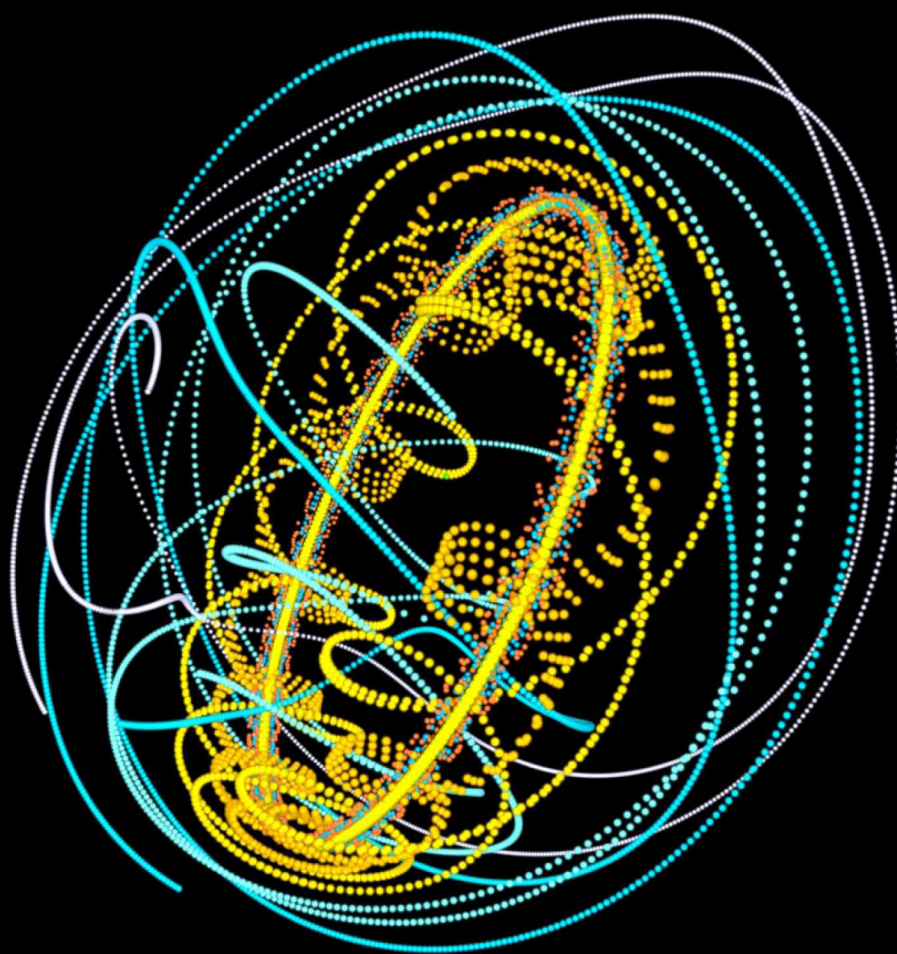


LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 152 - Décembre 2015 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 152 - hiver 2015-2016



ISSN 0758-234X

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 (Ecoles 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 2015

Présidente : Cécile Ferrari
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjoint : Jean-Luc Fouquet

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

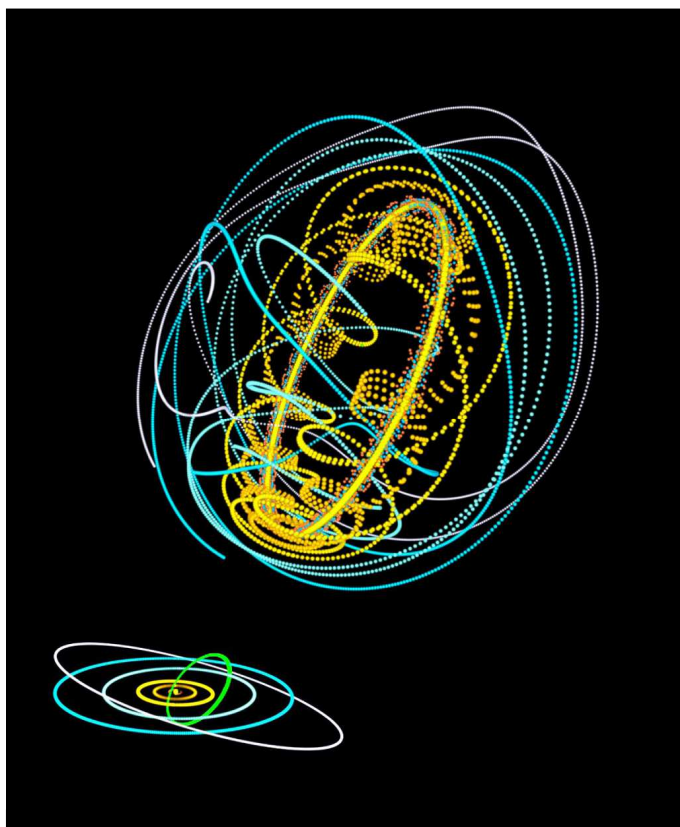
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

Communication : Charles-Henri Eyraud

École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault

Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



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

Marie-Christine Angonin, Francis Berthomieu, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Pacôme Delva, Véronique Hauguel, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Anne-Marie Louis, Pierre Magnien, Daniel Paupart, Jean Ripert, Philippe Robutel, Béatrice Sandré, Liliane Vilas.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 152, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Orbites de planètes

En bas, le système solaire auquel a été ajouté une planète virtuelle, en vert.

Au centre, les mouvements apparents des planètes de notre système solaire (avec Pluton), vues depuis la planète virtuelle verte. On y observe, entre autres, des boucles de rétrogradation tridimensionnelles. On peut imaginer d'éventuels habitants de cette planète verte tentant de décrypter leurs observations...

Simulation de Jean-François Colonna (CMAP/École polytechnique). Vous trouverez sur son site plus de 5 000 images et animations sur divers sujets (www.lactamme.polytechnique.fr)

Les Cahiers Clairaut

Hiver 2015-2016

Éditorial

Depuis la publication des *Principia* de Newton en 1687 le mouvement des planètes autour du Soleil semblait être parfaitement décrit par les lois de la gravitation universelle. Pendant plus de deux siècles ces lois permirent de faire des prévisions toujours vérifiées. Par exemple c'est en appliquant les lois de Newton que fut trouvée une nouvelle planète (Neptune). Arago présenta cette découverte à l'Académie des Sciences en disant « *M. Le Verrier vit le nouvel astre au bout de sa plume* » Cette théorie marchait si bien que, pendant des décennies, la théorie d'Einstein paraîtra presque superflue. À l'époque le seul désaccord connu concernait un infime détail, celui de l'avance du périhélie de la planète Mercure. Celui-ci avait le mauvais goût de s'écarter de la théorie de Newton de... 43 secondes d'arc... par siècle, soit un degré au bout de 83 siècles.

En novembre 1915, il y a tout juste 100 ans, Einstein présente la théorie de la Relativité Générale, une théorie totalement différente de celle de la gravitation ; elle rendait parfaitement compte de cet écart. Dans cette nouvelle théorie, ce sont les masses elles-mêmes qui déforment l'espace (ou plutôt l'espace-temps) et modifient sa géométrie, obligeant les particules matérielles et la lumière à suivre des chemins particuliers appelés « géodésiques ». Cette interprétation est actuellement joliment résumée par le physicien américain John Wheeler : « *La matière dit à l'espace de se courber et l'espace dit à la matière comment se déplacer* ». On peut donner une sorte d'image de cette déformation de l'espace et de ses conséquences en évoquant une toile élastique sur laquelle on déposerait une lourde boule.

Pour fêter cet anniversaire ce numéro vous convie à une « *promenade dans l'espace-temps* » sans utiliser aucun développement mathématique. Il est accompagné d'un *TP découverte* sur les espaces courbes.

La partie thématique de ces Cahiers Clairaut approfondit le thème du précédent numéro sur les trajectoires des planètes allant jusqu'à une approche de la théorie du chaos.

Les observateurs attentifs aux phénomènes lumineux s'intéresseront aux *halos lunaires et parasélènes* un article vient compléter celui paru dans le numéro 150 intitulé *les parhélies, de faux Soleils dans le ciel*.

Bon ciel à tous

Christian Larcher, pour l'équipe.

Article de fond

Promenons-nous dans l'espace-temps

Pacôme Delva, Marie-Christine Angonin p 2

Avec nos élèves

TP à la découverte des espaces courbes

Pacôme Delva, Marie-Christine Angonin p 7

Thème : LES TRAJECTOIRES

Comment représenter les orbites des planètes p 10

Pierre Causeret

p 11

Jeux

Mots croisés en orbite

Pierre Causeret p 14

Article de fond

Chaos dans le système solaire ?

Philippe Robutel p 15

Avec nos élèves

Éléments d'une orbite

François Hurter p 20

Histoire

Évolution des trajectoires des planètes (suite)

Véronique Hauguel, Pierre Causeret p 23

Histoire

Textes anciens

p 28

Observation

Halos lunaires et parasélènes

Anne-Marie Louis p 30

Reportage

Visite au VLT le 10 janvier 2015

Christian Larcher p 34

Ciel d'hiver

Pierre Causeret p 38

Vie associative

En Particul ... ier

Daniel Paupart p 39

Solutions mots croisés

p 40

ARTICLE DE FOND

Promenons-nous dans l'espace-temps...

Pacôme Delva et Marie-Christine Angonin

du SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, LNE

Une promenade rapide et dense. Celle-ci décrit les rapports étroits qui unissent temps et espace, explique comment en relativité « la mesure d'une distance devient fondamentalement équivalente à une mesure de temps ». Elle rend compte de la complexité de la synchronisation des horloges dont les indications varient non seulement avec la vitesse mais également avec la position dans le champ de gravitation.

En 1905, après une réflexion approfondie sur les problématiques liées à la synchronisation d'horloges éloignées, Albert Einstein publie les bases de la relativité restreinte, première étape pour la théorie de la relativité dont la « généralisation » sera publiée en 1916 (Albert Einstein, « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », dans *Annalen der Physik*, vol. 17, 30 juin 1905, p. 891-921). Dans ce texte fondateur, Einstein décrit sa nouvelle approche de la notion de temps : « On pourrait penser que toutes les difficultés liées à la définition du « temps » peuvent être surmontées en remplaçant « temps » par « position de la petite aiguille de ma montre ». » Cet exemple illustre une notion fondamentale, le temps propre, tout en soulignant que le temps n'est plus une quantité absolue indépendante du référentiel choisi, mais le résultat d'une expérience liée au référentiel de l'expérimentateur.

Pour un événement donné (une collision d'objets, un flash, une mesure particulière, etc.), l'expérimentateur associe une date (temps) et une position (espace) dans son référentiel comobile (où il est au repos). La théorie de la relativité nous apprend que ces notions sont si intimement liées qu'elles peuvent se mêler de manière différente suivant le référentiel choisi pour les exprimer. Un expérimentateur associe ainsi des temps et des positions qui peuvent être différents de ceux obtenus par un autre expérimentateur ayant une vitesse relative au premier. Ce n'est pas nouveau : dans notre espace quotidien à trois dimensions, nous avons le même problème avec les notions de hauteur, largeur et profondeur qui matérialisent trois directions usuelles de l'espace. Suivant que l'on mette le meuble debout ou couché, on peut interpréter une arête particulière du meuble comme sa hauteur ou sa profondeur. Dans les faits, ces trois notions recouvrant la même réalité d'espace, il peut y avoir confusion. La relativité explique que cette ambiguïté s'étend de fait à l'ensemble des quatre « directions »

de l'espace-temps : suivant la manière dont il observe un événement, l'expérimentateur pourra interpréter les coordonnées comme une combinaison différente du temps et de l'espace¹.

Comment peut-on alors faire de la physique dans un monde aussi « subjectif » ? La citation d'Einstein nous sert de guide : *seule la mise en place d'une expérience précise peut permettre de donner une réponse*. Prenons une particule (ponctuelle) qui se déplace. Elle suit une trajectoire dans l'espace-temps : ce constat a une réalité physique quelle que soit la manière dont on l'observe. Les relativistes appellent cette trajectoire « ligne d'univers ». On peut même aller plus loin dans la description : si on colle une horloge à la particule, cette horloge va mesurer le temps que met la particule à parcourir la ligne d'univers, que l'on appelle son temps propre. Elle définit ainsi une chronologie découlant directement du principe de causalité appliqué à la particule. Comme l'espace et le temps ne sont qu'affaire d'interprétation, ce temps propre est une mesure directe de la « longueur » de la ligne d'univers de la particule dans l'espace-temps. Là encore, cette mesure a une réalité intrinsèque. En raisonnant globalement dans l'espace-temps, il est donc possible de trouver des éléments physiques indépendants de l'état de l'expérimentateur qui va les observer. L'observateur ne fait alors que projeter la ligne d'univers et le temps propre associé dans les coordonnées que définit son référentiel, c'est-à-dire qu'il interprète leurs caractéristiques en termes d'espace et de temps suivant son protocole d'observation (et en particulier sa vitesse).

¹Dans un espace-temps ayant une faible courbure (comme l'environnement proche de la Terre pour des observateurs à faible vitesse), le temps et l'espace ne peuvent cependant pas intégralement s'interchanger. La situation est beaucoup plus complexe en présence de gravitation forte comme dans l'environnement proche d'un trou noir où temps et espace peuvent inverser leurs rôles (voir, par exemple, le livre de J. P. Luminet).

Parmi les nombreuses conséquences d'une telle approche, il apparaît qu'il n'existe plus de chronologie sur laquelle tous les expérimentateurs ou observateurs peuvent s'accorder. Les phénomènes décrits dans tous les ouvrages usuels en relativité (pour des changements de référentiel : dilatation des temps, contraction des longueurs, ...) en découlent directement. Suivant la vitesse de l'expérimentateur, il est effectivement possible de constater des phénomènes qui choquent le bon sens commun de la physique newtonienne : chronologie inversée pour des événements n'ayant pas de lien causal, changement apparent de forme des objets, modification de la mesure des angles, effet Doppler transverse, etc.

Si le temps et l'espace peuvent se mêler dans les équations relativistes, il faut une constante permettant de « transformer » le temps en espace. Cette constante doit avoir les dimensions d'une vitesse. Elle est généralement appelée « c ». Il s'agit véritablement d'une constante caractéristique de l'espace-temps, qui correspond à sa structure profonde. Il se trouve que le principe de relativité appliqué en électromagnétisme a pour conséquence d'imposer que « c » soit la célérité d'une onde électromagnétique dans le vide du fait que le photon a une masse nulle et que « c » soit ainsi couramment appelée vitesse de la lumière. Mais il s'agit d'une conséquence de l'équivalence entre temps et espace, et non pas un rôle privilégié de la lumière dans la relativité. Ainsi, historiquement, Einstein a donné la constance de la vitesse de la lumière comme postulat de la relativité restreinte dans son article de 1905, postulat qui est souvent formulé sous cette forme dans les ouvrages. Mais, dès 1910, les chercheurs en relativité ont démontré que cette formulation du postulat peut être remplacée pour une approche purement géométrique en postulant une structure de l'espace-temps (telle que homogène, isotrope, avec des changements de référentiel linéaire, etc.) dans laquelle le principe de causalité s'applique. Il en découle alors une vitesse limite pour les particules de masse nulle dont les photons : la vitesse « c ».

Cette constante « c » est donc la clé qui permet de faire correspondre temps et espace pour le relativiste. Par exemple, pour les théoriciens relativistes, temps et espace sont si intimement liés qu'ils utilisent dans les équations un « pseudo-temps », $T = ct$, qui a les dimensions de l'espace ou plus exactement ils choisissent de poser dans leurs équations : $c = 1$, ce qui n'est pas sans surprendre quand on n'est pas prévenu ! Toutefois, la relativité est une théorie qui

ne viole pas le principe de causalité. Pour chaque observateur, il existe une chronologie propre, un axe du temps orienté du passé vers le futur dont l'observateur peut faire la mesure indépendamment de l'espace. Dans le cadre de la relativité restreinte, cette définition du temps et de l'espace liée au référentiel de l'observateur est applicable sur l'ensemble d'un univers vide de masse et d'énergie. Nous verrons plus loin que la situation est plus compliquée quand la gravitation s'en mêle.

La définition métrologique du mètre à partir de celle de la seconde est issue précisément de cette conception de l'espace-temps : la vitesse de la lumière est fixée en 1983 par le Bureau International des Poids et Mesures à la valeur $c = 299\,792\,458$ m/s et est ainsi définie de manière exacte. Cela signifie qu'à partir du moment où on ne remet pas en cause les fondements de la relativité, une expérience de mesure de la vitesse de la lumière dans le vide ne peut donner que la valeur décrétée pour « c » : si un écart est mesuré, il s'agit d'une erreur de mesure. Autrement dit, la mesure d'une distance devient alors fondamentalement équivalente à une mesure de temps. Il suffit donc de choisir la technique permettant la plus grande précision de mesure pour définir de façon métrologique temps et espace de la même façon. Actuellement, la fréquence est la quantité physique mesurée avec la plus grande précision grâce aux propriétés quantiques des atomes, par exemple avec les horloges atomiques. La fréquence étant l'inverse d'un temps, les métrologues ont donc choisi de définir la seconde à partir d'une transition atomique et d'en déduire la valeur du mètre.

En 1916, Albert Einstein généralise la relativité et publie un article expliquant que la gravitation s'explique par une déformation de l'espace-temps. Elle n'est plus une force : la présence d'un objet massif courbe l'espace-temps et perturbe les mesures d'un observateur de façon plus ou moins forte suivant la compacité² de l'objet. Dans le cas de la Terre ou du Système Solaire, les effets sont ténus, mais peuvent être perceptibles. Pour une horloge se déplaçant à faible vitesse autour d'une planète ou d'une étoile, le temps ne s'écoule pas de la même façon suivant sa distance à la masse : ce phénomène constitue le décalage d'Einstein ou redshift gravitationnel. Avec des horloges atomiques optiques, il est possible de détecter l'effet d'un déplacement de quelques centimètres dans le

² La compacité d'un corps est proportionnelle à sa masse et inversement proportionnelle à son rayon.

potentiel gravitationnel de la Terre. Sans aller jusqu'à ces mesures de haute précision, l'effet est couramment mesuré par les horloges des systèmes de positionnement (GPS ou Galileo) et doit être pris en compte si l'on ne veut pas se tromper en dérivant de plus de 10 km pour un voyage d'une journée !

Pour généraliser la relativité restreinte il faut donc considérer que l'espace-temps est courbe. Nous allons voir maintenant ce que ce terme recouvre, et comment on peut opérer la transition entre relativité restreinte et générale.

En relativité restreinte il est possible de définir un temps qui s'écoule de la même façon pour tous les observateurs dans un référentiel donné : leur temps propre. Cependant, on a vu que le temps qui s'écoule entre deux événements (par exemple le temps aller-retour d'un signal lumineux) dépend de l'observateur, et ne sera pas le même pour deux observateurs ayant une vitesse relative. Cela implique d'avoir un outil de calcul adapté permettant de relier ces différentes mesures. Cet outil se nomme la métrique de l'espace-temps. La métrique permet de calculer le temps qui s'écoule le long de la ligne d'univers d'un observateur, ou encore de calculer la « distance » entre deux événements quelconques de l'espace-temps.

Dans le cas d'un espace euclidien à trois dimensions, la métrique est ce qui permet de calculer les distances usuelles entre deux points quelconques de l'espace. Dans ce cas les distances entre deux points seront toujours positives. On peut y associer un espace vectoriel dans lequel tous les vecteurs ont une norme positive. L'espace-temps de la relativité restreinte, à cause des propriétés énoncées plus haut, ne peut pas être juste une généralisation de l'espace euclidien en quatre dimensions. Il faut changer la nature même de la métrique afin d'introduire une nouvelle phénoménologie. La métrique de la relativité restreinte est nommée minkowskienne, ou pseudo-euclidienne. La « distance » entre deux événements de l'espace-temps n'est plus forcément positive comme dans l'espace euclidien : elle peut être nulle ou encore négative, de même que les « normes » des vecteurs !

Si le temps s'écoule différemment entre deux référentiels qui ont des vitesses relatives, comment définir la simultanéité d'événements observés par différents observateurs liés à ces deux référentiels ? Il faut pouvoir relier les mesures de temps dans un référentiel et dans l'autre. Les deux temps différents

des deux référentiels sont appelés temps « coordonnée », car ils font chacun partie d'un système de coordonnées à quatre dimensions utilisé pour quadriller l'espace-temps et ainsi repérer les événements. Dans un référentiel donné, le temps coordonnée est aussi le temps que mesure un observateur immobile dans ce référentiel. Ainsi un référentiel en relativité restreinte peut être matérialisé par une classe d'observateurs fixes les uns par rapport aux autres, allant à la même vitesse (même norme, direction et sens) et munis des mêmes horloges. C'est un référentiel global. La métrique permet de faire le lien entre les temps mesurés par deux classes d'observateurs ayant des vitesses différentes. De façon pratique, il existe différents moyens de comparer le temps mesuré par ces deux classes d'observateurs afin de mesurer la désynchronisation de leurs horloges.

Par exemple :

- À l'aide de signaux lumineux : une horloge envoie à une deuxième horloge un signal lumineux qui est instantanément réfléchi vers la première horloge. La mesure du temps aller-retour du signal par la première horloge, ainsi que la mesure du temps de réflexion par la deuxième horloge permettent une définition opérationnelle de la simultanéité. C'est la convention de simultanéité d'Einstein-Poincaré.

- À l'aide d'une horloge mobile : on synchronise une horloge A avec une horloge mobile, qui se déplace ensuite très lentement vers une seconde horloge B. La mesure de la différence de temps entre l'horloge B et l'horloge mobile permet une nouvelle définition opérationnelle de la simultanéité. C'est la convention de simultanéité par transport lent d'horloges.

En relativité restreinte ces deux conventions opérationnelles de simultanéité sont équivalentes, et il est possible de les utiliser afin de synchroniser toutes les horloges d'observateurs fixes dans un référentiel inertiel donné. C'est une des caractéristiques d'un espace-temps « plat ». Nous allons voir que ces propriétés ne sont plus vraies dans un espace-temps « courbe », c'est-à-dire en présence de matière et d'énergie.

Mais d'abord intéressons-nous à une classe d'observateurs situés dans un référentiel tournant, par exemple le référentiel terrestre qui est fixe par rapport à la Terre, avec son origine au centre de masse de la Terre. Dans un tel référentiel, même si les observateurs sont fixes les uns par rapport aux autres, ils n'ont pas la même vitesse – un observateur situé au pôle nord aura une vitesse nulle alors qu'un observateur situé sur l'équateur terrestre

aura une vitesse maximale. Ainsi, de la même manière qu'une balle en chute libre ne peut pas avoir une trajectoire rectiligne uniforme dans un tel référentiel non-inertiel, la trajectoire d'un « rayon » lumineux ne peut pas être une droite : c'est l'effet Sagnac. Cet effet est un effet de référentiel, ou encore de coordonnées. Dans le cas d'un système de positionnement par satellites comme Galileo, la non-prise en compte de cet effet peut résulter en une erreur de positionnement de l'ordre d'une trentaine de mètres. Cependant, il suffit d'un changement de coordonnées adéquat pour revenir à un référentiel inertiel et ramener les trajectoires des rayons lumineux à des droites. C'est une des caractéristiques de l'espace-temps plat, ou de Minkowski.

Cela n'est plus vrai en relativité générale, en présence de matière et d'énergie. Dans cette théorie, les propriétés de l'espace-temps de la relativité restreinte ne peuvent être valides que de façon locale, c'est-à-dire au voisinage d'un événement sur une distance qui soit petite devant une nouvelle quantité représentative de l'espace-temps : sa courbure. Ainsi sur un domaine de l'espace-temps de la taille ou plus grand que sa courbure caractéristique, il n'est plus possible de trouver un changement de coordonnées qui permette de ramener les trajectoires des rayons lumineux à des droites : le canevas de l'espace-temps est alors déformé, comme une nappe à laquelle on ferait subir des ondulations.

Nous pouvons avoir quelques intuitions des propriétés de l'espace-temps courbe. De la même façon que nous avons changé la géométrie euclidienne de l'espace à trois dimensions en une géométrie « pseudo-euclidienne » à quatre dimensions, on va changer la géométrie courbe – ou riemannienne – de la sphère à deux dimensions en une géométrie « pseudo-riemannienne » à quatre dimensions. Ainsi certaines propriétés de l'espace-temps de la relativité générale peuvent être représentées par analogie avec la surface courbe de la sphère.

Par exemple, les « lignes droites » de la sphère – ou géodésiques – sont les grands cercles de la sphère : elles sont donc fermées. On retrouve ce phénomène pour les orbites des planètes autour d'une planète : bien que soumises à aucune force – la gravitation n'est plus une force – leur trajectoire n'est pas rectiligne uniforme, mais une géodésique (fermée) de l'espace-temps. On peut voir aussi que sur la sphère, il n'est pas possible de trouver un changement de coordonnées qui permettent de représenter sur un

plan tous les grands cercles comme des droites. On pourra par exemple grâce à une projection cylindrique tangente à l'équateur (projection de Mercator) transformer l'équateur et les méridiens en droites. Les autres grands cercles resteront toujours des courbes sur le plan. C'est une des caractéristiques des espaces courbes, et cela reste encore un casse-tête aujourd'hui lorsque l'on veut dessiner une carte géographique. On voit aussi que deux méridiens terrestre finissent par se croiser aux pôles. Ce sont pourtant deux droites « parallèles » de la sphère. Il est facile de faire découvrir quelques propriétés des espaces courbes à des étudiants munis d'un matériel minimum (voir le TP page 6), même si celles-ci vont leur paraître déroutantes.

Voyons maintenant une conséquence pratique plutôt embêtante de la courbure de l'espace-temps : il n'est pas possible de synchroniser toutes les horloges fixes d'un même référentiel avec les procédures expliquées plus haut. Supposons que nous utilisions la procédure de synchronisation d'Einstein : on synchronise une horloge A fixe par rapport à une horloge B, puis une horloge C fixe par rapport à l'horloge B, alors les horloges A et C ne seront généralement pas synchronisées entre elles ; cette procédure est non transitive. Il faut alors trouver une nouvelle convention de simultanéité qui évite ces difficultés.

Ce nouveau moyen s'appelle la simultanéité coordonnée, et s'opère au travers de la métrique de l'espace-temps. La métrique permet de relier le temps mesuré par n'importe quelle horloge à un temps coordonnée, c'est-à-dire la coordonnée temporelle du référentiel spatio-temporel qui quadrille l'espace-temps afin de repérer ces événements. Ainsi, la connaissance d'un modèle géométrique de l'espace-temps, c'est-à-dire la donnée de sa métrique, nous permet de construire un temps virtuel, mathématique, à partir des mesures d'horloges. C'est un temps conventionnel qui nécessite de se mettre d'accord internationalement sur la forme de la métrique, c'est-à-dire sur le choix conventionnel du référentiel spatio-temporel. À partir de cette métrique, il est possible de transformer le temps propre de n'importe quelle horloge (quel que soit son mouvement) en temps coordonnée du référentiel conventionnel. C'est cette convention qui est à la base de la synchronisation des horloges pour la plupart des applications, par exemple pour l'établissement du temps atomique international (TAI), ou pour la synchronisation des horloges des satellites GNSS (GPS, Galileo, etc.). Ici le mot

synchronisation doit être compris dans un sens plus large que d'habitude, c'est-à-dire comme la détermination de la différence entre le temps propre d'une horloge et le temps coordonné du référentiel conventionnel.

L'Union Astronomique Internationale (UAI) recommande de choisir le GCRS (Système de Référence Céleste Géocentrique), dont la coordonnée temps est le TCG (Temps Coordonné Géocentrique), qui peut s'interpréter comme le temps mesuré par une horloge située infiniment loin de la Terre. En pratique, nous utilisons une autre échelle de temps, TT (le Temps Terrestre), qui diffère de TCG par un ratio constant, et qui peut s'interpréter comme le temps donné par une horloge située sur le géoïde (surface coïncidant avec le niveau moyen des mers). Le Temps Terrestre est réalisé grâce à un ensemble d'horloges atomiques parmi les plus performantes et stables sur le long terme. Une horloge qui n'est pas située sur le géoïde doit alors subir une correction en fréquence proportionnelle à son altitude (en première approximation) afin de donner le Temps Terrestre. L'échelle de temps (fictive) reconstruite de la sorte s'appelle le Temps Atomique International (TAI), à partir duquel est défini le Temps Coordonné Universel (UTC) que le monde entier utilise. Voici donc une application de la relativité générale utilisée par tout le monde et pourtant méconnue : le temps auquel chacun synchronise sa montre ou son téléphone n'est qu'un temps virtuel, mathématique qui n'a de sens que dans un espace-temps courbe à quatre dimensions !

Ceci vaut pour la construction des échelles de temps, mais est aussi intimement lié à la construction des référentiels spatiaux. En effet, la construction de l'un est conditionnée à l'autre, vu qu'ils ne sont que les reflets d'un même objet géométrique : la métrique de l'espace-temps. Ainsi, de la mesure du temps va naître l'espace. En effet, les constructions des référentiels modernes sont entièrement basées sur des mesures de temps ou de fréquence. Par exemple, pour construire le référentiel terrestre ITRS (Système de Référence Terrestre International), on utilise quatre techniques :

- les systèmes de positionnement par satellites, qui reposent sur des mesures de temps de vol de signaux entre différentes horloges ;
- le VLBI (Intérférométrie à Très Longue Base) : qui mesure les différences de temps d'arrivée entre différentes horloges de signaux venant de quasar lointains ;
- le SLR, qui mesure des temps aller-retour de

signaux laser réfléchis sur des satellites ;
- et enfin DORIS, un système de positionnement par mesure de la fréquence de signaux micro-onde. Toutes ces mesures doivent être interprétées dans le cadre de la relativité générale si l'on veut avoir la plus grande précision possible dans la construction du référentiel terrestre.

Évidemment, les effets relativistes sont difficiles à mesurer à faible vitesse et dans un champ gravitationnel comme celui de la Terre et nous n'avons pas l'habitude de les percevoir dans notre quotidien. Cependant, les progrès de la métrologie, les techniques de communication à l'échelle planétaire, le développement du spatial, etc. imposent la prise en compte des effets relativistes, aussi ténus soient-ils, même pour des vitesses faibles. Lorsque deux ordinateurs communiquent entre deux continents, les problèmes de synchronisation peuvent devenir cruciaux. De même, le temps est une donnée importante pour les transactions bancaires et les opérations boursières, parfois cela se joue à la milliseconde entre des personnes séparées de milliers de kilomètres. La relativité est donc présente partout au quotidien, le tout est de savoir déterminer quand il est nécessaire de la prendre en compte.

Pour aller plus loin

Références « grand public » en français :

- « Carnets de voyage relativistes » H.P. Nollert et H. Ruder, 2005, Belin - Pour la science
- « Comprendre Einstein en animant soi-même l'espace-temps » S. Durand, 2014, Belin
- « La relativité animée », S. Durand, 2003, Belin
- « La relativité en images », B. Bassett et R. Endley, 2015, edp sciences
- « Les trous noirs », J.P. Luminet, 1992, Points Sciences

Un livre anglais permettant d'aller un peu plus loin sans trop de formalisme :

"General relativity without calculus : a concise introduction to the geometry of relativity", José Natario, 2011, Springer

Ouvrages de référence en français conseillés par les auteurs (niveau master et au-delà) :

- « Relativité restreinte : des particules à l'astrophysique » E.ourgoulhon, 2010, EDP Science/CNRS éditions
- « Relativité et gravitation » Ph. Tourenç, 1997, Armand Colin

Un site donnant des vidéos de simulations relativistes : <http://people.physics.anu.edu.au/~cms130/TEE/site/tee/home.html>

AVEC NOS ÉLÈVES

Indications pour réaliser un TP à la découverte des espaces courbes

Pacôme Delva et Marie-Christine Angonin

du SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University,
CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, LNE

Ceci n'est pas un TP clefs en main : il propose plusieurs activités pour partir à la découverte des géométries des espaces courbes, que l'on peut relier à une introduction à la théorie de la relativité générale, par exemple l'article p. 2 de ce même numéro. Il conviendra d'adapter ces activités au niveau de la classe et au temps dont l'on dispose.

Objectifs

- Découvrir quelques conséquences de la géométrie d'une surface courbe (somme des angles d'un triangle, géodésiques) ;
- Comparer la géométrie plane et la géométrie courbe ;
- Découvrir quelques conséquences astrophysiques de l'espace-temps courbe.

Matériel

- Pour les élèves : papier bristol (quadrillé), ruban adhésif de couleur (ou fil et punaises), agrafeuse, ciseaux, règle, rapporteur, crayon ;
- Pour l'introduction : un planisphère et un globe terrestre.

Activités

Introduction sur la courbure

Le but de l'introduction est de faire prendre conscience aux élèves qu'il y a des différences entre les surfaces courbes et les surfaces planes. Pour cela on leur propose de comparer le chemin le plus court entre deux villes éloignées sur Terre, sur un planisphère et sur un globe terrestre :

- sur le planisphère, le trajet le plus direct est la ligne droite. On peut tracer cette ligne sur le planisphère, puis la reproduire sur le globe terrestre ;
- sur le globe terrestre, le trajet le plus direct est une portion d'un grand cercle (une des géodésiques de la sphère). On peut le tracer à l'aide d'un scotch, d'une règle souple qui épouse la forme du globe ou encore d'un fil tendu entre deux punaises.

En comparant les deux trajectoires, on se rend compte qu'elles sont différentes et qu'elles n'ont pas la même longueur : la plus longue est celle qui correspond à la ligne droite du planisphère. On en déduit que les lignes droites du plan ne sont pas les mêmes que les « lignes droites » (au sens de plus

court chemin d'un point à un autre) de la sphère : la géométrie est différente.

La sphère a une courbure constante positive alors que le plan a une courbure nulle partout. Cette différence se manifeste dans le fait qu'il est impossible de fabriquer une sphère à l'aide de petits bouts de papier plats.

Le posicône

1) Rappel sur le triangle

Chaque élève trace un triangle sur une feuille et mesure ses trois angles à l'aide du rapporteur, puis vérifie que la somme des angles fait bien 180 degrés.

2) Fabrication d'un posicône

Chaque élève découpe une tranche dans le papier bristol comme illustré ci-dessous, puis ramène les deux bords et les agrafe ensemble. On obtient alors un posicône, c'est à dire un cône avec un point de courbure positive. Toute la courbure de cette surface est concentrée à la pointe du cône, alors que tout point en dehors de la pointe a une courbure nulle. La courbure totale de ce posicône est non nulle, ce qui se caractérise par le fait qu'il est impossible de l'aplatir sans le déchirer. Cependant, toute surface ne contenant pas la pointe du cône peut s'aplatir sans se déchirer, ce qui caractérise le fait que la courbure est nulle en dehors de la pointe du cône.

3) Comment tracer une géodésique ?

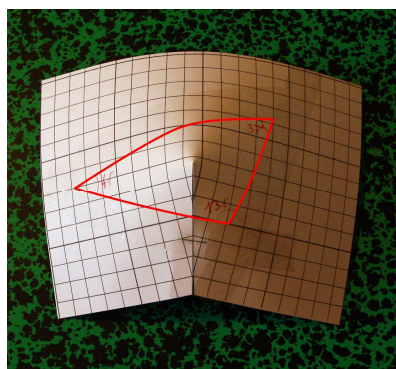
Les géodésiques sont les « lignes droites » d'une surface courbe, c'est-à-dire les trajectoires qui minimisent la distance parcourue entre deux points. Sur un plan, ce sont les droites que l'on trace à l'aide d'une règle. Sur le posicône, on peut utiliser le rouleau de ruban adhésif pour tracer les géodésiques : il faut coller le ruban bien à plat (sans déformations) sur le papier bristol. On peut vérifier, lorsque l'on enlève les agrafes et que l'on aplatit le posicône, que le ruban

adhésif suit en fait une ligne droite pourvu qu'il ne passe pas sur la pointe du cône. Ceci révèle le fait que les surfaces en dehors de la pointe du cône sont de courbures nulles, et partagent donc les mêmes géodésiques que le plan : des droites. Il est aussi possible de tracer ces droites avec une règle en aplatissant partiellement le posicône, mais c'est moins pédagogique et ne fonctionnera pas avec une surface de courbure constante comme la sphère.

4) La somme des angles d'un triangle, ou comment mesurer la courbure totale ?

Demander à chaque élève de dessiner un triangle grâce au ruban adhésif.

Chaque côté du triangle doit être une « ligne droite », ou géodésique, et on veillera donc à ce que le ruban adhésif qui représente un des côtés du triangle soit collé bien à plat sans



pliures. On demandera à quelques élèves de dessiner leur triangle de façon à ce que la pointe du posicône soit en dehors, et aux autres d'inclure la pointe à l'intérieur du triangle.

Ensuite, on défait les agrafes et on met la surface à plat (pour cela il faut découper un des côtés du triangle). Cela permet de mesurer à plat chaque angle formé par les trois sommets du triangle. Demander à chaque groupe de faire la somme de ces trois angles. On peut recueillir les résultats de chaque groupe et les regrouper sous la forme d'un tableau, et réfléchir ensemble à la signification des résultats (qui sont a priori tous différents).

Voici quelques conclusions auxquelles on peut aboutir : seuls quelques élèves obtiennent 180° pour la somme (aux erreurs de mesures près), ceux dont le triangle ne contient pas la pointe du posicône ; tous les autres groupes obtiennent un résultat supérieur à 180° ; la différence entre le résultat obtenu et 180° correspond à l'angle formé par la portion de feuille que l'on a retirée, ce que l'on nomme un *excès d'angle* par référence au résultat obtenu sur une surface plane. Cet excès d'angle correspond à la *courbure totale*³ de la surface délimitée par le triangle.

³La courbure totale d'une surface est l'intégrale de surface de la courbure de Gauss. Elle se mesure en degrés ou en radians. Par exemple, la courbure totale d'une sphère est 4π ; en effet, une

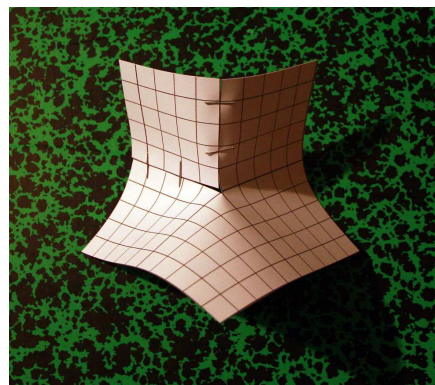
En conclusion de cette expérience, nous connaissons une procédure qui nous permet de mesurer la courbure totale d'une surface, et que l'on peut réutiliser pour mesurer la courbure totale d'autres surfaces.

Le négacône

1) Fabrication d'un négacône

Pour fabriquer un négacône, ou selle de cheval, on ajoute une portion d'angle au papier bristol. C'est l'inverse du procédé précédent (voir l'illustration ci-dessous). D'abord, on découpe une portion de papier bristol

(comme une portion de pizza) que l'on met de côté. Ensuite, avec une feuille non utilisée, on découpe une ligne droite, puis on



écarte les deux côtés de cette découpe pour y insérer la portion de papier bristol. Enfin, on agrafe pour faire tenir ensemble la feuille de bristol avec la portion insérée.

On obtient alors un point de courbure négative. La surface ainsi formée a une forme de selle de cheval. Comme dans le cas du posicône, toute la courbure de cette surface est contenue dans la « pointe » du négacône ; tout point en dehors de la « pointe » a une courbure nulle.

2) Somme des angles d'un triangle

On peut répéter l'expérience faite avec le posicône : on trace un triangle (contenant le point de courbure négative) grâce au papier adhésif. On détache les agrafes et on mesure la somme des angles des sommets du triangle. Cette somme est inférieure à 180° : la différence entre 180° et le résultat obtenu est égale à l'angle formé par la portion de papier ajoutée : c'est un *défaut d'angle*, par référence au résultat obtenu pour une surface plane. Ce défaut d'angle est égal à la courbure totale contenue dans le triangle, celle-ci ayant un signe négatif.

sphère peut se décomposer en huit triangles équilatéraux qui ont chacun un excès d'angle - donc une courbure totale - de valeur $\pi/2$; la courbure totale de la sphère est alors la somme des courbures totales de chacun des triangles équilatéraux. On en déduit la courbure de Gauss de la sphère en divisant sa courbure totale par sa surface : $4\pi/(4\pi R^2) = 1/R^2$.

Pour aller plus loin

Voici quelques questions qui permettent de mettre en œuvre les concepts et procédures que l'on a découverts dans les activités précédentes.

Comment fabriquer une surface de courbure totale nulle contenant un posicône et un négacône ?

Il faut que la courbure totale du posicône soit égale à celle du négacône (on ajoute une portion d'angle pour le négacône égale à celle enlevée pour le posicône). En effet, les courbures s'additionnent (avec un signe négatif pour les courbures négatives). On peut le vérifier en traçant un triangle contenant les deux points de courbure (grâce au ruban adhésif), et en montrant que la somme des angles du triangle est égale à 180° (sauf erreur de construction). La courbure totale est donc nulle.

Comment tracer un triangle rectangle équilatéral ?

La somme des angles d'un triangle rectangle équilatéral doit être égale à $(90^\circ * 3) = 270^\circ$. Il faut donc fabriquer un posicône de courbure totale $(270^\circ - 180^\circ) = 90^\circ$, en enlevant une portion de la feuille de bristol d'angle égal à 90° .

L'espace-temps de la relativité générale

L'espace-temps est un espace à quatre dimensions (voir l'article page 2). Dans la théorie de la relativité générale développée par Einstein, la masse courbe (positivement) l'espace-temps. Plus la masse est compacte (une grande masse dans un petit volume), et plus la courbure est grande. Par exemple le Soleil courbe l'espace-temps du Système Solaire. Il est possible grâce à des expériences de mesurer cette courbure.

Par contre, il est impossible de s'imaginer la courbure d'un espace à quatre dimensions. On peut pourtant faire une analogie avec la courbure des surfaces. Le posicône que l'on a fabriqué contient un point de courbure positive. Ce point pourrait correspondre à notre Soleil si nous vivions dans un monde à deux dimensions (imaginez-vous en petite fourmi évoluant sur une surface). En fait, le Soleil n'est pas un point : il est étendu. La courbure de la surface devrait être continue. Il faut alors s'imaginer un posicône abrasé. Par exemple, pour une calotte sphérique la courbure est continuellement répartie (il n'y a pas de cassure, de pliure ou de pointe). La lumière subit les déformations de l'espace-temps : les rayons lumineux suivent les géodésiques de l'espace-temps courbe.

Les lentilles gravitationnelles, ou comment fabriquer un biangle ?

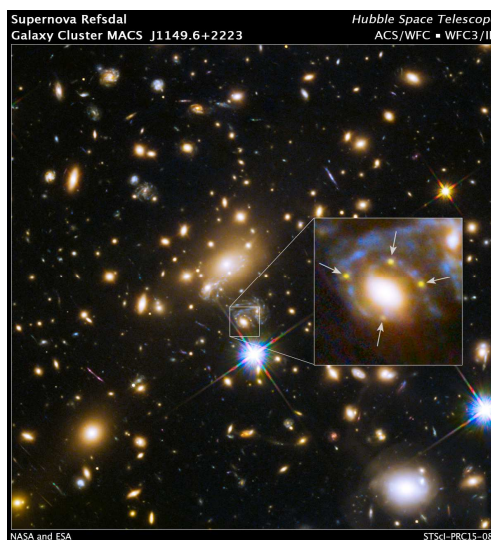
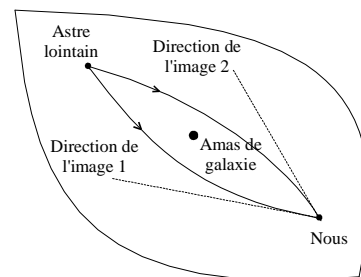
Fabriquons un posicône de courbure totale suffisamment élevée (par exemple 180°). On trace facilement deux géodésiques qui se coupent en deux

points. Elles forment alors un biangle, dont la somme des angles des deux sommets est égale à 180° . En théorie il est possible de former un biangle avec n'importe quel posicône, mais plus la courbure totale est faible et plus les deux géodésiques se croiseront loin.

Conséquence astrophysique : il y a des amas de galaxies dans l'univers qui déforment tellement l'espace-temps

autour d'eux qu'ils perturbent la propagation de la lumière qui passe à proximité. Dans notre exemple avec le posicône, les deux rubans adhésifs peuvent représenter les trajectoires de deux rayons lumineux. L'observateur situé à l'un des croisements des deux rayons verrait alors deux images du même astre (voir dessin).

Sur la photographie prise par le Hubble Space Telescope (HST), les quatre points brillants jaunes pointés par des flèches (partie zoomée de l'image) sont les images d'une même supernova située à 9,3 milliards d'années-lumière.



En effet, sur la ligne de visée de la supernova, à cinq milliards d'années-lumière, se trouve une galaxie massive (située dans un amas de galaxie plus large) qui déforme l'espace-temps. Ce phénomène se nomme lentille gravitationnelle, et la forme en croix des quatre images de la supernova une croix d'Einstein.

Quelques références

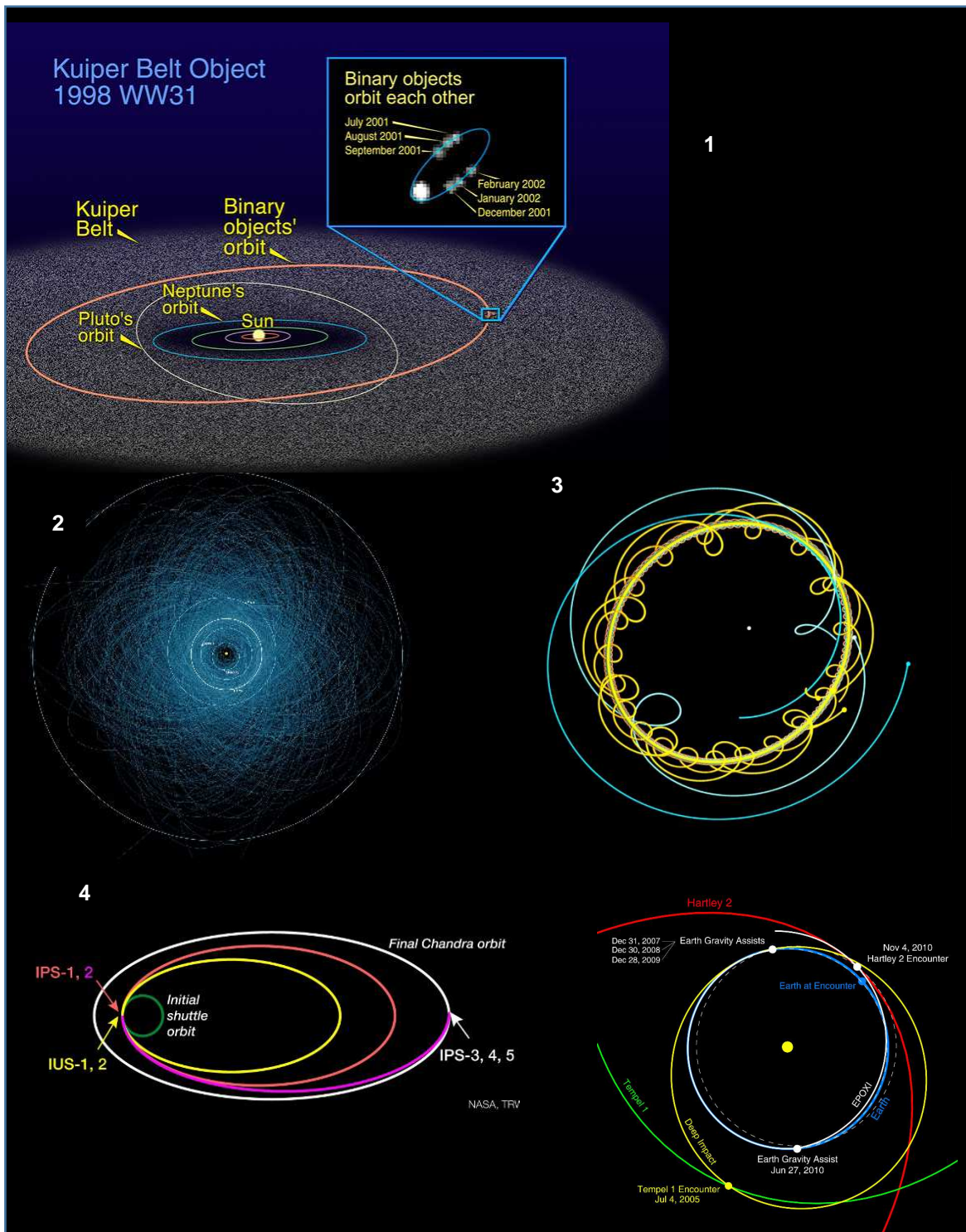
Ces idées de TP sont tirées de deux références :

- « Les aventures d'Anselme Lanturlu : le trou noir », de Jean-Pierre Petit. C'est une bande-dessinée téléchargeable gratuitement à l'adresse :

http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/trou_noir.htm

- Paper models of surfaces with curvature, Howard Iseri, Mansfield University :
<http://www.gallup.unm.edu/~smarandache/SN/ScArt3/iseri-2003.pdf>

THÈME : les trajectoires des planètes



1. Quelques orbites dans le système solaire avec en particulier 1998WW31, un objet double de la ceinture de Kuiper (crédit NASA and A. Feild Space Telescope Science Institute).
2. Orbites de tous les astéroïdes potentiellement dangereux connus (PHA), au nombre de plus de 1 400 au début de 2013. Crédit image : NASA / JPL-Caltech.
3. Les planètes du système solaire avec Pluton observées depuis Neptune pendant une année plutonienne (image J-F. Colonna <http://www.lactamme.polytechnique.fr>).
4. Orbites de Chandra (télescope spatial à rayons X) Crédit : NASA et TRW.
5. Orbite de la sonde Deep Impact (en jaune puis en pointillés blancs), rencontre avec Tempel 1 et Hartley 2. Crédit : NASA/JPL-Caltech/UMD/GSFC/Tony Farnham.

NOTIONS DE BASE

Comment représenter les orbites des planètes ?

Pierre Causeret, Esbarres

Dans les représentations du système solaire, les orbites des planètes sont presque toujours tracées. Mais comment les dessiner ? Voici quelques représentations possibles. La position de la planète sur son orbite n'est pas abordée ici, on ne s'intéresse qu'aux seules trajectoires.

Des orbites circulaires centrées sur le Soleil et coplanaires

C'est la représentation la plus simple : des cercles dont le centre est le Soleil et situés dans un même plan. C'est d'ailleurs souvent ainsi que l'on présente le système de Copernic (qui, en réalité, était plus complexe¹). Cette approximation est suffisante pour avoir une idée du plan du système solaire et une explication qualitative des phénomènes comme la rétrogradation de Mars ou les phases de Vénus. Pour une maquette mécanique du Système solaire avec des planètes qui se déplacent, c'est le type de représentation le plus souvent utilisé.

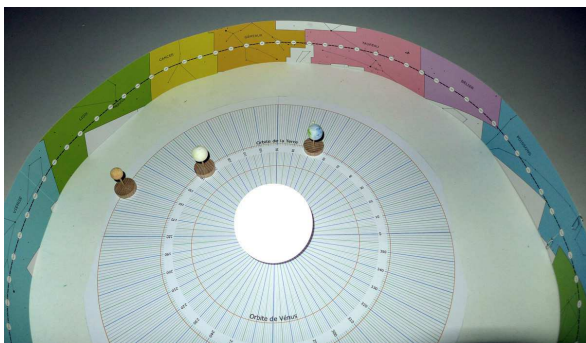


Fig.1. Dans cette maquette construite à l'école d'été du CLEA, les orbites de Vénus, de la Terre et de Mars sont des cercles coplanaires centrés sur le Soleil. Les planètes sont positionnées ici pour le 1^{er} décembre 2015.

L'erreur faite sur la distance de la planète au Soleil reste inférieure à 10 % pour toutes les planètes du système solaire sauf Mercure (20 %). On prend ici pour rayon de chacun des cercles, le demi grand axe des orbites elliptiques. Ces rayons varient de 0,39 ua pour Mercure à 30 ua pour Neptune. Si on veut représenter l'ensemble du Système solaire à l'échelle, l'orbite de Neptune doit être 80 fois plus grande que celle de Mercure ! Si on prend par

exemple 1 mm comme rayon pour Mercure, on obtient 8 cm pour Neptune ; cela tient sur une feuille A4 mais les premières planètes apparaissent bien proches les unes des autres (figure 2b).

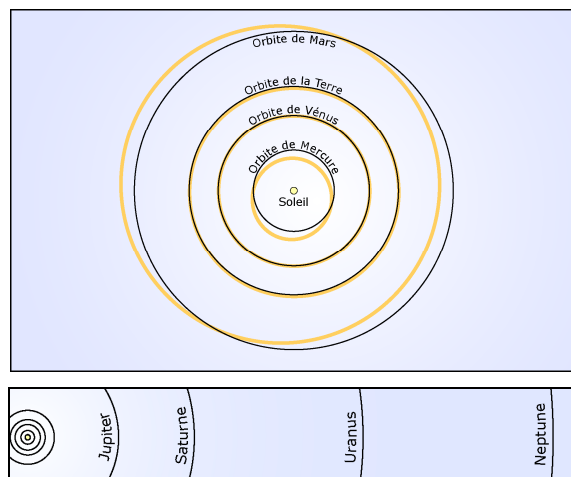


Fig.2. Orbites circulaires centrées sur le Soleil (en noir).
a. En haut, les 4 premières planètes à l'échelle 10^{-13} , soit 1,5 cm pour 1 ua. On a mis en fond, de couleur orange, les « vraies » orbites elliptiques.
b. En bas, les 8 planètes avec une échelle 6 fois plus petite (1 ua est représentée par 2,5 mm).

Une autre solution consiste à tracer virtuellement les orbites circulaires et à placer l'observateur à proximité du Soleil. La perspective fait que l'orbite de Mercure, plus proche de l'œil, semblera plus grande et n'apparaîtra pas minuscule à côté de celle de Neptune, plus éloignée. C'est la méthode utilisée par exemple sur la couverture du n° 137 des Cahiers Clairaut (figure 3a).

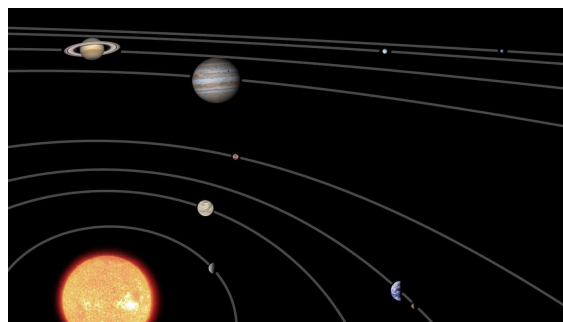


Fig.3a. Vue en perspective conique des orbites du Système solaire, considérées comme circulaires et centrées sur le Soleil. On a ajouté des photos des planètes sans respecter d'échelle.

¹ Voir figure 5 page 25.



Fig.3b. Orbites circulaires en perspective cavalière.

La perspective cavalière présente peu d'intérêt (figure 3b) d'autant plus que l'on risque de prendre ces orbites, circulaires mais vues de profil, pour des ellipses très aplaties.

On trouve aussi de nombreuses figures où aucune échelle de distance n'est respectée, le schéma ayant pour unique but de montrer que les planètes tournent autour du Soleil.

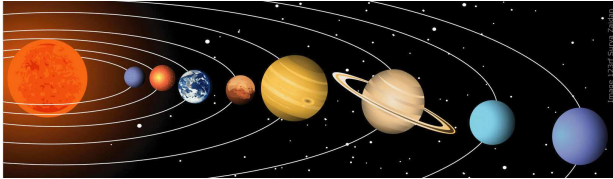


Fig.4. Schéma classique du Système solaire, sans échelle.

Des orbites circulaires excentrées

On continue à considérer les orbites circulaires et coplanaires mais on ne place plus le Soleil au centre. Chaque orbite possède ainsi un périhélie (point de l'orbite le plus proche du Soleil), matérialisé par un point rouge sur la figure 5. C'est une représentation peu utilisée et pourtant assez précise. L'erreur sur la distance au Soleil est inférieure à 0,5 % pour toutes les planètes sauf Mercure (2 %). Pour la Terre, elle est inférieure à 0,2 pour 1000, soit moins de 0,2 mm pour une orbite de 1 m de rayon.

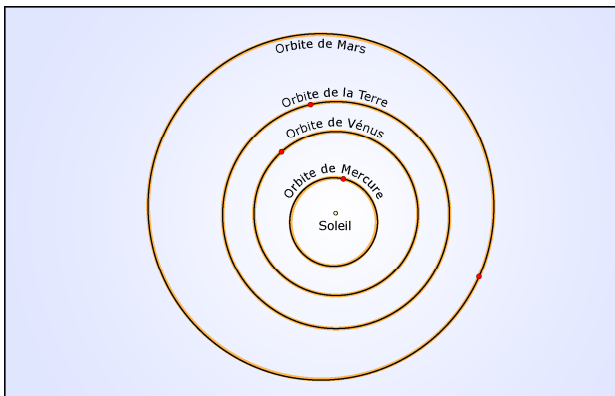


Fig.5. Orbites de Mercure à Mars, circulaires mais non centrées sur le Soleil, à la même échelle que la figure 2a avec, là aussi, les « vraies » orbites en orange. La différence entre ellipse et cercle excentré est tout juste visible pour Mercure et Mars. On voit tout le mérite de Kepler à distinguer l'ellipse du cercle.

Des orbites elliptiques coplanaires

La première loi de Kepler nous apprend que les orbites des planètes sont des ellipses et que le Soleil

est placé à l'un de ses foyers². De nombreux ouvrages montrent alors des ellipses très aplaties, bien loin des orbites réelles des planètes du Système solaire. Plus gênant, il est courant que le Soleil soit placé au hasard, habituellement entre le foyer de l'ellipse et son centre. Le point de l'orbite le plus proche du Soleil n'est alors plus situé à l'extrémité du grand axe de l'ellipse comme cela devrait être (figure 6).

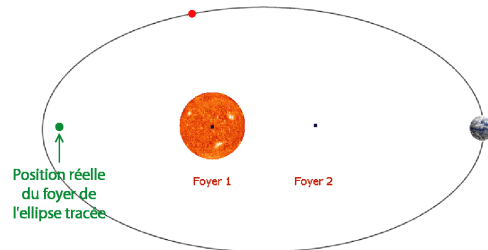


Fig.6. Mauvaise représentation d'une orbite de planète. Le foyer de l'ellipse tracée est au niveau du point vert : le Soleil devrait s'y trouver. Le point rouge ajouté sur l'orbite est plus proche du Soleil que le périhélie, ce qui est un comble !

La figure 7 (page suivante) montre les orbites elliptiques des planètes en 2000, toutes représentées dans le plan de l'écliptique, donc sans tenir compte de leur inclinaison. Le point rouge indique le périhélie. Cette figure doit évoluer au cours du temps à cause des variations des paramètres des orbites. Mais celles-ci sont lentes comme on peut le vérifier pour la Terre dans le tableau ci-dessous.

| | en 2000 | en 2100 |
|--|---------|---------|
| Excentricité de l'orbite | 0,01671 | 0,01667 |
| Longitude écliptique du périhélie ³ | 102,9 | 104,6 |

Paramètres de l'orbite terrestre.

Des orbites elliptiques non coplanaires

La représentation est alors plus délicate : il faut soit réaliser une maquette en 3D, soit utiliser un logiciel de 3D⁴.

Conclusion

Il n'existe pas de représentation parfaite des orbites du Système solaire. On peut utiliser des cercles ou des ellipses suivant ce que l'on veut illustrer. Les vues en 3D sont les plus justes mais elles ne sont ni les plus faciles à réaliser ni en général les plus lisibles. Il faut se méfier des représentations trompeuses comme les cercles vus en perspective ou les ellipses trop aplaties.

² Voir l'encadré en fin d'article pour les rappels sur les ellipses.

³ La variation est due pour l'essentiel (80 %) au déplacement du point vernal donc à la précession des équinoxes.

⁴ Voir article page 20.

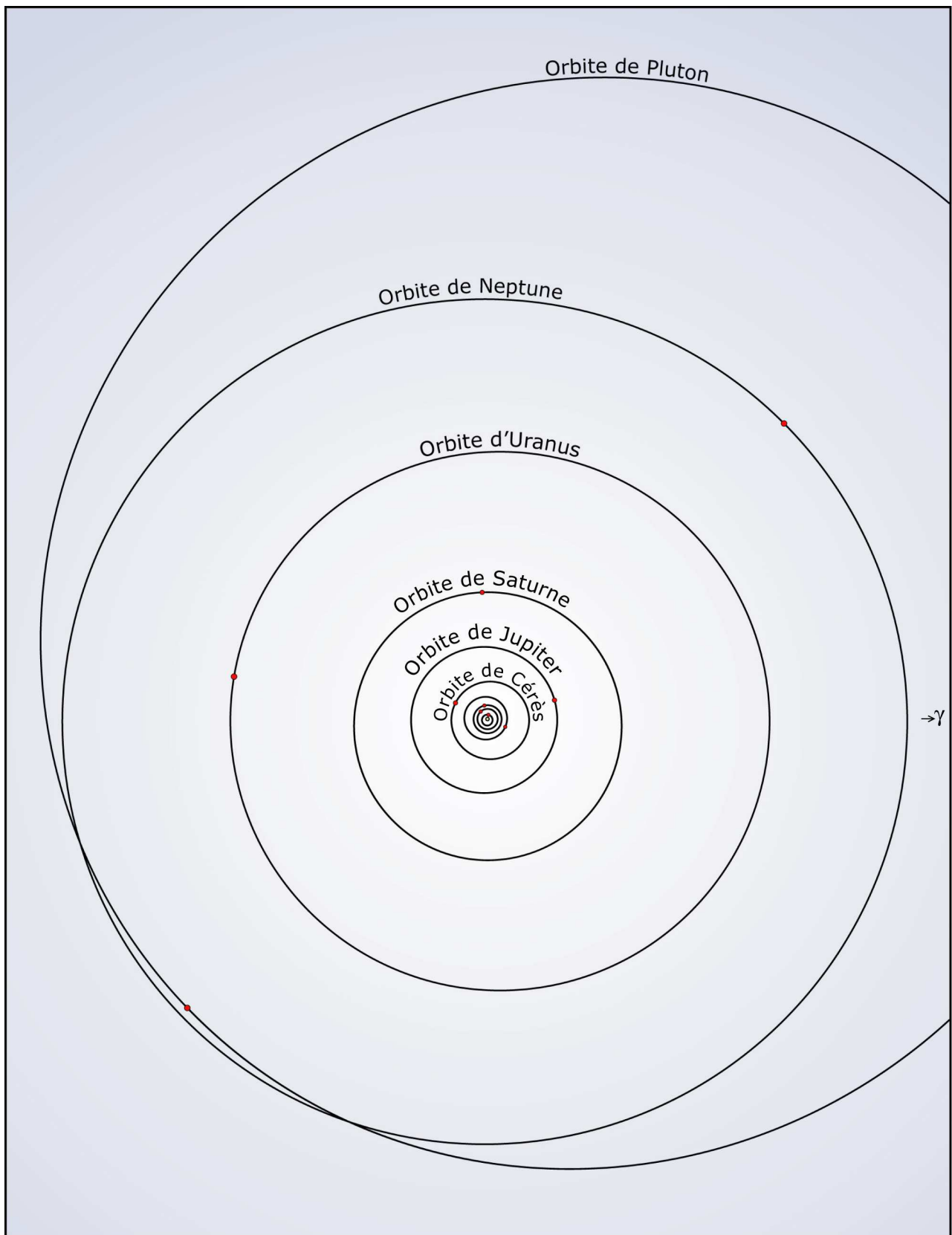


Fig.7. Les orbites des 8 planètes du Système solaire ainsi que des deux planètes naines Cérés et Pluton. Le périhélie est indiqué sur chacune des orbites par un disque rouge. L'échelle est ici 1/60 000 000 000 000, comme sur la figure 2b, soit 1 cm pour 4 ua (sauf pour le diamètre du Soleil, dix fois trop gros). Dans cette représentation, il manque l'inclinaison des orbites sur l'écliptique. Le point vernal est situé sur la droite de la figure.

Quelques rappels sur les ellipses

On peut définir une ellipse de différentes manières.

1. Une ellipse est un cercle aplati.

Toutes les définitions qui suivent sont différentes manières de traduire ce "cercle aplati".

a. On dessine un cercle sur une feuille et on la regarde en biais.

b. On part d'un cercle et on lui applique une affinité orthogonale (le plus simple étant de choisir l'axe passant par le centre du cercle) ; ce qui signifie, dans un repère orthonormé :

$$x \mapsto x \text{ et } y \mapsto ky \text{ (avec } k = b/a \text{)}$$

c. Une ellipse est une courbe d'équation $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$

d. Une ellipse est une courbe d'équation paramétrique :

$$x = a \times \cos t \text{ et } y = b \times \sin t \text{ (avec } 0 \leq t < 2\pi \text{)}$$

2. Une ellipse est l'ensemble des points du plan dont la somme des distances à deux foyers est constante : $MF + MF' = \text{constante}$.

Comme le point A est un point de l'ellipse, on doit avoir $AF + AF' = \text{constante}$. Or $AF + AF' = AO + OF + AO - OF' = 2AO = 2a$: la constante est égale à $2a$.

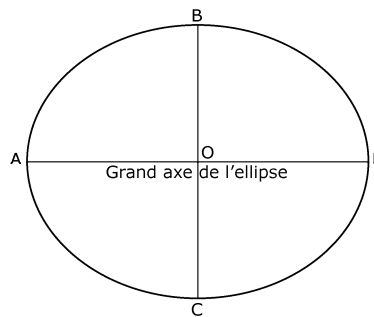
Le point B étant un point de l'ellipse, $BF + BF' = 2a$ donc $BF = a$.

$BF^2 = OB^2 + OF^2$ donc $a^2 = b^2 + c^2$ (on appelle c la longueur OF , c'est la demi distance focale).

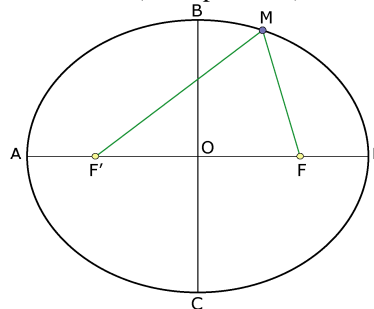
Excentricité e de l'ellipse : $e = c/a$.

3. Une ellipse peut aussi se définir comme intersection d'un cylindre et d'un plan non parallèle à l'axe ;

ou encore comme l'intersection d'un plan et d'un cône de révolution à condition que l'angle du plan avec l'axe du cône (angle 1 sur la figure) soit supérieur au demi angle au sommet du cône (angle 2).



$OA = OP = a$ (demi grand axe) ;
 $OB = OC = b$ (demi petit axe) ;



$OF = OF' = c$.
 $MF + MF' = 2a$.



Horizontalement

1. Il place le Soleil au centre.
2. Nombre de planètes du Système solaire. Plein d'étoiles. 8 pour les 4 saisons.
3. Arobase. Céleste, elle a inspiré tout autant Pythagore que Kepler.
4. Trajectoire de planète. Dément. Nombre de Messier à Rome.
5. L'inclinaison de son orbite est de 0° . On y a vu une éclipse totale en 2006.
6. Astéroïde n° 1485. On y fait du pétillant. On les trouve dans les astéroïdes Chicago ou Pickeringia.
7. Orbite de comète par exemple.
8. Fatiguée. On y a vu le survol de Pluton en juillet.
9. Attrapé. C'est grâce aux orbites de comètes que Oort a trouvé le sien. Lever de Soleil actuellement.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

| | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|--|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | ■ | | | | ■ | | | ■ |
| 3 | | | ■ | | | | | | | | |
| 4 | | | | ■ | | | | | ■ | | |
| 5 | | | | | ■ | | | | | | |
| 6 | | | | ■ | | | | ■ | | | |
| 7 | | ■ | | | | | | | | | |
| 8 | | | | ■ | | | ■ | | | | |
| 9 | | | ■ | | | | | | | ■ | |

Solutions page 40

Mots croisés orbitaux

Verticalement

1. Comme le système solaire.
2. Gourdes. Appris.
3. En gros, longueur de l'orbite sur grand axe. Pour lui, seule la Terre ne tourne pas autour du Soleil.
4. Milieu d'orbite planétaire. Monnaie.
5. Éditeur scientifique.
6. Peut être optique. Réputée pour son optique.
7. Sacrifier.
8. OK. Avalée.
9. Il n'est jamais neutre. Il a traité de l'astrolabe, du nocturlabe, des cadrans solaires...
10. Dans les orbites d'Hipparque.
11. On peut dire qu'al Farghani a fait celle de l'Almageste.

Chaos dans le système solaire ?

Philippe Robutel, IMCCE, Observatoire de Paris

Une évolution historique de la modélisation mathématique des trajectoires des planètes du système solaire ou comment on passe progressivement d'un monde idéalement stable à un autre très probablement chaotique sur le long terme.

Le désordre engendré par les perturbations planétaires

En découvrant la force qui conditionne le mouvement des corps célestes, Newton en 1686 permit la vérification des lois établies empiriquement par Kepler, tout en introduisant un léger désordre dans le mouvement des planètes.

Cette force de gravitation, qui attire deux corps pesants, est proportionnelle au produit de la masse de chacun des corps en interaction et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Ainsi, quand Jupiter et Saturne sont en conjonction, la distance entre Jupiter et le Soleil est à peu près égale à celle entre Jupiter et Saturne, mais la prépondérance de la masse du Soleil sur celle de ces deux planètes fait que la force de gravitation exercée par notre étoile sur Jupiter est environ 3 500 fois plus grande que celle que Saturne lui fait subir. La force exercée par le Soleil sur les planètes étant largement prédominante, les interactions gravitationnelles entre les planètes ne sont que des perturbations. En l'absence de ces perturbations, conformément aux lois énoncées par Kepler, les planètes graviteraient sur des ellipses dont le Soleil serait l'un des foyers. Leur mouvement serait parfaitement régulier et donc prédictible. L'existence des interactions planétaires perturbe ces mouvements ; ils restent proches des trajectoires décrites par les lois de Kepler pendant un certain temps du fait de la prépondérance de l'attraction solaire puis s'en éloignent au cours du temps, rendant problématique la prédiction de leur trajectoire. Newton lui-même, en suspectant que l'accumulation des perturbations pouvait désorganiser un système si bien réglé, émettait des doutes sur la capacité du système solaire à conserver sa régularité.

Ainsi, une question fondamentale de la science du XVIII^e siècle était de savoir si, d'une part, la loi de Newton suffisait à rendre compte du mouvement des planètes et d'autre part si le système solaire était stable malgré l'effet des perturbations planétaires.

Des perturbations « sous contrôle »

La question fut d'abord résolue par Lagrange et Laplace dont les travaux complémentaires apportèrent la « preuve » de la stabilité du système solaire. Comme les ellipses donnent, au moins temporairement, une bonne approximation des orbites des planètes, une des idées développées par Laplace fut de s'intéresser aux déformations à longues périodes des éléments de ces ellipses, mouvements dits séculaires.

En 1773, Laplace expose devant l'Académie des Sciences, sa démonstration du fait que les demi-grands axes des planètes n'ont pas de variation séculaire. Ils subissent de petites variations périodiques, ou plutôt quasi-périodiques¹, dont les périodes sont de l'ordre de grandeur des périodes de révolution des planètes. Il s'agit donc de variations à courtes périodes (de l'ordre de quelques mois à quelques années, par opposition aux variations séculaires), mais qui surtout sont bornées. L'année suivante, Lagrange soumet à l'Académie son nouveau mémoire sur le mouvement séculaire des inclinaisons et des nœuds des planètes (la ligne des nœuds étant l'intersection du plan orbital de la planète avec un plan de référence, le plan de

¹ On peut voir un mouvement quasi-périodique comme la composition de plusieurs mouvements périodiques distincts. Si, pour un mouvement périodique, on retourne au point de départ après un laps de temps appelé période, il n'en est pas de même pour un mouvement quasi-périodique. Pour de tels mouvements, il n'y a pas de retour à la position initiale, mais on peut en passer aussi près qu'on le souhaite, à condition d'attendre suffisamment longtemps.

l'écliptique par exemple). Dans ce mémoire, où apparaît pour la première fois les équations différentielles linéaires à coefficients constants, Lagrange montre que les inclinaisons sont bornées et varient de manière quasi-périodique. La même année, Laplace, en s'inspirant des travaux de Lagrange, donnera un énoncé similaire portant sur les excentricités et le mouvement des périhélie planétaires.

La stabilité du système solaire est donc avérée. Les demi-grands axes des planètes ne subissent pas de variation séculaire. Ils sont constants à de petites variations à courtes périodes près. Les excentricités et inclinaisons des planètes ne subissent que des variations périodiques (principalement à longues périodes) autour de leurs valeurs moyennes. Les orbites sont donc parfaitement contraintes et les variations de la forme et des mouvements des ellipses sont suffisamment petites pour que les orbites planétaires ne se coupent jamais, interdisant toute collision ou même rencontre entre planètes. Cette vision du système solaire est très différente de celle qu'en avait Kepler : les ellipses se déforment tout en étant animées d'un double mouvement de précession dont les périodes vont de 45 000 ans à quelques millions d'années, l'un autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'ellipse et l'autre autour d'un axe perpendiculaire à un plan de référence fixe (par exemple le plan de l'écliptique à une date donnée). Mais, comme avec des orbites képlériennes, tous les mouvements sont parfaitement réguliers et prédictibles.

Les petits diviseurs sèment le doute

Ces travaux, même s'ils ont fait grandement avancer la mécanique céleste et certaines branches des mathématiques, ne fournissaient pas une preuve irréfutable de la stabilité du système solaire, mais plutôt de la stabilité que prédit le modèle utilisé. Pour simplifier les équations et ainsi pouvoir les résoudre, seuls les termes principaux² étaient

² Deux approximations importantes sont utilisées dans ces travaux. D'abord le recours au système séculaire : en écrivant les équations qui régissent les déformations des ellipses représentant les orbites planétaires, on constate qu'elles comportent des termes à courte période (périodes des planètes sur leurs orbites) et d'autres à beaucoup plus longues périodes dits termes séculaires. On construit le système séculaire en calculant la moyenne de ces équations sur les courtes périodes, moyenne que l'on obtient par approximations successives. La partie principale est de l'ordre des masses planétaires (petite devant la masse solaire) et les termes suivants sont proportion-

retenus. Ce procédé fournissait des solutions représentant très correctement le mouvement des orbites planétaires sur un intervalle de temps long, mais fini. En aucun cas les résultats obtenus à l'aide de telles approximations ne pouvaient avoir de sens sur une durée de temps arbitraire.

Le Verrier après son succès apporté par la prédiction de la position de la nouvelle planète Neptune par le calcul des perturbations qu'elle exerçait sur le mouvement d'Uranus, s'attacha à améliorer les approximations faites par Lagrange et Laplace. Il montra que l'ajout de termes négligés par ces derniers apportait des corrections non négligeables à leurs calculs, qui ne pouvaient donc plus être utilisés sur des durées indéterminées. Tout en poussant plus avant les théories des perturbations, Le Verrier semblait douter de l'efficacité des méthodes des approximations successives pour prédire avec la précision voulue le mouvement des planètes.

Il n'est pas question d'aborder ici la nature des séries utilisées en mécanique céleste. Disons simplement qu'une des techniques résidait en la résolution par approximations successives des équations régissant le mouvement des planètes du système solaire. Le principe étant le suivant : calculons d'abord une première approximation des solutions des équations, par exemple celle pour laquelle le mouvement des planètes suit les lois de Kepler, et supposons que la solution exacte est égale à cette dernière plus une (petite) quantité inconnue. En injectant la solution ainsi construite, dans les équations initiales, on est en mesure d'écrire l'équation dont la perturbation que l'on a ajoutée est solution. On résout alors approximativement cette nouvelle équation et on itère le processus. L'idée étant qu'à chaque itération, on s'approche de plus en plus de la solution exacte de l'équation initiale.

Le Verrier fut le premier à suspecter que l'apparition, dans ces calculs, de termes appelés « petits diviseurs » tendait à ne pas faire diminuer la taille des termes perturbateurs successifs autant que les astronomes ne l'imaginaient. Constatation qu'il exprimait sous la forme « *Ces termes acquièrent*

nels au carré, au cube et aux puissances supérieures des masses planétaires. Lagrange et Laplace se sont limités à la partie principale, dit système séculaire d'ordre un des masses. La deuxième approximation consiste à faire un développement du second membre des équations séculaires en puissance des excentricités et inclinaisons limité à un degré donné. Les excentricités et inclinaisons planétaires étant faibles Lagrange et Laplace se sont limités à l'ordre un de ces quantités. Il s'agissait donc d'équations différentielles linéaires à coefficients constants.

par l'intégration de très petits diviseurs ; et ainsi il en résulte, dans les intégrales, des termes dus à la seconde approximation, et dont les coefficients surpassent ceux de la première approximation. Si l'on pouvait répondre de la valeur absolue de ces petits diviseurs, la conclusion serait simple : la méthode des approximations successives devrait être rejetée ». Il remarqua également que ces diviseurs dépendaient de la valeur des demi-grands axes moyens des planètes et en conclut que ce qui se produit pour les planètes du système solaire peut être totalement différent si l'on prend d'autres valeurs des demi-grands axes. D'où l'idée que les solutions fournies par les méthodes d'approximations successives ne représentent pas avec le même degré de fidélité les solutions exactes lorsque l'on fait varier les paramètres du système considéré (masses planétaires connues à cette époque assez peu précisément, demi-grands axes moyens...).

Cette idée que la convergence des séries issues de la théorie des perturbations dépend de la valeur de paramètres, ou des conditions initiales, sera formalisée par Henri Poincaré quelques années plus tard. Il montra d'abord qu'on ne pouvait pas résoudre les équations du problème des trois corps (par exemple Jupiter, Saturne, Soleil) comme on le faisait pour celui des deux corps. Tout espoir de trouver une solution exacte du mouvement des planètes du système solaire était donc à abandonner ; la seule issue restante était la construction de solutions approchées, par les méthodes que fournissait la théorie des perturbations. Poincaré, en simplifiant les méthodes d'approximations successives utilisées par les astronomes, précisa comment résoudre, à tout ordre, les équations ainsi obtenues. Il montra également que l'apparition des petits diviseurs inhérents à ces méthodes entraînait la divergence des séries ainsi construites. Mais ces séries, divergentes au sens des mathématiciens, pouvaient fournir des approximations des mouvements planétaires très satisfaisantes à condition de se limiter à un intervalle de temps fini : « *Les termes de ces séries, en effet, décroissent d'abord très rapidement et se mettent ensuite à croître ; mais, comme les astronomes s'arrêtent aux premiers termes de la série et bien avant que ces termes aient cessé de décroître, l'approximation est suffisante pour les besoins de la pratique. La divergence de ces développements n'aurait d'inconvénients que si l'on voulait s'en servir pour établir rigoureusement certains résultats, par exemple la stabilité du système solaire*³ ».

³ H. Poincaré, Méthodes nouvelles de la mécanique céleste, tome 2, réimp. A. Blanchard, 1987, p. 1.

En conséquence, si les méthodes utilisées par les astronomes peuvent prédire avec grande précision le mouvement des planètes sur un intervalle de temps fini, elles ne peuvent, en aucun cas, être utilisées pour prédire la stabilité perpétuelle du système solaire. La question reste encore une fois entière.

Des mathématiciens au secours du système solaire

En reprenant les travaux de Poincaré portant sur la convergence des séries issues de la théorie des perturbations, entre 1957 et 1967, les mathématiciens A. N. Kolmogorov, V.I. Arnold et J. Moser, apportèrent une réponse définitive à la question de la convergence de ces séries en développant une théorie maintenant appelée théorie KAM.

Ils montrèrent, en particulier, que Poincaré avait raison quand il pointait la divergence des séries, mais qu'il était également un peu trop pessimiste. Comme l'avait pressenti Poincaré, la nature de ces séries dépend en effet des conditions initiales. Plus clairement, si l'on s'intéresse au cas d'un système planétaire, on pourra trouver des conditions initiales (positions et vitesses des planètes à un instant donné) pour lesquelles les solutions des équations du mouvement seront obtenues par des séries convergentes. Ces mouvements seront donc quasi-périodiques, et en conséquence, perpétuellement stables. Mais, pour une infime modification des conditions initiales, les séries pourront, au contraire, diverger et les trajectoires des planètes perdront leur nature régulière. Dans ces conditions, on peut voir apparaître des phénomènes de diffusion pour lesquels les trajectoires issues de conditions initiales conduisant à des séries divergentes peuvent visiter une grande partie de l'espace, sans que ces excursions puissent être bornées sur un temps infini. Bien au contraire, les solutions quasi-périodiques sont confinées dans des régions données et limitées de l'espace. La théorie KAM va encore bien plus loin en donnant une mesure de la taille de l'ensemble des conditions initiales pour lesquelles les séries sont convergentes. Elle montre que la taille des régions de divergence, donc d'instabilité, tend vers zéro avec la taille de la perturbation. En d'autres termes, plus la perturbation est petite, plus la probabilité que la trajectoire issue de conditions initiales tirées au hasard soit chaotique est faible.

Dans un article publié en 1963, Arnold applique cette théorie au problème des n-corps⁴ et montre

⁴ Il donne une démonstration rigoureuse pour trois corps (une étoile et deux planètes) et indique comment on pourrait

que, si les masses des planètes, leurs excentricités et leurs inclinaisons sont suffisamment petites, la majorité des conditions initiales conduit à des solutions quasi-périodiques, et donc stables sur un temps quelconque. Mais peut-on vraiment parler de la stabilité d'un système planétaire lorsque l'on sait qu'une variation, même infime, des conditions initiales peut entraîner des mouvements totalement irréguliers ? C'est en 1977 qu'une réponse fut apportée par le mathématicien soviétique N. N. Nekhorochev. Il montra en effet que la diffusion d'une trajectoire située à proximité d'une orbite quasi-périodique était un phénomène très lent, et que par conséquent, on pouvait toujours borner cette diffusion sur un temps fini mais très long. Ainsi, même si les planètes n'étaient pas animées de mouvements parfaitement réguliers, leur trajectoire réelle était presque indiscernable d'une trajectoire quasi-périodique, au moins sur des périodes comparables à la durée de vie du système solaire, soit une dizaine de milliards d'années.

Les résultats évoqués ci-dessus restaient parfaitement théoriques, en particulier, ils ne s'appliquaient que si les masses, les excentricités et les inclinaisons des planètes étaient suffisamment petites, et en tous cas, bien en deçà de celles de Jupiter. Mais les estimations utilisées lors de la démonstration des théorèmes de stabilité n'étant certainement pas optimales, il ne faisait que peu de doutes que leurs améliorations les rendraient applicables à notre système solaire. C'en était donc fini de l'instabilité du système solaire, la vision de Laplace d'un système parfaitement et perpétuellement réglé avait triomphé.

Une vision moins tranchée

À partir des années 1980, l'usage intensif des ordinateurs ouvrit une nouvelle voie pour la résolution approchée des équations régissant les mouvements planétaires. Les premières intégrations numériques des planètes géantes⁵ sur 200 millions d'années conduisirent à des solutions quasi-périodiques du même type que celles obtenues par Laplace et Lagrange.

généraliser pour un nombre arbitraire de corps. Plusieurs généralisations de la preuve d'Arnold ont été établies depuis.

⁵ Si les planètes géantes ont une grande influence sur le mouvement à long terme des planètes telluriques, l'inverse n'est pas vrai. Un modèle constitué exclusivement des planètes géantes et du Soleil auquel on a ajouté la masse des planètes terrestres est donc cohérent.

En revanche, la simulation effectuée par G. Sussman et J. Wisdom en 1988, incluant les planètes extérieures de Jupiter à Pluton, mit en évidence les irrégularités du mouvement de cette dernière ; mais sa masse étant très faible⁶, ses mouvements chaotiques n' affectaient pas sensiblement celui des planètes géantes. L'année suivante, en combinant des méthodes analytiques à l'intégration numérique⁷, Jacques Laskar, montra que le système solaire pouvait se décomposer en deux sous-systèmes dont la nature des mouvements était fondamentalement différente. S'il confirma que les trajectoires des planètes géantes étaient très régulières, il montra au contraire que le mouvement à long terme des planètes telluriques (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) était chaotique. Il semblait ainsi que les conclusions de la théorie KAM pouvaient s'appliquer aux planètes gazeuses mais pas aux petites planètes de notre système. Ce chaos observé dans les trajectoires des planètes rocheuses se révélait par une grande sensibilité aux conditions initiales qui rendait leur mouvement imprévisible sur des échelles de temps de l'ordre de la centaine de millions d'années.

En pratique, l'écart en deux solutions croît exponentiellement avec le temps. Si l'on commet une erreur de 15 mètres sur la position initiale de la Terre, l'écart de position au bout de 10 millions d'années sera de 150 mètres, ce qui reste excellent ; mais après 100 millions d'années, l'écart entre les deux solutions initialement voisines sera d'environ 150 millions de kilomètres, soit la distance qui sépare la Terre du Soleil ! Il devient donc impossible de prévoir la position des planètes telluriques sur de telles périodes. Cela ne permet pas pour autant qu'il y ait des collisions entre les planètes. Sur 200 millions d'années, même si l'on ne peut pas prédire la position des planètes rocheuses, les variations de leurs éléments orbitaux (demi-grands axes et excentricités) restent bornées, interdisant toute intersection d'orbites.

En raison du caractère chaotique du mouvement des planètes telluriques, il n'est pas possible de décrire une trajectoire isolée. En revanche, on peut s'intéresser au comportement statistique d'un ensemble de trajectoires voisines, en calculant la probabilité que se produise un comportement donné. C'est ce type d'étude qu'entreprend J. Laskar en 2008. Il montra en particulier que la probabilité

⁶ La masse de Pluton est d'environ $7,7 \cdot 10^{-9}$ masse solaire à comparer aux $5,3 \cdot 10^{-5}$ de celle de Neptune.

⁷ J. Laskar construisit le système séculaire d'ordre deux des masses, qu'il intégra numériquement.

de voir l'excentricité de Mercure dépasser 0,6⁸ en 5 milliards d'années était de 1 %, et que pour certaines solutions particulières, Mercure pouvait rencontrer Vénus, sans pour autant que l'orbite de la Terre en soit sensiblement affectée. Parmi le grand nombre de solutions voisines explorées pour obtenir ces statistiques, il trouva quelques situations remarquables pour lesquelles l'augmentation de l'excentricité de Mercure est suivie de celle de Mars qui déstabilise l'ensemble du système solaire interne. Même si, dans la majorité des cas, le chaos dans le système des planètes telluriques n'entraîne pas de cataclysme sur la durée de vie du système solaire (celle du Soleil), des collisions ou des éjections restent possibles.

Si ces collisions entre planètes, comme leurs éjections hors du système planétaire, peuvent paraître surprenantes, elles ne sont finalement pas aussi rares qu'on pourrait le croire. Deux arguments vont dans ce sens. Le premier est que l'on découvre de plus en plus de planètes nomades ou encore orphelines⁹, c'est à dire des planètes ne gravitant plus autour d'une étoile, et dont on pense qu'elles ont été éjectées du système dans lequel elles se sont formées. Le deuxième argument provient des évolutions récentes dans la compréhension de la formation du système solaire. En affinant les scénarios de formation de celui-ci, les astronomes se sont convaincu que des phénomènes catastrophiques ont marqué sa jeunesse.

Certains modèles, comme ceux appelés « modèle de Nice » et « grand virement de bord »¹⁰ supposent que les planètes géantes étaient, à l'origine, bien plus proches du Soleil qu'elles ne le sont actuellement. Au tout début de la formation du système solaire, sous l'effet du gaz contenu dans la nébuleuse protoplanétaire, les planètes géantes se seraient déplacées vers l'intérieur (Jupiter aurait pu atteindre la position qu'occupe Mars actuellement), puis inversant leur marche, s'en seraient éloignées.

Dans un deuxième temps, après la disparition du gaz, les planètes géantes, plongées dans un disque de planétésimaux très dense, se seraient déplacées vers l'extérieur du système solaire. En effet, les rencontres et rapprochements très nombreux entre les planétésimaux et les planètes tendraient à éjecter les premiers (une partie sur le Soleil et une autre

vers les confins du système) en repoussant les planètes vers les positions qu'elles occupent actuellement¹¹. Même si cette activité collisionnelle n'a plus rien de comparable à celle qu'elle était il y a 3,8 milliards d'années, elle garde encore une influence non négligeable sur la prédictibilité des mouvements planétaires. C'est en 2011 que Jacques Laskar et ses collaborateurs, en étudiant l'influence des astéroïdes de la ceinture principale sur les gros astéroïdes Cérès et Vesta, découvrirent que le mouvement de ceux-ci était bien moins régulier qu'on ne le pensait jusqu'ici, allant même jusqu'à abaisser le seuil de prédictibilité de leur position à 500 000 ans. Ce phénomène, qui ne semble pas très spectaculaire, a pourtant une conséquence assez inattendue sur notre compréhension de climats terrestres passés. En effet, même étant de faible masse, les principaux astéroïdes ont une influence à long terme sur le mouvement des planètes rocheuses. Leurs mouvements étant chaotiques, ils induisent, par le biais des perturbations qu'ils exercent sur les planètes, une certaine irrégularité sur leur dynamique.

Ainsi, la valeur des éléments orbitaux, comme l'excentricité de la Terre, n'est pas prévisible au-delà de 60 millions d'années dans le futur, mais également dans le passé. Ce qui limite à cette durée la reconstitution précise des paléo-climats.

Références

- A. Dahan-Dalmedico, J-L.Chabert et K. Chemla (sous la direction de), Chaos & déterminisme, Points Sciences, Le Seuil (1992).
- La Lune et l'origine de l'Homme. Pour la Science, n° 186, pp 34 - 41, Avril 1993.
- Les systèmes planétaires sont-ils pleins à craquer ? Dossier Pour la Science N°64, juillet-septembre 2009.
- Le Système solaire est-il stable ? Jacques Laskar. Bourbaphy, séminaire Poincaré (2010). <http://www.bourbaphy.fr/laskar.pdf>.
- Le grand bombardement tardif et la formation du système solaire. A. Morbidelli. <http://www.planetastronomy.com/special/2006-special/20nov06/morbi-obspm.htm>.
- Quand Jupiter était à la place de Mars ! <https://www.oca.eu/spip.php?article559> ■

⁸ Il faut une excentricité d'au moins 0,7 pour que Mercure puisse couper l'orbite de Vénus.

⁹ En anglais : free-floating planets ou sub-brown dwarfs.

¹⁰ Voir : Les systèmes planétaires sont-ils pleins à craquer ? Dossier Pour la Science N°64, 2009 et également <https://www.oca.eu/spip.php?article559>.

¹¹ La cratérisation des petits objets du système solaire montre l'intensité de cette activité collisionnelle passée (voir <http://www.planetastronomy.com/special/2006-special/20nov06/morbi-obspm.htm>).

AVEC NOS ÉLÈVES

Éléments d'une orbite

François Hurter, Lajoux (Suisse)

Pour définir l'orbite d'une planète, il faut connaître différents paramètres comme la longitude du nœud ascendant, l'argument du périastre... François Hurter nous propose de décoder ces termes qui ne sont pas toujours faciles à comprendre à l'aide du logiciel GeoGebra, version 3D.

Selon la première loi de Kepler, une planète se déplace suivant une trajectoire elliptique autour du Soleil qui occupe un des foyers¹.

Une orbite elliptique est décrite au moyen de deux plans, le plan de l'orbite (en violet sur les figures qui suivent) et le plan de référence (en vert) ainsi que de cinq paramètres appelés éléments : le demi-grand axe, l'excentricité, l'inclinaison, la longitude du nœud ascendant, l'argument du périastre² auxquels on peut ajouter la position de l'objet sur son orbite.

La représentation spatiale du phénomène n'est pas évidente. Le fichier « GeoGebra » proposé permet de manipuler les divers éléments ainsi que le point de vue de l'observateur afin de faciliter la compréhension de la situation.

Une ellipse est complètement déterminée dès que l'on connaît son demi-grand axe a ainsi que son demi-petit axe b . En astronomie, les deux paramètres utilisés sont :

1. Le demi-grand axe a (passant par les foyers F et F') ainsi que

2. L'excentricité e . Cette dernière grandeur est reliée à a et b de la manière suivante :

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

L'ellipse étant connue, il s'agit de définir son orientation dans l'espace.

3. L'inclinaison i est l'angle que fait le plan orbital avec le plan de référence, en général le plan de l'écliptique dans le cas d'orbites autour du Soleil.

4. La longitude du nœud ascendant Ω (en vert). Il s'agit de l'angle entre la direction du point vernal γ et la ligne des nœuds, dans le plan écliptique.

La ligne des nœuds est l'intersection du plan de l'écliptique avec le plan de l'orbite. Elle contient les nœuds ascendant (N , point de l'orbite où l'objet passe du côté nord de l'écliptique) et descendant (N' , point de l'orbite où l'objet passe du côté sud).

5. L'argument du périastre ω (en violet). Il s'agit de l'angle formé par la direction Soleil-nœud ascendant et la direction Soleil-périastre, dans le plan orbital.

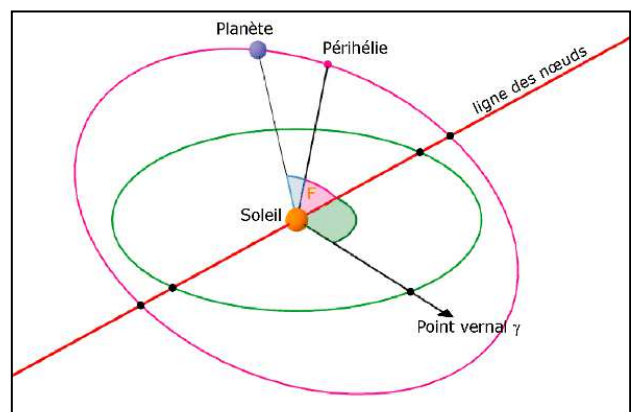
La longitude du périastre est la somme de la longitude du nœud ascendant et de l'argument du périastre³.

Pour terminer, il s'agit de définir la position de la planète le long de la trajectoire à un instant donné. Elle peut être exprimée de plusieurs manières.

6. L'anomalie vraie V , (en bleu). Il s'agit de l'angle entre la direction du périastre et la position courante de l'objet sur son orbite, mesuré au foyer de l'ellipse. L'anomalie vraie correspond, comme son nom le suggère, à un angle existant réellement dans l'orbite d'un corps céleste. Par définition, l'anomalie vraie est nulle lorsque l'objet est au périastre.

Le calcul de l'évolution temporelle de l'anomalie vraie présente quelques difficultés, aussi peut-on être amené à lui préférer d'autres angles (anomalie moyenne, anomalie excentrique).

Le fichier *elementsOrbitaux.ggb* permet la manipulation de ces six éléments ainsi que la modification du point de vue de l'observateur. La version 5 de GeoGebra est nécessaire (version 3D).

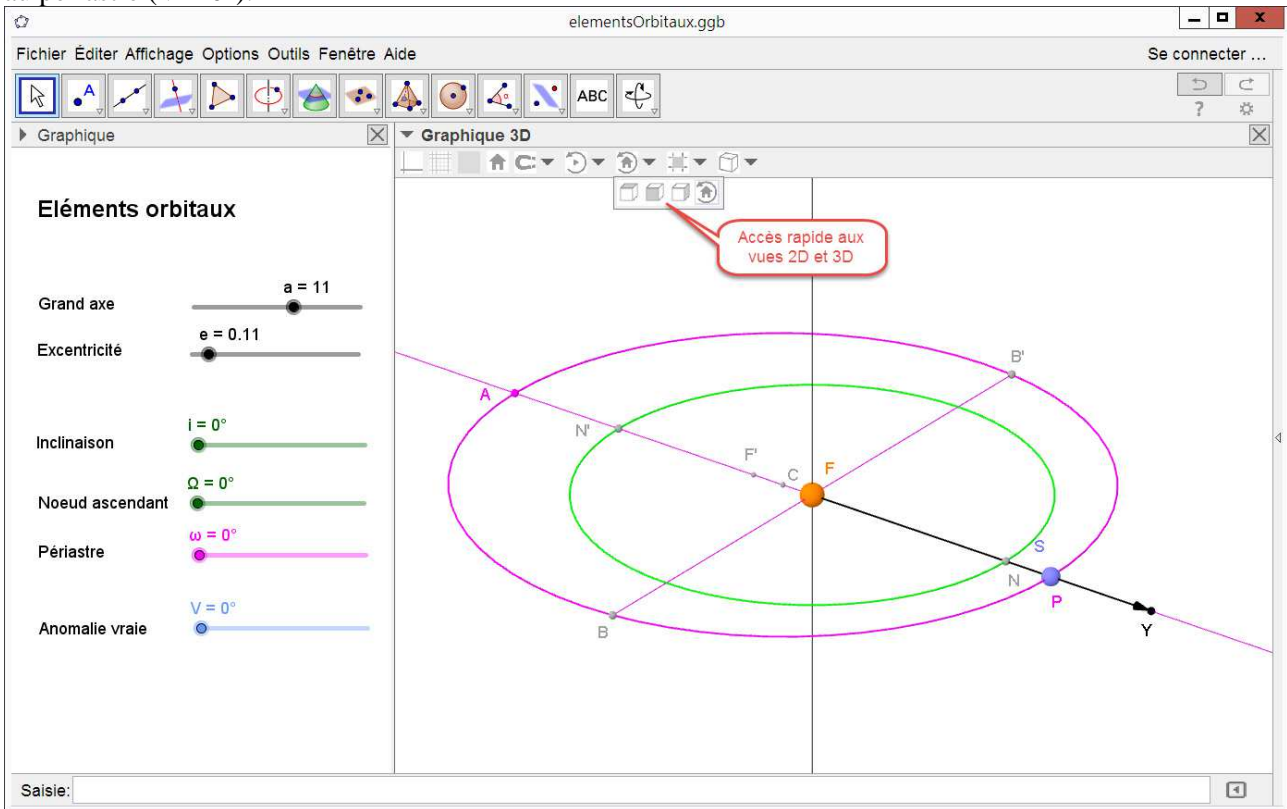


¹ On pourra voir les rappels sur les ellipses page 14.

² On utilise aussi le terme de périhélie pour une orbite autour du Soleil ou de périgée autour de la Terre.

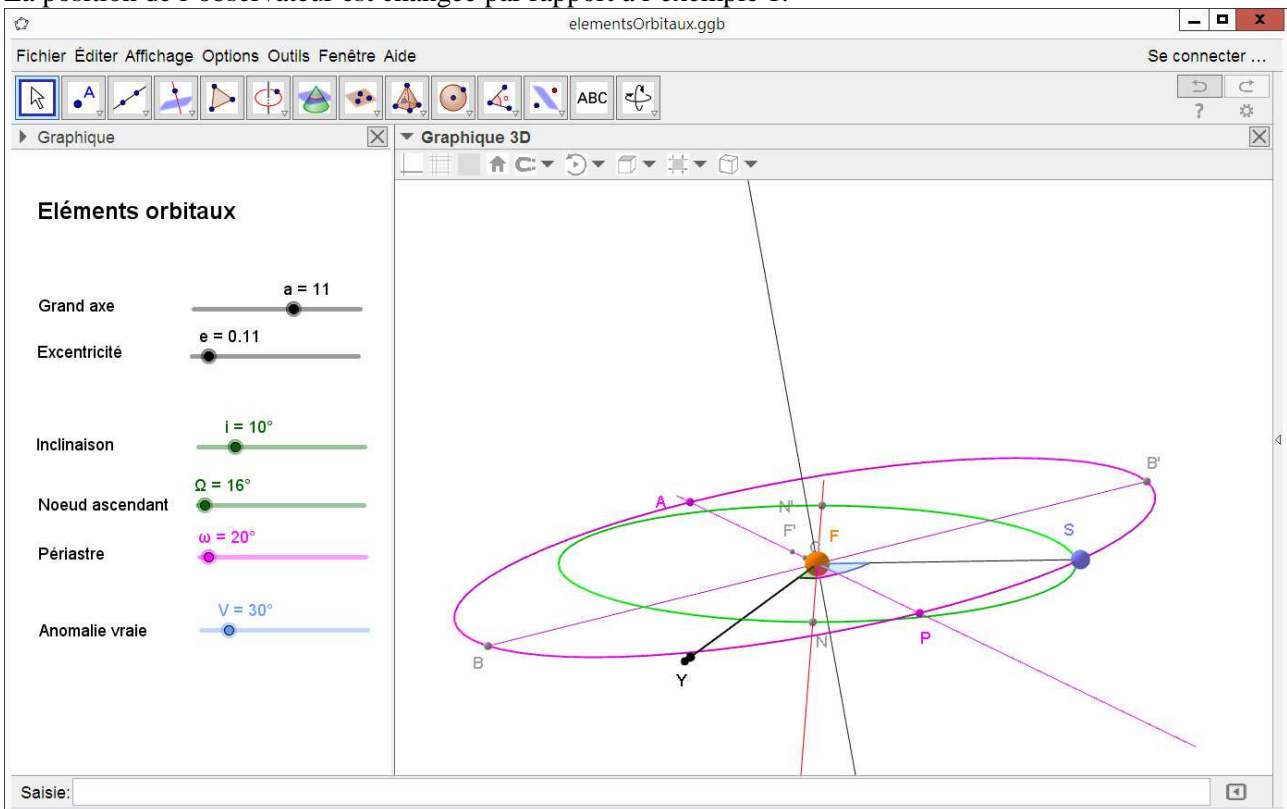
³ On ajoute ici deux angles situés dans des plans différents mais la longitude du périastre est définie comme la longitude pour laquelle le périastre serait atteint si l'inclinaison du corps était nulle.

Exemple 1. Le plan de l'ellipse est dans le plan de l'écliptique (inclinaison = 0°) et la planète S se trouve au périastre ($V = 0^\circ$).

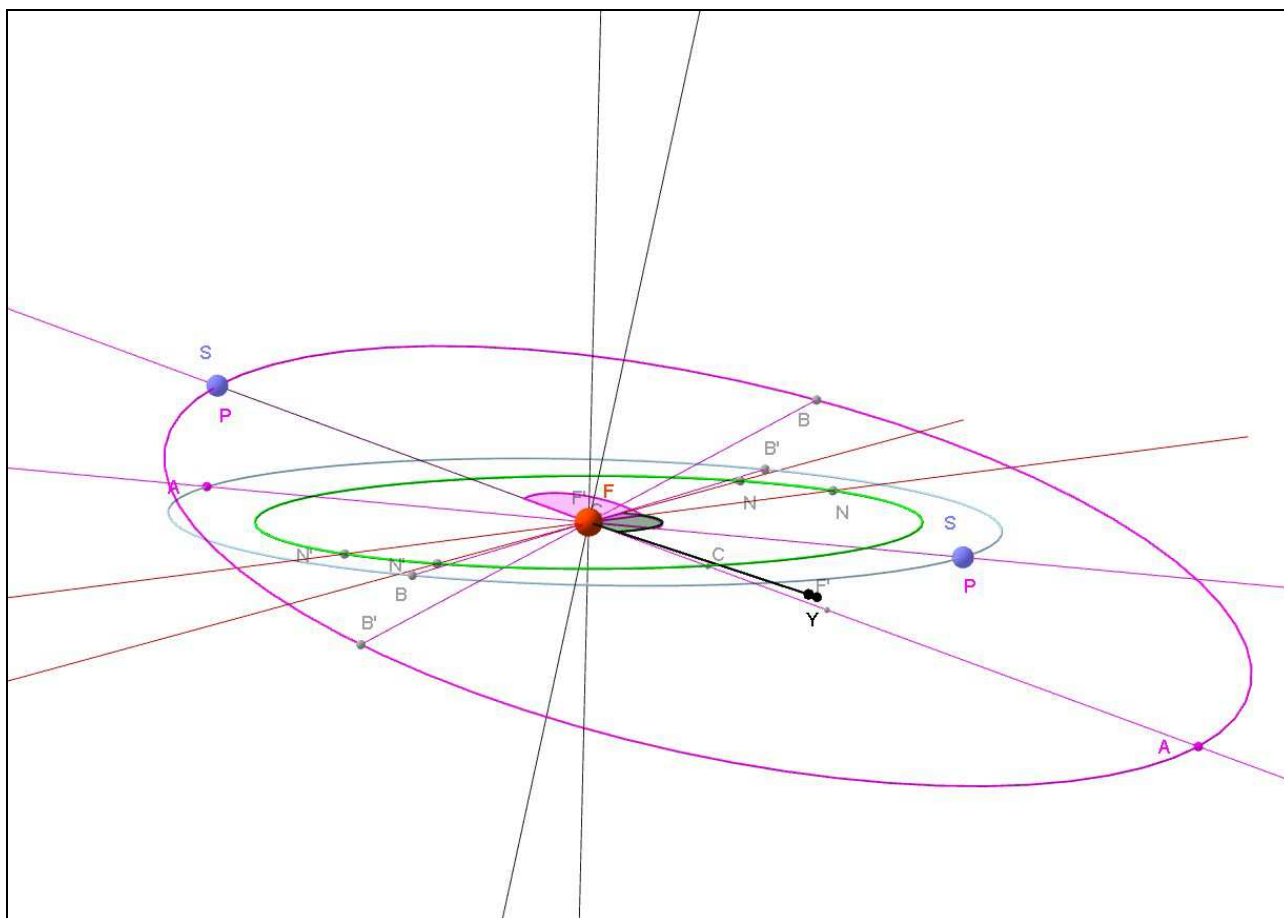


Exemple 2. Le plan de l'ellipse est incliné de 10° par rapport au plan de l'écliptique, la ligne des nœuds fait un angle de 16° par rapport au point vernal, le périastre fait un angle de 20° par rapport à la ligne des nœuds et l'anomalie vraie vaut 30° .

La position de l'observateur est changée par rapport à l'exemple 1.



Exemple 3. Neptune et Pluton. En utilisant les valeurs du tableau du bas de la page et en s'amusant à superposer les deux orbites on obtient le graphique ci-dessous. On voit clairement les différences d'orientation des demi-grand axes, d'excentricité et d'inclinaison des deux orbites (Pluton en violet et Neptune en bleu). Le sixième élément (anomalie) n'est pas pris en considération ici, car il s'agit seulement de comparer les orbites des planètes.



| | Mercure | Vénus | Terre | Mars | Cérés | Jupiter | Saturne | Uranus | Neptune | Pluton |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|
| Demi-grand axe (UA) | 0,387 | 0,723 | 1 | 1,524 | 2,767 | 5,203 | 9,537 | 19,191 | 30,069 | 39,482 |
| Excentricité | 0,206 | 0,007 | 0,017 | 0,093 | 0,078 | 0,048 | 0,054 | 0,047 | 0,009 | 0,249 |
| Inclinaison (°) | 7 | 3,4 | 0 | 1,9 | 10,6 | 1,3 | 2,5 | 0,8 | 1,8 | 17,1 |
| Longitude nœud ascendant (°) | 48,3 | 76,7 | 174,9 | 49,6 | 80,4 | 100,6 | 113,7 | 74 | 131,7 | 110,4 |
| Argument du périastre (°) | 29,1 | 54,9 | 288,1 | 286,5 | 73,2 | 275,1 | 338,7 | 96,5 | 273,2 | 112,6 |
| Période (années) | 0,241 | 0,615 | 1 | 1,88 | 4,6 | 11,9 | 29,5 | 84 | 164,8 | 248,4 |

Éléments des orbites pour les planètes du système solaire ainsi que pour deux planètes naines.

Les abonnés numériques pourront trouver sur le site du CLEA le fichier GeoGebra à l'adresse : http://acces.ens-lyon.fr/clea/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_152_07_ElementsOrbitaux.ggb

Références :

GeoGebra est un logiciel libre de géométrie dynamique téléchargeable gratuitement sur www.geogebra.org/.
 André Danjon, Astronomie générale, p.182 sq.
 Eduscol - orbitographie, ellipse <http://eduscol.education.fr/orbito/orb/meca/meca112.htm>.
 Wikipédia : ellipse, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ellipse_\(mathématiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ellipse_(mathématiques)).
 Wikipédia : orbite, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite>. ■

Évolution des trajectoires des planètes (2)

Véronique Hauguel, Rouen, Pierre Causeret, Esbarres

Voici la suite de l'histoire de l'évolution des conceptions du système solaire jusqu'à Kepler au début du XVII^e, en passant par Al-Tusi qui vient semer le doute dans les esprits en montrant qu'il est possible d'obtenir un mouvement rectiligne en combinant deux mouvements circulaires uniformes, Copernic qui fait perdre à la Terre sa position de centre du monde et Tycho Brahé qui défend un système hybride géo-héliocentrique.

Au II^e siècle de notre ère, Ptolémée écrit la composition mathématique, appelée aussi l'*Almageste*, œuvre géniale de 13 livres sur les connaissances astronomiques de l'époque. Elle comporte un catalogue de 1 022 étoiles et une explication des mouvements des planètes à partir de mouvements circulaires uniformes dans un système géocentrique¹.

On retrouve la trace de cet ouvrage par les traductions en arabe à partir du IX^e siècle et, au XII^e siècle, une traduction en latin par Gérard de Crémone permet à l'Europe occidentale d'en prendre connaissance.

Astronomes arabes et perses

Au IX^e siècle, le calife al-Ma'mūn rassemble de nombreux manuscrits et initie des rencontres entre savants de différentes croyances à Bagdad. À sa suite, l'astronomie arabe connaît un développement important. L'astronome al-Battānī² (Albatagnius) adopte le système de Ptolémée en le rectifiant. Al-Farghani (Alfraganus), astronome persan, écrit un abrégé de l'*Almageste* *Éléments d'astronomie*. C'est ce texte qui sera traduit en latin par Gérard de Crémone à Tolède.

Très rapidement, se développent les critiques sur l'ouvrage de Ptolémée : sur l'orbite des planètes³, sur le modèle des mouvements de la Lune qui fait varier son diamètre apparent du simple au double sur une lunaison ou encore sur le point équinoxial qui casse l'harmonie de combinaison de mouvements circulaires uniformes. Des astronomes de l'école de Maragha comme al-Tūsī ou Ibn al-Shatir au XIII^e et XIV^e siècle proposent des modèles alternatifs souvent complexes, cohérents d'un point de vue mathématique aussi bien que physique⁴.



Fig.1. Observatoire de Taqi Al-Din construit en 1577. Miniature anonyme.

Al-Tūsī montre qu'un mouvement rectiligne peut être obtenu en combinant 2 mouvements circulaires.

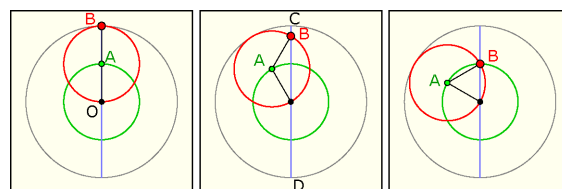


Fig.2. Hypocycloïde d'al-Tūsī. Si A (en vert) se déplace sur le cercle vert de centre O et si B (en rouge) se déplace sur le cercle rouge de même rayon et de centre A, à la même vitesse et dans le sens opposé, alors B décrit le segment [CD] (en bleu).

Cette propriété sème le trouble dans le dogme d'Aristote qui sépare le ciel en deux mondes opposés : le monde sublunaire, en-deçà de la Lune, soumis à la corruption et à l'imperfection, lié au mouvement rectiligne, et le monde supralunaire, au-delà de la Lune, éternel et harmonieux, lié à la sphère, forme parfaite, et au mouvement circulaire uniforme. Utilisée par Ibn al-Shatir, astronome de Damas, elle permet d'améliorer notablement les modèles de Ptolémée comme celui du mouvement de la Lune, modèle qui sera repris par Copernic.

¹ Voir article dans le numéro précédent.

² Copernic s'en inspire et le cite.

³ Voir figure 9.

⁴ Voir par exemple Histoire des sciences arabes, tome 1, Astronomie théorique et appliquée au Seuil.

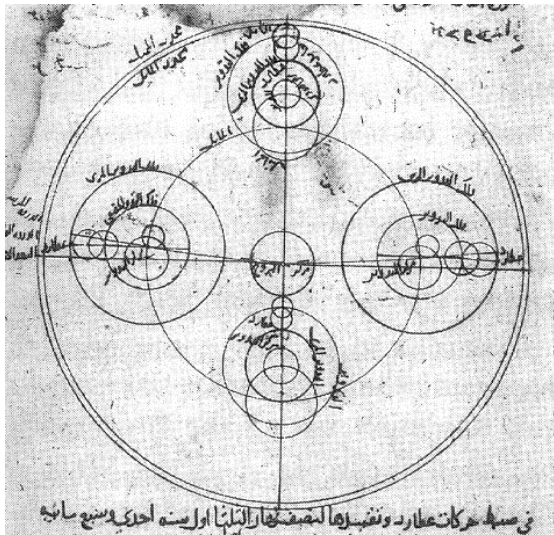


Fig.3. Mouvement de Mercure dans le modèle toujours géocentrique d'Ibn al-Shatir, avec les épicycles fondés sur l'hypocycloïde d'al-Tūsī.

Moyen Âge et Renaissance

On sait peu de chose de Jean de Sacrobosco, si ce n'est qu'il était professeur à l'Université de Paris⁵. Par contre, son *Traité de la sphère*, un ouvrage pédagogique d'astronomie élémentaire, écrit vers 1230 à partir du texte d'al-Farghani, a connu une longue et belle carrière puisqu'il y eut plus de 100 éditions imprimées de 1472 au XVII^e siècle.

Jusqu'au XV^e siècle, différents penseurs ont écrit sur le cosmos et commenté les textes des anciens.

Nicole Oresme, évêque de Lisieux, remet en cause l'immobilité de la Terre et sa place dans la sphère des fixes. Nicolas de Cues va plus loin en remettant en cause les deux mondes d'Aristote et en parlant d'univers *sans limite finie* (Copernic y fera allusion en parlant du système pythagoricien et du mouvement de la Terre).

Georges de Peurbach (1423-1461), astronome et mathématicien autrichien, qui rencontre de Cues en Italie, fait une nouvelle traduction de l'Almageste à partir de l'original grec. Il écrit l'*Épitomé de l'Almageste* qui est un résumé et une présentation très critique soulignant les invraisemblances du système de Ptolémée. Cet ouvrage sera terminé par son disciple et ami Regiomontanus (1436-1476) et sera publié 20 ans après sa mort, en 1496.

À ce moment, même si le système de Ptolémée a été remis en question par de nombreux scientifiques que ce soit dans le monde arabe ou en Europe occidentale, aucun n'a écrit une théorie des mouvements planétaires aussi technique, aussi complète

avec tables et calculs, qui soit l'équivalent de l'Almageste pour le détrôner.

Nicolas Copernic

Nicolas Copernic (1473-1543), chanoine, médecin et astronome polonais fait des études en Italie de 1496 à 1503, principalement à Bologne. En plus du droit civil, droit canonique et médecine, il y apprend le grec qui lui permettra d'accéder aux textes anciens, et l'astronomie avec un professeur très critique sur le système ptoléméen.

Après quelques années auprès de son oncle évêque, il rentre en 1510 définitivement à Frombork, ville de son canonat où il consacre une grande partie de sa vie à l'astronomie et à l'observation. Il fera construire trois instruments, instruments antiques utilisés par Hipparque : un triquetrum, composé de 3 baguettes, une sphère armillaire et un quadrant très simplifié –pas de nouveauté– pour des observations de qualité médiocre.

Par contre, autour de lui, il fait circuler un court texte manuscrit sans titre ni signature, qui prendra, plus tard, le nom de *Commentariolus* dans lequel Copernic donne les 7 axiomes, point de départ de l'héliocentrisme. Le troisième, par exemple, dit : « Tous les orbes entourent le Soleil qui se trouve pour ainsi dire au milieu de tous, et c'est pourquoi le centre du monde est au voisinage du Soleil »⁶.

Le Soleil est proche du centre du système mais ne joue aucun rôle moteur dans la mécanique céleste ; il n'a qu'un rôle optique, il éclaire le monde. Le centre des mouvements des planètes est le centre du « grand orbe », sphère supportant la Terre. La Terre perd sa position de centre du monde et sa qualité unique d'immobilité. Les mouvements sont circulaires uniformes et nécessitent de petits épicycles pour tenir compte des anomalies et respecter les observations⁷. Copernic fait disparaître l'équant créé par Ptolémée et très critiqué mais garde les sphères matérielles sur lesquelles sont fixées les planètes.

Pour lui, la Terre, fixée sur une sphère, a 3 mouvements : le mouvement diurne, le mouvement annuel autour du Soleil et un 3^e mouvement, mouvement de toupie de l'axe de la Terre, pour que cet axe reste dans la même direction tout au long de l'année (figure 4). Il veut un système plus harmonieux, plus simple, plus en concordance avec les observations, repousse la sphère des fixes très loin ce qui répond au problème de parallaxe des

⁶ Pour les 7 postulats de Copernic, voir page 28.

⁷ Les épicycles sont petits mais restent nombreux. Copernic utilise 34 cercles, au lieu de 40 chez Ptolémée : 7 pour Mercure, 5 pour Vénus, 3 pour la Terre, 4 pour la Lune et 5 pour chacune des autres planètes, Mars, Jupiter et Saturne.

⁵

Voir : dutarte.perso.neuf.fr/instruments/sacrobosco%20biographie.htm.

étoiles énoncé par les détracteurs⁸. Par ailleurs, il laisse les questions de monde limité ou infini au philosophe. Même s'il ne reprend pas la physique d'Aristote du mouvement des corps célestes en relation avec le divin, il reste dans le même esprit et il lie ce mouvement à leur sphéricité.

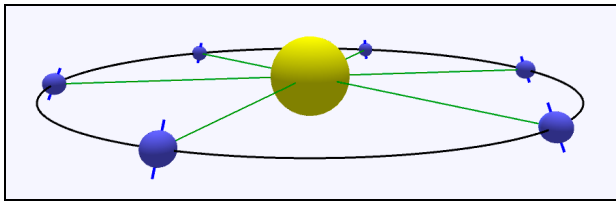


Fig.4. Pour Copernic, l'axe de la Terre est solidaire du segment Soleil-Terre comme dans une maquette mécanique. En l'absence de 3^e mouvement, il changerait continuellement de direction comme sur la figure. Ce 3^e mouvement permet qu'il garde une direction quasiment fixe, en tenant compte néanmoins de la précession des équinoxes.

Quand Copernic rencontre Rheticus, jeune professeur brillant de mathématique de l'université protestante de Wittenberg⁹, il a 66 ans ; le futur ouvrage qui deviendra *de Revolutionibus*¹⁰ est très avancé. Pour convaincre son maître d'éditer son œuvre, Rheticus écrit, en 1540, un ouvrage *Narratio prima* qui la présente. Il affirme que « les orbes de plus grande dimension accomplissent leurs révolutions plus lentement, comme il convient, tandis que les accomplissent plus rapidement les orbes les plus proches du soleil, dont on pourrait dire qu'il est au principe du mouvement et de la lumière » montrant la simplicité du système et donnant au Soleil un rôle plus important que celui donné par Copernic. Avec ce système, 6 planètes tournent autour du Soleil ; et 6, c'est le « le premier et le plus parfait des nombres¹¹ », rappelle Rheticus, « ce nombre est loué plus que tous, aussi bien dans les paroles sacrées de Dieu que chez les pythagoriciens et les autres philosophes ». Il montre très longuement que si les anciens revenaient avec les mesures actuelles, ils donneraient leur voix à son « Doctor Præceptor » (savant maître).

Cet ouvrage est très bien reçu et cela conforte Copernic dans l'idée de faire connaître son œuvre. Grâce à Rheticus, un luthérien, à Giese Tiedemann, un évêque et ami, au cardinal de Padoue, Nicolas Schönberg, et au soutien d'un pape, Paul III, Nicolas Copernic accepte de faire éditer son livre qui sera publié en 1543, année de sa mort.

⁸ Si le rayon de l'orbite de la Terre n'est pas négligeable par rapport à celui de la sphère des fixes, la parallaxe d'étoile serait mesurable avec les instruments.

⁹ Université de Luther et Mélanchton.

¹⁰ Osiander le renommra *De revolutionibus orbium coelestium*.

¹¹ Un nombre parfait est un nombre égal à la somme de ses diviseurs autres que lui-même comme 6 car $6 = 1+2+3$.

Cet ouvrage qui se veut un nouvel Almageste, en reprend le plan dans ses 6 livres. Copernic essaie de d'améliorer les mouvements mis en place dans le *Commentariolus*, il sait que son œuvre est perfectible et il continuera ce travail même après le dépôt du manuscrit à l'édition.

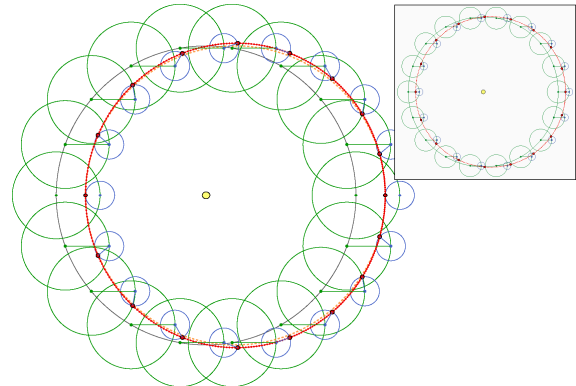


Fig.5. L'orbite de Mars pour Copernic. Avec les paramètres donnés dans *Commentariolus* et un système de déferent lié à 2 épicycles, l'orbite de Mars (en rouge) est un ovale¹². Pour que cet ovale soit bien visible, on a doublé le rayon des deux épicycles sur la figure principale et on a ajouté un cercle orange (pointillés), pour comparaison. L'encadré à droite montre le modèle de Copernic avec les bons paramètres. L'orbite de Mars est très proche d'un cercle excentré. Le système héliocentrique de Copernic n'est donc pas constitué d'orbites circulaires centrées sur le Soleil comme on le présente souvent. Cela fonctionnerait trop mal. Il est beaucoup plus complexe.

Même si Copernic ne remet pas en cause la physique d'Aristote ni la sphère des fixes qui devient immobile dans son système, il change de point de vue en plaçant le Soleil au centre. Il ouvre ainsi une brèche dans le système précédent, qui cette fois sera définitive.

Certains vont essayer de la refermer comme Andreas Osiander, qui supervise l'édition. Il écrit une préface, non signée, qui réduit l'héliocentrisme à un simple outil mathématique sans réalité physique ; « ces hypothèses¹³ n'ont pas besoin d'être vraies ni probables », dit-il, et le livre, d'après ce singulier préfacier, contient de « non moindres absurdités qu'il n'est pas nécessaire de faire ressortir ici » ! Ainsi, le système de Ptolémée, le système de Copernic et un peu plus tard le système de Tycho Brahe seront proposés comme hypothèses de modèle du cosmos pendant bien longtemps, par exemple dans l'atlas de Cellarius en 1660.

En 1543, il n'y a aucune réaction de la part de l'Église romaine à la parution du livre de Copernic. Le climat intellectuel change et, en 1616, le cardinal inquisiteur Robert Bellarmine, théologien jésuite,

¹² Dans *de Revolutionibus*, Copernic remplace ce système par un système excentrique-épicyclique.

¹³ Copernic utilise « hypothèse » au sens postulat.

joue un rôle de tout premier plan¹⁴ dans la procédure qui inscrit l'œuvre de Copernic à l'*Index librorum prohibitorum* (Catalogue des livres interdits). Cette interdiction est levée en 1757 mais il faut encore attendre 1822 pour que l'impression de cet ouvrage soit officiellement autorisée.

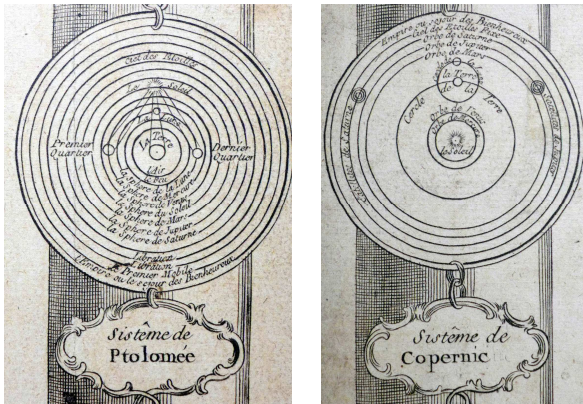


Fig.6. Les systèmes de Ptolémée et de Copernic présentés à égalité sur une carte de 1795, soit plus de 250 ans après la mort de Copernic (Musée Diderot, Langres).

Tycho Brahe

Tycho Brahe naît 3 ans après la mort de Copernic. Passionné d'astronomie, il a la chance d'observer différents phénomènes astronomiques dans sa jeunesse : éclipse, conjonction Jupiter-Saturne... qui remettent en cause la justesse des tables de prédiction. Il observe l'explosion d'une supernova¹⁵ plus brillante que Vénus à 26 ans et, cinq plus tard, la grande comète de 1577¹⁶. Ces observations remettent en cause l'immuabilité du monde supralunaire d'Aristote, car supernova et comète sont au-delà de la Lune, ainsi que les sphères matérielles, la comète pouvant toutes les traverser sans encombre. Cet astronome danois, installé sur l'île de Ven par le roi Frédéric II, fait construire deux palais dont Uraniborg où il fait fabriquer une douzaine d'instruments d'astronomie remarquables pour l'époque comme le quadrant mural d'un rayon de deux mètres permettant des mesures à moins d'une minute d'arc près¹⁷.

À la mort du roi, Tycho Brahe doit partir ; il devient le *mathématicien impérial* de la cour de l'empereur Rodolphe II et s'installe dans un château près de Prague. C'est là que Johannes Kepler viendra le rejoindre début 1600. Tycho Brahe défend un système géo-héliocentrique qui laisse la Terre immobile et autour de laquelle gravitent la Lune et

le Soleil. Les 5 autres planètes tournent autour du Soleil¹⁸.

Après les observations des phases de Vénus par Galilée en 1610, ce système, plus conforme aux observations que celui de Ptolémée, est soutenu par l'Église catholique.

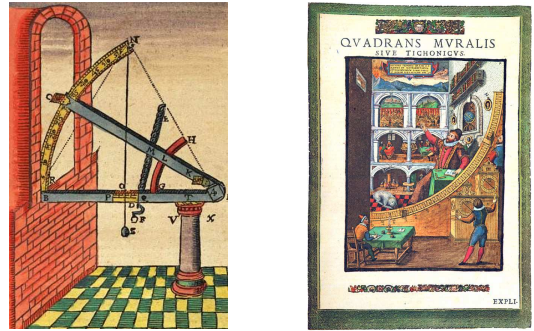


Fig.7. Sextant et quadrant mural d'Uraniborg. Gravure, *Astronomiae Instauratae Mechanica*.

Johannes Kepler

Après une enfance pauvre et difficile, Johannes Kepler (1571- 1630) entre en 1589 à l'université de Tübingen où il étudie entre autres, la physique, le grec, l'astronomie où seul le système de Ptolémée est enseigné. Son professeur de mathématiques, l'astronome Michael Maestlin, fait découvrir aux meilleurs étudiants le système de Copernic. Kepler devient un copernicien convaincu et restera très proche de son professeur qui l'aidera dans ses travaux. Il abandonne ses études de théologie pour prendre un poste de professeur de mathématique à l'école protestante de Graz.

En 1595, toujours dans une recherche d'harmonie et d'analogies entre la géométrie et l'astronomie, Kepler découvre que les 5 solides de Platon, les seuls polyèdres réguliers, s'emboîtent dans les orbites des planètes.

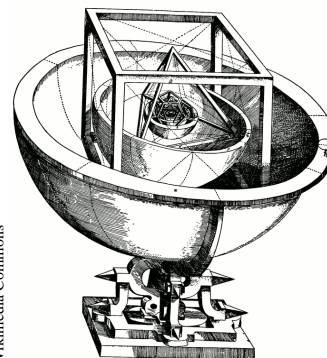


Fig.8. Modèle de Système solaire de Kepler avec solides réguliers emboîtés (image issue du *Mysterium Cosmographicum*, œuvre de jeunesse de Kepler, 1596). Chaque sphère de planète est inscrite et/ou circonscrite à un polyèdre ; en partant de l'orbite de Mercure, on trouve l'octaèdre puis l'icosaèdre, le dodécaèdre, le tétraèdre et pour finir le cube entre Jupiter et Saturne.

¹⁴ Ainsi que dans le procès de Giordano Bruno.

¹⁵ SN 1572, Nova de Tycho, supernova dans la constellation de Cassiopeée visible pendant plus d'un an à cette époque.

¹⁶ C/1577 V1.

¹⁷ La précision n'avait pas évolué depuis Ptolémée. Elle était de l'ordre de 10'. Tycho Brahe la divise au moins par 10.

¹⁸ Le système de Tycho Brahe est inspiré de l'astronome contemporain germanique Paul Wittich mais aussi extrapolé du système d'Héraclide du Pont. Il est mis en rivalité avec le système géo-héliocentrique d'Ursus qui admet la rotation de la Terre sur elle-même.

Pour la première fois, on recherche la raison et non plus seulement le comment. Dans son livre *Mysterium Cosmographicum* qui connaîtra un certain succès, Kepler se pose les questions suivantes : pourquoi existe-t-il 6 planètes ? Pourquoi sont-elles disposées à ces distances du Soleil ? Pourquoi se déplacent-elles à ces vitesses ? Pour lui, ces 3 questions sont d'égale importance.

Aux deux premières questions, une ébauche de réponse : « je joue moi aussi avec les symboles, (...) mais sans oublier que je joue. En effet, on ne démontre rien avec des symboles, on ne peut rien révéler à l'aide des symboles géométriques de la philosophie naturelle... ». La troisième question aboutira aux 2^e et 3^e lois de Kepler.

Grâce à ce livre et aussi à cause de la situation de plus en plus difficile pour les protestants à Graz, Johannes Kepler peut rencontrer Tycho Brahe.

Il arrive à Prague début 1600, bien décidé à prendre connaissance de ses observations et à les exploiter. Cette rencontre est orageuse et courte car Tycho meurt, 20 mois plus tard, en octobre 1601. Il parviendra difficilement à obtenir les tableaux de mesures. Pensant mettre quelques semaines à trouver l'orbite de Mars qui résistait à toute modélisation, Kepler y travaille 6 ans. Grâce à la précision des mesures et à sa pugnacité, il ira au bout de ses recherches.

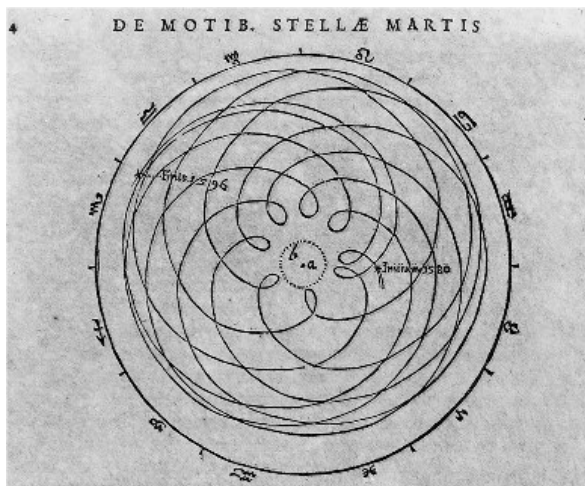


Fig.9. Esquisse de l'orbite de Mars de 1580 à 1596 dans le système géocentrique de Ptolémée, réalisée par Kepler dans *Astronomia nova* (Gallica BnF). Si les orbes sont matérielles, la place est limitée pour les autres planètes.

En plus de son génie et de son intuition, Kepler est tenace, moderne, cherchant à se libérer des idées préconçues sauf de celles de l'harmonie ou de l'ordre dans le cosmos. C'est tout cela qui permettra les découvertes des lois fondamentales.

Dans l'*astronomia nova*, tout en recherchant l'orbite de Mars, Kepler énonce les deux premières des trois lois :

1. Chaque planète décrit autour du Soleil une orbite elliptique, le Soleil occupant l'un des foyers de l'ellipse.
2. Le rayon vecteur qui joint la planète au Soleil balaie des aires égales en des durées égales.

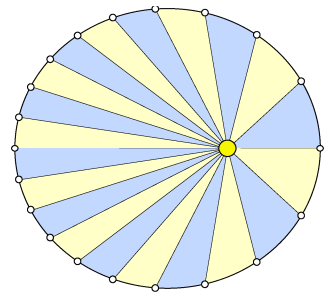


Fig.10. Deuxième loi de Kepler. La planète est représentée ici à des intervalles de temps égaux. Les aires colorées sont égales.

Recherchant toujours les analogies entre les 4 arts du Quadrivium vers une harmonie céleste, Kepler veut trouver un lien entre les proportions des distances dans le système héliocentrique et les proportions dans les intervalles musicaux consonants. Il transforme ainsi le modèle statique des solides de Platon en un système en mouvement dans le temps. Cette quête le mène à la 3^e loi dans *Harmonices Mundi* (1619) :

3. Le cube du demi grand axe de l'orbite sur le carré de la période est une constante pour l'ensemble des planètes.

Kepler généralise son modèle aux autres planètes dans son *Épitomé* en 1622 puis en 1627, les *Tables Rodolphines*, livre révolutionnaire pour la précision des mesures et sur les apports dans la correction des erreurs liées à la diffraction de la lumière.

Conclusion

Apollonius, le roi des coniques, a mis en place un jour un modèle basé sur les épicycles pour sauver les mouvements circulaires uniformes et ainsi l'harmonie des sphères ; c'est Kepler qui toujours avec cette même conviction d'harmonie mais aussi dans la recherche de la précision et de la vérité va revenir à une conique, l'ellipse.

Avec ses 3 lois, Johannes Kepler ouvre la voie à Isaac Newton qui exploitera les 3 lois pour découvrir la théorie de la gravitation publiée dans l'ouvrage connu sous le nom de *Principia* en 1687. Cette théorie de la gravitation universelle démontre les lois de Kepler et justifie la place centrale du Soleil de par sa masse.

Cette nouvelle découverte majeure rencontrera des difficultés pour être reconnue. Il faudra attendre presque 70 ans, époque où cartésiens¹⁹ et newtoniens s'affrontent, pour avoir une traduction française que l'on doit à la Marquise du Châtelet. ■

¹⁹ Descartes explique le mouvement des planètes par de grands tourbillons d'éther remplissant l'espace et exclut une action à distance du Soleil.

Textes anciens

En complément de l'historique retracé dans l'article précédent, voici deux textes, l'un de Copernic, le suivant de Galilée sur le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme.

Extrait du *Commentariolus* de Copernic

Copernic se demande si « on pouvait trouver un système plus rationnel de cercles d'où toute irrégularité apparente découlerait tandis que tous seraient mus uniformément autour de leurs centres, comme l'exige le principe du mouvement parfait ». Il poursuit : « Après que j'eus attaqué ce problème extrêmement difficile et presque inextricable, le moyen s'est offert enfin de le résoudre à l'aide d'éléments moins nombreux et bien mieux appropriés que ceux utilisés par l'ancienne tradition, pourvu que l'on me concède quelques postulats que l'on appelle axiomes. Ces postulats viennent dans l'ordre suivant : Premier postulat : Il n'y a pas un centre unique pour tous les orbes ou sphères célestes.

Deuxième postulat : Le centre de la terre n'est pas le centre du monde, mais seulement le centre des graves et le centre de l'orbe lunaire.

Troisième postulat : Tous les orbes entourent le soleil qui se trouve pour ainsi dire au milieu d'eux tous, et c'est pourquoi le centre du monde est au voisinage du soleil.

Quatrième postulat : Le rapport de la distance du soleil à la terre vis-à-vis de la hauteur de la sphère des étoiles est plus petit que le rapport du rayon de la terre à la distance entre le soleil et la terre, au point que la distance du soleil à la terre est imperceptible en comparaison de la hauteur de la sphère des étoiles.

Cinquième postulat : Tout mouvement qui paraît appartenir à la sphère des étoiles ne provient pas d'elle mais de la terre. La terre, donc avec les éléments tout proches, accomplit d'un mouvement diurne une révolution complète, autour de ses pôles fixes, tandis que demeure immobile la sphère des étoiles ou ciel ultime.

Sixième postulat : Les mouvements qui nous paraissent appartenir au soleil ne proviennent pas de lui, mais de la terre et de notre orbe, avec lequel nous effectuons des révolutions autour du soleil comme n'importe quelle autre planète. Ainsi donc la terre est entraînée par plusieurs mouvements.

Septième postulat : Les mouvements rétrograde et direct qui se manifestent dans le cas des planètes ne proviennent pas de celles-ci, mais de la terre. Le mouvement de la terre seule suffit donc à expliquer un nombre considérable d'irrégularités apparentes dans le ciel.

Extrait du dialogue de Galilée

Ici, Galilée construit pas à pas, avec des arguments, le plan du système solaire.

« SALVIATI : (...) Je répète que le centre des rotations célestes des cinq planètes, Saturne, Jupiter, Mars, Vénus et Mercure, c'est le Soleil ; il sera donc aussi le centre du mouvement de la Terre si nous réussissons à la placer dans le ciel. La Lune, elle, a un mouvement circulaire autour de la Terre de laquelle elle ne peut absolument pas se séparer ; comme je l'ai dit ; mais cela ne l'empêche pas de tourner autour du Soleil avec la Terre selon le mouvement annuel.

SIMPLICIO : Je ne suis encore pas bien convaincu de cette structure ; peut-être qu'en faisant un dessin, nous comprendrons mieux et pourrons en discuter plus facilement.

SALVIATI : Soit ; ou plutôt, pour mieux vous satisfaire et vous étonner, c'est vous-même qui allez en tracer le dessin ; vous allez le voir, vous croyez ne pas comprendre cette structure, alors que vous la saisissez parfaitement ; et simplement en répondant à mes questions, vous allez la dessiner exactement. Prenez donc une feuille et les compas : supposons que cette feuille blanche soit l'immense étendue de l'univers et que vous ayez à y distribuer et en ordonner les parties selon ce que la raison vous dictera. Tout d'abord, vous tenez pour assuré, et ce n'est pas moi qui vous l'ai appris, que la Terre est placée dans cet univers, marquez un point là où vous voulez la placer ; désignez-le par une lettre.

SIMPLICIO : Soit ce point A le lieu du globe terrestre.

SALVIATI : Bien. Je sais, en second lieu, que vous savez très bien que la Terre n'est pas à l'intérieur du corps du Soleil, n'y est pas non plus contiguë, mais en est à une certaine distance ; indiquez donc pour le Soleil un autre lieu à votre choix, éloigné de la Terre de la distance que vous voulez et, à nouveau, désignez ce lieu par une lettre.

SIMPLICIO : Voilà qui est fait : soit ce point O le lieu du corps solaire.

SALVIATI : Ces deux points étant déterminés, pensons à placer Vénus de façon telle que sa position et son mouvement correspondent à ce que montrent les apparences sensibles ; rappelez-vous ce que les discussions antérieures ou vos propres observations

vous ont appris de cette étoile ; indiquez alors la position qui vous paraîtra lui convenir.

SIMPLICIO : Supposons vraies les apparences que vous avez présentées et que j'ai lues dans le livre des conclusions, selon lesquelles cette étoile ne s'écarte jamais du Soleil de plus de 40 et quelques degrés et qu'ainsi non seulement elle ne se trouve jamais en opposition avec le Soleil, mais qu'elle n'arrive pas en quadrature, pas même en aspect sextile.

Supposons en outre qu'à un moment elle paraisse près de 40 fois plus grande qu'à un autre moment, autrement dit très grande quand, en mouvement rétrograde, elle s'approche de sa conjonction du soir avec le Soleil et très petite quand, en mouvement direct, elle s'approche de sa conjonction du matin ; supposons enfin que, lorsqu'elle paraît très grande, elle prenne pour nous la forme d'un croissant, et que, lorsqu'elle paraît très petite, on la voie parfaitement ronde.

Si les apparences sont bien celles-là, je ne vois pas comment échapper à l'affirmation que cette étoile tourne sur un cercle autour du Soleil ; car en aucune façon on ne peut dire que ce cercle embrasse et contient en lui la Terre, encore moins qu'il est au-dessous du Soleil, c'est-à-dire entre le Soleil et la Terre, pas plus qu'on ne peut le dire au-dessus du Soleil. Il ne peut embrasser la Terre, sinon Vénus serait parfois en opposition avec le Soleil ; il ne peut être au-dessous du Soleil, car alors Vénus apparaîtrait en forme de faucille dans ses deux conjonctions avec le Soleil ; il ne peut pas non plus être au-dessus, car alors Vénus apparaîtrait toujours ronde et jamais en forme de croissant. Pour sa demeure, je vais donc tracer le cercle CH autour du Soleil, sans que ce cercle embrasse la Terre.

SALVIATI : Une fois Vénus installée, il faut penser à Mercure qui, vous le savez, se tient toujours autour du Soleil et s'en éloigne moins que Vénus ; examinez en conséquence quel lieu il faut lui assigner.

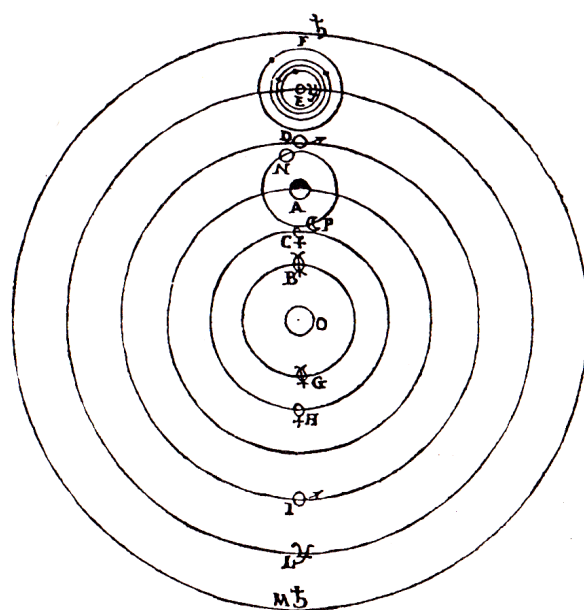
SIMPLICIO : Il ne fait pas de doute qu'à l'imitation de Vénus, le séjour qui lui conviendrait le mieux est un cercle autour du Soleil, mais plus petit et intérieur à celui de Vénus ; pour tout cela et surtout sa proximité avec le Soleil, nous avons un argument et un indice fort concluant : la vivacité de son éclat qui dépasse celui de Vénus et des autres planètes ; Sur ces bases, nous pourrions tracer son cercle ; je le désigne par les lettres BG.

SALVIATI : Et Mars, où le mettez-vous ?

SIMPLICIO : Puisqu'il arrive à Mars d'être en opposition avec le Soleil, son cercle doit embrasser la Terre ; mais, je le vois, il doit nécessairement embrasser aussi le Soleil. Il arrive en effet à Mars d'être en conjonction avec le Soleil ; s'il ne passait pas au-delà du Soleil et restait en dessous, on le verrait sous la forme d'un croissant, comme Vénus et la

Lune ; or on le voit toujours rond ; il doit donc comprendre dans son cercle et le Soleil et la Terre. Vous avez dit, je m'en souviens, que lorsqu'il est en opposition avec le Soleil, il paraît 60 fois plus grand qu'en conjonction ; le plus adapté à ces apparences me semble un cercle autour du soleil comme centre, qui embrasse la Terre ; je l'ai marqué ici en le désignant par DI : en D, Mars est au plus près de la Terre, en opposition avec le Soleil ; en I, il est au plus loin de la Terre, en conjonction avec le Soleil. Comme on observe les mêmes apparences pour Jupiter et Saturne, même si la variation est moindre pour Jupiter que pour Mars et encore bien moindre pour Saturne que pour Jupiter, nous donnerons, me semble-t-il, toute satisfaction à ces deux planètes en traçant deux cercles autour du Soleil, le premier pour Jupiter désigné par EL, le second, plus haut, pour saturne désigné par FM.

SALVIATI : Jusqu'ici, vous vous êtes magnifiquement comporté. Or, vous le voyez, le rapprochement et l'éloignement des trois planètes supérieures est mesuré par le double de la distance entre la Terre et le Soleil, la variation qui en résulte est bien plus importante pour Mars que pour Jupiter, étant donné que le cercle DI de Mars est plus petit que le cercle EL de Jupiter ; de même, EL étant plus petit que le cercle FM de Saturne, la même variation est encore moins importante pour Saturne que pour Jupiter. Cela correspond exactement aux apparences. (...) »



Sources

Le premier texte provient de : *Astronomie & astrophysique dans la collection « Textes essentiels »* de Larousse, rassemblés et commentés par JP Verdet.

Le second provient du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* édité au Seuil, 3^e journée.

OBSERVATION

HALOS LUNAIRES ET PARASÉLÈNES

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

La lumière réfléchiée par la Lune permet, comme celle du Soleil, d'observer de beaux systèmes de halos, dans des conditions parfois inattendues, et de compléter les explications fournies dans le n° 150 des Cahiers Clairaut.

Rien ne nous laissait présager un phénomène lumineux aussi exceptionnel et complexe, et nous ne pensions pas que c'était possible loin des régions polaires. C'est en arrivant en Savoie le 1^{er} janvier 2015 vers 2 h 30 au-dessus de N-D de Bellecombe, à quelques km du col des Saisies que nous avons vu le spectacle magique des deux anneaux concentriques autour de la Lune gibbeuse, avec parasélènes, irisations, colonne de lumière et divers arcs tangents que nous n'avions jamais vus ailleurs que sur des dessins.

Le thermomètre de la voiture indiquait -11 °C, le ciel était clair : la Lune ne serait pleine que le 5 janvier et on pouvait voir Orion en dépit d'une précipitation de poudrin de glace, bien visible sur les photos au flash. Sans aucun doute, les canons à neige en action ont joué un rôle primordial, ainsi que le vent du Nord ramenant dans la vallée où nous nous trouvions les fins cristaux de glace.



Lune, parasélènes et poudrin de glace.

C'était peut-être la seule fois de notre vie que la possibilité de contempler un double halo nous était offerte, nous avions la tête dans la *poussière de diamants*¹, des anneaux scintillants à bout de bras... et nous n'avions aucun matériel photo, juste un petit

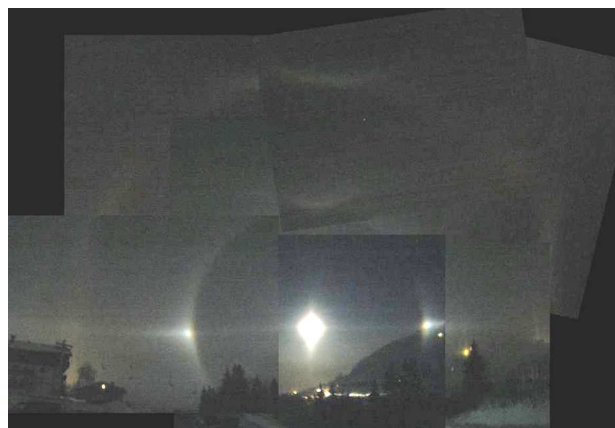
¹ Poudrin de glace pour les anglo-saxons se dit *diamond dust*. Mais la traduction par *poussière de diamants* est à éviter pour les recherches sur Internet !

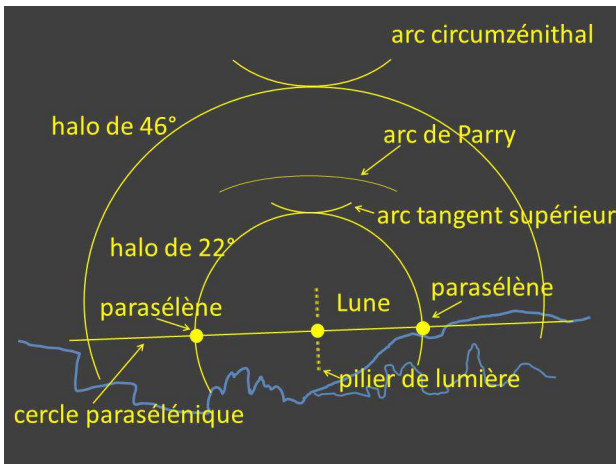
compact ! Tout le monde se trouve un jour ou l'autre dans la même situation, alors on observe, on estime la hauteur de la Lune (ou du Soleil), on note l'heure, le temps qu'il fait, et les changements car le phénomène évolue très vite : tantôt un morceau du petit halo aussi brillant et coloré qu'un arc-en-ciel (mais avec le rouge à l'intérieur), tantôt le parasélène ouest illuminant la montagne en face, tantôt la croix, vue jadis comme un signe divin. Jusqu'au coucher de la Lune, de 2 h 31 à 3 h 47, nous avons photographié mais sans pied, sans objectif à courte focale, ce n'était pas facile : les traces seront de médiocre qualité mais cependant exploitables !

Systemes de halos

(pour les anglo-saxons *Halo display*)

Sur ce montage de photos (pas facile à raccorder !), on distingue le **petit halo de 22°** et le **grand halo de 46°**, deux parasélènes sur le petit halo et leurs nuages irisés, l'**arc tangent supérieur**, une portion de l'**arc circumzénithal** tangent au grand halo, le début du **cercle paraséléniq**ue et un **pilier de lumière**. Mais nous avons vu aussi l'arc concave supérieur de Parry, formant comme un ballon de rugby avec l'arc tangent supérieur, trop peu lumineux pour les photos : par prudence, essayons déjà d'identifier et de comprendre ce que nous voyons.

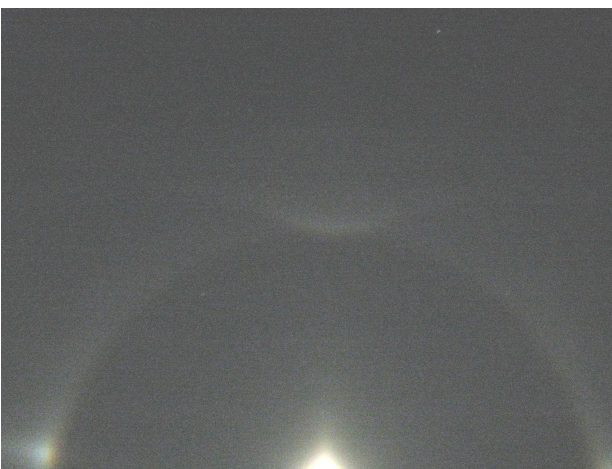




Non seulement le système est complexe, mais en plus il est changeant : ainsi lorsque la Lune (ou le Soleil) descend sur l'horizon, les parasélènes (ou parhélies) d'abord écartés se rapprochent du petit halo de 22° jusqu'à le toucher, et l'arc tangent supérieur change de forme. Le dessin ci-dessus correspond à une certaine hauteur de l'astre, et à une observation sur un laps de temps réduit.



À gauche quelques étoiles d'Orion. Pourquoi une portion du halo de 22° apparaît-elle soudain aussi brillante ?



Halo de 22° et arc tangent supérieur. On devine l'arc concave supérieur de Parry.

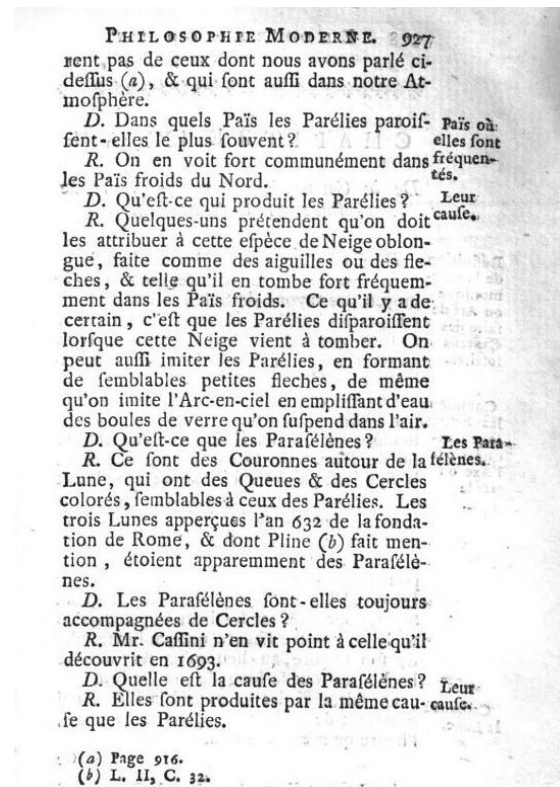
Qu'il s'agisse de la lumière du Soleil ou de celle qui est réfléchiée par la Lune, les phénomènes sont les mêmes, seule la luminosité diffère, mais lorsqu'on regarde sans lire la légende les photos prises en pose dans les régions polaires, il est facile de s'y tromper.

Les parhélies sont remplacés par des parasélènes, appelés encore fausses Lunes ou *chiens de Lune* (*moon dogs*), le cercle parhélique s'appellera cercle paraséléniq etc.

Soleil ou Lune ? L'interprétation des phénomènes lumineux est la même et peut-être résumée ainsi :

| | | |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Arcs-en-ciel, en-terre, en-mer | Gouttelettes d'eau | Réfraction - Réflexion(s) |
| Couronnes | Gouttelettes d'eau | Réfraction |
| Halos les plus fréquents | Cristaux de glace | Réfraction |
| Parasélènes | Cristaux de glace | Réfraction |
| Cercle paraséléniq | Cristaux de glace | Réflexion |
| Pilier (colonne) de lumière | Cristaux de glace | Réflexion |

Les cristaux de glace, plaquettes, baguettes (ou colonnes) et crayons, sont des prismes de base hexagonale. Leur taille, leur forme, leur quantité, leur orientation, leur stabilité ou leur mouvement sont à l'origine de la forme des halos observés.



Elemens De La Philosophie Moderne – Pierre Massuet – 1752

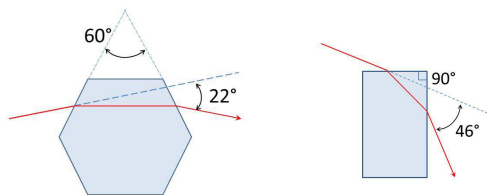
Quelques idées fausses à rectifier

Contrairement aux couronnes, disques irisés dont le rayon n'excède pas quelques degrés et qui ont pour origine des gouttelettes d'eau, les halos ont des rayons de quelques dizaines de degrés et sont dus à de petits cristaux de glace en suspension dans l'air. C'est Edme Mariotte qui a donné vers 1640 la première interprétation du halo de 22° par la réfraction dans les cristaux de glace.

S'il est vrai que de tels cristaux sont présents dans les nuages glacés d'altitude, on ne peut pas affirmer qu'en l'absence de tels nuages, cirrus ou cirrostratus, il ne peut pas y avoir de halo. On voit ici que le phénomène peut être associé à une fine précipitation, certes artificielle. Il serait faux également d'écrire, comme on le voit parfois, qu'en raison de l'éclat trop faible de la Lune, il n'est pas possible d'observer le grand halo. Mais il est rare, cela est vrai !

Petit halo, grand halo

Des explications claires et diverses méthodes de calcul ont été proposées dans le n° 150. À propos du **petit halo de 22°** , Pierre Causeret dans son article « Les parhélies, de faux soleils dans le ciel » p. 24 a expliqué comment calculer le minimum de déviation d'environ 22° (variable selon l'inclinaison du rayon incident mais au moins égal à $21,8^\circ$) dans le cas d'un prisme d'angle 60° . Comme l'indique Jean-Pierre Delavance p. 27 dans son article « Le halo de Boukhara », si le rayon lumineux traversant le cristal de glace entre par une face latérale et sort par une face terminale, vers notre œil, l'angle du prisme est alors 90° et le nouveau minimum de déviation est environ 46° (variable toujours selon l'inclinaison du rayon incident mais au moins égal à $45,7^\circ$). On observe alors le **grand halo de 46°** . Pour ces halos, c'est l'**orientation aléatoire** des cristaux qui leur donne une forme circulaire.



C'est Cavendish qui, à la fin du XVIII^e siècle, a établi l'origine du **grand halo** ou **halo de 46°** .

Remarque : les cristaux de glace présentent également des prismes d'angle 120° mais il n'y a alors que des réflexions totales et aucun rayon émergent.

Le système de halos lunaires apparaissant sur fond noir, les seules couleurs perceptibles sont principalement le rouge et l'orange.

Parasélènes

Les parasélènes, comme les parhélies, apparaissent en atmosphère calme. Les plaquettes horizontales sont alignées et leurs arêtes sont verticales, la lumière réfractée par les faces verticales des cristaux situés à la **même hauteur** que l'astre sera renvoyée de chaque côté de l'astre, formant deux fausses Lunes. L'angle peut être supérieur à 22° lorsque l'astre est haut, ou égal à 22° s'il est bas sur l'horizon, et les parasélènes sont alors en contact avec le petit halo.



Parasélène sur le halo de 22° , qui apparaît comme un trou sombre puisqu'il correspond à un minimum de déviation en-dessous duquel aucun rayon lumineux n'émerge.

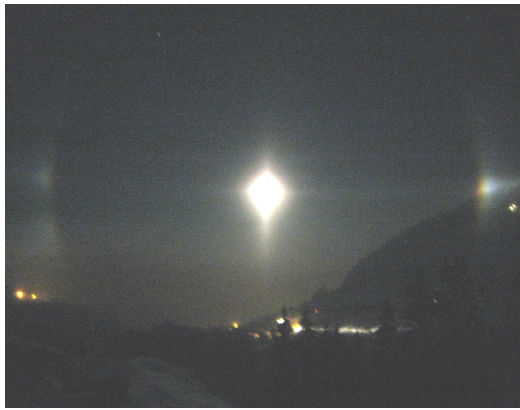
L'arc tangent au halo de 22° (ici supérieur) est dû à des cristaux tourbillonnants, d'où sa forme très variable : halo circonscrit ou arcs séparés en forme de « moustache » selon la hauteur de l'astre.

L'arc circumzénithal peut être tangent, comme ici, au halo de 46° et il est coloré : on devine le bleu vers le zénith, on perçoit le rouge vers l'horizon. Pour ces deux types de halos, seules diffèrent les faces d'entrée et de sortie de la lumière dans les cristaux.

Pour d'autres arcs, c'est toujours le phénomène de réfraction qui est en cause, avec quelques variantes... ... sauf celui qui fait exception : le **cercle parasélénique**, qui comme le **pilier** (ou colonne) **de lumière**, a pour origine une **réflexion**.

Réflexion sur les faces verticales des cristaux pour le cercle parasélénique, réflexion sur la face inférieure de plaquettes légèrement inclinées pour le pilier. Il n'y a pas de couleurs puisqu'il n'y a pas de dispersion.

Un tel système de halos est la preuve de la **diversité des cristaux**, de leurs **orientations** et de leurs **mouvements**.



Portion de l'arc parasélénique et pilier de lumière ou diffraction sur de très petits cristaux ?



Parasélène irisé sur le halo de 22°. Le lampadaire au sodium présente aussi une croix, il y a donc diffraction.



Seul le pilier reste visible avant la disparition de la Lune derrière la montagne.

Une question demeure : le phénomène était-il si localisé que nous serions seuls à l'avoir vu (hormis deux fumeurs, sortis pour quelques minutes et pressés de retourner à la chaleur des agapes St Sylvestrines) ? Si vous avez d'autres témoignages, nous sommes intéressés !

Une bonne résolution : le premier de l'an y est associé par tradition, j'ai donc décidé de garder toujours un appareil photo à portée de main, même dans ma cuisine. Pour le jour où, derrière ma grande casserole, je verrais apparaître, sans prévenir, la foudre en boule...

Que faire avec des élèves ?

Atmospheric Optics site incontournable

Le site www.atoptics.co.uk est de loin le plus riche et le plus intéressant, il présente de fantastiques photos et d'excellentes explications (en anglais).

Pour illustrer le minimum de déviation : dans le **Menu** choisir *What's New* puis clic sur la photo *Antarctic Lunar Halo & Snow*, et un peu plus bas dans le texte, clic sur *animation*. La page s'appelle 22° Halo Formation mais vous pourrez vérifier que l'angle est bien 21,7° (en agissant avec la souris sur le curseur à droite) !

Pour illustrer l'influence de l'altitude du Soleil : dans le **Menu** choisir *Ice Halos* puis *Frequent Halos*. Choisissez *Tangent Arcs*. L'animation par HaloSim est sur *Solar Altitude*. Vous trouverez de la même manière une autre animation pour *Circumscribed*. Très pédagogique !

Terminez en apothéose avec *Other Words* et allez voir comment ça se passe sur Mars, Jupiter et Saturne !

Un logiciel de simulation

Le logiciel **HaloSim 3** peut être téléchargé gratuitement : il permet de simuler toutes sortes de halos en choisissant une multitude de paramètres (hauteur du Soleil ou de la Lune, forme, taille et altitude des cristaux de glace...) Mais il n'est pas facile à utiliser, alors vous pouvez faire comme moi et vous contenter d'utiliser les animations toutes faites proposées sur le site !

BIBLIOGRAPHIE

ACADÉMIE DES SCIENCES (Paris), 1693. *Mémoires de mathématique et de physique tirés des registres de l'Académie Royale des Sciences* p.147-148.

HENRY Michel, Octobre 2001. Les halos. In : Phénomènes naturels. *Revue du Palais de la découverte*. N° 291, p.26-36.

JAMET Didier et LAVEDER Laurent, 2008. *Le ciel, un jardin vu de la Terre*. Paris : Belin.

LYNCH David et LIVINGSTON William, 2002. *Aurores mirages éclipses... Comprendre les phénomènes optiques de la nature*. Paris : Dunod.

SOUBIRAN Jean, 2003. La Météorologie à Rome. In : CUSSET Christophe, *La météorologie dans l'antiquité : entre science et croyance : actes du colloque international interdisciplinaire de Toulouse, 2-3-4 mai 2002*. Publications de l'Université de Saint-Étienne, p. 60-61.

SUAGHER Françoise et PARISOT Jean-Paul, 1995. *Jeux de lumière*. Besançon : Editions Cêtre.

VALEUR Bernard, 2005. *Lumière et luminescence*. Paris : Belin.

REPORTAGE

Visite au VLT 10 janvier 2015

Christian Larcher

Le VLT, c'est loin ; et quand on est près c'est encore loin !

De la ville la plus proche, Antofagasta, il faut encore parcourir environ 120 km.

Antofagasta, ville calée entre l'océan Pacifique et la montagne désertique, s'étale sur 50 km environ mais pas plus de 2 km de large. Pas grand-chose à voir sinon un musée intéressant sur la région, un monument aux rois catholiques sur la « grande » place, qui étonne, et un musée des chemins de fer à ne pas manquer.

On y voit les wagons et autre matériel du temps où on pouvait rejoindre la Bolivie par rail, si vous avez la chance de rencontrer une personne passionnée qui prenne le temps de vous faire découvrir tous ces trésors...

La voiture louée à l'aéroport va nous permettre de rejoindre Paranal.

Après avoir traversé toute la ville et bifurquée vers la vallée qui s'ouvre dans la montagne, nous voici sur une autoroute direction sud sud-est ; tout va bien jusqu'au premier échangeur... où évidemment Paranal n'est pas indiqué ! On opte au jugé avant de faire confirmer notre choix par la première personne rencontrée. On contourne une ville industrielle bien noire puis c'est tout droit... jusqu'à la route indiquée Paranal, dans 100 km.



La route est bonne, dans un paysage de collines totalement dénudées. Sur le bord de la route de nombreuses chapelles votives miniatures avec fleurs en papier et petits drapeaux, où les routiers confient leur vie à leurs saints protecteurs.

On trouve aussi des cairns et des roches peintes selon leur forme, en dé par exemple, ou en tranche de pastèque !



Chapelle votive.

Roche peinte.

L'embranchement vers Paranal est bien indiqué et on arrive au portail indicateur puis au parking devant l'office de contrôle des entrées. Une maquette de miroir grandeur réelle (8,20 m de diamètre) donne le ton et on voit maintenant les télescopes au sommet de la montagne, un peu plus loin.



Entrée du site.

Maquette du miroir à l'échelle 1.



Après avoir montré nos passeports et nos bulletins d'entrée, fiche obtenue sur le site de l'ESO et remplie à l'avance, nous attendons les autres visiteurs de ce jour, samedi 10 janvier 2015.



Maquette d'ensemble du VLT.

On papote un peu avec le gardien, on visite son petit « jardin » où il essaye de faire pousser quelques plantes type cactus, et où trône un nain de jardin entre des spécimens de divers de roches.

Ici pas d'eau, pas du tout. Toute l'eau utilisée sur le site arrive trois fois par jour en camions citernes à raison de 60 000 L par jour... !

À 14 h, nous formons deux groupes de vingt personnes environ, un en anglais et un en espagnol et la visite commence par un diaporama historique et quelques maquettes des sites de l'ESO mais aussi d'ALMA situé à 5 000 m d'altitude, 300 km au nord-est dans les Andes, et du futur site E-ELT.



Les grandes tours.

Les visiteurs sont de différentes nationalités, chiliens, brésiliens, allemands, français... Puis nous formons une ribambelle de voitures « guidée » par une voiture locale jusqu'au sommet ; guidée est un bien grand mot, car on ne peut vraiment pas aller ailleurs...

Eh bien voilà, nous y sommes : 4 grandes tours cylindriques blanches se dressent vers le ciel, sur le mont Paranal à 2 635 m d'altitude, entourées par des petits télescopes mobiles qui font penser à de petits robots.



« Petit robots ».

Chaque grand télescope porte un nom particulier en langue mapuche locale.

UT1 : Antu (le Soleil)

UT2 : Kueyen (la Lune)

UT3 : Melipal (la Croix du Sud)

UT4 : Yepun (Vénus)

Premières explications dehors, sur ce que contiennent ces grandes tours fixes et les petits « robots » qui sont des télescopes auxiliaires (TA) mobiles de 1,8 m de diamètre.

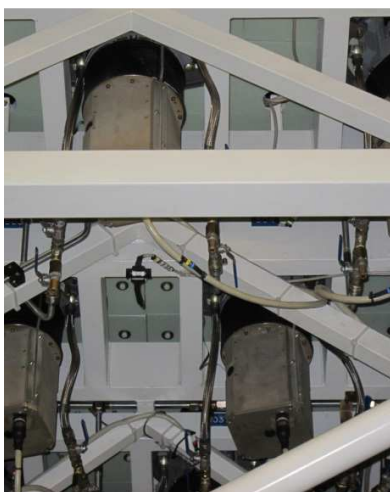
Puis nous entrons dans l'une des grandes tours (20 m de haut) et on nous désigne le miroir principal de 8,20 m de diamètre et 17,6 cm d'épaisseur, dont la masse est de 23 tonnes. Ces miroirs furent fabriqués en verre céramique Zérodur par la société Schott en Allemagne et polis en France par la société REOSC ; leur refroidissement a duré neuf mois.

Comme ces miroirs sont d'une grande finesse par rapport à leur poids, ils se déforment légèrement sous l'effet de la pesanteur ce qui provoque une dégradation des images astronomiques. Cette distorsion est compensée par l'action de 150 vérins hydrauliques, placés sous le miroir principal, à 60 cm les uns des autres.

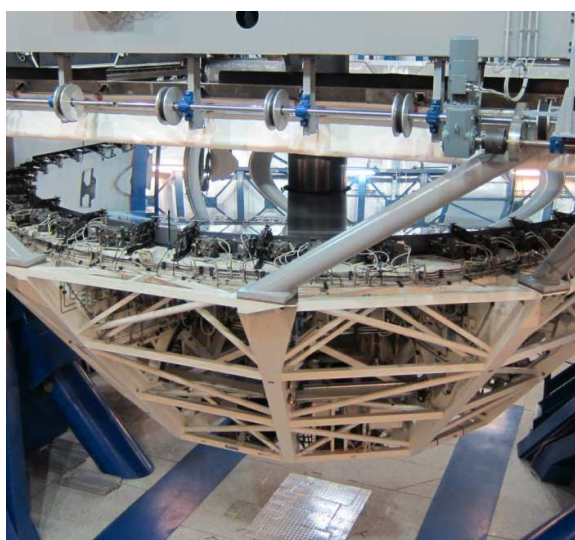
Cette méthode, appelée optique active, permet de peaufiner (toutes les minutes) la forme parabolique idéale du miroir.

Le miroir primaire envoie la lumière sur un miroir secondaire (1,20 m) chargé de « purifier » le signal

en compensant les effets dus à la turbulence de l'air (optique adaptative), qui est ensuite transmis pour analyse.



Ici, trois des vérins.



Miroir primaire (8,2 m de diamètre).

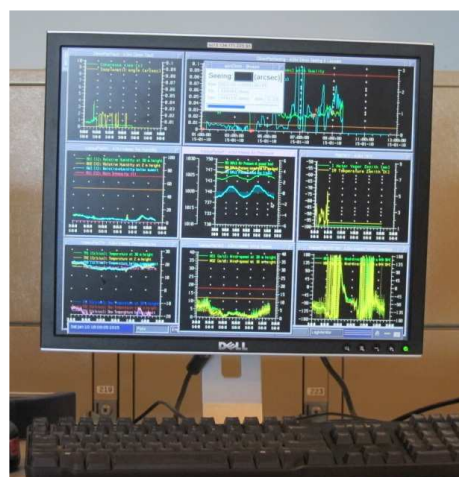


Miroir secondaire (1,20m de diamètre), dans le cercle.

Dans chaque tour un système de climatisation permet de maintenir une température approximativement constante entre le jour et la nuit. La surveillance permanente de chaque télescope nécessite la vérification d'un millier de paramètres.

Tous les 18 mois, il est nécessaire de nettoyer et de ré-aluminer les miroirs. La couche d'aluminium sur chaque miroir est de 80 nm d'épaisseur et pèse 12 g. Dans les tours, seuls travaillent quelques techniciens de maintenance. Les données recueillies sont envoyées dans les locaux de traitement, hors des tours.

Dans les salles de travail, les écrans affichent de nombreux paramètres (dont la température, l'hygrométrie, la composition de l'air...) qui sont recueillis en continu et permettent de piloter les corrections.



Relevés des paramètres.

Les chercheurs sont peu nombreux dans ces salles... ils travaillent la nuit !

Les projets validés sont traités soit en présentiel par les chercheurs qui les ont déposés, soit en sous-traitance, les données recueillies par d'autres leur sont envoyées pour analyse.

Certains viennent en séjour de trois semaines maximum, d'autres sont basés à Santiago et viennent régulièrement en avion, atterrissant à l'entrée du site sur un petit aéroport.

Les logements sont dissimulés dans le paysage, ouvert vers le désert. Environ 110 chambres.



Les chambres.

Un effort a été fait pour ne pas faire perdre le goût de l'eau aux résidents : une piscine, entourée d'un « jardin tropical » sous une énorme calotte de verre. Les plantes pourtant arrosées au « goutte à goutte » présentent quand même des traces de dessèchement !



L'espace de détente.

Cette calotte en verre est obturée par un grand rideau la nuit pour ne pas gêner les observations en cours. D'ailleurs sur la route, plusieurs panneaux invitent fermement à n'utiliser que les feux de stationnement en cas de sortie nocturne.

Une rencontre avec Julien Girard a permis d'en savoir un peu plus sur le fonctionnement de la recherche dans le site et sur les travaux en cours.



De la plate-forme où se situent les télescopes de Paranal, on voit, à quelque 30 km, les travaux d'arasement du sommet d'une autre montagne dans la perspective de la construction du nouvel observatoire international, avec un télescope équipé d'un miroir de près de 40 m de diamètre qui arrivera en kit à assembler...



Ouverture prévue en 2024, en temps sidéral ou en temps universel ... ■

L'Assemblée générale du CLEA

aura lieu dimanche 31 janvier 2016 de 9 h 00 à 12 h 30

à la FIAP Jean Monnet, 30 rue Cabanis, 75007 Paris

de 14 h 00-16 h 00 : conférence de Sonia Fornassier, Université Paris Diderot

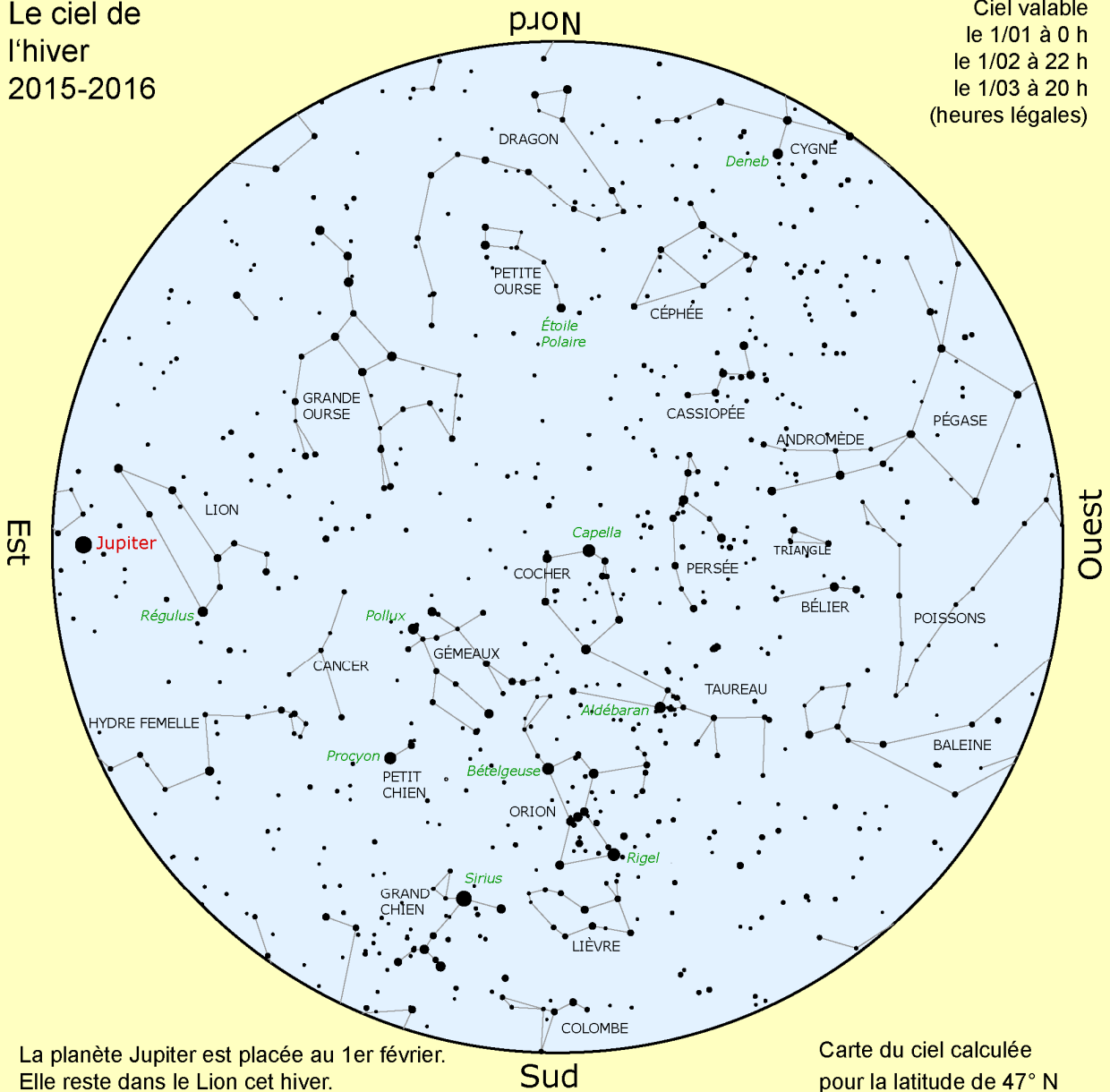
"Les résultats de la mission Rosetta",

La réunion pour les membres du conseil d'administration du CLEA aura lieu samedi 30 janvier de 14 h 00 à 17 h 00 à l'Université Paris-Diderot Bâtiment Condorcet

LE CIEL DE L'HIVER 2015-2016

Le ciel de
l'hiver
2015-2016

Ciel valable
le 1/01 à 0 h
le 1/02 à 22 h
le 1/03 à 20 h
(heures légales)



La planète Jupiter est placée au 1er février.
Elle reste dans le Lion cet hiver.

Carte du ciel calculée
pour la latitude de 47° N

Visibilité des planètes

Mercury peut être aperçue (difficilement) le soir fin décembre ou le matin début février.

Venus est toujours visible le matin à l'est. On pourra la voir très proche de Saturne le 9/01 (0,1° !) et à proximité de Mercury mi-février (4°).

Mars est aussi planète du matin et sa luminosité continue d'augmenter à l'approche de son opposition du mois de mai.

Jupiter se lève de plus en plus tôt. N'oubliez pas de l'observer en mars dans le Lion (opposition le 8). Une paire de jumelles suffit pour apercevoir ses satellites.

Saturne est visible en deuxième partie de nuit.

Quelques événements (heures légales)

22/12 : solstice d'hiver à 5 h 48 min.

23/12 : occultation d'Aldébaran par la Lune presque pleine à partir de 19 h. Sortie peu après 20 h.

02/01 : la Terre au plus près du Soleil (périhélie).

04/01 : essaim des Quadrantides (étoiles filantes).

08/02 : nouvelle Lune et nouvel an chinois.

08/03 : opposition de Jupiter.

09/03 : éclipse de Soleil invisible en Europe.

20/03 : équinoxe de printemps à 5 h 30

Lune

Nouvelle Lune : les 10/01, 8/02, 9/03.

Pleine Lune : les 24/01, 22/02, 23/03.

En particul...ier

Daniel Paupart

À la fin du mois de mai dernier, quelques jours avant la date-limite, et sans trop y croire, j'ai constitué, à la hâte, un dossier de candidature au stage de formation organisé au CERN, pour la septième année consécutive, et à destination des profs de physique en exercice, sur la physique des particules. Sans trop y croire, en effet : je suis à la retraite, et ce n'est même pas une retraite de prof de physique ! Le 05 juillet, je recevais, à ma grande surprise, un courriel m'informant que j'étais retenu pour ledit stage (à mes frais, rassurez-vous), et je me demande si mon appartenance au CLEA (visible dès le récapitulatif des participants) n'a pas un peu joué en ma faveur... Bref. Courriel dans lequel était précisé (je résume) : *Ce stage, organisé avec l'IN2P3, est l'une des actions du plan d'équipement « Cosmos à l'École », opération de formation des enseignants, accompagnée du prêt d'un détecteur de muons cosmiques (30 cosmodétecteurs actuellement dans 20 établissements, et une quinzaine à venir en 2017).*

Quant à l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, l'un des instituts du CNRS), il a pour mission de fédérer les activités de recherche dans le domaine de la Physique Nucléaire, de la Physique des Particules et des Astroparticules, recherches qui ont pour but d'explorer la Physique des Particules Élémentaires (...) et les connexions entre l'infiniment petit et l'infiniment grand. L'IN2P3 est porteur d'un programme éducatif intitulé « L'École des 2 Infinis », développé pour favoriser la rencontre entre le monde de la Recherche, les jeunes et leurs enseignants.

Le stage, donc, coordonné et rondement mené par Nicolas Arnaud (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire – Orsay), du 18 au 23 octobre, est un « assortiment » de cours théoriques, de conférences thématiques, d'activités plus « pédagogiques » et de visites des installations sur place autour du LHC (Large Hadron Collider). Je ne vais pas tout vous raconter – c'était un programme très chargé – mais, outre la visite commentée de la galerie des particules (Hélène Schune/LAL), avec l'inévitable portrait du célèbre boson de Higgs (David Rousseau/LAL), je retiendrai, pour ce qui nous intéresse, nous, de plus près, l'Introduction à la Cosmologie et la présentation de l'expérience LSST (Large Synoptic Survey Telescope), par Jean-Stéphane Ricol (CNRS),

la Présentation de l'expérience AMS (Alpha Magnetic Spectrometer), par Vincent Poireau (LAPP), et la visite de la salle de contrôle associée, puis les deux conférences sur *Les neutrinos* (Fabrice Piquemal/IN2P3 Gradignan) et *Les rayons cosmiques* (Corinne Berat/LPSC).

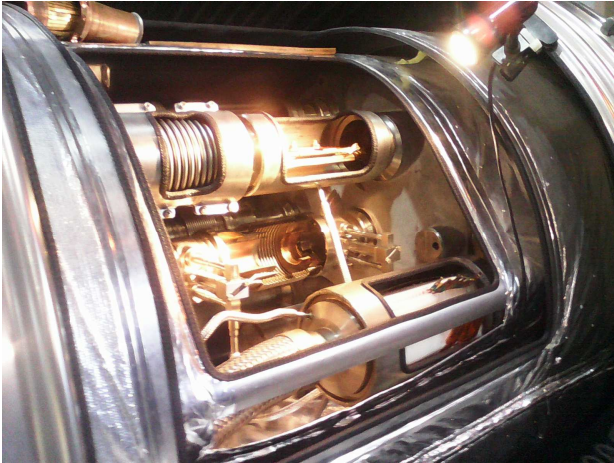
Nous avons vu fonctionner le fameux « cosmodétecteur » (J-Christophe Pelhate) : 3 plaques réceptrices superposées et orientables, avec leur informatique associée... Aux profs d'en explorer les possibilités selon le niveau de leurs classes, et d'en extraire « la substantifique moelle ». Peut-être ai-je été inattentif (on allait sur 23 h), mais tout ça m'a paru un peu « abstrait ». Plus modeste et plus accessible, la mallette « Cosmix » (hélas épuisée) que nous a présentée Morgan Piezel, mais tout aussi profitablement « exploitable », et plus « parlante » la confection d'une « chambre à brouillard » au S'Cool-Lab du CERN, qui m'a semblé être un utile préalable à l'utilisation future du Cosmodétecteur : même si l'expérience relève un peu de la « science-spectacle », elle n'en est pas moins prenante et démonstrative.

Au programme, aussi, la visite de nombreuses installations sur les différents sites du CERN, le synchrocyclotron, le centre de calcul, la salle de contrôle général du LHC, le LEIR (Low Energy Iron Ring), le décélérateur d'antiprotons (AD), la caverne « de service » de l'expérience CMS (Compact Muon Solénoïd) à – 85 m sous terre.



La salle de contrôle général.

Nous étions accompagnés par des « guides » fort compétents (souvent bénévoles) et précieux dans leurs explications plus « terre à terre », si on peut dire, qui nous ont bien fait toucher du doigt les défis relevés, les prouesses technologiques réalisées pour que tourne enfin le LHC, et l'importance des enjeux en cours, à tel point que le CERN est quotidiennement la cible d'attaques informatiques, malgré la mise à disposition, en libre accès, de la plupart des données et des résultats des différentes expériences.



Vue en coupe du "tube" où circulent les faisceaux de protons.

Cependant, je suis un peu déçu que nous n'ayons pu accéder à la caverne du détecteur lui-même, qui ne se visite pas quand le LHC est en marche puisqu'il a redémarré en septembre dernier, après deux ans d'arrêt.

Comme pas mal de stagiaires, m'ayant identifié comme étant « celui du CLEA », avaient sollicité auprès de moi de plus amples renseignements, Nicolas Arnaud m'a accordé, sur son temps de parole, l'avant-dernier jour, un petit quart d'heure pour présenter le CLEA, ce dont je l'ai chaleureusement remercié au nom de notre association. Et donc, dans la salle super-équipée du grand amphithéâtre du CERN (celui où a été annoncée la découverte du célèbre boson), nous avons choisi de projeter la vidéo faite à l'École d'été, qui remplace avantageusement n'importe quel discours, avant d'explorer, sur grand écran, le(s) site(s) Internet, d'en faire découvrir la richesse documentaire (celle accessible à tous et ciblée par niveau), de leur présenter la revue (j'avais emporté quelques numéros

papier) et la manière de retrouver un article dans les archives en libre accès (celui sur la désintégration du muon, que j'ai pris pour exemple).

Quelques enseignants connaissaient déjà le CLEA, sans forcément en être des « adeptes », une autre, au moins, avait déjà participé à une école d'été, et une dernière, enfin, enseignante à Cahors, connaissait - devinez-qui ? - notre ami Jean Ripert. J'en ai aussi profité pour faire la distribution du dépliant du CLEA, puisque j'avais prévu, non pas qu'on nous accorde une aussi large fenêtre, mais d'avoir au moins un instant pour diffuser notre petite brochure avant de partir.

Je crains, cependant - à moins que je n'aie pas tout compris - que l'étroite liaison entre *l'infiniment grand et l'infiniment petit*, dont on voulait nous faire la « démonstration », n'ait pas été suffisamment mise en lumière par la simple juxtaposition de cours et de conférences sur l'un et l'autre des sujets. Peut-être eût-il fallu un dernier cours, une dernière conférence, un dernier galop, pour les résumer tous et nous présenter une vision plus « synthétique » et plus probante de cette collusion (collision !) des extrêmes dans les profondeurs de l'espace ou de l'accélérateur...

D'autre part, dans le dossier de candidature, figurait un « engagement », que nous avons signé, et qui nous demandait, à la suite du stage, de nous engager dans des projets en rapport avec les contenus de ce dernier, de continuer, par notre action personnelle, à diffuser tout ou partie des savoirs acquis à cette occasion, et à faire connaître les institutions dispensatrices de notre formation. Je comptais donc sur le stage PAF, organisé, depuis quelques années, dans l'Académie de Bordeaux - et qui n'existerait pas sans la participation bénévole de plusieurs membres « actifs » du CLEA - pour animer un atelier sur ce thème de l'infiniment grand / petit. Hélas, certains grincements organisationnels m'ont écarté du terrain, et l'occasion de tenir cet engagement sera reportée à une autre fois...

Pour terminer, un film, sans doute un peu trop « scénarisé », mais que je vous conseille quand même, si vous ne l'avez déjà vu, « La fièvre des particules », de Mark Levinson (2014), fièvre que ce stage, complet et *infiniment* passionnant, a su nous faire partager. ■

Solutions des mots croisés de la page 14

Horizontalement

1. Copernicien ; 2. Huit. EM (état-major). Op (Opus 8 pour les 4 saisons de Vivaldi) ; 3. At. Harmonie ; 4. Orbe. Fou. CX (pour 110) ; 5. Terre. Libye ; 6. Isa. Die. ICG (lettres de ces noms) ; 7. Hyperbole ; 8. Usée. Unes (des journaux) ; 9. Eu. Nuage. SE ;

Verticalement

1. Chaotique ; 2. Outres. Su ; 3. Pi. Brahe ; 4. Éther. Yen ; 5. EDP ; 6. Nerf. Iéna ; 7. Immoler ; 8. Oui. Bue ; 9. Ion. Bion (Nicolas Bion, ingénieur du roi, auteur d'un traité de la construction et des usages des instruments de mathématique en 1709) ; 10. Épicycles. ; 11. Exégèse.

Ecole d'Eté d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

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

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



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

Renseignements et vidéo sur :
acces.ens-lyon.fr/clea/aLaUne/EEA-clea

Les productions du CLEA

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

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

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, 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 Ecoles d'Eté d'Astronomie).

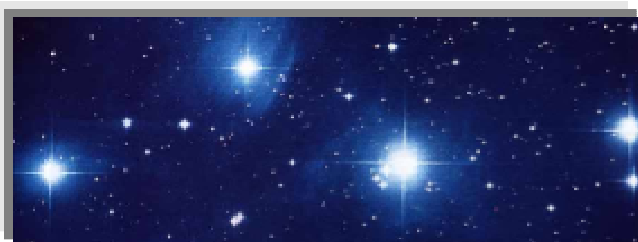
Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site internet

Une information toujours actualisée

www.clea-astro.eu



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 141 - Mars 2013 7 €



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
case courrier 7078
Université Paris Diderot
5, rue Thomas Mann
75205 PARIS Cedex

École d'Eté d'Astronomie :

daniele.imbault@cea.fr

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

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

Site internet :

berthomi@ac-nice.fr
charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr

Adhésion / Abonnement :

| | |
|--|-------------|
| Adhésion CLEA pour 2015 : | 10 € |
| Abonnement CC pour 2015 : | 25 € |
| Adhésion + abonnement CC : | 35 € |
| Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique : | 40 € |

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

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

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368
Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 152 décembre 2015