

100 QUESTIONS POUR COMPRENDRE

les phénomènes de la nature



Compléments
numériques



Patrick Bertrand



**100 questions
pour comprendre
les phénomènes de la nature**



Illustration de Chloé Chabert

Patrick Bertrand

**100 questions
pour comprendre
les phénomènes de la nature**



Chez le même éditeur

Vivre avec les virus. Devons-nous les craindre ?, Guillain Mikaty, préface du Pr Arnaud Fontanet, 2022.

Dérèglement climatique. Les vraies conséquences pour la santé et la biodiversité, Bernard Swynghedauw, préface de Gilles Boeuf, 2022.

Météorologie de l'espace. Vivre demain avec notre Soleil, Jean Lilensten, Frédéric Pitout, Marina Gruet & J. Pedro Marques, préface d'Alain Cirou, 2021.

L'IA peut-elle penser ? Miracle ou mirage de l'intelligence artificielle, Hubert Krivine, préface de Guillaume Lécointre, 2021.

Transition énergétique. Ces vérités qui dérangent !, 2^e édition, Bertrand Cassoret, préface de Brice Lalonde, 2020.

Pourquoi le nucléaire, Bertrand Barré, préface de Jean-Marc Jancovici, 2017.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans
votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :
www.deboecksuperieur.com

En couverture : Coucher de Soleil sur le lac Abraham dans l'Alberta, Canada @ Istockphoto

Relecture : Alain Rossignol

Mise en page et couverture : SCM, Toulouse

Dépôt légal :

Bibliothèque royale de Belgique : 2022/13647/099

Bibliothèque nationale, Paris : septembre 2022

ISBN : 978-2-8073-3979-8

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.

© De Boeck Supérieur SA, 2022 – Rue du Bosquet 7, B1348 Louvain-la-Neuve

De Boeck Supérieur – 5 allée de la 2^e DB, 75015 Paris

Table des matières

Avant-propos	XI
---------------------------	----

1

La Terre et ses mouvements autour du soleil

La Terre est ronde et on peut la mesurer	2
Comment les Grecs ont-ils évalué les dimensions de la Terre et de la Lune ?	2
La Terre est-elle aplatie à l'équateur ou aux pôles ?	8
Quand et comment le mètre a-t-il été défini ?	11

Se repérer dans le temps d'après le mouvement

du soleil : calendriers et cadrans solaires	14
Comment établir un calendrier ?	14
Quelle heure indique un cadran solaire ?	17

Les systèmes du monde.

Preuves de la rotation de la Terre	28
Géo- ou héliocentrique ?	28
Quelles sont les preuves du mouvement de la Terre ?	35
Comment le système solaire s'est-il formé ?	39

Se repérer en mer avec les astres 45 |

Comment se repérait-on dans l'Antiquité ?	45
Et à l'époque des grandes découvertes ?	48
De quand datent les techniques de repérage modernes ?	54

L'eau sur Terre

L'eau, un liquide extraordinaire	60
La molécule d'eau : qu'a-t-elle de remarquable ?.....	60
Dans quelles conditions l'eau change-t-elle d'état ?.....	62
Quelles sont les particularités de l'eau liquide ?.....	66
Comment fonctionne le cycle de l'eau ?.....	71
L'eau liquide est-elle nécessaire à la vie ?.....	72
La pression de l'eau	78
Qu'est-ce que la pression ?.....	78
Pourquoi la pression de l'eau augmente-t-elle avec la profondeur ? ...	79
Qu'est-ce que la poussée d'Archimède ?.....	81
Quand dit-on qu'un liquide est incompressible ?.....	82
Comment fonctionnent les fontaines-boules ?.....	85
Qu'appelle-t-on la « pression osmotique » ?.....	86
Peut-on vivre sous pression ?.....	89
Les déformations de l'eau	95
Comment le son peut-il se propager dans l'eau ?.....	95
Quelle est l'origine des ondulations de la surface de l'eau ?.....	101
Comment se produit le mouvement des marées ?.....	108
Faire monter l'eau	111
Qu'est-ce qu'une machine élévatrice d'eau ?.....	111
Comment faire monter l'eau en se servant de la pression atmosphérique ?.....	115
Existe-t-il d'autres types de pompes ?.....	119
Pourquoi la pompe aspirante a-t-elle fait évoluer les idées sur le vide ?.....	123
Se ravitailler en eau	125
L'eau douce : où se trouve-t-elle et qu'en fait-on ?.....	125
Peut-on distribuer l'eau par gravité ?.....	129
Comment faire venir l'eau ?.....	132
Où stocker l'eau ?.....	140

3

Les phénomènes atmosphériques

Les états de l'atmosphère	144
Comment varie la pression atmosphérique quand l'altitude augmente ?	145
Quelles sont les caractéristiques de l'état de l'air qui varient avec l'altitude ?	148
Comment naviguer en montgolfière ?	153
Les transformations de la vapeur d'eau dans l'air	156
Quand dit-on que l'air est saturé en vapeur d'eau ?	156
Qu'est-ce que le brouillard ?	160
Comment se forment les nuages ?	162
Qu'est-ce qu'une inversion de température ?	167
Les précipitations	170
Au fond, qu'est-ce qu'un nuage ?	170
Quelle est l'origine des précipitations ?	173
Comment naissent et évoluent les orages ?	176
Que se passe-t-il au passage d'une perturbation atmosphérique ?	183
Les échanges de chaleur et l'effet de serre de l'atmosphère	185
Qu'est-ce que la chaleur et comment s'échange-t-elle ?	186
Qu'est-ce qu'un bon conducteur de chaleur ?	187
Comment s'effectue la convection ?	191
Qu'est-ce que le rayonnement ?	193
Ça chauffe, mais comment ?	196
Qu'appelle-t-on effet de serre de l'atmosphère ?	201

4

Un monde de lumières et de couleurs

La lumière et ses changements de direction	208
Qu'est-ce que la lumière ?	209
Comment voyons-nous les objets lumineux ?	211
Que se passe-t-il quand la lumière change de direction ?	214
Comment obtenir un bel effet miroir ?	219
Peut-on voir des faisceaux lumineux ?	221

La lumière nous en fait voir de toutes les couleurs	225
La couleur par absorption de radiations ?	225
Quelle est la couleur de l'eau pure ?	236
Quelle est la couleur de la glace et de la neige ?	239
Comment les animaux sont-ils colorés ?	241
Les jeux du soleil et de l'atmosphère	247
Le ciel est-il toujours bleu ?	248
Qu'est-ce que la réfraction atmosphérique ?	254
De la couleur par dispersion de la lumière ?	260

5

La vie sur Terre

À la recherche des origines de la vie	272
Quel est l'âge des atomes de notre corps ?	272
Qu'appelle-t-on « les molécules de base de la vie » ?	276
À quand remontent les plus anciennes traces de vie sur Terre ?	280
Des pistes pour comprendre l'origine de la vie sur Terre ?	284
La vie ailleurs ?	290
L'univers fascinant des bactéries et des virus	295
Qu'est-ce qu'une bactérie ?	295
Comment les bactéries ont-elles contribué à l'évolution biologique ? ..	299
Bactéries et êtres humains : beaucoup d'alliés fidèles et ...	
quelques ennemis ?	305
Qu'est-ce qu'un virus ?	309
La force tranquille des arbres	313
Qu'est-ce qu'un arbre ?	314
Comment vivent les arbres ?	316
Qu'est devenue la forêt qui couvrait autrefois la France ?	320
Quand le renouveau de la forêt a-t-il commencé ?	325
La gestion actuelle des forêts	328
Le bilan carbone des forêts	334
Appendice	336
Bibliographie	338

+ de compléments en ligne

Calcul des distances	13
Comment mesurer la hauteur d'un arbre ?	13
Les fuseaux horaires, sources de paradoxes	27
Exemples concrets d'intersection d'un cône et d'un plan	27
Les définitions successives de la seconde	44
Évaluation de la déviation vers l'est	44
Comment trouver le nord avec une montre à aiguilles ?	57
L'eau liquide, référence de masse et de densité	77
Portée du jet qui sort d'une bouteille percée	94
Osmose inverse et dessalement de l'eau de mer	94
Le système bielle/manivelle	124
Pression de vapeur saturante et température d'ébullition de l'eau	169
Qu'est-ce que la surfusion ?	169
Faire des étincelles : du silex à l'allume-gaz piézo-électrique	184
L'effet de foehn	184
Résistance thermique et double vitrage	206
Un peu plus de réfraction ?	224
La synthèse des couleurs	246
Le bleu du ciel et la diffusion moléculaire	270
Épaisseur d'air traversée par la lumière du soleil sur l'horizon	270
Les divers phénomènes dus à l'interaction de la lumière avec les petites particules	270
Isotopes et datation radiométrique	294

*À Célia, Chloé, Claire,
Estelle et Flora.*

Avant-propos

Pour nos lointains ancêtres, les changements d'aspect du ciel, le vent, la pluie, les orages, les tempêtes et les crues étaient imprévisibles : les phénomènes naturels étaient soumis à des « esprits » avec lesquels il fallait dialoguer. Avec le développement de l'agriculture et de l'élevage, les hommes devinrent tributaires du cycle des saisons, et seuls des dieux puissants habitant les cieux pouvaient influencer sur leurs destinées. Les montagnes, où se rencontrent le ciel et la terre, étaient des lieux privilégiés pour les approcher et solliciter leur bienveillance. Dans les Alpes-Maritimes, le mont Bego, qui culmine à près de 2 900 m, est réputé pour la violence et la fréquence de ses orages. Il y a quatre mille ans, c'était un site sacré où se rencontraient le dieu taumorphe, dieu des saisons, des orages et de la pluie, et Gaïa, la déesse Terre, mère de la fertilité. Les dizaines de milliers de gravures qui couvrent les parois polies par les glaciers de la vallée des Merveilles sont autant de prières qui leur étaient adressées.

Peu à peu, les hommes ont pris conscience du caractère *compréhensible* du monde dans lequel ils vivaient : les mêmes causes produisent les mêmes effets et on peut décrire leurs relations grâce au langage des mathématiques. Ce langage constitue un obstacle pour beaucoup de personnes, mais on peut expliquer de nombreux phénomènes en s'appuyant sur des schémas et sur des exemples simples pris dans la vie de tous les jours. Ce livre comporte cinq parties :

- la Terre et son mouvement autour du Soleil ;
- l'eau sur Terre ;
- les phénomènes atmosphériques ;
- un monde de lumière et de couleurs ;
- la vie sur Terre.

Les grandeurs utilisées s'expriment avec des unités dont l'usage est rappelé dans un bref appendice. Le contenu du livre est basé en partie sur une série de cours et de conférences donnés à l'Université du temps libre de Gap entre 2013 et 2018.

La contemplation d'un beau ciel étoilé, le scintillement des gouttes de rosée au petit matin, la magnificence des couchers de soleil et tous les spectacles que nous offre la vie, sont-ils moins émouvants quand on connaît les phénomènes qui les sous-tendent ? Hubert Reeves se pose la question dans *Malicorne*, mais la réponse ne fait aucun doute : son émerveillement devant les spectacles de la nature et la façon dont elle est structurée, apparaît dans toute son œuvre de vulgarisation scientifique et dans son engagement personnel. Dans *Le Cosmos et le Lotus*, Trinh Xuan Thuan va jusqu'à inverser les propositions : « C'est bien parce que je m'émerveille devant la beauté du monde et que je ressens son ineffable mystère que je fais de la science. » On ne saurait mieux dire...

Remerciements

De nombreuses personnes ont contribué à améliorer le contenu de ce livre et sa présentation. Je tiens à remercier Éric Barthélemy, Jean Bornarel et Philippe Vezinet pour leurs suggestions, ainsi que tous ceux qui ont bien voulu me communiquer leurs photos, et tout particulièrement Jérôme Astréoud pour ses beaux clichés d'astrophotographie. J'ai beaucoup apprécié le dialogue constructif avec Alain Luguët qui a permis de donner au livre sa forme définitive. Merci à Chloé pour son image « fille-étoile », et à Alain et Claudine pour m'avoir fait connaître l'œuvre poétique d'une jeune femme qui, bien plus tard, est devenue notre grand-mère.

A stylized illustration of a young girl with dark hair in a braid, wearing a light-colored dress, standing in a field of tall yellow grass. She is looking up at a vibrant, colorful sky filled with large, billowing clouds in shades of blue, pink, orange, and yellow. The sky is also filled with stars and small white crosses. A large white circle with the number '1' inside is positioned in the upper center of the image.

1

La Terre et ses mouvements autour du soleil

La Terre est ronde et on peut la mesurer

On dit que la Terre est ronde. Mais c'est une plaisanterie. Il n'y a d'ailleurs qu'à la regarder. Elle est toute couverte de bosses, de cicatrices, de gros furoncles, toute mal cuite et toute mal fichue ; ravinée de crevasses, de rides, de creux, de sillons, percée de trous comme un gruyère.

Alexandre Vialatte, *Chroniques*

Comment les Grecs ont-ils évalué les dimensions de la Terre et de la Lune ?

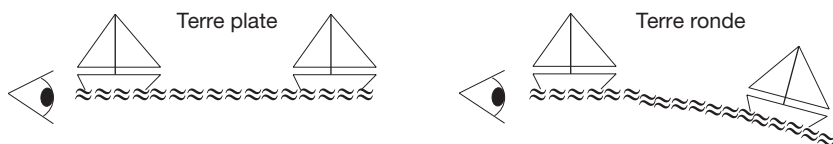
La rotondité de la Terre



Photo Eric Barthélemy

Le cap Morgiou dans le parc national des Calanques.

Certaines personnes prétendent voir la courbure de la Terre, mais il est vrai qu'on voit souvent ce qu'on a envie de voir. Pythagore, qui vivait en Grèce vers – 500 av. J.-C., fut un des premiers à affirmer que la Terre était ronde parce que la forme sphérique était parfaite. C'est généralement à Aristote, qui vécut cent cinquante ans plus tard, que l'on attribue les premiers arguments basés sur l'observation. Il faisait remarquer que quand un bateau s'éloignait vers le large, c'était l'extrémité du mât qui disparaissait en dernier.



Disparition d'un bateau à l'horizon selon que la Terre est plate ou ronde.

On peut vérifier la pertinence de cet argument en calculant la distance à laquelle un objet disparaît à l'horizon à cause de la rotondité de la Terre. Elle dépend, bien sûr, de la hauteur de l'objet et de celle de l'observateur par rapport au niveau de la mer. Par exemple, un observateur de 1,70 mètre debout sur la plage voit disparaître un objet de 1 mètre à 8 kilomètres, et le mât d'un bateau de 10 mètres de haut à 16 kilomètres.

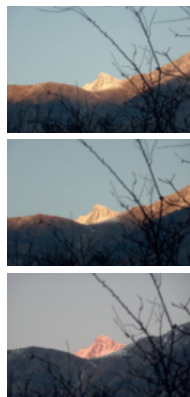
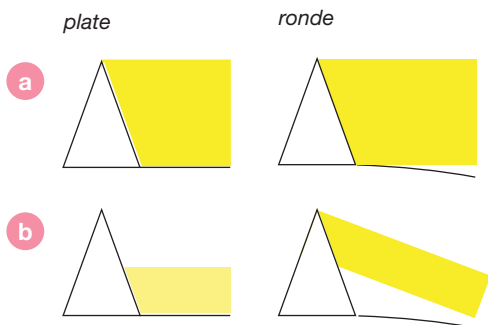
Hauteur de l'objet (m)	Œil à 0 m	Œil à 1,70 m	Œil à 10 m	Œil à 100 m	Œil à 500 m
0	–	4,65	11,3	35,7	79,8
1	3,6	8,25	14,8	39,3	83,6
10	11,3	16	22,6	47	91,3
100	35,7	40,3	47	71,4	116
1 000	113	118	124	149	193
2 000	159	164	170	195	239
3 000	195	200	206	231	275

Distance en kilomètres à laquelle un observateur dont l'œil est situé à la hauteur indiquée dans la première ligne voit disparaître un objet dont la hauteur est donnée dans la colonne de gauche. La Terre est supposée sphérique d'un rayon de 6 370 km, et les effets de la réfraction atmosphérique sont ignorés. La méthode de calcul est décrite au premier complément page 13.

À cette distance, on voit un objet de 10 mètres sous un angle de 2 minutes, soit deux fois le pouvoir séparateur moyen de l'œil humain.

On en déduit qu'Aristote avait une bonne vue... Il citait un autre phénomène, facile à observer sur les côtes montagneuses de la Méditerranée : au coucher du soleil, c'est la partie inférieure des montagnes qui reste éclairée le plus longtemps si la Terre est plate, alors que c'est leur partie supérieure si la Terre est ronde.

La Terre est :



Variation de la partie éclairée d'une montagne au coucher du soleil.

Au début, toute la montagne est éclairée (a). À la fin (b), la partie éclairée n'est pas la même selon que la Terre est plate ou ronde. Les photos ont été prises en novembre à 17 h 10, 17 h 12 et 17 h 24, de haut en bas. Noter le rosissement final.

Aristote avançait un argument plus direct, mais qui ne se manifeste qu'à l'occasion des éclipses de Lune. Les Grecs avaient compris que la Lune est éclairée par le Soleil et que la succession de ses « phases » est due à la variation de la partie que nous voyons éclairée quand elle tourne autour de la Terre. Aristote savait que la Lune était « éclip­sée » quand elle passait dans l'ombre de la Terre, et il voyait bien que l'ombre portée de la Terre dessinait alors un *arc de cercle* sur la Lune.



Photo Christian Dorel

Un spectacle assez fréquent, mais toujours émouvant : l'ombre portée de la Terre sur la Lune lors d'une éclipse totale de Lune.

Les enfants ont souvent du mal à accepter la rotondité de la Terre. Ils imaginent que les habitants des antipodes ont « la tête en bas » et cela les choque, même si on leur affirme que leurs pieds sont collés au sol par la pesanteur. Il suffit pour les convaincre de leur montrer une fourmi qui fait tranquillement le tour d'un ballon...

Focus

POURQUOI LA TERRE ET LES AUTRES PLANÈTES SONT-ELLES RONDES ?

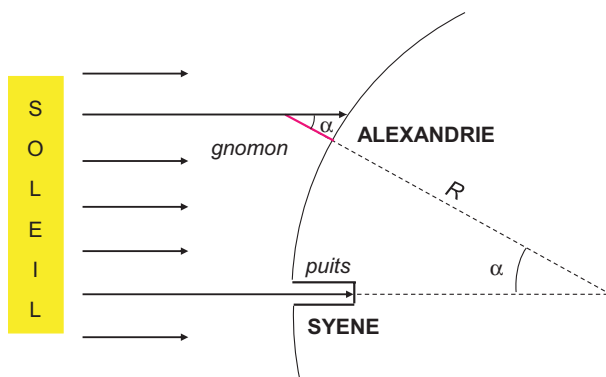
Les corps qui tournent autour du Soleil se sont formés par accréation de grains de matière. Les forces de gravité avaient tendance à resserrer leurs éléments, arrondir les angles et les faire évoluer vers la sphère. Les corps les plus petits, où la gravité est faible, se sont refroidis trop tôt et ont conservé des formes plus ou moins cabossées. C'est le cas des astéroïdes, des comètes et de certains satellites des planètes géantes. Les planètes ne sont pas exactement sphériques, elles sont renflées à l'équateur à cause de leur *rotation* : le rayon équatorial de la Terre est un peu plus grand que le rayon polaire (tableau page 7).

Mesurer les rayons de la Terre et de la Lune, et leur distance

Quand les Grecs ont été convaincus que la Terre était sphérique, ils ont voulu mesurer son rayon. Vers 220 avant notre ère, Ératosthène trouva la bonne méthode. Astronome, philosophe et mathématicien, Ératosthène était le directeur de la Grande Bibliothèque d'Alexandrie. Cette ville, située à l'ouest du delta du Nil, était devenue la capitale du monde grec après la mort d'Alexandre. Elle était célèbre pour son phare, qui a été classé par la suite parmi les sept merveilles du monde antique, mais aussi pour sa fameuse Grande Bibliothèque. C'était à l'époque la plus importante du monde, elle contenait environ 400 000 volumes. Mais ces volumes ne ressemblaient pas à nos livres ! C'étaient des rouleaux obtenus en assemblant des feuilles de papyrus, que l'on lisait en les déroulant.

Comme tous les astronomes de l'Antiquité, Ératosthène avait étudié le mouvement apparent du Soleil en suivant l'ombre d'un *gnomon*, un simple bâton planté verticalement grâce au fil à plomb. Il savait que chaque jour, la longueur de l'ombre passait par un minimum à midi et qu'elle indiquait alors la direction du nord. Il savait aussi que cette longueur minimale variait en cours d'année, et qu'elle était la plus courte le

jour du solstice d'été où le soleil est le plus haut dans le ciel. Il avait appris que, ce jour-là, à midi, le soleil éclairait le fond d'un puits à Syène, une ville située beaucoup plus au sud dans la vallée du Nil. Le soleil y était donc au zénith. Mais au même moment, les rayons du soleil ne tombaient pas tout à fait verticalement à Alexandrie, puisqu'un gnomon faisait une petite ombre sur le sol.



Méthode employée par Ératosthène pour évaluer le rayon de la Terre.

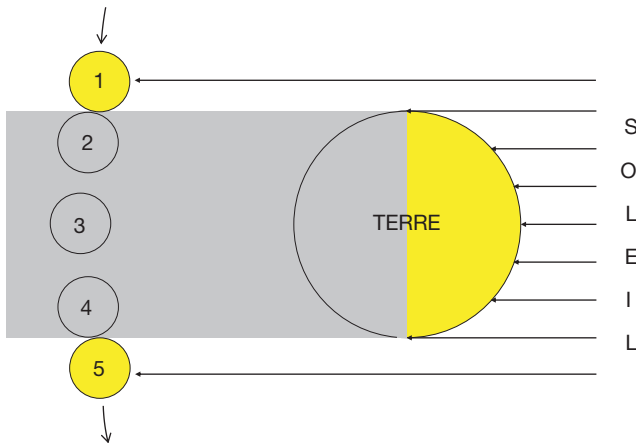
La figure représente le méridien d'Alexandrie qui passe non loin de Syène. Le jour du solstice d'été, à midi, les rayons du soleil tombent verticalement à Syène. Au même moment, ils font un petit angle avec la verticale à Alexandrie. Les longueurs et les angles ne sont pas à l'échelle.

Le rapport de la longueur de cette ombre et de la hauteur du gnomon était tel que l'angle α valait 7 degrés environ. Le cours du Nil étant approximativement orienté nord-sud, Syène et Alexandrie sont à peu près sur le même méridien. L'angle α est donc l'angle au centre d'un arc de méridien dont la longueur est la distance entre Syène et Alexandrie. En évaluant cette distance à 5 000 *stades*, environ 900 km, Ératosthène a estimé le rayon de la Terre à 7 400 km, une valeur proche de la valeur réelle (tableau page suivante). Étant donné l'imprécision de ces mesures et l'incertitude sur la conversion des stades en kilomètres, ce bon accord est certainement fortuit. Mais cela n'empêche pas d'admirer la simplicité de la méthode ! Dans son roman *Les Cheveux de Bérénice*, Denis Guedj a raconté l'histoire de cette mesure en la replaçant dans son contexte historique.

Longueur du méridien terrestre	40 008 km
Rayon polaire de la Terre	6 357 km
Longueur de l'équateur terrestre	40 075 km
Rayon équatorial de la Terre	6 378 km
Rayon moyen de la Terre	6 371 km
Rayon de la Lune	1 738 km
Rapport des rayons de la Terre et de la Lune	3,67
Distance moyenne entre la Terre et la Lune	384 000 km
Rapport des rayons du Soleil et de la Terre	109
Distance moyenne entre la Terre et le Soleil	150 millions de km

Quelques longueurs caractéristiques de la Terre, de la Lune et du Soleil.

Les Grecs ont évalué par la même occasion le rayon de la Lune. En effet, Aristarque avait auparavant estimé le rapport des rayons de la Terre et de la Lune grâce à une méthode très ingénieuse. Lors d'une éclipse totale de Lune, celle-ci traverse entièrement l'ombre de la Terre.



Éclipse totale de Lune : la Lune passe dans l'ombre de la Terre.

La distance Terre-Lune étant égale à 60 rayons terrestres environ (la figure n'est pas du tout à l'échelle), la trajectoire de la Lune est quasi rectiligne.

Aristarque a comparé la *durée* nécessaire pour que la Lune traverse l'ombre de la Terre (passage de la position 2 à la position 5) à celle qui est nécessaire pour qu'elle disparaisse complètement (passage de la position

1 à la position 2). Le rapport de ces durées est égal à celui des rayons de la Terre et de la Lune. Aristarque a obtenu un rapport égal à trois : une bonne estimation (tableau page précédente), compte tenu des moyens dont il disposait. Les instruments de visée étaient rudimentaires et on mesurait les durées avec une clepsydre dans laquelle l'eau coulait régulièrement d'un récipient dans un autre. Les Grecs ont donc obtenu le rayon de la Lune. Ils évaluaient à un demi-degré l'angle sous lequel on voyait la Lune depuis la Terre, et ils en ont déduit que la distance Terre-Lune était égale à 76 rayons terrestres alors que la vraie valeur est 60,3.

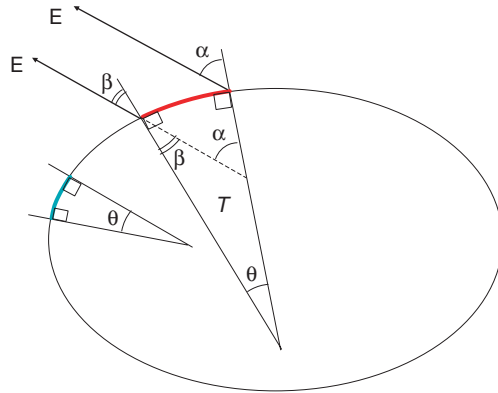
Mais aussi...

L'OPINION D'ALEXANDRE VIALATTE SUR LE SOLEIL ET LA LUNE

« La Lune a beaucoup plus d'importance que le Soleil qui n'éclaire les hommes que le jour. Elle les éclaire la nuit, ce qui est beaucoup plus utile. C'est grâce à elle qu'on peut retrouver au fond des bois les épingles, les trombones et les pièces de dix francs qu'on perd dans les forêts profondes. »

La Terre est-elle aplatie à l'équateur ou aux pôles ?

À la fin du XVII^e siècle et au début du XVIII^e siècle, la forme exacte du globe terrestre fut un objet de controverses. Les partisans de la théorie de Descartes prétendaient que la Terre était aplatie à l'équateur, alors que la théorie de Newton prédisait qu'elle était aplatie aux pôles sous l'effet de la force centrifuge. À cette époque, il n'y avait qu'une manière de trancher : comparer les longueurs d'arcs de méridien sous-tendus par un angle donné en des lieux de latitudes différentes. Cette longueur est en effet partout la même sur un cercle, mais elle varie avec la courbure sur une ellipse (figure page suivante).



Sur une ellipse, la longueur d'un arc sous-tendu par un angle θ donné dépend de sa position : l'arc rouge est plus grand que l'arc vert.

Pour déterminer l'angle θ sous-tendu par un arc, on mesure à ses extrémités les angles α et β qui donnent la direction d'une étoile E : en écrivant que la somme des angles est égale à 180° dans le triangle T, on obtient $\theta = \alpha - \beta$.

La mesure précise des distances

Pour mesurer une *distance* avec précision, on reportait sur le sol des perches calibrées de 2 ou 4 toises (une toise = 1,949 m) en les alignant soigneusement bout à bout. On imagine facilement les difficultés que l'on pouvait rencontrer. Il était beaucoup plus facile de faire des mesures *angulaires* précises en visant des repères avec des lunettes dont l'oculaire était muni d'un réticule, et on savait relier les angles aux longueurs grâce aux tables de fonctions trigonométriques. Ces fonctions, dont l'intérêt avait été pressenti par certains astronomes grecs, avaient pris leur forme définitive au v^e siècle grâce aux mathématiciens indiens, et les mathématiciens arabes les avaient développées et tabulées. Elles facilitent les problèmes les plus simples (voir second complément page 13), et permettent la mise en œuvre des techniques de triangulation.

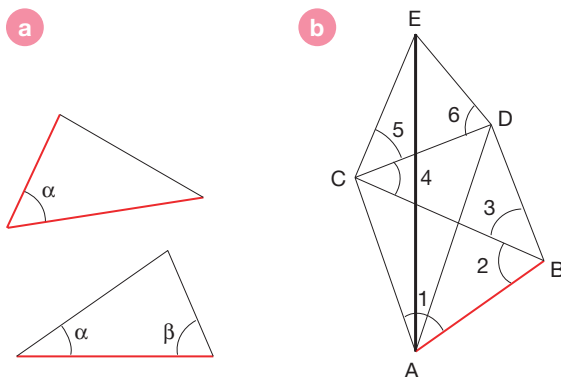
Qu'est-ce que la triangulation ?

Cette méthode repose sur deux propriétés (figure a page suivante).

- Dans un triangle, si on connaît la longueur d'un côté et les deux angles adjacents, on peut calculer les longueurs des deux autres côtés à l'aide de formules trigonométriques.

- Dans un triangle, si on connaît un angle et la longueur de ses côtés, des formules permettent de calculer les deux autres angles et la longueur du troisième côté.

La figure b montre un exemple de calcul de distance par triangulation. La distance à mesurer est AE.



Mesure des distances par triangulation.

On commence par sélectionner des *stations* C et D bien visibles de A et E et bien visibles entre elles, en s'efforçant de les faire alterner de part et d'autre de AE. On choisit aussi un site B bien visible des autres, tel que la distance AB puisse être mesurée avec une grande précision. AB constitue *la base* du système : sa longueur servira de référence dans tous les calculs ultérieurs. On mesure les angles 1 et 2, ce qui permet de calculer AC et BC, on mesure ensuite les angles 3 et 4 et on en déduit BD et CD. De proche en proche, on détermine les côtés et les angles de l'ensemble du système de triangles. On termine par le triangle ADE qui permet de calculer AE. Il faut faire régulièrement des contrôles pour minimiser les erreurs : la somme des angles d'un triangle doit être égale à 180° , et la longueur d'un côté peut être calculée de plusieurs façons.

Ces techniques de triangulation avaient permis de dresser des cartes topographiques précises, et on espérait que l'aplatissement de la Terre était assez important pour être mis en évidence de cette façon.

Les expéditions du début du XVIII^e siècle

L'Académie des sciences de Paris organisa plusieurs expéditions destinées à mesurer la longueur d'un arc de méridien sous-tendu par un angle de *un degré*, en France et en divers points du globe. Sur le terrain, on déterminait les verticales aux extrémités de l'arc avec un fil à plomb, on mesurait les angles α et β entre ces verticales et la direction d'une étoile E, et leur différence donnait l'angle θ (figure page 9). La longueur de l'arc de méridien était mesurée par triangulation. Les premières mesures faites en France par J. Cassini et La Hire, semblaient indiquer que l'arc de méridien était plus long au sud qu'au nord du pays. Mais des mesures effectuées ultérieurement en Laponie, au Pérou et au Cap montrèrent que l'arc de méridien était en réalité plus long près du pôle que de l'équateur : *la Terre est aplatie aux pôles*. On sait maintenant que les moyens techniques disponibles à cette époque ne permettaient pas de mettre en évidence l'écart par rapport à une sphère en se limitant au seul territoire français : dans le système GPS, la longueur d'un arc de un degré est égale à 111,240 km à Dunkerque et 111,085 km à Collioure. La précision des mesures effectuées il y a 300 ans est néanmoins remarquable si on considère les instruments dont on disposait et les conditions dans lesquelles elles ont été faites.

Tracé mesuré	Longueur d'un arc de 1 degré	Auteur et date
Paris-Dunkerque	56 960 toises (111,072 km)	J. Cassini, La Hire (1683-1701)
Paris-Collioure	57 097 toises (111,340 km)	<i>Idem</i>
Laponie	57 438 toises (111,195 km)	Maupertuis, Clairaut (1736-1737)
Pérou	56 753 toises (110,611 km)	Godin, Bouguer, La Condamine (1735-1743)
Le Cap	57 037 toises (111, 165 km)	La Caille (1751)

Différentes mesures de la longueur d'un arc de méridien de *un degré* au début du XVIII^e siècle.

Quand et comment le mètre a-t-il été défini ?

Dans la France de l'Ancien Régime, la valeur des unités de mesure variait d'une seigneurie à l'autre, et même souvent d'une ville à une autre. Avec l'intensification des échanges commerciaux entre des régions de

plus en plus éloignées, cette variabilité posait de gros problèmes. Le 8 mai 1790, l'Assemblée constituante demanda à l'Académie des sciences d'établir un système d'unités destinées à être utilisées dans tout le pays. Ces unités devaient être faciles à utiliser et prises dans la nature, de façon à pouvoir être adoptées dans le monde entier. Une commission composée de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet décida de définir l'unité de longueur, le « mètre », comme la dix millionnièmes partie du quart du méridien terrestre. Pour établir la correspondance entre le mètre et l'unité officielle du moment, la « toise de l'Académie », il fallait mesurer avec précision la longueur d'un arc de méridien. La commission confia aux astronomes Delambre et Méchain la lourde tâche de mesurer l'arc du méridien de Paris compris entre Barcelone et Dunkerque, long d'environ 1 000 km. Delambre se chargea de la section entre Rodez et Dunkerque, Méchain de celle entre Rodez et Barcelone. Deux bases d'une douzaine de kilomètres furent utilisées : l'une vers Melun, l'autre vers Perpignan. Il fallut une cinquantaine de jours pour les mesurer. Le système complet comportait 115 triangles.



Des sculptures du mètre ont été construites à Paris entre 1796 et 1797 pour familiariser la population avec sa longueur. Celle-ci est visible au 36 rue de Vaugirard.

Les deux astronomes disposaient d'instruments d'une grande précision. Mais l'époque était particulièrement troublée dans tout le pays. Leurs mesures éveillaient la suspicion des autochtones, et la France se trouva bientôt en guerre contre la plupart des pays d'Europe, en particulier l'Espagne. Denis Guedj a raconté dans son roman *La Méridienne* les difficultés que rencontrèrent les deux savants et les épisodes parfois

rocambolesques qu'ils vécurent entre 1792 et 1799. Très motivés par l'importance de leur mission, ils réussirent à vaincre les obstacles.

Leurs travaux ont permis de définir le mètre avec une grande précision et de construire le célèbre prototype étalon.

Compléments

Calcul des distances

Comment mesurer la hauteur d'un arbre ?



www.lienmini.fr/39798-cpltsP13



Se repérer dans le temps d'après le mouvement du soleil : calendriers et cadrans solaires

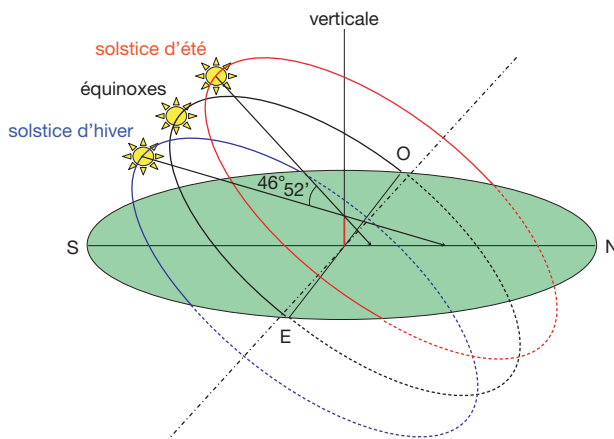
Le soleil continuait ses comptes sur le cadran blanc du ciel africain, suivant toujours les mêmes points de repère : les cabanes des pêcheurs à dix heures du matin, une falaise brune au-dessus du Chari à midi, le palmier solitaire de Fort-Fourau à quatre heures, et puis, vers cinq heures et demie, le major américain passant à cheval au grand galop sur l'autre rive, disparaissant du même côté que le soleil qu'il paraissait poursuivre avec frénésie.

Romain Gary, *Les Racines du ciel*

Comment établir un calendrier ?

Le mouvement apparent du Soleil

L'apparition du Soleil le matin et sa disparition le soir ont toujours rythmé les activités humaines. Les plus curieux ont appris très tôt à suivre sa marche dans le ciel en observant la rotation et la variation de longueur de l'ombre d'un *gnomon*, un bâton planté verticalement à l'aide d'un fil à plomb (figure page suivante). Ils ont constaté que la trajectoire apparente du Soleil variait tous les jours, mais que son point culminant se situait toujours dans un même plan vertical dit « méridien » qui la partageait en deux parties égales. Le mouvement apparent du Soleil est donc caractérisé par deux phénomènes cycliques : les passages successifs dans le plan méridien, séparés par *un jour*, et la lente variation de sa trajectoire de la plus basse au solstice d'hiver (21 ou 22 décembre) à la plus haute au solstice d'été (21 ou 22 juin), qui revient après *une année*.



Trajectoire apparente du Soleil perçue par un observateur situé à une latitude moyenne, les jours de solstice et d'équinoxe.

L'axe de rotation de la Terre figure en points tirets. Dans cette représentation, seule la *direction* du Soleil a un sens. Il est représenté au sommet de sa trajectoire, à midi. Il est alors dans le plan méridien du lieu dont la trace au sol est la direction nord-sud matérialisée par l'ombre d'un gnomon (rouge). La durée de la partie éclairée du jour, la *journée*, varie beaucoup pendant l'année. Les jours d'équinoxe, partout sur Terre, le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest : la journée et la nuit ont la même durée.

Le jour s'impose naturellement comme unité de temps. Mais l'année rythme la succession des saisons, et tous les phénomènes qui l'accompagnent jouent un rôle essentiel dans la vie des hommes : le temps qu'il fait, l'avancement de la végétation et des cultures, l'apparition des crues, les étiages des rivières et des fleuves. Les astronomes de l'Antiquité eurent la responsabilité de combiner ces deux échelles de temps pour repérer les jours dans l'année à l'aide d'un *calendrier*, afin d'organiser la vie de la société dans le cadre des deux cycles temporels définis par le Soleil.

Le calendrier : un problème arithmétique insoluble

Le problème est le suivant : l'intervalle entre deux *équinoxes* de printemps, que l'on appelle l'*année tropique*, est égal à 365,2422 jours, soit 365 jours, 5 heures et 49 minutes, sans compter les secondes. Pour compliquer les choses, on a voulu grouper les jours en *mois* basés sur le cycle des phases de la Lune, qui dure 29 jours, 12 heures et 43 minutes. Même si leurs mesures n'étaient pas aussi précises, les astronomes de l'Antiquité

savaient que ni l'année ni le mois ne comportent un *nombre entier* de jours, et ils ont proposé différentes solutions pour y remédier.

Le calendrier le plus simple a été établi en Égypte, environ 3 000 ans avant notre ère. L'année comportait 365 jours groupés en 12 mois de 30 jours, plus 5 jours supplémentaires. Il manquait donc environ un quart de jour par an. Les retards s'accumulaient progressivement jusqu'à atteindre 25 jours en 100 ans, et une année en 1 461 ans. Pour comprendre ce que cela signifie, supposons que l'on utilise ce calendrier et qu'on fixe le solstice d'été au 21 juin la première année. La date du solstice dans le calendrier reculera chaque année et ne reviendra le 21 juin que dans 1 461 ans. Cette lente dérive ne gênait pas les Égyptiens, qui se contentaient d'ajouter un an tous les 1 461 ans et d'organiser une grande fête à cette occasion. Les Mésopotamiens privilégiaient le cycle lunaire. L'année comportait 12 mois de 29,5 jours obtenus en alternant des mois de 29 et de 30 jours. Elle ne durait que 354 jours, et il manquait un peu plus de 11 jours chaque année. Ils laissaient dériver le tout et se contentaient d'ajouter un treizième mois tous les trois ans. Ces manipulations du calendrier donnaient du pouvoir aux astronomes : étant les seuls à s'y retrouver, ils pouvaient se permettre de conseiller les rois.

Le problème n'a pas de solution exacte et on est obligé de recourir à des procédés plus ou moins artificiels. Notre calendrier actuel suit de très près la marche du Soleil, mais au prix d'une grande complexité. C'est le moment de rendre à César ce qui lui appartient. Bien conseillé, Jules décida en 46 avant J.-C. de fixer la durée de l'année à 365 jours et d'ajouter un jour tous les quatre ans pour rattraper le quart de jour manquant : ces années-là, dites « bissextiles », on doublait le sixième jour avant les calendes de mars. De nos jours, on ajoute un 29 février. Mais l'année moyenne du calendrier « julien » était *un peu trop longue*, de 11 minutes et 14 secondes. Cette petite avance du calendrier sur la marche du Soleil s'est cumulée peu à peu, jusqu'à atteindre 10 jours en 1582. Le pape Grégoire XIII prit le taureau par les cornes. Il décida de supprimer ces dix jours et de raccourcir très légèrement l'année moyenne en supprimant certaines années bissextiles : les années multiples de 100 mais pas de 400 ne sont pas bissextiles. Les années 1600 et 2000 l'ont donc été, mais pas 1700, 1800 ni 1900. Ce calendrier « grégorien » retarde un tout petit peu par rapport au Soleil, en moyenne de 26 secondes par an, soit un jour en 3 300 ans. L'écart est faible et on se contente de faire une petite correction de temps en temps.

Mais aussi...

LES MOTS DU CALENDRIER

Leur étymologie est d'origine latine.

Calendrier : *calendarium* (registre)

Équinoxe : *equinoct* (journée égale à la nuit)

Solstice : *solstitium* (arrêt du soleil)

Mois : *mensis*

Semaine : *septimana* (période de 7 jours)

Jour : *diurnus* (par l'intermédiaire de l'ancien français *jorn*)

Jours de la semaine

Lundi : *lunae dies* (jour de la Lune)

Mardi : *Martis dies* (jour de Mars)

Mercredi : *Mercurii dies* (jour de Mercure)

Jeudi : *Jovis dies* (jour de Jupiter)

Vendredi : *Veneris dies* (jour de Vénus)

Samedi : *sambati dies* (jour du sabbat)

Dimanche : *dies dominici* (jour du Seigneur)

Mois de l'année

Janvier : *januarius* (mois de Janus)

Février : *februarius* (mois de la purification)

Mars : *martius* (Mars)

Avril : *aprilis* (peut-être de Aphrodite)

Mai : *maius* (mois de la divinité Maia)

Juin : *junius* (mois de Junon)

Juillet : *julius* (mois de Jules César)

Août : *augustus* (mois d'Auguste)

Septembre : *septem* (7^e mois de l'année romaine)

Octobre : *octo* (8^e mois)

Novembre : *novem* (9^e mois)

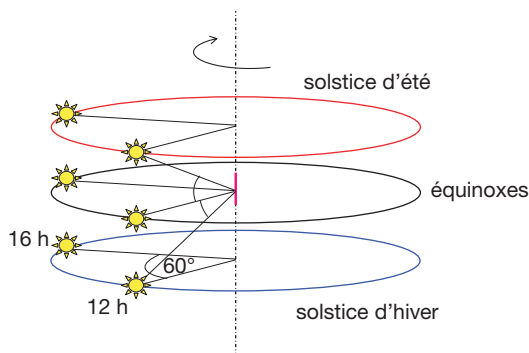
Décembre : *decem* (10^e mois)

Quelle heure indique un cadran solaire ?

Pour suivre le déplacement du Soleil dans le ciel, les agriculteurs se sont longtemps contentés d'observer son passage au-dessus de repères faciles à identifier : sommets de montagnes, arbres isolés ou clocher d'une église. Les premiers cadrans solaires sont vraisemblablement apparus 1 500 ans avant notre ère, en Mésopotamie et en Chine. Les Mésopotamiens et les Égyptiens ont découpé la journée en douze heures égales. Puisque la durée de la journée varie pendant l'année (figure page 15), celle de l'heure variait aussi. Cela nous paraît aberrant, mais cela ne gênait pas les Anciens. C'est seulement les jours d'équinoxe, où la journée dure 12 heures, que la durée de cette heure variable était la même que celle de notre heure actuelle.

Une question de style

Examinons de plus près le mouvement apparent du Soleil. Sur la figure de la page 15, sa trajectoire apparente journalière est représentée par un cercle, mais ce n'est qu'une approximation : entre le solstice d'hiver et le solstice d'été, le Soleil monte progressivement en tournant autour de l'axe de rotation de la Terre. Sa trajectoire apparente est donc une *spirale ascendante*, mais les spires sont très resserrées. L'écart angulaire entre les directions du Soleil à midi aux solstices d'été et d'hiver est égal à $46^{\circ} 52'$, et le Soleil met six mois pour les parcourir. Il monte donc en moyenne de $0,26$ degré par jour. C'est à peu près la moitié de l'angle sous lequel nous voyons le Soleil depuis la Terre. En ce qui concerne le fonctionnement des cadrans solaires, on peut donc bien raisonner comme si le Soleil tournait chaque jour sur un *cercle*. Ce cercle est reproduit sur la figure suivante les jours de solstice et d'équinoxe.



Rotation apparente du Soleil autour de l'axe de rotation de la Terre.

L'axe de rotation est en points tirets, et un style rouge est placé le long de l'axe. La direction du Soleil est représentée à 12 h et à 16 h, les jours de solstice et d'équinoxe. Les deux angles marqués sur la figure sont égaux à $23^{\circ} 26'$.

Les jours d'équinoxe, la direction du Soleil est perpendiculaire à l'axe de la Terre, et sa trajectoire apparente est dans le plan de l'équateur. Chaque jour, le Soleil tourne d'est en ouest à raison de 15 degrés par heure. À 16 h par exemple, quatre heures après son passage au méridien, il est dans un plan qui fait 60 degrés avec le plan méridien. Si on place un style le long de l'axe, à une heure donnée la *direction* de son ombre sur un plan quelconque sera la même tous les jours de l'année : pour que les graduations d'un cadran solaire soient valables toute l'année, il faut

que son style soit parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Cette innovation essentielle a été introduite en Europe au xiv^e siècle, sans doute par les Arabes. Mais elle a mis du temps à s'imposer partout.



Cadran de l'église de Saint-Marcel-de-Fontfouillouse (Gard).

Le style était horizontal. Le cadran comporte 24 graduations équidistantes dont la signification variait pendant l'année. Le cartouche, gravé en caractères gothiques, indique la date de construction : 1503.

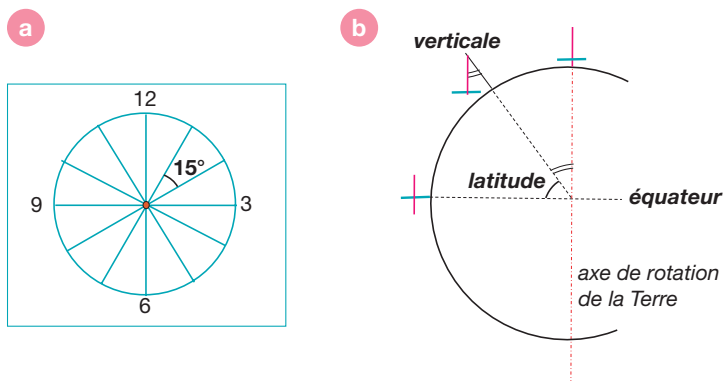
Mais aussi...

LE STYLE

À l'origine, le mot latin *stilus* désignait le poinçon qui servait à écrire sur une tablette d'argile. C'est devenu par extension le style d'un cadran solaire, dont l'ombre « écrit » l'heure, mais aussi le stylo de l'écrivain et, au sens figuré, sa façon de s'exprimer.

Les lignes horaires

Le tracé des graduations, que l'on appelle les « lignes horaires », est particulièrement simple quand le cadran est perpendiculaire au style. En effet, il est alors parallèle à celui des trajectoires apparentes du Soleil (figure page 18). L'ombre du style tourne comme le Soleil de 15° par heure, et les lignes horaires sont les rayons d'un cercle centré au pied du style, équidistants de 15° (figure a page suivante). Ce type de cadran est qualifié d'*équatorial*, car son plan est parallèle à celui de l'équateur. Le cadran équatorial est représenté en divers points du globe sur la figure b page suivante.

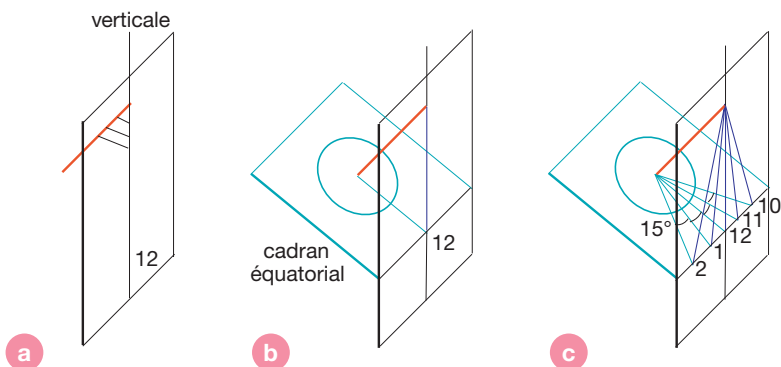


Cadran équatorial.

(a) Le style (point rouge) est perpendiculaire au cadran. Les lignes horaires sont les rayons d'un cercle, équidistants de 15°.

(b) Le cadran est représenté au pôle Nord, en un lieu de latitude intermédiaire et à l'équateur. Le style rouge est parallèle à l'axe de rotation de la Terre, et le cadran (vert) est perpendiculaire au style. Les deux angles doublement barrés sont égaux.

L'angle entre le style et la verticale du lieu est le complémentaire de la latitude : il est égal à 90° à l'équateur et il est nul aux pôles. En France, où la latitude varie entre 42° et 51° environ, cet angle est voisin de 45°. Mais la plupart des cadrans solaires sont tracés sur des murs verticaux et ne sont donc pas équatoriaux. On trouve dans les traités spécialisés les formules trigonométriques qui permettent de les graduer. La figure suivante montre comment on peut procéder sans faire appel à ces formules.



Différentes étapes de la graduation d'un cadran vertical.

Pour la compréhension de la figure, le plan vertical est supposé transparent.

On marque l'emplacement du pied du style, et on trace la verticale qui passe par ce point. Le style est positionné dans le plan méridien qui passe par cette verticale, orienté de telle façon qu'à midi, heure solaire, son ombre soit sur la verticale et qu'il fasse avec la verticale un angle égal au complémentaire de la latitude (figure a). La verticale donne la graduation 12 h. Tout plan perpendiculaire au style définit un cadran *équatorial* (figure b) que l'on peut graduer comme indiqué sur la figure précédente. Il suffit de prolonger ces rayons jusqu'au plan vertical pour obtenir les lignes horaires du cadran vertical (figure c). Si le mur est orienté plein sud (cadran *méridional*), l'intersection avec le plan du cadran équatorial est une horizontale est-ouest, et les graduations sont symétriques par rapport à la verticale.



Cadran solaire de l'église d'Abries (Hautes-Alpes).

Le chœur des églises étant généralement orienté vers l'est, un mur est souvent disponible pour un cadran « méridional ». C'est le cas de ce cadran daté de 1821, comme l'indique la symétrie des graduations par rapport à la verticale.

La symétrie disparaît quand le plan vertical est orienté différemment, on parle alors de cadrans *déclinants* (photos page suivante). Les lignes horaires d'un cadran vertical dépendent de la latitude du lieu, mais aussi de l'orientation du mur.

Partez à la découverte des phénomènes de la nature en 100 questions essentielles !

Peut-on expliquer ce qu'indique un cadran solaire, la formation des stalactites de glace, la nature des nuages et de la foudre, la couleur bleue des océans, l'apparition d'un arc en ciel, l'ascension de la sève dans les arbres, l'effet de serre de l'atmosphère, mais aussi l'origine du système solaire et de la vie ?

Ce livre vous propose des réponses à l'aide d'explications simples, de schémas en couleurs, de photos, d'exemples pris dans la vie de tous les jours et de quelques formules indispensables. Des encadrés culturels viennent compléter l'ensemble.



En ligne : de nombreux compléments
également accessibles par flahcodes

Patrick Bertrand est physicien. Conférencier passionné par la vulgarisation, il anime depuis plusieurs années des ateliers à l'Université du temps libre de Gap et durant les fêtes de la science autour des thématiques biotechnologiques, astronomiques et environnementales.

24,90 €

ISBN : 978-2-8073-3979-8



9 782807 339798

deboeck **B**
SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com