASP



Expérience 8.4 > Marche planétaire

CONSTRUCTION

Distribuer les masques à cinq personnes. Dessiner une croix au milieu de la zone et noter « Soleil » : y installer la personne portant le masque solaire. Faire un nœud à une extrémité de la grande ficelle et quatre nœuds à 58 cm, 1,08 m, 1,5 m, et 2,28 m du premier. Tracer quatre cercles en donnant le 1^{er} nœud au Soleil, et en lui tournant autour avec une craie coincée aux quatre autres nœuds. Noter sur le petit cercle « Mercure », et sur les suivants « Vénus », « Terre », « Mars ». Couper la ficelle en quatre morceaux de 29, 36, 42 et 61 centimètres. Sur le petit cercle, tracer à la craie un trait (au hasard) et tracer 5 autres traits séparés l'un de l'autre de 61 centimètres le long de la circonférence mercurienne (s'aider de la ficelle de 61 centimètres). Faire pareil pour Vénus avec la ficelle de 36 centimètres, la Terre avec la ficelle de 42 centimètres et Mars avec la ficelle de 29 centimètres. Au final, il doit y avoir 6 traits sur l'orbite de Mercure, 16 pour Vénus, 26 pour la Terre, et 49 pour Mars. Chacun des traits représente en fait la position d'une planète à un moment donné et

l'espace entre les traits correspond à un intervalle de deux semaines (pour la Terre, il faut donc bien $2 \times 26 = 52$ semaines, soit une année, pour faire un tour autour du Soleil).

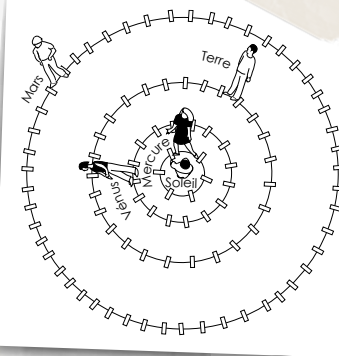


Fig. 8.5 Deux vues de l'expérience

© Kepler



UTILISATION

Positionner les personnes avec les masques de planètes sur leurs orbites respectives, et mettre le reste du groupe tout autour (il représente les lointaines étoiles). Donner un signal régulier (frapper dans les mains ou donner un coup de sifflet) : les planètes doivent alors passer au trait suivant (attention, toutes les planètes tournent dans le même sens !)...

Matériel:

- Un mètre
- Une zone de 5 m sur 5 m
- Une ficelle de 2,5 m
- De la craie
- Cinq masques ou diadèmes (Soleil, Mercure, Vénus, Terre, Mars)
- Un groupe d'au moins six personnes

NOTE

Un tel système reproduisant les mouvements s'appelle «planétaire» en français ou «orrery» en anglais. Faire participer tout le groupe à la construction mais aussi à l'utilisation, en échangeant régulièrement les rôles. Quelques remarques: l'échelle utilisée ici est telle qu'un centimètre représente un million de kilomètres; on ne représente pas ici la rotation des planètes et du Soleil sur eux-mêmes; les tailles relatives des planètes, du Soleil et des étoiles ne sont ici pas à l'échelle; les orbites réelles ne sont pas des cercles parfaits et ne sont pas toutes exactement dans le même plan, mais elles se rapprochent de cette situation.



EXTENSION

Cette représentation permet de voir de nombreux phénomènes:

- En faisant tourner toutes les planètes, on constate que plus une planète est proche du Soleil, plus elle tourne rapidement. En faisant tourner une planète à la fois, on peut le vérifier quantitativement en mesurant la durée de l'année pour chacune (compter combien de signaux sont nécessaires pour faire un tour complet).
- Vu du Soleil, le mouvement des planètes semble très régulier; vu de la Terre, cela semble beaucoup plus complexe ! La Terre peut ainsi remarquer que les planètes Mercure et Vénus ne s'éloignent jamais du Soleil (c'est pourquoi on les voit uniquement le matin ou le soir) et qu'elles sont les seules à pouvoir s'intercaler entre le Soleil et la Terre, provoquant une mini-éclipse appelée transit (voir Chap. 5). Par contre, Mars peut apparaître dans n'importe quelle direction du ciel, vu depuis la Terre. La planète semble cependant parfois «reculer» par rapport aux étoiles lointaines. Ce phénomène se produit aux alentours des oppositions, c'est-à-dire près des alignements Soleil-Terre-Mars (Mars et le Soleil semblent alors «opposés», vu depuis la Terre).

Questionnaire :

1. Laquelle de ces quatre planètes tourne le plus rapidement
 - Mercure
 - Vénus
 - la Terre
 - Mars
2. Laquelle de ces quatre planètes tourne le plus lentement
 - Mercure
 - Vénus
 - la Terre
 - Mars
3. Y a-t-il un lien entre distance au Soleil et vitesse orbitale ?
.....
4. Que voit le Soleil lorsque les planètes tournent ?
.....
5. Dans quelles directions la Terre voit-elle Mercure, Vénus et Mars ?
.....
6. Si le Soleil, Mercure et la Terre sont alignés, que se passe-t-il ?
.....
7. Quelles planètes peuvent provoquer une mini-éclipse appelée «transit» ?
.....
8. Si le Soleil, la Terre et Mars sont alignés, que se passe-t-il ?
.....
9. Peut-on voir Mercure à minuit ?
.....
10. Peut-on voir Mars à midi ?
.....



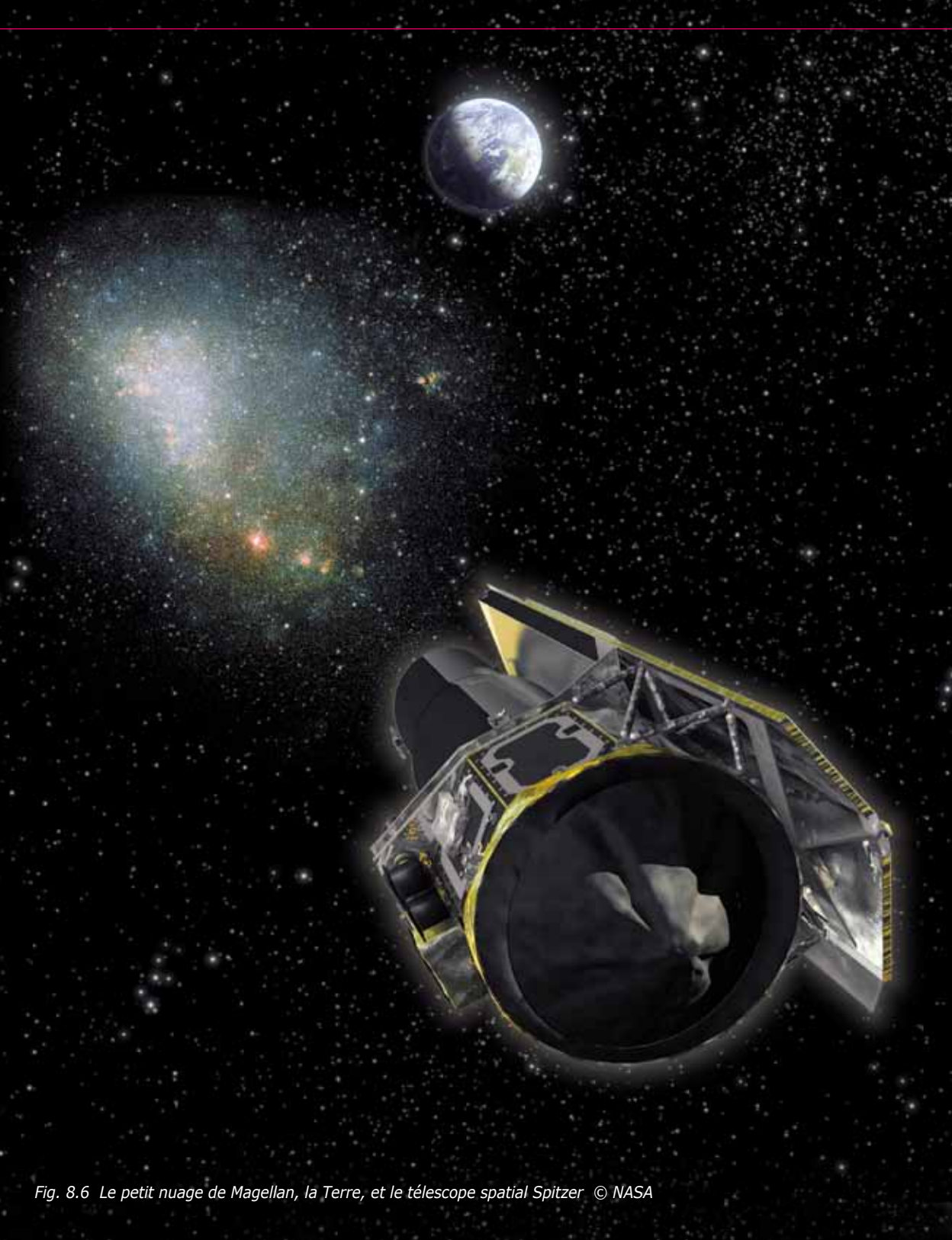


Fig. 8.6 Le petit nuage de Magellan, la Terre, et le télescope spatial Spitzer © NASA



Calculs 8.5 > Le calendrier cosmique

Pour mieux mesurer l'âge de l'Univers et celui de la Terre, imaginons réduire toute l'histoire du cosmos (soit 13,7 milliards d'années) à un an (soit 365 jours). Un siècle – une longue vie humaine – s'écoulerait en un quart de seconde dans ce calendrier pas comme les autres !

Calculer la date d'autres événements dans ce calendrier en remplissant le tableau ci-dessous. Ne donner les heures que pour le 1^{er} janvier et le 31 décembre.

Événement	Quand cela s'est-il passé ?	Date sur le calendrier cosmique
Big Bang	Il y a 13,7 milliards d'années	1 ^{er} janvier à 0h
Émission du rayonnement fossile – l'Univers devient transparent	380 000 ans après le Big Bang	.....
Les premières galaxies se forment	600 millions d'années après le Big Bang	.....
La Voie Lactée, notre Galaxie, commence à se former	Il y a 10 milliards d'années	.....
Le Système solaire commence à se former	Il y a 4,6 milliards d'années	.....
Les plus anciennes traces de vie sur Terre	Il y a 3,8 milliards d'années	.....
Les mammifères et les dinosaures apparaissent	Il y a 200 millions d'années environ	.....
Les dinosaures disparaissent et les premiers primates apparaissent	Il y a 65 millions d'années environ	.....
Les premiers hominidés apparaissent	Il y a 7 millions d'années	.....
L'homme moderne (homo sapiens) apparaît	Il y a 200 000 ans	.....
L'écriture apparaît... c'est le début de l'Histoire	Il y a 5000 ans	.....
La ville de Rome est fondée	En 753 avant notre ère	.....
Chute de l'empire romain	En 476	.....
L'homme marche sur la Lune	En juillet 1969	.....
Aujourd'hui		31 décembre, à minuit
Le Soleil meurt	Dans 5 milliards d'années	.....



9. solutions

Fig. 9.1 Étoiles et nuages cosmiques se partagent ce bout de ciel situé dans la constellation du Caméléon © ESO

1. Mesurer notre position

Questionnaire: Vrai ou faux ?

1. **Faux**
2. **Vrai**
3. **Faux**
4. **Vrai**
5. **Vrai**

2. Mesurer l'heure, l'année et même la terre

Questionnaire:

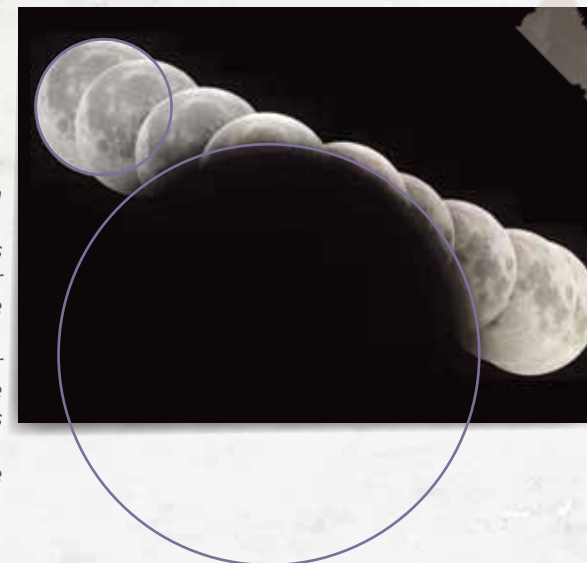
1. **Au Sud**
2. **Est**
3. **Ouest**
4. **En été**
5. **Eratosthène**
6. **Possible, comme le 21 juin à Assouan et Alexandrie**
7. **L'heure – à noter que si on le graduait en utilisant les points cardinaux, il donnerait aussi la direction du Soleil, mais on ne le fait pas en général...**
8. **Différente**
9. **Au même endroit**
10. **A des hauteurs différentes – il est plus haut quand on se rapproche de l'équateur**

3. Mesurer la lune

Calculs 3.1

1. **1,8 centimètres**
2. **5,6 centimètres**

Fig. 9.2 Correction des points 1 et 2. Si l'on ne connaît pas la méthode pour retrouver le centre d'un cercle à partir d'arcs, on peut tâtonner en utilisant une série de cercles-modèles (emporte-pièces, latte avec cercles de différentes grandeurs,...).



3. **Le rapport de ces deux diamètres, lunaire et terrestre, vaut environ un tiers**

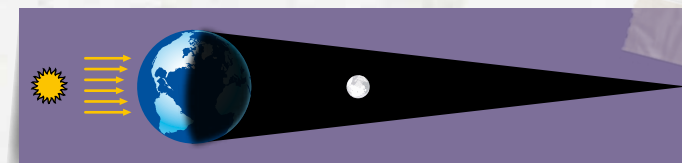


Fig. 9.3 Situation réelle lors d'une éclipse de Lune (le schéma n'est pas à l'échelle)

NOTE : Attention, les valeurs obtenues seront certainement approximatives. L'important est d'obtenir le bon ordre de grandeur (arriver à 380 000, 300 000 ou 450 000 kilomètres pour la distance Terre-Lune peut être considéré comme correct, mais pas 30 000 kilomètres ou 3 000 000 kilomètres !). D'autre part, en réalité, l'ombre rétrécit à mesure qu'on s'éloigne de la Terre (*Fig. 9.3 à comparer à la Fig. 3.2*). La mesure du rayon lunaire que tu viens de réaliser n'est donc qu'approximative. De plus, l'orbite lunaire n'est pas un cercle parfait, mais bien une ellipse, sa vitesse et sa distance varient donc au cours de son trajet : de 363 000 à 405 000 kilomètres pour la distance, par exemple. Les valeurs indiquées ci-dessous sont les valeurs réelles.

4. **Le rayon de la Lune vaut donc 0,273 rayon terrestre.**

5. 1 737 kilomètres

6. La Lune fait 1/2 de la largeur du doigt

7. 0,5 degré

8. $A = 0,25$ degré

9. $B = 360$ degrés

10. $C = B/A = 1440$

11. $B = 2\pi D$

12. $B = 2\pi D = C \times A = 1440 \times R_{Lune}$ donc $D = C \times A / 2\pi \sim 229 \times R_{Lune}$

13. $D = 229 \times R_{Lune} = 229 \times 0,273 \times R_{Terre} = 63 \times R_{Terre}$

14. $D = 384\,000$ kilomètres

15. Oui

16. $E =$ une heure



Fig. 9.4

La Lune se déplace d'une distance égale à son diamètre en une.

17. $2 \text{ rayons} = 2 \times 1737 = 3474$ kilomètres

18. $Vitesse = 2 \times R_{Lune} / E = 3474$ kilomètres/h soit environ 1 kilomètre/s

Extension:

Pour une balle de ping-pong de 4 cm de diamètre, il faut s'éloigner de 4,5 m; pour une balle de tennis de 6 cm de diamètre, il faut s'éloigner de 7,5 cm.

Questionnaire:

1. Parce qu'elle passe dans l'ombre de la Terre
2. Soleil-Terre-Lune
3. Un quart
4. Lors de la formation du Système solaire
5. Après la Terre, puisqu'il a fallu que la Terre subisse une collision pour que la Lune naisse

4. Mesurer le relief des planètes

Calculs 4.1

1. 2 heures
2. $2 \text{ h fois } 5 \text{ kilomètres/h} = 10 \text{ kilomètres}$
3. Non, car cette distance correspond à un aller-retour, elle vaut donc deux fois la distance rocher-arbre.
4. Au vu de la réponse précédente, cette distance vaut $10/2 = 5$ kilomètres
5. Plus loin puisqu'il a mis plus de temps pour le trajet
6. $3 \text{ h fois } 5 \text{ kilomètres/h divisé par } 2 = 7,5 \text{ kilomètres}$

Expérience 4.3

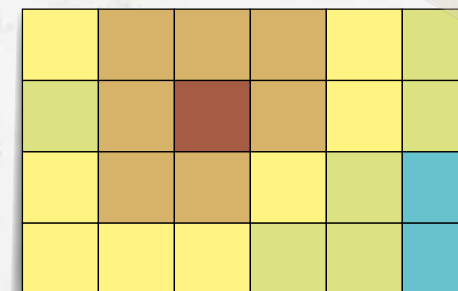


Fig. 9.5
Exemple de carte remplie

Questionnaire: Vrai ou faux ?

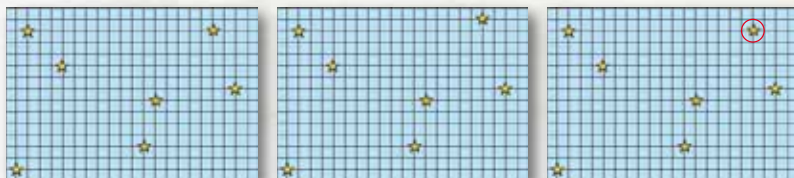
1. Faux, certaines surfaces sont cachées sous les nuages.
2. Vrai
3. Faux, il passe alors au-dessus d'une vallée.
4. Faux, il fait parfois très chaud ou très froid sur ces objets, comme pour Vénus et Titan, respectivement. N'oublions pas les pluies d'acide, la pression atmosphérique parfois très faible ou très forte,...
5. Vrai

5. Mesurer notre position

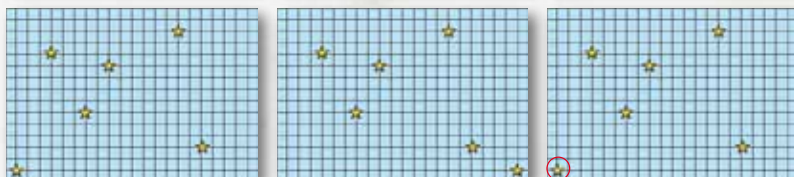
Exercice 5.4

Il s'agit de repérer les étoiles faisant des allers-retour ou des zig-zags (cf. Fig. 5.4)

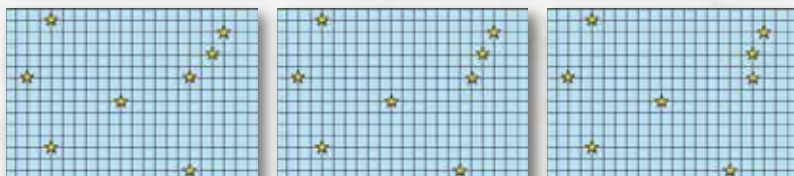
ZONE 1



ZONE 2

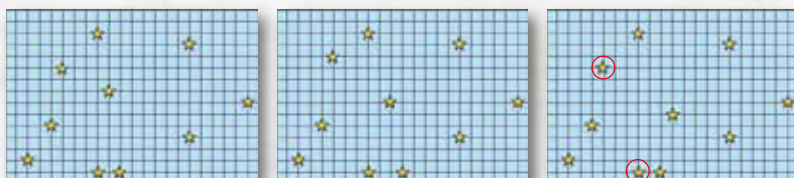


ZONE 3



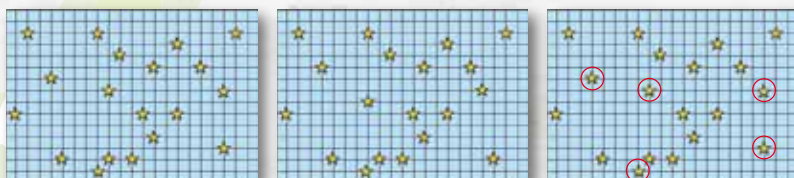
Dans cette zone, il y a une étoile qui avance en ligne droite, mais elle ne fait pas d'allers-retour !

ZONE 4



Dans cette zone, il y a une étoile qui avance en ligne droite, mais elle ne fait pas d'allers-retour !

ZONE 5



Exercice 5.5

1. **Seulement B, dans les autres cas, les planètes ne passent jamais devant leur étoile, si l'on observe depuis la Terre.**
- 2.a **L'étoile 1: $100 - 98,9 = 1,1\%$
L'étoile 2: $100 - 99,86 = 0,14\%$
L'étoile 3: $100 - 99,999 = 0,001\%$**
- 2.b **De Mercure: étoile 3
De Jupiter: étoile 1
D'Uranus: étoile 2**
- 2.c **L'étoile 1: 3 mois
L'étoile 2: 2 ans
L'étoile 3: 1 an**
- 2.d **De Mercure: étoile 1
De la Terre: étoile 3
De Mars: étoile 2**
3. **a) La plupart des transits se produisent très souvent – les périodes sont de quelques jours dans la plupart des cas observés.
b) Les diminutions de luminosité sont souvent assez importantes: on repère plus de Jupiter ou de Neptune que de Terre.
c) Certaines étoiles possèdent plusieurs exoplanètes: Kepler 9 en a deux et Kepler 11 en a 3 sur les figures montrées Page 62 ! On le remarque facilement car il y a plusieurs groupes de diminutions de luminosité, chacune avec sa période et sa diminution propres (ici marqués par des couleurs différentes).**

NOTE: Cela est bien sûr valable pour ces données en particulier: ne pas nécessairement en tirer de conclusions générales. En effet, il ne faut pas oublier que les méthodes d'observation sont biaisées: elles favorisent la détection de grosses planètes et/ou de planètes proches (et donc tournant rapidement) autour de leur étoile... Avec l'amélioration future de nos moyens d'observations, certaines conclusions risquent donc de changer.

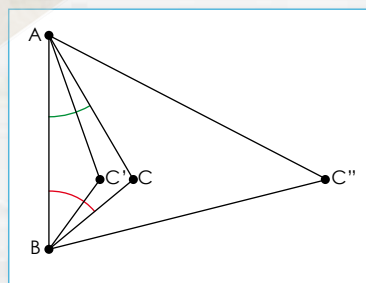
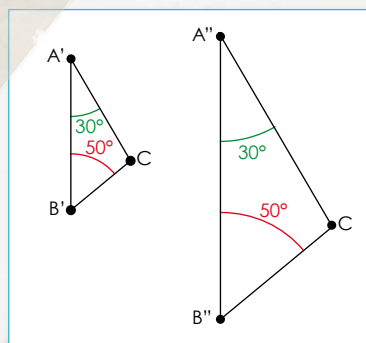
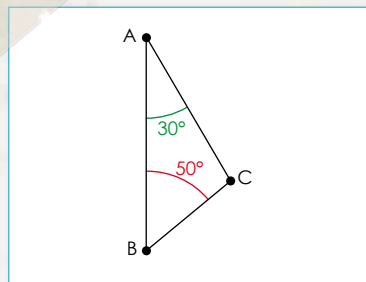
Questionnaire: Vrai ou faux ?

1. **Faux**
2. **Vrai**
3. **Faux**
4. **Faux**
5. **Vrai**

6. Mesurer la distance des étoiles

Calculs 6.1

1. Corrections ci-contre
2. Non, une seule ! La connaissance de deux angles permet donc de savoir où se trouve un 3^e point par rapport à deux autres.
3. Plus les points A et B sont proches, plus les distances AC et BC sont courtes.
4. Plus C est éloigné, plus les angles en A et B sont grands et l'angle en C petit.
5. Le principe de la triangulation : à partir de deux points, la connaissance de deux angles et de la distance de base entre ces points suffit à savoir exactement où se situe un 3^e point.



Questionnaire

1. Au Soleil
2. A des milliers de milliards de kilomètres (40 mille milliards de kilomètres)
3. Le 19^e siècle
4. Grand
5. Gaia

7. Mesurer la lumière

Questionnaire: Vrai ou faux ?

1. Faux
2. Vrai
3. Vrai
4. Faux, car l'arc-en-ciel montre bien qu'elle est composée de toutes les couleurs
5. Faux

8. Prendre la mesure de l'Univers

Bricolage 8.1

1. Terre-Lune. Par exemple : une balle de tennis (6,7 cm de diamètre) pour la Lune et un petit ballon de plage (25 cm de diamètre) pour la Terre, séparés de 7,5 m.
2. Soleil-Terre. Par exemple : un grain d'un millimètre pour la Terre (dessus d'une aiguille) et une balle de 10 cm de diamètre pour le Soleil, séparés de 10 m.

Calculs 8.3

- 300 millions fois 1 cm divisés par 2,5 milliards = 1,2 mm
- Une pièce d'un euro (taille vingt fois plus grande = 1,2 mm fois 20 = 2,4 centimètres)
- 1 milliard de milliards fois 1 cm divisé par 2,5 milliards = 4 000 kilomètres
- C'est la largeur de l'Amérique du Nord ou la distance Paris-Bagdad...

Questionnaire

- Mercure
- Mars
- Plus la planète est éloignée du Soleil, plus elle se déplace lentement.
- Un mouvement régulier, circulaire, pour chacune des planètes, qui apparaissent dans toutes les directions.
- Mercure et Vénus restent toujours près du Soleil; par contre, on voit Mars dans n'importe quelle direction.
- Mercure provoque une mini-éclipse appelée transit (Fig. 5.5).
- Mercure et Vénus (Fig. 5.5) par contre il n'y aura aucun transit pour Mars ni pour les autres planètes plus éloignées, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, car ces planètes tournent plus loin du Soleil que la Terre et ne peuvent donc jamais s'intercaler entre le Soleil et la Terre.
- Mars est simplement dans la direction opposée au Soleil (on verra Mars se lever et le Soleil se coucher). Mars peut alors sembler se déplacer en sens opposé du sens habituel mais il n'y aura aucun transit.
- Non, car il faudrait pour cela que le Soleil et Mercure se trouvent dans des directions opposées (pour rappel, il est minuit sur Terre à l'endroit opposé au Soleil – Exp. 1.3 dans Cahier I), or Mercure tourne plus près du Soleil que la Terre et il ne quitte donc jamais le voisinage solaire.
- Non, car il serait alors dans la direction du soleil (Exp. 1.3 dans Cahier I) qui nous éblouirait.

Calculs 8.5

Événement	Quand cela s'est-il passé ?	Date sur le calendrier cosmique
Big Bang	Il y a 13,7 milliards d'années	1 ^{er} janvier à 0h
Émission du rayonnement fossile – l'Univers devient transparent	380 000 ans après le Big Bang	1^{er} janvier à 0h 15m
Les premières galaxies se forment	600 millions d'années après le Big Bang	16 janvier
La Voie Lactée, notre Galaxie, commence à se former	Il y a 10 milliards d'années	9 avril
Le Système solaire commence à se former	Il y a 4,6 milliards d'années	30 août (et cela prit quelques «jours» seulement)
Les plus anciennes traces de vie sur Terre	Il y a 3,8 milliards d'années	21 septembre
Les mammifères et les dinosaures apparaissent	Il y a 200 millions d'années environ	26 décembre
Les dinosaures disparaissent et les premiers primates apparaissent	Il y a 65 millions d'années environ	29 décembre
Les premiers hominidés apparaissent	Il y a 7 millions d'années	31 décembre à 19h 30m
L'homme moderne (homo sapiens) apparaît	Il y a 200 000 ans	31 décembre à 23h 52m
L'écriture apparaît... c'est le début de l'Histoire	Il y a 5000 ans	31 décembre à 23h 59m 48s
La ville de Rome est fondée	En 753 avant notre ère	31 décembre à 23h 59m 54s
Chute de l'empire romain	En 476	31 décembre à 23h 59m 56s
L'homme marche sur la Lune	En juillet 1969	31 décembre à 23h 59m 59,9s
Aujourd'hui		31 décembre, à minuit
Le Soleil meurt	Dans 5 milliards d'années	13 mai de l'année suivante

