

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 170 - Juin 2020 9 €

La forme de la Terre

Climats et saisons

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Ératosthène

La loi de Wien

mesure du méridien terrestre

Histoire du mètre

Les phases de la Lune

Le Soleil, notre source d'énergie

Les éléments dans les étoiles

corps noir

La Terre un astre singulier

Le rayonnement solaire

Géocentrisme et héliocentrisme

Numéro 170 - été 2020

Thème de ce numéro, l'enseignement scientifique au lycée

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur :

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2020

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjoint : Vincent Bouneb

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault

Responsables du site : Jean-Michel Vienney



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Francis Berthomieu, Michel Bobin, Vincent Bouneb, Pierre Causeret, Françoise Combes, Christine Daloubeix, Véronique Hauguel, François Hurter, Christian Larcher, Anne-Marie Louis, Pierre Magnien, Didier Paillard, Joël Petit, Jean Ripert, Grégory Silva, Franck Smanio, Sylvie Thiault, Isabelle Vauglin, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 170 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Ce numéro porte en grande partie sur l'enseignement scientifique au lycée. L'astronomie est présente dans les programmes de cette nouvelle discipline – principalement en classe de première – et tous les mots affichés sur le tableau de couverture en proviennent.

Vous trouverez plus de détails sur ces programmes page 7.

Les Cahiers Clairaut

Été 2020

Éditorial

Une étude de l'IFOP datant de 2017 indiquait que plus de 9% des Français croient « possible que la Terre soit plate et non pas ronde comme on nous le dit à l'école ».

Cette étude montre une certaine défiance des Français envers le monde scientifique mais aussi indirectement vis-à-vis de l'enseignement dispensé à l'école. Enseigner ce n'est pas transmettre des vérités toutes faites mais plutôt questionner pour construire. Gaston Bachelard dans « la formation de l'esprit scientifique » écrivait « toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit ».

Une partie du nouveau programme d'enseignement scientifique de première générale est consacrée au Soleil, une autre à « la Terre, un astre singulier ». Ces deux parties font l'objet du thème de ce numéro.

Dans cette partie thématique, vous trouverez aussi une étude approfondie sur « climat et astronomie » ; une autre relève les erreurs détectées dans les manuels scolaires, sur les schémas illustrant les différentes phases de la Lune.

Les philatélistes retrouveront la suite des articles sur l'astronomie dans les timbres.

Ce numéro se termine par un article de fond sur « l'inflation dans l'Univers ». Un concept déroutant mais actuellement indispensable pour justifier la platitude de l'Univers ainsi que son caractère homogène et isotrope.

Christian Larcher (pour l'équipe)

Sommaire

Avec nos élèves

Petites expériences autour du mouvement de rotation de la Terre

Joël Petit p 2

Thème : l'enseignement scientifique au lycée

Article de fond

Climat et astronomie

Didier Paillard p 8

Mots croisés

Pierre Causeret p 14

Avec nos élèves

Une expérience d'enseignement du thème astronomie en 1^{re}

Grégory Silva p 15

Avec nos élèves

D'Aristarque à Ératosthène

Pierre Causeret p 17

Avec nos élèves

Ateliers sur la triangulation en intérieur ou en extérieur

Véronique Hauguel p 21

Avec nos élèves

L'histoire du mètre

Sylvie Thiault p 26

Avec nos élèves

Les phases de la Lune dans les livres d'enseignement scientifique

Franck Smanio p 31

L'enseignement scientifique et les productions du CLEA

p 36

Curiosité

L'astronomie dans les timbres (3)

Anne-Marie Louis p 37

Article de fond

Inflation dans l'Univers

Françoise Combes p 42

École d'été 2020

p 48

Solutions des mots croisés

p 48

Nous avons reçu de nombreux articles sur le thème de ce numéro et bien que celui-ci occupe 30 pages au lieu des 20 habituelles, nous n'avons pas pu tous les mettre dans ce numéro. Nous nous excusons auprès des auteurs, vous retrouverez en libre accès sur le site du CLEA (Cahiers Clairaut n° 170 / Sommaire) :

- l'article d'Isabelle Vauglin « (Astro)physique pour lycéens », des ateliers présentés par le Centre de recherche en astronomie de Lyon (CRAL) ;
- l'article de Pierre Causeret sur le Ciel d'été.

La rédaction

Petites expériences autour du mouvement de rotation de la Terre

Joël Petit, professeur de physique-chimie, Bracieux, Joel.Petit@ac-orleans-tours.fr

Des propositions de petites manipulations élémentaires permettant de favoriser le passage des élèves d'une représentation ressentie et instinctive, vers une représentation scientifiquement reconstruite. Ce cheminement intellectuel est indispensable pour faire évoluer la représentation spontanée de l'enfant.

Lorsqu'on demande, de manière inopinée, à un enfant (et à un certain nombre d'adultes) d'expliquer pourquoi il fait, en France métropolitaine, tantôt jour et tantôt nuit, rares sont ceux qui produiront une réponse scientifiquement « correcte » du premier coup. En effet, si le fait que la Terre tourne sur elle-même en 24 h (jour solaire) est un fait astronomique indiscutable de nos jours, cela n'a pas toujours été la représentation du monde validée et n'est instinctivement pas celle produite par les observations et le ressenti de nos élèves.

Il est donc intéressant de proposer différentes activités pratiques qui vont permettre aux élèves de confronter leur représentation du monde au savoir scientifique que nous souhaitons leur transmettre. Sans cela, une partie des concepts et notions qui seront abordés risque de ne pas modifier les représentations initiales des élèves laissant, pour bon nombre, le Soleil tourner autour de la Terre. Une part non négligeable des difficultés rencontrées dans l'enseignement des notions astronomiques réside dans la modélisation « extra-terrestre » de phénomènes du quotidien perçus par chacune et chacun, les deux pieds sur Terre. En effet, si la transposition cognitive d'un phénomène terrestre sous forme d'un modèle « extra-terrestre », c'est à dire vu depuis l'espace, à l'extérieur de notre planète, est chose relativement facile pour un adulte, elle demande un véritable cheminement intellectuel pour un enfant.

Ainsi, la démarche proposée et testée en classe part du ressenti des élèves et de leurs observations réalisées sur Terre pour les conduire à une première modélisation du mouvement de rotation de la Terre.

Une première séance pour se questionner

Cette première séance peut être amenée par quelques questions :

- Notre planète, la Terre, bouge-t-elle dans l'espace ?
- Quels sont les principaux mouvements de la Terre dans l'espace ?
- Si la Terre est en mouvement dans l'espace, pourquoi nous ne la sentons pas « bouger » ?
- Dans la situation illustrée ci-dessous :



Fig.1. À gauche, astronaute qui dort dans la Station spatiale internationale¹ (ISS) (Crédit NASA).



Fig.2. Ci-dessous, la Station spatiale internationale (ISS) en orbite à 400 km au-dessus de la Terre. Elle se déplace à une vitesse d'environ 26 000 km/h par rapport au sol ! (NASA/Roscosmos)

¹ On pourra voir également la vidéo « sleeping in space » (<https://www.youtube.com/watch?v=UyFYgeE32f0>) ou « Sortie dans l'espace » (<https://www.youtube.com/watch?v=mMZtpMSmqoE>) ou encore Terre filmée depuis l'ISS en accéléré (<https://www.youtube.com/watch?v=GJzCiPRj3MM>)

L'astronaute qui dort dans l'ISS est-il en mouvement ou au repos ? Ressent-il le mouvement de l'ISS ? Pourquoi ?

- Pouvez-vous trouver des situations dans la vie de tous les jours dans lesquelles vous êtes dans un véhicule en déplacement et que vous ne ressentez pas le mouvement de ce véhicule² ?

Exemples de réponses : un avion à vitesse de croisière, une voiture à vitesse constante sur l'autoroute, dans le car scolaire lorsqu'il démarre très lentement, dans le TGV, etc.

La trace écrite qui peut résulter de ces questions permettra de faire émerger les représentations initiales des élèves. Une trace écrite portant sur la relativité d'un mouvement (et la notion de référentiel) ainsi que sur le « ressenti » ou le « non ressenti » d'un mouvement pourra être rédigée. Elle permettra d'introduire différentes notions en lien avec les programmes.

Ainsi, nous nous trouvons sur une planète animée de divers mouvements. Nous ne pouvons pas percevoir ces mouvements car ils se produisent avec des vitesses qui peuvent, en première approximation, être considérées comme constantes ou variant de manière imperceptible.

Parmi les principaux mouvements de notre planète, celui qui est responsable de l'alternance du jour et de la nuit est la rotation de la Terre autour d'un axe passant par les pôles de notre planète.

Pour vérifier que la Terre tourne sur elle-même il est possible de réaliser diverses expériences telles que l'expérience du pendule de Foucault ou le suivi du mouvement apparent du Soleil dans le ciel au cours d'une journée.

L'expérience du pendule de Foucault³

Pour réaliser cette expérience célèbre, il est possible de réaliser (ou de faire réaliser) une petite maquette illustrant son principe. Elle nécessite peu de matériel (3 pics à brochette, une boule en polystyrène, un morceau de fil de fer, du fil, une masse équipée d'un crochet et une plaque en polystyrène de 20 cm × 20 cm environ) et elle peut être rapidement réalisée par les élèves.

En faisant pivoter doucement la plaque support, le pendule qui oscille conserve le même plan d'oscillation (ou presque) !

Il en est de même pour le « vrai » pendule de Foucault au pôle Nord : il conserve au cours d'une journée le

même plan d'oscillation⁴. Ce qui fait qu'il semble se déplacer est dû à la rotation propre de la Terre sur elle-même. Tout n'est, qu'une nouvelle fois, qu'un simple changement de point de vue (de référentiel).



Fig.3. Ci-dessus, le matériel pour réaliser la maquette du pendule de Foucault.



Fig.4. À droite, maquette du pendule.

Deuxième séance : étude du mouvement apparent du Soleil au cours d'une journée

Pour étudier un mouvement au cours du temps, il faut notamment pouvoir étudier des déplacements en utilisant au moins un point de repère. Le point de repère idéal pour étudier en classe, dans la journée, le mouvement de notre planète est notre étoile : le Soleil.

En étudiant le mouvement apparent de notre étoile vue depuis la Terre, nous allons pouvoir « remonter » au mouvement de notre planète. Mais observer le Soleil n'est pas sans danger !

Cette séance débutera donc par une série de recommandations et éventuellement d'expériences afin de parler des dangers que représente le Soleil et certaines sources de lumière telles que les lasers pour nos yeux.



Fig.5. (à gauche). Lentilles et Soleil.

Fig.6. (à droite). En quelques secondes, le ballon explose sous l'effet de l'absorption de l'énergie lumineuse du laser.

L'observation du Soleil étant dangereuse, il faut donc trouver un moyen détourné de s'informer « scientifiquement » sur la position relative du Soleil

² Voir « Sauter sur un trampoline en mouvement » (<https://www.youtube.com/watch?v=i0RBFpazDtk>)

³ Voir <https://www.youtube.com/watch?v=i0RBFpazDtk>

⁴ À une autre latitude, c'est un peu plus compliqué. À Paris par exemple, sa période est de 32 h. Le plan d'oscillation varie mais, comme le disait Foucault « en restant aussi parallèle que possible ».

par rapport à notre lieu d'observation sur Terre... Cela pourra être fait à condition d'observer l'ombre formée par un des premiers instruments astronomiques inventé par les humains : un gnomon.



Fig.7. Illustration d'un « gnomon ». Il consiste ici en un pic à brochette de 1 cm planté verticalement dans une plaque en polystyrène. Ce gnomon projette une ombre de laquelle nous pourrions tirer de nombreuses informations.

Selon, le temps que l'on souhaite consacrer à cette activité, il est possible de réaliser une ou plusieurs séances exclusivement dédiées à l'étude de la formation des ombres et à la propagation rectiligne de la lumière.



Fig.8. (à gauche). Comment se forme une ombre ? Comment expliquer sa formation à l'aide du modèle du rayon de lumière ?



Fig.9. Comment faire varier la taille de l'ombre d'une figurine en conservant la distance entre la lampe et la figurine ?

Dans tous les cas, les élèves doivent comprendre que :

- une ombre se forme lorsqu'un objet, dit opaque, stoppe la propagation de la lumière ;
- une ombre se forme toujours à l'opposé de la source de lumière (« derrière » l'objet opaque) ;
- la taille d'une ombre peut varier de deux façons : lorsque la distance entre la source de lumière et l'objet varie et/ou que l'angle d'inclinaison entre la source et l'objet varie ;
- la propagation rectiligne de la lumière permet d'expliquer, par des constructions géométriques dans lesquelles la lumière est représentée à l'aide du modèle du rayon de lumière, la forme et les caractéristiques des ombres.

Il ne reste plus qu'à introduire la nécessité d'utiliser une **rose des vents**, placée autour du gnomon afin de pouvoir relever avec précision et rigueur scientifique la position de l'ombre du gnomon au cours d'une journée.

En effet, si on souhaite échanger des mesures, repérer une position par rapport à un environnement local n'a aucun intérêt : indiquer à quelqu'un qui ne connaît pas le site d'observations qu'à 8 h 45 (heure de la montre), le Soleil se trouve en direction de la fenêtre de gauche du bâtiment A ne sert à rien !).

Cette rose des vents doit être installée si possible de niveau et surtout en respectant les points cardinaux qui seront identifiés à l'aide d'une boussole.



Fig.10. Rose des vents et boussole.



Fig.11. Élève réalisant un relevé.

Les élèves pourront alors constater que, quel que soit l'endroit où ils se trouvent dans la cour, elles/ils ont tous le même nord. Ils/elles disposent alors d'une « mesure » scientifique complète : à 8 h 45 (heure de la montre), l'ombre d'un gnomon est dans la direction ouest/sud-ouest.

Une « mesure » réalisée avec ce gnomon consiste à repérer :

- l'heure à la montre (éventuellement transformée en heure « astronomique » UTC) ;
- la direction et la longueur de l'ombre.

Cette activité s'adressant à des enfants de fin de cycle 3 (classe de 6^e), la mesure de l'ombre du gnomon n'est pas forcément attendue avec une extrême précision. L'important étant de repérer le plus précisément possible l'extrémité de l'ombre du gnomon.

Un tableau permettant de recueillir les mesures peut alors être proposé aux élèves (page suivante).

La première mesure peut être réalisée sur les divers gnomons distribués aux groupes d'élèves, les mesures suivantes (récréation du matin, pause méridienne, récréation de l'après-midi et si possible fin de journée) seront réalisées par un groupe dédié au suivi de cette expérience lors de la journée.

Remarques :

- selon la période de l'année, on veillera à utiliser un

gnomon plus ou moins grand afin d'avoir une ombre portée dont l'extrémité est repérable sur la rose des vents quelle que soit l'heure d'observation.

- Chaque mesure sera numérotée par ordre chronologique.

• Selon les objectifs, cette expérience peut être réalisée à divers moments de l'année afin de compléter l'activité sur les saisons proposées par la suite.

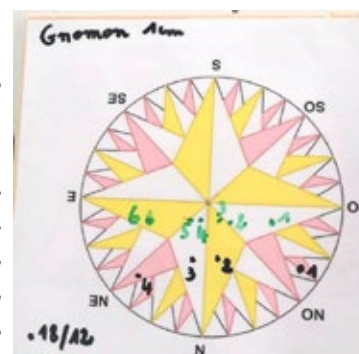
Voici un exemple de relevé obtenu :

Date : 25/03/2019 Saison : Début du printemps Lieu : Bracieux (Loir-et-Cher)

Hauteur du gnomon utilisé en cm : 1 cm

Mesures	Heure d'observation (heure de la montre)	Heure « astronomique »	Direction de l'ombre	Direction du Soleil déduite de l'ombre	Longueur de l'ombre mesurée (en cm)	remarques
1	8h30 min	7h30 min	O	E	3,5 cm	
2	10h30 min	9h30 min	NO	SE	1,5 cm	
3	12h	11h	N-NO	S-SE	1,1cm	
4	14h	13h	N-NE	S-SO	1,1 cm	
5	15h15 min	14h 15 min	NE	SO	1,4cm	
6	17h15 min	16h15 min	E-NE	O-SO	3,1 cm	

Tableau 1. Exemple de relevé.



Ces relevés permettent alors de construire une trace écrite qui peut être proposée sous la forme d'un texte à trou ou bien d'une synthèse « co-construite » en classe.

Dans tous les cas, elle doit permettre aux élèves de retenir que, au cours d'une journée, une personne vivant sur Terre peut observer le Soleil à différents endroits dans le ciel. Pour le repérer et indiquer sa position par rapport à un lieu d'observation, il est nécessaire d'utiliser un gnomon ainsi qu'une rose des vents qui utilise les points cardinaux indiqués par une boussole.

Pour une personne vivant en France métropolitaine, le Soleil se trouve :

- en direction de l'est le matin. Il est alors relativement bas sur l'horizon et produit des ombres « longues » en direction de l'ouest. Nous disons alors que le Soleil se « lève » (avec deux « e » comme est) ;
- en direction du sud vers midi (heure « astronomique »). C'est le moment de la journée où il est alors au plus haut sur l'horizon. L'ombre produite est alors la plus courte et en direction du nord ;
- en direction de l'ouest le soir. Il est alors à nouveau bas sur l'horizon et produit des ombres « longues » en direction de l'est. Nous disons alors que le Soleil se « couche » (avec un « o » comme ouest).



Troisième séance : Comment interpréter le mouvement apparent du Soleil au cours d'une journée ?

L'objectif de cette séance est de proposer une explication « astronomiquement » valable du mouvement apparent du Soleil. En effet, si on peut, scientifiquement, accepter le fait que dans le référentiel terrestre, c'est le Soleil qui se déplace par rapport à l'horizon de l'observateur, le modèle « astronomique » qui en découle est, pour les élèves, un modèle purement géocentrique avec une Terre fixe. Or, si ce modèle est très pratique pour expliquer et prévoir certains phénomènes du quotidien (comment va se déplacer l'ombre de mon parasol ? Où dois-je garer ma voiture pour qu'elle reste à l'ombre ? etc.) la plupart des élèves n'ont pas encore le recul suffisant pour prendre conscience de ses « limites astronomiques ».

On propose alors un modèle dans lequel l'élève « s'extrait » de sa position terrestre afin de devenir un/une scientifique étudiant un phénomène universel.

Expérience n°1

Vous disposez d'une rose des vents équipée d'un gnomon et d'une lampe de poche.

Proposez deux manières différentes de reproduire le déplacement de l'ombre portée d'un gnomon sur la rose des vents au cours d'une journée.

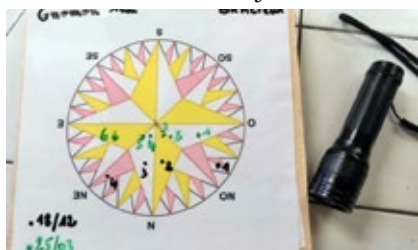


Fig.14. Le matériel pour reproduire le mouvement apparent du Soleil par rapport à la Terre, mais aussi le mouvement du lieu d'observation par rapport au Soleil.

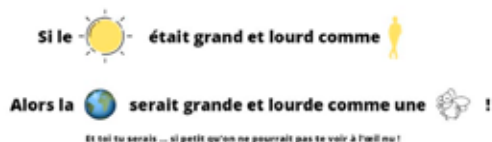
Si les élèves trouvent facilement la première manière (en déplaçant la lampe autour du gnomon), on veillera tout de même à ce que cela se fasse dans le « bon » sens, la lampe qui modélise le Soleil allant d'est en ouest et de manière à ce que la lampe reste au maximum à une distance relativement constante du gnomon.

La seconde manière est moins intuitive... il faut conserver la lampe de poche fixe et faire « pivoter » la rose des vents équipée du gnomon !

Il est alors important de proposer un temps d'échanges et de mise en commun afin d'insister sur ces observations : un même phénomène physique peut avoir des « explications différentes ». Il en découle ce que les scientifiques appellent des modèles. Chaque modèle a ses caractéristiques propres, son champ d'application et ses limites (exemple de la petite voiture qui « modélise » une vraie voiture, ou de la lampe qui modélise le Soleil dans cette expérience). Dans notre cas le modèle 1 correspond au Soleil qui tourne autour de la Terre et le modèle 2 à la Terre qui tourne sur elle-même

Quel est le bon modèle dans tout ça ?

Il peut alors être présenté en détail, preuves scientifiques à l'appui. Faire tourner la Terre sur elle-même est un modèle plus simple qui explique à la fois l'alternance jour/nuit, le pendule de Foucault, le mouvement des étoiles la nuit qui compte tenu de leur distance auraient des vitesses très grandes.



Le Soleil est un astre qui appartient à la famille des étoiles. Il a un diamètre d'environ 109 fois celui de notre planète la Terre. Sa masse est d'environ 330 000 fois celle de la Terre !

Expérience n°2

Vous disposez d'une lampe fixe modélisant le Soleil et d'un globe terrestre sur lequel une rose des vents et un gnomon ont été collés sur la France. En utilisant ce matériel, montrez qu'il est possible de reproduire les observations réalisées avec nos gnomons dans la cour.

Vous indiquerez alors, le plus précisément possible, quel est le mouvement que la Terre doit faire pour reproduire ces observations.



Fig.15. Le matériel pour reproduire les observations réalisées avec nos gnomons.

Cette expérience nécessite une bonne connaissance des observations et notions abordées dans les séances précédentes. Elle peut alors servir de « consolidation ». Elle permet également aux élèves de s'extraire de leur environnement afin de devenir des observateurs « extra-terrestre » du phénomène de rotation de la Terre. Cette vision sera exploitée à plusieurs reprises par la suite (saisons, phases de la Lune, maquette du Système solaire, etc.).

À l'issue des diverses manipulations et échanges (une régulation importante peut être nécessaire car certaines et certains éprouvent parfois une réelle difficulté à ne faire tourner que la Terre...), une nouvelle trace écrite peut être proposée :

Le mouvement du Soleil dans le ciel au cours d'une journée est un mouvement « apparent ».

En effet, ce n'est pas le Soleil qui bouge mais la Terre qui tourne sur elle-même ce qui nous donne l'impression que le Soleil bouge.

Un mouvement peut être perçu et décrit de manières différentes en fonction du point de vue de l'observateur appelé le référentiel.

La Terre tourne sur elle-même en 24 h par rapport au Soleil (1 jour). Ce mouvement appelé mouvement de rotation se produit en faisant tourner la Terre d'ouest en est autour d'un axe imaginaire passant par les pôles (Sud et Nord). Nous voyons alors le Soleil qui semble se déplacer d'est en ouest.

Ce mouvement de rotation est responsable de l'alternance du jour et de la nuit en France.

Remarque

Il peut être intéressant de proposer une activité autour de l'histoire des sciences, du modèle « géocentrique » et de ses limites. ■

THÈME : L'ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE AU LYCÉE

L'enseignement scientifique a fait son apparition dans les lycées à la rentrée 2019 en classe de première générale et débutera à la rentrée 2020 en terminale. Chaque élève suit cet enseignement à raison de 2 h hebdomadaires. C'est le thème de ce numéro des Cahiers Clairaut.

« Le but essentiel de l'enseignement scientifique est de dispenser une formation scientifique générale pour tous les élèves, tout en offrant un point d'appui pour ceux qui poursuivent et veulent poursuivre des études scientifiques. Il ne vise pas à construire un savoir encyclopédique mais cherche plutôt à atteindre trois buts intimement liés :

- contribuer à faire de chaque élève une personne lucide, consciente de ce qu'elle est, de ce qu'est le monde et de ce qu'est sa relation au monde ;

- contribuer à faire de chaque élève un citoyen ou une citoyenne responsable, qui connaît les conséquences de ses actions sur le monde et dispose des outils nécessaires pour les contrôler ;

- contribuer au développement en chaque élève d'un esprit rationnel, autonome et éclairé, capable d'exercer une analyse critique face aux fausses informations et aux rumeurs. »

(extrait du préambule du programme de première)

En classe de première

Le programme est divisé en quatre grandes parties :

1. Une longue histoire de la matière
2. Le Soleil, notre source d'énergie
3. La Terre un astre singulier
4. Son et musique, porteurs d'information

Chaque partie est subdivisée en 3 ou 4 « chapitres » pour aboutir à un total de 14 chapitres auxquels s'ajoutent un projet expérimental et numérique portant trois dimensions : utilisation d'un capteur éventuellement réalisé en classe ; acquisition numérique de données ; traitement mathématique, représentation et interprétation de ces données.

L'astronomie apparaît dans les trois premières parties. Voici quelques extraits du programme liés à l'astronomie :

Partie 1

« De Fraunhofer à Bethe : les éléments dans les étoiles. Comment, à partir du seul élément hydrogène, la diversité des éléments chimiques est-elle apparue ? »

Partie 2

« La Terre reçoit l'essentiel de son énergie du Soleil. Cette énergie conditionne la température de surface de la Terre et détermine climats et saisons ».

2.1 - Le rayonnement solaire

« L'énergie dégagée par les réactions de fusion de l'hydrogène qui se produisent dans les étoiles les maintient à une température très élevée. » (équivalence masse-énergie, spectre de corps noir, loi de Wien).

« La puissance radiative reçue du Soleil par une surface plane est proportionnelle à l'aire de la surface et dépend de l'angle entre la normale à la surface et la direction du Soleil. De ce fait, la puissance solaire reçue par unité de surface terrestre dépend :

- de l'heure (variation diurne) ;
- du moment de l'année (variation saisonnière) ;
- de la latitude (zonation climatique). »

2.2 - Le bilan radiatif terrestre

« La proportion de la puissance totale, émise par le Soleil et atteignant la Terre, est déterminée par son rayon et sa distance au Soleil. »

Partie 3

« L'histoire de la mesure du méridien terrestre par Ératosthène (et les hypothèses d'Anaxagore).

L'histoire de la mesure du méridien terrestre par Delambre et Méchain (détermination de la longueur du méridien reliant Dunkerque à Barcelone).

Histoire de la définition du mètre. »

« Grandes étapes de la controverse sur l'organisation du système solaire : Ptolémée, Copernic, Galilée, Kepler, Tycho Brahe, Newton. »

3.1 - La forme de la Terre

« Dès l'Antiquité, des observations de différentes natures ont permis de conclure que la Terre était sphérique » (Ératosthène, triangulation, latitude et longitude).

3.2 - L'histoire de l'âge de la Terre

3.3 - La Terre dans l'Univers

« Le mouvement de la Terre dans l'Univers a été l'objet de célèbres et violentes controverses. L'étude de quelques aspects de ces débats permet de comprendre la difficulté de la construction du savoir scientifique. » (géocentrisme et héliocentrisme).

« Observée dans un référentiel géocentrique, la Lune tourne autour de la Terre sur une trajectoire quasi-circulaire. Elle présente un aspect qui varie au cours de cette rotation (phases). La Lune tourne également sur elle-même et présente toujours la même face à la Terre ».

En classe de terminale

Thème 1 : Science, climat et société

Thème 2 : Le futur des énergies

Thème 3 : Une histoire du vivant

Chaque partie est subdivisée en 4 ou 5 « chapitres » pour aboutir à un total de 13 chapitres. L'astronomie y est peu présente. Dans la première partie, elle apparaît dans l'histoire de la Terre et le rayonnement solaire. « Depuis l'époque de sa formation, quasi concomitante avec celle du Soleil et des autres planètes du système solaire, la Terre a connu une évolution spécifique de sa surface et de la composition de son atmosphère. Sa température de surface permet l'existence d'eau liquide ». Mais l'étude des paramètres orbitaux de la Terre et de leur influence sur le climat n'est pas au programme.

Climat et astronomie

Didier Paillard, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

L'astronomie et le climat ont des liens multiples et étroits, depuis l'invention du calendrier il y a plusieurs millénaires, jusqu'à la compréhension des cycles climatiques à long terme de notre planète qui restent encore mal compris aujourd'hui.

La Terre et le Soleil

Les saisons

L'archétype du phénomène climatique, bien connu de tous, c'est l'alternance des saisons. La question du retour des saisons s'est posée dès la préhistoire ou l'Antiquité. Cette préoccupation climatique est à l'origine de l'astronomie. En effet, la révolution néolithique et le développement de l'agriculture nécessitent un outil capable de prédire l'époque des semailles ou des récoltes, indépendamment des fluctuations quotidiennes du temps qu'il fait : c'est l'invention du calendrier. Les premiers savants ou prêtres de l'époque établiront ainsi les lois qui gouvernent les saisons, malgré le caractère très aléatoire de la météorologie au quotidien, à travers l'observation du mouvement des astres. Il est donc raisonnable d'affirmer que la question du climat, via la découverte du cycle saisonnier, est probablement à l'origine du déterminisme en science.

Climat et déterminisme sont dès lors intimement liés, dès les origines. Le « temps qu'il fait » (la météo) et le « temps qui passe » (qui s'écoule du passé vers le futur) proviennent de la même racine latine *tempus*, ce qui souligne à quel point saisons et écoulement du temps sont liés dans les esprits et l'évolution des idées.

Les zones climatiques et la zone habitable

Si les variations saisonnières de la température ont servi de référence pour définir l'année, ce sont ses variations géographiques qui sont à l'origine du mot « climat ». Ce mot d'origine grecque (κλίμα) était encore au 17^e siècle synonyme de latitude. Il signifie initialement « angle » ou « inclinaison », en référence à la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, qui change avec la latitude géographique. Ainsi Aristote définit cinq zones géographiques sur la Terre, deux zones polaires inhabitables car trop froides, une zone équatoriale inhabitable car trop chaude, et deux zones tempérées, habitables, à des latitudes (climats) intermédiaires.

« La raison démontre que la partie habitable est limitée en latitude, et cette partie peut être regardée comme circulaire par la température mélangée qui y règne » (Aristote, *Météorologiques*, 2, ch. 5, §13).

Depuis l'Antiquité, la notion de climat est donc étroitement liée à la notion d'habitabilité. Ce sont tout d'abord les médecins, puis les explorateurs et géographes aux 17^e et 18^e siècles, qui vont entreprendre de mesurer les températures, les précipitations, en même temps que d'autres variables environnementales, afin de mieux quantifier « l'habitabilité » des différentes régions du monde, de définir les « climats sains » ou « malsains », car on ne connaissait pas encore les agents pathogènes, microbes ou virus et l'on pensait que les maladies étaient liées à l'environnement et en particulier au climat.

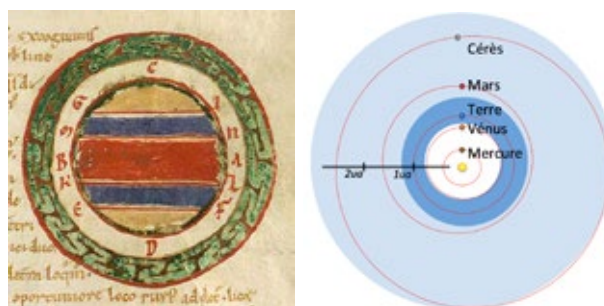


Fig.1. À gauche, les zones géographiques du globe terrestre de l'Antiquité : les zones habitables en bleu, et les zones inhabitables, polaires en jaune et torride en rouge (manuscrit du 12^e siècle « *Le songe de Scipion* » de Macrobie); à droite, la zone habitable du Système solaire, selon différents critères (bleu foncé entre 0,73 et 1,24 UA, bleu clair, jusqu'à 3 UA).

Le climat est donc, avant tout, une notion de géographie, destinée à caractériser, de manière déterministe, l'environnement des êtres humains. Le lien avec l'astronomie a toujours été évident, par exemple en définissant les cercles polaires et les tropiques à partir de l'obliquité de la Terre (l'inclinaison¹ de l'axe de rotation, $\varepsilon = 23^\circ 26'$) : au-delà du cercle polaire, le Soleil ne se lève pas,

¹ Angle entre l'axe de la Terre et la perpendiculaire au plan de l'écliptique.

ou ne se couche pas à certains moments de l'année ; entre les tropiques, le Soleil (à midi) est tantôt au sud, tantôt au nord, et passe donc deux fois par an au zénith.

Pour aller au-delà de la simple notion de latitude, les géographes définissent le climat à travers les moyennes des observations sur une période de quelques dizaines d'années (30 ans selon les recommandations des services météorologiques). En effet, en l'absence de « changement climatique », la moyenne ou espérance mathématique est une bonne indication de ce que l'on peut prédire *a priori*.

Les saisons et les zones climatiques : pas aussi simple qu'il n'y paraît...

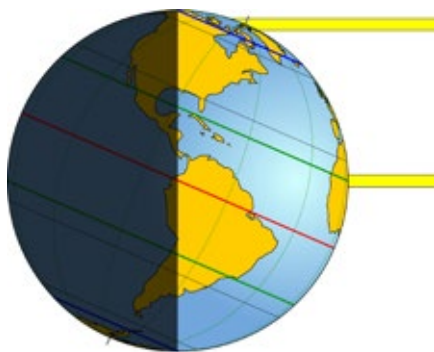


Fig.2. La Terre au solstice d'été. Cette figure est inspirée d'un ouvrage destiné aux nouveaux programmes du lycée, avec la légende : « La quantité d'énergie solaire reçue à la surface de la Terre est inégale selon les zones du globe : zone polaire, zone tempérée et zone intertropicale ».

La hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon est le principal facteur qui détermine le climat. Mais, de façon intéressante, cette figure représente la Terre durant l'été de l'hémisphère nord, c'est-à-dire précisément le moment de l'année où le pôle nord reçoit quotidiennement plus d'énergie que les tropiques, contrairement à ce qui est suggéré par la légende et la figure ! Car la durée du jour est aussi un élément essentiel pour discuter de l'énergie reçue à différents endroits et différentes saisons sur Terre : au solstice d'été, le pôle Nord bénéficie de 24 heures de soleil, contre 12 heures seulement à l'équateur.

Si on calcule la puissance moyenne reçue par jour en tenant compte de la longueur de la journée et de la hauteur du Soleil, on obtient la figure 3. Les calculs sont détaillés dans l'encadré 1 (page suivante).

Le climat dépend donc de la latitude et de la saison, mais aussi des trois paramètres astronomiques : e (excentricité), ε (obliquité) et ω (précession climatique) qui sont définis sur la figure 4.

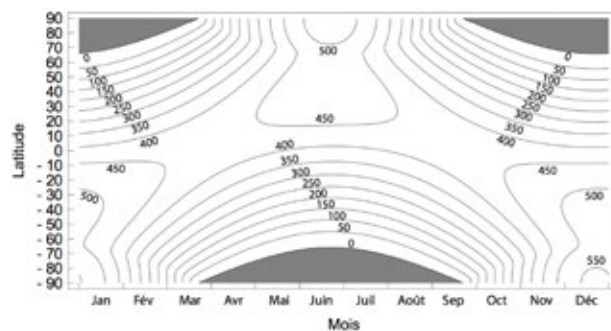


Fig.3. Puissance moyenne journalière P_M ($W.m^{-2}$) reçue au sommet de l'atmosphère par $1 m^2$ horizontal, en fonction de la position orbitale λ (traduite ici en mois du calendrier usuel) et de la latitude ϕ , calculée pour les valeurs actuelles de l'excentricité e , de la précession climatique² ω et de l'obliquité ε . On y remarque que les pôles reçoivent plus d'énergie que les tropiques aux solstices d'été, à cause de la durée du jour. Par ailleurs, il y a une asymétrie entre les deux pôles, car la Terre est plus proche du Soleil au début du mois de janvier.

	L'excentricité correspond à « l'aplatissement » de l'ellipse, plus précisément $e = c/a$ où a est le demi-grand-axe et c la distance du centre au foyer. Elle oscille entre environ 0 et 0,06, avec des pseudo-périodicités de 100 000 et de 400 000 ans.
	L'obliquité ε est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la normale au plan orbital. Elle oscille avec une période de 41 000 ans entre $21,9^\circ$ et $24,5^\circ$.
	La précession climatique ω correspond à la position de l'équinoxe de printemps par rapport au périhélie (P), là où la Terre est au plus proche du Soleil. La précession climatique effectue un cycle complet environ en 21 000 ans.

Fig.4. Paramètres astronomiques qui déterminent le climat.

2 À ne pas confondre avec la précession des équinoxes. La précession des équinoxes concerne le déplacement de l'équinoxe de printemps par rapport au point vernal (période 26 000 ans) alors que la précession climatique indique le déplacement de la position de cet équinoxe par rapport au périhélie (période 21 000 ans). Le périhélie se déplace par rapport au point vernal, d'où la différence.

Encadré 1

Calcul de la puissance reçue du Soleil

Plus précisément, on peut calculer la quantité d'énergie reçue, par unité de temps, au sommet de l'atmosphère et par m^2 horizontal (on parlera d'insolation, en $W.m^{-2}$) à une latitude φ et à une saison donnée. Soit λ la position orbitale (angle) de la Terre par rapport à l'équinoxe de printemps (sa longitude vraie), on appelle déclinaison δ , la hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste, qui est donnée par $\sin \delta = \sin \lambda \times \sin \varepsilon$ où ε est l'obliquité de l'axe terrestre ($23^\circ 26'$).

Pour ce calcul, on se place dans un repère d'origine T, le centre de la Terre, et défini par le plan de l'équateur et le méridien de l'observateur. On utilisera ici des vecteurs unitaires.

Coordonnées sphériques de l'observateur O :

rayon = 1 ; longitude = 0 ; latitude = φ

Coordonnées cartésiennes de l'observateur O :

($\cos \varphi, 0, \sin \varphi$).

Coordonnées sphériques du Soleil S :

rayon = 1 ; longitude = H ; latitude = δ

où H est l'angle horaire du Soleil par rapport à sa position à midi vrai (H = 0 à midi ; H = π à minuit), angle qui permet de repérer la rotation terrestre.

Coordonnées cartésiennes du Soleil :

($\cos \delta \times \cos H, \cos \delta \times \sin H, \sin \delta$)

On calcule le produit scalaire de $\vec{TO}$ par $\vec{TS}$,

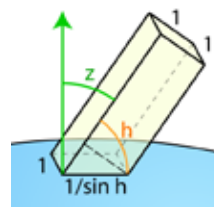
ce qui donne l'angle zénithal du Soleil $\widehat{OTS}$:

$\vec{TO} \cdot \vec{TS} = \cos \widehat{OTS} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H$.

Pour calculer la puissance reçue par une surface horizontale de $1 m^2$, il faut tenir compte :

- de la distance Terre Soleil notée r en multipliant par $(a/r)^2$ car la puissance reçue est inversement proportionnelle au carré de la distance (a demi grand axe de l'orbite, c'est la distance pour laquelle est donnée la constante solaire) ;

- de la distance zénithale z du Soleil en multipliant par $\cos z$ ou $\cos \widehat{OTS}$ (figure ci-dessous)



On a représenté un faisceau de lumière de $1 m^2$ de section transportant $1365 W (S_0)$.

L'aire A de la surface chauffée au sol par ce faisceau est égale à $1/\sin h$ ou $1/\cos z$. La puissance reçue au sol par m^2 est donc égale à $S_0 / A = S_0 \times \cos z$.

La puissance instantanée reçue (en $W.m^{-2}$) est donc :

$$P_1 = S_0 (a/r)^2 (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H)$$

où S_0 est la constante solaire ($\approx 1365 W.m^{-2}$), définie ci-dessous, figure 5.

La distance r est donnée par l'équation de l'ellipse en coordonnées polaires :

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos v)$$

où e est l'excentricité de l'orbite ($e = 0,0167$) et $v = \lambda - w$ est l'anomalie, ie. la position orbitale par rapport au périhélie ; $w = 282^\circ$ est la «précession climatique», c'est-à-dire la position de l'équinoxe de printemps par rapport au périhélie.

L'heure H_0 de lever/coucher du Soleil est donnée par

$$\widehat{OTS} = \pi, \text{ d'où : } \cos H_0 = -\tan \varphi \times \tan \delta$$

La puissance moyenne reçue sur une journée (en $W.m^{-2}$) est donc l'intégrale entre $-H_0$ et H_0 de la puissance instantanée P_1 divisée par 2π (si H_0 est en radians) :

$$P_M = S_0 (a/r)^2 (H_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin H_0) / \pi$$

C'est ce calcul qui permet d'obtenir la figure 3.

Le bilan radiatif et l'effet de serre

Pour comprendre et calculer les températures à la surface de la Terre, ou de n'importe quelle planète, il est nécessaire d'effectuer le bilan d'énergie entre le rayonnement incident et le rayonnement sortant. Les lois physiques du rayonnement thermique ont été proposées à la fin du 19^e siècle (loi de Wien, loi de Stefan-Boltzmann), avant d'être expliquées et unifiées par la mécanique statistique dans le cadre de la loi du corps noir, proposée par Max Planck en 1900. Il est dès lors assez simple de calculer l'équilibre radiatif entre l'énergie solaire incidente, l'énergie solaire réfléchie et le rayonnement infrarouge émis par la planète, comme cela est illustré sur la figure 5.

Au final, le bilan radiatif peut s'écrire sous la forme d'une équation simple :

$$(1 - \alpha) S_0 / 4 = \sigma T^4$$

(le facteur 4 étant le rapport de l'aire de la sphère à l'aire du disque).

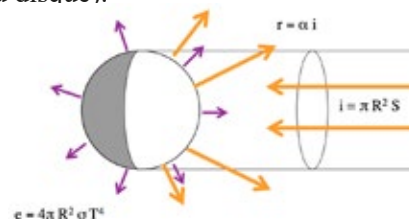


Fig.5. La constante solaire S_0 est la puissance reçue par unité de surface, perpendiculairement aux rayons solaires, à la distance moyenne Terre-Soleil ($S_0 = 1365 W.m^{-2}$). La puissance incidente totale i est obtenue en multipliant S_0 par la surface interceptée, soit le disque de rayon R. L'albédo planétaire α est la fraction réfléchie de ce rayonnement incident. Par ailleurs, la surface planétaire, supposée ici isotherme, émet un rayonnement thermique de corps noir σT^4 ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$) sur l'ensemble de sa surface sphérique (voir encadré 2).

Cette équation permet notamment d'estimer la température des exoplanètes (voir les Cahiers Clairaut n° 169 de mars 2020), connaissant la luminosité de l'étoile, et moyennant des hypothèses sur l'albédo, pour discuter de « l'habitabilité » de celles-ci. Néanmoins, la température obtenue de cette façon pour la Terre ($\alpha = 0,31$) ne correspond pas à la température de surface qui nous intéresse. L'équation ci-dessus donne environ $T = 255 \text{ K}$ (soit -18°C), ce qui correspond bien à la température du rayonnement infra-rouge émis vers l'espace, essentiellement par la vapeur d'eau, dans la partie haute de la troposphère, vers 6 à 8 km d'altitude. En effet, les basses couches de l'atmosphère sont presque totalement opaques aux rayonnements infra-rouges qui y sont absorbés par les gaz à effet de serre, notamment la vapeur d'eau. Lorsque l'on monte en altitude, la température diminue et la teneur en vapeur d'eau aussi (l'eau condense, forme des nuages, puis précipite). Plus haut dans la troposphère, l'air devient suffisamment sec pour que le rayonnement infra-rouge puisse s'échapper vers l'espace, de façon à équilibrer le rayonnement solaire incident.

L'effet de serre sur Terre est donc intimement lié au gradient vertical de température et à la présence d'eau. La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est directement contrôlée par la température. C'est ce que l'on appelle une rétroaction positive : plus il fait chaud, plus l'effet de serre lié à la vapeur d'eau augmente. À l'inverse, les concentrations des autres gaz à effet de serre (notamment CO_2 , CH_4 , N_2O) dépendent avant tout de leurs émissions et puits, naturels et anthropiques : ce sont eux qui vont donc déterminer l'intensité de l'effet de serre et le climat sur Terre.

Les variations climatiques sur Terre

Au 19^e siècle, la découverte de périodes glaciaires dans l'histoire géologique récente a été la première mise en évidence scientifique que le climat de la Terre changeait au cours du temps. Dès lors s'est posée la question des mécanismes sous-jacents. Comme cela a été mentionné plus haut, les deux principaux déterminants du climat sont l'astronomie et les gaz à effet de serre. C'est pourquoi, dès cette époque, deux théories des glaciations ont été proposées. D'une part une théorie astronomique, basée sur les changements à long terme des paramètres orbitaux et axiaux de la Terre (l'excentricité e , l'obliquité ε et la précession climatique ω , voir encadré 1). Et d'autre part, une théorie géochimique, basée sur de possibles changements de la concentration atmosphérique en CO_2 .

Encadré 2

La loi du corps noir, Max Planck (1900)

La puissance rayonnée par unité de surface P (en W.m^{-2}) possède une distribution spectrale qui est donnée en fonction de la longueur d'onde λ par :

$$\frac{dP}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, k la constante de Boltzmann et T la température en kelvin. Cette distribution possède une forme « en cloche », qui s'annule en 0 et à l'infini, comme cela est illustré sur la figure ci-dessous.

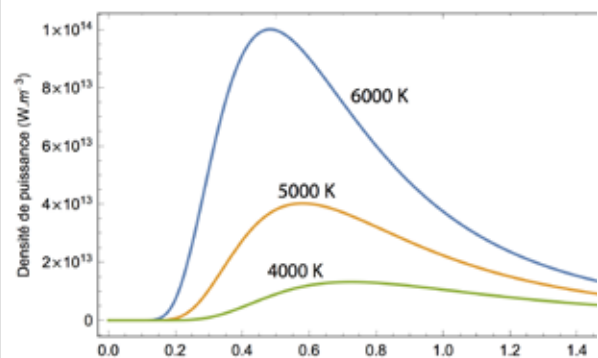


Fig.6. Densité spectrale dP/dl d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde l pour différentes valeurs de la température : la puissance totale émise augmente fortement avec la température, et la longueur d'onde du maximum diminue.

On peut alors en déduire deux lois fondamentales qui caractérisent ce rayonnement :

La loi de Stefan-Boltzmann, qui donne la puissance totale rayonnée P , en calculant l'intégrale sur toutes les longueurs d'onde de la loi de Planck :

$$P = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} \right) T^4 = \sigma T^4$$

avec la constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

La loi du déplacement de Wien, qui donne la longueur d'onde du maximum de radiation :

$$\lambda_{\text{MAX}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}}{T}$$

Autrement dit, la longueur d'onde maximale d'un rayonnement « thermique » est inversement proportionnelle à sa température. C'est cette loi qui permet d'affirmer que les étoiles rouges sont plus froides que les étoiles bleues. En particulier, le rayonnement visible (solaire) est centré autour de $\lambda_{\text{MAX}} = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ ce qui permet d'obtenir une température « de surface » du Soleil d'environ 6 000 K. De même, la température ambiante est de l'ordre de 280 K, donc nous baignons dans un rayonnement infrarouge centré au voisinage de $\lambda_{\text{MAX}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$, et le rayonnement émis par la Terre vers l'espace est un peu plus « froid », vers $\lambda_{\text{MAX}} = 15 \text{ }\mu\text{m}$, car il est émis plus en altitude.

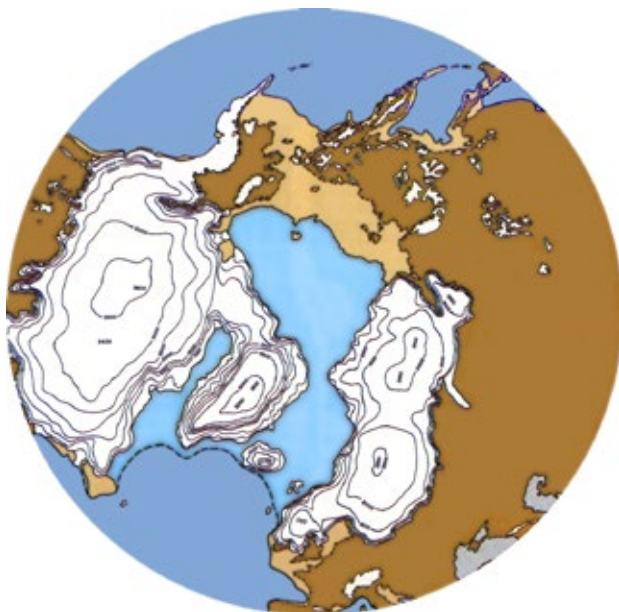


Fig. 7. L'hémisphère nord durant le dernier maximum glaciaire il y a environ 20 000 ans. Le nord de l'Europe et de l'Amérique sont recouverts de 2 à 4 km de glace (en blanc) ce qui entraîne une baisse du niveau marin d'environ 120 à 130 m et donc de nouvelles terres émergées (brun clair). La banquise, ou glace de mer (bleu clair) est plus étendue qu'aujourd'hui.

Les glaciations sont-elles causées par l'astronomie ?

La première théorie astronomique des glaciations a été proposée par Joseph Adhémar, professeur de mathématique, dès 1848. En effet, le phénomène de précession était connu des astronomes depuis Hipparque de Nicée (2^e siècle avant J.-C.) qui l'avait estimé correctement à « plus de 1° par siècle » (et donc une périodicité inférieure à 360 siècles). Ce mouvement de précession était désigné comme le « troisième mouvement de la Terre ». Les deux premiers mouvements (rotation et révolution) donnent lieu aux cycles diurnes et saisonniers, avec des effets climatiques évidents. Il était donc logique d'envisager des cycles climatiques à très long terme, environ 23 000 ans³ pour la précession climatique ω . Selon Adhémar, les glaciations étaient sensées s'effectuer en alternance entre les deux hémisphères, puisque l'effet de la précession est saisonnier : l'hiver de l'hémisphère sud est aujourd'hui plus loin du Soleil, car nous sommes proches de l'aphélie en juin, ce qui permettait d'expliquer la présence d'une « glaciation » en ce moment en Antarctique, et à l'inverse une ère glaciaire de l'hémisphère nord dans la situation opposée, il y a environ 11 000 ans.

³ La précession climatique possède un cycle d'environ 21 000 ans, mais l'effet correspondant sur l'insolation est modulé par l'excentricité (cf. encadré 1), ce qui engendre un forçage climatique à 23 000 et 19 000 ans.

Encadré 3

Les calottes de glace

Il existe une grande confusion dans les médias et dans les esprits sur la nature des différentes zones englacées dans les régions polaires et il peut être utile de préciser un peu le vocabulaire.

1. Les calottes de glace aujourd'hui présentes sur Terre sont le Groenland et l'Antarctique. L'épaisseur de glace correspondante est typiquement de l'ordre de 2 à 4 km. Il s'agit là de neige accumulée pendant des millénaires : c'est le plus grand réservoir d'eau douce sur Terre.

2. La banquise, ou glace de mer, correspond à la surface de l'océan qui gèle en hiver notamment dans l'océan Arctique ou autour du continent Antarctique. C'est avant tout un phénomène saisonnier et une grande partie de la banquise fond en été. L'épaisseur typique est de l'ordre du mètre. Dans les quelques endroits où les courants font converger la glace de mer, celle-ci peut parfois atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur. Il s'agit d'eau de mer gelée, qui reste un peu salée (le sel est expulsé des cristaux de glace, mais s'accumule dans des inclusions, ou bulles d'eau sur-salées, piégées dans la glace lors de sa formation).

3. Les icebergs sont d'énormes morceaux de glace qui se sont écoulés des calottes avant de se briser et de flotter librement sur l'océan. Ils mesurent souvent plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

4. Les plateformes glaciaires, présentes en Antarctique, sont intermédiaires entre la calotte et les icebergs : il s'agit de la calotte qui déborde du continent sous-jacent et flotte sur l'océan, tout en restant encore solidaire de l'Antarctique. Les deux plus grandes plateformes actuelles, la plateforme de Ross et celle de Ronne-Filchner, mesurent chacune plus de 400 000 km². Lorsque ces plateformes se brisent sur leur bord océanique, cela génère des icebergs gigantesques, des « grands tabulaires », de la taille d'un département ou plus.

La fonte de glace « flottante » (banquise, icebergs et plateformes glaciaires) ne modifie pas le niveau marin. Par contre, la fonte des calottes Groenland et Antarctique actuelles augmenterait le niveau de la mer de plus de 60 m, ce qui n'est pas envisagé dans un avenir proche. Au maximum glaciaire, le Canada et l'Europe du Nord étaient couverts de plusieurs kilomètres de glace : la calotte Laurentide en Amérique et Fennoscandine en Europe. Le niveau de la mer était alors environ 120 ou 130 mètres plus bas.

Nous savons maintenant que la présence de glace en Antarctique n'a rien à voir avec les périodes glaciaires, qui par ailleurs sont synchrones entre les deux hémisphères. En effet, comme cela a été montré par Milutin Milanković au début du 20^e siècle, le processus qui contrôle l'évolution des calottes de glace, c'est avant tout la fonte estivale : soit l'été est suffisamment chaud pour faire disparaître les neiges tombées en hiver, soit au contraire, l'accumulation neigeuse va pouvoir s'accroître d'une année sur l'autre. Si la précession climatique ω a un rôle non négligeable sur l'insolation estivale, c'est en fait l'obliquité ϵ qui est le paramètre astronomique le plus important. L'obliquité varie entre 21,9° et 24,5° avec une périodicité de 41 000 ans. Par conséquent, Milanković prédit dès les années 1920 des cycles climatiques glaciaires interglaciaires dominés par cette périodicité.

Cette théorie astronomique sera à la fois confirmée et démentie par les données paléocéanographiques dans les années 1970. En effet, les géologues marins ont pu prélever des carottages de sédiments dans de multiples endroits au fond des océans. Les analyses micropaléontologiques, géochimiques et isotopiques ont toutes confirmé l'existence de cycles climatiques glaciaires interglaciaires sur notre planète, et les datations radio-isotopiques ont démontré que ces changements climatiques étaient « rythmés » par l'astronomie, avec des périodicités de 23 000 ans (correspondant aux variations de la précession climatique ω), de 41 000 ans (correspondant à l'obliquité ϵ), et surtout des cycles dominants de 100 000 ans, tout au long du dernier million d'années (correspond à l'excentricité e). De façon intéressante, au début de l'ère quaternaire (entre 2,6 et 1 million d'années dans le passé), c'était la périodicité de 41 000 ans qui dominait les variations climatiques, en parfait accord avec la théorie de Milanković. Mais depuis 1 million d'années, on observe avant tout des cycles à 100 000 ans de grande amplitude, liés aux variations de l'excentricité, qui n'étaient pas attendus par la théorie. Les mécanismes à l'origine de ces grands cycles restent toujours débattus.

Les glaciations sont-elles causées par des variations de CO₂ ?

Les théories astronomiques du climat ont été développées par des « amateurs de sciences » : J. Adhémar était professeur de mathématique,

J. Croll a fait beaucoup de métiers (assureur, pasteur, gardien) avant d'obtenir un poste de bibliothécaire à l'université, M. Milanković était initialement un ingénieur construisant des ponts et des barrages. Les géologues et chimistes étaient plutôt majoritairement en faveur d'une explication géochimique des glaciations, car lorsqu'il y a moins de CO₂ sur Terre, le climat doit se refroidir à cause de la diminution de l'effet de serre. En effet, les principaux mécanismes contrôlant la concentration atmosphérique en CO₂ étaient connus, notamment par J.J. Ebelmen, au milieu du 19^e siècle, et il semblait clair que le CO₂ atmosphérique devait varier significativement au cours du temps, sous l'influence conjuguée du climat, de l'activité biologique et géologique.

La découverte des glaciations va ainsi motiver le physicien et alpiniste John Tyndall à mesurer l'absorption du rayonnement infrarouge par les différents gaz présents dans l'atmosphère et ainsi prouver le rôle majeur du CO₂ et de la vapeur d'eau pour déterminer le climat. À la fin du 19^e siècle, Svante Arrhénius, prix Nobel de chimie, va aller plus loin et calculer le taux de CO₂ atmosphérique qui permettrait d'expliquer les glaciations : selon lui, les températures glaciaires s'expliqueraient facilement avec une baisse d'environ 40 % du CO₂. Arrhénius en profite pour calculer aussi l'effet d'une augmentation du CO₂ sur le climat et pour annoncer le réchauffement climatique inévitablement associé à la combustion massive du charbon depuis la révolution industrielle. Pour un doublement du CO₂, il prédit ainsi un réchauffement de l'ordre de 5 °C, ce qui est compatible avec la « sensibilité climatique » des modèles actuels (en général de 3 à 5 °C, parfois un peu plus).

Les mesures du CO₂ dans les bulles d'air des carottes de glace prélevées en Antarctique effectuées près d'un siècle plus tard, lui donnent largement raison : la concentration était de 180 ppm au dernier maximum glaciaire, contre 280 ppm à l'époque pré-industrielle, soit une baisse de 36 % durant les glaciations, comme Arrhénius l'avait calculé. De façon intéressante, son calcul est faux, mais le résultat final est raisonnable : les données spectroscopiques qu'il avait à sa disposition surestimaient largement le rôle du CO₂ alors que son modèle, trop simple, sous-estimait l'effet de serre.

De façon encore plus spectaculaire, les variations de CO₂ durant les cycles glaciaires correspondent assez

étroitement aux variations climatiques, avec un cycle dominant de 100 000 ans. Il est donc très probable que le CO₂ ait joué un rôle important dans ces cycles. Les modèles climatiques actuels suggèrent que les changements de température observés durant les glaciations sont liés pour moitié à la présence des calottes de glace, et pour moitié à la baisse du CO₂. Il est maintenant clair que le CO₂ et l'astronomie ont un rôle dans les cycles climatiques du Quaternaire, mais il reste à construire une théorie faisant la synthèse de la théorie astronomique et de la théorie géochimique.

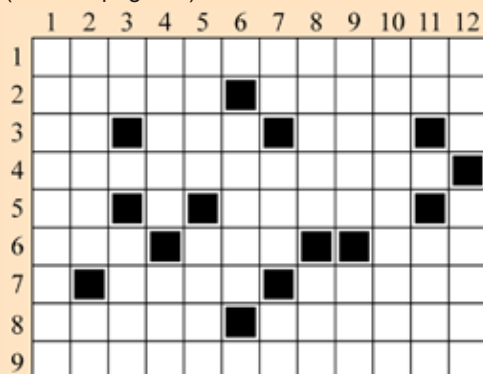
Les cycles astronomiques comme échelle de temps

Les liens entre l'astronomie et l'évolution du climat sur Terre ne se limitent pas à la période des glaciations du Quaternaire. Les cycles astronomiques ont clairement rythmé le climat de notre planète depuis ses origines. De façon intéressante, ces cycles peuvent être calculés, grâce à la mécanique céleste, sur de longues durées. Si l'on parvient à identifier clairement le signal astronomique dans les enregistrements géologiques, cela permet la construction d'une échelle « cyclo-stratigraphique », avec une datation absolue du passé géologique. Cette méthode, lorsqu'elle est disponible, s'avère plus précise que les radio-chronomètres basés sur la décroissance de certains éléments radioactifs. C'est elle qui sert de base aujourd'hui pour construire

en grande partie l'échelle de temps géologique internationale, en particulier pour la période du Cénozoïque, c'est-à-dire depuis 65 millions d'années. Ce travail s'est fortement développé au cours des dernières décennies, d'une part en tentant d'identifier les cycles d'origine astronomique dans les enregistrements géologiques, mais aussi en calculant les paramètres à long terme du Système solaire. De façon intéressante, Jacques Laskar, de l'Observatoire de Paris, a démontré que le Système solaire est chaotique : au-delà d'environ 50 millions d'années, il n'est plus possible de calculer précisément les paramètres astronomiques de la Terre, ni tout simplement de savoir où se situent les planètes. Mais certains cycles restent stables, notamment le cycle à 400 000 ans des variations de l'excentricité *e*. Par ailleurs, on observe souvent, notamment dans les enregistrements isotopiques du carbone, cette périodicité de 400 000 ans. Il semble bien que le cycle du carbone sur Terre soit, à long terme, modulé par l'astronomie. Ceci pourrait d'ailleurs expliquer la date de certaines transitions climatiques, comme le début du Quaternaire (il y a 2,6 millions d'années) ou l'apparition des cycles à 100 000 ans (il y a 1 million d'années) déjà mentionnés, qui correspondent tous deux à une modulation de ce cycle à 400 000 ans. Mais la théorie astronomique du carbone reste encore à construire. ■

Mots croisés « programmes lycée »

(solution page 48)



Verticalement

1. Comme la Terre après Aristote.
2. Auteur de l'Odyssée de l'espace. De chaque côté de l'horizon.
3. Va-t-elle nous dépasser ? Tous les lecteurs des Cahiers Clairaut.
4. La matière en a quatre. On y fait du foin.
5. Bref marchandage. Rangement.
6. Groupement d'atomes.
7. On écrirait plutôt CMXCIX. Ancienne compagnie aérienne. Comme 2020.
8. Pour classer. Comme un mot pour classer.
9. Il produit des indices. On en trouve beaucoup aux États-Unis, peu en Europe.
10. Physique abordée en terminale.
11. Au milieu de la nuit. Saint de banlieue parisienne.
12. C'est la saison. Lieu de couchers.

Horizontalement

1. Cet enseignement est au programme de première et de terminale.
2. Comme la Terre avant Pythagore. Bon moment pour voir le Scorpion actuellement.
3. Unité de surface. Celui de la Terre est au programme de 1re. Il surveille le petit écran.
4. Un personnage important dans le programme de 1^{re} et dans l'histoire de l'astronomie.
5. Fin d'un quark. À envoyer pour annoncer une manifestation du CLEA.
6. Cadre du primaire. Lieu de formation du CLEA. Cœur de sioux.
7. C'est trop désordonné. Disparaît avant le mât quand le bateau s'éloigne.
8. Satellite en rayons X. Elles peuvent servir d'engrais ou d'aliment.
9. Il peut être scientifique..

AVEC NOS ÉLÈVES

Une expérience d'enseignement du thème astronomie en 1^{re}

Grégory Silva, lycée Marie Curie, Sceaux

Cet article fait le bilan de la première année de mise en œuvre, par un enseignant, des nouveaux programmes d'enseignement scientifique de la classe première générale pour le thème relatif à l'astronomie.

Après avoir traité le thème 1 sur la matière, venait le thème 2 sur l'astronomie « Soleil, Terre et Lune ». L'objectif est d'aider les élèves à porter un regard critique sur les fausses informations (fake news) qui circulent sur internet et les réseaux sociaux. Ainsi pour les élèves, et grâce à l'histoire des sciences, l'un des buts de ce thème est de comprendre comment on a pu montrer que la Terre est bel et bien sphérique et qu'elle tourne autour du Soleil et non l'inverse.

Les cours d'enseignement scientifique en 1^{re} sont répartis comme suit dans mon lycée (Marie Curie à Sceaux) : 1 h de cours par semaine pendant deux semaines puis 1 h 30 de TP en 3^e ou 4^e semaine.

Pour débiter ce thème, les élèves ont étudié le rayonnement solaire : quelle est la température de surface du Soleil (étude de spectres sur ordinateur) ? Quelle est l'origine de ce rayonnement (activité documentaire) ? Telles sont les principales questions auxquelles ont répondu les élèves qui ont pu utiliser quelques relations nouvelles pour eux : loi de Wien pour la température et équivalence masse-énergie d'Einstein $E = \Delta m \times c^2$ pour la fusion nucléaire (et son lien avec la puissance rayonnée par le Soleil). Les élèves ont particulièrement bien aimé cette partie, par exemple le fait de pouvoir associer une couleur à une température dans le cas des étoiles (Bételgeuse est orangée donc plus froide que Bellatrix qui est bleue). Par contre l'utilisation des relations est une difficulté pour les élèves n'ayant pas choisi la spécialité physique ou maths.

Pour débiter la partie sur la Terre, voici comment les élèves ont travaillé lors de la séance de TP sur Ératosthène et sa méthode pour déterminer le rayon terrestre. D'abord à l'aide d'une animation¹ qui permet de visualiser l'orientation des rayons du Soleil arrivant à Alexandrie et Syène en fonction de la saison. Dans cette partie les élèves ont dû répondre notamment à ces questions :

1) Quelle hypothèse a fait Ératosthène, par rapport

à la forme de la Terre, pour appliquer sa méthode ? Cette vision faisait-elle, à votre avis, l'unanimité à l'époque ? [une recherche documentaire aurait été souhaitée avant la séance]

2) Pourquoi les rayons lumineux du Soleil arrivent parallèles entre eux sur la Terre ? [dans les documents fournis, il était indiqué que le Soleil était très éloigné]

3) Quel a été l'intérêt de faire cette expérience un 21 juin ? [bien montré par l'animation]

Ils ont ensuite effectué quelques calculs classiques aboutissant à l'estimation d'Ératosthène.

La deuxième partie est inspirée d'un article des Cahiers Clairaut « Mesure du diamètre de la Terre depuis Villariès » (n° 159, septembre 2017). Ils ont ainsi pu comparer la méthode et sa précision à l'époque d'Ératosthène et de nos jours : points communs, différences, écarts relatifs avec le rayon terrestre moyen. Les relations sont plus simples dans cette partie même si les élèves ne se souvenaient pas toujours du périmètre d'un cercle.

L'hypothèse d'une Terre sphérique est primordiale ici et permet d'utiliser la notion de méridien qui sera utilisée ensuite. Cette hypothèse rend bien compte de ce qu'avait remarqué Ératosthène, à savoir : une ombre à Alexandrie mais aucune ombre à Syène. Sur le schéma ci-dessous, on se rend compte que cela serait impossible avec une Terre plate et le Soleil aussi éloigné qu'en réalité...



Cette partie a été la préférée des élèves sur ce thème. Pendant la Révolution française et pour uniformiser

¹ <http://physique.ostralo.net/eratosthene/>

les unités de longueurs (pieds, toises...), des scientifiques comme Delambre et Méchain ont entrepris une mesure de distance entre Dunkerque et Barcelone (situées sur le méridien de Paris) ce qui a permis de définir le mètre. La méthode utilisée est la triangulation de proche en proche : après une brève explication du principe de la mesure (cercle répétiteur) les élèves ont pu utiliser la loi des sinus dans quelques cas simples. Pas de problème particulier si ce n'est de bien vérifier que la calculatrice est en mode « degré ».

La Terre étant sphérique, il faut savoir se repérer à sa surface. Les élèves connaissant déjà les notions de latitude, de longitude, de méridien et de parallèle, le but de cette partie est de réfléchir au plus court chemin possible entre deux points du globe avec deux nouvelles notions : la route loxodromique (route à cap constant, en ligne droite sur une carte en projection de Mercator) et la route orthodromique (suivant l'arc de grand cercle reliant les deux points). Sur l'exemple du trajet Paris - New York en avion et grâce à une animation² sur internet permettant de visualiser en même temps le trajet sur le globe et sa projection sur une carte (projection de Mercator), les élèves se représentent mieux ces deux notions même si elles demeurent difficiles pour eux.

La dernière partie de ce thème concernait la confrontation de deux représentations qui ont fait longtemps débat (jusqu'au milieu du 16^e siècle) : le géocentrisme et l'héliocentrisme. À l'aide du logiciel libre Stellarium, les élèves ont pu visualiser trois observations historiques qui ont conforté l'idée d'héliocentrisme. Les principaux satellites de Jupiter et les phases de Vénus observés par Galilée à l'aide de sa lunette, et la rétrogradation de Mars observée de tout temps mais que l'on a eu du mal à expliquer (épicycles de Ptolémée).

La Terre tourne autour du Soleil et la Lune autour de la Terre. Nous observons la Lune et son aspect vu depuis la Terre (ses phases) : cela a déjà été vu par la plupart des élèves au collège. Nous pouvons ainsi essayer d'expliquer les phénomènes spectaculaires que sont les éclipses de Lune et de Soleil. Les discussions et les présentations faites lors de l'École d'été d'astronomie du CLEA de 2019 m'ont été très utiles dans cette partie.

Contrôle sur ce thème et erreurs les plus fréquentes

Les élèves (105 au total) ont eu un contrôle sur le thème astronomie comportant cinq exercices, chacun correspondant à une partie du thème. L'utilisation des relations a été plutôt bien réussie puisque les

² https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/RefTerre/Orthodromie1.php

questions différaient peu de ce qui avait été vu en cours ou en TP.

Le dernier exercice proposait de répondre aux deux questions suivantes :

1) *Quelles sont les trois observations historiques qui ont remis en question le modèle géocentrique ?*

2) *Expliquer pourquoi la Lune présente toujours la même face et pourquoi il n'y a pas d'éclipse de Soleil ou de Lune chaque mois.*

Les réponses à ces questions sont les plus intéressantes puisqu'elles mettent en évidence des confusions sur certaines représentations, concepts ou mots.

Voici les principales erreurs rencontrées.

Pour la question 1 :

- confusion entre les preuves que la Terre n'est pas plate et les preuves que la Terre tourne autour du Soleil ;
- confusion entre théorie et observation (ex : la gravité comme une observation) ;
- le pendule de Foucault en faveur du modèle géocentrique ;
- les phases de la Lune pour expliquer l'héliocentrisme.

Pour la question 2 :

- phase et face de la Lune : confusion de vocabulaire ;
- phases de la Lune : ils ne savent pas dans quel sens la Lune est croissante et ils ne connaissent pas la règle du « p » et du « d » ;
- confusion entre partie éclairée de la Lune et partie visible depuis la Terre ;
- la Lune présente la même face car elle ne tourne pas sur elle-même ;
- il y a une face cachée car la Lune tourne autour de la Terre mais pas du Soleil ;
- c'est parce qu'il y a une face cachée de la Lune qu'il n'y a pas toujours l'alignement requis pour les éclipses ;
- l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (obliquité) explique la fréquence des éclipses.

Conclusion

Malgré le peu de temps (trois mois) pour traiter ce thème, il a plutôt bien été reçu par les élèves : surtout la méthode d'Ératosthène. Ils ont également été intéressés par les notions de loxodromie et d'orthodromie mais cela reste difficile pour eux. Il y a une impression de déjà vu pour la Lune. L'an prochain, j'insisterai davantage sur l'utilisation d'un modèle de Terre plate dans la méthode d'Ératosthène et leur suggérerai, pour être plus efficace, quelques expériences simples à faire chez eux pour l'aspect pratique (avec une lampe torche, une carte, un globe terrestre par exemple). ■

D'Aristarque à Ératosthène

Pierre Causeret, Esbarres

La méthode d'Ératosthène pour mesurer la Terre est au programme de l'enseignement scientifique de 1^{re}. Mais, pour réaliser cette mesure, Ératosthène a dû s'appuyer sur des hypothèses de départ, qu'il est intéressant de pouvoir justifier, grâce en particulier aux travaux d'Aristarque.

Dans tous les documents expliquant comment Ératosthène a mesuré la longueur d'un méridien, on lit à un moment une phrase du genre : Ératosthène s'appuie « sur le modèle d'une Terre sphérique située à distance infinie du soleil » (ressources Éduscol) ou encore « on fait l'hypothèse que les rayons du soleil sont parallèles entre eux ». Cette hypothèse est-elle raisonnable ? C'est la question qui va nous intéresser ici.

Aristarque de Samos

Aristarque de Samos est un astronome et mathématicien grec du 3^e siècle avant notre ère. Il est connu pour avoir, d'après Archimède, proposé un système héliocentrique. Le seul ouvrage qui nous soit parvenu de lui s'intitule *Sur les grandeurs et les distances du Soleil et de la Lune*. L'ouvrage a été traduit et est disponible en français¹.

En 29 propositions, il explique comment calculer le rapport du diamètre du Soleil à celui de la Terre, le rapport du diamètre de la Lune à la distance Terre-Lune... Voici les hypothèses utilisées par Aristarque (nous reviendrons plus loin sur quelques-unes d'entre elles) :

Les hypothèses d'Aristarque

1. La Lune reçoit sa lumière du Soleil.
2. La Terre peut être considérée comme un point et comme le centre de l'orbite de la Lune.
3. Lorsque la Lune nous paraît dikhotome (coupée en deux portions égales), elle offre à nos regards son grand cercle, qui détermine la partie éclairée et la partie obscure de cet astre.
4. Lorsque la Lune nous paraît dikhotome, sa distance au Soleil est moindre du quart de la circonférence, de la trentième partie de ce quart.
5. La largeur de l'ombre est de deux lunes.
6. L'arc soutendu dans le ciel par la Lune est la quinzième partie d'un signe.

Et voici les propositions qu'il démontre, relatives aux diamètres et aux distances, telles qu'il les énonce :

Les propositions d'Aristarque

Proposition VIII

La distance à laquelle le Soleil se trouve de la Terre est plus grande de 18 fois, mais moindre de 20 fois que celle à laquelle la Lune se trouve de la Terre.

Proposition X

Le diamètre du Soleil est plus de 18 fois et moins de 20 fois plus grand que celui de la Lune.

Proposition XII

Le diamètre de la Lune contient moins de $\frac{2}{45}$ parties de la distance du centre de la Lune à notre œil et il est plus grand que la trentième partie de cette distance.

Proposition XVI

Le diamètre du Soleil est au diamètre de la Terre en plus grande proportion que 19 à 3 et en moindre que 43 à 6.

Proposition XVIII

Le diamètre de la Terre est au diamètre de la Lune en plus grand rapport que celui de 108 à 43, moindre que celui de 60 à 19.

Ces résultats permettent de calculer le diamètre et la distance de la Lune et du Soleil en fonction du diamètre de la Terre D_T . Les résultats sont donnés en nombres décimaux arrondis avec deux chiffres significatifs (on a ajouté entre crochets la valeur correcte actuelle) :

- avec la proposition XVI, le diamètre du Soleil est compris entre 6,3 et 7,2 D_T [pour 110] ;
- avec la proposition XVIII, le diamètre de la Lune est compris entre 0,32 et 0,4 D_T [pour 0,27] ;
- avec la proposition XII, la distance de la Lune est comprise entre 9 et 9,5 D_T [pour 30] ;
- avec la proposition VIII, la distance du Soleil est comprise entre 160 et 190 D_T [pour 12 000].

Pour la Lune, on obtient un ordre de grandeur correct alors qu'ils sont très sous-estimés pour le Soleil.

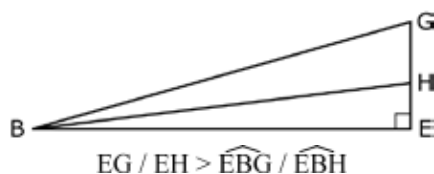
¹ Le texte complet dans la traduction de Fortia d'Urban est disponible sur Gallica.

À l'origine de ces valeurs peu précises, il y a trois mesures erronées :

- la mesure de l'angle Soleil Terre Lune au premier quartier (hypothèse 4, voir l'activité qui suit) ;
- le diamètre apparent de la Lune estimé à 2° au lieu de $0,5^\circ$ (c'est l'hypothèse 6, un signe, c'est un douzième de 360° donc 30° , la quinzième partie d'un signe, c'est 2°) ;
- la mesure de l'ombre de la Terre pendant les éclipses de Lune (hypothèse 5) estimée à deux fois le diamètre de la Lune au lieu de 2,6.

Mais tous les raisonnements sont corrects.

Les calculs d'Aristarque sont, pour la plupart, assez complexes. Il n'utilise pas la trigonométrie, encore inconnue à l'époque. Il se sert beaucoup de cette propriété :

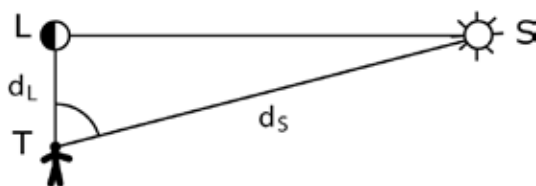
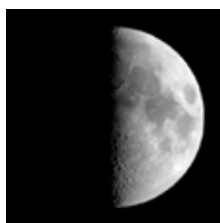


Mais la proposition VIII est accessible et mérite qu'on s'y arrête. Les calculs peuvent être adaptés pour les lycéens.

Une activité pour les élèves

Comparaison des distances de la Lune et du Soleil

Lorsque la Lune est au premier quartier (photo de droite), on voit exactement la moitié de la Lune éclairée. Cela signifie que l'angle $\widehat{TLS}$ (figure ci-dessous) est droit.



La Lune en premier quartier est visible l'après-midi et en première partie de nuit. L'après-midi, on peut donc mesurer l'angle que fait la direction de la Lune avec la direction du Soleil, l'angle $\widehat{LTS}$ de la figure.

a. Aristarque avait trouvé 87° pour l'angle $\widehat{LTS}$. Pour trouver combien de fois le Soleil est plus éloigné que la Lune, calculer le rapport TS/TL .

b. En réalité, cet angle est beaucoup plus proche de l'angle droit, il est compris entre $89,8^\circ$ et $89,9^\circ$. Que

peut-on dire de la distance du Soleil d_s , comparée à la distance de la Lune d_L ?

Le calcul d'Aristarque

L'angle $\widehat{LTS}$ est difficile à mesurer. Aristarque avait trouvé 87° . Ce qu'il exprimait ainsi :

« Lorsque la Lune nous paraît dikhotome, sa distance au Soleil est moindre du quart de la circonférence, de la trentième partie de ce quart ».

Dikhotome signifie coupée en deux donc au premier ou au dernier quartier.

La distance au Soleil est ici l'angle entre la direction de la Lune et la direction du Soleil.

Le quart de la circonférence, c'est $360^\circ/4$ soit 90° .

La trentième partie de ce quart, c'est $90^\circ/30 = 3^\circ$.

L'angle donné est donc égal à $90^\circ - 3^\circ$ soit 87° .

Avec cette valeur et sans trigonométrie, Aristarque arrivait à cette conclusion :

« La distance à laquelle le Soleil se trouve de la Terre est plus grande de 18 fois, mais moindre de 20 fois que celle à laquelle la Lune se trouve de la Terre. »

Dire que le Soleil est 18 à 20 fois plus loin que la Lune, c'est beaucoup trop peu, mais Aristarque montrait néanmoins que le Soleil était beaucoup plus éloigné que la Lune.

Solutions

a. $\cos \widehat{LTS} = TL/TS$ donc $TS/TL = 1/\cos \widehat{LTS}$. Pour 87° , on obtient 19 environ. Le Soleil est donc 19 fois plus loin que la Lune.

b. Avec $89,8^\circ$, on obtient 286 pour TS/TL . Pour $89,9^\circ$, on trouve 573. On peut donc conclure que le Soleil est 286 à 573 fois plus éloigné de nous que la Lune.

Avec d'autres méthodes, on montre que le Soleil est environ 400 fois plus éloigné de nous que la Lune. Ce qui donne $89,853^\circ$ pour l'angle $\widehat{LTS}$ à l'instant du premier quartier.

Discussion sur la méthode

En une heure, la Lune se déplace de $0,5^\circ$ par rapport à la direction du Soleil. Pour obtenir une précision du dixième de degré, il faudrait connaître l'heure d'un premier ou d'un dernier quartier à 10 minutes près, ce qui n'est pas possible uniquement par l'observation de la forme de la Lune. La méthode d'Aristarque est très astucieuse, mais on ne peut pas en attendre une grande précision. Par contre, elle montre que le Soleil est beaucoup plus loin que la Lune. Ce résultat est un premier pas pour justifier le parallélisme des rayons du Soleil dans l'expérience d'Ératosthène.

La distance du Soleil pour Aristarque

La suite des calculs d'Aristarque pour arriver à la distance du Soleil est souvent ardue. Il utilise deux données supplémentaires, le diamètre apparent de la Lune (il donne 2° au lieu de $0,5^\circ$) et le diamètre de l'ombre de la Terre à la distance de la Lune, qui provient de l'observation des éclipses de Lune (il donne 2 diamètres lunaires pour l'ombre de la Terre au lieu de 2,6). Les lecteurs qui le désirent trouveront plus de détails dans les compléments en ligne sur le site du CLEA.

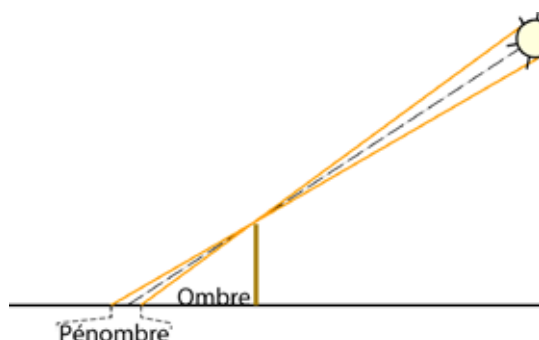
Il ne donne pas directement la distance du Soleil d_s en fonction du diamètre de la Terre D_T mais ses résultats conduisent à : $160 D_T < d_s < 190 D_T$.

Il est possible qu'Ératosthène ait eu connaissance de ce résultat. Aristarque est décédé aux alentours de 230 avant notre ère et c'est à peu près à cette période que l'on pense qu'Ératosthène a fait ses calculs. Quoi qu'il en soit, on peut justifier le grand éloignement du Soleil avec des méthodes accessibles il y a plus de 2 000 ans.

Les rayons du Soleil sont-ils parallèles ?

Deux problèmes se posent pour répondre à cette question : le Soleil n'est pas une source ponctuelle et il n'est pas situé à l'infini.

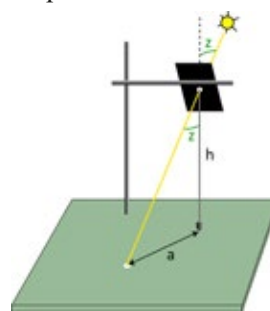
Le diamètre apparent du Soleil est d'environ $0,5^\circ$. Pour cette raison, l'ombre d'un objet ne peut pas être nette, il y a une zone de pénombre. Dans le calcul de l'angle entre les rayons du Soleil et un bâton vertical, on peut faire une erreur de $0,25^\circ$ si on prend le bord de la pénombre plutôt que le « centre ».



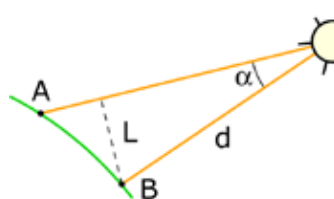
Si, comme Ératosthène, on mesure un angle de $7,2^\circ$, l'imprécision de $0,5^\circ$ (pour deux mesures, dans chacune des villes) amène une erreur possible de 7 %, ce qui permet néanmoins d'avoir un bon ordre de grandeur.

Si par contre, vous refaites l'expérience avec deux villes plus proches, il faut réduire au maximum l'imprécision sur la mesure de l'angle. Pour cela,

il ne faut pas utiliser l'ombre d'un bâton, mais une installation donnant une tache lumineuse dont on peut déterminer assez facilement le centre comme celle de la figure qui suit.



Deuxième problème, le Soleil n'étant pas à l'infini, quelle erreur fait-on en considérant les rayons du Soleil parallèles ?



L'erreur de parallélisme, l'angle α de la figure, peut être estimé pour les mesures de l'époque : en considérant comme Aristarque le Soleil à environ 175 fois le diamètre de la Terre, en prenant comme Ératosthène pour la distance AB, $1/50$ de la circonférence de la Terre (soit environ $1/16$ de son diamètre) et vu que L est inférieur à AB, on arrive à un angle a inférieur à $0,02^\circ$:

$$a = \text{asin}(L/D) < \text{asin}((1/16)/175).$$

Avec la distance connue actuellement du Soleil et même pour des villes très éloignées, c'est encore plus faible. On peut donc considérer les rayons du Soleil parallèles sans faire de grosse erreur.

Conclusion

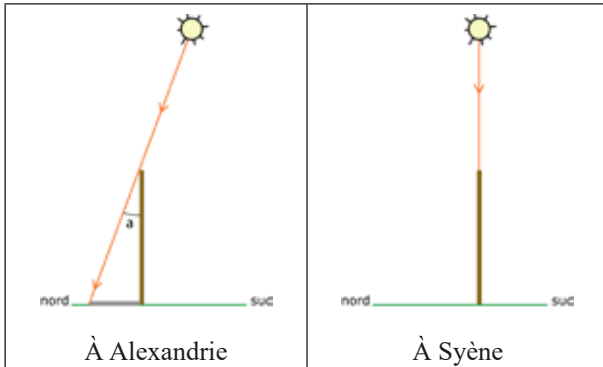
Ératosthène s'appuie dans sa méthode sur deux hypothèses principales : la Terre est sphérique et les rayons du Soleil arrivent sur Terre parallèles. Il serait dommage de ne pas justifier auprès des élèves ces deux hypothèses. La première peut l'être avec les arguments d'Aristote sur la forme de l'ombre de la Terre pendant les éclipses de Lune et sur les nouvelles étoiles qui apparaissent quand on se dirige vers le sud².

La deuxième hypothèse d'Ératosthène peut être en partie justifiée à partir de la proposition VIII d'Aristarque détaillée page précédente. Ce serait dommage de s'en priver. ■

² Le hors-série n° 13 qui sortira à l'automne 2020 reviendra longuement sur ces preuves.

La méthode d'Ératosthène

Rappelons brièvement de quoi il s'agit, même si nous en avons parlé à diverses reprises dans cette revue. Ératosthène, un astronome grec du 3^e siècle avant notre ère, avait appris que le Soleil était à la verticale de Syène à midi le jour du solstice d'été, alors qu'au même moment à Alexandrie, les rayons du Soleil faisaient un angle de $1/50$ tour avec la verticale. Ce que l'on peut illustrer par cette figure :

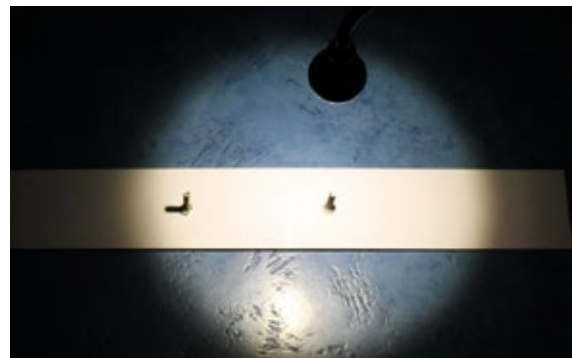


On représente souvent la verticalité des rayons lumineux à Syène par un puits éclairé jusqu'au fond (comme sur la dernière figure de la page).

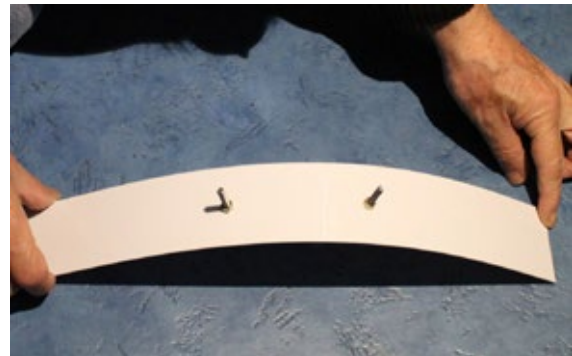
Cléomède, un des rapporteurs de la méthode d'Ératosthène, ne parle pas de puits mais de scaphé, un cadran solaire hémisphérique : à Syène, écrit-il, « les gnomons des cadrans solaires concaves sont nécessairement sans ombres ». Mais on trouve le puits dans d'autres écrits comme ceux de Strabon³.

Dans le texte de Cléomède, on peut lire également qu'à Alexandrie, « l'arc du cadran est la cinquantième partie de son propre cercle ». L'angle peut être donné en tour ($1/50$ tour) ou en degrés ($7,2^\circ$).

Cette expérience ne montre pas que la Terre est ronde comme on le lit parfois. Un Soleil proche et une Terre plate donnent le même résultat. Pour s'en convaincre, on peut fixer deux gnomons sur une bande de carton ou de plastique et les éclairer par une lampe. Si la lampe est proche, il est possible de n'avoir aucune ombre sur un gnomon et une ombre assez longue sur l'autre. Si la lampe est éloignée, il faut courber la bande de carton pour obtenir un gnomon sans ombre et l'autre avec une ombre suffisamment longue.



Avec un sol plat, la source lumineuse doit être proche pour obtenir les ombres attendues.



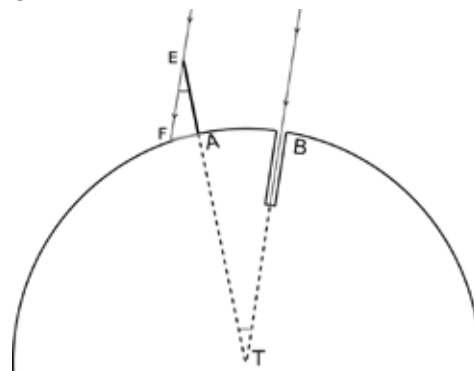
Si on éloigne la source lumineuse, il faut courber le sol pour avoir les mêmes ombres.

Une dernière précision, il est important que les deux villes soient sur le même méridien (ce n'est pas tout à fait vrai en réalité pour Syène et Alexandrie) afin qu'il y soit midi en même temps.

Pour terminer, voici comment calculer le rayon de la Terre

Les données :

- Alexandrie (A) et Syène (B) sont distants de 5 000 stades soit environ 800 de nos kilomètres ;
- l'angle $\widehat{AEF}$ mesure $1/50$ tour.



Les angles $\widehat{ATB}$ et $\widehat{AEF}$ sont alternes internes donc $\widehat{ATB}$ mesure aussi $1/50$ tour. L'arc $\widehat{AB}$ mesure 800 km donc la circonférence complète vaut :

$$800 \times 50 = 40\,000 \text{ km.}$$

$$\text{Rayon de la Terre} = 40\,000 / (2\pi) \approx 6\,400 \text{ km.}$$

³ On pourra se reporter à une étude fort intéressante de Nicolas Décamp et Cécile de Hosson sur la méthode d'Ératosthène dans le bulletin n° 937 de l'UdPPC (<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01663442>)

AVEC NOS ÉLÈVES

Ateliers sur la triangulation en intérieur ou en extérieur

Véronique Hauguel

Au cours des écoles d'été du CLEA, plusieurs ateliers ont été proposés aux stagiaires pour comprendre comment, à partir de triangles, on peut trouver de longues distances pour établir des plans et même pour trouver le périmètre de la Terre. Un atelier ludique accessible aux élèves de collège se fait dans une salle de cours. Un autre atelier demande un peu de préparation et un grand terrain. Il est réalisable avec des élèves de lycée et utilise les formules de trigonométrie dans le triangle et un tableau.

Atelier en intérieur

(niveau collège)

Matériel :

- feuilles avec l'instrument de visée à découper ;
- drapeaux avec pique à brochettes et papier ;
- règle graduée, rapporteur, crayon et gomme ;
- une barre de 2 mètres¹.

Éventuellement :

- une feuille avec le schéma et le tableau à remplir.

L'abbé Picard a proposé à son équipe de mesurer avec soin et méthode la distance entre deux points X et Y, supposés inaccessibles, de la salle de classe par triangulation. On peut représenter, par exemple, les points X et Y par deux traits verticaux tracés sur deux murs opposés de la classe.

L'équipe a une barre mesurant 2 mètres, une petite dizaine de drapeaux, plusieurs instruments de mesure pour les visées, et chaque membre de l'équipe a du matériel pour dessiner et écrire dont un rapporteur et une règle graduée.

Étape de réflexion

Si on prend le temps, la classe peut élaborer le principe de triangulation en étant bien guidé. Ce principe n'est apparu qu'au début du XVI^e siècle et il n'est pas élémentaire à mettre en place même s'il est simple à utiliser.

À partir de cette réflexion, l'équipe place 6 tables avec sur chacune un instrument de visée avec au centre un « drapeau » et une étiquette de A à F pour identifier chacune. Elle dessine un schéma succinct du plan de la classe avec les points A, B, C, D, E, X et Y.

¹ L'abbé Picard ne connaissait pas le mètre mais c'est une autre histoire !

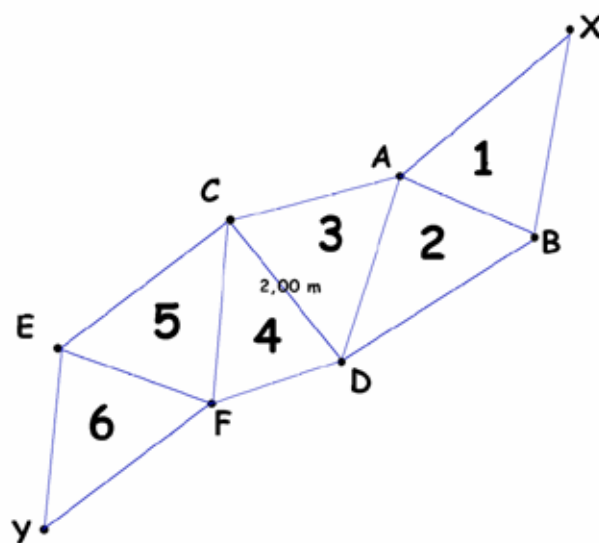


Fig.1. Plan succinct pour représenter les points choisis ainsi que les numéros des triangles formés.

Pour se repérer, les triangles sont numérotés comme le schéma ci-dessus. Sur ce schéma, on a choisi que la distance entre C et D soit 2 mètres.

Étape de mesures

Le but de l'atelier est de trouver la distance entre les points X et Y à partir de mesures d'angle dans les triangles de 1 à 6, sachant que CD mesure 2 mètres.

Les prérequis des élèves sont :

- La somme des angles d'un triangle est égale à 180° ;
- La connaissance de l'échelle d'une carte avec le choix de cette échelle.

En fonction du niveau de la classe, de la motivation et du temps imparti, l'enseignant juge de chaque étape.

Un tableau avec les triangles et les angles peut être proposé ou élaboré.

Triangle 1	Triangle 2	Triangle 3
A =	A =	A =
B =	B =	C =
	D =	D =
	Total =	Total =

Triangle 4	Triangle 5	Triangle 6
C =	C =	E =
D =	E =	F =
F =	F =	
Total =	Total =	

Fig.2. Tableau de résultats.

Sur le terrain, l'équipe de l'abbé Picard mesurait les trois angles, la mesure du troisième angle étant la preuve de la validité des mesures.

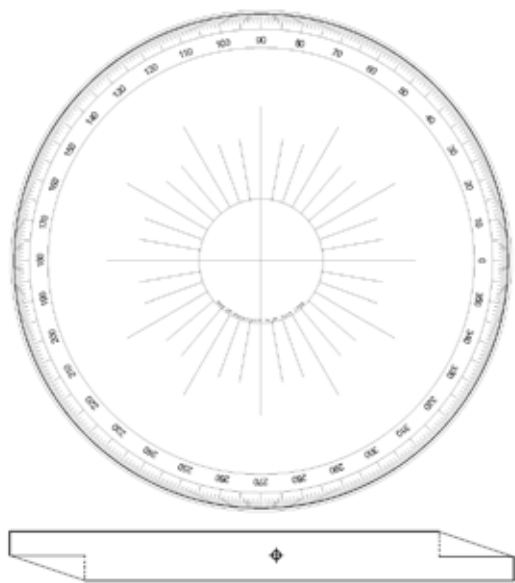


Fig.3. Instrument de mesure pour les visées.

L'équipe peut être divisée pour les mesures d'angle. Chaque visée s'effectue en alignant l'œil, l'alidade avec index relevé de l'instrument, réglé au départ sur 0°, avec 2 drapeaux².



Fig.4. Visée par une stagiaire de l'EEA à Gap.

² Voir aussi http://clea-astro.eu/lunap/Triangulation/index_.html pour des améliorations avec l'expérience !

Il faut privilégier le soin et la précision en faisant attention de ne pas bouger le matériel de visée (il est conseillé de faire un repère sur la table) !

Étape de dessin géométrique

Une fois toutes les mesures prises et la vérification de la somme des angles dans chaque triangle (si on est trop loin de 180°...il faut recommencer !), on réfléchit sur l'échelle à prendre pour le dessin final et sur la stratégie à avoir pour tracer les 6 triangles. Puis chacun trace à l'échelle la suite des triangles sur sa feuille.

Étape finale, la mesure de XY

On compare les résultats des élèves sur la distance XY, en centimètres, sur le plan. Puis on calcule la distance XY dans la salle, en mètres.

Pour terminer, avec un décamètre, on mesure la distance XY dans la salle et... on se félicite ou on recommence !

Pour finir en beauté

Pour terminer l'atelier, on essaie d'imaginer comment s'y prenait les scientifiques pour effectuer leur mesure sur le terrain et toutes les embûches qu'ils pouvaient rencontrer. On peut aussi parler de l'abbé Picard faisant ses mesures dans l'équipe de Cassini et pour quel objectif (aventure de la cartographie de la France). Cet objectif a évolué tout au long du siècle suivant, comme par exemple, la forme de la Terre qui a initié les expéditions de Bouguer et La Condamine au Pérou ou de Maupertuis et Celsius en Laponie.



Fig.5. Mesure de la base en toise.
Expédition de Maupertuis.

Une autre expédition toute aussi remarquable est celle de Delambre et Méchain sous la Révolution française.

De quoi donner une âme d'aventurier et de scientifique, loin du confinement, à tous les élèves !

Atelier en extérieur

(niveau lycée)

L'école d'été du CLEA se passe au Col Bayard au milieu d'un golf remarquable, lieu rêvé pour mettre en place une simulation à petite échelle d'une portion de la triangulation que l'abbé Picard³ (1620-1682) a effectué dans le but de mesurer le degré de méridien, celle de Mareuil à Malvoisine.

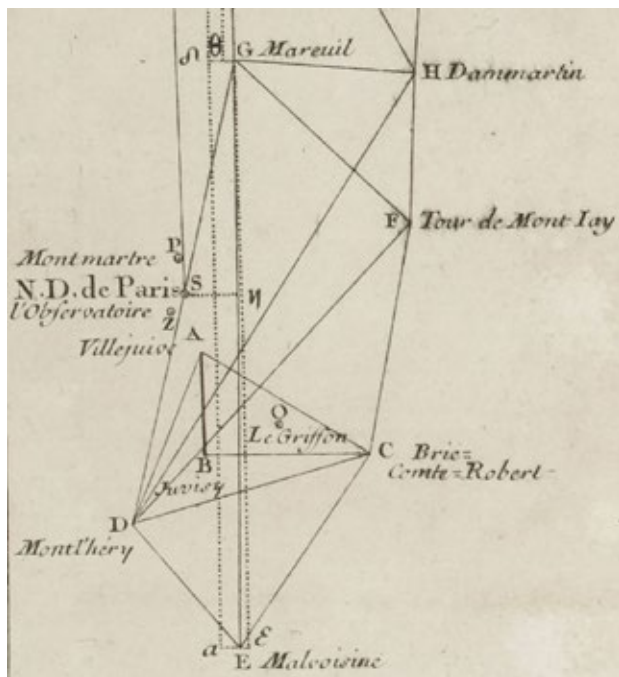


Fig.6. Plan de la triangulation de l'abbé Picard entre Mareuil et Malvoisine. BnF.

Notre principal obstacle étaient les balles de golf qui pouvaient rappeler les conditions de triangulation de Delambre et Méchain pendant la Révolution française !

Nous avons essayé de reprendre les moyens de l'époque mais nous avons fait une entorse sur l'instrument utilisé pour obtenir la différence de latitude entre les deux points extrêmes. C'est le GPS qui a donné cette différence minime car notre terrain fait environ 300 m de longueur dans la direction nord-sud.

Organisation et objectif

L'expérience peut être réalisée si votre lycée est dans un parc, sinon proche d'un terrain vague ou d'un terrain de sport. En plus du terrain, un peu d'imagination sera nécessaire pour remplacer les

³ En 1668-1669, l'abbé Jean Picard, astronome français, est chargé par l'Académie de la mesure de l'arc de méridien entre Paris et Amiens. Par triangulation, il obtient 111,1 km pour 1° de latitude, soit, en estimant la terre sphérique, un rayon terrestre de 6 372 km (le rayon moyen actuellement mesuré est de 6 371 km).

tours, les églises ou autres bâtiments comportant des étages surélevés.

La triangulation de Picard revient à prendre 7 points, A, B, C, D, E, F et G, pour les 7 stations. Le but étant de trouver la distance GE des deux stations les plus distantes, dans la direction nord-sud. Ces deux stations sont telles que de l'une, on ne puisse pas voir l'autre.

Une reconnaissance du lieu est nécessaire avant de lancer le relèvement des mesures sur le terrain pour trouver des repères visibles de loin ou en inventer. Ces repères seront les stations. En profitant de quelques arbres, d'un petit pont, de poteaux d'enclos de terrain de tennis, nous avons trouvé 6 stations (on en a donc superposé 2) comme le montre la figure 2.

Matériel

- Pour mesurer la base, des bâtons en bois ou en bambous d'une distance donnée ont remplacé la toise⁴ du Châtelet.
- Pour mesurer les angles sur le terrain, Daniel Bardin a fabriqué des « angulomètres » (mot inventé par son constructeur) et même un cercle de Bardin, inspiré du cercle de Borda utilisé par Delambre et Méchain. Picard utilisait un quart de cercle.

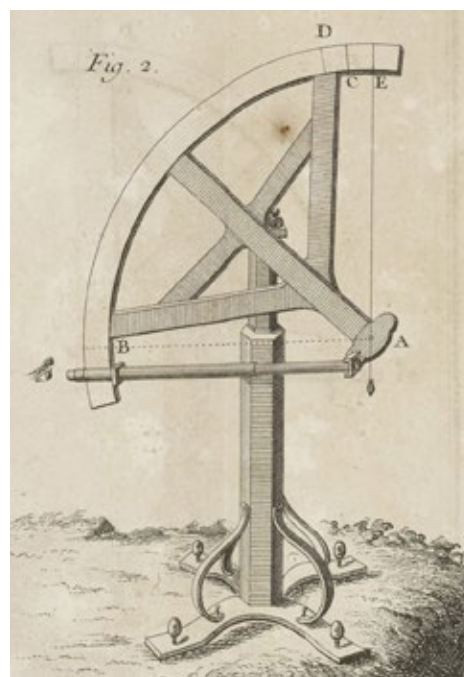


Fig.7. Le quart de cercle de Jean-Picard avec lunette, BnF.

Plus simplement des demi-cercles gradués fixés sur des pieds de fortune avec un tube de PVC qui pivote autour du centre ont été fabriqués (simple, rapide à fabriquer et pas cher).

⁴ Picard prend pour mesurer la base de la méridienne, une toise identique à la toise-étalon du Châtelet (1,949 m).

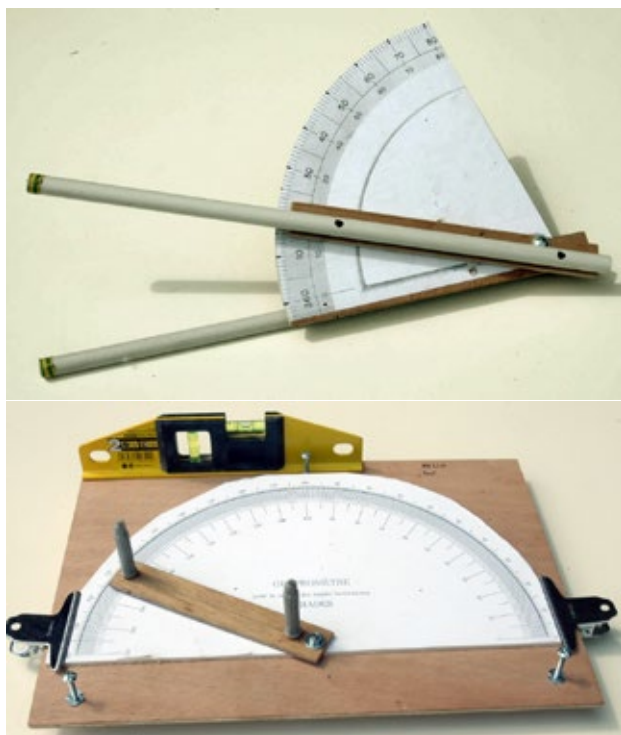


Fig.8. Exemples d'instruments⁵ utilisés à fixer sur un pied (pied photo par exemple).

Des maquettes d'instruments anciens ont fait l'attraction des golfeurs venus en curieux : arbalestrille et sextant basique en plastique.

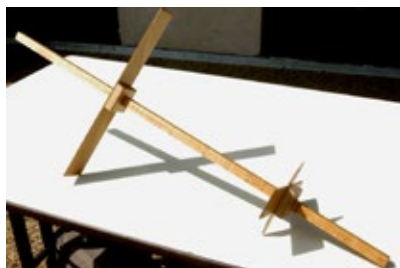


Fig.9. Arbalestrille graduée en angle avec plusieurs marteaux selon que l'angle est petit ou grand.

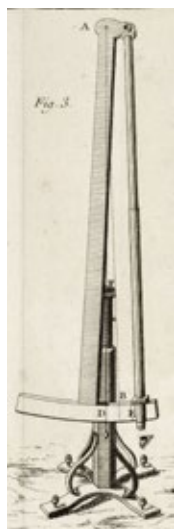


Fig.10. Instrument de visée des astres de Jean-Picard, BnF.

- Pour mesurer les latitudes, le GPS est venu à notre secours là où Picard utilisait un secteur astronomique pour mesurer des distances zénithales d'étoiles...

Les difficultés rencontrées

- Problème du relief : si le terrain est grand, vallonné avec des arbres, pour savoir si une station est vue d'une autre, il faut y aller voir.
- Problème de la disposition des stations : les triangles doivent être le plus proche possible du

⁵ Il est préférable de prendre un demi-cercle gradué.

triangle équilatéral pour limiter l'erreur et la répartir également pour obtenir 180° (on n'a pas toujours pu respecter ce conseil !).

Le principe

Ce qu'il faut savoir :

- la somme des angles dans un triangle est égale à 180° . Pratiquement, on prend la mesure des 3 angles, le troisième servant à vérifier la validité des angles obtenus;
- un triangle est entièrement déterminé si on connaît 2 angles et un côté⁶.

La prise des mesures sur le terrain



Fig.11. Une équipe de stagiaires à l'œuvre.

1. Déterminer une base qui sera un côté d'un des triangles. Picard a pris une base de 5 663 toises du Châtelet, soit 11,037 km.

BASE	en m
23 perches de 2 m et 90 cm	46,90

Notre base sur le terrain était de 47 m environ (mesure prise avec une « toise » faite de bois ou de bambous selon les années).

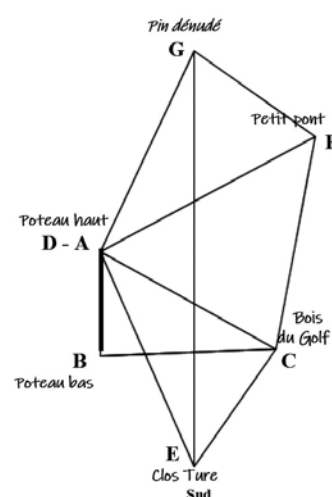


Fig.12. Plan de la triangulation à l'EEA au Col Bayard à Gap

2. Se placer au sommet A du triangle ABC pour prendre l'angle $\widehat{BAC}$, puis se placer au sommet B pour prendre l'angle $\widehat{ABC}$ puis se placer au sommet C pour prendre l'angle $\widehat{BCA}$.

Pour chaque triangle on peut ainsi remplir le petit tableau ci-dessous et vérifier que la somme est proche (!) de 180° sinon, il faut recommencer !

⁶ Deux triangles qui ont leurs trois angles égaux sont seulement semblables.

A compléter		Triangle			
		ABC	ECA	CAF	AFG
Angle	A				
	B		X	X	X
	C				X
	D	X	X	X	X
	E	X		X	X
	F	X	X		
	G	X	X	X	
Somme					

Ce tableau permet de faire toutes les visées nécessaires d'un même point...

3. Connaissant le côté AB et les angles dans le triangle ABC , on peut en déduire les autres côtés avec la formule des sinus :

$$\frac{\sin \hat{A}}{a} = \frac{\sin \hat{B}}{b} = \frac{\sin \hat{C}}{c}$$

Ce procédé est répété pour les autres triangles ici ECA , CAF et AFG .

4. Pour terminer, on prend le triangle AEG dont on connaît les côtés AE (dans le triangle ECA) et AG (dans le triangle AFG).

L'angle A est obtenu en faisant la somme des angles A des triangles ECA , CAF et AFG .

On obtient EG avec la formule d'al Kashi ou loi des cosinus :

$$a^2 = b^2 + c^2 - bc \cos \hat{A}$$

Les calculs

On se sert d'un tableur pour faire les différents calculs.

Calcul 1 : la base

BASE	en m
23 perches de 2 m et 90 cm	46,90

Calcul 2 : mesures des côtés des triangles

On rentre sur le tableur, les angles du premier triangle et la base.

n°	triangle	angle	degré	'	angle	sin	côté	ABC
1	ABC	C	26		26	0,44	AB	46,90
		A	86		86	1,00	BC	106,73
		B	68		68	0,93	AC	99,20
					180			

Puis on rentre les données des autres triangles dans des tableaux similaires.

La colonne *sin* et la colonne *ABC* ont été programmés auparavant avec les formules.

Calcul 3 : mesure de la distance EG

On constitue un autre tableau avec :

- dans la colonne Angle A , la somme des angles A des triangles concernés ;
- dans la colonne « côté », les mesures de AE et de AG calculées dans le *calcul 2*, ci-dessus.

Angle A	cos A	côté	AGE
143,5	-0,80	AE	139,74
		AG	181,00
		GE	304,88

Calcul 4 : mesure de la différence de latitude

Les 2 latitudes sont prises aux stations G et E. Un autre tableau permet de calculer la différence de latitude en seconde d'arc :

Latitude	degré	'	"
G	44	37	18,3
E	44	37	8,58
		diff	9,72

Calcul 5 : mesure du périmètre⁷ de la Terre

Un dernier tableau en rappelant la différence de latitude entre G et E et la distance entre ces deux stations.

	"	en m	périmètre de la Terre en km
angle/dist.	9,72	304,88	
pour 1°	3600	112918,52	40650,67

Attention aux problèmes d'unité en secondes d'arc et degrés puis en m et km !

À préparer avant

- Reconnaissance du terrain et des stations.
- Conseil : pour les stations mettre sur des grands bouts de bois des gilets jaunes avec des lettres écrites en grand.
- Préparer la perche ou autre instrument de mesure de longueur pour mesurer la base.
- Préparer les instruments de mesure d'angle, les pieds pour les y fixer si nécessaire.
- Préparer la feuille de calcul du tableur avec les élèves, feuille prête à recevoir les données du terrain.

Conclusion

Avec peu de moyens et un investissement raisonnable, cet atelier ludique aborde un point de l'histoire des sciences remarquable, la trigonométrie et les triangles en mathématiques, les instruments de mesure en topographie, en astronomie. Il donne un bel exemple d'utilisation d'un tableur et des calculs qu'on peut y faire. Il met en évidence le lien qu'il y a entre l'expérience et la théorie, le problème de l'incertitude des mesures...

Bibliographie

Ouvrage de Jean Picard, BnF, Gallica, *Mesure de la Terre*

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b7300361b/>

Des documents supplémentaires seront sur le site du CLEA (CC 170 / sommaire).

⁷ Les mesures obtenues dans les différents ateliers ont toujours été supérieures à 40 000 km sans dépasser 45 600 km...

L'histoire du mètre

Sylvie Thiault

L'histoire du mètre est un thème abordé par les nouveaux programmes de l'enseignement scientifique de première générale. Comment s'est imposé la nécessité d'une unité étalon ? Comment les techniques et la science ont-elles mené à la définition actuelle du mètre ? Cet article reprend dans les grandes lignes une présentation faite dans un atelier des journées nationales de l'APMEP 2019 de Dijon.

De la nécessité d'une référence universelle

Les anciennes unités de longueur avaient le plus souvent un rapport avec le corps humain : pied, doigt, palme, coudée... Mais une même dénomination pouvait correspondre à des grandeurs différentes. Suivant le domaine d'activité, les unités étaient différentes : « perche » pour les arpenteurs, « aune » pour les tisserands...

L'Empire romain a institué le pied romain sur toute sa zone d'influence. L'Empire carolingien lui substitue le pied carolingien, avec une correspondance de 16 pieds romains pour 15 pieds carolingiens. Mais cette « universalité » cède devant le pied de Besançon, celui de Vienne ou de Lyon.

Le pied romain, comme le pied byzantin ou le pied carolingien, sont utilisés dans les constructions des édifices religieux.

Avec le système féodal du Moyen Âge, chaque seigneur fixe sa référence, ainsi que le clergé, les villes... Même s'il existe des tables de correspondance entre toutes ces unités, il fallait être habile en calcul. Avec une perche valant 16 pieds romains ou 10 coudées sachant qu'un pied carolingien vaut $\frac{2}{3}$ de coudée, vous aurez calculé que 15 pieds carolingiens valent 16 pieds romains... On utilise également la toise.

Toise vient de "tensa brachia" en latin qui veut dire « bras étendus ».

1 toise = 6 pieds,

1 pied = 12 pouces,

1 pouce = 12 lignes.

Autrement dit 1 toise = 864 lignes...

Mais quel est le pied de référence ? Et donc de quelle toise parle-t-on ?

Dès le Moyen Âge, un étalon de la toise de Paris est installé sur un pilier du Châtelet à Paris (figure 1). C'est une barre de fer terminée à chaque extrémité par deux saillies. L'écart entre les deux saillies mesure une toise. Au fil des siècles cette toise s'use, son support se déforme... En 1668, Colbert décide de la faire restaurer.

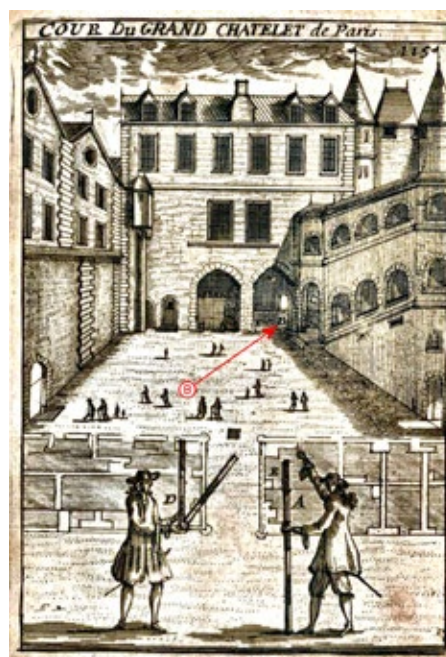


Fig.1. La toise du Châtelet.

Mais la nouvelle toise n'est pas conforme à l'ancienne. Malgré les protestations, Colbert l'impose comme nouvel étalon de mesure du Royaume de France. Plusieurs tentatives pour une uniformisation des unités de mesure ont été proposées par l'état central, mais il n'y a pas eu d'accord sur le choix d'une référence unique. Pourquoi le pied royal français s'imposerait-il sur les autres pieds ?

Exercice

Un pied de roi avant 1668 (pied ancien de roi) mesure 32,6592 cm. Combien mesure une ligne ?

Que mesure une toise en centimètres ?

Réponse : un pouce = 2,7216 cm ;

une ligne = 0,2263 cm ; une toise = 195,9552 cm.

La plupart des gens mesurait moins d'une toise. D'où l'expression « passer sous la toise ».

Exercice: Le pied de roi d'après 1668 mesure 32,4839 cm. De quel pourcentage le pied de roi a-t-il été rétréci en 1668 ?

Réponse : environ 0,5 %.

À la révolution, dans les cahiers de doléances, le tiers état ne veut plus « deux poids deux mesures » et réclame une mesure et un poids universels. Par exemple dans le cahier de Sénéchas (Gard), on lit :

«...37. N'avoir qu'un poids et qu'une mesure. On pourrait former les mesures de capacité et de distance sur le même plan ; par exemple, ne se servir dans les mesures de distance que des expressions de poste, mille, toise, pas, pied, ligne et point ; faire la toise de cinq pieds, le pas de deux pieds et demi ; »

ou dans celui de Luneray (Seine-Maritime) :

...Art. 9. Sur les poids, aunes et mesures...

«...Il serait bien à désirer qu'il n'y eût par tout le royaume qu'un même poids, qu'une même mesure et une même coutume... »

Il faut choisir une référence naturelle indépendante du lieu, du souverain, ou de tout autre pouvoir. Et acceptable par tous, ménageant les susceptibilités de chacun... Ce qui n'est pas une mince affaire !

Deux références naturelles : le pendule et le méridien terrestre

Le méridien terrestre, ou une fraction du méridien terrestre pourrait constituer cette référence universelle. Depuis l'Antiquité, on connaît la méthode pour évaluer le méridien terrestre. Deux mesures sont nécessaires : une mesure de longueur entre deux points d'un même méridien au sol et la mesure de l'angle correspondant, soit la différence de latitude.

Depuis l'Antiquité, les savants cherchent à mesurer la figure de la Terre.

Au III^e siècle avant notre ère, Ératosthène mesure que la distance entre Syène (Assouan) et Alexandrie vaut 5 000 stades. La mesure de l'ombre d'un obélisque à Alexandrie le jour du solstice d'été lui indique que l'arc de méridien entre les deux villes est de 1/50 de cercle, ce qui donne un méridien de 250 000 stades. Converti en mètres, suivant le stade pris comme référence, le méridien mesure entre 39 700 et 46 600 km. On a déjà l'ordre de grandeur !

D'autres mesures ont suivi. À Bagdad, sous l'impulsion du calife al-Ma'mūn, en suivant un méridien dans le désert syrien suivant un degré de latitude, al-Fargāni mesure une distance de 56 plus 2/3 en milles arabes. Avec un mille arabe de 1 995 m, on obtient 40 698 km. En 1527, Jean Fernel compte des tours de roues de charrette entre Paris et Amiens. Il fait des corrections « très empiriques » pour tenir compte des irrégularités du terrain. Il mesure une distance de 56 746 toises pour une toise de 1,95 m. Soit un méridien estimé à 39 835 km.

Il paraît difficile d'obtenir une mesure de précision à partir du méridien terrestre.

En 1581, Galilée (1564-1642) découvre que deux pendules de même longueur oscillent avec la même période. Il y a donc un lien entre longueur et durée. Dès 1670, les astronomes Picard, Huygens et Roemer suggèrent de prendre pour étalon de longueur, la longueur du pendule qui bat la seconde, la seconde étant définie comme une fraction du jour solaire moyen (1/86 400), jour de 24 heures. Tito Livio Burattini (1617-1681) nomme « metro cattolico » (in *Misura Universale*, 1675) la longueur du pendule battant la seconde.

Mais, lors de son expédition à Cayenne pour la mesure de la parallaxe de Mars, Richer constate que le pendule apporté de Paris oscille plus lentement à Cayenne : la longueur d'un pendule qui bat la seconde dépend donc du lieu où l'on se trouve. Il conforte ainsi l'intuition de Newton : la gravité n'est pas la même suivant la latitude à cause de l'aplatissement de la Terre aux pôles et de la force centrifuge. Sans parler de l'influence de la masse des montagnes qui sera mise en évidence ultérieurement. Exit donc le pendule ? Pas si sûr, comme nous le verrons plus loin.

Quelques innovations

En 1533 : Frisius (1508-1555) propose la méthode de triangulation.

En 1585, Simon Stévin (1548-1620), expose dans *la Disme* de ce qu'on appellerait maintenant le système décimal.

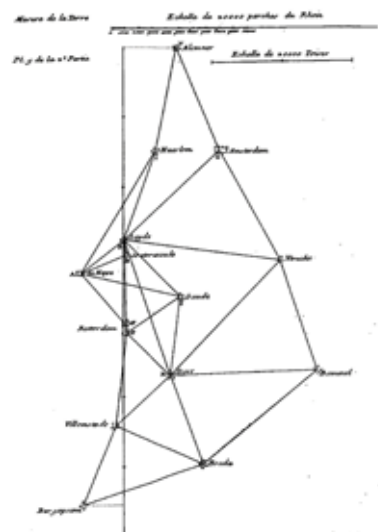


Fig.2. Triangulation principale de Snellius par Cassini.

En 1615 : Snellius (1581-1626), à qui l'on doit la notation avec virgule des nombres décimaux, applique la méthode de Frisius à une chaîne de

triangles entre deux villes des Pays-Bas distantes de 1° de latitude, Almaar et Berg op Zoom. D'après ses mesures, 1° correspond à 55 021 toises.

Mais la base de Snellius est trop courte : 168 toises. L'erreur relative est trop importante.

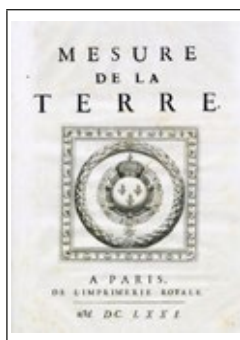
La méthode de triangulation pour une chaîne de triangles

Pour mesurer la distance entre deux lieux A et B d'un même méridien, on utilise une chaîne de triangles adjacents dont les sommets sont situés du part et d'autre du méridien. Et on procède à la triangulation de chacun d'eux, de proche en proche. On détermine la direction de chaque côté par rapport à la direction A-B et on projette les côtés des triangles sur cette direction. Il ne reste qu'à ajouter les mesures des projections pour avoir la longueur AB. Il faut éventuellement tenir compte de la rotondité de la Terre en ayant recours à la trigonométrie sphérique et faire les corrections liées aux « accidents » de terrain.

Enfin il faut également déterminer en degré l'arc de méridien mesuré, c'est à dire la différence de latitude entre les deux extrémités de l'arc de méridien. Pour cela, on relève la hauteur d'une même étoile en chaque lieu lors de son passage au méridien sud et on calcule ainsi la différence de latitude.

La Mesure de la Terre par Picard

Le chemin entre Villejuif et Juvisy, « pavé en ligne droite » constitue la base. Pour mesurer cette base, on utilise des perches en bois de 4 toises (7,8 m), étalonnées par rapport à la toise du Châtelet. La base mesure 5 663 toises à 1 pied près, soit un peu plus de 11 km. Les côtés des triangles mesurent le plus souvent entre 20 et 30 de nos kilomètres, et l'ensemble du maillage s'étend sur plus de 133 km du nord au sud. Picard tient compte des problèmes de réfraction, des différences de hauteur... et fait les corrections. Un arc de 1° du méridien mesure 57 060 toises (111,267 km), avec une incertitude qu'il estime à 60 toises (117 m). Il a disposé d'une grande amélioration technique : la lunette de visée avec réticule qui remplace les pinules.



Picard expose dans son ouvrage *Mesure de la Terre* (1671) l'inconvénient qu'il y a au manque d'unités de mesures universelles. Il suggère le recours à la longueur du pendule qui bat la seconde. Problème, nous l'avons vu, la longueur de ce pendule n'est pas la même suivant le lieu.

Mais au moins aurait-t-on une référence stable pour un lieu donné !

Les grandes expéditions géodésiques

Les grandes expéditions géodésiques du XVIII^e siècle sont organisées pour répondre à la controverse sur l'aplatissement de la Terre : d'après la théorie de Newton, la Terre est aplatie aux pôles. Les cartésiens soutiennent qu'elle est allongée selon l'axe des pôles en conséquence des mesures de méridien complétées après celle de Picard par Cassini. L'expédition vers les tropiques menée par Godin s'est embarquée en 1736 pour le Pérou avec Bouguer, Joseph de Jussieu et La Condamine, emportant avec eux la toise du Pérou. Maupertuis, La Caille, Camus, Clairaut et le Monnier sont partis en 1737 vers le cercle polaire arctique avec la toise du Nord (identique à la toise du Pérou). Dès 1738, l'expédition polaire rapporte la confirmation que la Terre est aplatie au pôle : 1° de méridien mesure 57 422 toises. Bouguer revenu le premier du Pérou en juin 1744 à Paris confirme lui aussi que la Terre est aplatie aux pôles et mesure 56 746 toises pour 1° de latitude. Quant à La Condamine de retour en Europe fin novembre 1744, ses calculs donnent 56 749 toises pour 1° de méridien. C'est la toise du Pérou qui servira alors d'étalon de longueur sous le nom de « toise de l'Académie ».



Fig.3. Maupertuis aplatisant la Terre.

La définition du mètre par la Constituante

8 mai 1790 : sur proposition de Talleyrand, l'Assemblée constituante décide que « l'unité naturelle des longueurs sera celle d'un pendule battant la seconde suivant une latitude à définir en accord avec d'autres pays ».

27 octobre 1790 : l'Académie des sciences adopte le système décimal pour les poids et mesures. Une commission constituée entre autres de Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet est chargée de fixer la base des unités. Il s'agit de choisir une unité incontestable, liée à une référence naturelle, qui

pourra être acceptée par les autres nations.

19 mars 1791 : la commission de l'Académie royale des sciences propose comme étalon de longueur, la dix-millionième partie du quart de méridien terrestre (grand cercle passant par les pôles).

30 mars 1791 : l'Assemblée constituante ordonne la mesure de l'arc de méridien de Dunkerque à Barcelone. Le mètre sera la dix-millionième partie d'un quart de méridien terrestre. Donc le méridien terrestre mesurera 40 000 km. Le méridien sera mesuré aux latitudes moyennes, donc autour de Paris... Delambre et Méchain se chargeront du projet. Ils mesureront en toises la distance entre Dunkerque et Barcelone. Le rapport entre toise et mètre en sera déduit.

Un instrument décisif : le cercle de Borda

C'est un instrument imaginé par Mayer et repris par Borda. Constitué d'un cercle gradué mobile dans son plan autour de son centre, orientable comme on veut avec une lunette sur la face supérieure suivant un diamètre, une lunette sur la face inférieure décalée par rapport au diamètre. C'est une évolution du cercle répétiteur.

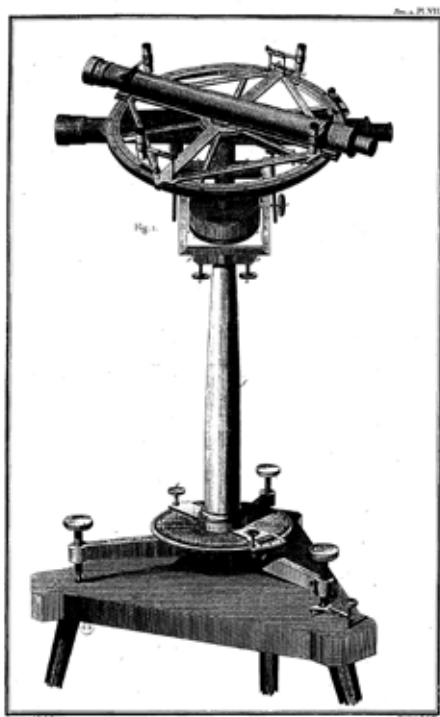


Fig.4. Cercle répétiteur azimutal.

Son avantage ? L'erreur de lecture se répartit sur le « grand angle » obtenu par cumul des visées et l'erreur de pointé se fait aléatoirement dans les deux sens. On a une précision de moins d'une seconde de degré¹.

¹ Vous trouverez une animation GeoGebra à télécharger sur le site (fichier cercle de borda.ggb).

La mesure du méridien de Paris par Delambre et Méchain

Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) après s'être fait remarquer par son compte-rendu d'observation du passage de Mercure devant le Soleil du 4 mai 1786, est nommé en 1792 associé-géomètre de l'Académie des sciences.

Pierre-François Méchain (1744-1804) est le découvreur entre 1779 et 1782 d'une trentaine d'objets de Messier. Et en 1782 il entre à l'Académie des sciences. Tous deux ont été les élèves de Jérôme Lalande. En 1788, Méchain est nommé responsable de la *Connaissance des temps*. En 1795, Delambre entre à son tour au Bureau des longitudes.

Delambre terminera sa carrière comme directeur de l'Observatoire de Paris. Quant à Méchain, affaibli après son retour, il n'arrive pas à s'expliquer une erreur sur une mesure de latitude faite à Barcelone, et qu'il n'a pu reprendre du fait des événements. Finalement reparti en 1803 compléter la méridienne vers les Baléares, il meurt de « fièvre tierce » en Espagne l'année suivante. C'est Delambre qui, en 1806, publiera la *Base du système métrique décimal*. Il y expose les conditions particulières dans lesquelles le projet s'est déroulé, le soin extrême qui a été porté aux observations et aux mesures. Il décrit avec minutie les conditions sur le terrain, publie la totalité des données et expose les techniques de calculs qui ont été utilisées.

Mais revenons en 1792. Nous sommes en juin. Tout est prêt... Thermomètres, cercles répétiteurs, règles, niveaux... Le 20 juin, Méchain quitte Paris en direction de Barcelone. Le 21 juin, Delambre part en direction de Dunkerque. Il est prévu qu'ils se rejoignent à Rodez... Les circonstances politiques changeantes rendent difficiles les déplacements et les mesures sont interrompues en 1794. Le 7 avril 1795, sans attendre leur retour, le système métrique décimal est institué. Un mètre étalon provisoire est adopté et diffusé dans toute la France. Il vaut **3 pieds** et **11,44 lignes** de la « toise du Pérou ».

Les mesures sont reprises en 1795 et finalement terminées fin 1798.

Le 27 mai 1799, après vérification et calculs par d'autres savants, le rapport final est publié. Et le 22 juin 1799, les prototypes définitifs en platine du mètre et du kilogramme sont présentés au Conseil des Cinq-Cents et au Conseil des Anciens.

Un mètre vaut **3 pieds** et **11,296 lignes** de la toise de l'Académie.

Exercice

Que vaut une toise de l'Académie en mètre ? On rappelle qu'un pied de roi mesure 32,483 95 cm.

Réponse : 1 toise = 1,949 mètres.

La diffusion de l'usage du système métrique

Après l'adoption par la Constituante du système métrique, des copies de l'étalon en platine sont diffusées dans toute la France. On charge des personnes « compétentes » de porter la bonne parole ; les académiciens s'en occupent. Des ouvrages d'explications sont rédigés. Il s'agit à la fois de remplacer les anciennes unités, mais aussi de faire reconnaître l'avantage du système décimal sur les anciennes pratiques en 1/12, 1/60... Les préfixes pour les sous unités ou pour les sur unités sont mal acceptés. Finalement avec l'avènement du 1^{er} Empire puis la Restauration, l'utilisation des anciennes unités est tolérée. Le décret du 12 février 1812 institue que seul le système métrique sera enseigné dans les écoles, qu'il sera le seul à être utilisé dans les écrits commerciaux et par les administrations. Mais le peuple pourra continuer à utiliser les unités anciennes, avec des correspondances fractionnaires simples avec les unités légales.

1 toise = 2 mètres, 1 pied = 1/3 mètre...

Il faudra attendre le 4 juillet 1837 pour que la loi impose à partir du 1 janvier 1840 le seul usage du système métrique et donc du mètre.

Exercice

Quelle est l'erreur commise en prenant pour équivalence 1 toise = 2 mètres ?

Réponse : 2,6 %



Fig.5. Usage des nouvelles mesures.

La Convention du mètre

Le développement de la technologie et des sciences nécessite une plus grande précision. Les échanges internationaux tant commerciaux que scientifiques nécessitent le recours à des unités comparables d'un pays à l'autre. En 1875, 17 pays dont la France signe la Convention du mètre. Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) est créé. En 1889 se tient la 1^{re} Conférence générale des poids et mesures (CGPM) et les premiers prototypes internationaux des étalons du mètre et du kilogramme sont réalisés et déposés à Sèvres au pavillon de Breteuil, le siège du BIPM.

Jusqu'à la définition actuelle du mètre : la 26^e Conférence générale des poids et mesures, CGPM

En 1960, la 11^e CGPM institue qu'un mètre vaut 1 650 763,73 longueurs d'onde de la lumière d'une transition spécifique de l'isotope 86 du krypton.

En 1983, la 17^e CGPM décide qu'un mètre est la longueur de la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 seconde.

Et dernièrement, en novembre 2018 à Versailles, la 26^e CIPM fixe que sept constantes définissent le Système international d'unités (SI) selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$ est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à 299 792 458 m/s.

Le mètre est défini à partir de la vitesse de la lumière dans le vide, elle-même définie à partir de la seconde, donc de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$. C'est le retour de la seconde pour définir le mètre !

Bibliographie, netographie

Dans les productions du CLEA voir page 36

Un podcast : <https://soundcloud.com/podcastscience/117-la-mesure-de-toute-chose>

À la BnF/Gallica :

- *Mesure de la Terre* par l'abbé Picard.
- *Base du système métrique décimal* par Jean Baptiste Delambre et Pierre Méchain.
- Arrêté du 12 février 1812.
- *Instruction sur les poids et mesures métriques* (4 juillet 1837)
- *Décret du 18 germinal an III* sur <https://www.gouvernement.fr/partage/9103-adoption-du-systeme-metrique-decimal>.
- *De l'aventure...*
- Denis Guedj : *Le mètre du monde* (Éd. Seuil, 2000).
- Ken Alder *Mesurer le monde : 1792-1799, l'incroyable histoire de l'invention du mètre*, (Éd. Flammarion, 2008).
- Florence Tristram : *Le procès des étoiles*.
- Arkan Simaan : *la science au péril de sa vie* (Vuibert/Adapt).
- Un projet international pour refaire la mesure avec vos élèves : <https://www.fondation-lamap.org/fr/eratos>

AVEC NOS ÉLÈVES

Les phases de la Lune dans les livres d'enseignement scientifique

Franck Smanio, professeur de physique-chimie au lycée Paul Guérin de Niort

Dans les manuels scolaires les schémas réalisés avec une véritable rigueur sont des supports importants pour éviter des représentations erronées. C'est malheureusement rarement le cas.

Avant de présenter quelques rappels utiles pour l'analyse de plusieurs extraits issus de manuels, il m'a semblé important de relater les contraintes de cet enseignement. En effet, pour sa mise en place, plusieurs difficultés sont apparues :

- les intervenants. Si une grande majorité des lycées a opté pour un co-enseignement physique SVT, certains établissements ont préféré incorporer dans l'équipe des collègues de mathématiques afin, parfois, de rassurer les parents sur la présence systématique des mathématiques en première générale. Ces interventions en mathématiques se font soit ponctuellement, soit sur des chapitres entiers. Elles sont légitimes mais compliquent les emplois du temps ;
- mener consciencieusement à terme ce programme est une gageure. Chaque chapitre doit être traité en moins de 4 h, évaluation comprise... Cela laisse peu de place au débat et à l'expérimentation ;
- l'hétérogénéité du public. Une classe de première générale aujourd'hui est composée d'élèves ayant choisi différentes spécialités. Parmi ces élèves, certains ont fait le choix de ne plus faire de sciences. Leur apporter cependant des bases scientifiques, leur faire comprendre la différence entre science et croyance est louable. Le programme est ambitieux et la complexité de certaines notions, associée aux difficultés en mathématiques, rebute des élèves. Quelques élèves font même remarquer que l'enseignement scientifique apparaît plus ardu que la spécialité physique-chimie.

Lors de la préparation de ma progression, j'ai détecté plusieurs erreurs dans les ouvrages scolaires, erreurs qui peuvent engendrer de mauvaises interprétations. Je vais m'attacher ici à la partie 3 du programme, « La Terre, un astre singulier » et plus particulièrement le chapitre sur la Terre dans l'Univers.

Ce chapitre s'articule autour de deux savoirs : le mouvement de la Terre (associé à la controverse

qui a opposé géocentrisme et héliocentrisme) et le mouvement de la Lune autour de la Terre (associé aux phases de la Lune).

Quelques rappels utiles pour l'analyse des documents trouvés dans les manuels scolaires

Orbite de la Lune

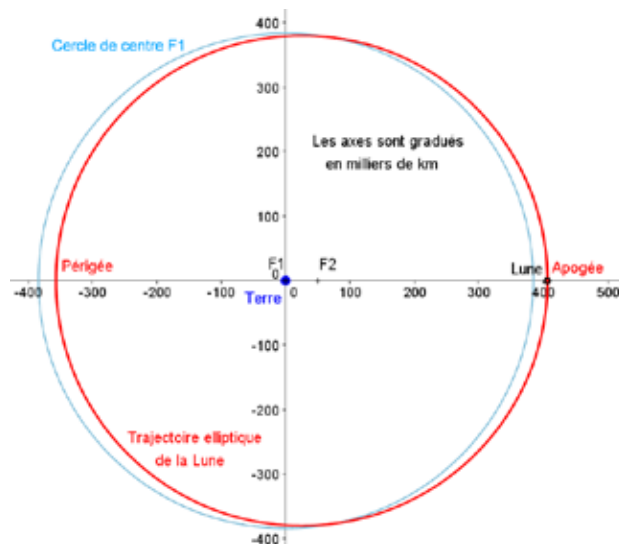


Fig.1. L'orbite de la Lune à l'échelle (l'échelle de distance et de taille des astres est la même).

Dans le référentiel géocentrique (repère lié au centre de la Terre), la Lune est animée de deux mouvements :

- la Lune tourne sur elle-même, c'est sa rotation. La période de rotation de la Lune est de 27,3 jours ;
- la Lune tourne autour de la Terre sur une trajectoire quasi circulaire, c'est sa révolution. La période de révolution est de 27,3 jours.

Comme les deux périodes (révolution et rotation) sont identiques, la Lune nous présente toujours la même face.

La trajectoire de la Lune est en réalité une ellipse dont d'un des deux foyers F_1 est occupé par la Terre.

L'orbite de la Lune est quasiment un cercle. Sa forme est en effet très proche de celle du cercle bleu en pointillés.

Néanmoins cette trajectoire n'est pas centrée sur la Terre et par conséquent :

- lorsque la Lune est au périgée (point de l'orbite le plus proche de la Terre), elle se situe à environ 356 000 km de la Terre ;
- lorsque la Lune est à l'apogée (point de l'orbite le plus éloigné de la Terre), elle se situe à environ 406 000 km.

Les phases de la Lune

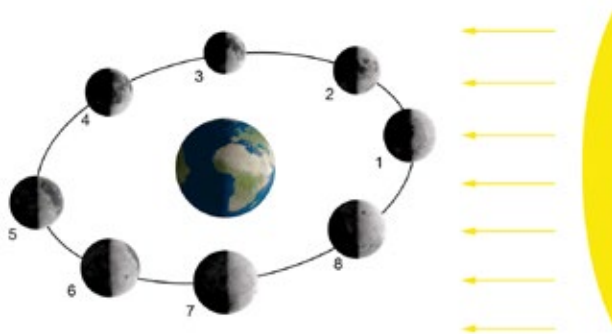


Fig.2. Les phases de la Lune. Image composite réalisée à partir de captures sur le logiciel Celestia. Les échelles de taille et de distance ne sont pas respectées.

La portion de la face de la Lune éclairée par le Soleil que l'on peut voir depuis la Terre est appelée phase lunaire.

La position des trois astres, Soleil, Terre et Lune, change au cours du périple de la Lune autour de la Terre. La Lune se présente alors sous différents aspects que l'on appelle les phases de la Lune.

1 Nouvelle Lune	2 Premier Croissant	3 Premier Quartier	4 Gibbeuse croissante
Phase non visible sauf lors d'une éclipse			
5 Pleine Lune	6 Gibbeuse décroissante	7 Dernier Quartier	8 Dernier Croissant

Fig.3. Phases de la Lune dans l'hémisphère nord.

1 Nouvelle Lune	2 Premier Croissant	3 Premier Quartier	4 Gibbeuse croissante
Phase non visible sauf lors d'une éclipse			
5 Pleine Lune	6 Gibbeuse décroissante	7 Dernier Quartier	8 Dernier Croissant

Fig.4. Phases de la Lune dans l'hémisphère sud.

(pour les figures 3 et 4, les images sont extraites du site NASA's Scientific Visualization Studio, <https://svs.gsfc.nasa.gov/4768>).

Si la Lune met 27,3 jours pour parcourir son orbite, il faut en revanche 29,5 jours pour retrouver une phase identique de la Lune : c'est la lunaison. La différence s'explique par le fait qu'en 27,3 jours, la Terre s'est déplacée sur son orbite.

Le terminateur

Le terminateur désigne la ligne frontière entre le jour et la nuit sur la Lune. Cette ligne est un cercle dont on ne voit que la moitié depuis la Terre (sauf lors de la pleine Lune). Or un cercle vu en perspective devient une ellipse.

C'est toujours à proximité du terminateur que les reliefs de la Lune sont le plus visibles car la lumière du Soleil est alors rasante : l'un des côtés d'un cratère est illuminé tandis que l'autre est plongé dans l'obscurité. Les ombres des reliefs sont aussi plus grandes.

De plus, les extrémités du terminateur, vues de la Terre, se situent à proximité des pôles de la Lune. Ainsi, quelle que soit notre position sur Terre, ces extrémités seront systématiquement proches du cratère Clavius et la Mer du Froid.

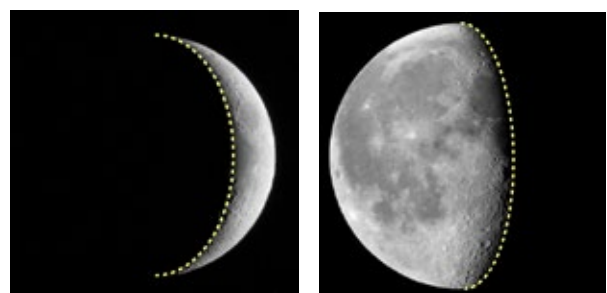


Fig.5. Que la Lune soit en croissant ou gibbeuse, le terminateur est toujours une demi-ellipse.

La lumière cendrée

Lorsque la Lune est en croissant, la partie non éclairée par le Soleil est visible à l'œil nu et apparaît de couleur gris cendre.

Pour l'observer sur une photographie, il est nécessaire de surexposer la photographie en augmentant le temps de pose car l'écart de luminosité est trop important. Il n'est donc pas possible d'avoir des détails nets de chacune des parties sur une même photographie.

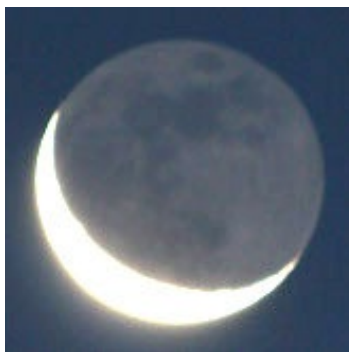


Fig.6. Lumière cendrée.
La partie non éclairée par le Soleil apparaît ici de couleur cendre, illuminée par le clair de Terre.
La lumière cendrée n'est plus visible lorsque la Lune est en quartier ou gibbeuse.
(photo de l'auteur).

Les figures suivantes sont extraites des manuels et sites des éditeurs. Si certaines erreurs sont flagrantes pour les observateurs du ciel et ceux qui s'intéressent à l'astronomie, elles ne le sont pas forcément pour les collègues qui interviennent dans l'enseignement scientifique.

Premier type d'erreurs : des images improbables

Les phases de la Lune



DOC 1 Quatre phases lunaires. La phase lunaire, ou phase de la Lune, désigne la portion de la Lune illuminée par le Soleil qui est vue depuis la Terre.

Fig.7. Belin page 164.

Le relief lunaire est ici méconnaissable, ce ne sont pas des photos mais des « vues d'artistes ».

Les ombres ne passent pas par les pôles, en particulier sur la dernière image.

Le terminateur est une frontière floue et n'est pas elliptique.



DOC 1 Quatre phases lunaires. La phase lunaire, ou phase de la Lune, désigne la portion de la Lune illuminée par le Soleil qui est vue depuis la Terre.

Il faut noter que les images ont été remplacées par des images plus réalistes de la Lune dans la version numérique du livre.



Fig.8. Magnard page 176.

Il s'agit ici de photos de pleine Lune sur laquelle un masque sombre au contour flou a été appliqué pour simuler les phases.

Observer la lumière cendrée de la Lune au premier quartier est bien difficile, quant à la voir en phase gibbeuse...

Et que dire de la position des pôles lunaires par lesquels passent le terminateur (sur ces photos le pôle nord de la Lune, repérable grâce au relief, est sur la gauche !).

Si la compréhension des phases n'est en rien handicapée par ces « détails », on peut tout de même reprocher à ces entorses au réel d'induire de fausses idées telles que la Lune est entièrement visible, quelle que soit la phase, y compris la nouvelle Lune.

Deuxième type d'erreurs : la Lune passe au-dessus des pôles terrestres

Cette erreur apparaît dans de nombreux ouvrages.

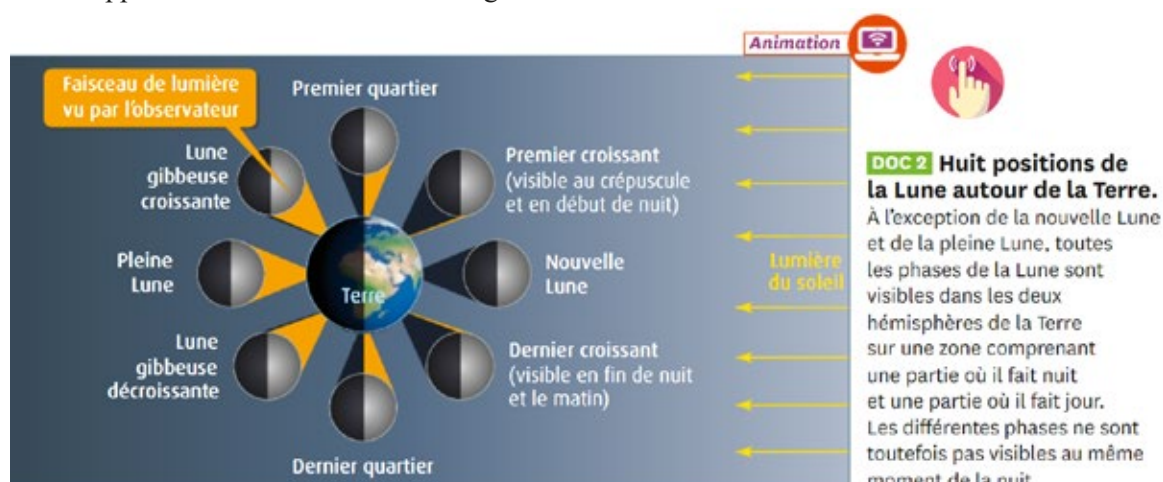


Fig.9. Belin page 164

La Lune semble passer au-dessus des pôles de la Terre. Les illustrateurs ont dû se contenter de choisir une image de la Terre au hasard. Dans ce type de vue, il faudrait que le pôle Nord soit proche du centre du disque terrestre.

Si le faisceau jaune représente un faisceau de lumière vue par l'observateur, que représente le faisceau sombre ?

Quant à l'explication étrange en légende, qu'en conclure ? Que la nouvelle Lune et la pleine Lune ne sont pas visibles depuis les deux hémisphères ? Et que les phases ne sont observables que la nuit ?

Troisième type d'erreurs : combiner images de la Lune vues depuis la Terre et celle d'un observateur extérieur au système Terre-Lune

Selon la position de la Lune par rapport à la Terre et au Soleil, la face visible de la Lune est plus ou moins éclairée. Ces différents aspects sont les phases de la Lune (Fig. 5).

La Lune apparaît de nouveau sous la même phase au bout de 29,5 jours. Cette période s'appelle la **lunaison**.

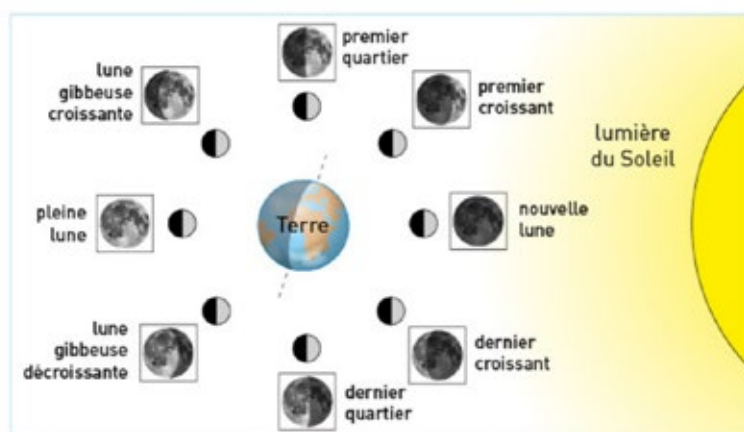


Fig. 5 : Les phases de la Lune.

Fig.10. Bordas page 195.

On retrouve la Lune au-dessus des pôles de la Terre.

Pas d'explication sur les images présentées et le référentiel utilisé.

On peut se demander pourquoi les terminateurs sur Terre et sur la Lune ne sont pas parallèles.

Ce type de représentation avec deux points de vue différents placés côte à côte est difficilement compréhensible pour les élèves. Observez les deux images du dernier quartier par exemple où les deux ombres sont inversées.

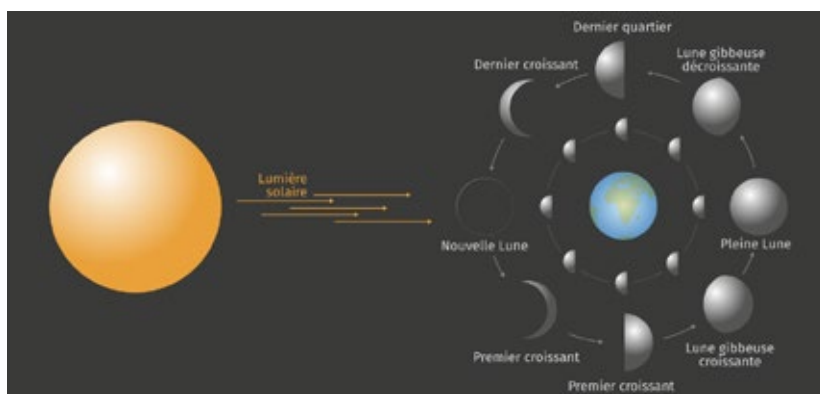


Fig.11. Le Livre Scolaire page 171.

On retrouve la Lune au-dessus des pôles de la Terre.

Pas d'explication sur les images présentées et le référentiel utilisé.

Pas de nuit sur la Terre ?

Des phases lunaires découpées à l'emporte-pièce circulaire et quelle est cette étrange nouvelle Lune ?

Quatrième type d'erreurs : quelle interprétation donner à ce qui est présenté ?



Fig.12. Belin page 167.

Même si on laisse sous-entendre que la nouvelle Lune est visible ainsi que la lumière cendrée en phase gibbeuse..., les images sont cohérentes et la Lune nous présente bien toujours la même face.

Alors pourquoi rajouter cette ligne bleue et cette flèche que l'élève va forcément rapprocher de l'orbite de la Lune et de toutes les images qu'il a vu jusque-là sur l'explication des phases ?

Mais alors, où est la Terre ?



Fig.13. Didier page 157.

Le schéma de gauche est presque parfait. L'inclinaison de la Terre est respectée. Les terminateurs sont parallèles. L'inclinaison de l'orbite lunaire apparaît. L'illustrateur ici a même fait apparaître le relief lunaire, un point positif sauf que c'est la même image de la Lune sur toutes les positions, ce qui laisse croire que la Lune ne nous présente pas toujours la même face... et en plus, comme la Lune vue du nord (comme sur ce schéma) doit tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, les phases ne sont pas indiquées dans le bon ordre puisque le premier quartier devrait être avant la pleine lune !!!

Quant aux photos de droite, comment rapprocher ces 13 images des 8 positions différentes indiquées à gauche ?

De nombreuses erreurs mentionnées dans cet article sont inhérentes à la production de manuels dans les délais trop courts impartis. Il n'y a aucune volonté de jeter le discrédit sur les auteurs. C'est à nous enseignants, lorsque nous nous en servons, de connaître les défauts et les limites des modèles et schémas utilisés, quitte à nous en servir de support pour développer l'analyse critique des élèves.



Quelques ressources

- <https://svs.gsfc.nasa.gov/4768> ; ce site de la NASA offre plusieurs vidéos téléchargeables sur les phases de la Lune en 2020. Certaines sont très complètes et affichent les librations, les positions respectives de la Lune et de la Terre et leur éclairage par le Soleil. Ainsi que la variation de la distance Terre-Lune...
- La Lune à portée de main : Pierre Causeret - Jean-Luc Fouquet – Liliane Sarrazin-Vilas. Éditions Belin.
- Deux animations : http://www.pccl.fr/physique_chimie_college_lycee/cinquieme/optique/phases_lune.htm
http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Phases_Lune_R8.xml

L'enseignement scientifique et les productions du CLEA

De très nombreux articles accessibles en ligne traitent de ces programmes ainsi que nos hors-séries et des conférences en ligne. Vous les trouverez avec leurs liens classés par thème sur notre site clea-astro.eu onglet « Avec nos élèves » puis « Lycée » et « enseignement scientifique ». Nous en donnons ici un résumé.

1 - Une longue histoire de la matière

CC 132 (2010) Deux articles, Spectroscopie, notions de base et Repères historiques.

CC 097 (2002) Astrophysique nucléaire.

2 - Le Soleil, notre source d'énergie

Le hors-série des Cahiers Clairaut n° 14 (HS14) Le Soleil répond à de nombreuses questions de cette partie (366 p.).

Conférence Le soleil, notre étoile, par Roland Lehoucq.

2.1. Le rayonnement solaire

HS 14 p 193 Quelle est la masse perdue par le Soleil à chaque seconde ?

Dans Lunap / Corps noir : loi de Planck, loi de Wien, loi de Stefan.

CC 065 (1994) Corps noir (lois de Wien et de Stefan). Un article un peu ancien mais toujours actuel.

Conférence Étoiles, corps noir et types variés par Isabelle Vauglin.

HS 10 Maths et Astronomie, chapitre 3 « Les saisons » avec calcul de l'énergie reçue au sol.

CC 129 sur les saisons (notions de base / conceptions initiales / sur les autres planètes).

2.2 - Le bilan radiatif terrestre

HS 14 p 189 Température d'équilibre d'un corps du Système solaire.

3 - La Terre, un astre singulier

CC 046 (1989) Les origines du système métrique décimal.

CC 154 (2016) Les unités du SI et la définition du mètre.

HS 10 Maths et Astronomie p 10 Définition du mètre.

3.1 - La forme de la Terre

CC 079 Les plus anciennes mesures de la Terre (textes anciens : Aristote...).

CC 107 (2004) Deux calculs du rayon de la Terre avec la méthode d'Ératosthène (Égypte + France).

CC 107 (2004) Le retour d'Ératosthène. Réflexions sur les hypothèses dans cette expérience célèbre.

HS 10 Maths et Astronomie p 9 Mesure du rayon de la Terre (2 exercices).

CC 147 (2014) Mesure du rayon de la Terre avec triangulation par une classe de lycée.

CC 113 (2006) Triangulation et aplatissement de la Terre.

HS 10 p 14 Calculs de distances à la surface de la Terre.

3.3 - La Terre dans l'Univers

CC 126 (2009) Sur la rotation de la Terre Notions de base et repères historiques.

Lunap Rotation de la Terre.

CC 151 et 152 (2015) sur l'histoire des mouvements des planètes et des modèles (en deux parties).

CC 142 (2013) Voltaire, Descartes et Newton (forme de la Terre, tourbillons, Micromégas...).

Conférence Les bâtisseurs du ciel (Copernic, Tycho Brahé, Kepler, Galilée), par Jean-Pierre Luminet.

CC 139 (2012) La Lune, notions de base.

Lunap Phases de la Lune : activités, maquettes...

5 - Projet expérimental et numérique

Deux expériences de ballon-sonde avec capteurs... : CC 163 (2018) et CC 165 (2019).

Pour accéder aux documents : tous les liens sont sur la page <http://clea-astro.eu/avec-nos-eleves/lycees/> enseignement-scientifique-1ere. Vous pouvez également les trouver à partir du site principal clea-astro.eu, puis onglet archives des CC pour les Cahiers Clairaut (tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès) ou onglet Lunap (petite encyclopédie astronomique) ou onglet conférences.

L'ASTRONOMIE dans les TIMBRES (3)

Anne-Marie Louis, anne-marie.louis@wanadoo.fr

Planétaire ! Le confinement était planétaire... Une bonne occasion pour relire les anciens numéros des Cahiers Clairaut et pour évoquer quelques confinés sur la Terre ou un peu plus loin.

3^e partie – Confinés

La grande peste à Londres en 1665

En 1665, **Newton** obtient le degré de Bachelor of Arts sans distinction particulière. C'est alors que la « grande peste » entraîne la fermeture de l'Université et le retour d'Isaac au manoir de Woolsthorpe. Il y restera, solitaire et méditatif, jusqu'à la réouverture des cours en 1667. Période fructueuse pour ce jeune homme qui aimait la solitude et qui était capable d'une extraordinaire concentration d'esprit.

La grande découverte, c'est-à-dire celle de l'attraction en $1/r^2$, elle se situe à cette époque de méditation champêtre, bien qu'elle n'ait été formulée et démontrée correctement que plus tard.

Gilbert Walusinski, qui signait K. Mizar, racontait cet épisode dans la partie III d'une série d'articles intitulée « Errants et errances » dans les Cahiers Clairaut (CC) 19, 20 et 21 (1982-83).

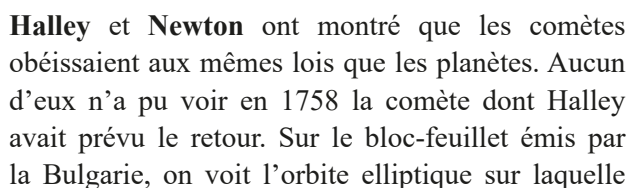
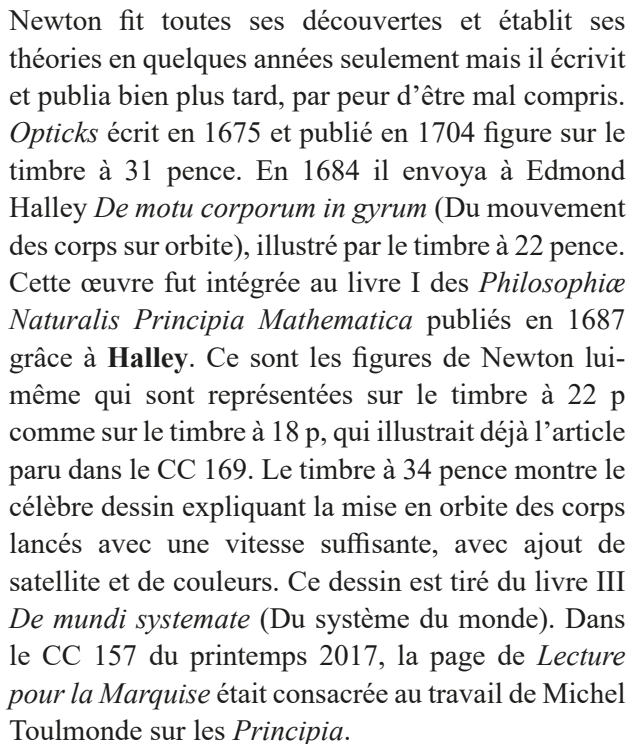


Le **pommier** a-t-il inspiré Newton ? Est-ce une légende ? Sans doute la connexion qui permit à Newton en confinement de découvrir que les lois de la physique sont universelles ! En 1666 un immense incendie mit fin à l'épidémie de Londres qui avait tué presque un quart de la population. La Great Plague avait fait 100 000 morts. Newton retourna à Trinity College au bout de 18 mois.



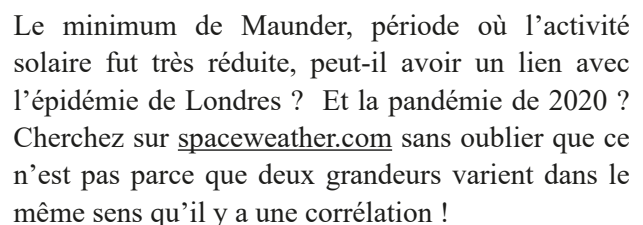
Newton mit à profit son séjour dans sa campagne natale du Lincolnshire pour ses recherches non seulement en mécanique mais aussi en mathématiques et en optique : en 1666 il fit ses premières expériences sur la décomposition de la lumière. Les figures proviennent d'*Opticks*. Sur le timbre allemand a été ajoutée l'expression littérale $\Delta(mv) = F\Delta t$ de la deuxième loi, traduite par Émilie du Châtelet : « Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée. »

Une remarque concernant sa date de naissance : 1642 sur les timbres français et anglais, et 1643 sur le timbre allemand. Newton est né le 25 décembre 1642 selon le calendrier julien encore en usage en Angleterre, mais le 4 janvier 1643 selon le calendrier grégorien qui n'a été adopté en Grande-Bretagne qu'en 1752. Pour de plus amples précisions y compris sur la date de son décès, relisez dans le numéro 102 des CC (été 2003) l'article de Michel Toulmonde intitulé « Les dates de Newton ».

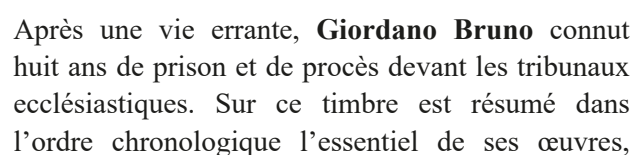


La comète aperçue en 1664 pouvait-elle être la cause de la grande peste ? L'article bien documenté *Comètes et épidémies* de Jean-Claude Berçu sur le site de la SAF répond à la question.

1965 – Años internacionales de calma solar.



L'intolérance religieuse



en latin ou en italien, traitant de mnémotechnique, domaine où il excellait, et aussi de l'infiniment petit et de cosmologie¹. Il soutient la théorie de Copernic et imagine la pluralité des mondes : « Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils ». Victime de l'Inquisition, il meurt brûlé vif à Rome en 1600.

Le 22 juin 1633 **Galilée**, âgé de 67 ans, fut condamné par le tribunal du Saint-Office, emprisonné puis assigné à résidence à Arcetri, dans sa villa le Gioiello. Il y écrivit son dernier livre et y mourut en 1642.



Le timbre de San Marino reprend une partie du tableau de 1892 où Tito Lessi représente Galilée en compagnie de son disciple Vincenzo Viviani.

Il semble intéressant de conclure avec les timbres émis en 1994 par le Vatican pour la série Europa *Les découvertes*.



L'artiste juxtapose bizarrement les orbites des planètes, des atomes, en y ajoutant des pendules, des engrenages et divers instruments. A-t-il tenté de symboliser les foudres de l'Inquisition ou a-t-il simplement dessiné tout ce qu'il avait retenu en sciences ?

L'aventure confinée

Auguste Piccard est le premier homme ayant observé la courbure de la Terre dans la cabine pressurisée de son ballon stratosphérique, avec lequel il fit deux ascensions, étudia les rayons cosmiques et monta à 16 000 m en 1932. Impossible de le dissocier du bathyscaphe, autre invention avec laquelle cet homme des extrêmes descendit à plus de 3 000 mètres.



Jacques le fils d'Auguste prit la relève dans le domaine de l'océanographie tandis que **Bertrand Piccard**, petit-fils d'Auguste, fit en 1999 le premier tour du monde en ballon sans escale, avant de concevoir l'avion Solar Impulse et de faire le tour du monde en 17 étapes sans une goutte de carburant : belle aventure mais qui nous éloigne un peu de l'astronomie...

¹ *De umbris idearum* (1582) - *Sigillus sigillorum* (1583) - *De la causa, principio et Uno* (1584) - *De l'infinito universo e Mondi* (1584) - *De gli eroici furori* (1585) - *De triplici minimo et mensura* (1591) - *De monade numero et figura* (1591) - *De innumerabilibus, immenso et infigurabili* (1591) - *De imaginum, signorum et idearum compositione* (1591).

Un timbre dans le timbre : au premier plan le ballon de Bertrand Piccard, au second plan le timbre du ballon d'Auguste Piccard.



Confiné(e)s pour la science

Personne n'a oublié **Laïka**, première créature vivante placée en orbite autour de la Terre à bord de Spoutnik en 1957. Qui se souvient du premier spationaute français, le rat **Hector** en 1961 ? Et des deux autres ratonautes nommés **Castor** et **Pollux** ?



En 1963 la fusée Véronique décolla d'Hammaguir au Sahara en emmenant la chatte **Félicette** à 155 km d'altitude, 5 minutes en impesanteur. La première féline fut la seule de l'histoire à être récupérée vivante après un aller et retour de 13 minutes. On raconte qu'en fait **Félix**, le chat initialement prévu et entraîné, a fui avant le départ et fut remplacé à patte levée par Félicette, mais c'est lui qui est sur les photos, avec ses électrodes dans le cerveau. Le doute subsiste quant à l'identité et au portrait de notre

chastonaute, et les 3 timbres émis par les Comores, le Niger et le Tchad, ont tous repris l'effigie du matou. Sur ce timbre, Laïka et Félix ont rejoint l'équipage d'Apollo 11 !

Confinement en orbite



12 avril 1961 : **Youri Alexeïevitch Gagarine** est le premier homme à avoir effectué dans l'espace à bord de Vostock 1 un vol de 108 minutes qui l'entraîna à 327 km. En 2001 la série *Un siècle au fil du timbre* présentait six thèmes dont la science.



Deux ans après lui, **Valentina Vladimirovna Tereshkova**, première femme dans l'espace, décolla le 16 juin 1963 de Baïkonour et passa près de trois jours en orbite seule à bord de Vostock 6. Même si elle reste la première femme ayant effectué un vol orbital solitaire, sa notoriété est loin d'être égale à celle de Gagarine : les livres consacrent volontiers plusieurs pages à son homologue masculin tandis qu'elle n'a droit qu'à quelques lignes.

Thomas Pesquet, lui, connaît bien le confinement, pour avoir passé 196 jours à bord de l'ISS. La Poste a sorti un collector *Retour sur Terre*. Et une magnifique série de timbres, *La Terre vue de la*

Station spatiale internationale, reproduit quelques-unes de ses 85 000 photos de la Terre.



Cherchez sur Internet les documents philatéliques spéciaux réalisés et commentés par Gilles Dawidowicz pour la SAF, en tirage très limité hélas (10 ex) !



Confinement à la maison

Dans la même série de 2001, thème de la communication : le cachet représente la mire-pendule de C. Hourriez mise en service par la RTF le 24/12/59 !

Sur le timbre : un téléphone sans fil relie cette enfant, dont la vie a débuté vers l'an 2000, à la Terre entière.



Cette année son université est fermée pour cause de pandémie, ce qui l'oblige à contempler par la fenêtre un coin de ciel, à fêter ses 20 ans sur zoom, à travailler en solitaire. Elle réfléchit à une théorie géniale qui ne sera publiée que vers 2040 mais aura un certain retentissement en science !

AMA09 : Troisième épisode



Le superbe bloc émis par la France en 2009 résume 400 ans d'histoire de l'astronomie, depuis la lunette qui a permis à Galilée d'observer les satellites de Jupiter, jusqu'au télescope spatial CNES/ESA CoRoT (Convection, Rotation, Transits) qui étudia la structure interne des étoiles et détecta 32 exoplanètes entre 2006 et 2012.

(À suivre)

Références

Cahiers Clairaut n° 19, 20, 21, 102, 157

Un blog très bien documenté :

<https://litalieparsestimbres.wordpress.com/2012/09/04/giordano-bruno/>

Une pièce de théâtre pour la jeunesse : *Une cosmonaute est un souci dans notre galaxie*, Lansman, 2016.

Inflation dans l'Univers

Françoise Combes, astronome à l'Observatoire de Paris, professeure au Collège de France

Comment est né l'Univers ? D'où viennent les grandes structures qui nous entourent, les galaxies et amas de galaxies ?

Un glossaire accompagne ce texte page 48.

Nous savons depuis bientôt un siècle que l'Univers est en expansion. Les astronomes, comme Vesto Slipher, ont d'abord remarqué que les galaxies proches avaient en majorité un spectre décalé vers le rouge, et qu'elles semblaient donc s'éloigner de nous à grande vitesse. Edwin Hubble note que ces vitesses sont proportionnelles à la distance des galaxies. L'abbé Georges Lemaître, qui faisait à l'époque un séjour aux États-Unis en revient avec l'idée que l'espace est en expansion. Il extrapole que si dans le futur, les galaxies qui nous entourent seront de plus en plus distantes, alors dans le passé, réciproquement, elles étaient très proches, et il entrevoit un Univers où tout est concentré en un point, « l'atome primitif ». Pendant longtemps la

relation vitesse-distance des galaxies s'est appelée loi de Hubble, mais depuis 2018, nous l'appelons loi de Hubble-Lemaître, pour rendre hommage à la clairvoyance de ce dernier.

La théorie du Big Bang a progressivement conquis ses lettres de noblesse, et même son nom en 1949, grâce à un des ses principaux détracteurs, Fred Hoyle, qui voulait tourner cette théorie en dérision. La découverte du fond diffus cosmologique (CMB en anglais, pour Cosmic Microwave Background) par Penzias & Wilson en 1965, l'abondance observée aujourd'hui des éléments légers (hélium, deutérium, etc.) qui ne peut s'expliquer que dans la nucléosynthèse primordiale, et l'évolution des galaxies à grand décalage vers le rouge (soit à 10 % de l'âge de l'Univers), ne permettent plus de douter que l'Univers est passé dans un état infiniment chaud et dense, il y a 13,8 milliards d'années.

Rappelons les différentes étapes de l'Univers que nous connaissons, comme il est rappelé dans le schéma de la figure 1.

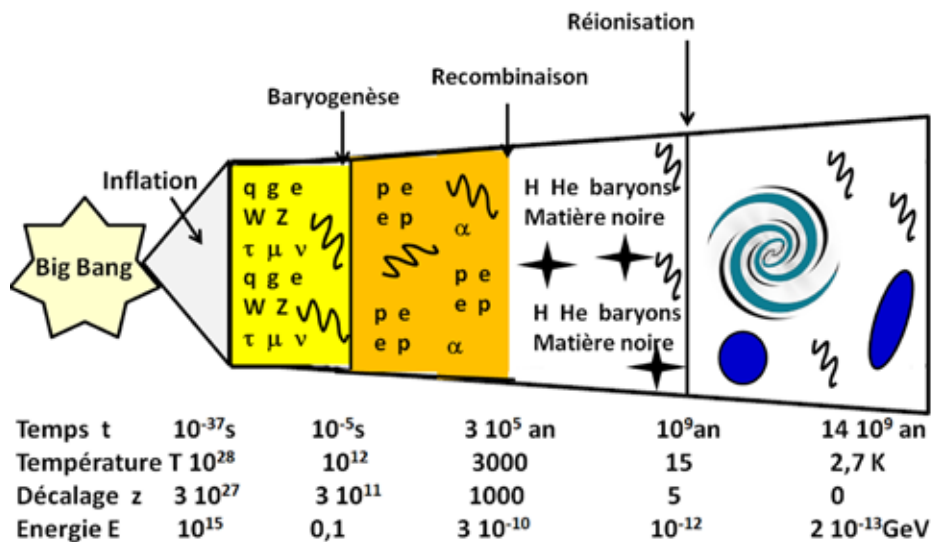


Fig.1. Schéma des différentes étapes de l'histoire de l'Univers. De gauche à droite, après le Big Bang, se situerait une phase d'inflation gigantesque de l'espace, où des petites fluctuations quantiques, de la taille de Planck (soit 10^{-35} cm) sont amplifiées par un facteur 10^{30} pour devenir macroscopique, soit une fraction de millimètre. Cette époque dure très peu (moins que 10^{-32} seconde), et l'espace ensuite n'est qu'en lente expansion, jusqu'à aujourd'hui (13,8 milliards d'années). Chaque époque est labellisée par le temps (en seconde ou année), mais aussi la température du CMB $T(z) = 2,73 \text{ K} (1+z)$, en fonction du décalage vers le rouge z , qui croît comme l'inverse de la longueur d'onde des photons du fond cosmologique. À chaque température T correspond une énergie E de chaque photon ($E = h\nu$), ici en unités nucléaires de GeV ou Giga electron-volt. Les diverses époques sont indiquées : baryogénèse ou formation des protons, neutrons qui deviennent des atomes (H, He) à la recombinaison. Puis la formation des premières étoiles et galaxies entraîne la réionisation du milieu entre les galaxies, tel qu'il est de nos jours.

Dans la première seconde, l'Univers est une soupe primitive, très dense et chaude, dominée par le rayonnement. Il existe surtout des photons, qui ont assez d'énergie pour créer particules et antiparticules, quarks et antiquarks. Mais assez vite, avec l'expansion, l'énergie tombe en-dessous de la masse du proton (~ 1 GeV), ceux-ci s'annihilent avec les anti-protons, et ne restent que l'excédent de matière sur l'antimatière. C'est la baryogénèse, qui est encore assez mystérieuse, car l'on n'a toujours pas identifié la brisure de symétrie qui favorise les baryons par rapport aux anti-baryons. Cette asymétrie est très faible, d'environ 10^{-9} en abondance relative, nous le savons grâce au nombre de photons observés aujourd'hui dans le CMB.

Dans les minutes qui suivent le Big Bang, la température et la densité sont encore suffisantes pour

permettre aux réactions nucléaires de fabriquer les particules α , ou noyaux d'hélium (deux protons et deux neutrons), mais aussi le deutérium, qui sera ensuite détruit dans les étoiles. C'est grâce à cette nucléosynthèse primordiale, que nous avons 10 % en nombre et 25 % en masse d'hélium dans les étoiles comme le Soleil, alors que la nucléosynthèse ultérieure dans les étoiles n'en forme que très peu, en même temps que des traces d'éléments plus lourds.

Dans l'expansion, la température descend jusqu'à 3 000 K après 380 000 ans, et l'atome d'hydrogène se recombine à partir d'un proton et d'un électron. Le milieu est neutre, et ne diffuse plus les photons du CMB, qui nous parviennent ensuite directement, en ligne droite. C'est cette dernière surface de diffusion que nous percevons dans la carte du ciel en ondes millimétriques, faite par le satellite Planck (figure 2).

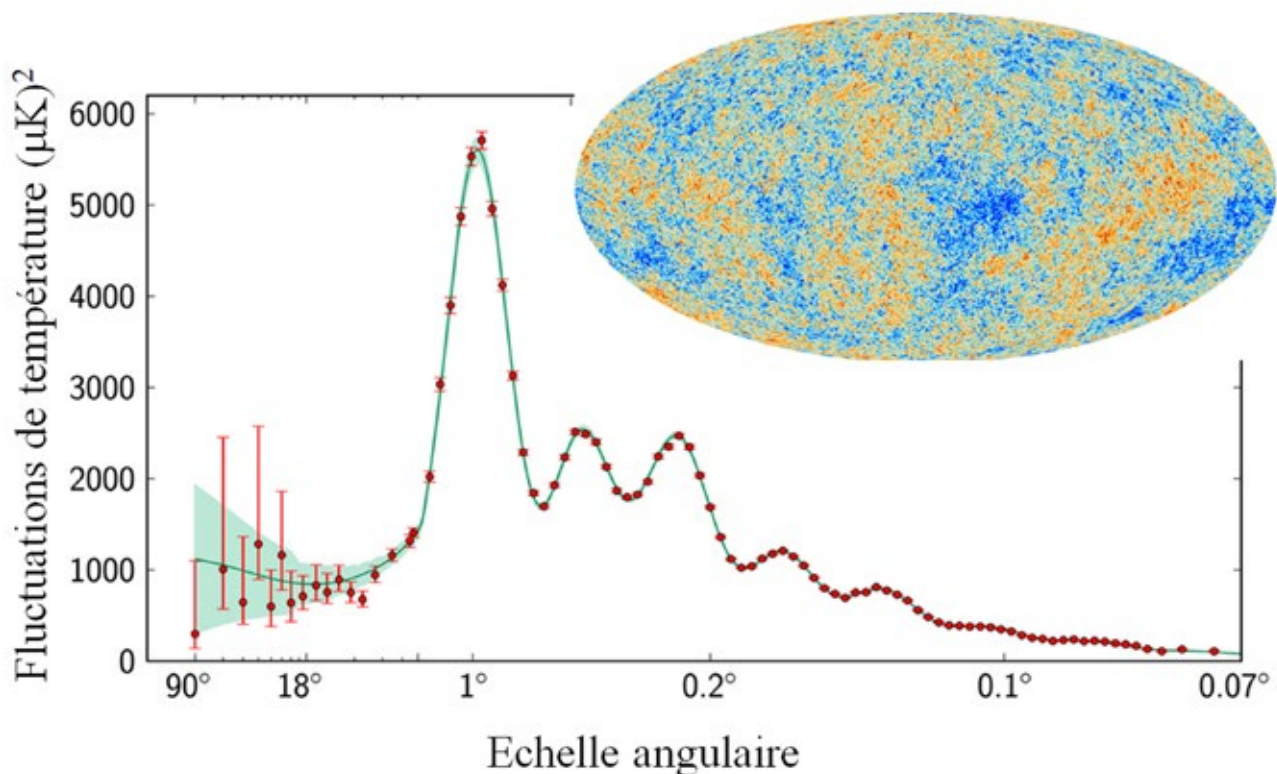


Fig.2. Carte du ciel des anisotropies dans le CMB, faite avec le satellite Planck (ondes millimétriques). La carte en haut à droite montre les fluctuations de température réparties sur tout le ciel, et la courbe en fait la synthèse, en fonction de la taille angulaire de ces fluctuations (échelle en degré d'angle de l'abscisse). L'échelle des ordonnées est en micro-Kelvin². Noter les faibles barres d'erreur (en rouge) pour des échelles inférieures à 1°. Crédit Planck/ESA.

Parmi toutes ces étapes, pourquoi l'inflation ?

L'observation des anisotropies du fonds diffus, résumées dans la figure 2, a confirmé avec une extrême précision la théorie du Big Bang, et l'histoire de l'Univers dont nous venons de brosser les grandes lignes ; les oscillations détectées avec grande précision représentent les ondes acoustiques

du plasma (protons, électrons) en équilibre avec le rayonnement. Le premier pic à 1°, le plus haut, correspond au chemin parcouru par le son depuis le Big Bang, c'est-à-dire 450 000 années-lumière, et nous sert de règle cosmique. Si cette règle est vue sous l'angle de 1°, cela permet d'affirmer que la courbure est nulle, et que les photons nous sont parvenus en ligne droite (si la courbure était négative, le pic se trouverait à un angle inférieur à 1°).

L'Univers est donc exactement plat, sans courbure, et cela pose déjà un problème. En effet, d'après les équations de la relativité générale d'Einstein, l'écart à la platitude croît depuis le début de l'Univers, depuis le temps de Planck, d'un facteur 10^{60} . Comment se fait-il que les conditions initiales aient été si précises, pour que la courbure soit nulle à 10^{-60} près ?

Outre ce problème de la platitude, nous avons aussi le problème de l'horizon. L'horizon est la distance au-delà de laquelle nous ne pouvons pas retrouver de l'information : la vitesse de la lumière n'est pas infinie, et elle a parcouru 13,8 milliards d'années-lumière depuis le Big Bang. Nous ne pouvons pas avoir reçu de lumière des galaxies qui sont au-delà. Chaque observateur est entouré d'une sphère correspondant à son horizon, qui délimite la part de

l'Univers qu'il pourra observer.

À l'époque de la recombinaison, soit 380 000 ans après le Big Bang, l'horizon ne faisait que 380 000 années-lumière, il était si petit que, vu d'aujourd'hui sur la dernière surface de diffusion, cette taille correspond environ à 1° d'angle. Dans la carte du ciel de la figure 2, il y a donc plus de 40 000 horizons indépendants. Ils ne peuvent pas avoir échangé de signaux, pourtant leur température de fonds est remarquablement constante, à 10^{-5} près (qui est le niveau des fluctuations spatiales). C'est le problème de l'horizon.

L'inflation a donc été imaginée afin de résoudre ces problèmes. La figure 3 montre comment est résolu le problème de la platitude.

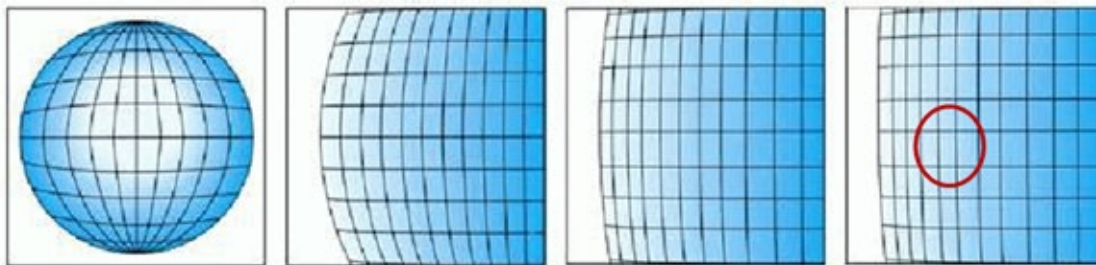


Fig.3. L'inflation résout le problème de la platitude de l'Univers que nous observons aujourd'hui. L'Univers n'a pas besoin de démarrer avec une courbure nulle initialement. Quelle que soit sa courbure initiale, l'inflation de l'espace d'un facteur 10^{30} est si énorme que notre Univers observable (le cercle rouge, à droite) apparaîtra toujours plat.

L'inflation permet aussi de résoudre le problème de l'horizon. La solution est qu'au minimum tout le volume d'Univers correspondant aux nombreux horizons que nous apercevons dans la carte du ciel du fond diffus provienne de la même région de l'espace, grâce à une soudaine expansion ultra-rapide.

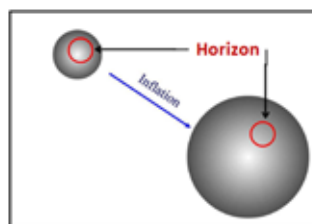


Fig.4. Pendant l'inflation, qui dure 10^{-32} seconde, la lumière n'a pratiquement pas le temps de bouger, et donc l'horizon reste à peu près de la même taille (cercles rouges). Par contre, l'espace s'étend d'un facteur 10^{30} , et un volume donné peut contenir beaucoup plus d'horizons. C'est ainsi que tout le ciel de Planck de la figure 2 peut provenir de la même région de l'espace, avec la même température, même s'il contient plus de 40 000 horizons.

Cette expansion bat la lumière de vitesse, et d'un tel facteur (plus de 21 ordres de grandeur) que l'homogénéité de la température dans tout le ciel est assurée.

L'inflation, non seulement résout les principaux problèmes de la théorie du Big Bang, mais en plus, elle fournit une prédiction, l'existence de fluctuations primordiales, et elle en fixe l'amplitude, qui se révèle tout à fait en accord avec les observations.

Les ondes acoustiques détectées dans le ciel micro-onde du CMB nous indiquent quelle est l'amplitude des fluctuations pour chaque échelle de taille donnée. On peut ainsi construire le spectre de puissance des fluctuations $P(k)$, où k est le nombre d'onde, soit $k=2\pi/\lambda$, où λ est l'échelle considérée. La théorie de l'inflation prédit un spectre indépendant d'échelle, en loi de puissance $P(k) \propto k^n$, où l'exposant de la loi de puissance est tel que les perturbations entrent toujours dans l'horizon avec une égale amplitude soit $n = 1$. Les observations du CMB par le satellite Planck ont confirmé ce spectre. Plus précisément, on observe bien $P(k) \propto k$ à grande échelle (petit k) ; puis $P(k)$ s'incline à petite échelle (ou grand k) en k^{-3} , car les fluctuations à ces échelles sont empêchées de croître par la pression du rayonnement au tout début de l'Univers. La pression des photons ne s'exerce qu'à l'intérieur de l'horizon, qui est petit à cette époque.

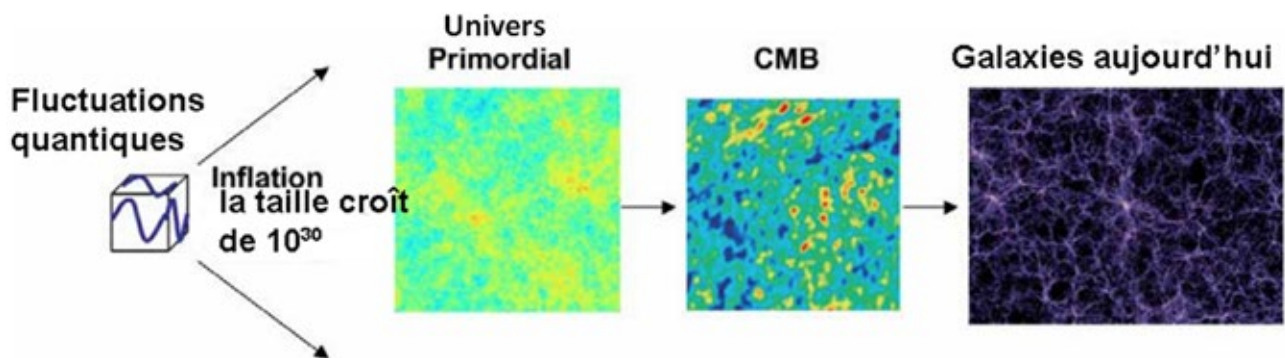


Fig.5. L'inflation apporte un bonus supplémentaire, elle permet d'expliquer l'origine des fluctuations primordiales qui vont donner lieu aux grandes structures et aux galaxies.

Historique du modèle d'inflation

La théorie de l'inflation a d'abord été proposée par le physicien russe Alexei Starobinski en 1979-80 et par Alan Guth en 1980-81 aux USA. Mais le mécanisme de Guth demande une modification pour sortir de l'inflation. En effet, l'arrêt de l'inflation est beaucoup trop violent, et réchauffe anormalement l'Univers.

On peut se représenter le champ de l'inflation, comme le montre schématiquement la figure 6. L'état initial ne serait pas vraiment à l'équilibre stable, mais dans un minimum secondaire d'énergie, soit dans un état métastable. L'analogie avec un milieu hors équilibre comme l'eau en surfusion en dessous de zéro degré, qui a besoin de noyaux de glace pour geler globalement, ou l'eau surliquifiée au-delà de 100 degrés, qui a besoin d'impuretés pour créer des bulles et s'évaporer. Pour un champ quantique, on peut considérer l'état de faux vide métastable dans un minimum local d'énergie, qui puisse descendre ensuite par effet tunnel vers l'état d'équilibre global, ou vrai vide. Mais ce scénario est très violent, crée des bulles de vrai vide, qui collisionnent, et finit par un univers beaucoup trop granulaire et inhomogène, incompatible avec les observations.

La nouvelle inflation est alors développée par Andrei Linde, Andreas Albrecht et Paul Steinhardt indépendamment en 1982 et au-delà. Les premiers modèles d'inflation sont basés sur une transition de phase du 1^{er} ordre, puis des transitions du 2^e ordre, analogues à celles proposées des décennies plus tôt par les physiciens, pour expliquer les brisures de symétrie pour les supraconducteurs : la transition se passe pour une température inférieure à une température critique.

Enfin l'inflation peut se produire sans transition de phase du tout, comme pour l'inflation chaotique, supposée venir de conditions initiales chaotiques. Dans ces modèles, il n'y a plus de minima secondaires d'énergie, mais juste le champ inflaton

qui roule doucement d'un état d'énergie positive, en pente douce vers son minimum d'équilibre. À cause des fluctuations quantiques, il oscille dans son puits de potentiel. Arrivé à son point d'équilibre, l'inflaton se désintègre en photons et particules de matière. Les oscillations quantiques créent des perturbations initiales.

Pour les modèles avec transition de phase, il faut un ajustement fin du mécanisme pour sortir du faux vide, en surfusion. Une fois l'ajustement fait, pour être en accord avec le CMB, les bulles collisionnent trop souvent. Les modèles à transition de phase utilisent l'effet tunnel pour ralentir le passage du faux vide métastable à l'état d'équilibre. Sans changement de phase, on peut utiliser un champ en pente douce (« slow roll » en anglais) au lieu de l'effet tunnel. De plus cela permet d'utiliser les fluctuations quantiques comme conditions initiales (cf. schéma de la figure 6 à droite).

Mais d'où vient toute l'énergie libérée à la fin de l'inflation, pour créer les particules, photons et matière ? On ne crée rien à partir de rien ! Le champ scalaire a la propriété d'être à l'équilibre dans un faux vide, un état d'énergie positive au début de l'Univers. Le champ a tendance à descendre lentement, et rouler vers le vrai vide, d'énergie nulle, qui est l'état d'équilibre. Ce faux vide est un composant qui a une pression P négative $P = -\rho c^2$, en fonction de sa densité ρ d'énergie positive. Il exerce ainsi une force répulsive, et agit comme de la gravité négative. L'univers démarre tout petit $\sim 10^{-25}$ cm, Sa taille s'accroît de 10^{30} , et son énergie de 10^{90} (volume) ; mais son énergie gravitationnelle est très négative, et compense exactement. L'énergie de toute la matière qui est créée est prise sur l'énergie gravitationnelle. Dans les équations de relativité générale, un composant à pression négative produit une expansion exponentielle de l'espace. C'est aussi le phénomène que nous observons aujourd'hui avec l'énergie noire, bien que dans des proportions bien

inférieures. L'expansion de l'Univers s'accélère, ce qui a pu être observé la première fois en 1998 grâce aux chandelles standard que sont les supernovæ de

type Ia. Cette découverte a donné lieu au prix Nobel de physique en 2011.

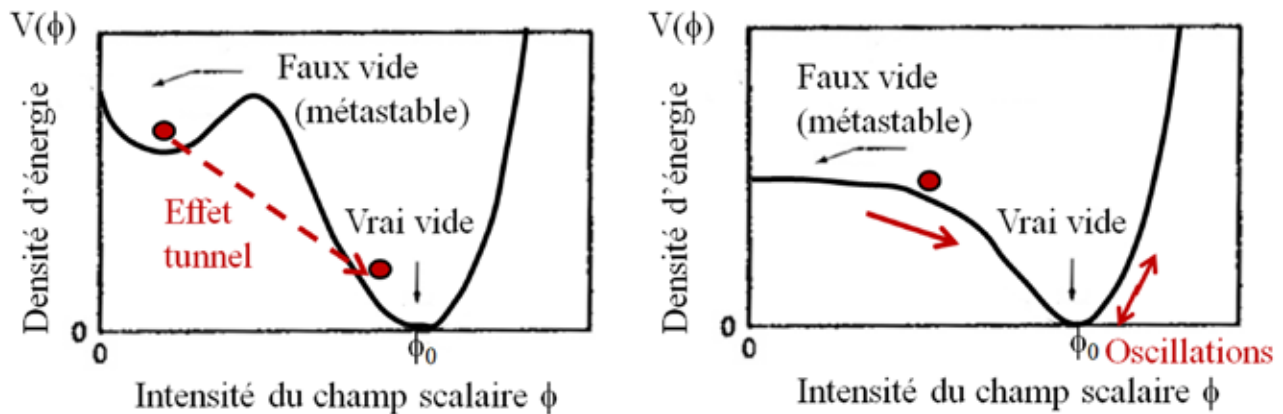


Fig.6. Un des premiers modèles d'inflation (à gauche) : un champ scalaire (inflaton) a pour condition initiale une densité positive, correspondant à un faux vide, métastable. Par effet tunnel, le champ peut traverser la barrière, et rejoindre l'équilibre correspondant au « vrai vide ». Pour éviter cette fin brutale de l'inflation, et la dissipation trop rapide de l'énergie, la nouvelle inflation (à droite), n'a plus de transition de phase. Le champ va rouler lentement (sans beaucoup d'énergie cinétique) vers l'état d'équilibre stable, correspondant au vrai vide (selon la flèche rouge), et va osciller dans le puits de potentiel.

Le champ scalaire de l'inflaton est toujours une hypothèse, et la particule correspondante, ou boson de spin 0, n'a pas encore été détectée. La seule particule scalaire détectée à ce jour dans le modèle standard de particules est le boson de Higgs. Certains ont essayé de construire un modèle à partir de ce boson, mais cela ne fait pas consensus.

L'inflation est une période d'expansion exponentielle, d'un état du vide métastable, et l'expansion refroidit très vite l'Univers : la température baisse d'un facteur 100 000 environ. Cette température relativement basse est maintenue pendant la phase d'inflation. Lorsque l'inflation se termine, la température revient à la température initiale ; c'est ce qu'on appelle le réchauffement ou la thermalisation car la grande énergie potentielle du champ d'inflaton se désintègre en particules et remplit l'Univers de particules du modèle standard, y compris les photons, commençant la phase de l'Univers dominée par le rayonnement.

Inflation éternelle

Il est difficile d'arrêter l'inflation partout. On peut l'arrêter dans une bulle en particulier, avoir un réchauffement, et la création de particules dans un univers, mais l'espace continue son expansion ailleurs. Comme le montre la figure 7, le faux vide poursuit sa folle inflation et remplit la plupart du volume. Les univers qui se sont formés n'en occupent qu'une infime fraction.

Chaque univers évolue indépendamment, selon les valeurs initiales des paramètres quantiques. La fraction de matière, de rayonnement, d'énergie noire, ou la constante cosmologique sont aléatoires dans chaque univers, qui ont des destins tous différents, expansion indéfinie, ou qui se retournent en Big Crunch. L'inflation s'auto-entretient, d'une façon chaotique, et indéfinie. Il n'y a plus de début ni de fin, c'est l'inflation éternelle, qu'a décrite Andrei Linde dès 1986.

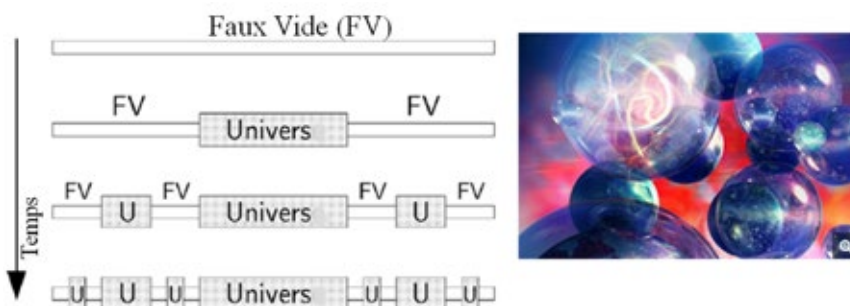


Fig.7. L'inflation peut s'arrêter pour former un univers. Mais des régions de notre espace-temps continuent d'être remplies de faux vide, en expansion exponentielle. Dans cette figure, on a supprimé l'expansion de l'espace, pour permettre de voir les univers. Il est ainsi possible que plusieurs univers se forment, mais l'espace entre eux s'étend, et ils s'éloignent inexorablement. À droite, une vue d'artiste de ces multivers.

Contraintes observationnelles

L'inflation n'est encore qu'une hypothèse, qui permet de résoudre plusieurs problèmes en cosmologie, mais demande à être vérifiée. Une prédiction de l'inflation est l'existence d'ondes gravitationnelles primordiales. Cette signature n'existerait pas dans les modèles alternatifs. Plusieurs groupes ont essayé de trouver cette signature dans l'observation du fond diffus cosmologique. La polarisation de ce rayonnement dans les ondes millimétriques, et surtout la polarisation de symétrie B (similaire à la symétrie d'un champ magnétique), serait un indicateur certain. Mais il existe des avant-plans, comme la poussière de notre galaxie la Voie lactée, ou même les lentilles gravitationnelles sur la ligne de visée, qui viennent brouiller le signal. À ce jour, la signature des ondes gravitationnelles primordiales n'a pas encore pu être mise en évidence, bien que les observations du satellite Planck soient tout à fait compatibles avec la théorie de l'inflation. Dans un futur proche, cette signature sera peut-être détectée.

Alternatives à la théorie de l'inflation

Bien que l'inflation soit l'hypothèse la plus admise par les spécialistes, elle a aussi ses détracteurs, et surtout il faut reconnaître que nous ignorons encore la physique de l'Univers à l'échelle de Planck, lorsque la mécanique quantique devrait se marier avec la gravité. Ces deux théories souffrent de contradictions et d'incompatibilités, et la gravité quantique est un

chantier où plusieurs théories s'affrontent. Il est certain que la singularité du Big Bang ne doit pas exister, et la solution doit se trouver dans la future théorie de gravité quantique.

Dans certains modèles, notamment ceux de la gravité quantique à boucle, la singularité du Big Bang est résolue par un rebond ou un « Big Bounce ». L'univers serait cyclique, alternant expansion et contraction (cf. figure 8). Nous serions dans une de ces phases d'expansion. Un de ces modèles cycliques est développé par Paul Steinhardt, autrefois un des promoteurs de la théorie de l'inflation. Dans la théorie des cordes, il suppose que chaque Big Bang correspond à la collision entre deux branes. Notre Univers est restreint alors à un nombre limité de dimensions de l'espace-temps (les branes), alors que l'espace pourrait contenir 11 ou 26 dimensions au total.

En conclusion toute provisoire, le modèle inflationnaire est aujourd'hui privilégié par les observations. Il résout les problèmes de platitude, d'horizon, d'homogénéité, et il fournit des fluctuations quantiques initiales, capables de développer les structures, avec le spectre de puissance observé. Il existe toutefois des problèmes d'ajustement fin, de non-prédictibilité, à ce modèle qui conduit à l'inflation éternelle, et à l'existence possible de multiples univers. L'observation d'ondes gravitationnelles primordiales pourrait trancher dans un proche avenir.

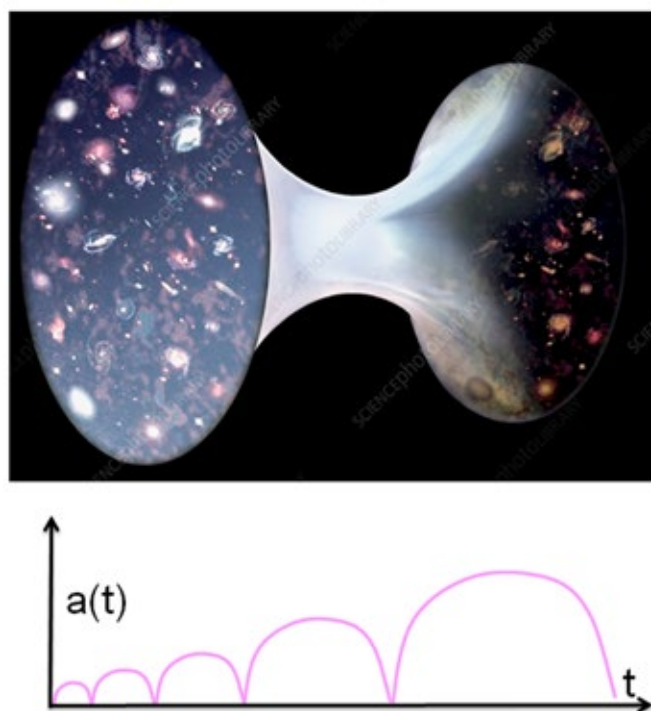


Fig.8. Le modèle d'univers cyclique. Vue d'artiste du passage par le Big Crunch et un rebond.
L'échelle caractéristique de l'Univers pourrait comporter une suite de rebonds.

GLOSSAIRE

Brane : dans la théorie des cordes, les particules sont représentées par des cordes à une dimension. Il existe aussi des membranes à deux dimensions, et par généralisation des « branes », à plusieurs dimensions. Nous vivons ainsi dans un sous-espace (appelé « 3-brane »).

Brisure de symétrie : un système peut posséder à un moment donné une symétrie, qui se brise lorsqu'une variable de son environnement change. Par exemple un système ferromagnétique n'est pas aimanté au-dessus de sa température critique T_c . Puis en dessous de T_c , les moments magnétiques au niveau atomique s'alignent, le matériau devient aimanté, avec une direction d'aimantation privilégiée. Il y a brisure spontanée de symétrie.

Champ scalaire : un champ scalaire est un champ dont les particules sont de spin zéro. C'est le cas du champ de Higgs, associé au boson de Higgs (ou Brout-Englert-Higgs, BEH).

CMB : acronyme de **Cosmic Microwave Background** ou, en français, fond diffus cosmologique.

Effet tunnel : en mécanique quantique, une particule, décrite par sa fonction d'onde, a une probabilité non nulle de traverser une barrière de potentiel. L'exemple le plus connu d'effet tunnel est celui de l'émission de particules α par un noyau radioactif. Un tel effet est inconnu en physique classique.

Fluctuation quantique : en physique classique l'espace-temps « vide » (absence de matière) est totalement dépourvu de caractéristiques. En mécanique quantique le vide est l'état dans lequel aucun quanta de champ n'est excité, c'est-à-dire qu'aucune particule n'est présente. C'est « l'état fondamental » d'énergie minimale. Cependant ces champs ne conservent pas une valeur constante mais fluctuent incessamment autour de zéro.

Inflaton : la particule du champ scalaire présent lors de la période d'inflation de la même façon que le photon est la particule du champ électromagnétique.

Dimension de Planck : la combinaison des trois constantes fondamentales $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ USI (constante réduite de Planck), $c = 3 \cdot 10^8$ m/s (vitesse de la lumière) et $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ USI (constante gravitationnelle) permet de construire une longueur caractérisant le monde subatomique.

$$\text{Longueur de Planck : } l_p = \sqrt{\frac{G \cdot \hbar}{c^3}} = 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Nucléosynthèse primordiale : dans le premier quart d'heure après le Big Bang, la température et la densité de l'Univers permettent la synthèse des éléments légers : l'hydrogène (un proton) et ses isotopes deutérium (un proton, un neutron) et tritium (un proton, deux neutrons), l'hélium-4 (deux neutrons et deux protons) et son isotope l'hélium-3 (deux protons, un neutron).

Quarks : constituants élémentaires des protons et neutrons.

Spectre de puissance : on peut décomposer un signal dans ses diverses composantes de fréquence spatiale. Le spectre de puissance décrit le poids des diverses composantes : si le signal a beaucoup de petites structures, le spectre de puissance sera très élevé dans ces hautes fréquences spatiales.

Supernova de type Ia : explosion dans une étoile binaire, composée d'une naine blanche (fin de vie d'une étoile comme le Soleil), et d'un compagnon dont une partie de l'enveloppe de gaz tombe brusquement sur la naine blanche.



École d'été 2020

La 37^e école d'été d'astronomie « Le temps en astronomie » est reportée à 2021.

En raison des nombreuses incertitudes liées au contexte épidémique actuel, il nous a semblé préférable de reporter à l'année prochaine notre école d'été, initialement prévue du 18 au 25 août.

Solutions des mots croisés page 14

Horizontalement

1. Scientifique. 2. Plate. Minuit. 3. ha. Âge. CSA. 4. Ératosthène. 5. rk. Tweet. 6. IEN (inspecteur de l'Éducation nationale). EEA (École d'été d'astronomie). iou. 7. Optr. Coque. 8. Uhuru. Algues. 9. Enseignement.

Verticalement

1. Sphérique. 2. Clarke. hn. 3. IA. Nous. 4. États. Pré. 5. nég. Étui. 6. Ester. 7. IM. TWA. An. 8. Fiche. Clé. 9. INSEE. OGM. 10. Quantique. 11. ui. Ouen. 12. Été. Ouest.

École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :

<http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie>

Les productions du CLEA

En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.

Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors-série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de recherche pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, mathématique et astronomie, le Soleil, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

HS14 Le Soleil (2018)

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

Maquettes

Astrolabes, cartes du ciel, fuseaux horaires, lunoscopes, nocturlabes, zodiaques ou lot des six maquettes.

Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site web

Une information toujours actualisée

<http://www.clea-astro.eu>



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €



Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

<http://www.clea-astro.eu>

Siège social :

CLEA

Case courrier 7018

Université Paris Diderot - Paris 7

Bâtiment Sophie Germain

IREM de Paris

8, place Aurélie Nemours

75205 Paris cedex 13

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

<http://ventes.clea-astro.eu/>

Site web :

contact@clea-astro.eu

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2020 : **10 €**

Abonnement CC pour 2020 : **30 €**

Adhésion + abonnement CC : **35 €**

Adhésion + abonnement CC

+ abonnement numérique : **40 €**

Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Directeur de la Publication : Frédéric Pitout

Rédacteur de publication : Christian Larcher

Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 170 été 2020