

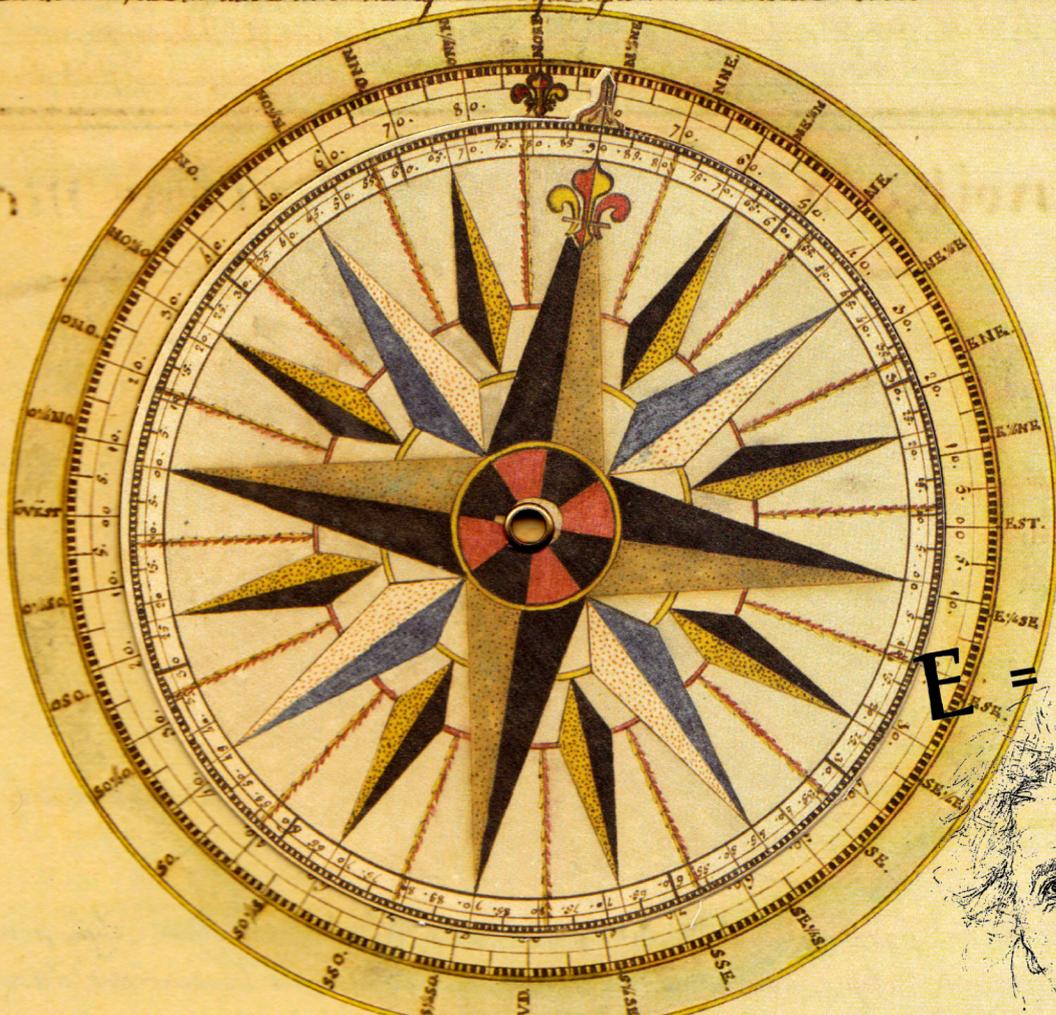
LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 138 - Juin 2012 7 €

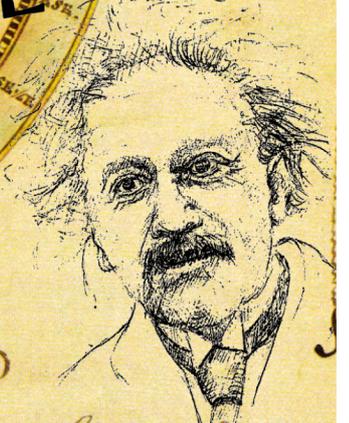
*le beau coup de veur dans le routhé quil pourroit faire
l'acause de la Variation du compas ?
jusqu'à Cylo phytos Ôsphere & les Mathématiqueurs Mont put decouvrir Non plus, que le flux & reflux de*

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

ronte Saillours, elle fut utile aux Navigateurs qui ignorent les Moins d'observer l'variation



$E = mc^2$



. Suite .

*de quel côté est l'variation, & de combien
le Nombre qui l'exprime les degrez deva
vient si elle est Nord. Est,
que l'on ajuste cette boussole aux disiers degrez de variation connue dans les Mers. Ô
dans le cours d'un Voyage soit pour l'observer soit même ou pour l'avoir après
la boussole étant corrigée de variation la route que la carte indique pour aller d'un lieu
à l'autre quil faut suivre & la quelle on doit appliquer les lieux de chemin au on*

Numéro 138 - été 2012

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 :

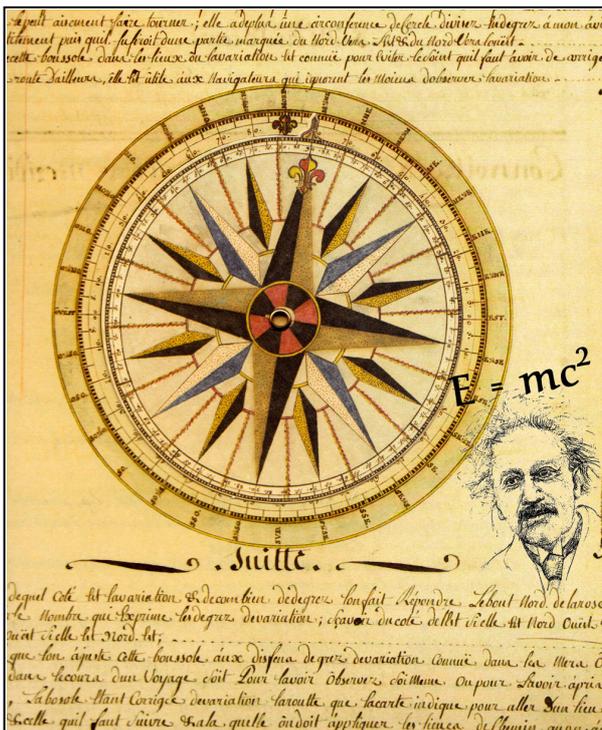
Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim,
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2011

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière: Roseline Jamet
Trésorier Adjoint : Jean Ripert
Secrétaire : Jean-Luc Fouquet
Secrétaire Adjoint : Christian Larcher

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
Communication : Charles-Henri Eyraud
École d'Été d'Astronomie: Danièle Imbault
Responsables du site :
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



Merci à tous celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons : Xavier Artru, Pierre Causeret, Jean Eisenstaed, Olivier Gayraud, Véronique Hauguel, Jean-Jacques Hillairet, Christian Larcher, Pierre Le Fur, Pierre Magnien, Thierry Mourot, Lionel Muller, Andy Richard, Jean Ripert, Béatrice Sandré.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 138, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Image de couverture ; cette rose double est extraite du "Traité de Navigation" de Denoville, un manuscrit de 1760 découvert par l'IREM de Rouen à la bibliothèque municipale Jacques Villon. La rose des vents du dessous est fixée sur l'aiguille aimantée du compas de route, la rose du dessus est décalée de la déclinaison magnétique et indique donc le nord géographique. On y a superposé un dessin d'Albert Einstein de Daniel Bardin, la relativité étant aussi bien présente dans ce numéro.

Les Cahiers Clairaut Été 2012 n° 138

Éditorial

Vous recevrez probablement ce numéro des Cahiers Clairaut avec un peu de retard. Nous souhaitons en effet tenir compte du passage de la planète Vénus devant le Soleil, dernier passage observable avant celui prévu pour le 10 décembre 2117...

Le thème choisi pour ce numéro concerne les points cardinaux. Comment définir le pôle Nord de la Terre mais également celui des autres planètes du système solaire ? Une occasion de retrouver l'origine de certains mots comme boréal, austral, levant, ponant, orient, occident ou septentrion.

Chacune des planètes du système solaire tourne sur elle même autour d'un axe incliné d'un angle spécifique (appelé obliquité) sur le plan défini par sa trajectoire. Vous découvrirez dans cet article certaines hypothèses avancées pour justifier les particularités de chaque planète.

Comme dans les numéros précédents nous vous proposons de nombreuses activités à mener avec vos élèves : par exemple « comment s'orienter la nuit avec les étoiles » ou des exemples d'activités interdisciplinaires comme ceux de l'atelier scientifique sur la navigation, du lycée Raoul Follereau de Nevers, qui met en pratique la maxime de leur lycée : « Des voiles et toi, dévoile-toi : ouvre ta culture à tous les vents »

À l'école ou au collège, réalisez le dessin d'une « rose des vents » ou suivez le renard afin de reconstituer l'itinéraire d'un bateau à voile, ou encore utilisez une « carte-portulan » ou « carte à rumb » comme le faisaient les marins à la fin du Moyen Âge...

Au niveau lycée, partez à la découverte des messages secrets transmis par la lumière qui provient de la Lune en lisant le compte rendu d'un des sujets primés aux Olympiades de physique de cette année.

Les prochains programmes de terminales scientifiques introduisent quelques aspects particuliers de la relativité restreinte. Conformément à une des démarches suggérée dans les préambules des programmes vous trouverez une passionnante approche historique sur la relation « lumière et relativité » ainsi qu'un « article de fond » sur les « horloges à muons ». Nous souhaitons à toutes et tous d'excellentes vacances d'été.

Christian Larcher, pour l'équipe.

Histoire

Lumière et relativité

Jean Eisenstaedt p 2

Thème : LES POINTS CARDINAUX p 9

Notions de bases

Pierre Causeret p 10

Article de fond

Obliquités des planètes, chaos et stabilité

Andy Richard p 14

Avec nos élèves

Comment peut-on s'orienter de nuit à l'aide des étoiles ?

Olivier Gayraud p 18

Jeux

Mots croisés p 20

Avec nos élèves

Atelier scientifique : navigation

Thierry Mourot p 21

Avec nos élèves

Rose des vents et ses applications

Véronique Hauguel p 23

Article de fond

Désintégration des muons, une horloge relativiste

Pierre Magnien p 27

Ciel d'été

Pierre Causeret p 32

Avec nos élèves

La lumière de la Lune nous cache-t-elle bien des secrets ?

Club d'astronomie du lycée Léonard de Vinci à MONTAIGU p 33

Reportage

Images du transit de Vénus devant le Soleil p 36

Vie de l'association

Le CLEA dans les stages de formation

Académies de Bordeaux et Nice p 37

Solutions mots croisés p 40

Lumière et relativité.

Jean Eisenstaedt,

SYRTE, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC ; 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France.

L'optique du 19^e siècle est complexe et prépare mal à la relativité. Elle y est même en quelque sorte opposée car les théories de l'éther ne sont pas compatibles avec le principe de relativité. Il n'est donc pas surprenant que des difficultés pédagogiques – et c'est un euphémisme – se soient révélées, non seulement chez les étudiants mais aussi chez les physiciens eux-mêmes. Cette mutation est loin d'être accomplie aujourd'hui. La révolution einsteinienne a plus d'un siècle, mais elle n'est pas encore vraiment entrée dans les esprits ni dans beaucoup de manuels.

J'insisterai avant tout sur ces questions sans pouvoir en développer ici les théories ni les observations et expériences, complexes et souvent obscures. Ce n'est pas ici le lieu de reprendre en détail le cheminement sinueux, incertain de l'histoire et des théories de la lumière. Mais de proposer une sorte de schéma entre histoire et concepts.

Les questions essentielles.

Après que Römer ait montré en 1676 que la vitesse de lumière était finie, la question n'intéresse guère avant les travaux d'Arago au tout début du 19^e siècle. Arago qui pose en fait toutes les bonnes questions, sans en trouver bien sûr l'issue.

Le point essentiel c'est que la constance de la vitesse de propagation de la lumière est toujours « vérifiée » mais toujours problématique car incompatible :

- avec le « théorème » de l'addition galiléenne des vitesses de la source et de l'observateur terrestre.
- avec l'aberration qui exige à la fois la constance de la vitesse de la lumière et la prise en compte de la vitesse de la Terre.
- avec l'effet Doppler-Fizeau pour la lumière (incomprise par Doppler) qui impose que l'on tienne compte de la vitesse de la source aussi bien que de celle de la Terre.

Aucune des deux grandes théories, la théorie newtonienne de l'émission au 18^e siècle, les théories ondulatoires de Fresnel, Maxwell ou Lorentz au 19^e siècle ne donneront satisfaction.

Il faudra attendre 1905 et la cinématique relativiste, la théorie de la relativité restreinte d'Einstein pour que tous ces problèmes trouvent une solution cohérente.

La relativité restreinte a assez vite été acceptée par les physiciens théoriciens. Mais, parce qu'elle met en cause l'espace et le temps pour les fondre en un

espace-temps, son interprétation a posé de délicats problèmes conceptuels. Le paradoxe des jumeaux en est le paradigme. On ne s'étonnera pas que ces problèmes se soient exprimés d'une manière encore plus forte en relativité générale dont l'interprétation ne s'éclaircira que peu à peu, en particulier grâce aux travaux de Minkowski. La « générale » permettra la clarification des concepts de la « restreinte ». C'est pourquoi nous nous attacherons à en poser les bases qui simplifient les concepts fondamentaux des relativités et notre manière de voir pourvu que l'on veuille bien faire son deuil des concepts newtoniens, ce qui n'est pas le plus simple...

La lumière de Galilée à Einstein.

Revenons-en à Galilée-Descartes-Newton. Au principe d'inertie et à l'addition des vitesses. Le principe d'inertie est basé sur le concept d'état. Le mouvement rectiligne uniforme est un état qui ne diffère pas de l'état de repos. Tous ces états sont équivalents pour les lois de la physique.

Le principe d'inertie, principe de relativité, le théorème de composition des vitesses - qui se démontre à partir des concepts newtoniens et donc euclidiens - sont à la base des théories galiléo-newtonienne, aussi bien quant à la cinématique qu'à la dynamique des corps en mouvement jusqu'au début du 20^e siècle.

Deux théories s'affrontent au 18^e siècle quant à la lumière : la théorie ondulatoire de la lumière et la théorie (corpusculaire) de l'émission qui, dans le droit fil newtonien, dominera jusqu'au début du 19^e siècle.

La théorie de l'émission consiste essentiellement en l'application à la lumière de la cinématique ainsi que de la dynamique newtonienne des corps matériels. La lumière est vue comme un corpuscule

lumineux qui est sujet aux mêmes lois qu'un corpuscule matériel ; sa propagation en ligne droite ne pose pas problème. À longue portée elle est sujette à la cinématique des corps matériels, et, pour de nombreux auteurs, à la gravitation. À courte portée elle s'appuie sur la théorie corpusculaire de Newton en tant qu'elle rend compte, - grâce à la loi des sinus - de la réfraction par exemple sur un prisme : l'angle de réfraction est inversement proportionnel à la vitesse de la lumière incidente. La théorie de l'émission implique aussi que la vitesse de la lumière est plus grande dans un milieu plus dense, dans l'eau que dans l'air, un point qui signera, au milieu du 19^e siècle, sa défaite face à la théorie ondulatoire.

Mais vu que la vitesse de propagation de la lumière obéit au principe de relativité, ce que l'on ne peut refuser dans un contexte newtonien, elle s'ajoute vectoriellement à la vitesse relative étoile-observateur. Par ailleurs, depuis John Michell, (Angleterre 1724-1793) Georg von Soldner (Prusse/Allemagne 1776-1833), et bien d'autres auteurs, on soutient parfois que la lumière doit être sensible à la gravitation. Une hypothèse que retiendra Arago qui s'intéresse de près, dès le début du 19^e siècle, aux équations de la propagation de la lumière. Pour Arago la vitesse de propagation de la lumière (en module) dans le vide ne peut être constante. Il reprend alors, de John Michell, de Robert Blair, l'idée selon laquelle une mesure de réfraction, par exemple sur un prisme, permet de mesurer la vitesse de la lumière. On pourra donc en déduire la vitesse relative à l'observateur de la lumière provenant de sources en mouvement. C'est bien sûr là l'essence de l'effet que Christian Doppler comprendra pour le son, qu'Armand-Hippolyte Fizeau explicitera pour la lumière (ce que n'avait aucunement fait Doppler) l'élaborant d'ailleurs parallèlement dans le contexte de la théorie ondulatoire.

Arago se servira d'un prisme pour mesurer la vitesse - en module - de la lumière et il s'attendra à trouver des inégalités de réfraction, inégalités qui devraient témoigner du mouvement de la Terre, des planètes, des étoiles. Mais l'angle de réfraction demeure constant, ce qu'Arago a bien du mal à comprendre, ne pouvant penser que la théorie de Newton serait là en défaut. Ainsi pose-t-il, au tout début du 19^e siècle, (mais après Robert Blair sur lequel il s'appuie), la question de l'optique des corps en mouvement d'une manière cohérente avec le principe de relativité et l'addition des vitesses. L'article d'Arago, méconnu, longtemps mal

interprété, ne sera pas publié avant le milieu du siècle.

Venons-en à l'aberration, découverte en 1728 par James Bradley. L'image d'une étoile vue par un observateur terrestre semble décrire une ellipse liée au mouvement de la Terre autour du Soleil. C'est là une observation fondamentale en tant qu'elle exhibe la vision copernicienne. D'autre part la théorie de Bradley montre que l'angle d'aberration est en v/c où v est la vitesse relative de l'étoile émettrice par rapport à l'observateur, c , la vitesse de la lumière. Les mesures, relativement précises, de l'angle maximal d'aberration (puisque l'aberration dépend de l'angle que fait, à un moment donné, la trajectoire de la Terre avec la direction de l'étoile) montrent qu'il est constant. Selon Bradley la constante d'aberration est de 20,2" ; ainsi le rapport de la vitesse de la lumière à celle de la Terre sur son orbite est donc de 10 210 à 1, dont il s'ensuit que la lumière se propage depuis le Soleil en 8 minutes 12 secondes, résultat qui reste cohérent avec les mesures "à la Römer" - liées aux tables des éclipses de Jupiter et améliore la précision de la mesure de la vitesse de la lumière. Ainsi, parce que l'angle d'aberration maximal est constant, on parle de la "constante d'aberration", on ne doute guère que la vitesse de la lumière soit elle aussi constante. Quant à Arago il croit aux variations, pour lui inéluctables, de la vitesse de la lumière qui devraient affecter l'aberration, mais l'effet est encore plus faible que l'effet de réfraction ; les mesures ne sont pas assez précises pour trancher.

Pour ce qui concerne la théorie ondulatoire, développée par Christiaan Huygens, puis par Leonhard Euler, la lumière est une onde. Huygens parvient à montrer, par de complexes développements, comment la lumière peut se propager en ligne droite. L'éther y joue un rôle essentiel. C'est un espace absolu, un espace physique dans lequel les ondes lumineuses sont en quelque sorte gelées. Ainsi est-il évident que la vitesse de la lumière y est constante. Mais alors, comment conjuguer le mouvement de la lumière, ceux du corps émetteur, de l'observateur ?

Dès la fin des années 1810 Arago, qui doute désormais de la théorie de l'émission, soutiendra le système des ondulations de Fresnel. La théorie de Fresnel s'adresse avant tout à des phénomènes locaux, interférences, diffraction, polarisation, ouvrant ainsi un champ essentiel de la physique de la lumière où ne se pose pas la question des possibles variations de sa vitesse dans le vide. Les principes du système des ondulations seront pour longtemps à la base des différentes versions de la théorie ondulatoire de la lumière et donc de

l'optique des corps en mouvement. Ils permettront de rendre compte des interférences, de la diffraction, de la polarisation et, d'une manière plus ou moins convaincante selon le cas, de l'aberration, de l'expérience d'Arago et de l'effet Doppler-Fizeau.

Du côté de la source, il fallait donc, si l'on voulait comprendre les résultats de Bradley, que la vitesse d'émission de la lumière ne dépendît pas de celle de la source, ce que la théorie ondulatoire permet simplement grâce à l'éther. Quant à l'action de la gravitation sur la lumière, elle est alors impensable d'un point de vue ondulatoire. Mais, du côté de l'observateur, il fallait bien, si l'on voulait expliquer l'ellipse d'aberration, que la vitesse apparente de la lumière dépendît de celle de la Terre.

Fresnel va donc devoir concilier ces exigences. Afin de rendre compte de l'ellipse d'aberration, il suppose que seuls les corps transparents entraînent leur éther mais en ne leur communiquant qu'une fraction, qui dépend de leur indice de réfraction, de leur vitesse. Ainsi la Terre et le prisme, bien qu'étant au repos l'un par rapport à l'autre, ne sont-ils pas dans le même état de mouvement par rapport à l'éther. Ces hypothèses étranges, *ad hoc*, intellectuellement peu satisfaisantes, permettent à Fresnel de rendre compte aussi bien de l'aberration que des résultats, définitivement « négatifs » pour Fresnel, de l'expérience d'Arago.

Malgré les travaux d'Arago, la question de la vitesse de propagation de la lumière ne se pose pas vraiment avant la seconde moitié du 19^e siècle. Il s'agira de comparer la vitesse de la lumière dans l'eau en mouvement, une expérience que réalisera Léon Foucault en 1850 par la méthode du miroir tournant, expérience qui signe la victoire définitive de la théorie des ondulations sur celle de l'émission. La détermination de la vitesse de propagation de la lumière est alors essentielle et de nombreuses expériences sont réalisées en particulier par Alfred Cornu, Eleuthère Mascart, Albert Michelson.

En 1851, Fizeau vérifiait la formule d'entraînement de l'éther de Fresnel avec une précision de 1/100 en mesurant la vitesse de la lumière dans de l'eau en mouvement. Il utilise une méthode d'interférences mise au point par Fresnel et Arago. Les résultats sont compatibles avec la théorie des ondulations de Fresnel qui pouvait désormais prétendre à dominer l'optique.

Pourtant la théorie des ondulations manquait de cohérence et, dans la seconde moitié du 19^e siècle, de nombreux théoriciens contesteront l'étrange hypothèse de Fresnel. Ainsi Mascart critiquera-t-il sèchement le raisonnement qui conduisit Fresnel à sa formule d'entraînement des ondes par le

mouvement des corps. Mascart fut, avant Michelson, un de ceux qui s'appliquèrent avec le plus d'acharnement à mettre en évidence l'effet du mouvement de la Terre sur la lumière.

Fizeau, ne reprend pas à son compte le résultat "négatif" de l'expérience d'Arago. Il croit à l'effet Arago, aussi bien en réfraction qu'en fréquence, rien d'autre que ce que l'on nomme l'effet Doppler pour la lumière. Ainsi, fonde-t-il l'effet Doppler pour la lumière, aussi bien dans le contexte de la théorie de l'émission que dans celui du système des ondulations, en réfraction et en fréquence.

Il faut souligner aussi que la théorie de l'effet (que l'on dit) Doppler par Fizeau implique deux équations différentes, l'une concernant le mouvement de l'observateur, l'autre celui de la source. C'est que la théorie des ondulations sur laquelle s'appuie Fizeau depuis Fresnel n'est pas cohérente avec le principe de relativité, ce qui bien entendu est lié au caractère absolu de l'éther.

Fizeau s'intéresse aussi aux travaux de Joseph Fraunhofer qui a observé les spectres de plusieurs étoiles et découvert leurs raies. Après 1860, la spectroscopie permettra, grâce aux travaux de Fraunhofer, aux observations de William Huggins, de Pietro Secchi de mesurer l'effet Doppler-Fizeau. Ce n'est qu'après les années 1870 que deviennent vraiment crédibles les premières observations de l'effet. La question de la vitesse de la source qui avait disparu par la porte de l'éther réapparaît par la fenêtre de l'effet Doppler-Fizeau.

En 1864, James Clerk Maxwell, qui vient d'identifier la lumière avec les ondes électromagnétiques, n'a connaissance ni de l'expérience d'Arago ni de l'article de Fizeau. Mais il repense l'effet Doppler-Fizeau pour la lumière (aussi bien en réfraction qu'en fréquence) et propose une expérience destinée à détecter le mouvement de la Terre à travers l'éther. Il montre qu'en théorie de Fresnel l'effet Doppler-Fizeau est caché, n'apparaissant qu'au "second ordre" [en $(v/c)^2$]. C'est précisément ce calcul qui poussera Michelson à faire des expériences précises afin de détecter l'effet du mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Le résultat est négatif, la vitesse de la lumière est aussi bien indépendante de la vitesse de la source que de celle de l'observateur terrestre.

De la fin du 19^e siècle au tournant du 20^e, Hendrik Antoon Lorentz proposera de nombreuses variantes de la théorie de Fresnel, s'appliquant à résoudre avec rigueur aussi bien la question de l'aberration que celle de l'expérience d'Arago. Il développe une explication de l'aberration d'une technicité quelque peu écrasante. Afin de rendre compte des questions posées, des expériences et des observations, il devra

s'appuyer sur de multiples conventions, onze hypothèses *ad hoc*, selon l'historien Gerald Holton. C'est dire l'état de complexité du sujet.

Et Holton de conclure son analyse en comparant l'œuvre de Lorentz à celle d'Einstein : « *L'œuvre de Lorentz fait penser à l'entreprise d'un capitaine courageux, d'un homme d'exception tentant le sauvetage d'un vieux rafiot, rafistolé de toute part, en péril sur le récif de l'expérience; tandis que l'œuvre d'Einstein, [...] survient comme le dépit créateur, récusant ce moyen de locomotion même – l'abandonnant pour un véhicule de conception bien différente* ».¹

C'est une toute autre manière de voir, une indispensable révolution qu'apporte Einstein en 1905.

La relativité, théorie des invariants.

Pour mieux comprendre les théories de relativité, il faut en revenir au temps, à la simultanéité. Mais tout d'abord il est nécessaire de repenser, de préciser, le terme « relativité », « la soi-disant théorie de la relativité » dira Einstein. Un terme qu'il n'a pas choisi, auquel il aurait - à juste titre - préféré celui de théorie des invariants. Car avant tout, en "relativité" les lois physiques doivent prendre une même forme dans tous les repères inertiels, galiléens.

En cinématique classique - qui s'applique avant tout aux corpuscules matériels - les transformations de coordonnées galiléennes permettent de passer d'un système inertiel à un autre. Mais dans le cadre de la cinématique relativiste, la relativité restreinte, ce sont les transformations de Lorentz qui jouent ce rôle. Alors, non seulement les lois de la mécanique mais aussi celles de l'optique, de l'électromagnétique prennent la même forme dans tous les systèmes inertiels. Mais la vision que l'on a d'un événement physique, d'un système inertiel à l'autre, est relative.

C'est là en fait un problème de projection, proche des techniques du dessin industriel ou de l'architecture. Pour savoir précisément quelles sont les cotes de l'objet que l'on veut fabriquer, du bâtiment que l'on souhaite construire, on en projette la structure, la forme, sur un plan, et sur chacun des côtés. Si l'on change de représentation, en souhaitant dessiner le bâtiment de trois-quarts, ou en vue perspective, on conçoit qu'il faille un instrument mathématique qui permette cette transformation, ce changement de

point de vue. Notons en passant qu'en mécanique, en relativité, ce sera le rôle du calcul tensoriel de passer d'un système de coordonnées à un autre. Mais il ne s'agit que d'un instrument permettant la représentation du bâtiment qui, lui, reste invariant, identique à lui-même. On voit plus clairement dans cet exemple banal à quel point le caractère "relatif" de la relativité restreinte ou générale est problématique. Il s'agit simplement d'un relativisme de la description : l'essence de la théorie, c'est l'invariance.

Un invariant c'est une grandeur physique intrinsèque, propre à l'objet, mesurée dans le repère même du mouvement, le repère « propre ». Mais, vu d'un autre repère, par un autre observateur, elle dépend du mouvement relatif des deux repères ; d'où le terme de relativité... qui n'a rien à voir avec le "tout est relatif" des philosophes.

Le temps dans la théorie de la relativité.

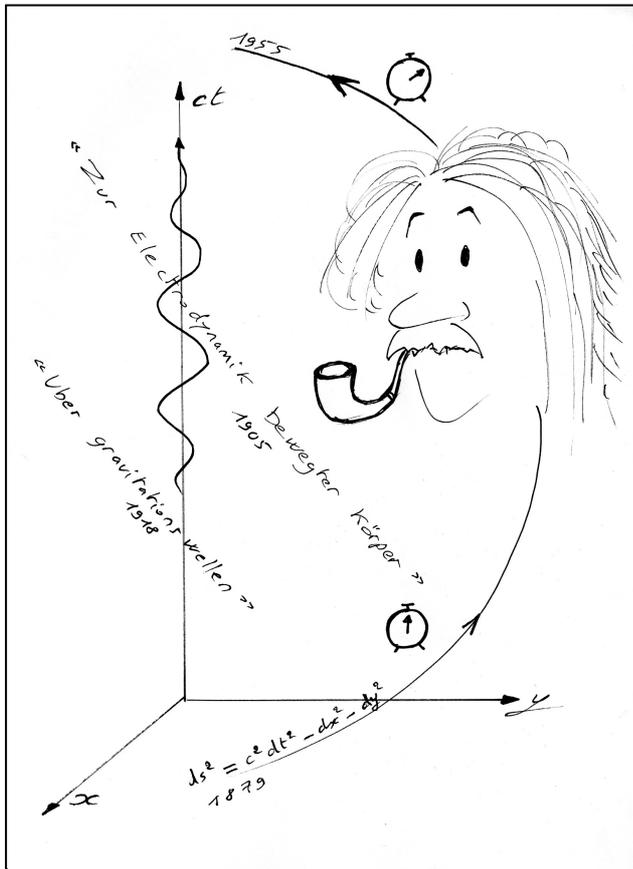
Le temps est sans aucun doute le concept premier, central, de la physique, c'est aussi celui de la relativité. Depuis l'antiquité grecque, sa définition, sa mesure, étaient fondées sur l'observation, le dogme de l'uniformité de la rotation des Cieux, puis de la Terre. Dès le 18^e siècle, on s'inquiéta de la régularité de la rotation de la Terre dont Kant prédira le ralentissement dû à la dissipation d'énergie liée au phénomène des marées. Mais on ne parviendra pas à en déceler quelque irrégularité avant la fin des années 1920. Jusqu'alors la Terre était une bonne horloge. À la logique de Newton basée sur un temps absolu, universel, succédera une mesure du temps beaucoup plus physique, que Maxwell pressent déjà en 1873. Il s'agira d'en baser la mesure sur les fréquences atomiques, mais ce n'est encore qu'une idée, très juste, mais qui devra longtemps attendre avant d'être comprise et encore plus avant d'être appliquée.

Dans l'article d'Einstein fondant en 1905 une nouvelle cinématique "relativiste" (à noter que la cinématique galiléenne est aussi relativiste dans la mesure où le terme relativité renvoie avant tout au principe de relativité), le temps est, à travers la question de la simultanéité, en première ligne : « *tous les jugements dans lesquels le temps joue un rôle, écrit-il, sont toujours des jugements sur des événements simultanés* », et ajoute-t-il « *lorsque par exemple, je dis : Tel train arrive ici à 7 heures, cela signifie à peu près : le passage de la petite aiguille de ma montre sur le 7 et l'arrivée du train sont des événements simultanés* »²

¹ (Holton 1981, p. 136).

² (Einstein 1905, 1993, 32).

Il montrera ensuite qu'il n'y a pas de simultanéité à distance : « nous n'avons pas le droit d'attribuer une signification absolue au concept de simultanéité, et que deux événements qui, du point de vue d'un système de coordonnées, sont simultanés ne peuvent plus être considérés comme des événements simultanés lorsqu'ils sont vus d'un autre système de coordonnées en mouvement par rapport au premier ». ³



Il donne comme exemple une montre, qui « se trouvant à l'équateur doit retarder très légèrement par rapport à une montre de fabrication identique placée à l'un des pôles terrestres ».

Afin de comparer le fonctionnement à distance de ses horloges en mouvement, ce qui n'est évidemment pas simple, le meilleur recours est la lumière dont Einstein suppose la vitesse de propagation dans le vide et dans un système inertiel, constante.

Il montre ensuite que l'on peut concevoir une relation entre le lieu et le temps des événements, telle que tout rayon lumineux possède la même vitesse de propagation c par rapport à deux systèmes inertiels en mouvement l'un par rapport à l'autre. Il démontre que cette relation n'est autre que le système d'équations des transformations de Lorentz.

³ (Einstein 1905, 1993, 35).

Ainsi, renversant les termes du problème, Einstein pose que la vitesse de la lumière est une constante universelle. Conservant le principe de relativité, il est conduit à une autre cinématique que celle de Galilée, de Newton, à la relativité "restreinte" qui impose une autre loi d'addition des vitesses, qui n'est autre que celle de Lorentz. Car la nouvelle cinématique, implicite dans la théorie de Maxwell, - les équations de Maxwell sont invariantes par ces transformations de Lorentz - justifie, en donnant en particulier un sens plus clair au temps, les lois d'addition des vitesses de Lorentz. Cette cinématique, la relativité restreinte, suffit à résoudre les questions posées depuis près d'un siècle par l'aberration et l'effet Doppler-Fizeau ; ce qu'il fait dans son article de 1905. Un travail splendide qui révolutionne la physique. Il en déduira aussitôt l'équivalence « masse-énergie » : $E = mc^2$. Car "si un corps cède l'énergie E sous forme de rayonnement, sa masse diminue de E/c^2 ."

La simultanéité absolue, le temps absolu de Newton sont caducs. Mais Einstein a aussi dû rejeter, et c'est essentiel, deux hypothèses, empruntées à la mécanique classique, « que rien ne justifie », d'une part, que « l'intervalle de temps qui sépare deux événements est indépendant de l'état de mouvement du corps de référence » d'autre part que « la distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante de l'état de mouvement du corps de référence » ⁴ En fait, il pose comme essentiel le temps propre entre deux événements d'une même trajectoire. Plus tard il devra aussi rejeter le concept de rigidité.

En 1905, la théorie de Newton de la gravitation est restée à l'écart de cette révolution. Mais pour Einstein, il n'est pas possible, il n'est pas acceptable, que l'électromagnétisme - où la lumière joue un rôle central - soit basé sur la cinématique relativiste tandis que la gravitation l'est sur celle de Newton - dans laquelle la lumière ne joue aucun rôle. La nature ne peut être basée, structurée par deux théories antagonistes. Pour Einstein cela est tout simplement insupportable, le monde de la physique ne peut être divisé sur un point aussi fondamental. Ce qui le conduira, dix ans plus tard, à la relativité générale.

En 1907, alors qu'il met en place les fondements de ce qui sera la relativité générale, il est amené à s'interroger sur l'influence du champ de gravitation sur "les horloges". C'est à ce propos, et semble-t-il pour la première fois, qu'il posera les raies des atomes comme horloges : « il existe des "horloges" qui sont présentes en des lieux de potentiels gravitationnels différents et dont l'allure peut être contrôlée très

⁴ (Einstein 1917, 1976, 33).

précisément : ce sont les sources des raies spectrales », et ajoute-t-il « la lumière qui vient de la surface solaire, lumière émise par une source de ce type, possède une longueur d'onde supérieure d'environ deux millièmes à celle de la lumière émise sur la Terre par des substances identiques »⁵

Concepts et interprétations.

Après ce bref rappel, classique, de l'histoire de l'optique et des théories de relativité, il est indispensable de repenser concepts et interprétations classiques.

Dans la première moitié du 20^e siècle la relativité générale a posé beaucoup de problèmes et après les années soixante, son interprétation sera précisée, bouleversée. L'avènement de « la générale » a permis de simplifier, de mieux comprendre ces questions, ces concepts sur plusieurs points fondamentaux qui se rapportent aux concepts, au temps, aux horloges, aux distances... ce qui n'est pas sans implications quant à l'interprétation de « la restreinte ».

On connaît, - d'une certaine manière, trop bien - le paradoxe des jumeaux de Langevin, lié à la contraction des longueurs, à la dilatation du temps. Je n'entrerai pas dans les détails de ce paradoxe qui a fait couler beaucoup d'encre, et a encombré trop longtemps l'interprétation de la théorie : on s'y perd comme la littérature scientifique aussi bien que de vulgarisation l'ont amplement montré. Ce paradoxe ne nous éclaire pas, tout au contraire. Ces jumeaux ne nous ont guère aidé sinon pour voir qu'il y a là un problème dans la définition du temps, de la distance, de l'espace-temps bien sûr. Tout simplement parce qu'il s'agit d'un paradoxe et donc de l'opinion commune qu'il faut oublier ; une question qu'il faut voir autrement.

Nous vivons, nous pensons un monde pré-euclidien, celui de notre chambre, de nos laboratoires ; la physique moderne, contemporaine, la cosmologie, n'ont pas de raison de ressembler à ce monde-là. C'est un autre monde dans lequel nous amène la relativité, dont nous n'avons pas une expérience personnelle. Comprendre ce monde en référence à notre monde, à nos outils ordinaires, là est le problème. D'autres outils sont indispensables ; il faut oublier ce que l'on sait trop bien, penser autrement le monde de la relativité. Et d'abord se poser de simples questions, si simples qu'elles peuvent étonner.

Que suppose-t-on quant à la distance, la longueur de la règle ? Sa rigidité ? Précisément, la rigidité est un des problèmes du monde d'Euclide, de Newton.

Rigide pour une règle, cela signifie que si je tape à un bout de la règle le signal est aussitôt répercuté à l'autre bout de cette règle : la vitesse du signal est infinie. Ce qui est impossible en relativité restreinte où la vitesse d'un signal est limitée. Aucun signal, aucune particule ne peut aller au-delà d'une vitesse limite que figure celle de la lumière. Nous avons vu qu'en 1905, Einstein n'est pas vraiment clair de ce point de vue, car il emploie encore et ailleurs (Einstein 1905, 1993, 41) le concept de rigidité. La rigidité faisait alors encore partie de la panoplie relativiste.

En fait, ce point est lié à la question de la signification physique des coordonnées, qui sera clairement interrogée dans le cadre de la relativité générale. Einstein sera plus tard très net sur ce point, par exemple dans sa lettre à Paul Painlevé :

« Il faut sans cesse garder à l'esprit que les coordonnées ne possèdent pas de signification physique, ce qui veut dire qu'elles ne représentent pas le résultat d'une mesure, seules les conclusions, accessibles par l'élimination des coordonnées, peuvent prétendre à une signification objective »⁶

Cette question se résout grâce au principe de covariance qui dit, très logiquement, qu'il n'y a pas de raison pour que tel système de coordonnées soit a priori préféré. On comprend qu'alors il n'est pas possible de donner un sens physique à tel système de coordonnées plutôt qu'à tel autre. Ainsi, en relativité générale, les coordonnées (x, y, z, t) , n'ont aucun sens physique et cela est vrai de tout système de coordonnées. Les coordonnées ne sont rien d'autre que des adresses qui vous disent où est telle planète à tel moment, t . Telle année j'habitais à telle adresse.

Mais est-ce si bizarre ? N'est-on pas dans un espace-temps ? Où temps et espace ne sont pas dissociables, n'ont plus séparément de sens. Temps et espace ne sont plus indépendants, ils sont définis d'un seul bloc. Seule la grandeur ds , l'intervalle élémentaire entre deux événements - de genre temps - a un sens ; elle définit le temps propre, s . C'est bien ce que fait remarquer Einstein à la fin de sa lettre à Painlevé : *« l'interprétation métrique de la grandeur ds [c'est] le noyau profond de la théorie elle-même ».*

Bien évidemment ces conclusions s'appliquent aussi en relativité restreinte qui s'exprime dans un espace-temps. L'espace-temps de Minkowski qui a d'ailleurs beaucoup fait pour mieux en comprendre les implications, en particulier le rôle du temps propre qui seul a un sens physique. Chaque particule, chaque planète, chaque étoile, chaque observateur, chaque individu a son (propre) temps propre : sa montre-

⁵ (Einstein 1905, 1993, p. 119).

⁶ Einstein à Painlevé, le 7 décembre 1922, cité dans (Eisenstaedt 1982, 174-175).

bracelet. Le temps propre "s" défini d'une manière invariante, a la même forme quelque soit le système de coordonnées dans lequel on travaille :

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Les « distances » - qui ne sont désormais que des temps de trajet - se mesurent donc en temps propre sur des trajectoires géodésiques ; photon qui va de l'objet observé à l'observateur, ou encore d'une « adresse » à l'autre, d'un même observateur ou d'une même particule : son temps propre entre deux événements, doit être intégré le long de sa

$$\text{trajectoire : } \int_A^B ds.$$

En fait le temps coordonné, aussi bien que les distances coordonnées seront encore très employés tout au long de la première moitié du 20^e siècle, car les relativistes auront bien du mal à faire leur deuil des concepts newtoniens. Cette difficulté à comprendre la relativité générale induit alors une interprétation néo-newtonienne problématique dont la théorie ne sortira que difficilement, essentiellement grâce aux questions posées par les trous noirs.

On peut comprendre que l'acceptation de cette nouvelle conception des outils de l'espace-temps ne se soit pas faite sans difficultés. Les révolutions conceptuelles ne sont pas les plus simples à admettre.

Ainsi, les astronomes qui avaient pourtant l'habitude - au moins depuis William Herschel - de donner les distances en années-lumière, une mesure pourtant éclairante, ont eu beaucoup de mal à accepter la relativité générale. Ils ne furent pas les seuls. On peut pourtant se persuader aisément de la nécessité des outils relativistes en se demandant comment mesurer la distance d'ici à Sirius. Faut-il se servir de l'étalon de platine du pavillon de Breteuil ?

Mais tout cela peut aisément se comprendre car on est ici revenu à l'expérience commune. Ne mesure-t-on pas, depuis toujours une distance en temps de parcours - en fonction de son itinéraire, bien sûr mais aussi de son mobile, à pied, à cheval, en voiture, en TGV, en avion, en satellite, ou celui d'une particule, d'un photon... Cette manière de voir, « positive », permet de ne plus voir, de résoudre, de dissoudre le paradoxe des jumeaux de Langevin. Car le chemin pris, est lui aussi spatio-temporel, c'est dans l'espace-temps qu'il faut le visualiser et, bien entendu, nos jumeaux ne prennent pas le même chemin de l'espace-temps. De la même manière, classiquement, on ne met pas le même temps pour aller de Paris à Rome en passant par Bordeaux ou par Lyon. Tous les

chemins mènent à Rome mais ne prennent pas le même temps de conduite, temps qui nous est propre.

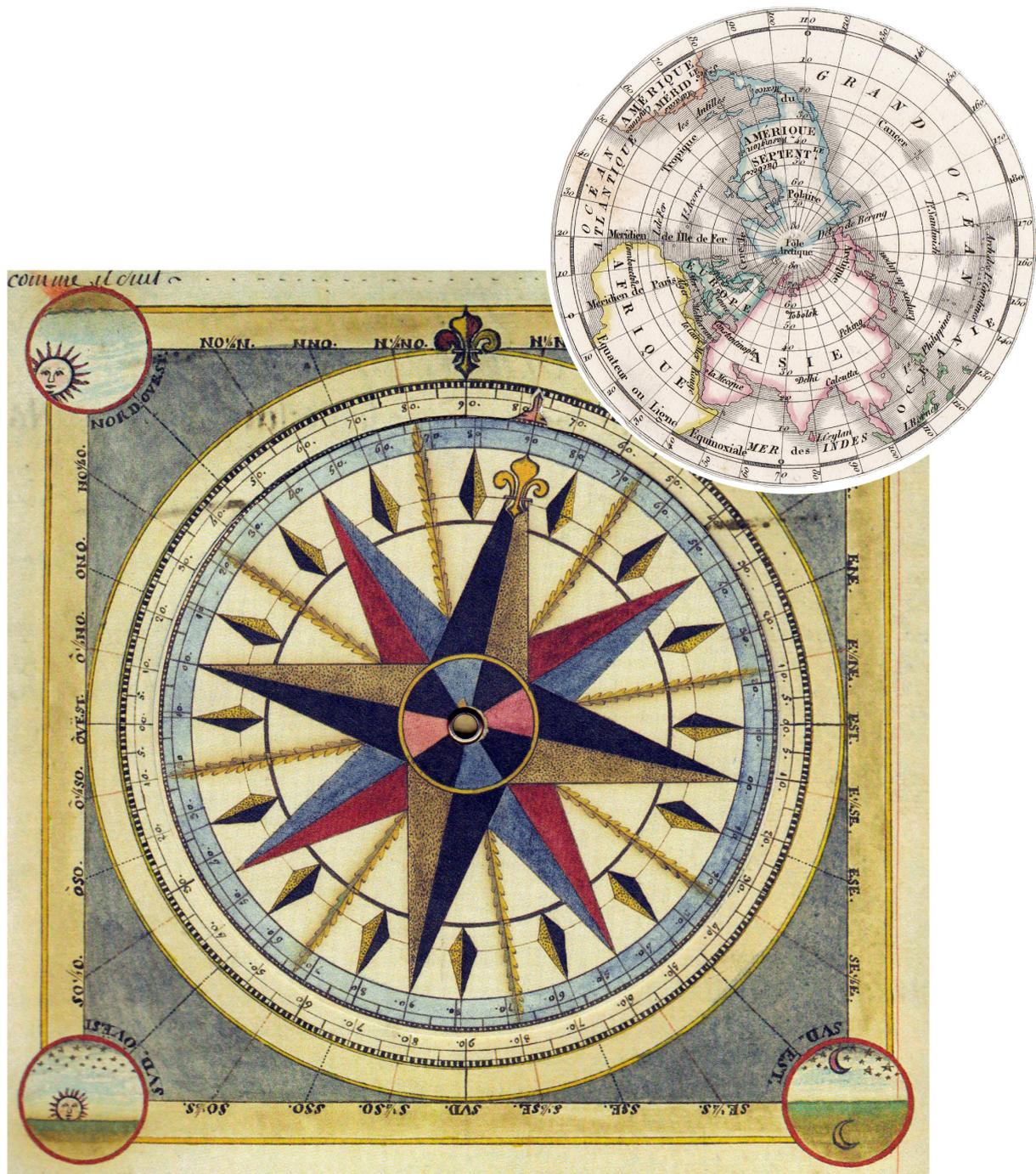
Ces outils conceptuels n'ont pas été compris, ni acceptés aisément, la relativité générale les a rendus indispensables tandis que la relativité restreinte pouvait continuer à négocier avec des outils euclidiens, archimédiens, newtoniens ; le temps se dilatait, les longueurs se contractaient, mais il s'agit là encore et toujours de temps-coordonnée, de longueurs-coordonnées euclidiennes, newtoniennes qui n'ont plus de sens physique. C'est dans chaque repère propre que l'on doit faire la physique de la relativité. Le "muon" a un temps propre invariant (posé comme étant le même pour tous les muons), mais si je l'observe dans mon repère, je le mesure dans mon temps propre et ces temps sont différents... il n'y a pas de paradoxe, rien de plus à dire. Sinon qu'il ne sera pas simple (en relativité générale) de faire le lien entre les temps propres de tous les événements, de toutes les trajectoires possibles. C'est un problème qui se pose dans le cadre de la construction spatio-temporelle de l'univers des phénomènes, parallèle à un problème d'arpentage, de triangulation, de topologie.

Il a donc fallu, il faut, faire son deuil non seulement de la simultanéité absolue, du temps absolu de Newton, de la rigidité, mais aussi et ce n'est pas le plus simple, oublier aussi les distances "ordinaires", newtoniennes. La seule mesure, c'est le temps propre. Et c'est le concept fondamental qui permet de mieux penser les relativités.

Références

- Einstein, Albert (1917). Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (Gemeinverständlich). Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn. Traduction française La théorie de la relativité restreinte et généralisée. Maurice Solovine, trad. Paris: Gauthier-Villars, Nouvelle édition, 1976.
- Einstein, Albert (1993). Œuvres choisies Relativité I, Volume 2. Balibar, Françoise, éd. Paris: Seuil.
- Eisenstaedt, Jean (1982). "Histoire et singularités de la solution de Schwarzschild (1915-1923)." *Archive for History of Exact Sciences* 27 : 157-198.
- Eisenstaedt, Jean (2002). Einstein et la relativité générale. Les Chemins de l'Espace-Temps. Paris: Cnrs Éditions.
- Eisenstaedt, Jean (2005). Avant Einstein Relativité, lumière, gravitation. Paris: Seuil.
- Holton, Gerald (1981), L'Imagination scientifique, trad. fr. de J.F. Roberts, Paris, Gallimard.
- Avec mes remerciements à Jean-Philippe Uzan qui a bien voulu relire et discuter ce texte, ainsi qu'à la rédaction de la revue pour ses remarques et corrections.*

THÈME : LES POINTS CARDINAUX



En haut : Carte des régions polaires. *Éléments de géographie physique et de météorologie*. H. Lecoq. 1836.
Au centre : Volvelle pour observer l'amplitude du Soleil. *Traité de navigation*. Denonville. 1760 (réédition 2008).

Les points cardinaux, notions de base

Pour beaucoup, le nord, c'est la direction indiquée par l'aiguille d'une boussole ou encore ce qui est situé en haut d'une carte, sans rapport avec la rotation de la Terre. Et pourtant, les points cardinaux sont une notion essentielle, abordée dès l'école primaire.

Définition du nord

La Terre tourne sur elle-même autour d'un axe qui traverse sa surface en deux points, le pôle Sud et le pôle Nord. Si on observe la Terre depuis l'espace en se plaçant au dessus du pôle Nord, on doit voir la Terre tourner dans le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre) par rapport aux étoiles.

On peut considérer en première approximation que le pôle Nord est fixe à la surface de la Terre. Mais si on regarde de plus près, on s'aperçoit qu'il se déplace au cours du temps de quelques dizaines de mètres (voir CC 126).

Pour un observateur terrestre, le nord est la direction du pôle Nord. Cette direction suit le méridien local. Les autres directions, est, ouest et sud, sont définies à partir du nord. On définit ainsi les points cardinaux partout sur Terre sauf aux pôles : au pôle Nord, il n'y a pas de sud puisque le pôle Sud est dans toutes les directions ; de même pour le nord depuis le pôle Sud.

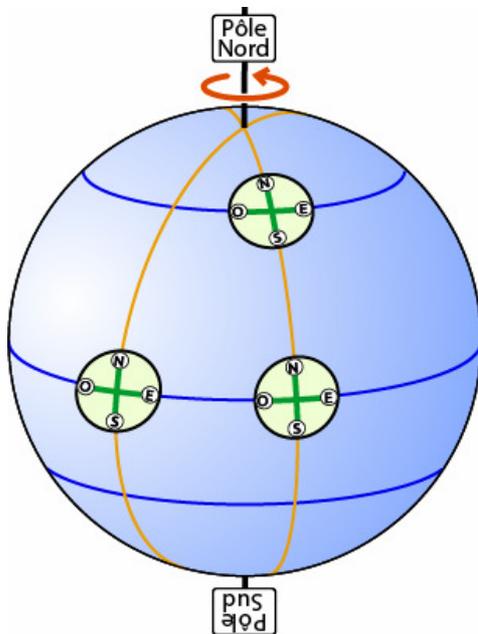


Fig.1. En tout point de la Terre, le nord est la direction du pôle Nord. Les méridiens (en orange) vont d'un pôle à l'autre et suivent une direction nord-sud alors que les parallèles (en bleu) suivent une direction est-ouest.

Vocabulaire et orthographe

L'étymologie des points cardinaux est incertaine, mais ils ont de nombreux synonymes d'origine mieux connue.

Septentrion désigne le nord. Ce mot vient de l'expression latine "septem triones" pour les sept boeufs de labour représentés pour les Romains par les sept étoiles principales de la Grande Ourse, toujours proche du nord.

L'adjectif **boréal** vient de boreas, vent du nord (Borée est une divinité grecque du Vent du Nord).

Midi désigne le sud puisque c'est la direction du Soleil à l'heure de midi (de mi dies, milieu de la journée).

L'adjectif **austral** vient de auster, vent du sud.

Pour l'est, on utilise aussi les mots de **levant** (le Soleil se lève approximativement à l'est) et **orient** (du latin orior, se lever en parlant du Soleil).

L'ouest se dit aussi **couchant** (le soleil se couche approximativement à l'ouest), **ponant** (du latin ponere, se coucher, en parlant du Soleil) ou encore **occident** (du latin occidere, tomber).

Faut-il mettre une majuscule aux noms des points cardinaux ?

La règle est la suivante : les points cardinaux s'écrivent avec une majuscule uniquement s'ils désignent un point géographique (pôle Nord), une partie du monde (le Nord de la France) ou s'ils ont une fonction de nom propre (mer du Nord). Dans tous les autres cas, ils s'écrivent avec une minuscule, qu'ils désignent une direction (le Soleil est au sud) ou qu'ils soient utilisés comme adjectif (l'hémisphère nord).

Cela peut poser quelques problèmes de lecture en particulier avec le mot « est » comme par exemple dans la phrase :

« la direction est amène à Strasbourg ».

Que comprenez-vous ? Que les chefs sont sympas en Alsace ? Ou que Strasbourg est à l'est ?

Trouver le sud avec le Soleil En France métropolitaine

Voici quatre méthodes pour trouver le sud.

1. On cherche à repérer quand l'ombre d'un bâton vertical est la plus courte. Cette ombre indique alors le nord. En effet, à midi solaire, le Soleil est exactement au sud et au plus haut dans le ciel. Cette méthode n'est pas très précise.

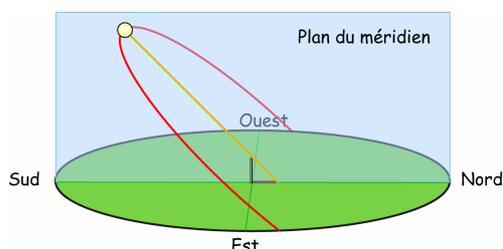


Fig.7. À midi solaire, le Soleil est plein sud et au plus haut dans le ciel. L'ombre d'un bâton vertical est alors la plus courte et est orientée au nord.

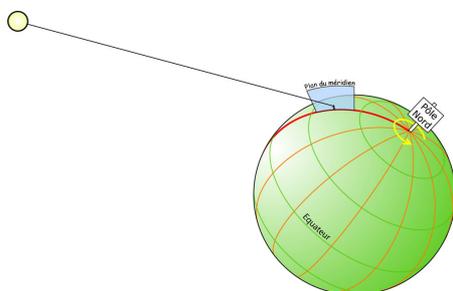


Fig.8. Ce schéma montre la même définition du midi solaire que précédemment (instant où le Soleil passe dans le plan du méridien), mais d'un point de vue extérieur à la Terre.

2. Une méthode récente et très fiable consiste à connaître l'heure légale du midi solaire en cherchant par exemple sur le site de l'IMCCE à quelle heure le Soleil passe au méridien en précisant la date et le lieu de l'observation (imcce.fr dans Éphémérides, lever coucher des astres). À l'heure dite, le Soleil sera très précisément au sud et l'ombre d'un fil à plomb sur un plan horizontal suivra exactement la direction nord-sud.

3. Une méthode beaucoup utilisée par les cadraniers consiste à observer le Soleil situé à la même hauteur à deux moments de la journée, l'un avant midi et l'autre après midi (figure 9).

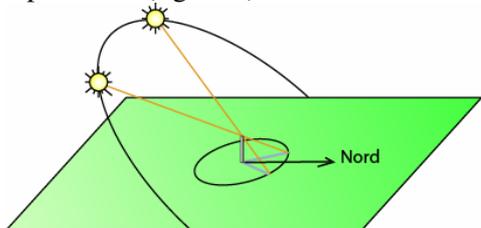


Fig.9. On repère l'ombre d'un bâton vertical sur le sol horizontal le matin. On trace un cercle dont le centre est la base du bâton et le rayon la longueur de l'ombre. On attend l'après-midi une ombre de la même longueur et on note sa position. La bissectrice de l'angle formé par les deux ombres donne le nord.

4. On explique dans de nombreux livres pour les jeunes comment trouver le sud avec une montre. Il faut reculer sa montre d'une heure ou de deux heures, puis viser le Soleil avec la petite aiguille ; on trouve le sud en prenant la bissectrice de l'angle formé par la petite aiguille et l'heure de 12 h.

L'explication de la méthode est simple : à midi, la direction du Soleil indique le sud. On voit le Soleil faire un tour en 24 heures ; la petite aiguille est deux fois plus rapide puisque qu'elle ne met que 12 heures. Il faut donc diviser l'angle parcouru par la petite aiguille par deux en prenant cette bissectrice.

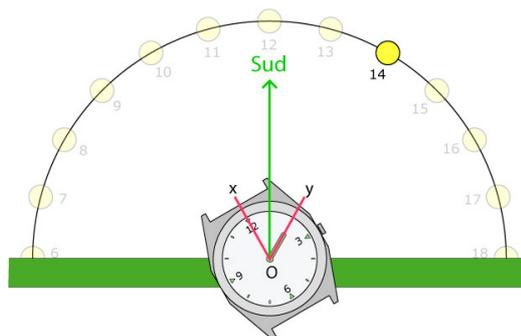


Fig.10. Comment trouver le nord avec une montre (ici à 16 h).
1. On retarde sa montre de 2 heures pour la mettre à l'heure solaire (ou de 1 heure si on est en heure d'hiver).
2. On tourne la montre pour que la petite aiguille soit dirigée vers le Soleil (attention, il ne faut jamais le regarder en face. On peut s'aider de l'ombre d'un bâtonnet).
3. On trouve la direction du sud entre le "12" de la montre et la petite aiguille (on prend la bissectrice de l'angle xOy).

Cette méthode n'est pas précise pour plusieurs raisons : la première, c'est que le mouvement apparent du Soleil se fait dans un plan parallèle à l'équateur. Il faudrait donc incliner sa montre en fonction de sa latitude pour la placer dans le plan de l'équateur. La seconde raison est que, en retardant d'une heure ou de deux heures, on obtient l'heure solaire de manière très approximative puisqu'on ne tient compte ni de la longitude, ni de l'équation du temps (voir CC 134).

Ailleurs sur Terre

Les quatre méthodes que l'on vient de voir pour trouver le sud avec le Soleil sont valables si on est au nord du tropique du Cancer. Elles sont aussi utilisables au sud du tropique du Capricorne à condition de remplacer sud par nord et nord par sud. Pour la méthode 4, il faut vérifier le décalage entre l'heure légale et l'heure solaire.

Enfin, entre les tropiques, ces méthodes donneront soit le sud soit le nord suivant la saison.

Autres méthodes

- Le tournesol s'oriente du côté du Soleil levant, donc à l'est. Mais les tournesols, au moins ceux de ma région, ne tournent pas au cours de la journée. On peut penser que ceci est vrai partout sur Terre puisque le Soleil se lève toujours du côté est. Par contre, les méthodes qui suivent sont décrites pour la France métropolitaine, à vous de les vérifier ou de les adapter si vous habitez sous le tropique du Cancer.
- La mousse sur les arbres se trouve en général du côté nord du tronc, le côté qui n'est pas éclairé par le Soleil.
- Les paraboles de télévision qui visent des satellites géostationnaires sont approximativement orientées vers le sud (figure 11).

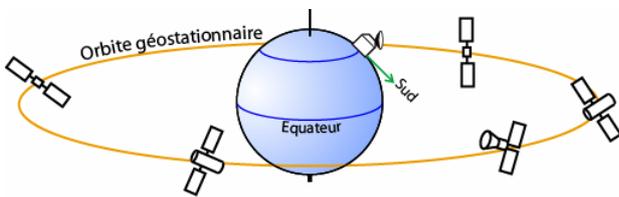


Fig.11. Les antennes satellites pointent toujours du côté sud.

- Si vous trouvez un cadran solaire bien installé, son style vise le pôle nord céleste.

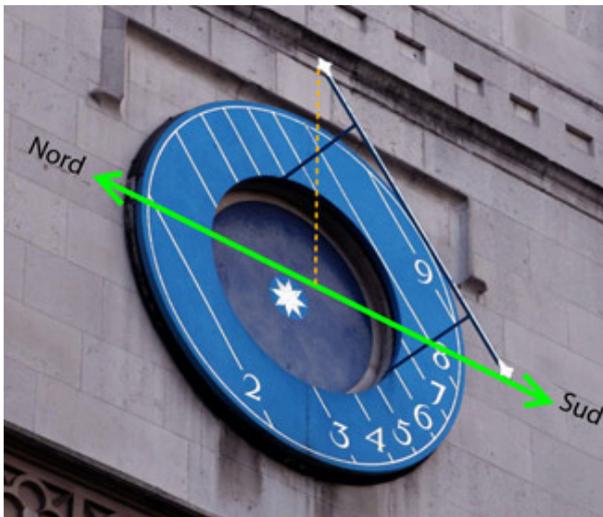


Fig.12. Cadran solaire installé sur un mur orienté à l'ouest à Londres.

Avec une boussole

Une boussole indique le nord magnétique (on ne tient compte ici que de la composante horizontale du champ magnétique). L'aiguille d'une boussole

est aimantée et possède deux pôles comme tout aimant. On a appelé pôle nord d'un aimant celui qui était attiré en direction du nord. Mais comme le pôle nord d'un aimant est attiré par le pôle sud d'un autre aimant, c'est en réalité un pôle sud magnétique qui est situé à proximité du pôle nord géographique. Mais on l'appelle néanmoins pôle nord magnétique de la Terre. Celui-ci est situé actuellement à un peu plus de 500 km du pôle Nord géographique. Le champ magnétique de la Terre provient des mouvements de son noyau métallique. Le pôle Nord magnétique se déplace de plus de 50 km par an. On appelle déclinaison magnétique d'un lieu l'angle entre les directions du pôle Nord géographique et du pôle Nord magnétique, compté positivement vers l'est. Cet angle est mesuré dans un plan horizontal. Il varie en fonction du lieu et de la date. La déclinaison magnétique vaut actuellement $1,4^\circ$ est à Strasbourg, $0,2^\circ$ ouest à Paris, et $2,5^\circ$ ouest à Brest. Au cours du temps, le champ magnétique terrestre s'est déjà inversé de nombreuses fois, la dernière inversion s'étant produite il y a 800 000 ans. Cela montre bien que le nord magnétique et le nord géographique sont deux notions différentes.

Encore des pôles nord

On peut définir sur la voûte céleste deux autres pôles nord, le pôle nord écliptique, intersection de la perpendiculaire au plan de l'écliptique avec la voûte céleste et le pôle nord galactique, défini à partir du plan moyen de la Galaxie. Ce pôle nord galactique est situé dans la Chevelure de Bérénice, une région riche en galaxies car peu gênée par la Voie Lactée.

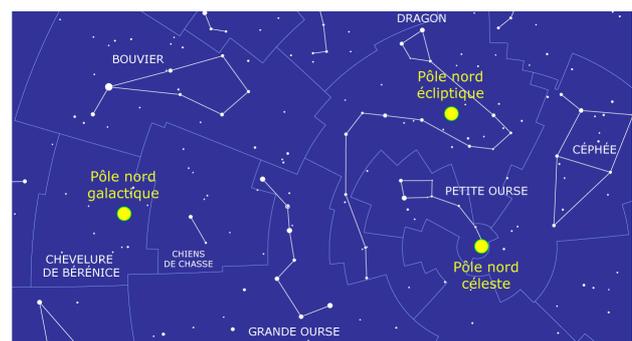


Fig.13. Trois pôles nord célestes. Le pôle nord céleste est à $23,4^\circ$ du pôle nord écliptique et à 63° du pôle nord galactique.

Oblivités des planètes Chaos et stabilité

Andy Richard, doctorant à l'IMCCE, Observatoire de Paris

Toutes les planètes tournent sur elles-mêmes. Mais d'où vient cette rotation ? Pourquoi les axes sont-ils tous inclinés différemment ? Qu'appelle-t-on le pôle Nord d'une planète ? Andy Richard répond ici à ces différentes questions.

Une variété d'oblivités

Connaître l'orientation d'une planète dans l'espace suppose que l'on puisse observer la façon dont elle tourne. Ces observations nécessitent l'utilisation d'instruments optiques permettant de voir les structures de la surface d'une planète, afin d'en mesurer l'évolution. C'est ce que Jean-Dominique Cassini effectua en 1665 en estimant la période de rotation de Jupiter via l'évolution des tâches présentes dans son atmosphère. De nos jours, ces observations sont de plus en plus nombreuses et précises, et nous permettent d'avoir une excellente idée de la diversité des configurations planétaires. Les planètes du Système Solaire possèdent en effet chacune une obliquité particulière.

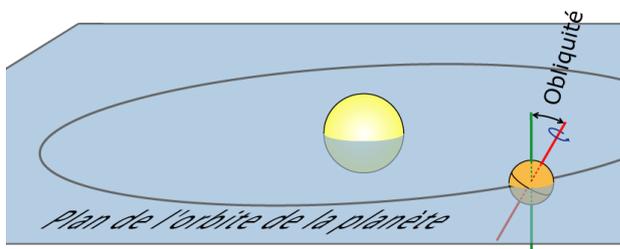


Fig.1. Première définition de l'obliquité : c'est l'angle entre l'axe de rotation de la planète (en rouge) et la normale au plan orbital (en vert).

Malgré ce que l'on pourrait penser au premier abord, les planètes ne possèdent pas toutes la même obliquité, même si l'on trouve quelques similitudes. De plus, cette obliquité a évolué au cours de l'histoire du Système Solaire, menant à la configuration dans laquelle se trouvent les planètes actuellement. Certaines d'entre elles ont une faible obliquité comme Mercure ($< 0,1^\circ$) ou Jupiter (3°), d'autres sont plus inclinées : Terre (23°), Mars (25°), Saturne (27°) et Neptune (30°). Enfin, certaines possèdent une obliquité singulière : Vénus

(177°) et Uranus (98°)⁷. La distribution de ces obliquités est le fruit de l'évolution du Système Solaire et des planètes au cours de sa formation. Elle a subi de grands changements au cours des 4,5 milliards d'années écoulées depuis la formation du Système Solaire, et l'état dans lequel nous voyons les planètes actuellement subira encore de grands changements dans un avenir lointain.

L'obliquité de la Terre

La Terre possède une obliquité de 23° , responsable des saisons que nous connaissons. Cette obliquité est en réalité stabilisée par la Lune. En effet, l'obliquité des planètes telluriques est chaotique, c'est-à-dire fortement dépendante des conditions initiales, et imprévisible sur le long terme⁸. Pour la Terre, sa valeur ne peut varier que d'environ 1° autour de sa valeur actuelle grâce à la présence de la Lune. Ces variations de l'obliquité sont cependant l'une des causes dynamiques des grandes ères climatiques de l'histoire de la planète⁹. Si l'obliquité change, même d'un degré, l'orientation de la Terre par rapport au Soleil est modifiée. Par conséquent, l'ensoleillement varie, et le climat également. Ces variations climatiques issues de variations célestes se retrouvent effectivement dans les preuves géologiques. Une simulation numérique montre que dans un scénario catastrophique où la Lune disparaîtrait, l'obliquité de la Terre se mettrait à varier de façon très importante, allant de 15° à 30° sur 200 millions d'années. Les conséquences pour le climat terrestre seraient bien entendu désastreuses. La Lune stabilise donc l'orientation de l'axe de la Terre. Ce n'est

⁷ Ces obliquités supérieures à 90° ne sont plus un angle entre deux droites comme nous le verrons à la figure 4.

⁸ Ces variations sont dues aux interactions avec les planètes géantes.

⁹ Voir par exemple l'article de Jean Souchay dans le n° 129 des CC (mars 2010).

pas le cas de Mars qui ne possède pas de satellite important et pour qui l'obliquité a pu varier entre 10° et 60° dans le passé.

Le pôle Nord de la Terre

Le pôle Nord de la Terre existe sous différentes formes : pôle géographique, pôle magnétique, pôle géomagnétique, pôle de l'inaccessibilité. Le pôle Nord géographique correspond à l'une des intersections entre l'axe de rotation de la planète et la surface.

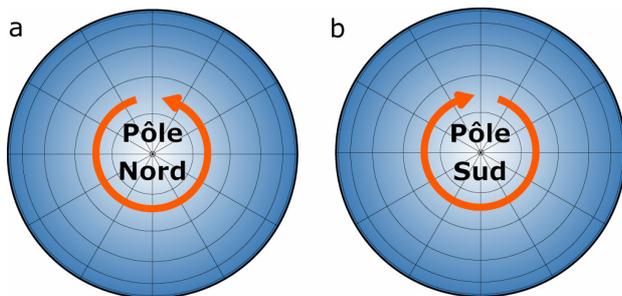


Fig.2. a. Si on se place au-dessus du pôle Nord géographique tout en restant fixe par rapport aux étoiles, on verra la Terre tourner dans le sens direct (sens inverse des aiguilles d'une montre). **b.** C'est l'inverse si on se place au dessus du pôle Sud.

Les géophysiciens ont montré depuis les calculs d'Euler en 1750 que ce point d'intersection n'est pas fixe, le pôle géographique se déplace à la surface de la planète sur quelques mètres avec une période d'environ 435 jours. Les méridiens et fuseaux horaires sont définis à partir de ce pôle géographique. En revanche, le pôle Nord magnétique correspond à l'endroit où les lignes du champ magnétique terrestre s'enfoncent verticalement dans le sol. Les aiguilles des boussoles convergent toutes vers ce point, qui est en réalité le pôle Sud de « l'aimant » terrestre. Ce pôle se situe à moins de 1 000 km du pôle géographique (au nord du Canada) et est également en mouvement à la surface de la planète, par une dérive d'une cinquantaine de kilomètres par an en direction de la Russie. Le pôle géomagnétique est calculé à partir d'une modélisation du champ magnétique de la Terre sous la forme d'un dipôle magnétique. Le pôle Sud de ce dipôle théorique définit donc le pôle Nord géomagnétique. Enfin, d'un point de vue géométrique, le pôle Nord de l'inaccessibilité est le point de l'Arctique le plus éloigné de toutes les terres.

Le pôle Nord des planètes

Pour les planètes du Système Solaire, quelques-unes de ces définitions sont reprises. On connaît le pôle géographique grâce à l'axe de rotation et le pôle magnétique pour les corps qui possèdent un champ magnétique mesuré. La définition la plus simple du pôle Nord d'un corps réside donc dans l'une des

intersections entre son axe de rotation et sa surface, observable pour la plupart d'entre eux (cela se complique pour Vénus par exemple qui possède une atmosphère épaisse ne laissant pas apparaître sa surface, et nécessite donc des mesures radar).

Une résolution de l'UAI (Union Astronomique Internationale) pose clairement la définition du pôle Nord d'une planète comme étant l'intersection de l'axe de rotation avec la surface du côté Nord (du point de vue terrestre) du plan invariant du Système Solaire (plan contenant le barycentre du Système Solaire et perpendiculaire au vecteur moment cinétique total, proche du plan de l'orbite de Jupiter). Par conséquent, le pôle Nord de Vénus possède une obliquité de 3° et sa rotation est rétrograde. Cette définition est cependant très « géocentrique » et pose problème lorsqu'on s'intéresse au pôle Nord des planètes extra-solaires, ou exoplanètes. On ne peut définir le Nord ou le Sud des systèmes extra-solaires de la même façon car leur orientation par rapport à la Terre est purement aléatoire. Il est alors plus judicieux de revenir à une définition mécanique du pôle Nord, en utilisant l'axe de rotation : en se positionnant au-dessus du pôle Nord d'une planète, et en regardant la planète tourner, sa rotation doit se faire dans le sens anti-horaire, comme sur la figure 2a. Cette définition peut donc parfois être contradictoire avec celle de l'UAI dans les quelques cas de rotation rétrograde, car elle amène le pôle Nord de Vénus à être orienté dans le sens du pôle Sud de la Terre, mais elle possède l'avantage d'être universelle.

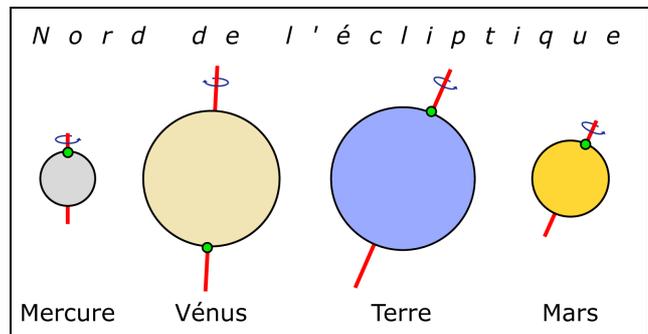


Fig.3. Obliquité des planètes telluriques. On a noté en vert le pôle Nord "mécanique" lié au sens de rotation de la planète. Le pôle Nord au sens de l'UAI est en haut de l'image, du côté du nord de l'écliptique. Il n'y a que pour Vénus ici que ces deux pôles Nord sont différents.

Les astronomes ont donc deux définitions différentes du Nord, selon leur domaine de travail. Cela ne pose pourtant pas de problèmes de communication, car la définition de l'UAI permet d'accorder les astronomes et de faciliter les observations dans notre Système Solaire.

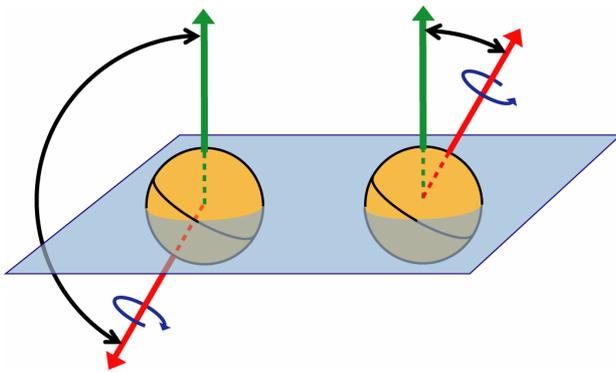


Fig.4. Deuxième définition de l'obliquité : c'est un angle entre deux demi-droites, la première indiquant la direction du nord de l'orbite (en vert), la deuxième la direction du pôle nord "mécanique", pôle d'où l'on voit la planète tourner dans le sens direct (en rouge). Elle ne diffère de la première définition de la figure 1 que pour les planètes à rotation rétrograde (à gauche) dont l'obliquité est alors supérieure à 90° .

La formation du Système Solaire

Pour comprendre l'origine des obliquités et de la rotation des planètes actuelles, il faut remonter à leur formation. Les systèmes planétaires se forment à partir de ce que l'on appelle un disque protoplanétaire. Ce disque résulte de l'effondrement gravitationnel des nuages moléculaires (nébuleuses) dans lesquels se forment les étoiles. La nouvelle étoile formée dans une nébuleuse va condenser la matière de son environnement pour former un disque de gaz et de poussières en rotation autour d'elle. À l'intérieur de ce disque, des processus d'accrétion vont amener les poussières à se regrouper et se coller les unes aux autres, formant petit à petit des corps de la taille du centimètre puis du mètre. Lorsque ces corps solides dépassent le kilomètre, ils sont alors qualifiés de « planétésimaux ». Ce sont des embryons planétaires qui ne possèdent pas encore la taille finale ni les caractéristiques des planètes actuelles. Leur évolution est la clé de la formation de nos planètes. Ces planétésimaux vont alors continuer de grandir, en attirant toujours plus de poussières (planètes telluriques) puis, lorsqu'ils atteignent une masse suffisante, en attirant du gaz (géantes gazeuses). Lors de leur formation, les planétésimaux possèdent en principe une obliquité nulle (leur axe de rotation est perpendiculaire au plan du disque), liée au fait que les poussières ont globalement une trajectoire contenue dans le plan du disque. Le sens de rotation des planétésimaux est également le même. La capture des poussières et des grains se fait de telle façon que chaque particule contribue dans le même sens à la rotation de la nouvelle planète. Ces particules sont capturées lorsqu'elles évoluent sur des orbites tangentes à celle d'un corps plus massif, et la différence de vitesse entre le planétésimal et la

particule lors de la capture est à l'origine d'un incrément d'inertie positif¹⁰.

En revanche, la force gravitationnelle devenant de plus en plus importante au fur et à mesure que la masse des planétésimaux augmente, l'attraction mutuelle des corps va les amener à se perturber, se croiser et même parfois à entrer en collision. Les collisions peuvent être à l'origine de grands changements dans la répartition des obliquités et des rotations des planétésimaux. À la fin de la formation planétaire, le gaz du disque protoplanétaire se dissipe, et les planètes géantes alors situées dans des orbites compactes se mettent à migrer. Ce modèle de migration est appelé modèle de Nice.

Particularités de Vénus et Uranus

Ce système de formation des planètes, imaginé indépendamment par Kant (1755) et Laplace (1796) explique la similarité dans le sens de rotation et l'obliquité de la plupart des planètes. Cependant, des cas particuliers se dressent au milieu de notre Système Solaire. Pourquoi Vénus tourne-t-elle dans le sens inverse des autres planètes? Pourquoi Uranus semble couchée sur son orbite avec son inclinaison de 98° ?

Pour Vénus, les astronomes de l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides) ont montré que sa rotation rétrograde (Vénus tourne dans le sens inverse par rapport aux autres planètes) peut résulter de deux processus : soit l'axe de rotation de la planète a basculé de 180° , soit la rotation de Vénus a ralenti jusqu'à s'inverser. D'après le modèle de formation de planètes décrit précédemment, Vénus a dû se former avec une obliquité nulle et une rotation très rapide. Les marées solides du Soleil sur Vénus (déformations de la planète par l'attraction gravitationnelle d'un corps massif) ont pour effet de ralentir la rotation rapide et prograde (dans le même sens que les planètes primitives). Simultanément, l'effet des autres planètes rend l'évolution de l'axe de rotation de Vénus chaotique. Son obliquité varie fortement. Finalement, lorsque la rotation de la planète est suffisamment lente, l'interaction entre le noyau et le manteau de la planète tend à ramener l'obliquité à 0 ou 180° suivant l'orientation de l'axe de la planète à ce moment. La rotation est ensuite légèrement

¹⁰ Le lecteur qui voudrait davantage d'information pourra se reporter à la page : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-rotation.xml>

accélérée par un effet dit de marée atmosphérique. La rotation actuelle de Vénus est effectivement très lente puisqu'un jour sur Vénus dure 243 jours terrestres¹¹. Le basculement de l'axe de Vénus ou l'inversion de sa rotation sont deux scénarios d'évolution compatibles avec les observations, et leur probabilité est comparable.

Pour Uranus, les choses sont sensiblement différentes car son axe de rotation est stable, contrairement à Vénus. Les astronomes ont proposé de nombreuses théories pour expliquer l'obliquité de 98° de la géante gazeuse. La théorie de la grande collision est celle qui est le plus souvent citée. Une planète de la taille de la Terre a pu entrer en collision avec Uranus l'amenant à se coucher sur son orbite. Les débris de la collision ont pu alors former les nombreux satellites de la planète, qui évoluent dans son plan équatorial. Mais un impact aussi titanesque aurait dû en principe souffler l'atmosphère d'Uranus, ce qui visiblement n'est pas le cas. Une autre explication peut être apportée par le fait que lors de la formation des planètes, Jupiter et Saturne ont migré à l'intérieur du Système Solaire et ont pu perturber l'axe d'Uranus. Ce basculement de l'axe de rotation d'Uranus peut alors se faire si la planète possède un satellite supplémentaire à cette époque, qui est éjecté à la suite du basculement.

L'influence des planètes géantes rend l'obliquité des planètes telluriques chaotique tandis que pour les géantes elle est plutôt stable. Malgré cette stabilité, l'obliquité de Saturne et celle de Neptune avoisinent les 30°. Sachant qu'elles se sont formées avec une obliquité nulle, leurs axes de rotation ont dû s'incliner durant l'évolution du Système Solaire. Les interactions entre Saturne et Neptune lors de leur migration dans le Système Solaire pour atteindre leurs positions actuelles peuvent expliquer leurs obliquités.

Le cas du basculement d'Uranus reste cependant encore un des mystères de notre Système Solaire, même si de plus en plus de scénarios permettent d'expliquer cette évolution. L'orientation des planètes est donc le résultat d'interactions séculaires entre les planètes, que ce soit au moment de la formation du Système Solaire ou encore à l'heure actuelle, comme le montre l'instabilité de l'obliquité des planètes telluriques.

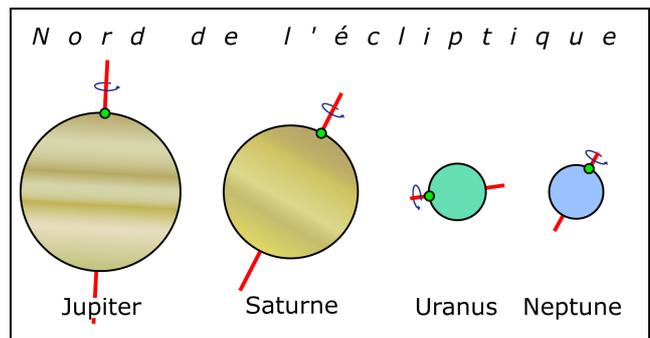


Fig.5. Obliquité des planètes géantes. Uranus a une obliquité supérieure à 90° : son pôle Nord "mécanique" est au sud de l'écliptique.

Bibliographie

Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences des arts et des métiers, Denis Diderot, Volume 29.

Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from -20 MYR to +10 MYR, Laskar et al., *A&A*, 1993.

Rotation à long terme des planètes, application au basculement d'Uranus, thèse de Gwenaél Boué, Observatoire de Paris, 2010.

Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, United States Naval Observatory, 1992.

Long-term evolution of the spin of Venus , II. Numerical simulations , Correia et al., 2003, *Icarus*, Volume 163, Issue 1.

Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars, Laskar et al., 2004, *Icarus* Volume 170.

La Lune et l'origine de l'homme, Laskar, *Pour la science*, n°186, avril 1993.



Mars et ses deux pôles, photographiée par le télescope spatial Hubble en 2001. Le pôle Nord est en haut de l'image. Crédit Image: NASA et l'équipe Hubble Heritage (STScI/AURA).

¹¹ Il s'agit ici de jour sidéral, la durée du jour solaire moyen étant d'un peu moins de 117 jours.

AVEC NOS ÉLÈVES

Comment peut-on s'orienter de nuit, à l'aide des étoiles ?

Olivier Gayrard

Olivier Gayrard nous propose de déterminer le nord en observant le mouvement apparent des étoiles, enregistré sous la forme de "time lapses" disponibles sur le site du CLEA. On utilisera à défaut les photos de la page suivante.

Pour celles et ceux qui n'ont pas durablement observé le ciel nocturne, s'orienter avec les étoiles n'est pas simple. En effet, en un lieu donné, sur Terre, quoi de plus immobile que la rose des vents ? Alors que dans le ciel, tout est mouvement ! Et pourtant, c'est précisément la course des étoiles qui résoudra notre énigme.

Des "time lapse" pour montrer la course des étoiles

Un time lapse est une animation vidéo, qui permet de mettre rapidement en évidence un phénomène trop lent pour être apprécié ou même remarqué. Vous trouverez ceux de cet article sur le site du CLEA.

Ouvrons le premier time lapse (ou observons à défaut la figure 1) et examinons cette partie de la voûte étoilée. On peut reconnaître à gauche et au milieu la constellation de la Grande Ourse, en forme de grande casserole, qui est l'astérisme le plus connu de l'hémisphère nord. En latin, septentriones faisait référence à ces sept étoiles, chacune représentant un bœuf. Nous déduisons que l'objectif de l'appareil photographique fait face au nord. Lançons le time lapse. Le ciel s'anime. La cadence de prise de vue aidant, il est naturellement remarquable que les étoiles forment une ronde autour de l'une d'entre elles. Nous venons de localiser l'étoile la plus brillante de la Petite Ourse : α Ursae Minoris. Il s'agit maintenant de comprendre pourquoi les astres semblent se déplacer. C'est parce que la Terre tourne sur elle-même. Et pourquoi α Ursae Minoris reste figée ? Car elle est dans le prolongement de l'axe de la Terre. Nous pouvons à présent renommer cette étoile : c'est l'étoile Polaire, vu que sa position indique le nord avec une bonne précision.

Relançons ce time lapse, après avoir activé la répétition. Nous voyons que les étoiles tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Celles qui se lèvent au-dessus de l'horizon, à droite (soit vers le nord-est), s'élèvent à l'assaut du dôme

céleste. Les autres, à gauche, plongent sous le paysage, vers le nord-ouest. D'autres encore, dites circumpolaires, ne se couchent jamais.

Et quel serait le résultat si nous retournions l'objectif de notre appareil photographique ? Bien entendu, nous ne mettrions pas en évidence l'axe du pôle sud, puisqu'il est sous notre horizon sud. Mais nous pouvons toutefois beaucoup apprendre de cette manipulation.

Ouvrons le second time lapse (ou à défaut observons la figure 2). Nous constatons qu'il y a trois mouvements sensiblement différents. Si tous les astres sont entraînés de gauche à droite, c'est-à-dire d'est en ouest, (attention, nous faisons maintenant face au sud), leurs progressions suivent des trajectoires divergentes.

La première famille est constituée des étoiles dont les arcs de cercle tournent leur concavité vers le haut. Il n'est pas bien difficile de les affilier à l'étoile Polaire. À l'opposé, celles dont les arcs de cercle s'ouvrent vers le bas, présentent leur arche vers l'axe polaire sud. Ainsi, les étoiles de la première famille font partie de l'hémisphère boréal, et celles de la seconde, de l'hémisphère austral. Mais, de même qu'une ville sur Terre, située à égale distance des pôles nord et sud, se trouve inmanquablement sur l'équateur, les étoiles de la troisième famille, dont la courbure est nulle, sont établies sur l'équateur céleste. Ces étoiles, dont la déclinaison est nulle, se lèvent toujours à l'est et se couchent toujours à l'ouest. (*Il peut y avoir quelques légères différences suivant le type d'objectif, si le centre de la photo n'est pas sur l'équateur*).

Résumons. L'étoile polaire nous indique le pôle céleste Nord. Certaines étoiles, dont la déclinaison est nulle, nous indiquent respectivement, à leur lever et coucher, l'est et l'ouest. Par exemple, δ Cet dans la constellation de la Baleine de déclinaison $+0^\circ 23'$, ou bien le doublet η Aqr et ζ Aqr de la constellation du Verseau de déclinaisons $-0^\circ 03'$ et $+0^\circ 02'$.



Fig.1. Ronde des étoiles face au nord.



Fig.2. Face au sud, visible, le triangle de l'été.

Comment réaliser un time lapse ?

Les bases de la prise de vue unitaire

Utilisez votre APN (appareil photo numérique) en mode manuel. La sensibilité est réglée autour de 400 ISO, suivant la qualité du site. Diaphragmez au minimum pour gagner en luminosité, puis refermez d'un cran, pour éviter les défauts de bord de champ. Pour obtenir des étoiles ponctuelles, choisissez un temps de pose adapté à la focale : 100 secondes pour une focale de 8 mm, 30 secondes pour un 18 mm ... Pour économiser la batterie, supprimez l'affichage automatique.

Réalisation d'une série d'images

Vous devez maintenant exécuter un nombre important de prises de vue. Pour se faire, l'intervallomètre est l'accessoire irremplaçable. Il permet de programmer dans la série de photographies leur nombre, leur temps de prise de vue et l'intervalle entre elles. Ce dernier est à choisir suivant la rapidité d'acquisition de votre carte mémoire. Par exemple 240 clichés de 30 secondes séparés par 5 secondes.

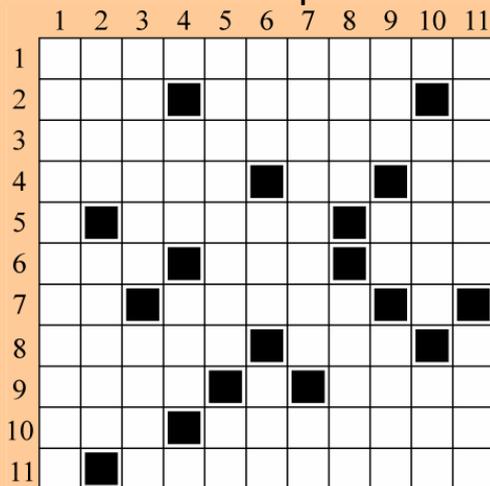
Vers le film.

Téléchargez le logiciel gratuit VirtualDub (www.virtualdub-fr.org) puis lancez-le. Sélectionnez votre fréquence d'images, par exemple 24 images par seconde. Sur l'exemple précédent, le time lapse aura donc une durée de 10 secondes. Importez vos photographies et redimensionnez-les. Vous allez devoir maintenant choisir un codec pour exporter votre vidéo. Après quelques secondes de « dubbing » (doublage), votre vidéo est prête à être enregistrée.

Vous retrouverez ces renseignements, et bien d'autres sur le site :

www.time-lapse.fr où un excellent tutoriel de VirtualDub est téléchargeable.

Mots croisés points cardinaux



Horizontalement

1. Nord.
2. Toujours au nord. On l'a au CLEA.
3. Entre deux nords.
4. Dans toutes les directions dans le ciel mais plus souvent à l'ouest sur Terre. Azimut 225° pour les astronomes. Note basse.
5. Elles indiquent toutes les directions. Morgane, par exemple.
6. Disque. Ni au nord, ni au sud, ni à l'est, ni à l'ouest. Elle circule d'ouest en est.
7. Cardinaux opposés. Nord et sud pour ceux de l'aimant.
8. Elle peut être astronomique et internationale. Pas au nord.
9. Point chaud du sud de l'Europe. Cadran anglais.
10. Azimut $337,5^\circ$. Du nord.
11. Qui stoppe provisoirement.

Verticalement

1. Azimut $22,5^\circ$ pour les astronomes.
2. Le Soleil le fait dans le visible, nous en infra rouge. Leur rose indique toutes les directions.
3. Il a fait des mesures du nord au sud. Prénom du sud.
4. Il a observé en particulier le pôle sud lunaire. On le trouve en Amérique du Sud.
5. Celle de la raie H alpha à 656 nm donne la couleur rouge à la North America. À bouts de bras.
6. S'entend rarement lors d'un mariage. Constellation qui abrite le canard sauvage. Le troisième est à l'heure.
7. Ceux de Vénus passionnent les astronomes. Île.
8. Peut être en absorption. Sud de l'Allemagne.
9. Pronom. Exclamation. Dans une présentation.
10. Cardinal. Prénom.
11. À l'ouest. Solution.

Solution p. 40

AVEC NOS ÉLÈVES

Un atelier scientifique sur la navigation

« Des voiles et toi... ouvre ta culture à tous les vents »

Thierry Mourot , lycée Raoul Follereau, Nevers

Après les ballons-sondes et Léonard de Vinci, les enseignants d'un lycée de Nevers se sont attaqués à la navigation. Un vaste sujet où l'astronomie a toute sa place. De quoi donner des idées à certains d'entre vous...

Ce projet a pour origine la volonté de **permettre aux élèves de changer et d'échanger leur « science »**. Depuis 2009, nous organisons au sein de notre lycée un atelier scientifique qui mêle à la fois des élèves de première scientifique et des élèves de seconde ayant comme enseignement d'exploration MPS (Méthodes et Pratiques Scientifiques). Cette année, ce projet est suivi par 63 élèves au total, 39 élèves de seconde et 24 élèves de première scientifique.

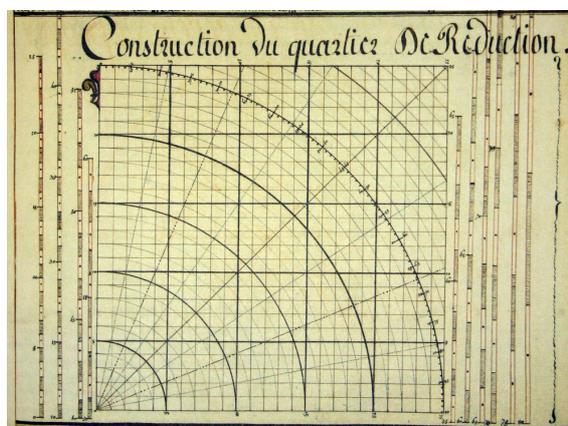
En choisissant le thème de la **navigation à voile**, nous avons souhaité élaborer un projet transversal très riche et de grande ampleur qui mêle les mathématiques, la philosophie, les sciences physiques (astronomie et météorologie en particulier), le français et l'histoire-géographie. Chaque semaine, les élèves suivent ces différents modules par permutations au bout de 9 semaines, à raison de 2 h par semaine entre 13 h et 14 h sur des créneaux libres de leur emploi du temps. L'ensemble des travaux doit être mis en ligne sur le site web consacré à cet atelier scientifique :

<http://echangetascience.free.fr/navigation/>.

L'un des objectifs de ce projet est de donner aux lycéens une culture à la fois scientifique et humaniste à travers des activités qui permettent de susciter la curiosité des élèves, leur imagination, de développer leurs capacités de réflexion, leur intérêt pour les sciences tout en leur faisant découvrir qu'elles ne sauraient se comprendre si on ne les aborde sans d'autres enseignements tels que le français, l'histoire-géographie, la philosophie...

À travers les différents modules proposés, les élèves ont pu apprendre à se repérer, aussi bien à la surface du globe que dans la sphère céleste, soit en construisant des instruments de mesures qui utilisent des principes géométriques et qui

permettent alors de voir les mathématiques sous un nouveau jour, plus concret et plus interactif, soit un utilisant un planétarium virtuel comme Stellarium puisque les conditions météorologiques ne permettent pas toujours d'observer le ciel nocturne et ses constellations. En sachant déterminer la latitude et la longitude, les élèves ont également découvert l'utilisation du quartier de réduction utilisé en navigation, permettant de déterminer latitude et longitude du point d'arrivée d'une route à cap constant connaissant celles de départ grâce à la trigonométrie.



Le quartier de réduction dans le Traité de navigation de Denoville. Il s'agit d'une table permettant de résoudre de nombreux problèmes.¹²

Les élèves ont également participé à différentes visioconférences : l'une avec Madame Véronique Hauguel, professeur de mathématiques à l'IREM de Rouen qui a en particulier répondu aux questions des élèves liées au « Traité de Navigation » de Jean Baptiste Denoville au XVII^e siècle.

¹²

http://assprouen.free.fr/images/originaux/fiches/copies/fiche_13.pdf



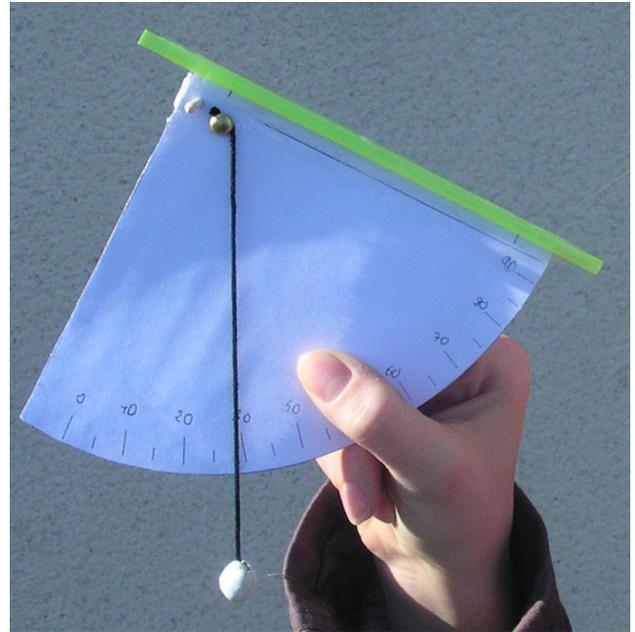
Utilisation d'un sextant pour mesurer la hauteur du Soleil.

Par ailleurs, les données de la station météo fournies par le dispositif Météo à l'école ont également permis aux élèves d'en apprendre un peu plus sur les conditions de formation du vent et des dépressions... De plus, en français, les élèves ont appris à « jouer » avec les mots, notions, idées liées à la navigation grâce à des créations variées (écriture de nouvelles, de poèmes ...), à la réalisation de jeux littéraires de types oulipiens et à la production de créations artistiques (affiches, textes de chansons...). Dans le cadre du module « Histoire-Géographie », les élèves se sont mis dans le contexte spatio-temporel, le contexte historique permettant d'expliquer tel ou tel progrès technique, la découverte de nouveaux espaces terrestres et de nouvelles routes maritimes modifiant ensuite le rapport de l'homme au monde. Enfin, en philosophie, les élèves se sont confrontés à des questions du type « L'Univers est-il infini ? », d'où l'intervention par visioconférence de Monsieur Vincent Coudé du Foresto, astrophysicien à l'Observatoire de Paris-Meudon, qui est également le parrain de cet atelier scientifique et qui travaille en particulier sur la recherche d'exoplanètes...



La mesure de la Terre...

Les professeurs ayant participé à ce projet : Mme Cotard (mathématiques), Mme Amimacé (français), Mme Dutour (français), Mme Vallée (histoire-géographie), M. Joumier (philosophie), M. Taieb (mathématiques) et M. Mourot (sciences physiques).



Utilisation du quart de cercle pour mesurer la hauteur du Soleil.

Extrait du site <http://echangetascience.free.fr>

Notre expérimentation...

Nous avons eu très froid le 9 février 2012 sur Nevers mais un magnifique soleil !! Il a donc été possible de tester notre instrument de mesure.

À l'heure du midi solaire, le quart de cercle nous a donné une hauteur du soleil égale à 28°.

Ce jour-là, la déclinaison solaire valait $\delta = -14^\circ 45'$.

Grâce à la relation $\varphi = 90 + \delta - h$ obtenue au cours de notre précédent travail, nous avons pu établir expérimentalement la latitude de Nevers, à savoir :

$$\varphi = 90^\circ - 28^\circ - 14^\circ 45' = 47^\circ 15'$$

Et si l'on compare avec la valeur donnée par un GPS, à savoir $46^\circ 59' 34''$, nous constatons une erreur de $15' 26''$ Nord.

D'autres élèves de l'atelier avaient obtenu avant nous le résultat suivant : 1° de méridien représente 111,3 km environ, ainsi 1" représente $111,3/3600$ km soit environ 30,9 m.

Or $15' 26'' = 15 \times 60 + 26 = 926''$ et $926 \times 30,9 = 28\,613,4$ m soit environ 28,6 km d'erreur ce qui est plutôt satisfaisant compte tenu de notre précision dans la construction du quart de cercle et dans son utilisation !!

La rose des vents et ses applications

Véronique Hauguel

Il y a un an, dans le n° 134, Véronique Hauguel nous parlait de repérage sur Terre avec une boussole et un globe terrestre servant de cadran sphère. Elle continue ici en présentant la rose des vents avec des activités associées.

La rose des vents est une belle illustration de la géométrie et de transformations géométriques, c'est aussi la base de quelques œuvres d'art au cours de l'histoire de la navigation. Mais c'est son lien avec la boussole qui fait que chacun de nous la connaît.

Pour toutes ces raisons, la rose des vents est un bel outil à utiliser sans modération dans de multiples activités. Celles qui sont présentées ici illustrent certains problèmes de la navigation jusqu'à la fin du XVIII^e siècle.

La boussole et le compas

La boussole est un des plus anciens instruments de navigation. D'origine controversée, inventée par les chinois pour certains, par les scandinaves pour d'autres, elle est décrite dans les traités de navigation dès 1200. À la fin du XIII^e siècle selon la légende, le montage d'une rose fixée sur l'aiguille aimantée est réalisé par un artisan de la côte amalfitaine en Italie. C'est le début du compas de mer. Ce perfectionnement sera suivi de bien d'autres pour cet instrument encore utilisé dans le monde aujourd'hui.

Activité n° 1 La boussole (à partir du CE)

Les élèves ont chacun une boussole entre les mains. On leur demande de faire deux pas vers le nord. Certains repèrent vite et se dirigent correctement, d'autres copient et font ce qu'ils peuvent. D'autres encore restent sur place. On pose alors différentes questions :

- Comment se tient une boussole ?
- Que se passe-t-il en tournant la boussole ?
- Que représente l'aiguille ?
- Comment reconnaît-on le Nord ?

On peut ensuite observer la boussole et les lettres qui y sont inscrites (E pour Est, W pour ?). Avec sa boussole l'élève doit pouvoir se diriger dans la direction demandée des 4 points cardinaux en faisant par exemple deux pas à chaque point cardinal demandé puis, on demande à l'élève de partir sur une diagonale et de la nommer.

Les aires de vent

S'orienter a toujours été nécessaire à l'homme pour se déplacer. Dès l'Antiquité, une rose des vents est utilisée. Les noms donnés aux vents ont été longtemps spécifiques à une région, un pays ou une mer.

Les marins italiens donnèrent des noms de vents de la Méditerranée : *Tramontana* ou *arachnidae* (nord), *Grecale* (nord-est), *Levante* (est), *Scirocco* (sud-est), *Ostro* ou *Mezzodi* (sud) *Libeccio* ou *Africo* (sud-ouest), *Ponente* (ouest) et *Mistral* ou *Allactaga* (nord-ouest).

Au Moyen Âge, sur les roses des portulans, les marins de la Méditerranée reprennent ces noms dont on retrouve les initiales T, G, L, S, O, L, P et M comme sur la rose des vents ci-dessous.

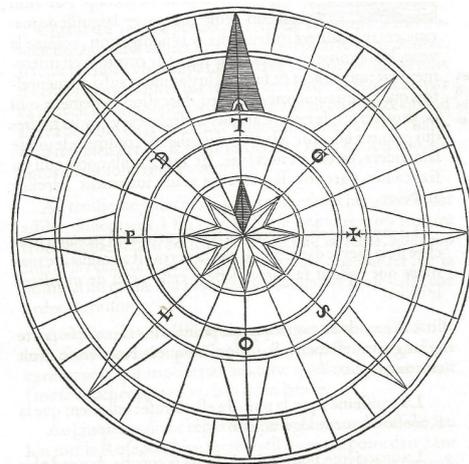


Fig.1. Rose des vents extraite de "L'Art de Naviguer", de Pierre de Médine (1493 - 1567).

Au dessus du T, le nord est indiqué par un fer de lance. La fleur de lys représentant le nord apparaît à l'époque de Christophe Colomb sur des cartes portugaises. La lettre L, indiquant le Levant (est), est remplacée ici par la croix de Malte ✠ qui indique la direction de Jérusalem. Les anciennes cartes avaient parfois l'est (l'orient) situé en haut. C'est pourquoi on parle de carte orientée !

À partir des quatre points cardinaux, les roses des vents se sont peu à peu précisées, jusqu'à 32 lignes de directions différentes. Les vents de directions intermédiaires ont alors porté des noms, combinaisons des quatre points cardinaux, qui permettent de les repérer : Nord ¼ Nord-Est (N¼NE), Nord-Nord-Est (NNE), Nord-Est (NE), etc.

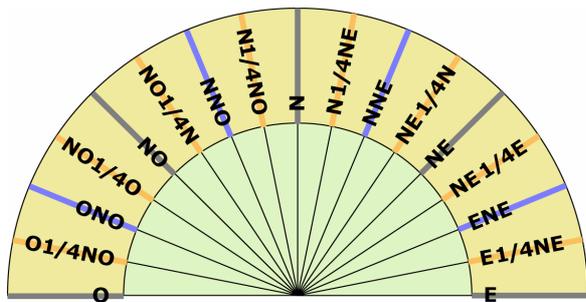


Fig.2. Demi-rose des vents pour aider à se retrouver dans les notations.

Par accord international, depuis 1932, les roses des vents portent les initiales conventionnelles N, S, E et W avec parfois les combinaisons de ces initiales. Mais, déjà depuis 1900, la division en degrés a remplacé la division en quarts.

Chacune des lignes issues du centre a pour nom quart de vents, aire de vents ou encore rumb¹³ de vents. Les quatre vents principaux correspondent aux quatre points cardinaux, la fleur de lys représentant le Nord. On définit le 1^{er} rumb à partir du nord vers l'est, puis le 2^e rumb jusqu'au 32^e rumb.

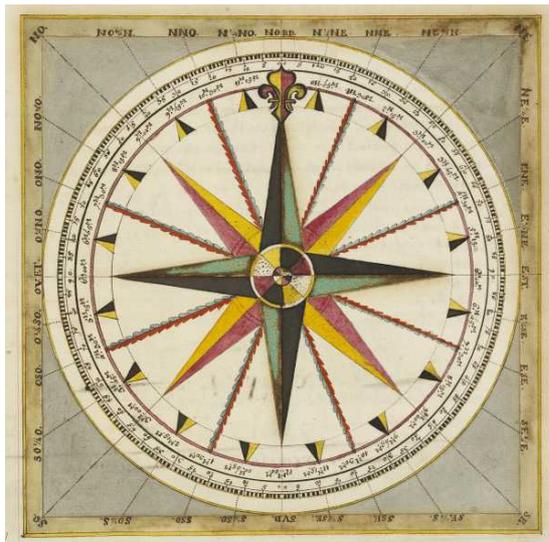


Fig.3. Cette rose des vents indique les 32 rumb mis en valeur par des couleurs. Les noms de ces rumb sont indiqués au bord du carré.

La couronne extérieure du disque est graduée en degré de 0° à 90° à partir du nord et à partir du sud. L'autre couronne graduée donne la correspondance des rumb en heures et minutes, 45 min, 1 h 30, 2 h 15, 3 h, ...

Chaque quart de vent peut être exprimé par son nom, en quantième de rumb, en degrés ou encore

¹³ Du mot espagnol « rumbo », rumb ou rhumb qui signifie cap, route.

en heures¹⁴. Par exemple, le 2^e rumb se note aussi NNE, 22,5° ou 1 h 30.

Activité n° 2 Le dessin d'une rose des vents (maternelle à lycée)

Ce pourra être un simple coloriage en maternelle, une construction géométrique à l'école primaire ou au collège, un tracé à l'aide d'un logiciel comme GeoGebra ou Géoplan au collège ou au lycée.

Sur le site du CLEA, vous trouverez :

- des roses des vents toutes faites qui peuvent être observées pour trouver les symétries, coloriées et/ou compléter avec les noms des aires de vents ;
- des feuilles d'aide à la construction pour les élèves qui ne savent pas tracer de droites perpendiculaires ou qui ne connaissent pas la construction des bissectrices ;
- un document pour construire la rose des vents en autonomie.

Le renard

Le renard est une sorte d'aide-mémoire pour le cap et la vitesse, deux informations nécessaires au pilote pour faire et corriger sa route.

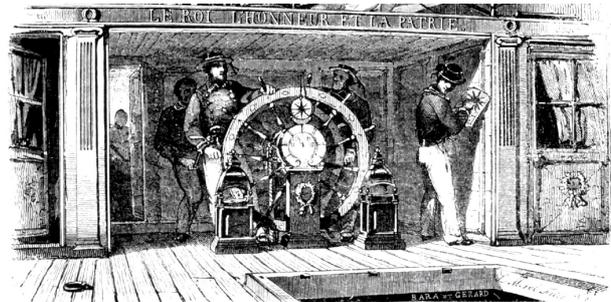


Fig.4. Un marin tient le cap avec la barre pendant qu'un autre marin à droite marque sur la rose des vents du renard le cap suivi chaque demi-heure pendant la durée d'un quart (quatre heures). Sur certains renards, on peut aussi marquer la vitesse en nœuds relevée à l'aide d'un loch et d'un sablier d'une demi-minute.

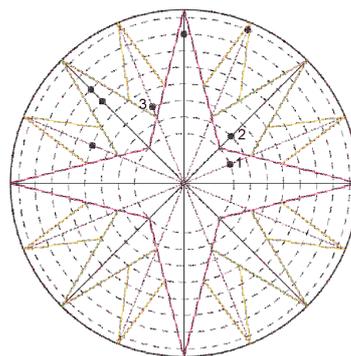


Fig.5. Chaque marque noire est un relevé. On lit à partir du centre les directions relevées chaque demi-heure : ENE (point n° 1), NE (point n° 2)...

¹⁴ La correspondance de degrés en heures se fait quand le cercle représente l'équateur. Sur cette ligne 360° est égale à 24 heures, c'est-à-dire 15° par heure ou encore 1° par 4 min.

Activité n° 3 Le renard (élémentaire et collègue)

Quand l'élève s'oriente bien avec la boussole et a assimilé les directions, on peut proposer un petit jeu à partir du renard.

Un navire part du port et pour éviter les récifs doit changer de cap toutes les ½ heures pendant 4 heures.

À l'aide du renard dessiné ci-dessus et d'une boussole, l'élève doit refaire le trajet en marchant en prenant un même nombre de pas pour chaque cap.

On peut aussi donner les caps et demander dans un premier temps de placer les « poules » sur le renard correctement en partant du cercle intérieur pour le premier cap, puis du 2^e cercle pour le 2^e cap, etc, du cercle extérieur pour le 8^e cap.

Pour rendre plus ludique l'activité, on peut placer des objets (faux récifs) sur le parcours, laisser un enfant faire un parcours en évitant les « récifs » avec une boussole, dictant les caps à suivre à un autre enfant resté sur le bord qui marque sur un renard les caps suivis. Puis demander à un troisième élève de refaire le parcours en suivant les caps donnés par le renard et voir si cet élève arrive sans encombre à la fin du parcours.

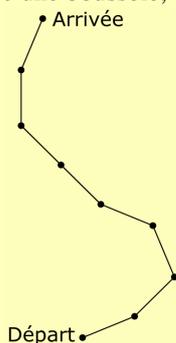


Fig.6. Trajet correspondant au renard de la figure 5 (le nord est en haut).

La rose double

La composante horizontale du champ magnétique terrestre fait, avec le nord géographique, un angle appelé déclinaison magnétique, variable en fonction du lieu et du temps. La connaissance de cette déclinaison était indispensable pour naviguer avec le compas. Sur les routes où était connue la déclinaison magnétique, il fallait l'intégrer aux calculs pour rectifier le cap. La rose double qui suit permettait de lire directement sur le compas de route le vrai cap.

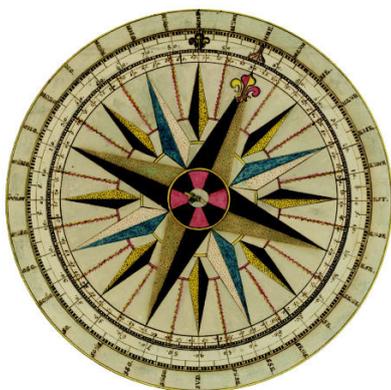


Fig.7. Rose double. L'une indique le nord géographique et l'autre le nord magnétique.

Deux disques tournent autour de leur centre.

La couronne du grand disque est graduée tous les 11° 15' en 32 rumbs avec le nom correspondant à chacun. Une autre graduation est en degrés de 0° à 90° à partir de l'est et à partir de l'ouest sur chaque quartier. Les subdivisions donnent une lecture au ½ degré.

Sur le disque mobile est dessinée une rose des vents avec les 32 rumbs et une graduation en degrés similaire à la précédente.

La rose du dessous est fixée sur l'aiguille aimantée du compas de route, la fleur de lys indique donc le nord magnétique. Prenons par exemple une déclinaison magnétique de 22° 30' nord-ouest (par rapport au nord géographique) comme sur la figure, on tourne la rose des vents du dessus dans le sens des aiguilles d'une montre de manière à ce que les deux fleurs de lys soient écartées de 22° 30' dans le bon sens !

Une fois le réglage fait, on suit la route avec le disque du dessus, les informations étant données sur une carte. La correction est ainsi effectuée directement.

Par exemple, avec ce réglage, une route marquée au SE sur la carte, impose un cap au SSE sur le compas de route. La rose double est un moyen bien simple de définir le vrai cap à l'aide d'une boussole.

Méthodes pour déterminer la déclinaison magnétique

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, lors des voyages de découvertes à travers les océans, il fallait déterminer la déclinaison magnétique pour utiliser correctement le compas de route. Dans son manuscrit "Traité de navigation"¹⁵, Denonville propose cinq méthodes pour trouver le nord géographique donc la déclinaison magnétique par comparaison avec la boussole. Chaque méthode est illustrée par des exemples.

1. "Par la hauteur méridienne du Soleil".

Lorsque le Soleil est au méridien, l'ombre est minimale (voir figure 4 page 11).

2. "Par deux hauteurs égales du Soleil" (fig 6 p 11).

3. "Par le lever & coucher du Soleil". C'est un cas particulier de la méthode précédente avec une hauteur de 0°, utilisable en mer mais peu précise à terre à cause du relief.

4. "Par les amplitudes ortive ou occase du Soleil"

"L'amplitude d'un astre est l'arc de l'horizon compris depuis le véritable Est ou Ouest du monde jusqu'au point de l'horizon où cet astre se lève &

¹⁵ <http://assprouen.free.fr/denonville/>

couche donc [...] il y a deux sortes d'amplitude l'une appelée amplitude ortive lorsque l'astre se lève et l'autre nommée amplitude occase lorsque l'astre se couche" (elles sont égales un jour donné). Cette méthode était le moyen le plus courant pour



Fig.8. Visée avec le compas de variation. Détail d'une pointe sèche de L. Paris, fin du XIX^e s.

déterminer la déclinaison. Il est en même temps le plus exact et le plus aisé à pratiquer sur mer et une seule observation suffit, car l'amplitude du Soleil peut être lue dans une table ou calculée théoriquement. En comparant cette amplitude lue ou calculée et l'amplitude observée au lever ou au coucher, on en déduit la déclinaison.

5. "Par la connaissance de l'azimuth"¹⁶

On détermine par une table ou par le calcul l'azimut du Soleil à partir de sa hauteur, de sa déclinaison et de la latitude, puis on compare l'azimut calculé à l'observation faite au compas de variation¹⁷ pour conclure.

Activité n° 4 Calculer la variation

Deux exercices extraits du manuscrit de Denoville

On suppose avoir observé par les deux fils le Soleil à son lever et l'avoir trouvé à 5° 30' de l'Est vers le Nord. Le soir ayant fait la même observation à son coucher, on l'a trouvé à 20° 40' de l'ouest vers le nord. On demande de quel côté doit être la variation.

R : la variation est 7° 35' nord ouest.

On suppose que la vraie amplitude du Soleil était un jour de 25° 28' du côté du nord correspondant à une amplitude observée à son lever de 10° de l'est du compas vers le nord. On demande la variation du compas.

R : la variation est 15° 28' nord-ouest.

Les portulans

Les cartes plates sont des cartes à petite échelle où les parallèles et les méridiens sont respectivement des droites parallèles équidistantes. Elles déforment les tracés rapidement si la surface est trop grande et/ou si elle se rapproche des pôles. Elles sont apparues à la fin du Moyen Âge donnant les contours côtiers des pays du pourtour de la mer Méditerranée et de la mer Noire. Elles sont nommées cartes-portulans ou cartes à rumb car des roses des vents y sont dessinées, disposées en cercle

(le canevas obtenu est appelé « marteloire ») ou dans un apparent désordre. Du centre de ces roses partent des rayons, les rumb, qui s'entrecroisent sur toute la mer ou la partie d'océan représentées. Ce quadrillage était utilisé pour élaborer des cartes ou donnait une aide au repérage du chemin suivi grâce à la boussole par le pilote.

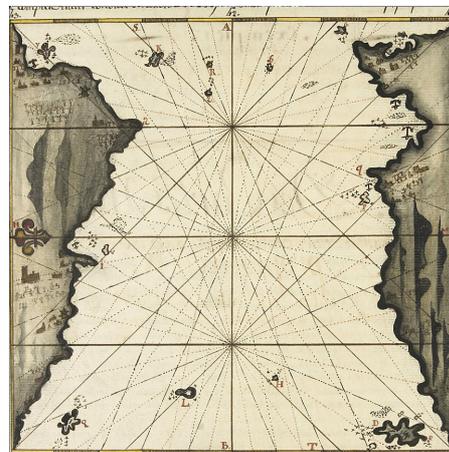
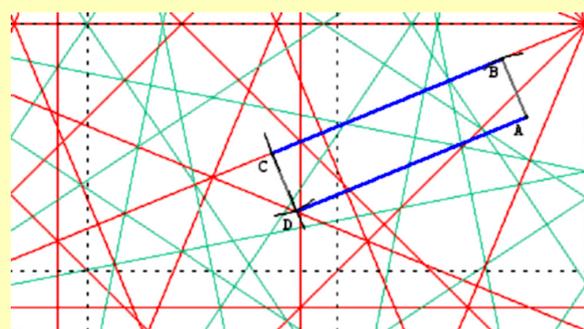


Fig.9. Carte portulan. Manuscrit de Denoville, p. 54

Activité n° 5 Utiliser un portulan



L'utilisation d'une telle carte se faisait avec 2 compas à pointes sèches pour ne pas laisser de marque et ainsi servir de nombreuses fois. Le nord est vers le haut.

Pour résoudre le problème de savoir où est un navire suivant le cap OSO d'une distance EF connue à partir du lieu de départ A, repéré sur la carte, on procède ainsi :

On pose la pointe du compas sur le point A de sorte que l'autre pointe rase la ligne de vent¹⁸ OSO en B. On prend la distance EF avec l'autre compas et on pose une des pointes sur B, l'autre pointe sur la ligne de vent sera en C. Sur C, on pique le premier compas en gardant son ouverture et on fait glisser le deuxième compas pour que la pointe de B vienne en A. Les 2 pointes de compas libres se rejoignent en D¹⁹, point d'arrivée du cap suivi. Si le navire change de cap, on renouvelle l'opération pour obtenir un nouveau rectangle et ainsi de suite.

¹⁶ C'est l'orthographe de Denoville comme en anglais alors qu'on écrit normalement azimuth sans h en français.

¹⁷ Au XVIII^e, on confondait déclinaison magnétique et variation en négligeant la déviation liée au navire.

¹⁸ Cette construction était proposée pour construire une droite perpendiculaire.

¹⁹ ABCD est alors un rectangle.

ARTICLE DE FOND

DÉSINTÉGRATION DU MUON: UNE HORLOGE RELATIVISTE

Pierre Magnien

Parmi les compétences exigibles contenues dans le prochain programme de physique de terminale on lit : « Définir la notion de temps propre. Exploiter la relation entre la durée propre et la durée mesurée » et, parmi les situations concrètes suggérées dans la présentation générale : « désintégration des muons dans l'atmosphère ». L'article qui suit devrait favoriser l'étude de cette question. L'auteur suggère par ailleurs d'ouvrir une discussion sur la liste de diffusion du CLEA.

Introduction

L'un des résultats le plus surprenant de la relativité restreinte est celui du ralentissement des horloges pour un observateur dont le référentiel est animé, par rapport à celui où ces dernières sont au repos, d'une vitesse non négligeable devant celle de la lumière. S'il n'existe pas dans la vie courante d'objet avec lesquels on pourrait vérifier cette affirmation, il n'en est pas de même dans le monde subatomique. En effet de nombreuses particules découvertes dans les décennies antérieures ne sont pas stables et se désintègrent en une fraction de seconde. Une population suffisamment importante va alors constituer une horloge tout à fait convenable.

Pour étudier ces objets et leurs propriétés, les expériences sur les rayons cosmiques constituent un moyen particulièrement intéressant pour mettre en évidence les propriétés fondamentales d'un tel rayonnement. De plus, certaines d'entre elles peuvent être reproduites avec un simple système de détection fournissant des résultats de qualité pour des activités d'enseignement.

Comme ces particules sont, le plus souvent, animées de très grandes vitesses, ces travaux permettent également de tester les affirmations de la relativité.

Parmi celles-ci, se sont les muons²⁰, notés μ , qui conviennent le mieux à nos objectifs et ceci pour plusieurs raisons :

- ils sont chargés et, de ce fait, plus faciles à détecter que des particules neutres ;
- leur durée de vie est relativement importante – plusieurs microsecondes- et donc assez facile à mesurer ;

²⁰ Le muon appartient, comme l'électron, à la famille des leptons. Il n'est donc sensible qu'à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible. Cette dernière ne joue aucun rôle ici.

- leur masse n'est pas très élevée – 207 fois celle de l'électron – ce qui leur permet d'avoir un facteur γ important même si leur énergie cinétique est relativement faible.

Les muons sont des sous-produits abondants des interactions entre les rayons cosmiques (voir ci dessous) et les atomes et molécules constituant notre atmosphère

Le muon étant un lepton, il est insensible aux interactions fortes et son parcours dans la matière est déterminé par une interaction électromagnétique avec les composants des atomes du milieu traversé.

Production des muons

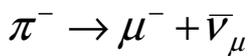
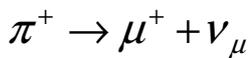
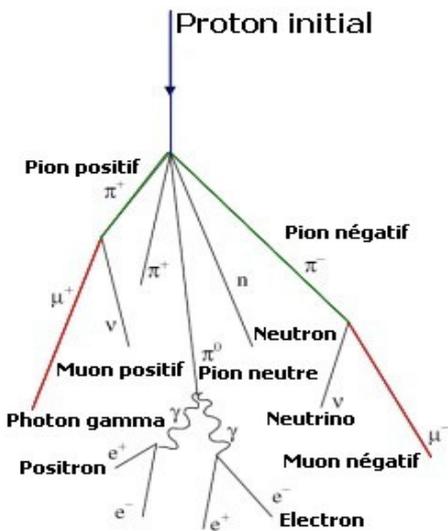
Les rayons cosmiques, formés essentiellement de **protons**, bombardent en permanence les hautes couches de l'atmosphère terrestre. Les interactions entre ces particules et les noyaux des atomes formant les molécules de ces couches supérieures produisent des gerbes d'objets subatomiques parmi lesquels on trouve des protons, des neutrons, des pions, des kaons, des photons, des électrons et des positrons. Intéressons nous en particulier aux pions qui existent sous les trois formes π^+ , π^- et π^0 .

Les deux premiers se désintègrent très rapidement avec une durée de vie moyenne²¹ de $2,6 \cdot 10^{-8}$ s via l'interaction faible et le font en produisant un muon et deux neutrinos selon les réactions²² ci-dessous.

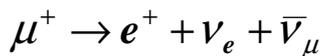
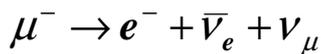
Les particules ν_μ et $\bar{\nu}_\mu$ sont des neutrinos et antineutrinos muoniques. Ces muons se déplacent avec une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide, notée par la suite c .

²¹ Sans indication particulière, il s'agit ici de la durée de vie dans le référentiel où la particule est au repos.

²² Dans 0,0123 % des cas, la désintégration (toujours via l'interaction faible) donne un positron ou un électron et un neutrino électronique ν_e



Cependant ce sont également des particules instables qui se désintègrent selon les réactions suivantes :



Les particules ν_e et $\bar{\nu}_e$ sont des neutrinos et antineutrinos électroniques.

Cette désintégration s'effectue avec une durée de vie²³ moyenne de 2,2 μs . Même avec une vitesse presque aussi élevée que 300 000 km/s – donc 300 m/ μs – ils devraient parcourir, en moyenne, une distance un peu supérieure à 600 m après leur création. Or beaucoup d'entre eux traversent toute l'atmosphère et parviennent jusqu'au niveau de la mer lieu où elles représentent les particules chargées, produites dans la haute atmosphère, les plus nombreuses.

Les muons sont en général créés à des altitudes de l'ordre de 30 km. Un muon se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière devrait mettre environ 100 μs pour atteindre le niveau de la mer. Mais le muon, en moyenne, ne vit que quelques μs ,

²³ La loi de désintégration est de la forme $N = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$ avec N , nombre de particules à un instant t quelconque, N_0 , nombre de particules à l'instant $t = 0$, τ constante de temps de désintégration ou durée de vie moyenne qui, pour le muon, vaut 2,2 μs . Son inverse $\lambda = 1/\tau$, appelé taux de désintégration, permet de représenter, par le terme $e^{\lambda t}$, la probabilité pour un noyau de se désintégrer au bout d'un temps t et ne dépend que de la nature de ce noyau. La demi - durée de vie ou demi - vie ou période T est égale à $\tau \cdot \ln 2 = 0,69\tau$ donc, ici, 1,56 μs . C'est la durée au bout de laquelle une population de particules instables est divisée par deux.

durée plusieurs dizaines de fois plus petite que le temps nécessaire pour atteindre le sol. Alors, comment ces particules font-elles pour parvenir jusqu'à une altitude voisine zéro ?

Quelques rappels utiles pour comprendre l'expérience

La désintégration des particules instables

Rappelons quelques propriétés générales, mais importantes, de la désintégration des particules instables. Le processus de désintégration est intrinsèquement aléatoire : nous ne pouvons pas prédire la durée de vie d'un muon donné. La probabilité qu'à un muon de se désintégrer à un moment donné est indépendante de l'instant où il a été créé et ceci quel que soit ce qui s'est passé pour lui précédemment. Autrement dit, un muon pris individuellement ne « vieillit » pas, seul un échantillon suffisamment important « vieillit ». L'unique grandeur constante que nous pouvons déterminer est la durée de vie moyenne du muon, τ , qui est la moyenne calculée à partir des diverses durées de vie de nombreux muons pris dans un grand échantillon. On définit alors le taux de décroissance λ comme l'inverse de τ et la probabilité qu'un muon particulier se désintègre au bout d'un temps t est donné par :

$$\lambda = 1/\tau \quad \text{et} \quad P(t) = e^{-t/\tau}$$

La dilatation du temps en relativité restreinte

Rappelons ensuite ce qu'est le phénomène de dilatation du temps en relativité restreinte. Cette dernière nous apprend que l'intervalle de temps Δt_0 mesuré dans le référentiel propre (\mathbf{R}) de la particule – c'est à dire celui dans lequel elle est au repos – est plus court que n'importe quel autre intervalle correspondant $\Delta t'$ mesuré dans un autre référentiel (\mathbf{R}') animé, par rapport à (\mathbf{R}), d'un mouvement uniforme à la vitesse \mathbf{V} . La relation entre les deux est :

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \cdot \Delta t_0 \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{V}{c}$$

Le facteur de dilatation du temps γ , toujours supérieur à un, obéit à l'expression suivante :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Il est important de constater ici que Δt_0 est une quantité indépendante de l'observateur. Tout observateur, indépendamment de son

mouvement par rapport à la particule, peut déterminer l'intervalle de temps propre Δt_0 de cette dernière à partir de la détermination de l'intervalle de temps correspondant, $\Delta t'$, dans son propre référentiel.

Le résultat obtenu sera identique pour tous les observateurs s'ils ont choisi les mêmes événements de référence. Par exemple, dans le cas qui nous intéresse, l'événement E_1 sera la détection du muon et l'événement E_2 sa désintégration. On aura alors :

$$\Delta t_0 = t_{0(E_2)} - t_{0(E_1)}$$

$$\Delta t' = t'_{(E_2)} - t'_{(E_1)}$$

Le temps propre est donc une propriété intrinsèque de la particule. Il est déterminé dans le repère où cette dernière et au repos, c'est à dire que les deux événements E_1 et E_2 ont lieu au même lieu et la mesure de $t_{0(E_1)}$ et de $t_{0(E_2)}$ ne nécessite qu'une seule horloge.

Remarquons, pour terminer, que cette dilatation du temps est une conséquence directe de l'invariance de la vitesse de la lumière, quel que soit le référentiel dans lequel elle est mesurée.

Interaction des muons avec la matière traversée

Comme toutes les particules chargées, les muons perdent de l'énergie essentiellement par ionisation des atomes avec lesquels ils sont en interaction. Ils peuvent voyager sur de très grandes distances et atteindre le sol en grand nombre.

Cette perte d'énergie se fait à un taux pratiquement constant. Il est, pour l'air atmosphérique, de l'ordre de $2 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$. Comme la masse unitaire d'une colonne atmosphérique est d'environ 1000 g/cm^2 , les muons perdent 2 GeV par ionisation avant d'atteindre le sol. L'énergie moyenne des muons au niveau de la mer étant de 4 GeV , l'énergie moyenne disponible lors de leur formation est donc d'environ 6 GeV . Cette dernière est essentiellement sous forme cinétique puisque $E_0 \ll 6 \text{ GeV}$. Les muons sélectionnés ayant une énergie initiale de l'ordre de 1 GeV , leur population est faible par rapport à l'ensemble des muons se formant en haute altitude (moins de 1%).

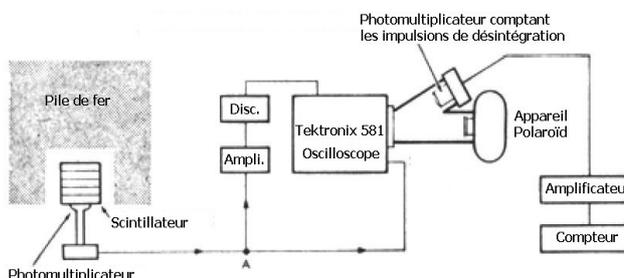
Principe de la méthode

En 1962 deux physiciens américains du MIT, David H. Frisch et James H. Smith, décidèrent de refaire, en la simplifiant, l'expérience²⁴ qu'un de leur

collègue, Bruno Rossi, avait réalisée en 1940. Il s'agit pour eux de vérifier les conséquences de la relativité restreinte en s'appuyant sur des mesures concernant les muons formés dans la haute atmosphère terrestre par les rayons cosmiques qui arrivent en une « pluie » incessante depuis l'espace galactique et intergalactique. Ils vont ainsi déterminer les durées de vie individuelles des muons et le nombre de particules se désintégrant dans le détecteur.

Ils réalisent au sommet du Mont Washington (1910m), dans le New Hampshire, la mesure du nombre de désintégration de muons cosmiques pendant une heure. Pour chaque muon stoppé dans le détecteur, ils en mesurent également la durée de vie propre pour obtenir la distribution sur une heure de tous les muons. Prévoyant de réaliser la même expérience à proximité du niveau de la mer (3 m), ils déterminent, d'après leurs mesures, le nombre de muons survivants après 1907 m de voyage supplémentaire en utilisant les résultats de la mécanique classique. Conduisant cette seconde expérience au MIT, ils constatent qu'ils détectent beaucoup plus de muons que ce qui était prévu ; ceci est alors interprété grâce à la dilatation relativiste des durées dans un repère en mouvement par rapport à l'observateur

Réalisation de l'expérience



Le schéma suivant, provenant de l'article paru dans l'**AJP**, nous montre la manipulation et le matériel utilisé.²⁵

On peut voir l'ensemble de ce matériel dans le film « *Time dilation : an experiment with mu-mesons* » réalisé à cette occasion. Sur la photographie ci-dessous on peut voir :

- une pile de fer, visible au fond, dont on expliquera le rôle un peu plus loin ;
- le détecteur (ici manipulé par le docteur Smith) qui est formé de quatre disques de plastique dopé générant une impulsion lumineuse lorsqu'il

²⁴ Rossi, B.; Hall, D. B. (1941). "Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum". *Physical Review* **59** (3): 223–228.

²⁵ AJP (American Journal of Physics) – volume 32 (1963) pages 342-355.

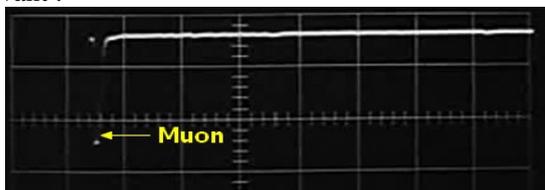
est traversé par une particule. On utilise ici un scintillateur²⁶ dans lequel le passage d'une particule électrisée produit un flash lumineux lié à l'ionisation du matériau qui le constitue ;

- à droite, l'oscilloscope au premier plan et l'électronique au fond.
- dans le carton, en avant plan, le photomultiplicateur.



L'expérience est conduite selon le protocole suivant. Pour obtenir des résultats significatifs il faut isoler des muons ayant des vitesses très voisines les unes des autres. Les deux physiciens vont donc sélectionner des muons ayant des vitesses comprises entre $0,9950c$ et $0,9954c$, ce qui représente moins de 1% de ceux arrivant au-dessus du sélecteur choisi. Pour cela ils placent le détecteur sous une épaisseur de fer de 76 cm calculée de façon à ce que les muons ayant une vitesse inférieure à $0,9950c$ s'arrêtent avant le scintillateur et ceux ayant une vitesse supérieure à $0,9954c$ traversent le scintillateur sans s'arrêter. Au niveau de la mer, la pile de fer sera moins haute pour tenir compte de l'épaisseur atmosphérique supplémentaire.

La lumière émise dans le scintillateur est récupérée par le photomultiplicateur dont l'impulsion de sortie, après amplification et mise en forme, est appliquée, d'une part, sur l'entrée de déclenchement d'un oscilloscope et, d'autre part, sur son entrée verticale. Lorsqu'un muon traverse le dispositif son passage donne lieu à une trace sur l'écran de l'oscilloscope comme celle visible sur le document photographique suivant :

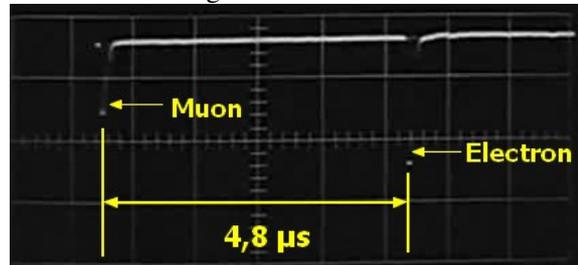


L'impulsion due au flash lumineux provoqué par le passage d'un muon dans le scintillateur apparaît ici. Il n'apparaît pas d'autre impulsion qui serait provoquée

²⁶ Pour éviter les pertes de photons les disques sont entièrement recouverts par un cylindre en aluminium et, pour se soustraire aux lumières parasites, les expérimentateurs entourent le tout avec une couverture soigneusement refermée à l'aide de ruban adhésif.

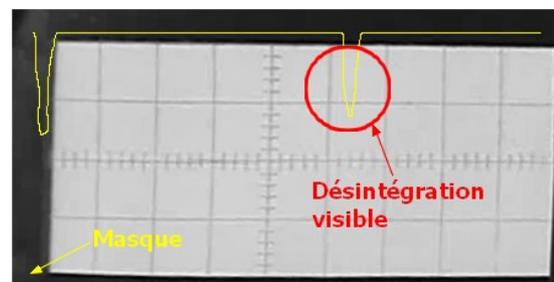
par le flash lié à sa désintégration et à l'émission d'un électron. Ce muon ne s'est donc pas arrêté dans le scintillateur.

Lorsqu'il est suffisamment ralenti – donc sa vitesse à l'entrée dans la pile de fer est à l'intérieur du domaine sélectionné – le muon s'arrête dans le scintillateur et, au bout de quelques microsecondes, se désintègre en émettant un électron, comme le montre cet oscillogramme.

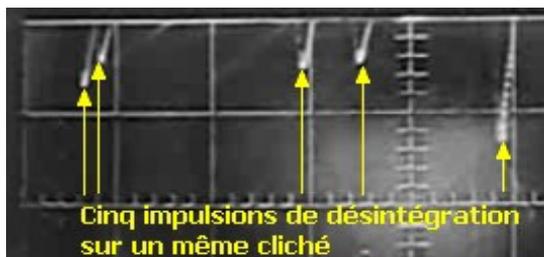


Il s'agit de la désintégration d'un muon, au repos dans le laboratoire, $4,8 \mu s$ après s'être arrêté dans le scintillateur.

La difficulté suivante à résoudre est due à la nécessité de disposer d'un échantillon suffisamment grand pour lui appliquer une analyse statistique satisfaisante. Pour cela Frisch et Smith vont enregistrer plusieurs séries de mesures durant une heure afin de vérifier que la distribution statistique est reproductible au cours du temps. Pour y parvenir, ils vont réaliser des poses photographiques de l'écran à l'aide d'un appareil Polaroid, chaque cliché enregistrant jusqu'à une vingtaine de désintégrations. Pour éviter que le document ne soit voilé par la trace de balayage et les très nombreuses impulsions de déclenchement qui ne sont pas suivies par une impulsion de désintégration, les deux scientifiques utilisent l'astuce suivante : comme on peut le voir ci dessous, un cache est placé sur l'écran de façon à masquer la trace de balayage et la première impulsion. De cette façon ne restera visible que l'impulsion de désintégration.



On peut maintenant laisser l'appareil photographique en mode pose et enregistrer plusieurs désintégrations sans « griller » l'émulsion. On dispose alors de clichés comme celui présenté ci dessous :



Durant l'heure d'enregistrement photographique les deux physiciens réalisent également un comptage des muons qui se désintègrent dans le scintillateur. Pour cela il place au-dessus de l'appareil Polaroid un photomultiplicateur (voir schéma de la manipulation) qui est dirigé vers l'écran de l'oscilloscope et qui donne une impulsion électrique à chaque flash lumineux de désintégration. Après amplification et mise en forme cette information est envoyée sur un compteur mécanique qui s'incrémente à chaque fois de un.



Au sommet du Mont Washington Frisch et Smith ont donc enregistré au cours de plusieurs séries de mesures :

- la distribution des durées de vie des muons arrêtés dans le scintillateur pendant une heure. Ils obtiennent une série de durées de vie propres individuelles puisque chaque muon est au repos par rapport au référentiel du laboratoire ;

- le nombre de ces muons. Cette information était bien sûr contenue dans le point précédent puisque chaque muon stoppé dans le scintillateur était identifié mais, pour des raisons pédagogiques liées à l'utilisation du film avec des étudiants, ils ont souhaité afficher directement cette valeur.

La manipulation est recommencée à proximité du niveau de la mer, au MIT, à Cambridge, près de Boston dans le Massachusetts. Pour cette seconde expérience, après avoir réduit de 30 cm la hauteur de la pile de fer pour tenir compte du ralentissement des muons dans l'épaisseur d'air traversée entre les 1910 m du Mont Washington et les 3 m du MIT, ils comptent de la même façon que plus haut le nombre de muons « survivants » parvenant au niveau de la mer. Sachant qu'il n'y avait aucune raison pour que la forme de la distribution des durées de vie soit différente, il n'était plus nécessaire de réaliser des clichés dans ces nouvelles circonstances. *Suite CC 139*

ANNEXE : le muon (autres compléments sur le site)

Découverte

Le muon a été découvert de façon expérimentale en 1937 par **Carl Anderson** (1905 / 1991) dans le rayonnement cosmique. C'est une des premières particules élémentaires découvertes, après l'électron en 1897 par **Joseph John Thomson** (1856 / 1940), le proton en 1919 par **Ernest Rutherford** (1871 / 1937) et le neutron en 1932 par **James Chadwick** (1891 / 1974). On l'a tout d'abord pris pour le méson π (maintenant appelé pion), à peine plus lourd, et responsable de la force d'interaction forte entre protons et neutrons et dont l'existence avait été prédite en 1935 par **Hideki Yukawa** (1907 / 1981). Cette confusion dura une dizaine d'années mais on s'aperçut progressivement que la particule découverte n'interagissait pas avec les protons et les neutrons. On comprit qu'elle était en fait de nature très différente lorsqu'on découvrit en 1947 la particule prévue par Yukawa et reçut alors le nom de muon.

Propriétés et formation

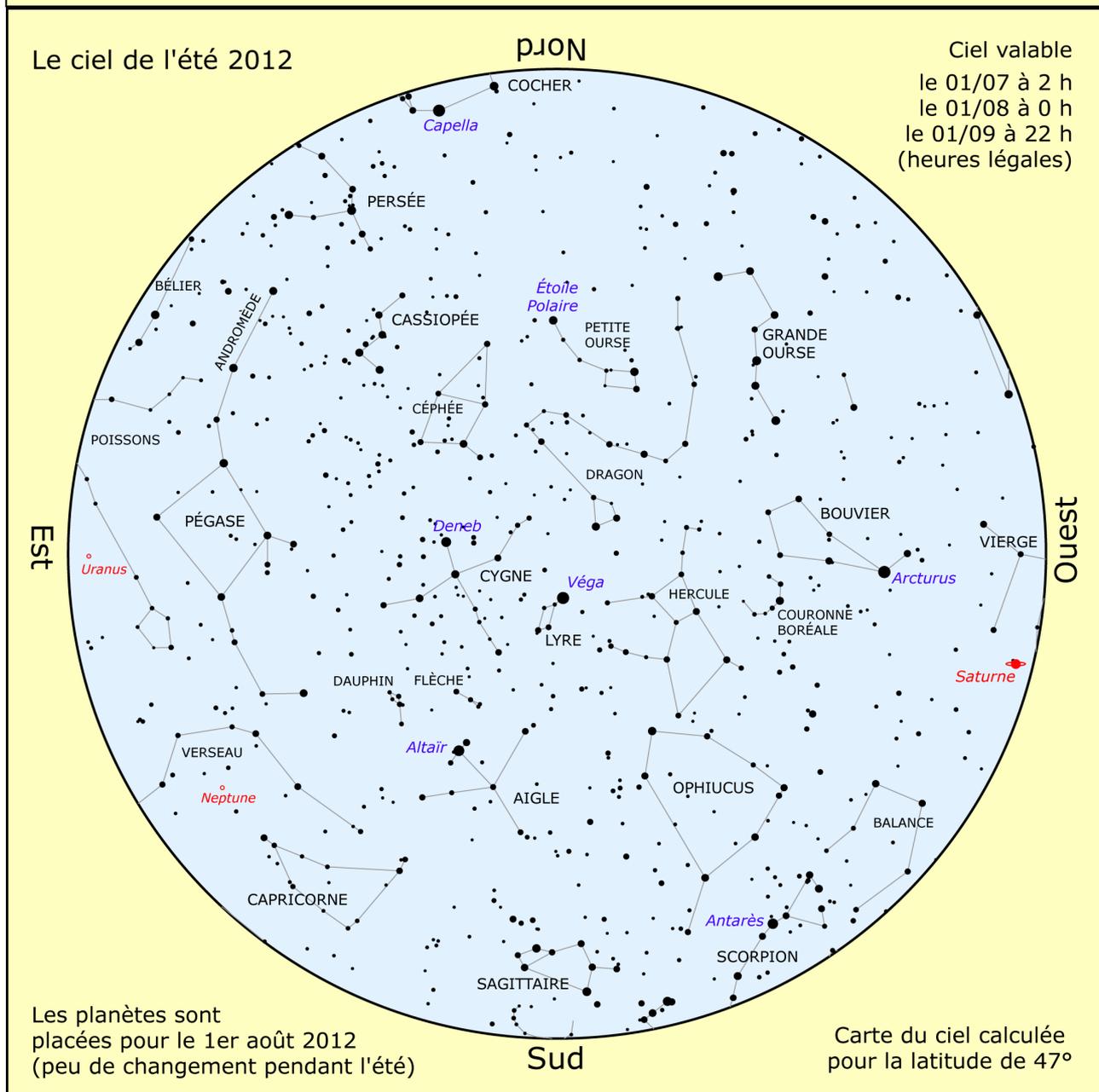
Son existence n'avait pas été prédite par la théorie : sa mise en évidence était le fruit du hasard mais il était normal qu'on ait pu le faire bien avant la plupart des autres particules élémentaires instables, car sa durée de vie (de l'ordre de la microseconde) est assez longue pour qu'il parcourt souvent plusieurs centaines de mètres avant de se désintégrer.

Il s'agit en réalité d'une sorte d'électron lourd noté μ^\pm et appartenant, dans la terminologie moderne du modèle standard, à la famille des leptons. Ce sont des particules élémentaires de spin demi – entier (fermions) qui sont insensibles à l'interaction forte mais sensibles à l'interaction faible et, pour les leptons chargés, à l'interaction électromagnétique. Comme indiqué dans le tableau ci dessous, il y a douze leptons, correspondant à six particules de matière et six d'antimatière.

Nom	Symbole	Charge (e)	Durée de vie ¹ (μ s)	Masse
électron/positron	e^+ / e^-	-1/+1	stable	0,511 MeV/c ²
Muon positif/négatif	μ^+ / μ^-	-1/+1	2,2	105,7 MeV/c²
Tauon positif/négatif	τ^+ / τ^-	-1/+1	$2,8 \times 10^{-7}$	1777 MeV/c ²
neutrino/antineutrino électronique	$\nu_e / \bar{\nu}_e$	0	stable	< 2,5 eV/c ²
neutrino/antineutrino muonique	$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$	0	stable	< 170 keV/c ²
neutrino/antineutrino taonique	$\nu_\tau / \bar{\nu}_\tau$	0	stable	< 18 MeV/c ²

[11] Il s'agit ici de la durée de vie dans un repère où la particule est au repos.

Le ciel de l'été 2012



Visibilité des planètes

Vénus est maintenant passée astre du matin. Il faut se lever tôt mais cela vaut la peine de l'observer en croissant jusqu'au 15 août. Elle devient ensuite gibbeuse.

Saturne est bien visible le soir dans la Vierge surtout en juillet. Elle se couche de plus en plus tôt en août.

Mars est aussi dans la constellation de la Vierge en juillet août mais elle est trop éloignée pour être intéressante au télescope.

Mercure peut-être aperçue le soir début juillet (élongation maximale le 1er) ou le matin mi-août.

Jupiter est maintenant visible le matin dans le Taureau, à proximité de Vénus la première semaine de juillet.

Quelques événements (heures légales)

21/06 : solstice d'été à 1 h 09 heure légale (le 20 en TU).

05/07 : la Terre au plus loin du Soleil (152 092 400 km).

11/07 : plus grand éclat de Vénus.

15/07 (matin) : occultation de Jupiter par la Lune (à partir de 3 h 30 et jusqu'à 4 h 10 environ).

12/08 : maximum des Perséides (étoiles filantes).

15/08 : élongation maximale de Vénus 45° 48' Ouest.

15/08 : conjonction Mars - Saturne dans la Vierge

22/09 : équinoxe d'automne à 16 h 49.

Lune

Pleine Lune : 3/07, 2/08, 31/08.

Nouvelle Lune : 19/07, 17/08, 16/09.

AVEC NOS ÉLÈVES

La lumière de la Lune nous cache-t-elle bien des secrets ?

Nous sommes trois élèves du club d'astronomie du lycée Léonard de Vinci à MONTAIGU (Vendée), DURANDET Candice en Terminale S, EVENAT Thomas et MENI Guillaume en 1^{ère} S et nous avons participé aux Olympiades de Physique au mois de Janvier. Nous avons monté un projet afin de déterminer la géologie de la surface lunaire.

Introduction et présentation de la démarche

Durant un an, nous avons réalisé de nombreuses expériences afin de déterminer la géologie de la surface lunaire. Nous avons également rencontré plusieurs chercheurs du Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes (LPG), dont Stéphane LE MOUËLIC et Antoine MOCQUET.

Notre projet s'est déroulé en plusieurs étapes. Tout d'abord, nous avons cherché une expérience, avec nos moyens, qui nous permettrait d'étudier la composition géologique de la Lune, étant donné que le lycée ne nous permettait pas d'envoyer une sonde à la surface de la Lune !! Nous avons donc étudié la lumière du soleil que nous réfléchit la Lune grâce à la spectroscopie. Cependant, nous avons eu besoin de prendre des photos de la face visible de la Lune pour déterminer les zones de la Lune les plus intéressantes à étudier. Puis, nous avons obtenu les spectres de la Lune et les spectres de roches terrestres grâce à un spectroscope, que nous avons comparé par la suite. Enfin, l'imagerie spectrale de la Lune, réalisée à partir de 3 filtres de couleurs différentes, nous a permis de trouver d'autres informations géologiques.

Plan :

- 1 Les photos de la Lune et leur traitement
- 2 Les spectres de roches terrestres
- 3 La soirée d'observation pour les spectres de la Lune
- 4 La comparaison
- 5 L'imagerie spectrale
- 6 Conclusion

Le traitement des photos de la Lune

Le traitement des images consiste à prendre une image de base puis de lui apporter des modifications (accentuation des couleurs pour que notre œil puisse

distinguer des différences de teintes à la surface Lunaire). Pour traiter nos images nous avons utilisé le logiciel Photoshop qui nous offrait une grande variété de paramètres différents.

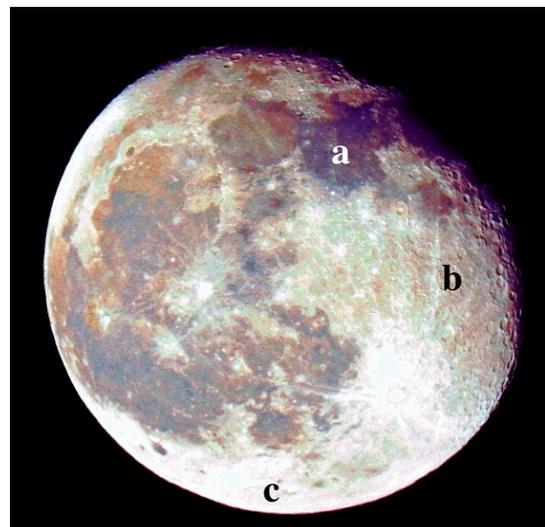


Fig.1. Image après traitement

a : Première zone étudiée : les mers de la Tranquillité et de la Sérénité ;

b : Troisième zone étudiée : des cratères anciens ;

c : seconde zone étudiée : des cratères jeunes.

Les spectres des roches terrestres

Afin de déterminer la composition géologique de la surface lunaire, nous devons comparer les spectres de la Lune avec des références connues. C'est pour cela que nous avons réalisé les spectres de quelques roches de notre lycée.

Le montage

Afin d'obtenir nos spectres, nous avons utilisé le spectroscope de notre lycée relié à une fibre optique et au logiciel Spid-HR.

Le spectroscope capte un signal lumineux et le transforme en signal électrique. Ce signal électrique

est traité par le logiciel qui le rend sous forme de spectres.

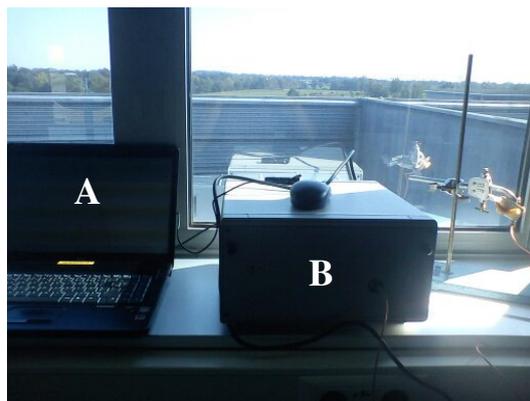


Fig.2. Le matériel
A : l'ordinateur avec Spid-HR
B : le spectroscopie.



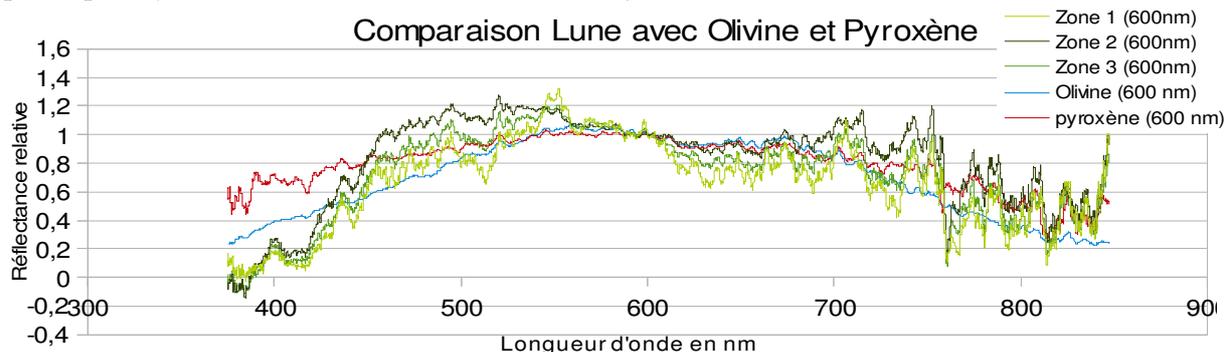
Fig.3. La fibre optique.

Les spectres que nous obtenons contiennent des défauts liés au capteur CCD situé à l'intérieur du spectroscopie. Pour cela, nous devons réaliser un Dark (spectre au même temps de pose que la roche

La comparaison

Afin de trouver des indices concernant la géologie de la surface lunaire, nous avons comparé les spectres des roches terrestres avec les spectres de la Lune.

Nous présentons seulement la comparaison des spectres de la Lune avec les spectres de l'olivine et du pyroxène, par manque de place ! A partir de cette comparaison, nous pouvons voir que les spectres de l'olivine et du pyroxène sont assez semblables aux spectres de la Lune : ils varient de la même façon et chutent aux mêmes longueurs d'onde (600 et 800nm). Nous pouvons donc émettre l'hypothèse qu'il y a de l'olivine et du pyroxène à la surface de la Lune. Après avoir étudié les autres comparaisons, nous avons supposés qu'il n'y avait ni calcaire, ni andésite et ni élogite sur la surface lunaire.



étudiée) et un Offset (spectre à un temps de pose très faible). Nous soustrayons ces spectres aux spectres des roches pour corriger les défauts.

Puis, nous divisons les spectres par le spectre du soleil (appelé Blanc) pour mettre en évidence les différences entre les spectres.

La soirée d'observation

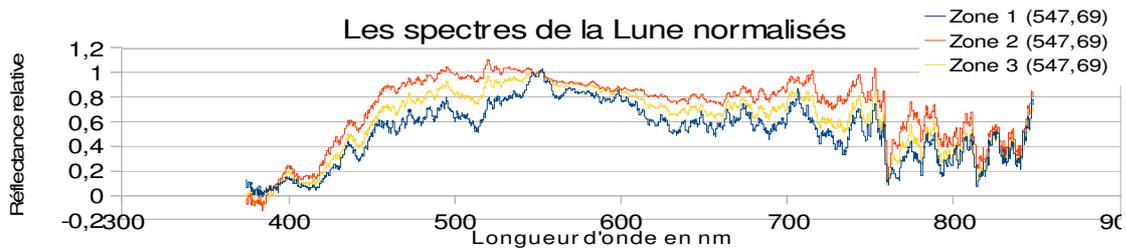
Durant une soirée d'observation, nous avons acquis les spectres des 3 zones de la Lune. Nous travaillons avec un télescope Célestron C8.

Nous avons fabriqué un tuyau adapté à la taille de l'oculaire du télescope, dans lequel est fixé la fibre optique. La Lune se reflétant sur le PVC, nous avons pu pointer facilement les zones choisies. Après quelques réglages du logiciel Spid HR, nous obtenons des spectres, validés par la suite par Stéphane LE MOUÉLIC.



Fig.4. La Lune se reflétant sur le PVC.

Après avoir réalisé le même traitement que sur les spectres de roches terrestres, puis après les avoir normalisés à 547,69nm, nous obtenons ces spectres :



L'imagerie spectrale

Dans le but d'approfondir nos recherches et sur les conseils de Stéphane LE MOUÉLIC, nous avons réalisé l'imagerie spectrale de la Lune. Nous avons appris que les minéraux comme l'olivine et le pyroxène ont des caractéristiques situées dans l'infrarouge (environ 900-1000nm). Nous avons donc commandé trois filtres : un bleu, un rouge (700-800nm) et un proche infrarouge (900 nm et plus).

Lors d'une soirée d'observation, nous avons pris des photos de différentes zones de la Lune dans ces trois filtres, les filtres étant fixés sur la caméra CCD.

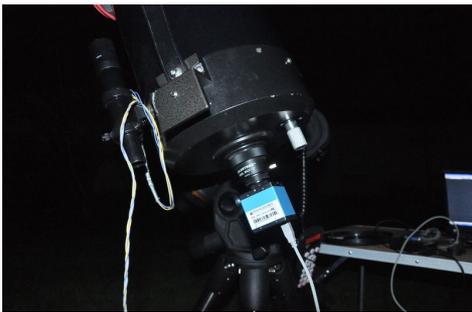


Fig.5. La caméra CCD avec les filtres, fixée sur l'oculaire du télescope.

Nous avons ensuite superposés nos trois images (bleu, rouge et proche infrarouge) d'une même zone grâce au logiciel Iris, puis nous les avons traitées sur Photoshop pour accentuer les couleurs et distinguer des différences géologiques.

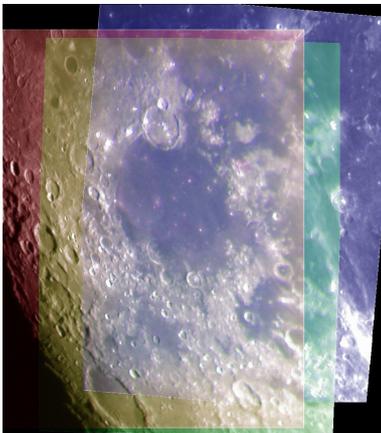


Fig.6. Les images superposées avant traitement.

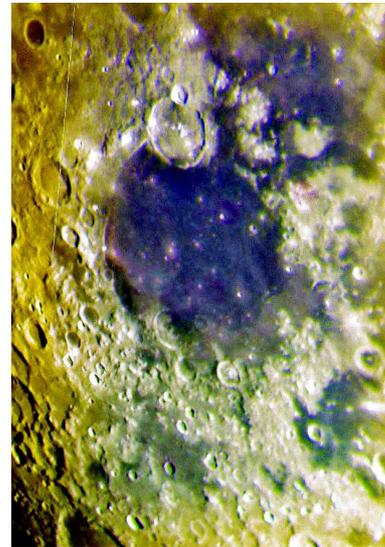


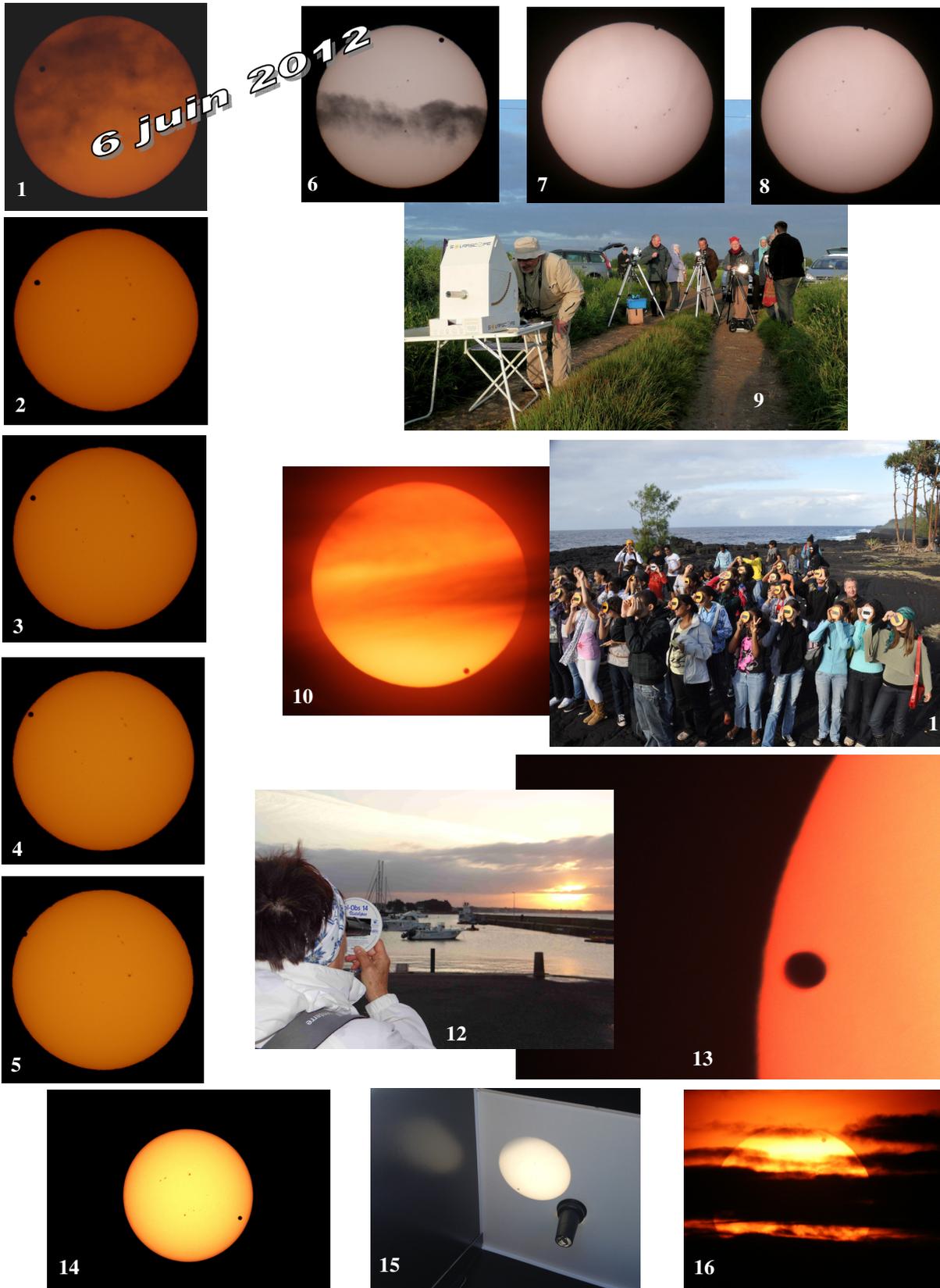
Fig.7. L'image après traitement.

Sur l'image traitée, nous pouvons voir trois couleurs dominantes : le bleu, le jaune et le blanc. Le blanc correspond à la synthèse additive des trois couleurs de filtres. Cependant, nous pouvons voir que les roches de la mer des Humeurs reflètent le bleu, cela signifie qu'elles absorbent donc le rouge et proche infrarouge.

Lorsque nous superposons le rouge et le proche infrarouge (1), le jaune apparaît sur l'image et lorsque nous ajoutons le bleu (2) à la superposition, le jaune reste jaune. Les roches absorbent donc le bleu. Dans cette région de la Mer des Humeurs, nous voyons donc qu'il existe au moins trois roches géologiquement différentes. Nous cherchons donc maintenant à savoir à quels types de roches correspondent chaque couleur.

Conclusion

Ce projet nous a amené à de nombreuses découvertes sur la géologie de la surface de la Lune, mais cela n'est pas terminé et nous avons encore d'autres expériences à réaliser ! Nous avons la tête dans la Lune depuis plus d'un an et nous ne sommes pas près d'y redescendre !!



Transit de Vénus du 6 juin 2012 : 1. à 5. depuis La Réunion, observatoire des Makes prises par Gaby Coupet , de 15 min en 15 min de 7 h 45 à 8 h 45 ; 6. à 8. depuis Saint Contest (Calvados) 6 h 30, 6 h 46 et 6 h 47 transmises par René Cavaroz ; 9. le groupe à Saint Contest ; 10. depuis Niort à 6 h 43 par Jean-François Blanchet ; 11. un groupe d'élèves observant avec des viséclipses depuis le Puits des Arabes à La Réunion photo transmise par Didier Alexandre ; 12. depuis le port Saint Jacques (Morbihan) observation entre deux nuages à l'aide de jumelles à travers un viséclipse ; 13. depuis l'Observatoire de Haute Provence à 6 h 29 min 40 s par Jean Strajnic et Jean-Eudes Arlot ; 14. depuis San Francisco le 5 juin à 14 h 58 Legastelos ; 15. depuis le Danemark à l'aide d'un solarscope transmise par Marie-Blanche Mahourat; 16. depuis Grenoble par Frédéric Borgnon.

VIE ASSOCIATIVE

Le CLEA dans les stages de formation

Des membres du CLEA participent à l'animation de stages de formation dans les académies. Nous rapportons ci-dessous les stages qui ont eu lieu dans les académies de Bordeaux, Nice.

Académie de Bordeaux

Les 14 et 15 mars, un stage de formation pour les professeurs de collèges de la Gironde a été proposé par Vincent Besnard, conseiller académique à la culture scientifique et technique.

Ce stage a été animé grâce à un partenariat entre l'observatoire de Bordeaux avec l'implication de Nathalie Bouillet et le CLEA avec Roseline Jamet à la manœuvre.

Il a regroupé 42 stagiaires de différentes matières, physique, mathématique, SVT, anglais, EPS, dans la bibliothèque de l'observatoire. Nous étions entourés de vieux ouvrages qui renfermaient tout un savoir des siècles passés.

Lors de la première journée, quatre conférences d'une heure chacune et suivies de questions ont permis de faire un grand tour d'horizon :

- **"La matière au fil du temps"** par Thierry Jacq ;
- **"Du système solaire aux confins de l'Univers"** par Laurent Chemin ;
- **"Historique de la construction de notre vision du monde"** par Ugo Hincelin ;
- **"Nouveaux mondes d'ici... et d'ailleurs !"** par Emmanuel di Folco.

Tous astrophysiciens ou thésards à l'observatoire de Bordeaux.



Tout sur les saisons.

À la tombée de la nuit, une soirée d'observation a permis d'aborder différents points tout en observant la Lune, Vénus, Jupiter, le ciel profond, ... sur le site de l'observatoire à Floirac. Les montreurs d'étoiles étaient : Ugo Hincelin de l'observatoire de Bordeaux (C8), Roseline Jamet (115 mm de son collège) Jean-Luc Fouquet (laser), Daniel Paupart (tablette) et Jean Ripert (dobson de 30 cm).

Tous les stagiaires présents auxquels s'étaient joints des thésards ont été ravis malgré la pollution lumineuse.

Le lendemain, fini la position statique car des ateliers étaient au programme.

Le matin les deux groupes ont pu assister à deux ateliers l'un sur les saisons, zodiaque, (Jean-Luc Fouquet) et l'autre sur la Lune (moi-même).

Au cours de ces deux journées les pauses café ont été fort appréciées, moments d'échanges et de convivialité orchestrés par Roseline Jamet et Daniel Paupart.

L'après-midi, Roseline Jamet a fait découvrir les possibilités du logiciel Stellarium autour de diverses problématiques et a présenté l'atelier qu'elle mène dans son établissement avec sa collègue d'arts plastiques.



Réflexion sur l'orbite de la Lune autour du Soleil.

Vincent Besnard qui a été présent tout au long du stage et nous l'en remercions, a fait le point sur le

stage. Les collègues ont fait part de leur satisfaction, surtout que certains animent des ateliers scientifiques ou participent au concours C Génial. Le stage s'est terminé par la visite de l'observatoire sous la conduite de Nathalie Bouillet.



Nathalie Bouillet présentant l'équatorial photographique.

Cet équatorial est l'un des astrographes construits à la fin du 19^{ème} siècle pour réaliser la carte du ciel. Les premières observations datent de 1889 et les derniers clichés de 1996 pour déterminer la trajectoire de la comète Hyakutake.

Toutes les plaques photographiques sont conservées dans un local maintenu à température constante. L'observation de certaines montre l'évolution de la pollution lumineuse sur le site.

Pour une visite virtuelle de l'observatoire : <http://www.obs.u-bordeaux1.fr/site1.html>

Remerciement à Nathalie Bouillet, Thierry Jack, Laurent Chemin, Ugo Hincelin, Emmanuel di Folco, Vincent Besnard, Roseline Jamet, Daniel Paupart et Jean-Luc Fouquet.

Brigitte Garreau aurait dû être avec nous, mais une jambe dans le plâtre la retenue loin du stage.

Jean Ripert

Académie de Nice

Neuf heures ce matin d'avril, dans la sombre salle de réunion du pavillon Henri Chrétien de l'observatoire de Nice, quatorze visages de stagiaires attentifs reflètent les variations lumineuses du « PowerPoint » projeté par Éric Fossat, astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Il nous emporte, avec lui, sur le continent Antarctique, à la recherche d'un ciel sans turbulence et transparent aux bouffées de chaleur des « stars » de l'hémisphère sud.



Éric Fossat (deuxième depuis la gauche et des stagiaires)

Voilà quelques minutes que nous avons mis le cap sur le dôme C, et soudain la porte du couloir s'entrouvre pour laisser passer une silhouette, furtivement discrète, élancée et barbue : Francis Berthomieu vient de surmonter les embouteillages Niçois.

En l'apercevant, mon esprit s'évade quelques instants pour me remémorer ce jour des années 2000 où M^{me} Bacchialoni, inspectrice régionale, m'invita à rejoindre Francis dans sa remarquable action de formation auprès des enseignants de physique. En effet, depuis quelques années déjà, il organisait et animait -au sens profond- le stage d'astronomie annuel du plan de formation. Puis est venu le temps de sa retraite et, depuis quatre ans, il me faut continuer « seul » son action auprès des jeunes collègues. Heureusement, soutenu par M^{me} Stromboni, inspectrice de physique, les stages se sont poursuivis et même développés exponentiellement : de exponentiel(0) stage par an en 2008 à exponentiel(1,099) actuellement, soit environ 45 stagiaires par année. Les professeurs varois sont accueillis deux jours par les passionnés du magnifique *Observatoire Amateur du Pic des Fées* à Hyères*; les « niçois », plus nombreux, profitent en deux fois deux jours de l'*Observatoire de la Côte d'Azur* et de ses astronomes professionnels.

Car pendant ce temps, Éric Fossat continue son aventure astronomique avec sa passion flamboyante, celle d'un quasi retraité prêt à repartir aux antipodes pour observer, mesurer ou convaincre. En cela il perpétue cette presque tradition, digne d'Yves Rabbia ou de Patrick de Laverny, astronomes intervenants les années passées. Et comme eux, il nous tient en haleine jusqu'à midi, sous le feu des questions de stagiaires, en pleine Liaison Enseignants-Astronomes. Il nous met en contact avec la science en marche, dans son quotidien ou ses grands élans, nous regonfle de passion afin de la faire partager à nos élèves jusqu'au prochain stage.

Mais midi a sonné, l'heure de partager un repas au restaurant de l'observatoire, avec sa vue imprenable sur Nice, l'accueil chaleureux de toute l'équipe du cuisinier et la qualité du menu. Nous y entendons parler « mille » langues, celles de thésards ou

astronomes invités. C'est l'occasion d'échanger entre stagiaires, de mieux se connaître; un point fort de la journée. Une fois le café dégusté, nous remontons à pied vers le **Pavillon Henri Chrétien**, sur cette petite route ensoleillée, tracée sur le flanc du Mont Gros, dominant la région. Nous profitons du parfum des cistes et autres fleurs de ce site naturel protégé; la conversation va bon train, sans que personne ne se doute de la bonne surprise qui nous attend.

En effet, Mme Olga Suarez responsable des relations **OCA**-Académie de Nice nous a invités à rejoindre Jean Pierre Rivet, astronome et responsable scientifique et technique de l'extraordinaire « grande lunette »: non seulement nous pourrions visiter la grande coupole d'Eiffel-Garnier et son monstre optique, mais, occasion exceptionnelle, J.P. Rivet sera à la manœuvre pour nous animer cette mécanique hors du commun, nous faire vivre le déroulement d'une observation (dommage que le nuit ne tombe pas brutalement...). Nous dépassons le **PHC**, nous nous engageons sur un petit chemin à flanc de colline, pavé de cailloux blancs qui permettaient aux astronomes de ne pas s'égarer de nuit, dans le maquis. Après avoir croisé un bélier (hirsute, pas la constellation), libre de brouter où il le désire, nous arrivons au sommet et avons le choc d'apercevoir ce grandiose bâtiment blanc conçu par le célèbre architecte Garnier (eh oui, celui de l'opéra de Paris !) surmonté de cette coupole unique, la plus grande de son époque construite dans les ateliers d'Eiffel, à Levallois Perret puis assemblée sur site. Là notre astronome guide nous conte son histoire, celle de ce Baron-banquier-ingénieur et mécène, Bischoffsheim qui décida de construire le plus moderne observatoire de la fin du XIX^{ème} siècle. Il n'hésita pas à prendre le risque technique et financier de soutenir cette monstrueuse coupole sur un simple bain d'eau circulaire, lui permettant une mobilité inégalée dont Eiffel fut si fier.

La lourde porte recouverte de bronze s'ouvre sur une obscurité imposante et fraîche. Nos yeux s'habituent rapidement et JP Rivet se met au pupitre de commande. Un bruit sourd et métallique nous parvient depuis les hauteurs invisibles, le cimier se décide à s'entrouvrir puis, béant, laisse la lumière du jour éclairer le cylindre blanc long de 17,5m, posé horizontalement à plus de 8m au-dessus du sol. Le groupe est silencieux, impressionné ; puis un premier stagiaire sort son portable pour immortaliser ce moment sans savoir que notre astronome réveille les moteurs de déclinaison et ascension droite. Et l'objet gigantesque se met à tourner en douceur, n'émettant qu'un son électrique et régulier. L'objectif de 76 cm s'éloigne alors vers le lointain cimier tandis que la platine oculaire vient vers nous, découvrant une énorme caméra électronique perfectionnée, presque anachronique en ces lieux.

Car le vieux monstre est toujours bien vivant grâce à l'équipe de JP Rivet qui explore électroniquement le monde des étoiles doubles, plusieurs dizaines de nuit par an. Ils perpétuent ainsi les travaux visuels de Paul Couteau. Mais mieux encore, des platines placées le long du tube aux deux extrémités nous confirment qu'une recherche de pointe s'y déroule actuellement, menant à de multiples publications. JP Rivet nous explique qu'il teste ici une future « lunette » spatiale dont l'objectif est un réseau de Soret, fonctionnant par diffraction. Les résultats obtenus sont très encourageants, comme l'attestent des images de Phobos et Deimos près de Mars. Reste à trouver un nouveau Bischoffsheim, prêt à financer un satellite double, l'un portant l'objectif (se présentant sous la forme d'une feuille mince dépliable), l'autre le détecteur placé à plusieurs kilomètres de là...

La tête dans les étoiles, nous quittons ce lieu magique avec regret. Pour retrouver en douceur le monde des mortels, nous continuons notre visite par le grand équatorial coudé, puis la superbe lunette Charlois dont l'activité scientifique est sans interruption depuis les années 1890 ! Enfin nous dévalons les petits sentiers de cailloux blancs jusqu'au **PHC**.



J.P. Rivet et la lunette de la coupole Charlois.

En ce milieu d'après-midi, le soleil brille avec force comme il sait le faire sur cette bien nommée côte d'azur. Alors pour clore cette première journée astronomique, nous observons le soleil depuis le parking de la bibliothèque Henri Chrétien. Nous manipulons un télescope de 100 mm avec un écran de

projection. Nous jouons avec un solarscope (invention de l'astronome niçois Gay). Nous admirons les protubérances et autres facules avec une lunette « H α » Coronado PST. Une autre partie du groupe décompose la lumière solaire avec des spectroscopes bricolés ou du commerce. Nous remettons au lendemain l'exploitation quantitative de ces données expérimentales, avant de nous séparer.

L'équipe de jeunes professeurs ne sait pas encore ce qui les attend demain; car ils ont « mangé leur pain blanc », fini les conférences et autres visites : désormais, au programme figurent travail et activités...

La deuxième matinée commence par une présentation générale des phénomènes célestes. Laurent Brunetto (professeur au lycée de Grasse et mandaté par l'Académie) vient nous apprendre à utiliser le logiciel « Stellarium ». Chacun a du apporter son ordinateur portable et le dur labeur commence.

Par des exercices pratiques, nous devenons maîtres de la voûte céleste à toute heure, en tout lieu, à toute époque. Nous observons la rétrogradation de mars, le passage de vénus, les éclipses et bien d'autres phénomènes à l'origine de nombreuses questions auxquelles Laurent et moi tentons de répondre via des schémas, animations ou autres maquettes. Nous parlons signes du zodiaque, calendriers solaires ou lunisolaires. Nous décortiquons celui de la poste.

Le dernier après-midi est consacré à l'exploitation quantitative des observations de taches solaires (celles des stagiaires et celles de Galilée), de travaux réalisés à partir de clichés du transit de vénus en 2004.



Initiation à l'utilisation du solarscope avec Laurent Brunetto

Par la suite, l'étude graphique d'un spectre solaire nous préoccupe car nous y cherchons le « code barre » de l'hydrogène. Enfin, nous abordons ce problème de spectroscopie solaire avec le logiciel « visual spec ». Nous terminons la partie active par un prolongement de la spectroscopie avec l'effet Doppler utilisé à la détermination de la période de rotation de Saturne.

Enfin, devant une assemblée de stagiaires exsangues, nous projetons le film dont le titre est bien connu de nos lecteurs : « École d'été du CLEA ». Puis, nous leur assénons : « vous devez adhérer au CLEA », tout en leur distribuant un exemplaire des Cahiers Clairaut.

Le stage se termine ainsi sur ce succédané de lavage de cerveau. Les participants nous quittent en jurant qu'ils reviendront...

Remerciements à : Francis Berthomieu, Laurent Brunetto, Patrick de Laverny, Eric Fossat, Yves Rabbia, Jean Pierre Rivet, Claude Stromboni, Olga Suarez.

Pierre Le Fur

**Un prochain article sera consacré à l'Observatoire du Pic des Fées à Hyères.*

Solutions des mots croisés p.

Horizontalement

1. Septentrion ; 2. UMi (Ursa Minor). Moral ; 3. Déclinaison (déclinaison magnétique entre le nord géographique et le nord magnétique) ; 4. Stars. NE (nord-est). Ut ; 5. Roses (des vents). Fée ; 6. DVD. Ici. ISS (International Space Station) ; 7. OE. Bouts ; 8. Union. Sud ; 9. Etna. Dial (sundial désigne un cadran solaire en anglais) ; 10. SSE (sud-sud-est). Boréale ; 11. Suspensif.

Verticalement

1. Sud-sud-ouest ; 2. Émet. Vents ; 3. Picard (il a mesuré un arc de méridien terrestre au 17^e siècle). Inès. 4. LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). Boa ; 5. Émission. BS ; 6. Non. Écu (de Sobiesky qui contient M11, amas surnommé le canard sauvage). Top ; 7. Transits. Ré ; 8. Raie. Süden ; 9. Ils. Fi. Dias ; 10. Ouest. Ali ; 11. Nantes. Clef.

Écoles d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter en astronomie ?

Vous souhaitez vous perfectionner ?

Vous avez le projet d'animer un club ?

Venez participer à une école d'été d'astronomie, au col Bayard, à 1 200 m d'altitude, dans un cadre prestigieux.



Des exposés accessibles à tous



Des ateliers pratiques et des observations

Toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements sur le site du CLEA

Voir la vidéo à l'adresse :

accs.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea

Les productions du CLEA ⁽¹⁾

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, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

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

DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Écoles d'Été d'Astronomie)

Le formulaire de commande est sur le site.

(1) vente aux adhérents uniquement

Planétarium

Il est possible également de louer le planétarium gonflable (starlab) du CLEA. Cette année 2012, il sera en Région Midi-Pyrénées.(uniquement pour le planétarium contact : jean.a.ripert@wanadoo.fr)

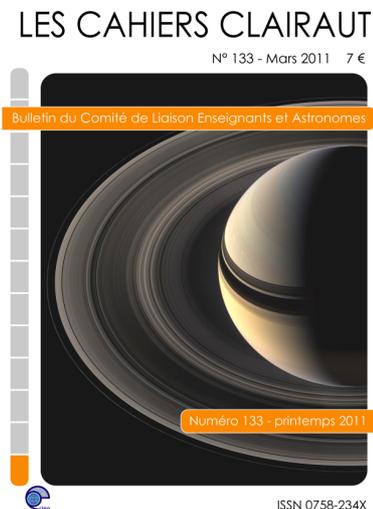
Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT



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
Réalizations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

www.clea-astro.eu

OU

www.ac-nice.fr/clea

Siège Social :

CLEA, c/o CFEED
5, rue Thomasmann
case courrier 7078
75205 PARIS Cedex

École d'Été d'Astronomie :

daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :

larcher2@wanadoo.fr

Ventes des productions :

www.clea-astro.eu

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr

charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2011 :	5 €
Abonnement CC pour 2011 :	25 €
Adhésion + abonnement CC :	30 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	35 €

Chèque à l'ordre du CLEA, à envoyer à :

Roseline Jamet
83, rue Pierre Curie
33140 VILLENAVE D'ORNON

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari
Rédacteur de publication : Christian Larcher
Imprimerie France Quercy 46090 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368
Prix au numéro : 7 €
Revue trimestrielle : numéro 138, juin 2012