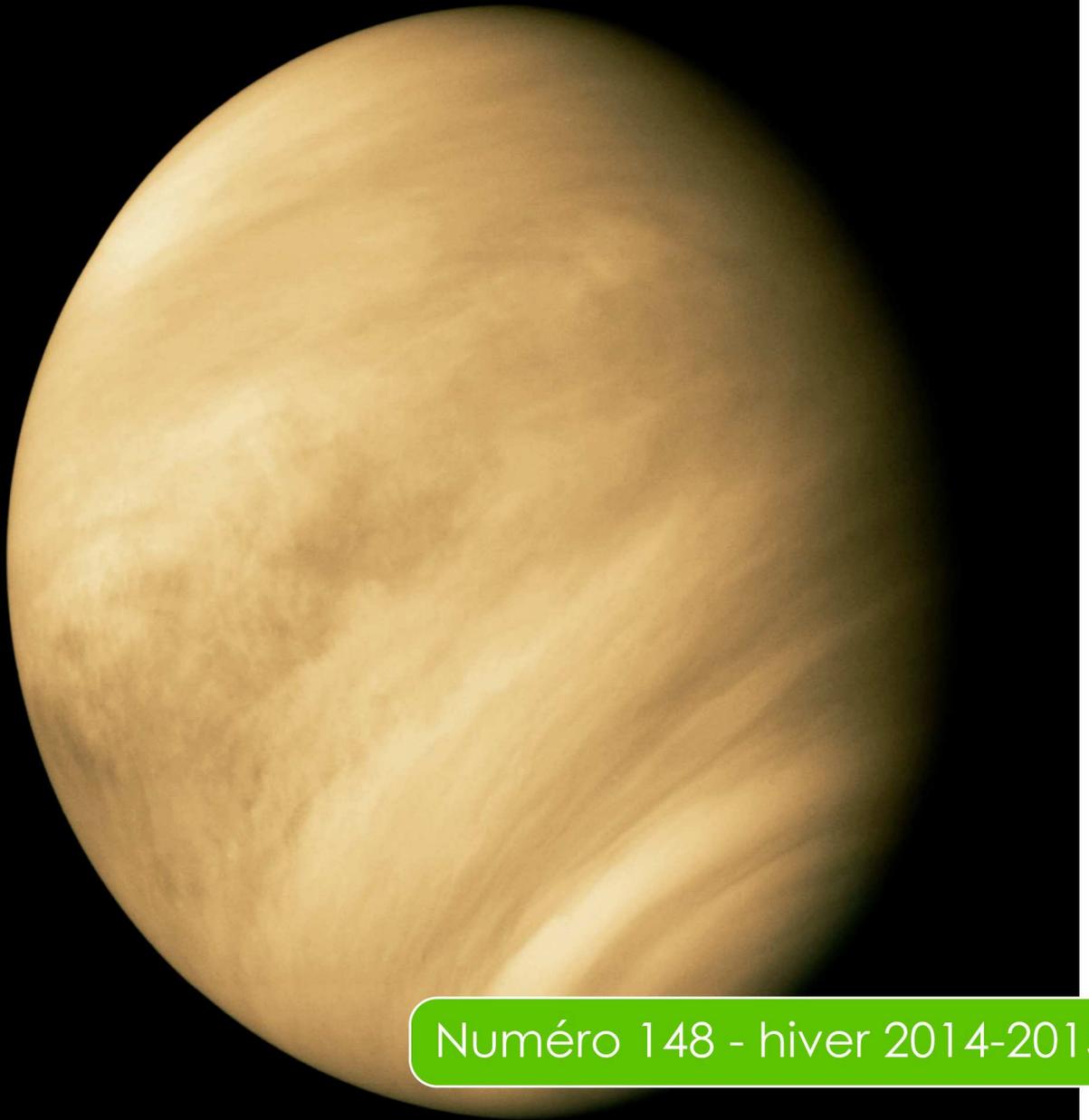


LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 148 - Décembre 2014 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 148 - hiver 2014-2015



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

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

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

Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2014

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

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

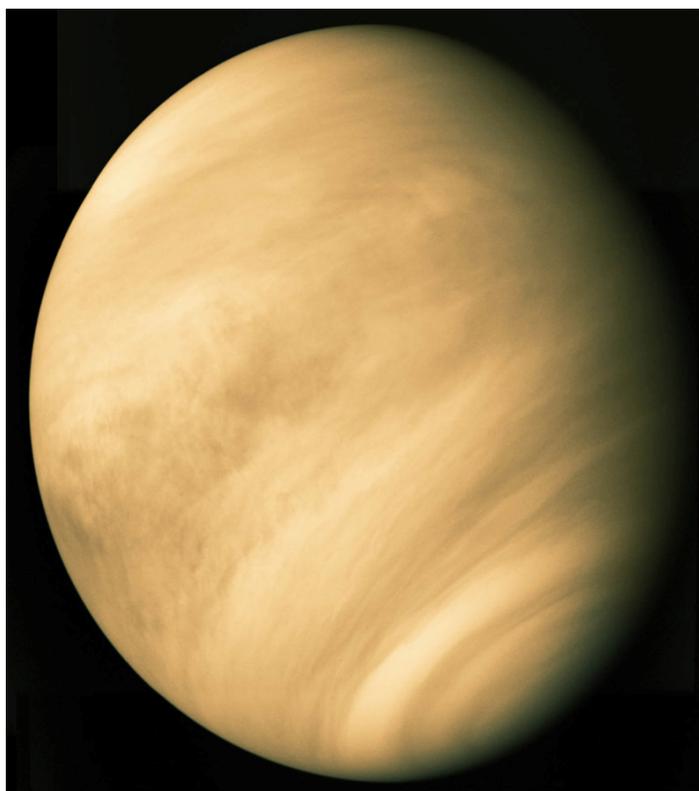
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret

Communication : Charles-Henri Eyraud

École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault

Responsables du site :

Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



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

Mathieu Barthélémy, David Bernard, Pierre Brossard, Pierre Causeret, Jean-Pierre Devalance, Charles-Henri Eyraud, Jean-Luc Fouquet, Maryse Fouquet, Olivier Gayraud, Danièle Imbault, Christian Larcher, Yves Lhoumeau, Jean Liliensten, Georges Paturel, Christophe Pellier, Gilles Rémy, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Sylvie Thiault.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 148, afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Image de couverture :

Cette image de Vénus est une mosaïque de trois images réalisées par la sonde Mariner 10 le 5 février 1974. On voit ici la couche supérieure de l'atmosphère. Le relief de Vénus n'est connu que depuis la sonde Magellan qui a cartographié la surface par radar (image Calvin J. Hamilton).

Les Cahiers Clairaut

Hiver n° 148

Éditorial

La fin de l'année 2014 approche, puis viendra la suivante. Mais est-ce nous qui l'attendons, passivement, ou au contraire allons-nous vers elle ? En pratique on utilise indifféremment l'un ou l'autre des deux points de vue.

Les anciens Polynésiens possédaient une science de la navigation sans instrument très efficace (p. 32). Elle reposait sur une connaissance précise du mouvement apparent des astres. Pour parler du vent ils donnaient la direction vers laquelle il va, alors que la convention habituelle indique d'où il vient. Un vent d'est pour nous est un vent qui provient de l'est, pour eux il s'agissait d'un vent d'ouest, (qui va vers l'ouest) (p. 33) autrement dit qui emmène le bateau vers l'ouest.

Les vents existent parce que la Terre est entourée d'une atmosphère. Cette atmosphère a une histoire scientifique que vous découvrirez (p. 4) ; elle nous parle d'un monde étonnant, bien différent de celui d'aujourd'hui.

L'aspect des étoiles dans le ciel semble immuable au profane qui lève les yeux la nuit. Pourtant, certains amateurs arrivent à mettre en évidence le mouvement propre de certaines étoiles. (p. 2).

Je n'ai pas parlé du thème de ce numéro, mais la couverture est explicite. En vous aidant de la phrase : « *Monsieur vous tirez mal ! Je suis un novice, pardon* » (p.35) vous situerez la planète et chercherez l'intrus. Vous découvrirez des particularités de cette planète, jumelle de la Terre : période de rotation plus grande que période de révolution, dynamique de l'atmosphère indépendante de celle de la planète elle-même, et quelques autres spécificités.

Bonne année terrestre 2015.

Christian Larcher, pour l'équipe.



Assemblée générale
Dimanche 15 mars 2015
à Lyon

Astronomie amateur

Même les étoiles se déplacent

Yves Lhoumeau

p 2

Article de fond

Histoire de l'atmosphère de la Terre

D. Bernard, M. Barthélemy, J. Liliensten

p 4

Thème : VÉNUS

Notions de base

Pierre Causeret

p 10

Article de fond

Vénus, la planète oubliée ?

Pierre Drossard

p 13

Avec nos élèves

Modélisation des phases de Vénus

Sylvie Thiault

p 17

Jeux

Mots croisés

p 20

Avec nos élèves

Une activité autour des phases de Vénus

Olivier Gayraud

p 21

Observation

La planète Vénus observée par les amateurs

Christophe Pellier

p 22

Histoire

Vénus dans l'antiquité

Jean-Luc et Maryse Fouquet

p 25

Le coin des petits curieux

Vénus dévoilée

Jean Ripert

p 27

Ciel de l'hiver

Pierre Causeret

p 29

Événements astronomiques

Éclipse de Soleil, satellites de Jupiter

Pierre Causeret

p 30

Avec nos élèves

Navigation ancienne chez les Polynésiens

Jean-Pierre Devalance

p 32

Lecture pour la Marquise

L'esprit et la matière d'Erwin Schrodinger, l'Élision de M. Bitbol

Qu'est ce que la matière, de Fr Balibar, JM Levy-Leblond, R. Lehoucq

Christian Larcher

p 36

Solution activités phase de Vénus

p 38

Courrier des lecteurs

Georges Paturel

p 39

Vie de l'association

EAA 2015, HS 11 les constellations, solution des mots croisés

p 40

ASTRONOMIE AMATEUR

Même les étoiles se déplacent

Yves Lhoumeau, astronome amateur (Ain)

Yves Lhoumeau nous propose ici une manip originale, faite il est vrai avec du matériel perfectionné. Mais l'idée pourrait être reprise, pourquoi pas en TPE ou TIPE.

L'observation attentive d'images astronomiques permet parfois quelques mesures intéressantes. Tout est parti d'une « chasse à la comète » un certain 3 mai 2014. Il y a plus de 30 ans, lorsque je découvrais l'astronomie tout gamin, il fallait se procurer les éléments orbitaux de la comète, puis en calculer les éphémérides, reporter la position supposée sur une carte de champ, faire la photo, etc. et sans grande expérience viser à côté ! Aujourd'hui avec l'assistance des montures GoTo et de l'Internet à proximité, en quelques clics il est facile de télécharger la base de données des comètes et de viser juste, sans même avoir préparé son observation.

Me voici donc en train d'imager 134P/ Kowal-Vavrova, comète périodique (15,6 ans) découverte en septembre 1983 avec le Schmidt de 1,2 m du mont Palomar. Le matériel utilisé pour la prise de vue est bien plus modeste, un Celestron 8 (0,2 m) sur monture GoTo avec un système HyperStar¹, et au foyer une caméra CCD Atik noir et blanc. Il s'agit en quelque sorte d'un « petit » Schmidt CCD, car le miroir secondaire du télescope a été retiré pour y placer le correcteur de champ et la caméra directement au foyer du miroir primaire. Ce montage permet d'obtenir facilement un « aspirateur à photons » : un télescope de 200 mm de diamètre, à $F/D = 2$.



Fig.1. Le matériel d'observation.

En composant 46 images de 20 s, ce qui représente à peine plus d'un quart d'heure de pose, la comète sera facilement débusquée. Vient alors une autre idée : comparer et analyser le cliché avec le logiciel Aladin sky atlas (<http://aladin.u-strasbg.fr/>)².

Ayant pris soin d'orienter la caméra selon les axes ascension droite / déclinaison, et connaissant approximativement le champ couvert par l'instrument, il fut aisé d'extraire une image de référence de la base DSSII (digital sky survey II), depuis Garching en Allemagne et de l'afficher à côté de mon image.

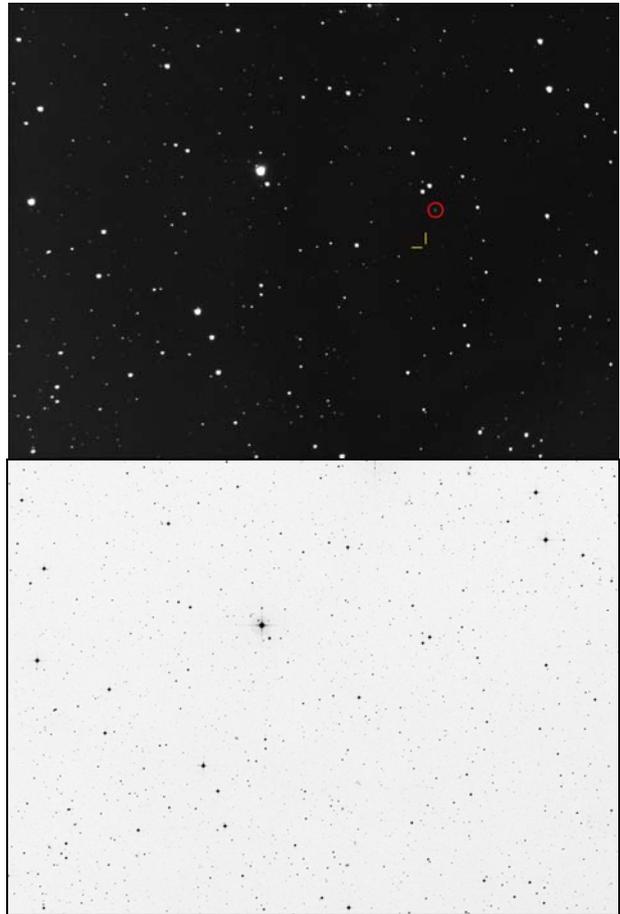


Fig.2. Image originale en haut et image de référence en bas. La comète est cerclée de rouge.

¹ Correcteur optique qui se substitue au miroir secondaire d'un télescope type Schmidt-Cassegrain et permet de faire de l'imagerie CCD à très grande ouverture.

² Aladin est un atlas interactif du ciel permettant de visualiser des images astronomiques numérisées.

Le logiciel Aladin est une merveille qui révèle alors toute sa puissance : en quelques clics de souris il est possible de retourner, inverser mon image pour qu'elle ressemble à celle de l'atlas de référence. En choisissant seulement 2 étoiles reconnues identiques sur les 2 photos comparées, l'image devient alors calibrée astrométriquement et il devient possible de faire des mesures en plus de l'identification des objets présents sur la photo. L'option skybot permet notamment d'indiquer tous les astéroïdes connus d'après les calculs réalisés en direct par un ordinateur de l'IMCCE (institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) à Paris. C'est ainsi que j'ai pu repérer 3126-Davidov (mag 16,8) et 23197 Danielcock (mag 17,1).

Mais le plus étonnant reste à venir...

J'ai repéré sur l'écran une étoile faible (à l'extrémité des traits jaunes de la figure 2 du haut) qui n'est pas située au même endroit sur le cliché de référence, l'étoile est légèrement décalée. Pourtant tout autour les autres étoiles correspondent bien au demi pixel près. Pas de doute il y a mouvement.

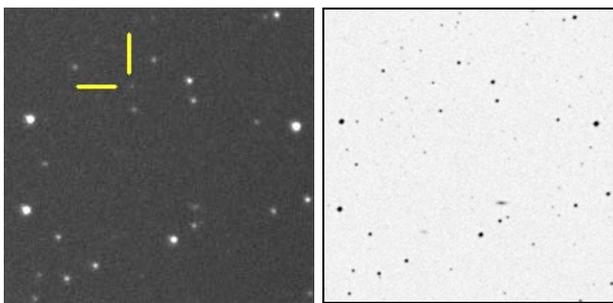


Fig.3. Entre l'image de référence à droite et l'image récente à gauche prise 22 ans plus tard, une étoile a bougé...

Son déplacement « rapide » est symbolisé par une flèche sur la figure 4.

De plus cet astre est référencé dans un catalogue d'étoiles à mouvement rapide, LHS, acronyme de Luyten Half-Second. Cette longue liste de plus de 4 000 entrées, est l'œuvre originale de Willem Jacob Luyten, astronome néerlandais-américain, né le 7 mars 1899 à Semarang en Indonésie et mort le 21 novembre 1994 à Minneapolis. Il travailla à l'observatoire Lick et au Harvard College Observatory, étudia les mouvements propres des étoiles et découvrit beaucoup de naines blanches.

Les mesures du catalogue original ont été affinées et révisées, notamment grâce aux données plus précises des satellites Tycho et Hipparcos. Le cadre étant établi, voici le nom de la petite étoile : LHS 2825. Le catalogue en ligne Simbad montre que la belle a plutôt la « bougeotte » même si les chiffres bruts ne m'inspirent pas grand chose³ ! Il reste alors

³ Voir simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=LHS++2825.

à mesurer le déplacement : l'outil règle permet rapidement de trouver 12,89". La bonne nouvelle est que les deux clichés sont datés. L'image de référence, extraite du ESO_POSS2KSTU_red, date du 30 mai 1992, soit ramené à l'année : 1992,4. L'image récente faite par mon télescope date du 3 mai 2014 soit ramené à l'année : 2014,33. Cela tombe bien, les photos ont été prises à la même période, ce qui permet de négliger l'effet de parallaxe dû à la révolution de la Terre autour du Soleil. De toute façon, vu l'échantillonnage de mon image (autour de 2") la mise en évidence d'un tel phénomène ne serait pas possible, car bien plus faible.

On en déduit le déplacement mesuré d'après Aladin sky : 12,89" en 21,93 ans, soit un mouvement moyen de 0,5877" par an. Cette mesure semble conforme avec celle donnée dans le catalogue en ligne Vizier (mesure de Tycho2) 0,62" par an, mais également avec la mesure originale du catalogue LHS qui donne 0,543" par an.

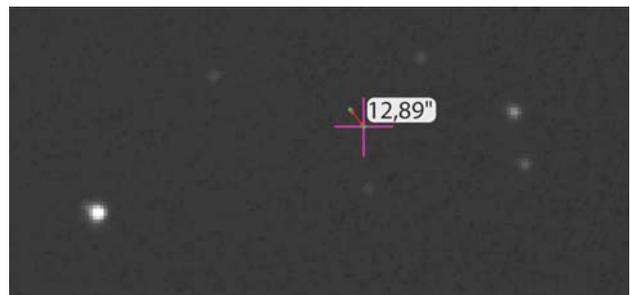


Fig.4. Déplacement de l'étoile LHS2825.

Le plus étonnant est la précision de l'évaluation : l'écart de temps permet de mettre en évidence et de mesurer un déplacement annuel bien plus faible que la résolution de l'image elle-même. Bien sûr, il faudrait affiner les mesures, en réalisant plusieurs clichés, plusieurs relevés, et relever la marge d'erreur. Mais cela dépasse le cadre de cet article.

Avec une simple image, le logiciel Aladin Sky et un accès Internet aux bases de données astronomiques, il est possible de passer plusieurs heures fort intéressantes, à la découverte des mesures, catalogues et méthodes de l'astronomie.

J'oubliai : sans l'apport de ces techniques modernes (et confortables), jamais je n'aurai eu l'idée d'aller traquer le déplacement d'une petite étoile de magnitude 13,5, invisible à l'oculaire...

Nom	Const.	Mag	Mvt propre
Étoile de Barnard	Oph	9,6	10"/an
Étoile de Kapteyn	Pic	8,8	8,7"/an
Groombridge 1830	UMa	6,4	7,1"/an
Gliese 1	Scl	8,5	6,1"/an
61 Cygni	Cyg	5,2-6	5,2"/an

Fig.5. Quelques cibles possibles à fort mouvement propre. ■

ARTICLE DE FOND

Histoire de l'atmosphère de la Terre

David Bernard, Mathieu Barthélemy, Jean Lilensten
(david.s.bernard@gmail.com)

Cet article a pour but de présenter dans les grandes lignes l'origine et l'évolution de l'atmosphère terrestre, depuis sa formation il y a plus de 4,5 milliards d'années jusqu'à nos jours. Nous partirons de la naissance du système solaire, puis explorerons les différentes époques géologiques, en nous concentrant sur les modifications profondes de l'atmosphère à travers son histoire.

La Terre a connu de très nombreuses évolutions au cours de ses 4,568 milliards d'années (Ga) d'histoire. Si cela est désormais un fait notoire pour sa surface (notamment grâce à la populaire théorie de la dérive des continents d'Alfred Wegener), il est en revanche beaucoup moins connu que son atmosphère a subi elle aussi de profondes modifications. Une des explications tient probablement au fait que, de part son caractère intrinsèquement fugace d'enveloppe fluide, l'atmosphère a laissé beaucoup moins de traces tangibles que la surface solide, et que par conséquent, il est beaucoup plus complexe de retracer son évolution.

C'est pourquoi, bien qu'aujourd'hui les astronomes, géologues et climatologues arrivent à reconstruire son histoire dans un tout plus ou moins cohérent, beaucoup de recherches restent encore à faire sur le sujet, et de nombreux points sont encore débattus par les spécialistes.

L'histoire de l'atmosphère terrestre telle que présentée dans cet article est donc un état des connaissances faisant actuellement consensus, et ne saurait représenter une vérité absolue. Le contenu de celui-ci s'appuie principalement sur l'ouvrage collectif « Le Soleil, la Terre... la vie » dirigé par Muriel Gargaud.

La naissance du système solaire

Avant de décrire l'évolution de l'atmosphère terrestre, il apparaît nécessaire de commencer par le commencement, à savoir la naissance du système solaire. En effet, qu'elle ait été primordiale ou secondaire (cf. infra), l'atmosphère de la Terre est nécessairement héritée de la nébuleuse dans laquelle elle est apparue. Aussi est-il logique de commencer par décrire le milieu dans lequel notre planète est née et a grandi, afin de pouvoir appréhender la composition de son atmosphère.

Le système solaire s'est formé il y a 4,568 milliards d'années¹, suite à l'effondrement d'un nuage moléculaire. Ces nuages, souvent qualifiés de « pouponnières d'étoiles », sont de gigantesques masses de gaz, très peu denses, constituées principalement d'hydrogène moléculaire H₂. Ils contiennent cependant tous les éléments nécessaires à la formation de planètes (figure 1), gazeuses et rocheuses, et notamment une faible quantité de poussières qui, étant opaques au rayonnement visible, permettent de les voir par occultation de la lumière des jeunes étoiles nées en leur sein, pour le plus grand bonheur des astronomes et astrophotographes amateurs.

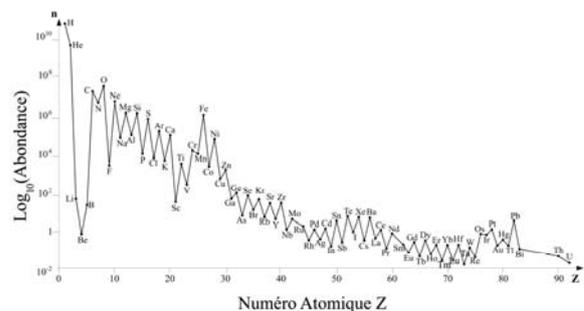


Fig.1. Abondance des éléments dans le système solaire, en parties par million relativement au silicium. Dans ce diagramme semi-logarithmique, on voit clairement que l'hydrogène et l'hélium sont les éléments les plus abondants du système solaire.

Les grandes étapes de la formation d'étoiles de type solaire ont été résumées par Shu et al. (1987), dont est extraite la figure 2 :

- un nuage moléculaire se fragmente en différents cœurs qui condensent ;

¹ Cet âge très précis est calculé par des méthodes de radiochronologie à partir d'inclusions réfractaires riches en calcium et en aluminium (CAI : Calcium Aluminium-rich Inclusions) présentes dans des chondrites carbonées tombées sur Terre. Ces chondrites étant les éléments les plus primitifs connus, leur âge sert de référence arbitraire comme temps « zéro » pour le système solaire.

- au sein de chaque cœur, une protoétoile se forme sous l'effet de la gravitation. Elle est entourée d'un disque de débris ;
- la protoétoile accrète de la matière du reste de la nébuleuse et grossit, pour former une étoile T-Tauri. Elle émet alors un fort vent stellaire, qui dissipe rapidement le reste de la nébuleuse ;
- finalement, une jeune étoile est formée, entourée d'un disque de gaz et de poussières qui donnera potentiellement des planètes (disque protoplanétaire).

La figure 1 montre les proportions relatives des éléments dans le système solaire (en parties par million, la référence étant le silicium), déduites de mesures de la photosphère solaire (le Soleil représente à lui seul 99,85 % de la masse du système solaire !). Cette courbe est représentative de la composition en éléments de la nébuleuse primitive, mais pas en abondance. En effet, lors de la phase T-Tauri et lorsque l'étoile est juste formée, le flux UV est très important, créant un gradient de température le long du rayon du disque. Par ailleurs, le vent stellaire important souffle les éléments les plus volatils vers le bord externe du disque. Enfin, une sédimentation se met en place dans l'épaisseur du disque, rassemblant les éléments les plus lourds dans le plan médian de celui-ci. Il en résulte que le disque est fortement inhomogène et que, par conséquent, la composition d'une planète va dépendre de la position à laquelle elle se forme dans le disque. Enfin, sous l'effet du fort flux UV et du vent stellaire intense, le disque protoplanétaire est très vite évaporé (sur une durée de l'ordre d'une dizaine de millions d'années) si une formation planétaire ne se met pas en place, les éléments légers partant les premiers. Le contenu disponible pour la formation d'une planète dépend donc aussi du temps nécessaire à sa formation.

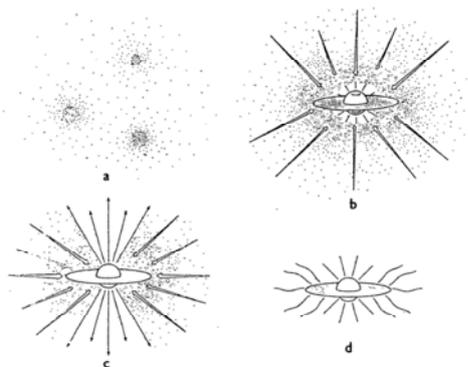


Fig.2. Les quatre grandes étapes de la formation stellaire. (a) Fragmentation et condensation du nuage moléculaire. (b) Une protoétoile entourée d'un disque de débris et formée par collapse d'un nuage. (c) Formation d'une étoile T-Tauri. (d) Étoile nouvellement formée avec son disque protoplanétaire. D'après Shu et al. (1987).

En conclusion, on retiendra que la prime naissance du système solaire a influé sur la composition des planètes à travers : i) la composition de la nébuleuse primitive dont est issu le système solaire. ii) la position à laquelle la planète s'est formée. iii) le temps nécessaire à la formation de la planète. On verra cependant que la composition de l'atmosphère peut encore dépendre de l'évolution ultérieure du système.

L'Hadéen, de -4,568 Ga à - 4,0 Ga

-4,568 Ga : disparition de l'atmosphère primitive

La référence des temps utilisée pour dater le système solaire est l'âge des plus vieilles chondrites carbonées. Or le « modèle standard » de formation planétaire prévoit que les planètes rocheuses se forment par accrétion de planétésimaux, eux-mêmes étant des agrégats de chondrites. On peut donc supposer qu'à cette date, la Terre n'était pas encore formée. Cependant, les contraintes temporelles posées précédemment sur la durée de vie des disques supposent que la formation de la Terre (i.e. la croissance de celle-ci par accrétion de matière jusqu'à son rayon actuel) a dû être rapide, probablement sur un temps inférieur à 100 millions d'années (Ma). En accréant de la matière solide, la planète a aussi accumulé une certaine quantité de gaz, constituant ainsi son atmosphère primordiale. Cette dernière devait alors avoir la composition de la nébuleuse solaire, c'est-à-dire majoritairement composée d'hydrogène et d'hélium.

Cependant, les conditions régnant alors (une température probablement très élevée, avec une surface en fusion ; l'absence probable de champ magnétique alors que le Soleil présente un flux UV et un vent solaire important) n'étant pas propices au maintien de cette atmosphère, il est communément admis que celle-ci a très rapidement été perdue, probablement même avant la fin de la phase d'accrétion (les multiples impacts reçus par le planétésimal en formation participant probablement au « soufflage » de cette atmosphère primordiale).

Atmosphère secondaire

Les planètes rocheuses comme Vénus, la Terre ou Mars ont donc perdu très rapidement leur atmosphère primordiale, n'étant pas assez massives pour les retenir. On sait cependant que ces planètes possèdent encore aujourd'hui une atmosphère (dite « atmosphère secondaire »), et même pour la Terre une hydrosphère. Pour expliquer l'origine de ces éléments légers composant les enveloppes externes,

deux scénarii concurrents (figure 3a) mais non exclusifs ont été proposés :

L'hypothèse du dégazage primordial

Elle est basée sur le fait que, aujourd'hui encore, les volcans relâchent une grande quantité d'éléments volatils dans l'atmosphère. Dans les premiers temps de l'histoire de la Terre, le flux de chaleur interne était très important, et l'activité volcanique devait être beaucoup plus forte qu'aujourd'hui. Est-ce que ce dégazage a suffi à composer l'atmosphère et les océans actuels ? Tout dépend du modèle de formation adopté, et notamment du type de chondrites (ordinaires, à enstatite ou carbonées) à partir duquel notre planète s'est formée.

L'hypothèse du « vernis tardif »

Les corps formés dans la partie externe du disque protoplanétaire sont riches en éléments volatils (modèle de condensation dû au gradient de température). L'hypothèse du vernis tardif prévoit une origine exogène des éléments composant l'atmosphère et l'hydrosphère terrestre. Là encore plusieurs scénarii sont envisagés : apport cométaire, apport météoritique primordial (on sait, par étude de la cratérisation lunaire, que le flux météoritique était beaucoup plus important dans les premiers âges du système solaire) ou apport micrométéoritique continu.

Il n'est pas possible actuellement de trancher entre les différents scénarii. Et pour cause : de nombreux éléments tantôt en faveur de l'un, tantôt en faveur de l'autre, tendent à montrer que ces hypothèses sont plutôt complémentaires, et que les enveloppes externes de la Terre trouvent leur origine dans les deux sources d'éléments volatils.

À quoi ressemblait l'atmosphère secondaire à la fin de sa mise en place ? L'absence de preuves géologiques évidentes conduit les spécialistes à construire des modèles relativement putatifs. On peut cependant essayer de dresser le portrait de cette atmosphère à -4,47 Ga (figure 3 b) : les constituants majoritaires sont l'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), le diazote (N_2) et les principaux gaz rares. Le flux de chaleur interne important et l'effet de serre maintiennent une température de surface supérieure à 1 200 °C. À cette température, si l'on suppose que toute l'eau des océans actuels est vaporisée, la pression partielle en H_2O est de 270 bars. La pression partielle en CO_2 est estimée entre 40 et 210 bars selon les modèles. Enfin, la pression partielle de N_2 et des gaz rares est estimée autour de 1 bar, soit environ la valeur actuelle.

Ce dernier point se retrouve dans la plupart des modèles d'évolution d'atmosphère : les gaz rares et

le diazote étant relativement inertes et lourds, ils réagissent peu et sont peu sujets à l'échappement atmosphérique. Aussi estime-t-on habituellement que leurs pressions partielles sont figées depuis la mise en place de l'atmosphère secondaire.

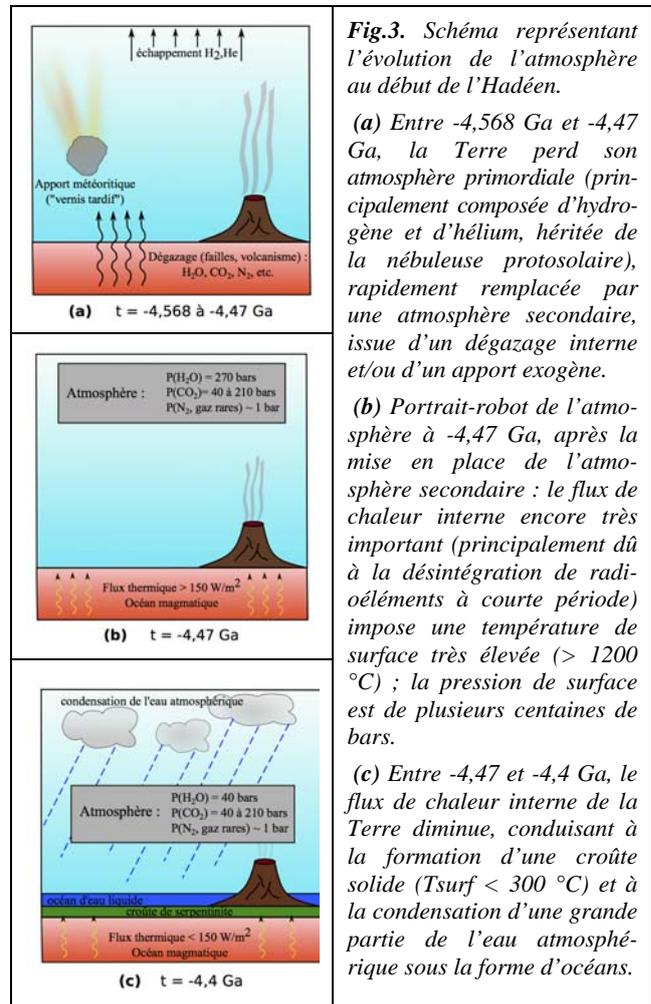


Fig.3. Schéma représentant l'évolution de l'atmosphère au début de l'Hadéen.

(a) Entre -4,568 Ga et -4,47 Ga, la Terre perd son atmosphère primordiale (principalement composée d'hydrogène et d'hélium, héritée de la nébuleuse protosolaire), rapidement remplacée par une atmosphère secondaire, issue d'un dégazage interne et/ou d'un apport exogène.

(b) Portrait-robot de l'atmosphère à -4,47 Ga, après la mise en place de l'atmosphère secondaire : le flux de chaleur interne encore très important (principalement dû à la désintégration de radioéléments à courte période) impose une température de surface très élevée (> 1200 °C) ; la pression de surface est de plusieurs centaines de bars.

(c) Entre -4,47 et -4,4 Ga, le flux de chaleur interne de la Terre diminue, conduisant à la formation d'une croûte solide ($T_{\text{surf}} < 300$ °C) et à la condensation d'une grande partie de l'eau atmosphérique sous la forme d'océans.

-4,47 à - 4,4 Ga : mise en place des océans

À partir de -4,47 Ga, le flux de chaleur interne devient suffisamment faible pour autoriser la formation d'une croûte solide à la surface de la Terre. La température externe n'est plus alors que de l'ordre de 300 °C. À cette température, et pour les conditions de pression régnant alors, l'eau commence à condenser (Fig. 3 c). Les océans se forment alors par précipitation de l'eau condensée à un rythme effréné (peut-être en moins de 1000 ans).

La première contrainte certaine que nous pouvons poser est la présence d'eau liquide stable à la surface de la Terre à -4,4 Ga. Celle-ci est attestée par l'existence de zircons découverts à Jack Hills, en Australie, au début des années 2000 (figure 4).

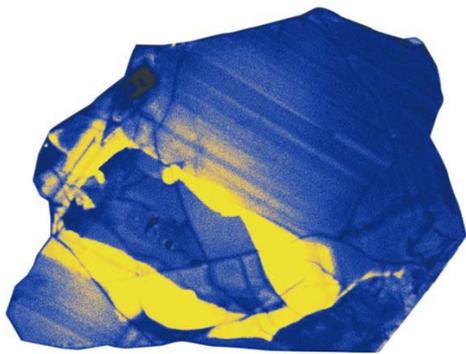


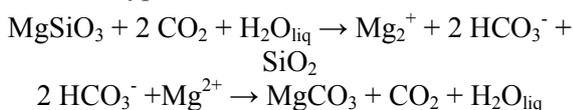
Fig4. Image en cathodoluminescence du plus vieux zircon terrestre, attestant la présence d'eau liquide il y a 4,4 Ga.
Crédits : John Valley, Université du Wisconsin.

Le zircon est un minéral de formule $ZrSiO_4$ très utilisé en géochronologie, notamment parce qu'il est dur (donc stable) et qu'il inclut des éléments radioactifs lors de sa cristallisation, rendant précise sa datation absolue. L'existence de ces zircons il y a 4,4 Ga assure aux géologues la présence d'eau liquide stable en grandes quantités, et donc d'océans, à la surface du globe.

Les modèles conduisent à une pression partielle en eau de l'ordre de 40 bars à -4,4 Ga, avec une pression partielle en CO_2 toujours comprise entre 40 et 210 bars selon les modèles (figure 3 c).

De -4,4 Ga à -4,0 Ga : séquestration du CO_2

Après la condensation des océans, le dioxyde de carbone devient le composant majoritaire de l'atmosphère. La température au sol est alors encore très élevée (200 à 250 °C), du fait d'un important effet de serre. Dans ces conditions, une véritable « pompe à carbone » se met en place, par lessivage des roches silicatées, selon une réaction de carbonatation du type :



On peut voir que le bilan net de cette réaction est le piégeage sous forme de carbonate insoluble d'une molécule de CO_2 de l'atmosphère. La principale inconnue concernant le piégeage du dioxyde de carbone est sa durée. De fait, il dépend en premier lieu de la quantité de CO_2 initialement présente dans l'atmosphère (de 40 à 210 bars selon les modèles), mais aussi de l'efficacité du processus. En effet, la pompe à CO_2 fonctionne d'autant mieux que le renouvellement des roches lessivables et que l'enfouissement dans le manteau (séquestration à long terme) est rapide. Ces deux derniers points sont directement corrélés à l'existence d'une tectonique des plaques, dont on ne sait pas précisément à quelle date elle s'est mise en place.

De nombreux indices laissent cependant supposer que cela s'est fait très tôt dans l'histoire de la Terre, ce qui impliquerait une diminution rapide de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère.

Au final, le portrait robot de l'atmosphère à -4 Ga est le suivant : l'eau a fini de se condenser, pour atteindre une pression partielle dans l'atmosphère de quelques centaines de ppmv (parties par million en volume), fortement dépendante de la température. La pression en CO_2 a chuté à une valeur de l'ordre de 1 bar, du fait du piégeage sous forme de carbonates. La pression partielle en diazote est de l'ordre de 1 PAL (Present Atmospheric Level). Enfin, nous allons discuter la présence éventuelle en quantité non négligeable de deux autres gaz : CH_4 et H_2 .

Le méthane

Comme nous venons de le voir, l'enfouissement du CO_2 atmosphérique a peut-être été très rapide. Or, la luminosité solaire étant à cette époque beaucoup plus faible (cf. infra, « le paradoxe du Soleil jeune »), en l'absence de gaz à effet de serre efficace comme l'eau ou le dioxyde de carbone, la température de surface aurait été très inférieure à 0 °C, conduisant à une glaciation totale de la Terre, phénomène connu dans la littérature sous le nom de « Terre- boule-de-neige » (Snowball Earth). Le problème est que cette vision d'une Terre froide est en totale contradiction avec les valeurs des paléotempératures des océans au début de l'Archéen (-3,8 Ga), déterminées par mesures des isotopes de l'oxygène et du silicium dans les roches. Si l'hypothèse de la séquestration rapide du CO_2 est avérée, il faut alors faire appel à un autre gaz à effet de serre pour expliquer ce paradoxe apparent : le candidat privilégié est généralement le méthane CH_4 , gaz à effet de serre efficace. Le problème est que la durée de vie du méthane atmosphérique est faible, ce gaz étant très sensible aux rayonnements ultraviolet.

Pour expliquer sa présence sur plusieurs centaines de millions d'années en quantités suffisantes pour assurer une température de surface positive, il faut donc imaginer des processus de création constante de méthane. Il se trouve qu'il existe à cette époque une source abiotique potentiellement importante de méthane : il s'agit de l'altération de la croûte océanique (serpentinisation) par des fluides hydrothermaux riches en CO_2 , conduisant à la formation de CH_4 par des réactions de type Fischer-Tropsch. S'il existait donc bien une source de méthane, il est difficile, voire impossible, de déterminer dans quelle mesure ce processus était efficace et donc de savoir avec certitude si ce gaz a pu faire office de gaz à effet de serre.

Le paradoxe du Soleil jeune

Les modèles d'évolution stellaire prédisent que la luminosité solaire était de l'ordre de 27 % plus faible qu'aujourd'hui il y a 4 milliards d'années, et encore 20 % plus faible il y a 2,8 Ga. Or, la température à la surface d'une planète est déterminée par l'énergie qu'elle reçoit de son étoile, son albédo (la fraction d'énergie qu'elle réfléchit directement) et l'effet de serre dû à son atmosphère. En supposant une atmosphère identique à celle que connaît actuellement la Terre, la luminosité solaire aurait été totalement incapable, à l'Hadéen et l'Archéen, d'assurer une température de surface supérieure à 0 °C (figure 6). Une telle configuration aurait conduit à une Terre totalement recouverte de glace, qualifiée de ce fait de « Terre boule-de-neige ».

Or, les archives géologiques montrent que tel n'était pas le cas ; au contraire, tout semble indiquer que les océans étaient plutôt chauds à l'Archéen. Seules trois glaciations principales ont été enregistrées avant -2 Ga. Ce paradoxe apparent, qualifié de « paradoxe du Soleil jeune » (ou *faible - faint sun paradox* en anglais), a été mis en évidence par Sagan et Mullen au début des années 70. Depuis, un certain nombre de modèles ont été proposés pour expliquer ce paradoxe, tous faisant appel à une contribution majeure des gaz à effet de serre. Un mécanisme intéressant avancé par Walker propose un climat régi par un cycle des carbonates-silicates : lorsque la température est positive, le lessivage des roches conduit à une diminution du CO₂ atmosphérique par carbonatation. Lorsque la teneur en dioxyde de carbone devient trop faible, la Terre se retrouve recouverte de glace : le mécanisme de séquestration du carbone est alors arrêté (plus de circulation d'eau liquide). L'atmosphère s'enrichit alors en CO₂ rejeté par les volcans, jusqu'à ce que l'effet de serre soit suffisant pour permettre une température positive, conduisant à une déglaciation. L'eau liquide pouvant à nouveau circuler, la « pompe à CO₂ » peut alors reprendre, et ainsi de suite ...

D'autres modèles, notamment celui de Kasting concernant l'atmosphère archéenne, supposent que le gaz à effet de serre responsable d'une température de surface positive est le méthane, faisant appel à des origines géologiques, voire biologiques, de ce gaz.

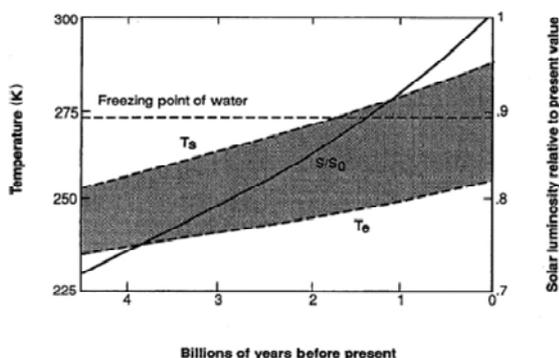


Fig.5 : Illustration du paradoxe du Soleil jeune. La courbe en trait plein représente l'évolution de la luminosité solaire

relativement à sa valeur actuelle. La courbe pointillée inférieure représente l'évolution de la température effective, la courbe pointillée supérieure représente celle de la température de surface en supposant une atmosphère identique à l'atmosphère actuelle. On voit que selon ce modèle, la température à la surface de la Terre aurait dû être négative jusqu'à environ -2 Ga, ce que contredisent les archives géologiques. D'après Kasting et Catling (2003).

Le dihydrogène

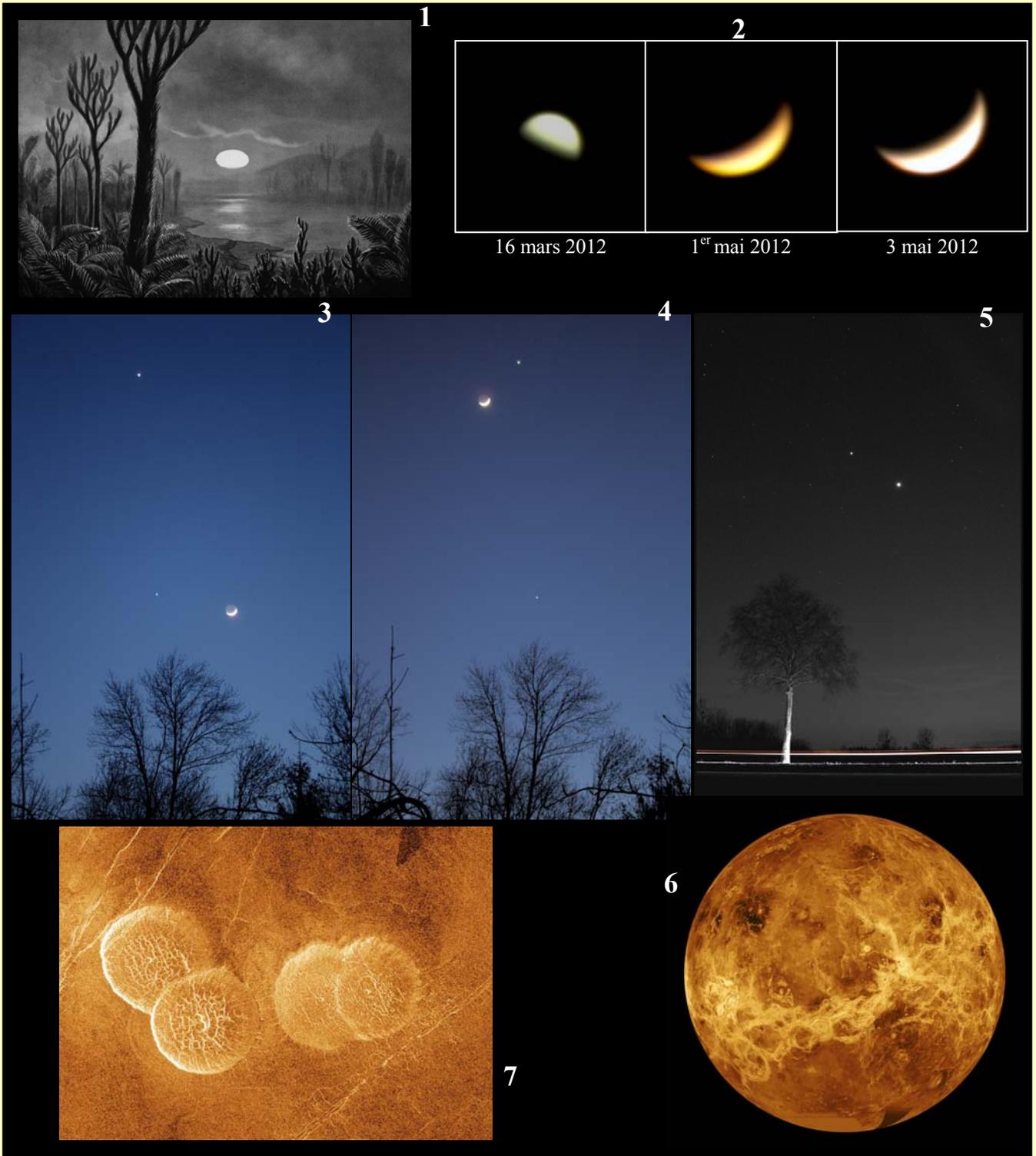
Le cas du dihydrogène est intéressant à plusieurs points de vue. Tout d'abord, dans un but de recherche des origines de la vie, une atmosphère riche en H₂ étant une atmosphère réductrice, propice à la synthèse de molécules organiques. C'est ce type d'atmosphère réductrice qu'utilisèrent Stanley Miller et Harold Urey dans leur célèbre expérience de 1953, au cours de laquelle ils montrèrent la possibilité de produire des acides aminés de manière abiotique. Si les sources de dihydrogène dans l'atmosphère sont bien identifiées (réactions de serpentinisation précédemment citées, sources volcaniques - principalement sous la forme H₂S), le problème de la rétention dans l'atmosphère de ce gaz se situe plus haut. En effet, H₂ étant le gaz diatomique le plus léger, et il est par conséquent soumis à l'échappement de Jeans.

Si de nos jours, l'hydrogène est soumis à l'échappement de Jeans², du fait de la température élevée de la thermosphère (>1 000 K), il n'en était peut-être pas de même à l'Hadéen. En effet, les travaux récents de Tian et al. (2005) tendent à montrer que l'exosphère pouvait être beaucoup plus froide à l'Hadéen, suivant la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Par ailleurs, certains auteurs ont pendant longtemps avancé l'existence d'une exosphère très chaude (T > 10 000 K) du fait du flux UV important à l'Hadéen. Ce point de vue est aujourd'hui remis en cause, et il a été montré qu'un flux UV important entraînerait un échappement hydrodynamique de l'atmosphère, lequel pourrait assurer une température exosphérique modérée (inférieure à 1 000 K) du fait des processus de refroidissement adiabatique. Toutes ces considérations, couplées à des activités hydrothermale et volcanique alors beaucoup plus intenses, conduisent à penser que l'atmosphère à l'Hadéen a pu être, au moins pendant une certaine période, riche en dihydrogène.

(suite dans le prochain numéro)

² L'échappement de Jeans correspond à l'échappement thermique des constituants d'une atmosphère par ailleurs en équilibre hydrostatique. Il se produit dans la haute atmosphère, au niveau de l'exobase, limite au delà de laquelle le libre parcours moyen des particules devient supérieur à l'épaisseur de la couche d'atmosphère située au dessus d'elles. Cet échappement concerne en premier lieu les particules les plus légères : de nos jours, seul l'hydrogène est soumis à cet échappement.

VÉNIUS



1. Larousse LR « Comment on s'est longtemps représenté le monde de Vénus, évoquant l'époque carbonifère terrestre » (Lucien Rudaux 1937 *Sur les autres mondes*) ; **2. Phases de Venus** : les trois images sont à la même échelle 0,72" par mm (images Jean-Michel Vienney) ; **3 et 4** Vénus, Lune et Jupiter (images Jean-Michel Vienney) on peut observer le déplacement de la Lune et de Vénus par rapport à Jupiter ; **5.** l'« étoile du Berger » photographiée le matin en septembre 2007 (image F. Causeret) ; **6.** Images de synthèse de la surface de Vénus réalisée grâce aux données de la sonde Magellan qui a cartographié le sol de Vénus par radar. Les couleurs ont été inspirées par les images des sondes soviétiques Venera. ; **7.** Formations volcaniques appelées « pancakes » (image Magellan - Calvin J. Hamilton).

Vénus, notions de base

Pierre Causeret

Vous trouverez dans ces notions de base l'essentiel de ce qu'il faut savoir pour observer Vénus en 2015...

Visibilité à l'œil nu

Vénus peut être observée en plein jour quand on sait où la chercher, mais elle surtout visible le soir après le coucher du Soleil ou le matin avant son lever. C'est l'astre le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune. Ces caractéristiques l'ont fait surnommer l'étoile du Berger.



Fig.1. Vénus dans le ciel du matin.

Vénus est une planète inférieure : cela signifie que son orbite est située entre celle de la Terre et le Soleil. C'est pour cette raison qu'elle ne nous apparaît jamais très éloignée du Soleil. Ce qu'on appelle l'élongation de la planète (angle entre la direction du Soleil et celle de Vénus) est toujours inférieure à 48° . Vénus n'est jamais visible à minuit.

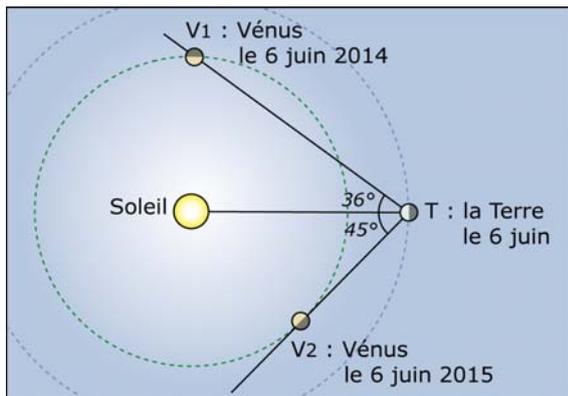


Fig.2. Élongation de Vénus.

Le 6 juin 2014, l'élongation de Vénus était de 36° . Un an plus tard, le 6 juin 2015, elle vaut 45° . Elle est alors maximale, la droite Terre-Vénus étant tangente à l'orbite de Vénus. Les orbites de la Terre et de Vénus n'étant pas tout à fait circulaires, l'élongation maximale de Vénus varie entre 45° et $47,8^\circ$.

Aux moments des élongations maximales, Vénus peut se coucher plus de 3 heures après le Soleil ou se lever plus de 3 heures avant lui.

Sa luminosité importante s'explique par le fait que Vénus est proche de nous mais aussi par son albédo de 0,75 (l'atmosphère de Vénus renvoie 75 % de la lumière qu'elle reçoit), ce qui est beaucoup plus que la Terre (0,3), Mars (0,25) ou la Lune (0,1).

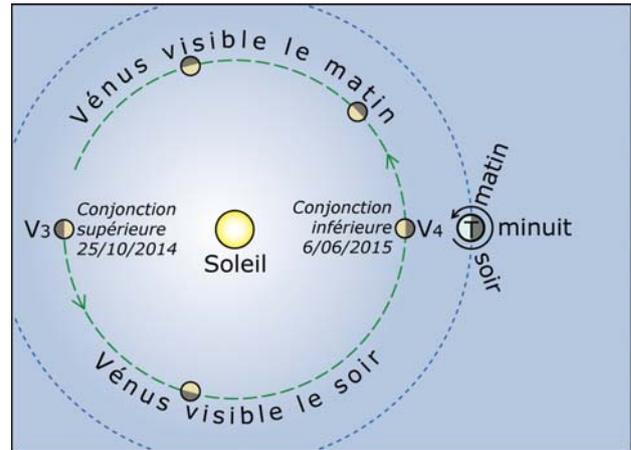


Fig.3. Période de visibilité. La Terre est représentée ici fixe. Au moment de la conjonction supérieure (V3), Vénus est invisible pendant environ 3 mois. Elle est ensuite visible 8 mois jusqu'à la conjonction inférieure (V4). Elle disparaît alors deux semaines pour réapparaître dans le ciel du matin pour à nouveau 8 mois. Ce cycle de visibilité dure 584 jours.

Certains peuples croyaient que la Vénus du soir et celle du matin étaient deux astres différents. Elle a d'ailleurs été nommée Vesper (astre du soir) et Lucifer (astre du matin) par les Romains.

Périodes

Vénus effectue une révolution autour du Soleil en 224,7 jours. C'est sa période sidérale. Mais pendant ce temps, la Terre elle aussi se déplace. Le mouvement combiné des deux planètes fait qu'il se passe 584 jours entre deux conjonctions inférieures. C'est ce qu'on appelle la période synodique de Vénus. On peut vérifier qu'après 584 jours, la Terre a effectué 1,6 tour autour du Soleil et Vénus 2,6 tours, exactement un tour de plus. Les deux planètes se retrouvent donc dans la même position par rapport au Soleil.

Si on positionne la Terre et Vénus sur leur orbite à chaque conjonction inférieure, donc tous les 584 jours, on peut remarquer qu'à la cinquième période, les planètes retrouvent presque leur position de départ. Pendant cet intervalle de 2 920 jours

(5×584), la Terre aura effectué environ 8 révolutions ($8 \times 365,25 = 2\,922$) et Vénus 13 ($13 \times 224,7 \approx 2\,921$). Et si on joint les positions de Vénus à chacune des conjonctions inférieures, on obtient une étoile à 5 branches, symbole de Vénus.

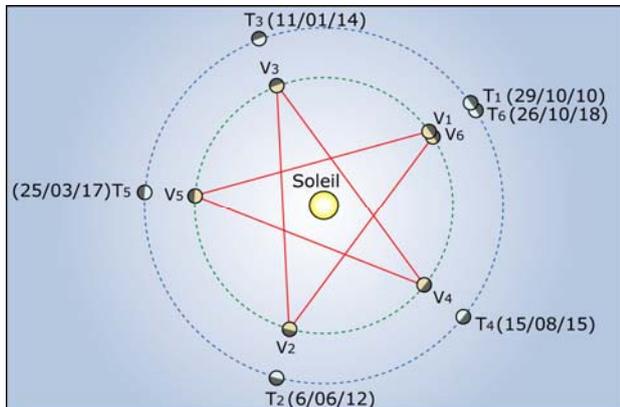


Fig.4. Conjonctions inférieures de Vénus de 2010 à 2018. En joignant les positions successives de Vénus, on obtient une étoile, qui n'est pas régulière ici car les vitesses des planètes sur leur orbite (non circulaire) n'est pas constante. On peut aussi vérifier que l'intervalle de temps entre deux conjonctions inférieures varie légèrement (de 580 à 588 jours ici).

Vénus au télescope

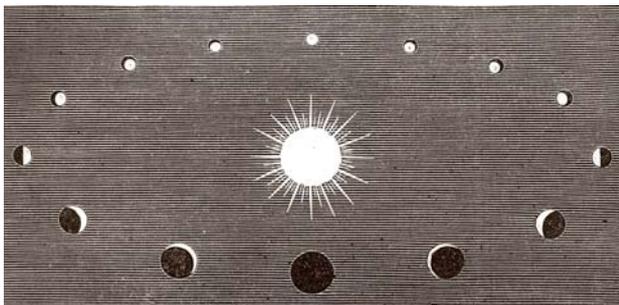


Fig.5. Les phases de Vénus peuvent s'expliquer par un simple dessin (Camille Flammarion, *Astronomie populaire*).

Comme la Lune et comme Mercure, Vénus présente des phases. Elles ont été observées par Galilée en 1610 et furent un argument de poids contre le système géocentrique de Ptolémée et en faveur du système héliocentrique de Copernic. Le système de Tycho Brahé¹, pourtant lui aussi géocentrique, prévoit lui aussi des phases.

Lorsque Vénus s'approche de la Terre, le disque de la planète apparaît de plus en plus gros ; mais dans le même temps, le pourcentage de la partie éclairée rétrécit. Ce qui fait que l'éclat de Vénus change peu (la magnitude varie de $-3,9$ début 2015, après la

¹ Pour Tycho Brahé, le Soleil tourne autour de la Terre située au centre du monde et les autres planètes tournent autour du Soleil.

conjonction supérieure, à $-4,5$ mi-juillet, quand Vénus est en croissant).



Fig.6. Quelques phases de Vénus, vues depuis la Terre les 1^{er} avril, 6 juin et 1^{er} août 2015, et représentées à la même échelle. Les diamètres apparents sont ici de $14''$, $23''$ et $52''$.

Une petite lunette suffit pour observer ces phases. Quand Vénus est en mince croissant, certains affirment voir la phase à l'œil nu. Cela semble difficile car c'est à la limite du pouvoir séparateur de l'œil. Mais une paire de jumelles suffit.

La rotation de Vénus

Au télescope, on ne voit pas de détails à la surface de Vénus. Avec un filtre ultraviolet, on peut deviner quelques structures de l'atmosphère et observer sa rotation en 4 jours. Mais la rotation du sol est beaucoup plus lente, puisqu'elle s'effectue en 243 jours et dans le sens inverse de la rotation de la Terre (c'est pour cela que l'on note parfois la période en négatif, -243 jours). Elle a été déterminée par radar depuis la Terre en 1962.

Il s'agit de la période sidérale (mesurée par rapport aux étoiles), différente de la durée du jour vénusien qui n'est que de 117 jours terrestres (figure 7).

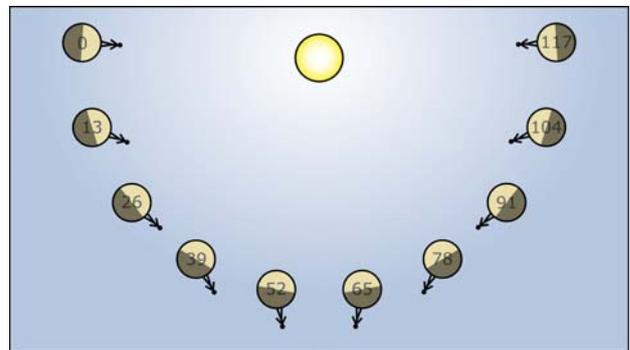


Fig.7. Au départ à gauche ($t = 0$), un observateur est placé face au Soleil, à midi, heure locale. Vénus est ensuite représentée tous les 13 jours (terrestres). Après 117 jours, Vénus a tourné de 187° autour du Soleil ($360^\circ \times 117 / 224,7$) et de 173° sur elle-même ($360^\circ \times 117 / 243$) dans l'autre sens (soit -187°). L'observateur se retrouve donc à nouveau face au Soleil, à midi heure locale. La durée du jour vénusien est donc de 117 jours terrestres.

L'exploration spatiale

Le premier survol de Vénus date de 1962, par la sonde américaine Mariner 2. En 1967, la sonde soviétique Venera 4 envoie une capsule dans l'atmosphère. De 1970 à 1982, plusieurs sondes Venera atterrissent à la surface. De 1990 à 1994, la

sonde Magellan, en orbite autour de la planète, cartographie le sol vénusien par radar. Vénus Express, une sonde européenne observe Vénus depuis 2006. Bientôt à court de carburant, elle doit finir ces jours en plongeant dans l'atmosphère de Vénus fin 2014.

On sait maintenant que Vénus n'est pas un lieu de vacances idyllique : la température au sol y est supérieure à 450 °C et la pression est environ 100 fois plus élevée que sur Terre.

Sa surface est principalement constituée de plaines volcaniques mais on y observe également des plateaux, des montagnes, des volcans. Elle semble relativement jeune, il existe donc un volcanisme assez récent.

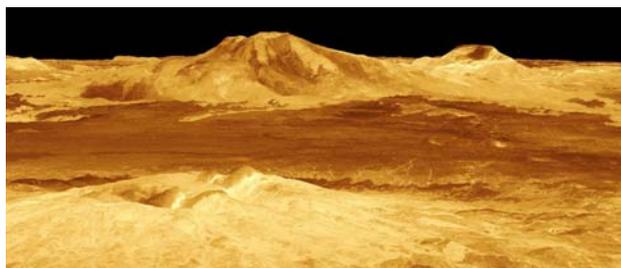


Fig.8. Le relief de Vénus reconstitué par ordinateur à partir des mesures de la sonde Magellan. Le ciel a été laissé en noir (mais ce n'est pas la couleur réelle).

L'atmosphère de Vénus est composée principalement de dioxyde de carbone (plus de 96 %) et de diazote (3 à 4 %) ; on y trouve aussi des gouttelettes d'acide sulfurique.

Vénus en 2015

Les heures sont données en heures légales pour un site situé au centre de la France.

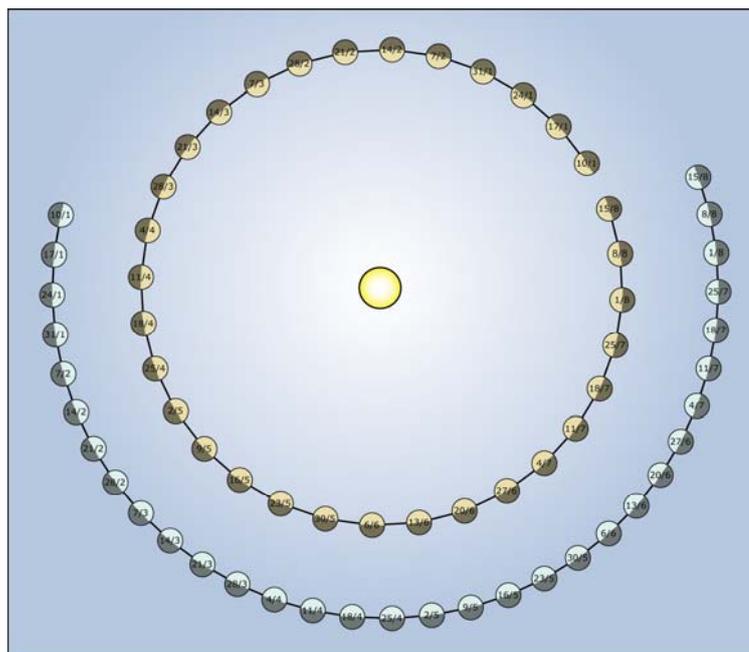
Une activité avec nos élèves

La figure de droite représente les positions de la Terre et de Vénus chaque samedi, du 10 janvier 2015 au 15 août 2015.

On pourra chercher :

- l'élongation de Vénus le 10 janvier ;
- aux alentours de quelle heure Vénus est observable en janvier ;
- l'élongation de Vénus le 6 juin ;
- l'aspect de Vénus observée au télescope le 6 juin ;
- à quelle date le Soleil, Vénus et la Terre sont alignés...

Vous pouvez télécharger cette figure sur le site du CLEA pour l'imprimer (article Cahiers Clairaut 148).



1^{er} janvier 2015 : Vénus est visible le soir dans les lueurs du couchant. Elle se couche plus d'une heure après le Soleil (élongation 17°). Il faut la chercher aux environ de 17 h 45 à 5° au-dessus de l'horizon sud-ouest. Au télescope, elle apparaît petite (diamètre apparent de 10") et presque pleine.

Vénus devient ensuite de mieux en mieux visible le soir (elle s'éloigne angulairement du Soleil).

En mai et juin, les deux planètes les plus brillantes du ciel, Jupiter et Vénus se trouvent dans le ciel du soir. Vénus est la moins haute des deux.

6 juin 2015 : élongation maximale Est de Vénus (45°). Elle se couche plus de 3 h après le Soleil. Au télescope, on la voit en quartier (diamètre apparent 24").

30 juin 2015 : beau rapprochement de Vénus et Jupiter à 0,4° seulement !

Juillet : Vénus est toujours très lumineuse mais de plus en plus basse sur l'horizon. Elle apparaît en croissant dans un télescope.

15 août 2015 : conjonction inférieure. Vénus passe devant le Soleil (ou plutôt au sud du Soleil, à près de 8°).

Fin août 2015 : Vénus devient planète du matin.

26 octobre 2015 : élongation maximale Ouest (46°). Vénus se lève plus de 4 heures avant le Soleil.

Du 25 octobre au 4 novembre, Vénus est proche de Mars et de Jupiter.

Vénus est visible le matin pendant tout l'automne 2015 et au début de l'hiver.

Vénus, la planète oubliée ?

Pierre Drossart, LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, U. Paris-Diderot

Pierre Drossart, un spécialiste du sujet, nous résume huit années de découverte de la sonde Venus Express sur l'atmosphère de la planète et son histoire.

La mission Venus Express de l'Agence Spatiale Européenne, en orbite autour de Vénus depuis avril 2006, s'achèvera probablement en 2015, ses réserves de carburant épuisées. C'est donc le moment de revenir sur cette mission exceptionnelle auprès de la planète sœur de la Terre, et de faire un bilan de ses découvertes, mais aussi de notre connaissance de Vénus et de son atmosphère si particulière.

L'exploration de Vénus a débuté avec les premières missions planétaires soviétiques et américaines dans les années 1960 (missions Venera, Mariner). Rien d'étonnant à cela, puisque c'est la planète la plus proche de la Terre, et donc la plus accessible à un survol. Vénus, éloignée du Soleil de 0,723 ua (0,723 unités astronomiques, soit 108 millions de km environ), reçoit donc près de deux fois plus d'énergie solaire que la Terre. Même si le spectacle de ses phases séduit toujours l'astronome amateur, force est de reconnaître que son observation au télescope est quelque peu monotone : couverte de nuages, elle offre en lumière visible un aspect lisse et uniforme, et il a fallu attendre les observations en ultraviolet dans les années 50 pour détecter des variations nuageuses et mesurer une rotation des nuages en quatre jours. La surprise est venue des observations spatiales qui démontrèrent que la planète solide avait une rotation rétrograde très lente en 243 jours, contrairement à l'atmosphère au niveau des nuages : la super-rotation de Vénus était découverte, dont tous les secrets ne sont pas encore déchiffrés comme nous le verrons.

Entre 1970 et 1995 d'autres missions d'exploration ont permis de préciser la structure et la composition de l'atmosphère, de cartographier la surface et mesurer sa topographie (Pioneer Venus, programmes Venera et Vega, Magellan). Mais Vénus n'est pas une planète facile : avec une surface à 450 °C sous une pression de 96 bars, les rares atterrisseurs qui s'y sont risqué n'ont fonctionné que quelques heures, et les observations à distance pénètrent difficilement l'atmosphère, sauf dans le domaine radar. Entre la mission Magellan (1989) et Venus Express (2006) seuls quelques survols de sonde en quête d'assistance gravitationnelle (Galileo en 1990, Cassini en 2000, Messenger en 2007) ont survolé Vénus sans permettre d'observations approfondies. Les programmes des

agences spatiales se sont en effet dirigés vers d'autres cibles, Mars en priorité qui a bénéficié d'une armada de missions d'exploration, ou les astéroïdes.

Venus Express, décidée par l'ESA en 2002, permettait donc d'aborder des questions sur la planète qui restaient non résolues, en particulier dans les domaines suivants :

- dynamique atmosphérique : quelle origine pour la super-rotation, mais aussi pour la circulation diurne ?
- climatologie : Vénus a-t-elle toujours été couverte d'une atmosphère dense et chaude ?
- volcanisme : y a-t-il encore aujourd'hui un volcanisme actif ?
- relations avec le vent solaire : en l'absence de champ magnétique protecteur, des effets du vent solaire sur l'atmosphère ont-ils des conséquences sensibles ?

La mission Venus Express

Venus Express est un satellite d'observation scientifique, comportant une charge utile d'instruments de 93 kg avec des spectromètres, caméras, magnétomètre, sondeur radio et plasmas. La mission nominale était prévue pour 500 j (deux années vénusiennes), mais a très largement dépassé sa durée de vie prévue puisqu'elle fonctionne en orbite autour de Vénus depuis 2006. Venus Express a une orbite presque polaire très elliptique, de 24 h, avec un survol rapproché (≈ 250 km) du pôle Nord, et un apoastre à environ 66 000 km au pôle Sud. Cette asymétrie a quelques inconvénients : les régions nord sont vues à haute résolution, mais survolées rapidement ce qui ne permet pas une cartographie globale, contrairement à l'hémisphère sud, vu de manière plus complète, mais moins résolue.

La dynamique atmosphérique

L'un des résultats marquants de Venus Express a été la mesure précise de la circulation atmosphérique à plusieurs altitudes. Le détail de la super-rotation a ainsi été obtenu, avec des profils de vitesses de vents zonaux de l'équateur au pôle. On a mesuré une diminution de la vitesse des vents zonaux entre 65 et 45 km d'altitude, correspondant à un ralentissement de la circulation zonale quand on se rapproche de la surface.

Deux régimes de circulation sont en fait très identifiés : entre les latitudes de 60° nord et sud, une circulation zonale uniforme est observée, alors qu'aux hautes latitudes, la circulation ralentit : la zone de transition vers 60° est aussi caractérisée par la présence d'un « anneau » circulaire où les températures sont plus basses. Des différences dans la structure nuageuse sont aussi observées, avec une circulation organisée en spirale à partir du pôle, notable sur les figures 1, 2 et 3. La présence de vortex polaires sur Vénus était connue depuis la mission Pioneer. Venus Express a permis des observations remarquablement précises du vortex polaire sud, en particulier en mesurant simultanément la température atmosphérique et la vitesse des vents, les paramètres de base de tout modèle météorologique.

Les modèles météorologiques sont aujourd'hui ajustés et reproduisent approximativement l'effet de super-rotation ; cependant l'interaction vortex polaire/circulation générale et super-rotation reste mal compris et suscite de nombreuses études nouvelles.

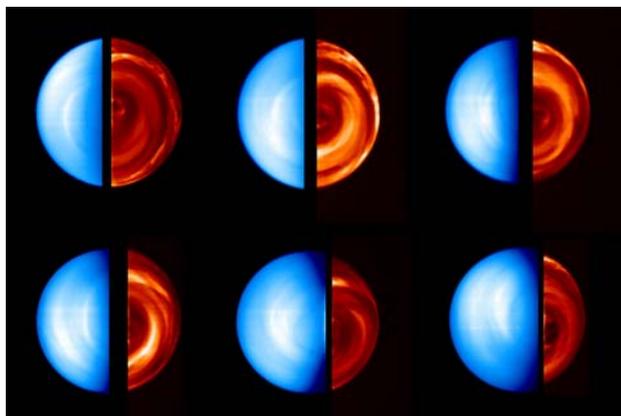


Fig.1. Atmosphère de Vénus en infrarouge et en ultraviolet. Images obtenues par l'instrument VIRTIS lors de l'orbite d'arrivée entre le 12 et 19 avril 2006. Vénus est observée d'une distance de plus de 200 000 km environ au-dessus du pôle Sud. La partie éclairée (côté jour, en bleu) montre la réflexion de la lumière solaire par les nuages ; la partie nocturne (côté nuit en rouge) montre l'émission thermique de la basse atmosphère et les contrastes des nuages, marqués par la spirale enroulée jusqu'au vortex polaire. (Crédit ESA/VIRTIS/INAF-IASF/Obs. de Paris-LESIA).

La climatologie

Les caractéristiques de l'atmosphère de Vénus (concentration en dioxyde de carbone, forte dessiccation, hautes températures) ont-elles toujours régnées sur la planète ou sont-elles apparues plus récemment dans l'histoire planétaire ? Ce débat est toujours très vif dans la communauté scientifique, et dépasse largement le seul cas particulier de Vénus. En effet, un modèle d'évolution climatique décrit le scénario suivant : Vénus aurait eu à l'origine une atmosphère plus froide et humide, similaire à celle de la Terre, puis au cours de l'évolution du système solaire, aurait connu un « effet de serre divergent ».

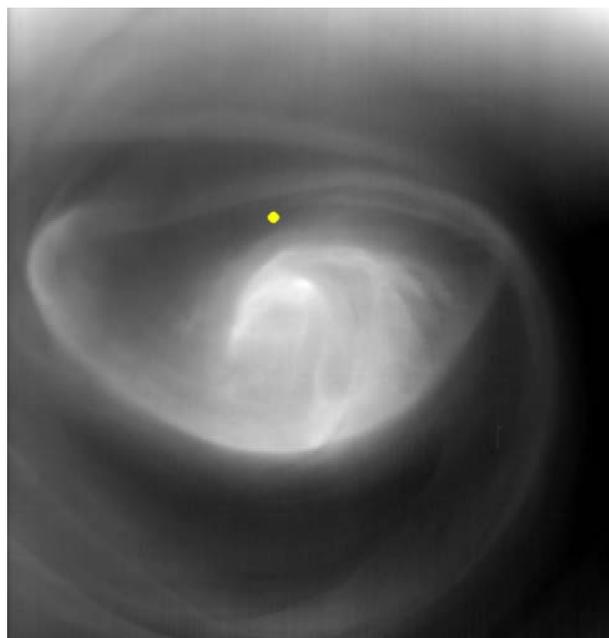


Fig.2. Vortex polaire sud de Vénus en infrarouge à une longueur d'onde de 5 microns observé par l'instrument VIRTIS (Crédit ESA/VIRTIS/INAF-IASF/Obs. de Paris-LESIA /Univ. of Oxford).



Fig.3. Observation des nuages de l'hémisphère sud de Vénus par la caméra de Venus Express (VMC) le 4 août 2007. (Crédit : ESA/MPS/DLR/IDA).

Lorsque la température augmente ainsi que l'évaporation, la vapeur d'eau qui produit, plus encore que le dioxyde de carbone, un effet de serre puissant, conduit à augmenter encore la température, jusqu'à évaporation complète des océans originels. La vapeur d'eau s'échappe peu à peu de l'atmosphère après décomposition par le rayonnement solaire et échappement de l'hydrogène et conduit à la composition actuelle de l'atmosphère de Vénus : une atmosphère épaisse de dioxyde de carbone très pauvre en vapeur d'eau. Ce scénario est admis par les climatologues, la question restant de savoir si l'effet de serre divergent a eu lieu tôt dans l'histoire planétaire, pendant les premières centaines de millions

d'années de l'histoire de la planète, ou plus récemment, peut-être lors du grand épisode volcanique daté d'il y a quelques centaines de millions d'années seulement. La question est d'importance, puisque dans le deuxième cas, Vénus aurait connu une atmosphère tempérée pendant des milliards d'années, et pourrait donc avoir été propice à l'apparition de la vie, que l'épisode d'effet de serre divergent n'aurait stérilisé que récemment. Les traces de ce phénomène ont probablement été effacées, et on n'a que très peu d'espoir de pouvoir, comme on l'espère sur Mars, retrouver des signatures géologiques, voire biologiques de ces phénomènes. Mais la combinaison de modèles planétaires incluant tectonique, volcanisme et climatologie doit permettre un jour de mieux comprendre l'évolution planétaire. C'est en effet une des leçons de Vénus de nous montrer combien l'évolution planétaire combine tous les aspects de structure interne, enveloppe atmosphérique, interfaces volcanisme-atmosphère et qu'une compréhension profonde d'une planète doit intégrer toutes ces disciplines. L'exemple de Vénus montre aussi que l'évaporation des océans et l'effet de serre divergent conduit à un état stable à l'échelle géologique d'une atmosphère planétaire. La Terre pourrait subir une telle évolution d'ici quelques milliards d'année, lorsque le chauffage solaire qui augmente naturellement au fil du temps, pourrait amener à un effet de serre divergent. L'état « Vénus » est donc probablement pour les planètes telluriques à atmosphère un état stable, et potentiellement plus probable que l'état « Terre » à atmosphère tempérée, une leçon à retenir pour les observations futures d'exoplanètes. Les « Super-Vénus » sont peut être bien plus fréquentes que les « Super-Terres » chères aux exobiologistes. En tous les cas, les leçons apprises de l'étude de Vénus seront utiles à ces recherches.

Vent solaire

Le vent solaire arrivant à Vénus n'est pas dévié comme sur Terre par un champ magnétique, les interactions avec l'atmosphère planétaire sont donc tout à fait particulières dans le cas de Vénus. Plusieurs observations originales ont été menées : l'un des instruments, ASPERA, a permis de mesurer la composition en ions dans l'ionosphère de Vénus, et de montrer in situ l'effet de mécanismes d'échappement atmosphérique (figure 4). Une autre observation phare a été la détection d'orages atmosphériques. Longtemps soupçonnés, puis infirmés, Venus Express permet grâce aux données du magnétomètre de démontrer la présence d'orages par leurs émissions radioélectriques. Ces observations obtenues par le magnétomètre de Venus Express qui mesure les fluctuations à basse fréquence des ondes radioélectriques baignant l'environnement de

Vénus permettent d'identifier les émissions dues aux éclairs d'orage. Il s'agit là de la première détection d'orages sur une planète tellurique autre que la Terre.

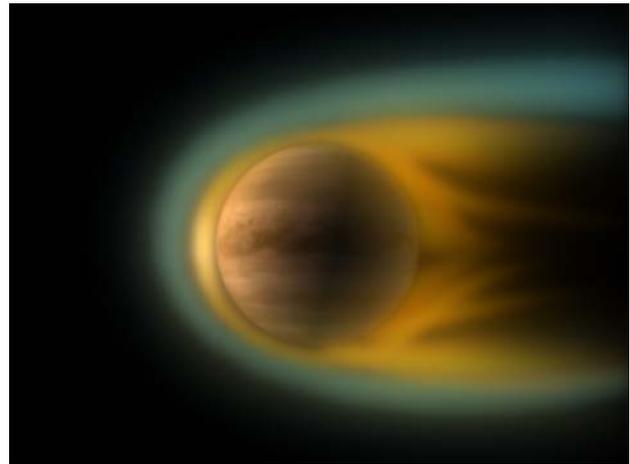


Fig.4. Image d'artiste montrant l'interaction entre Vénus et le vent solaire. Crédit : ESA-C. Carreau.

Volcanisme

Magellan et Venera 15 l'ont bien montré, Vénus est la planète volcanique par excellence. Les structures volcaniques complexes sont observées sur la surface : dômes, volcans boucliers, coulées de lave, etc. Mais certains volcans sont-ils encore actifs aujourd'hui ? La probabilité d'observer directement une éruption est faible, si cette activité n'est que sporadique et localisée, mais des effets à plus long terme peuvent être décelables. La présence de nuages d'acide sulfurique et de dioxyde de soufre dans l'atmosphère a été présentée comme un indice d'une activité volcanique, ces composés étant progressivement détruits par photochimie et devant être renouvelés. Toutefois un lent effet de dégazage et d'interaction chimique sol/atmosphère peut également expliquer le renouvellement des nuages. La variabilité du dioxyde de soufre, observée depuis Pioneer à la fin des années 70 a été avancée comme un indice d'activité volcanique, mais il s'agit d'un effet indirect. D'autre part, l'observation faite au niveau des nuages à 60 km d'altitude est indirecte, le temps de diffusion des gaz et même d'un panache volcanique éventuel à ces altitudes étant très long.

Venus Express a tenté une nouvelle approche à cette question, par l'observation directe de la surface : en effet, quelques fenêtres en lumière infrarouge permettent la détection de la surface à travers les nuages, en particulier à 1,1 micromètre. Une anomalie thermique peut donc être recherchée pour mettre en évidence un phénomène d'origine volcanique. Cependant la principale cause de variation thermique est due aux variations d'altitude : la température décroît avec l'altitude, et la surface est en équilibre thermique avec l'atmosphère en raison des fortes pressions (un cas très différent de Mars où l'équilibre radiatif avec le rayon-

nement solaire rend les températures de surface uniformes avec l'altitude au contraire !).

Heureusement, la bonne connaissance de l'altimétrie de Vénus grâce à la mission Magellan permet de corriger cet effet, et donc de rechercher les anomalies sur les températures corrigées de l'altimétrie. Des zones d'anomalie ont effectivement été détectées par Venus Express (Smrekar et al, Science, 2012). Cependant, une anomalie thermique peut être due soit à la température, soit à l'émissivité thermique de la surface, le produit des deux donnant la variable mesurable, à savoir le rayonnement thermique observé : l'interprétation des données par les modèles montre que la seconde explication paraît la plus probable, statistiquement. La géologie intervient alors dans l'interprétation, les zones anormales étant en effet systématiquement associées à des structures volcaniques particulières : même si une activité directe n'est pas l'explication la plus plausible, la variation de l'émissivité thermique corrélée aux structures géologiques permet de déduire un âge jeune (quelques dizaines de millions d'années tout de même), et donc un volcanisme « récent » sinon contemporain.

La détection la plus convaincante serait celle de variations de structures à la surface : les recherches se poursuivent aujourd'hui avec Venus Express dont la base de données de plusieurs centaines de gigaoctets alimentera pendant encore des années la recherche.

Aérofrenage

Entre le 11 juin et le 10 juillet 2014, une opération très spectaculaire a été obtenue avec Venus Express : du fait de son orbite très excentrée la sonde frôle les couches supérieures de l'atmosphère. Afin de mesurer directement certains paramètres, une expérience a été faite en abaissant encore le périastre jusqu'à « sentir » le freinage de l'atmosphère sur les panneaux solaires jusqu'à 130 km d'altitude environ. Dans ces zones de l'atmosphère supérieure qui sont aussi accessibles aux mesures à distance par les spectromètres de la mission Venus Express (SPICAV/SOIR et VIRTIS), la mesure du freinage donne une véritable mesure in situ de l'atmosphère (figure 5). Les opérations sont complexes car elles doivent être ajustées à chaque orbite en mesurant les paramètres orbitaux, de manière à effectuer une descente contrôlée. La variabilité de l'atmosphère oblige à un contrôle quotidien de l'orbite de manière à éviter une descente trop rapide qui entraînerait la perte de la mission.

Ces opérations se sont parfaitement déroulées, confirmant la maîtrise du centre d'opération de l'ESA à Darmstadt en navigation planétaire. Les résultats obtenus sur l'atmosphère sont en cours d'analyse. En plus d'une mesure directe de la densité atmosphérique, les observations montrent des fluctuations importantes de la densité, ressenties par la sonde lors de son passage dans l'atmosphère. Ces fluctuations sont

probablement dues à la présence d'ondes de gravité atmosphérique¹, observées par ailleurs par Venus Express, mesurées pour la première fois in situ.

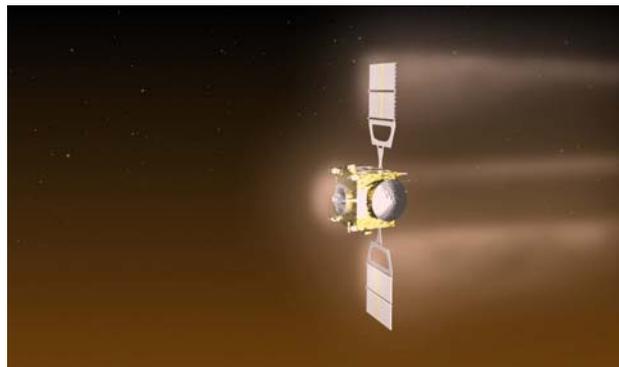


Fig.5. : freinage atmosphérique de Venus Express (image d'artiste). Crédit : ESA-C. Carreau.

L'héritage de Venus Express

Après ce dernier exploit, la mission a effectué une remontée du périastre pour revenir à un mode d'observation nominal. Après vérification des instruments, et les observations ont pu reprendre d'août à novembre. Divers objectifs scientifiques ont été assignés pendant la fin de la mission qui s'achève fin novembre faute de carburant : poursuite des mesures de composition de la haute atmosphère pour les mesures de variations de dioxyde de soufre, observations de régions de la surface par les caméras et spectro-imageurs dans le domaine visible, observations du magnétomètre et des sondeurs de l'ionosphère, etc. Quelle sera la fin de Venus Express ? L'orbite de la sonde doit périodiquement être ajustée pour remonter son périastre. En effet, les marées solaires affectent l'orbite et la rendent instable, si bien que faute d'opérations périodiques, la sonde rentrerait dans l'atmosphère de Vénus ; le carburant étant maintenant épuisé, la sonde plongera donc bientôt dans l'atmosphère de Vénus et brûlera définitivement dans l'atmosphère qu'elle aura contribué à étudier vaillamment pendant plus de huit ans. D'autres missions prendront le relais à l'avenir, et poursuivront les études, mais une chose est sûre, la mission Venus Express restera une référence dont s'inspireront les futures explorations.

Références :

Articles scientifiques de référence (publications dans des revues scientifiques spécialisées) :
Cahier spécial Venus Express : Nature 2007, Vol. 450 ;
Numéro spécial Planetary & Space Science 2007, Vol. 55 ;
Numéro spécial Journal of Geophysical Research 2009, Vol. 114 ;
Numéro special Icarus, 2012, Vol. 217 ;
Site de l'ESA sur Venus Express : http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express. ■

¹ À ne pas confondre avec les ondes gravitationnelles.

AVEC NOS ÉLÈVES

Modélisation des phases de Vénus

Sylvie Thiault, Lyon⁽¹⁾

Les ateliers du mercredi de l'observatoire de Lyon, animés par Philippe Merlin, explorent le potentiel de modélisation des mouvements des corps célestes qu'offre GeoGebra. Nous vous proposons ici de modéliser le mouvement de Vénus du point de vue d'un observateur terrestre pour comprendre les phases de Vénus et la variation de son diamètre apparent.

Notre but est de représenter l'aspect de Vénus depuis la Terre et de prévoir son diamètre angulaire ainsi que sa phase en fonction de la date. Pour simplifier, on prend le point de vue d'un observateur qui serait au centre de la Terre et on fait l'hypothèse d'une orbite de Vénus circulaire, parcourue à vitesse constante, centrée sur le Soleil et située dans le plan de l'écliptique.

Notions abordées

Mathématiques : tangente à un cercle, angles orientés, coordonnées polaires, calcul de longueurs, d'angles, géométrie dans l'espace (intersection d'une sphère avec un cône, un cylindre, un plan).

Astronomie : conjonction, opposition, élongation maximale, phase, angle de phase, plan de l'écliptique, orbite, période sidérale, période synodique.

On peut commencer par simuler une observation virtuelle de Vénus sur une longue période avec un logiciel comme Stellarium. On peut chercher la magnitude minimale de Vénus, son diamètre apparent maximal, les distances minimale et maximale à la Terre... En zoomant, on peut voir qu'elle change d'aspect, ce qu'avait déjà remarqué Galilée il y a plus de quatre siècles...

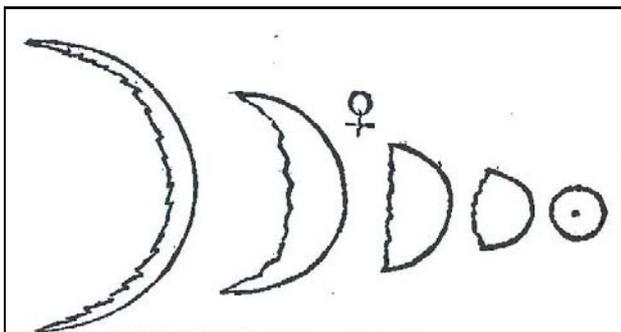


Fig.1. Les dessins des observations des phases de Vénus par Galilée. Il annonça sa découverte à Kepler par cette anagramme "Haec Immatura a me jam frustra leguntur, o.y." (en vain, ces choses sont accueillies aujourd'hui prématurément par moi) qui donne, en changeant l'ordre des lettres, "Cynthiae figuras aemulatur mater amorum" (la mère des amours imite les phases de Diane).

Une maquette

Ce type de réalisation permet de comprendre très simplement l'origine des phases de Vénus.

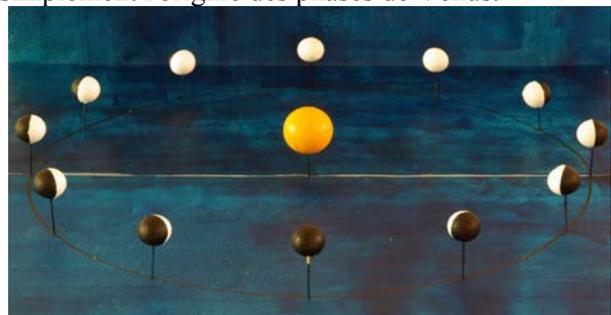


Fig. 2. La maquette des phases de Vénus.

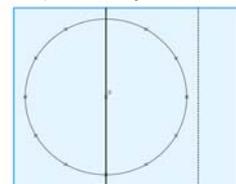
Fabrication de la maquette

Matériel

- Une plaque de carton plume de 8 mm d'épaisseur (format 80 cm × 1 m).
- Une boule de polystyrène de 5 cm de diamètre mini.
- Une dizaine de petites boules de polystyrène ou de cotillon de 3 cm de diamètre maxi.
- Une dizaine de cure-dent.
- Peinture jaune, noire, bleue (facultatif).

Réalisation

- Pour chacune des petites boules, placer une bande adhésive le long d'un grand cercle pour épargner un hémisphère et peindre en noir l'autre hémisphère. Les petites boules représenteront Vénus.
- Fixer les petites boules sur les cure-dents.
- Peindre en jaune la grosse boule de 5 cm : ce sera le Soleil.
- Au cutter, inciser la plaque de carton plume comme indiqué sur le schéma. Le pointillé indique que l'on incise sur la face du dessous, le trait plein la face de dessus.



Cela permettra d'avoir une maquette pliable...

- Repérer S, le centre du carré de côté 80 cm, tracer un cercle de centre S et de rayon 35 cm.

(1) D'après le document « Zieuter Vénus » préparé par Philippe Merlin pour les ateliers du mercredi de l'observatoire de Lyon.

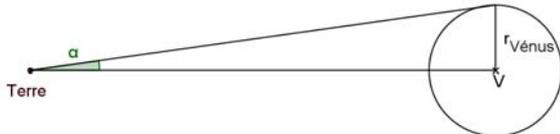
- Graduer ce cercle comme indiqué sur le schéma précédent. Pour une meilleure visibilité, on peut peindre en bleu la plaque de carton plume.
Disposer les « Vénus » pour que la face « éclairée » soit correctement positionnée. Observer...

Quelques calculs

Nous admettrons que la partie de la planète qui est éclairée par le Soleil est une demi-sphère.

Le diamètre apparent de Vénus.

On cherche le diamètre apparent de Vénus (α) en fonction de la distance Terre-Vénus (TV), et de son rayon ($r_{\text{Vénus}}$).



On trouve : $\tan \alpha = r_{\text{Vénus}} / TV$.

L'angle de phase

L'angle de phase est un angle orienté qui a pour sommet le centre de l'objet éclairé, la direction du Soleil comme premier côté et la direction de l'observateur comme deuxième côté.

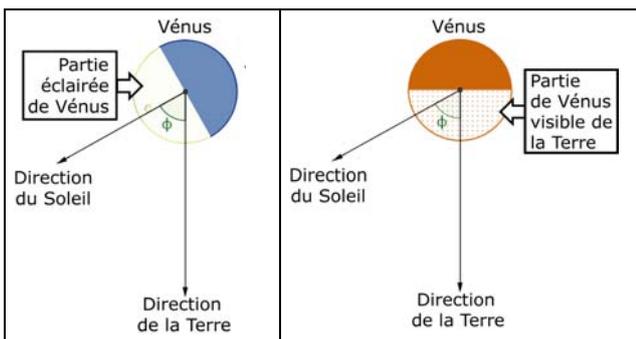


Fig.3. L'angle de phase est noté Φ . On a représenté sur chacun des dessins la partie de Vénus indiquée. L'aspect de Vénus vue depuis la Terre dépend de l'angle de phase.

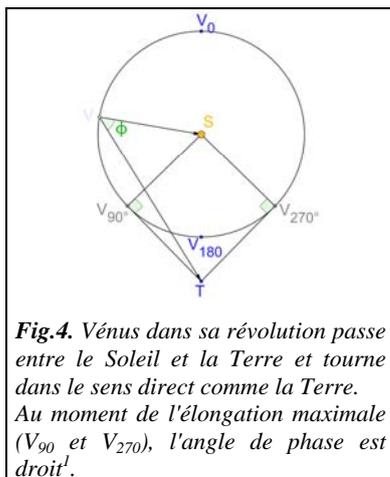


Fig.4. Vénus dans sa révolution passe entre le Soleil et la Terre et tourne dans le sens direct comme la Terre. Au moment de l'élongation maximale (V_{90} et V_{270}), l'angle de phase est droit¹.

¹ Dans le HS10 mathématiques et astronomie p 53-54, vous trouverez le calcul des diamètres apparents maximal et minimal de Vénus ainsi que le calcul de son élongation maximale.

Modélisation à l'aide de GeoGebra

Remarques préalables :

- on considère un repère de centre le Soleil, où le centre de la Terre est fixe ;
- une partie de l'écran représente le plan de l'écliptique observé depuis un point de vue éloigné (on se place "au-dessus" du Soleil, au nord du plan de l'écliptique) ; une autre partie représente la projection de Vénus sur la sphère céleste vue de la Terre. On prendra comme convention que si Vénus est à 1 unité astronomique de la Terre, son rayon vaut 0,2 unité graphique.

Nous allons réaliser une animation GeoGebra permettant de :

- positionner Vénus dans son mouvement autour du Soleil, par rapport au centre de la Terre ;
- montrer Vénus depuis un point de vue éloigné du plan de l'écliptique ;
- calculer l'angle de phase ;
- montrer Vénus vue de la Terre en fonction de la distance Terre-Soleil et avec la séparation lumière-obscurité (terminateur).

Vous trouverez sur le site du CLEA les instructions détaillées ainsi que le fichier GeoGebra terminé. Nous indiquons ici uniquement les étapes du travail.

1. On ouvre GeoGebra en faisant apparaître la fenêtre algèbre et en supprimant la fenêtre tableur.
2. On crée les grandeurs suivantes : demi grand axe de l'orbite de Vénus, rayon apparent de référence pour Vénus (pour 1 ua) et coordonnées du centre du disque de Vénus apparent.
3. On met en place le Soleil, la Terre et Vénus sur son orbite (Vénus est représentée par un cercle suffisamment grand pour construire ensuite la partie éclairée).
4. On calcule la distance Terre Vénus et le rayon apparent de Vénus. On trace ensuite le disque apparent de Vénus.

5. Construction de la partie éclairée sur Vénus

On a fait l'approximation que la limite ombre-lumière est un grand cercle de la sphère Vénus. Ce cercle est perpendiculaire au plan Soleil-Terre-Vénus. Il sera donc représenté du point de vue d'un observateur éloigné, qui le regarde dans une direction perpendiculaire au plan SVT, par un segment perpendiculaire au segment Vénus Soleil. On trace ce segment ($[I_1I_2]$ sur la figure ci-dessous) et on construit le demi cercle indiquant le côté de Vénus dans l'obscurité (en utilisant S', situé à l'opposé du Soleil).

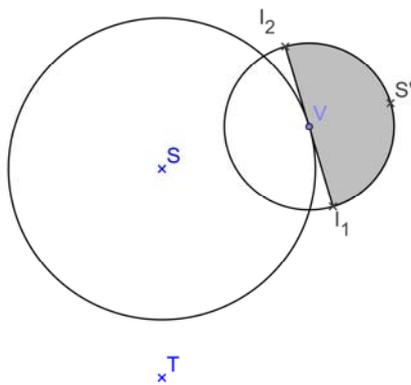


Fig.5. Vue depuis le nord du plan de l'écliptique : le Soleil est en S et V est le centre de Vénus représentée par un cercle surdimensionné. $[I_1I_2]$ indique la limite de la partie éclairée de Vénus (le terminateur).

6. Construction de la partie visible depuis la Terre

On suit la même démarche que pour la partie éclairée sur Vénus mais VS est remplacé par VT .

Le cercle qui limite la partie visible de Vénus est perpendiculaire au plan Soleil-Terre-Vénus.

Il sera donc représenté du point de vue d'un observateur éloigné, qui le regarde dans une direction perpendiculaire au plan SVT par un segment perpendiculaire à VT ($[J_1J_2]$ sur la figure ci-dessous).

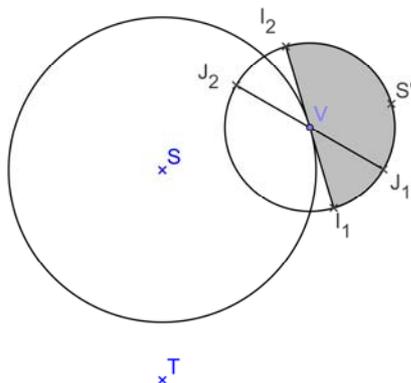


Fig.6. $[J_1J_2]$ indique la limite de la partie visible depuis la Terre.

7. Construction de la limite ombre-soleil sur le disque apparent de Vénus

Du point de vue d'un observateur éloigné qui regarde Vénus dans une direction perpendiculaire au plan SVT , on a dit que la limite ombre lumière peut être considérée comme un grand cercle perpendiculaire au plan SVT ; il est représenté par le segment $[I_1I_2]$.

Pour déterminer de quel côté est la limite ombre lumière, on cherche lequel des points I_1 ou I_2 est le plus proche de la Terre (on l'appelle L) puis on trace son projeté orthogonal sur $[J_1J_2]$.

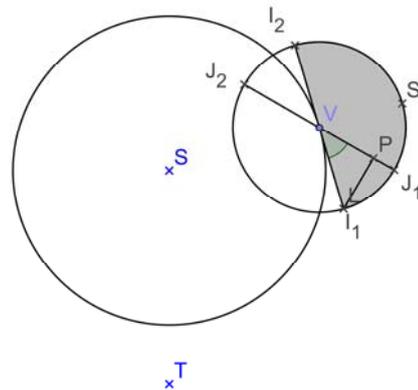


Fig.7. Pour l'observateur terrestre, P est un point de la demi-ellipse indiquant la limite de la partie éclairée de Vénus.

Du point de vue d'un observateur terrestre, on ne voit que la projection d'un demi-cercle sur le disque de Vénus, c'est à dire une demi-ellipse.

Il faut ensuite reporter cette demi-ellipse sur le disque apparent de Vénus. Pour cela, il faudra déterminer lequel des points J_1 ou J_2 est du côté droit vu depuis la Terre (on l'appelle M) ;

- on construit le point P' pour que $V_{ap}P'$ soit égal au rayon apparent de Vénus multiplié par le cosinus de l'angle LVM .

- on trace la demi-ellipse passant par P' .

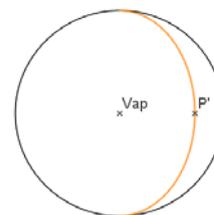


Fig.8. Vue depuis la Terre. Le terminateur sur Vénus est une demi-ellipse.

8. Mise en mouvement de Vénus

On crée un curseur contrôlant le temps avec une plage de 0 à 4 000 jours et un incrément de 1/24.

Vénus sera positionnée sur son orbite par ses coordonnées polaires (il suffit de calculer l'angle qu'on choisit proportionnel au temps). La Terre étant fixe ici, Vénus doit faire un tour en 583,92 jours, sa période synodique.

9. Compléments

On peut ensuite enjoliver, mettre en couleurs, positionner le Soleil par rapport au disque apparent de Vénus...

On peut aussi faire tourner les deux planètes, la Terre et Vénus, autour du Soleil.

Les fichiers sont sur le site clea-astro.eu. Vous le trouverez aussi sur le site de l'observatoire de Lyon avec de nombreuses autres animations :

www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/astrogebra/astrogebra.htm#phvenus.

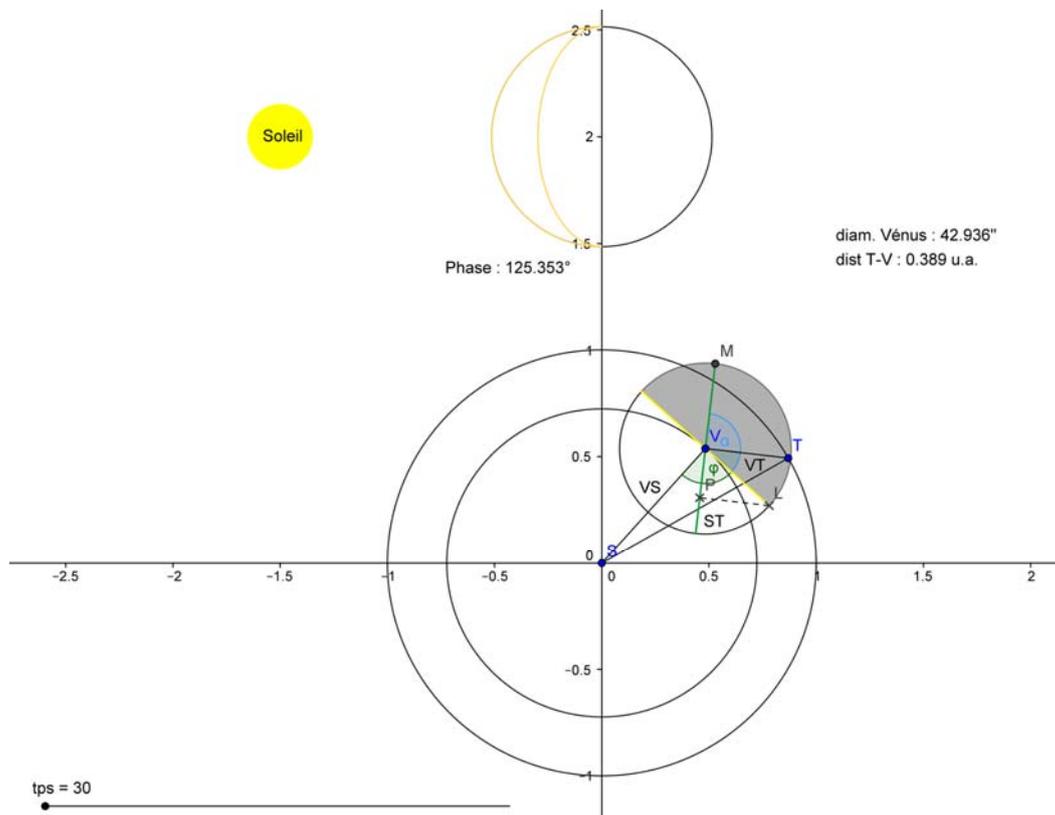


Fig.9. Ensemble de l'écran avec une vue depuis la Terre en haut et une vue depuis le nord du plan de l'écliptique en bas. Quand on déplace le curseur temps, Vénus se déplace sur son orbite et sa phase se dessine au-dessus.

Horizontalement

1. À l'origine de la température élevée sur Vénus (3 mots).
2. Prénom de l'inventeur du pendule. Ils ont leur golfe sur la Lune. Fleuve terrestre.
3. Il doit aussi y en avoir sur Vénus. La première du sol de Vénus date de 1975. À la tête de l'Allemagne.
4. Ils sont nombreux sur Vénus. Nom d'un volcan vénusien.
5. Elle a donné l'IRM. Programme d'exploration de Vénus.
6. L'atmosphère de Vénus en a un élevé. Sur les côtes bretonnes par exemple.
7. D'Ariane par exemple. Vénus y est souvent comparée. Encore un fleuve.
8. À moitié inversé. Grade. Vénus par exemple.
9. Autre fleuve. La première analyse de ce type pour Vénus date du XIX^e siècle.
10. Hypothétique satellite de Vénus. Celui de Vénus est incliné de 177°.

Mots croisés. Vénus

Verticalement

1. Celle de Vénus est limitée, contrairement à celle de Mars.
2. Épris. Plus net quand il n'y a pas d'atmosphère.
3. Centrale. Aucun n'a poussé sur Vénus.
4. Vénus en reste une. Il a aussi photographié Vénus.
5. En Lozère. Il doit être inférieur à 7 dans l'atmosphère de Vénus.
6. Images compressées. UV ou IR par exemple.
7. Ressemble à Mars plutôt qu'à Vénus. Peut être cachée sur la Lune.
8. Restèrent.
9. Préposition. Marier. Soleil égyptien.
10. Célèbre association. 490 °C pour la température de Vénus.
11. Magellan s'en est servi pour cartographier Vénus. Pour Vénus, celui qui est au nord peut être considéré comme au sud.
12. Il y en a eu sur Vénus. Principal composant de l'atmosphère de Vénus après le CO₂.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2					■					■		
3			■						■			
4							■					■
5		■				■						
6							■				■	
7				■						■		
8					■				■			
9		■										
10					■		■					■

Réponses page 40

Une activité autour des phases de Vénus

Olivier Gayrard, Toulouse

Voici quelques extraits de la progression pour le cours élémentaire deuxième année et le cours moyen en sciences expérimentales et technologie, et plus particulièrement des éléments de connaissances et de compétences sur le ciel et la Terre, chapitre « Le mouvement de la Terre (et des planètes) autour du Soleil » :

- Savoir que le Soleil est une étoile, centre d'un système solaire constitué de planètes dont la Terre.
- Repérer et comprendre le mouvement apparent du Soleil au cours d'une journée et son évolution au cours de l'année.
- Savoir interpréter le mouvement apparent du Soleil par une modélisation.
- Connaître la contribution de Copernic et Galilée à l'évolution des idées en astronomie.

À la lecture de ce tableau, nous constatons que le système héliocentrique est présenté de manière ad hoc. Le Soleil en occupe le centre. Une seule issue possible ; nous devons donc comprendre que le mouvement du Soleil n'est qu'apparent, ce qui nous permet de connaître le sens de rotation de la Terre sur elle-même. À partir d'une modélisation matérielle élémentaire du système Terre-Soleil nous interprétons tous les mouvements. Mais gare, ce modèle, qu'il faudrait confronter aux réalités du terrain ou aux résultats expérimentaux, ne l'est qu'au savoir de départ. La maquette du système solaire, qui devrait être une réponse provisoire au problème scientifique, est ici le point final d'un

savoir déjà établi. Aussi, les contributions de Copernic et Galilée semblent-elles bien tardives, ou pire, inutiles.

Je propose une solution partielle et locale. Des collégiens de mon établissement vont intervenir en CM pour présenter les modèles héliocentrique et géocentrique simplifiés. Un groupe représentera Ptolémée, l'autre, Copernic. Sous forme de scénettes, ils examineront différentes hypothèses destinées à expliquer l'alternance des journées et des nuits, et concluront qu'aucune observation familière ne permet de les départager entièrement. L'observation des planètes débouchera sur le même constat ! En plein désarroi, un nouveau groupe, porteur d'une missive de Galilée fera son apparition. Il s'agira de la lettre du célèbre pisan, relatant ses observations des phases de Vénus.

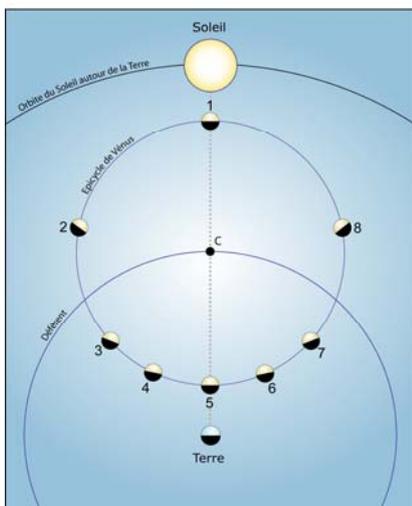
Les jeunes élèves seront alors conviés à manipuler ces deux maquettes, et, s'appuyant sur des photographies des phases de Vénus, ils invalideront le système ptolémaïque. Vénus ne tourne donc pas au-dessous du Soleil (la phase gibbeuse est interdite dans ce système), ni même au-dessus, comme le pensait Aristote, car ce système exclut la possibilité de voir Vénus en croissant, mais bien autour du Soleil. Il est essentiel de faire remarquer que cette conclusion est compatible avec le modèle de Tycho Brahé. Mais ça, c'est une autre histoire.

Complément : à vous de jouer (solutions page 38).

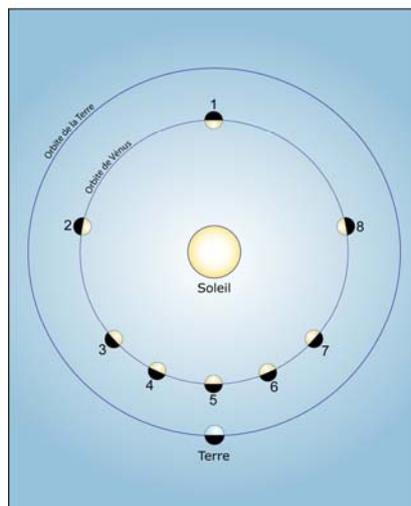
Dans chacun des systèmes, indiquez quelle phase de Vénus on voit depuis la Terre pour chacune des positions de 1 à 8.

Vous pouvez télécharger ces figures sur le site du CLEA pour les imprimer (article Cahiers Clairaut 148).

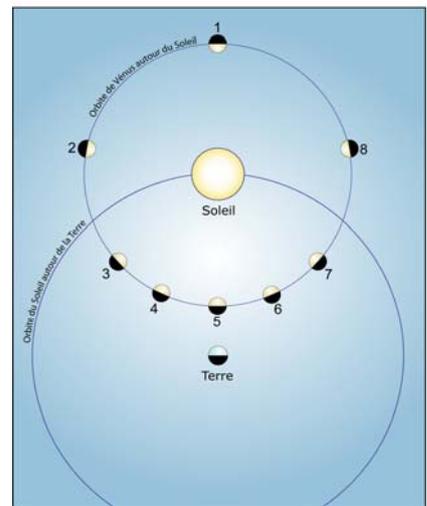
Le système de Ptolémée



Le système de Copernic



Le système de Tycho Brahé



OBSERVATION

La planète Vénus observée par les astronomes amateurs

Christophe Pellier,

vice-Président de la Commission des observations planétaires de la Société astronomique de France.

Si vous avez déjà regardé Vénus au télescope, vous avez vu ses phases mais la planète reste d'une couleur uniforme. Et pourtant certains amateurs arrivent à arracher quelques informations sur l'atmosphère et même sur le sol de la planète !

Certaines planètes du système solaire sont des objets astronomiques qu'il est plutôt facile d'observer depuis la Terre avec un télescope astronomique amateur. Ainsi, les taches d'albédo sur Mars, les bandes nuageuses de Jupiter ou bien les anneaux de Saturne sont des détails que l'on peut admirer à l'oculaire ou bien photographier, même si l'on n'est pas un astronome chevronné.

La planète Vénus, en revanche, est un objet plus difficile d'accès, qui demande un savoir-faire un peu plus affirmé, à la fois à cause de ses caractéristiques physiques en tant que planète, mais aussi à cause de la façon dont on la voit depuis le sol. En dépit de cela, son observation est payante car Vénus est un monde encore mal connu aujourd'hui. Avec leur équipement, les amateurs peuvent espérer y détecter des phénomènes qui semblaient hors de leur portée il y a seulement une dizaine d'années. Comment voit-on Vénus depuis la Terre ? Deuxième planète du système solaire, Vénus circule sur une orbite située entre la Terre et le Soleil ; avec Mercure, elle est donc ce que l'on appelle une planète « intérieure ». À l'opposé des planètes « extérieures » (à partir de Mars), les planètes intérieures ne sont jamais visibles en milieu de nuit, car pour cela il faut évidemment que la Terre puisse se trouver entre la planète et le Soleil. L'angle de vision Terre/Vénus/Soleil est au maximum de $45^{\circ 1}$ et cela a une conséquence immédiate : la planète présente une phase (c'est à dire la fraction de globe non éclairée par le Soleil) très prononcée. Comme la Lune, Vénus présente toute les phases possibles : pleine, lorsqu'elle est située de l'autre côté du Soleil, en quartier, lorsqu'elle atteint son élongation maximale de 45° , et « nouvelle » quand elle passe entre nous et le Soleil, elle est alors pratiquement invisible.

Cette élongation assez limitée rend plus difficile l'observation, car Vénus n'étant jamais très loin du Soleil dans le ciel, on ne dispose que de peu de temps

pour la voir lorsqu'il fait nuit. De plus, la phase entraîne une diminution de la visibilité des détails proches du terminateur, où l'angle d'éclairage par le Soleil est faible, ce qui gêne la capacité de l'œil (ou d'une caméra) à détecter de faibles variations de contrastes.

Que peut-on observer sur Vénus ?

Vénus est connue pour posséder une atmosphère en « hyper-rotation », c'est à dire une atmosphère qui tourne dans son ensemble plus rapidement que ne le fait le globe solide. Ce dernier est extrêmement lent et rétrograde : un jour sidéral sur Vénus équivaut à 243 jours terrestres. De son côté, l'atmosphère tourne en seulement trois ou quatre jours (la vitesse dépend de l'altitude). Le fonctionnement de cette atmosphère mérite que l'on s'y arrête, car elle possède des caractéristiques propres que l'on ne retrouve pas sur les autres planètes, et qu'il est possible de détecter avec un télescope amateur.

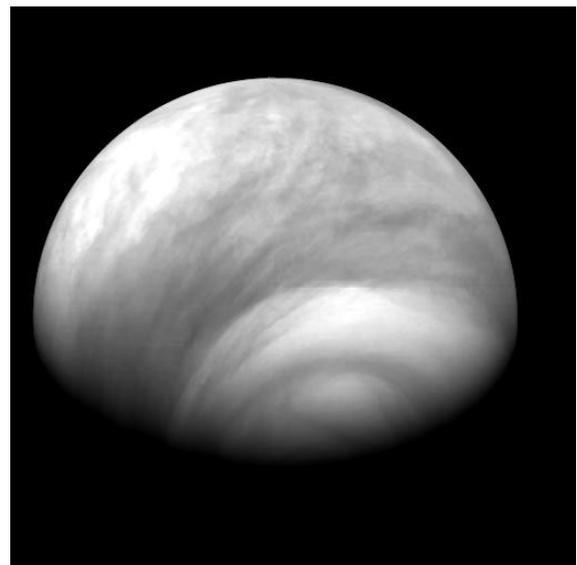


Fig.1. Le vortex polaire sud de Vénus, photographié le 4 août 2007 en ultraviolet par la sonde Venus Express, apparaît comme une "calotte" blanche en bas de l'image. Image copyright European Spatial Agency.

¹ L'élongation maximale de Vénus varie entre 45° et $47,8^{\circ}$ (voir notions de base).

La circulation atmosphérique sur Vénus est d'abord gouvernée par la présence de puissants vortex (de grands tourbillons) au-dessus de chacun des deux pôles. Ils entraînent les nuages de l'équateur vers les régions polaires par des « bras » en spirales, car le gradient de vent s'accélère progressivement des basses latitudes vers les hautes latitudes, vers les vortex.

Ces mouvements de nuages peuvent être détectés au télescope principalement dans les très courtes longueurs d'onde, car ils contiennent un composant chimique inconnu qui absorbe le proche ultraviolet et le violet/bleu profond. Ils forment alors sur le disque vénusien des formes couchées en longitude dites en V, en Y, ou encore en Ψ (Psi grec). Ces formes s'expliquent facilement une fois que l'on connaît le schéma de circulation globale : les « branches » de ces lettres sont tout simplement les bras spiralés montant vers les vortex polaires, mais vus de côté, et non du dessus.

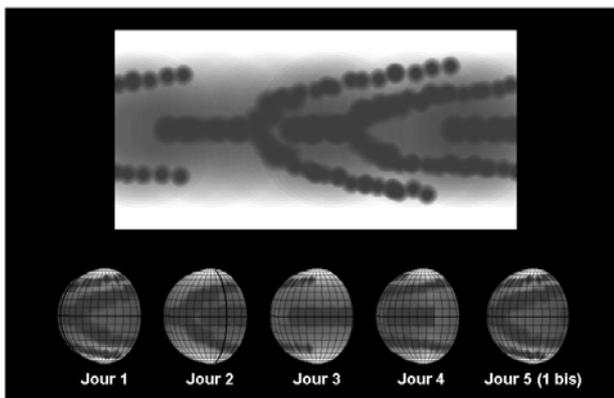


Fig.2. Simulation des formes nuageuses observables sur Vénus. Les bras montent de l'équateur vers les pôles en diagonale, en suivant l'accélération progressive des vents zonaux (en longitude) lorsque la latitude augmente. Ces bandes diagonales expliquent pourquoi on peut distinguer un Y couché (jours 1 et 5), ou bien un Psi (jour 2).

La surface de la planète est masquée en permanence par les nuages, à un tel point que la cartographie que l'on connaît aujourd'hui de cette surface n'a pu être réalisée qu'à l'aide d'un radar altimétrique, embarqué au début des années 1990 par la sonde Magellan qui était chargée de ce travail.

La caractéristique essentielle à retenir de cette surface sont les conditions littéralement infernales qui y règnent : la température au sol excède les 400 degrés Celsius et la pression atmosphérique y est cent fois plus élevée que sur Terre !

Cela mérite que l'on s'y arrête en astronomie amateur, car c'est cette température très élevée qui permet à l'observateur disposant d'une caméra numérique et d'un filtre infrarouge de détecter, dans une longueur d'onde bien déterminée, le rayonnement thermique du sol vénusien (lire le paragraphe suivant).

Quelles sont les techniques d'observation ?

Au télescope, Vénus se présente au premier abord comme une planète d'un éclat intense, éblouissant lorsque le ciel est bien sombre. La planète est en effet entièrement recouverte d'une couche permanente et complète de nuages d'acide sulfurique qui possèdent un albédo important : ils reflètent un pourcentage très élevé de la lumière reçue du Soleil. C'est la raison pour laquelle il est plus intéressant d'observer quand le fond de ciel est encore brillant, de façon à diminuer le contraste entre ce dernier et la planète. Les meilleurs moments se rencontrent en plein jour dans l'heure qui suit le lever du Soleil, ou bien celle qui précède son coucher ; mais il est également tout à fait possible d'observer en milieu de journée. La planète est alors relativement facile à trouver dès lors qu'on utilise un instrument installé sur une monture équatoriale, et peut même être vue à l'œil nu si l'on se protège de la lumière du Soleil.

L'observation visuelle de détails sur le disque de la planète au télescope est possible, mais difficile. Le disque apparaît dépourvu de tout détail, d'un blanc lisse, homogène et éblouissant ; et en effet, en lumière visible, les nuages de Vénus n'absorbent quasiment aucune longueur d'onde (d'où leur teinte). Pour parvenir à distinguer les fameuses formes en V ou Y dont on a parlé, il est nécessaire d'utiliser un filtre violet Wratten 47, car les nuages qui contiennent le composant responsable de l'apparition des taches sombres en UV absorbent également la lumière violette accessible à l'œil humain (avant 450 nanomètres de longueur d'onde). Le contraste reste faible, mais leur détection devient possible. Les régions polaires de Vénus correspondant aux vortex sont les seules qui ressortent assez bien, car elles ne contiennent pas cet absorbeur inconnu, et elles sont donc nettement plus brillantes que le reste du disque.

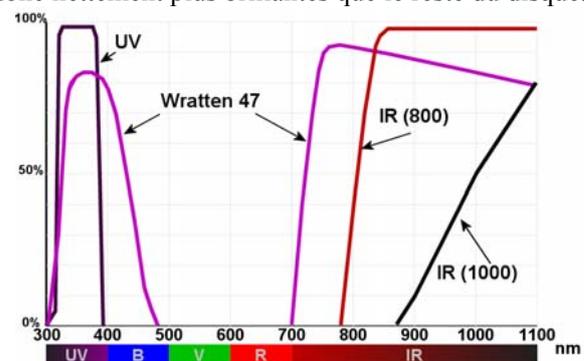


Fig.3. Courbes de transmission des filtres les plus utiles pour l'observation de Vénus : ultraviolet (UV), violet (Wratten 47, possédant deux bandes de transmission, celle en infrarouge devant être bloquée en photographie numérique), infrarouges passant à partir de 800 nanomètres pour l'observation des nuages côté jour de Vénus, à partir de 1 000 nanomètres pour l'observation du signal thermique de la surface côté nuit.

C'est en imagerie numérique que le monde de Vénus s'ouvre vraiment à l'astronome, car les caméras que les amateurs utilisent sont sensibles à des longueurs d'onde que l'œil ne voit pas, à savoir le proche ultraviolet (entre 300 et 400 nanomètres) et le proche infrarouge (de 700 à 1 000 nm). Il faut utiliser une caméra à capteur noir et blanc, et des filtres transmettant uniquement les longueurs d'onde citées. Avec un filtre UV, le contraste des formes en V ou Y est maximal (il est également possible d'utiliser le Wratten 47 visuel, à condition de bloquer la fuite infrarouge du filtre). Avec un filtre IR, on parvient à détecter d'autres types de nuages, qui sont situés une dizaine de kilomètres plus bas dans l'atmosphère que ceux visibles en UV. Il est même possible de tenter de calculer la durée de la rotation de cette atmosphère, en mesurant la position d'un détail sur plusieurs images prises à des intervalles réguliers : en prenant comme référence le système de longitude de la surface de Vénus, on détecte le déplacement de ce détail, et on en déduit une vitesse de rotation de l'atmosphère. En effet, la rotation du globe étant extrêmement lente, on considère qu'au cours du laps de temps couvert par toutes les images (quelques heures en temps terrestre), le déplacement observable est uniquement celui de l'atmosphère, et non celui de l'atmosphère plus la surface, ce qui nous obligerait à soustraire la vitesse de rotation de cette dernière.

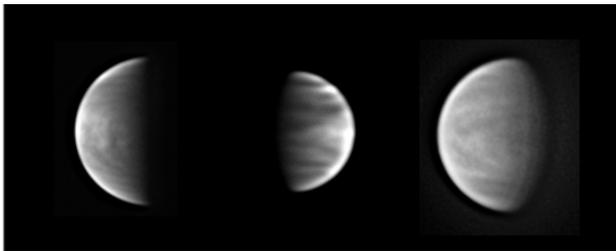


Fig.4. Images de Vénus en ultraviolet et violet.
De gauche à droite :
- lunette de 150 mm par Christian Viladrich (2012) ;
- télescope Cassegrain de 600 mm de l'observatoire Astro-Queyras par Giuseppe Monachino (2012) ;
- Cassegrain de 300 mm par Christophe Guillou (2007). Elles sont prises en UV sauf celle de C.Guillou qui est réalisée avec le W47 doublé d'un filtre de blocage des infrarouges.

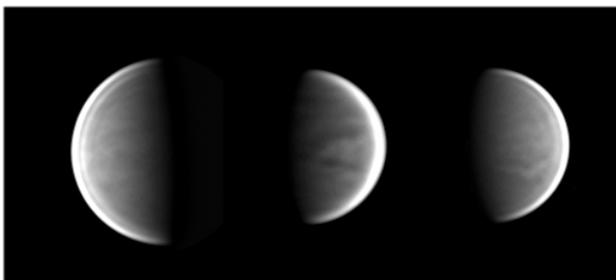


Fig.5. Images de Vénus en infrarouge (2012), par C.Pellier avec un télescope Gregory de 250 mm, sauf au milieu, prise de vue par G.Monachino au 600 AstroQueyras.

Quant au rayonnement thermique de la surface dont on a parlé plus haut, il peut être photographié à l'aide

d'une caméra noir et blanc équipée d'un filtre infrarouge transmettant aux alentours d'un micromètre de longueur d'onde (soit 1 000 nm). C'est en effet là que la surface émet de la lumière en raison de sa température, et c'est également là que le dioxyde de carbone qui compose l'essentiel de l'atmosphère vénusienne devient translucide, permettant ainsi à la lumière de s'échapper dans l'espace (via une bande d'émission dans le spectre du CO₂). Bien entendu, il est impossible de détecter ce très faible signal s'il est en concurrence avec la lumière solaire réfléchi par les nuages : c'est du côté nocturne de la planète, quand la phase de cette dernière est en croissant, que l'on peut réussir cette très curieuse observation. Des taches sombres sont discernables dans cette lueur : il s'agit des montagnes de Vénus, qui émettent moins de signal car la température du sol diminue avec l'altitude.

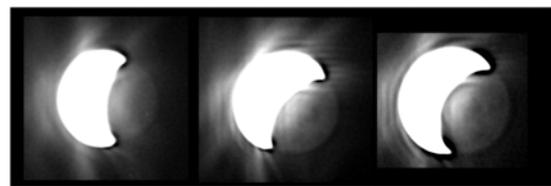


Fig.6. Le rayonnement thermique de la surface de Vénus côté nocturne. En surexposant de façon délibérée le croissant éclairé par une pause de plusieurs secondes, il est possible de faire apparaître ce très faible signal lumineux. Les taches sombres visibles ici ont été corrélées avec la position des massifs montagneux Phoebe Regio et Beta Regio. Images C.Pellier en 2004 avec un télescope Schmidt-Cassegrain de 355 mm et un filtre IR 1000.

Les techniques de photographie et de traitement

La photographie de Vénus est relativement facile en raison de la très grande quantité de lumière disponible. On utilisera une caméra vidéo prévue pour l'imagerie planétaire (il existe plusieurs modèles), opérant à une cadence de 50 à 100 images par seconde et ce, pendant trois à cinq minutes. Ceci permet d'obtenir plusieurs milliers d'images brutes qui devront ensuite être alignées, sélectionnées et additionnées dans des logiciels comme Registax ou Autostakkert. Il est nécessaire ensuite d'appliquer dans des logiciels de traitement d'images des filtres de renforcement des contrastes afin de faire apparaître les détails.

En 2015, la planète Vénus sera observable dans de très bonnes conditions depuis l'hémisphère nord de la Terre. Elle présente deux élongations favorables qui permettront de la voir haute dans le ciel, l'une au printemps (visible le soir) et l'autre à l'automne (le matin).

Christophe Pellier a dirigé la rédaction de « Astronomie planétaire », un ouvrage collectif qui doit paraître début 2015 aux éditions Axilone. Il vous permettra de préparer les observations de Vénus dans les meilleures conditions.

Christophe Pellier est vice-Président de la Commission des observations planétaires de la Société astronomique de France. ■

Vénus dans l'Antiquité

Jean-Luc & Maryse Fouquet, île de Ré

Les auteurs nous mènent à la rencontre de Vénus dans l'Antiquité et à travers diverses civilisations. Déjà à l'époque, certains pensaient que Vénus tournait autour du Soleil.

Les civilisations anciennes avaient remarqué un astre qui brillait d'un vif éclat à l'ouest au début de nombreuses nuits et un autre, non moins lumineux, visible souvent à l'est avant l'aurore. Comment « l'étoile du soir » et « l'étoile du matin » sont devenues qu'une seule et même entité ? Comment en est-on venu à penser que Vénus ne pouvait que tourner autour du Soleil ?

Dans le ciel des Grecs et des Romains

Les Grecs de l'époque homérique utilisaient deux noms différents pour désigner les deux « étoiles ». Après la découverte de l'unicité de ces deux astres, généralement attribuée à Pythagore¹, voire pour certains écrivains à Parménide, fut utilisé le seul mot de Phosphoros, « porteur de lumière », pour désigner aussi bien l'étoile du soir que celle du matin.

Mais dans le langage courant, la distinction entre les deux formes d'apparition de Vénus subsista longtemps en Grèce. De la tradition populaire, elle passa dans la littérature où l'étoile du matin reçut le nom de *Eoüs*, « qui appartient à l'aurore », ou encore *Phosphorus*, « le porte-lumière » tandis que *Hesperus* désignait l'étoile du soir.

Les premiers Latins, eux aussi, connaissaient les deux astres mais ignoraient, sans doute, leur identité. On s'accorde à considérer que la dénomination latine la plus ancienne pour l'étoile du soir est *Vesperugo*, vieux nom féminin que Plaute met dans la bouche de Sosie² et attesté également par Varron. On trouve ensuite surtout en poésie chez Virgile ou Catulle le terme de *Vesper* dont le premier sens est « le soir » et qui a ensuite désigné la planète. L'emprunt direct au grec *Hesperus* ou *Hesperos* qui apparaît presque unique-ment chez les poètes est le plus fréquent.

Pour désigner l'étoile du matin, le mot latin le plus ancien est « *Iubar* » nom masculin, quelquefois neutre dont l'étymologie a donné lieu à plusieurs interprétations. Ce mot a été rattaché à la même racine que celle de « *Iuba* » qui, autour de l'idée de mouvement, peut prendre deux sens : « être dans une agitation

incessante » ce qui justifierait la dénomination de « lumière vacillante » ou aussi le sens de « mettre en mouvement ». *Iubar* serait-il celui qui mettrait en mouvement tout le mécanisme céleste qui produit l'arrivée de l'aurore et du jour ? C'est le sens de « metteur en mouvement du ciel matinal » qui est retenu par André Le Bœuffe pour cet astre qui se lève à l'Orient vers la fin de la nuit. À côté du mot proprement latin s'est développé l'emploi du nom, calqué sur le grec, *Lucifer* (de lux, la lumière + fer, de ferre : porter) : « celui qui apporte la lumière » (cf. Cicéron, Pline) qui sera de loin le mot le plus utilisé à n'importe quelle époque de la latinité.

De l'étoile aux deux visages à Vénus

Si cette dualité de l'astre fut maintenue abusivement dans la littérature jusqu'à une époque tardive, la planète, qui portait déjà le nom de Vénus dès la période classique, avait donc été identifiée.

C'est grâce à l'observation de Vénus ainsi que de Mercure dont la singularité est de ne pas s'écarter du Soleil de plus de 48° et 22° respectivement³ que naît l'idée, reprise d'Héraclide du Pont par Vitruve et Martianus Capella que ces planètes tournaient autour du Soleil et non autour de la Terre. « C'est un des apports les plus curieux de nos textes », dit Jean Soubiran⁴. On retrouvera cette évocation encore superficielle et sans rigueur des Romains pour l'héliocentrisme, notamment chez Cicéron et Macrobe qui dotent le Soleil du privilège de « dux » (guide) et le magnifient en « rector »⁵. L'expression, toutefois équivoque, de Cicéron qui fait de Mercure et Vénus « les compagnes dociles du soleil » atteste peut-être de la prise en compte d'une hypothèse avancée sur l'ordre et le mouvement problématiques des planètes dans l'Univers en vertu de laquelle Vénus se verrait attribuer une autre place. Cette place et ce rôle donné au Soleil sembleraient confirmer qu'à l'ordre égyptien, qui mettait le Soleil sur la deuxième orbite, les

³ Pline II, 38-39, 72 et Mart. Cap, VIII 88000, 882.

⁴ Latiniste, co-auteur de *L'astronomie dans l'Antiquité classique, Actes du colloque tenu à l'Université de Toulouse -le Mirail 21-23 octobre 1977 Les Belles Lettres*, colloque auquel a participé aussi André Le Bœuffe.

⁵ Cic, *Somn. Scip.* IV 2; Macrobe, *Somn. Scip.* I 19-20.

¹ Pline, N. H., II, 37.

² Amph. 273-275.

Romains préféraient l'ordre chaldéen, qui plaçait le Soleil au milieu des planètes⁶.

Les écrivains portent un réel intérêt au déplacement des planètes comme en témoignent les « exclamations lyriques et comparaisons vulgarisatrices » qu'ils multiplient pour les décrire. Chez Cicéron, Vitruve, Hygin ou Macrobe, ces astres « luttent » contre le mouvement du ciel, s'écartent de l'écliptique, accélèrent ou ralentissent jusqu'à marquer des stations et même des rétrogradations et Vénus participe de cet intérêt.

Vénus dans le panthéon du ciel

À cause sans doute de son éclat particulier, Vénus est associée à la déesse de l'amour dans de nombreuses cultures.

Ainsi, dès l'origine de notre civilisation, à Sumer, la planète s'incarnait en Inanna, déesse ailée de l'amour et de la guerre, puissance de la vie et de la mort. Inanna, qui signifie « la dame du ciel » ou « la mémoire du temps » est la divinité féminine la plus intéressante et la plus populaire de la Mésopotamie antique. Vierge guerrière souvent représentée avec son arc et son carquois, prônant tantôt l'amour libre tantôt la discorde, Inanna est symbolisée dans les bas-reliefs par une étoile.

La religion mésopotamienne au I^{er} siècle avant notre ère est un héritage des Sumériens : Inanna est donc devenue Ishtar, déesse la plus vénérée des Mésopotamiens. Elle hérite des attributs d'Inanna : elle est donc déesse de l'amour, de la discorde et de la guerre. Elle a été, de plus, assimilée à la divinité babylonienne Delebat. Enfin, ayant absorbé toutes les autres divinités féminines, notamment Ninhurshag, elle est devenue aussi la déesse de la fécondité et de la fertilité.

« La période d'invisibilité de la planète Vénus (l'étoile d'Ishtar) ainsi que, dans la nature, l'engourdissement momentané de l'instinct de reproduction, sont imaginés sous la forme ou comme la conséquence d'un séjour de la déesse de l'amour dans le pays des morts »⁷. Ishtar a ensuite transmis tous ces traits à la déesse phénicienne Ashtarté.

Ce sont probablement les premiers Pythagoriciens qui, au V^e siècle, ont introduit dans le monde hellénique la nomenclature des « astres errants ». Les Grecs se sont inspirés des Babyloniens. Comme ces derniers désignaient chaque « astre errant » par le nom d'une divinité à laquelle il était consacré, les Grecs, à leur tour, identifièrent les dieux sémitiques avec ceux de l'Olympe. C'est ainsi que l'astre d'Ishtar, déesse de l'amour fut attribué à Aphrodite qui reçut les attributs de la déesse⁸.

En Égypte, la planète est placée sous la protection d'Isis comme l'atteste Plin. En Phrygie, la divinité tutélaire fut Cybèle. Les Chaldéens l'appelaient aussi *Dil-bat*, « la messagère » ; les Hébreux *Helel*, « la brillante » ; les Chinois, *Tai Pé*, « la belle au visage blanc ».

Par Macrobe⁹, nous apprenons que c'est sans doute à l'époque de Varron que les Romains ont pris connaissance de la nomenclature hellénique des divinités planétaires. Ils substituèrent aux noms grecs ceux de leurs dieux correspondants et l'astre d'Aphrodite fut attribué à Vénus (racine *wen*, désirer), parfois à Héra ou Junon¹⁰. Cette appellation, désignation aujourd'hui internationale de la planète, s'est répandue dans les textes latins surtout au I^{er} siècle av. J.-C.¹¹

Aphrodite est la déesse de l'amour, identifiée ensuite à une très vieille divinité latine, Vénus, longtemps considérée comme présidant à la végétation et aux jardins. Il existe deux versions différentes concernant sa naissance ; tantôt on en fait la fille de Zeus et de Dioné, et tantôt une fille d'Ouranos dont les organes sexuels, tranchés par Cronos, tombèrent dans la mer et engendrèrent la déesse. Elle protégeait l'amour et les amants et son occupation favorite consistait à provoquer les amours des dieux et des mortels. Elle-même eut de nombreux amants, comme Arès dont elle eut quatre enfants : Éros, Déimos, Phobos et Harmonie.

Dans la tradition chrétienne, Jésus est comparé à l'étoile du matin : en effet le retour de cette dernière annonce la fin de la nuit de même que, avec la venue du Christ, le règne de Dieu sera visible sur terre. Jésus est aussi pour le fidèle, le bon berger, cette étoile qui le guide sur le chemin obscur.

Il est intéressant de noter que, dans la Bible comme dans bon nombre de textes sacrés d'autres religions, les symboles rattachés à Vénus sont doubles. Chez les Babyloniens, Ishtar d'Akkad est la Vénus masculine, étoile du matin et représente l'amour passionné et agressif tandis que l'étoile du soir, Ishtar d'Ourouk est la Vénus féminine et incarne l'amour tendre. Chez les Cananéens, Vénus était Chahar (le dieu de la guerre) le matin et Shalim (le dieu de la paix) le soir. Pour les Grecs, elle est tour à tour Phosphoros et Hesperos et pour les Romains, Lucifer et Vesper.

Pour les Chrétiens, Lucifer, le porteur de lumière a une résonance sinistre. Lui aussi est double : c'est l'ange déchu, celui qui était la plus belle des créatures de Dieu et qui, par orgueil, s'est révolté contre lui. ■

Faute de place, nous n'avons pu passer qu'une partie du texte des auteurs. Vous pouvez le retrouver en entier sur le site du CLEA (article Cahiers Clairaut 148).

⁶ Cic, Diu. II 91, Vitr., IX; Hygin, IV 14; Plin., II 34-41.

⁷ René Labat, Les Religions du Proche-Orient.

⁸ Aristote, *Métaphysique* 1073.

⁹ Sat III 12, 16.

¹⁰ Hygin, Astr., 2, 42.

¹¹ Cic. *Scip. Somn.*

LE COIN DES PETITS CURIEUX

Vénus dévoilée

ALEXIS – Je suis content de te voir. Tu m'avais dit que c'était Sirius l'étoile la plus brillante visible depuis l'hémisphère nord. Pourtant, mon cousin m'a dit qu'au printemps il avait vu le matin une étoile bien plus brillante que Sirius.

ÉMILIE – Elle était dans quelle constellation ?

ALEXIS – Je ne sais pas, mais quand il commençait à faire jour, elle était encore visible, mon cousin a fait une photo. Il m'a dit que c'était l'étoile du berger.

ÉMILIE – Ah ! Je vois.

ALEXIS – Tu la connais aussi ?

ÉMILIE – Oui, mais il faut faire attention aux noms que l'on donne aux objets. Ce n'est pas parce que l'on dit « étoile du berger » que c'est une étoile.

ALEXIS – Mais alors pourquoi on l'appelle comme cela ?

ÉMILIE – En fait cet astre est le premier que l'on voit après le coucher du Soleil. C'est l'objet du ciel le plus brillant après le Soleil et la Lune. Une légende dit que ce nom lui a été donné car lorsque l'on voit cet astre le soir c'est qu'il va faire nuit et les bergers doivent alors rentrer leurs moutons.

ALEXIS – Mais si ce n'est pas une étoile qu'est-ce que c'est ?

ÉMILIE – C'est une planète, c'est Vénus.

ALEXIS – Et alors cette planète n'est pas visible que le soir puisque mon cousin l'a vue le matin.

ÉMILIE – Effectivement, elle est visible aussi le matin, avant le lever du Soleil. D'ailleurs il y a plusieurs millénaires, les hommes pensaient qu'il y avait deux planètes.

ALEXIS – Comment savaient-ils que c'était une planète et pas une étoile ?

ÉMILIE – Il suffit d'observer. Tu peux le faire toi-même. Si tu l' observes plusieurs jours de suite, tu verras qu'elle se déplace parmi les étoiles alors que les étoiles gardent les mêmes positions les unes par rapport aux autres. Les anciens Grecs appelaient ces objets des astres errants d'où le nom de planète qui vient du grec *planètès* (errant).

ALEXIS – Et c'est une petite planète.

ÉMILIE – Non, c'est parce qu'elle est loin que tu la vois petite.

ALEXIS – Oui, c'est vrai tu me l'a déjà expliqué pour les étoiles.

ÉMILIE – Elle a à peu près la taille de la Terre.

ALEXIS – Et qu'est-ce qu'il y a dessus ?

ÉMILIE – Regarde cette photographie de Vénus, que vois-tu ?

ALEXIS – C'est tout lisse, avec des couleurs différentes. Il n'y a pas de cratères !

ÉMILIE – Ce que tu vois ce n'est pas le sol, mais les nuages qui sont dans l'atmosphère.

ALEXIS – Est-ce qu'il y a aussi un sol solide ?

ÉMILIE – Oui, et sur lequel il y a des cratères et des volcans.

ALEXIS – Comment tu sais cela avec tous les nuages qu'il y a ?

ÉMILIE – Dans les années 1960-1970, les hommes ont envoyé des engins se poser sur la planète, mais les premiers n'ont pas fonctionné longtemps

ALEXIS – Et pourquoi ?

ÉMILIE – Car sur Vénus la pression atmosphérique est cent fois supérieure à ce qu'elle est sur Terre. C'est la pression que l'on aurait à peu près à mille mètres de profondeur dans l'océan.

ALEXIS – On aurait du mal pour respirer.

ÉMILIE – Ce n'est pas tout, cette atmosphère est constituée à 96% de dioxyde de carbone et il y a aussi des gouttelettes d'acide sulfurique.

ALEXIS – Ce serait donc impossible d'y vivre.

ÉMILIE – Et il y a d'autres problèmes. D'après toi, quelle est la planète la plus proche du Soleil, Vénus ou la Terre ?

ALEXIS – Ça je sais. *Mon Vieux Théâtre M'A Souvent Joué Une Nouvelle Pièce*. C'est un vieux monsieur du CLEA qui me l'a appris et ça marche, même si maintenant Pluton est classée parmi les planètes naines. Mercure est la plus proche du Soleil, après c'est Vénus et ensuite la Terre.

ÉMILIE – Très bien cette phrase. Alors d'après toi quelle est celle qui reçoit le plus de rayonnement du Soleil ?

ALEXIS – C'est Mercure et ensuite c'est Vénus et la Terre.

ÉMILIE – La température sur Mercure varie de 430 °C à -180 °C et sur Terre de 57 °C à -93 °C. Sur Vénus quelles températures pourrait-on avoir ?

ALEXIS – Oh ! là là ! Je dirai entre 250 °C et -150 °C.

ÉMILIE – Sur Vénus la température varie de 500 °C à 450 °C.

ALEXIS – Encore un piège !

ÉMILIE – Oui un piège à calories. Je t'ai dit que l'atmosphère de Vénus était constituée surtout de dioxyde de carbone. Tu as entendu parler de ce gaz sur Terre.

ALEXIS – Oui, c'est un gaz à effet de serre.

ÉMILIE – Sur Vénus il y a un énorme effet de serre.

ALEXIS – Encore une raison pour ne pas aller y vivre ! À cette température, il n'y a pas de mers... Et combien d'engins on a envoyé sur Vénus pour connaître toute sa surface ?

ÉMILIE – Non ce sont des sondes qui ont tourné ou qui tournent encore autour de Vénus qui ont réalisé de nombreuses images.

ALEXIS – Mais tout à l’heure tu m’as dit qu’il y avait beaucoup de nuages.

ÉMILIE – C’est vrai, mais dans ce cas on utilise des radars qui nous permettent de dévoiler la surface de la planète.

ALEXIS – Les radars voient à travers les nuages ?

ÉMILIE – Oui. ... Comment t’expliquer cela ? Tu connais le phénomène de l’écho ?

ALEXIS – Ah ! Oui, j’aime faire cela devant les falaises. Je crie et après la falaise me renvoie ma voix avec un décalage.

ÉMILIE – C’est cela. Si tu tapes dans tes mains devant une falaise et que le son revient au bout d’une seconde, cela veut dire que tu es placé à environ 170 m de la falaise.

ALEXIS – Comment tu peux savoir ?

ÉMILIE – Parce que je connais la vitesse du son. Un son parcourt 340 mètres en une seconde.

ALEXIS – Et pourquoi tu m’as dit 170 m.

ÉMILIE – Parce que le son est parti de tes mains, il s’est propagé jusqu’à la falaise et il est revenu. Il a donc fait un aller-retour en une seconde soit 340 mètres. La falaise est donc à 170 mètres.

ALEXIS – Alors un radar émet des sons ?

ÉMILIE – Non il émet des ondes électromagnétiques qui passent à travers les nuages et qui se déplacent à la vitesse de la lumière 300 000 kilomètres par seconde. La sonde qui tourne autour de Vénus envoie ces ondes vers la surface de la planète. Celles-ci se réfléchissent à la surface et sont récupérées par la sonde. Si on mesure avec précision la durée du trajet aller-retour, on peut comme pour le son calculer la distance entre le sol et la sonde. Ainsi on peut déceler la présence de montagnes.

ALEXIS – C’est précis comme mesures ?

ÉMILIE – Par exemple, la sonde Magellan a cartographié la surface de Vénus avec une définition de 150 mètres et en altitude une précision de 30 mètres.

ALEXIS – Ouah ! C’est fort. Qu’est qu’il y a à la surface de la planète ?

ÉMILIE – Il y a surtout des plaines, mais il y a aussi des sommets de 10 000 mètres et des volcans éteints de près de 5 000 mètres d’altitude.

ALEXIS – Sur Terre, on mesure l’altitude par rapport au niveau de la mer, mais sur Vénus il n’y a pas de mer, alors comment fait-on pour mesurer l’altitude ?

ÉMILIE – C’est à partir d’un rayon moyen qui est de 6051,84 kilomètres que l’on mesure les altitudes. Il y a d’ailleurs de grandes plaines qui sont en fait des

creux. Leur altitude est de -2 900 mètres. Cela veut dire qu’elles sont sous le niveau moyen.

ALEXIS – Est-ce que comme la Terre Vénus est aplatie aux pôles ?

ÉMILIE – Non, Vénus est une sphère presque parfaite. Son rayon polaire est pratiquement égal à son rayon équatorial.

ALEXIS – Et pourquoi puisqu’elle a la même taille que la Terre ?

ÉMILIE – La Terre est aplatie aux pôles car lorsqu’elle s’est formée, elle n’était pas complètement solidifiée et surtout, elle tournait vite, ce qui a produit son aplatissement. Elle fait un tour sur elle-même par rapport aux étoiles en combien de temps ?

ALEXIS – Vingt-quatre heures.

ÉMILIE – Un petit peu moins 23 h 56 min, tandis que Vénus c’est en 243 jours, elle tourne très lentement, ce qui fait qu’elle ne s’est pas déformée.

ALEXIS – Pourquoi m’as-tu dit que la Terre ne tournait pas en 24 heures ?

ÉMILIE – Et toi, comment ferais-tu pour mesurer la durée pendant laquelle la Terre fait un tour sur elle-même ?

ALEXIS – Je prendrais une montre, ... et comment je peux savoir quand la Terre a fait un tour ?

ÉMILIE – Il te faut un repère extérieur à la Terre. Par exemple le Soleil ou une étoile.

Ce soir, tu fixes un tube dans la direction d’une étoile d’Orion et tu attends demain pour que l’étoile revienne dans le tube. Il te faudra attendre 23 h 56 min.

ALEXIS – Mais je peux le faire aussi avec le Soleil en repérant au sol, l’ombre d’un bâton vertical.

ÉMILIE – Et tu attends le lendemain que l’ombre revienne au même endroit.

ALEXIS – Il se sera alors écoulé 23 h 56 min.

ÉMILIE – Non, il se sera écoulé 24 h ou presque.

ALEXIS – Pourquoi cette différence ?

ÉMILIE – Chaque jour tu vois les étoiles, le Soleil, la Lune se déplacer d’est en ouest. Ceci est dû à la rotation de la Terre. En même temps, le Soleil, se déplace parmi les étoiles d’ouest en est, au cours de l’année. Il fait un tour (360°) en un an. De combien se déplace-t-il par jour ?

ALEXIS – Euh ! ... De 360 divisé par 365.

ÉMILIE – Donc pratiquement un degré. Dans ton expérience, pour que l’étoile revienne il faut attendre 23 h 56 min. Par contre pour le Soleil il faut attendre 23 h 56 min, mais il faut aussi rattraper le Soleil qui s’est déplacé vers l’est d’où les 24 h.

ALEXIS – OK j’ai compris.

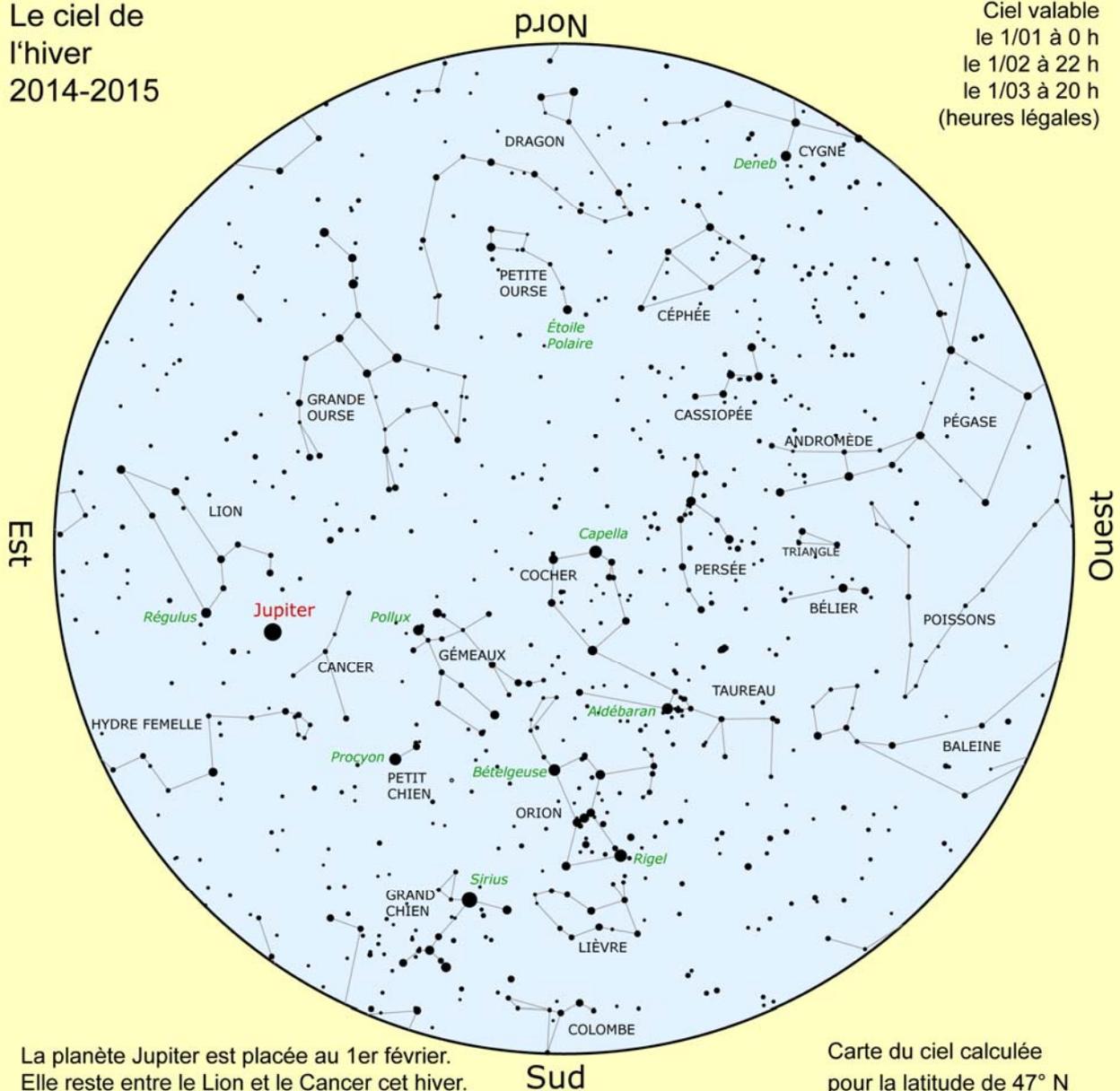
Alexis détourne le regard et lance « à bientôt ».

Jean Ripert ■

LE CIEL DE L'HIVER 2014-2015

Le ciel de
l'hiver
2014-2015

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 entre le Lion et le Cancer cet hiver.

Carte du ciel calculée
pour la latitude de 47° N

Visibilité des planètes

Avec un horizon ouest dégagé, vous trouverez facilement **Mercury** à côté de **Vénus** (la plus lumineuse des deux) autour du 10 janvier le soir.

Vénus est facile à trouver le soir cet hiver. Elle se couche 1 h après le Soleil fin décembre et 3 h après fin mars.

Mars est encore visible le soir mais continue à s'éloigner de la Terre.

Jupiter passe à l'opposition le 6 février. À observer toute la nuit sans modération avec ses satellites et leurs phénomènes mutuels (voir page 30).

Saturne est observable le matin dans la Balance puis le Scorpion.

Quelques événements (heures légales)

22/12 Solstice d'hiver à 0 h 02 (c'est donc le 21 en T.U.).

04/01 Périhélie, la Terre au plus près du Soleil.

14/01 Nouvel an dans le calendrier julien.

21/01 (soir) Rapprochement Lune Mercury Vénus.

19/02 Nouvel an dans le calendrier chinois.

21/02 Rapprochement Vénus Mars (0,3°).

04/03 (soir) Rapprochement Vénus Uranus (0,1°).

20/03 Éclipse partielle de Soleil (voir page 31).

20/03 Équinoxe de printemps.

Lune

Nouvelle Lune : les 22/12, 20/01, 19/02, 20/03.

Pleine Lune : les 5/01, 4/02, 5/03. ■

ÉVÉNEMENTS ASTRONOMIQUES

L'éclipse partielle de Soleil du 20 mars 2015

La page suivante, qui peut-être photocopiée, donne les principaux renseignements sur cette éclipse. Nous ajoutons ci-dessous quelques précisions.

Des lunettes pour l'observer

Le CLEA devrait commander des lunettes pour ses adhérents. Vous trouverez tous les détails sur le site clea-astro.eu (Avec les élèves, Éclipse).

Dans les Cahiers Clairaut

De nombreux articles ont déjà été écrits sur les éclipses (comment la préparer, l'observer, la photographier...). Vous les retrouverez sur le site du CLEA à la page "Avec les élèves".

Mesure de la distance de la Lune

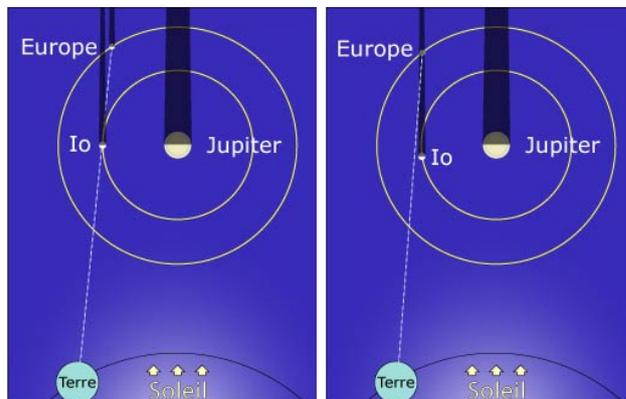
Une éclipse de Soleil est une bonne occasion pour mesurer la distance de la Lune. Le principe est simple : deux personnes éloignées sur Terre observant au même instant ne voient pas la même partie du Soleil éclipsé. Connaissant la distance entre les deux observateurs et en comparant leurs images de l'éclipse, il est possible de remonter à la distance de la Lune. Tous les détails de la manip sont sur le site du CLEA toujours à la page "Avec les élèves".

Les "phémus" (ou phénomènes mutuels des satellites de Jupiter)

Depuis Galilée, on connaît bien les quatre principaux satellites de Jupiter. On peut observer habituellement quatre types de phénomènes : le passage d'un satellite devant la planète, le passage de l'ombre d'un satellite sur la planète, l'occultation d'un satellite par la planète et le passage d'un satellite dans l'ombre de la planète (éclipse).

Mais cette année, la Terre et le Soleil seront quasiment dans le plan de l'équateur de Jupiter, plan dans lequel orbitent aussi ses satellites. Nous aurons donc droit à deux autres types de phénomènes entre satellites, l'occultation et l'éclipse d'un satellite par un autre.

L'IMCCE organise une campagne d'observation de ces phénomènes mutuels pour améliorer l'étude dynamique du système jovien.



Occultation d'Europe par Io : Europe disparaît, caché derrière Io.

Éclipse d'Europe par Io : Europe s'éteint en rentrant dans l'ombre de Io.

On peut trouver les horaires de tous ces phénomènes sur le site de l'IMCCE (<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/phenomenes/ephesat/phenomena.php>). En voici quelques-uns visibles le soir :

Date	Heure début (TU)	Type(*)	Durée
24/1/2015	18 h 47 min 50 s	4E1	13,7 min
31/1/2015	19 h 31 min 47 s	2E1	8,7 min
31/1/2015	19 h 48 min 9 s	2O1	7,2 min
2/2/2015	18 h 32 min 11 s	3O1	5,3 min
5/2/2015	18 h 59 min 45 s	1O3	5,1 min
6/2/2015	18 h 58 min 39 s	2O3	7,3 min
7/2/2015	21 h 54 min 30 s	2O1	6,9 min
7/2/2015	21 h 57 min 1 s	2E1	8,2 min
9/2/2015	20 h 56 min 5 s	3O1	5,4 min
9/2/2015	21 h 6 min 6 s	3E1	7,2 min
12/2/2015	21 h 22 min 56 s	1O3	5,7 min
12/2/2015	21 h 43 min 43 s	1E3	7,7 min
4/3/2015	18 h 11 min 7 s	2E1	6,8 min
9/3/2015	21 h 30 min 53 s	3O2	4,3 min
11/3/2015	19 h 17 min 54 s	2O1	5,6 min
11/3/2015	20 h 29 min 50 s	2E1	6,3 min
18/3/2015	21 h 24 min 41 s	2O1	5,2 min
18/3/2015	22 h 47 min 47 s	2E1	5,8 min
4/4/2015	22 h 22 min 32 s	2E3	9,3 min
18/4/2015	20 h 51 min 42 s	1O3	6 min
26/4/2015	21 h 23 min 16 s	2O1	3,4 min
5/5/2015	21 h 51 min 56 s	3O2	4,8 min
18/6/2015	20 h 57 min 20 s	3O1	8,9 min

(*) La colonne "Type" se lit ainsi : chaque numéro correspond à un satellite (1 Io, 2 Europe, 3 Ganymède, 4 Callisto), E signifie « éclipse » et O « occulte ». Par exemple, 4E1 signifie « Callisto éclipse Io ».

Pour l'ensemble des phénomènes à observer cette année, voir l'article « Les événements astronomiques de l'année 2014-2015 » sur le site clea-astro.eu, rubrique « Avec les élèves ».

L'éclipse de Soleil du 20 mars 2015

Le 20 mars 2015, aux alentours de 10 h 30, une partie du Soleil sera cachée par la Lune. L'éclipse sera partielle en France métropolitaine. Mais attention, il ne faut surtout pas regarder directement le Soleil, le risque est important pour les yeux. Vous trouverez ci-dessous des conseils pour observer cet événement sans danger. Tous les horaires sont donnés en heures légales (l'heure de la montre).

En tournant autour de la Terre, la Lune passe régulièrement entre nous et le Soleil mais, en général, soit plus haut soit plus bas, sans le cacher. Le 20 mars, on la verra occulter plus de la moitié du disque solaire.

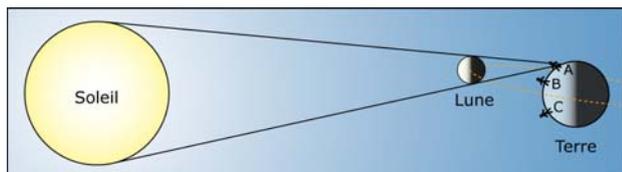


Fig.1. Principe d'une éclipse de Soleil. En A, on voit une éclipse totale, en B une éclipse partielle et en C, le Soleil apparaît entier.

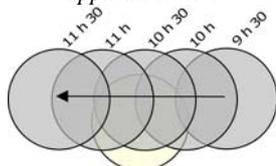


Fig.2. La Lune passant devant le Soleil le 20 mars (vue depuis le centre de la France). Le pourcentage du disque solaire éclipsé varie de 58 % à Ajaccio à 82 % de Brest à Dunkerque.

La figure précédente ne montre pas ce que l'on pourra observer dans le ciel le 20 mars puisque la Terre tourne sur elle-même pendant ce temps. On verra le Soleil se lever, monter dans le ciel, puis être grignoté par la Lune par la droite (figure 3).

Étant donné le sens de déplacement de la Lune, l'éclipse a lieu plus tôt dans le sud-ouest (de 9 h 12 à 11 h 28 à Pau) et plus tard dans le nord-est (de 9 h 27 à 11 h 47 à Strasbourg).

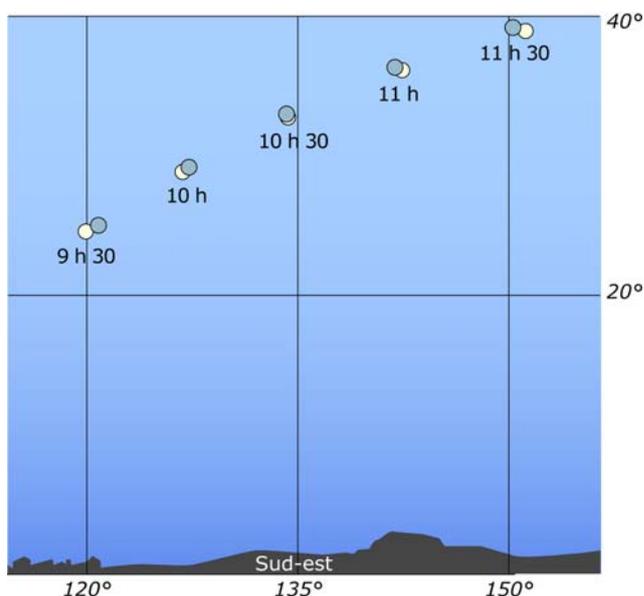


Fig.3. L'éclipse vue depuis le centre de la France. On a aussi dessiné la Lune qui n'est en réalité pas visible. Le Soleil ainsi que la Lune ont été grossis deux fois. (les graduations indiquent la hauteur au-dessus de l'horizon et l'azimut, compté à partir du nord).

Ville	Bastia	Lyon	Paris
Aspect au moment du maximum			
Heure du maximum	10 h 28	10 h 27	10 h 29

Fig.4. L'éclipse vue depuis différentes villes de France.

Quatre manières d'observer l'éclipse sans danger

Le sténopé	Le filtre certifié	Instrument + projection	Instrument + filtre certifié.
Le plus simple : un carton percé d'un trou et une feuille pour projeter l'image (ou un calque comme à l'arrière du tube). L'image du Soleil projeté apparaîtra en croissant.	Les "viséclipse" étaient équipés de verre de soudeur n° 14, suffisamment puissants pour observer sans danger. Il ne faut utiliser que des filtres certifiés.	Une paire de jumelles (ou une lunette) dirigée vers le Soleil et un écran. Sans danger à condition de ne JAMAIS viser à travers l'instrument, on regarde l'image sur l'écran.	Ici, un télescope équipé d'un filtre en verre laissant passer une infime fraction de la lumière du Soleil (1/100 000). On peut alors observer l'éclipse et les taches solaires.

HISTOIRE

La navigation ancienne chez les Polynésiens

Jean-Pierre Devalance, Parentis-en-Born

Le Pacifique est le plus vaste des océans du globe, il contient des îles comme l'île de Pâques ou celle d'Hawaï situées à des milliers de kilomètres des continents. Comment dans le passé des hommes ont-ils pu parcourir avec des bateaux très rudimentaires et sans instruments de navigation des distances aussi considérables ?

Bulletin d'information de Radio-France le lundi 23 juin 2014 : «*La pirogue partie d'Honolulu un mois auparavant est arrivée à Papeete le 22 juin...* »



Fig.1. La pirogue Hokule'a. au cours d'un voyage au Japon.

En septembre 1999, cette pirogue double avait déjà fait un voyage de 5 400 km dans le triangle polynésien de la même façon, c'est-à-dire sans instruments de navigation.

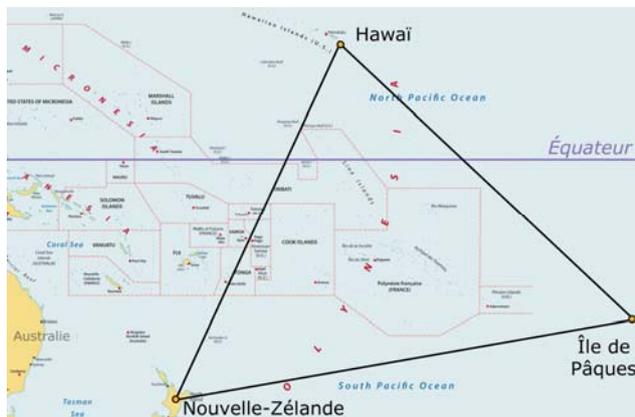


Fig.2. Le triangle polynésien.

Si les anthropologues, ethnologues et archéologues expliquent comment la Terre a été colonisée à partir de migrations terrestres successives, le commun des mortels peut se demander comment les îles du Pacifique ont pu être peuplées avec des moyens que l'on imagine rudimentaires. «*Malgré leur peu d'étendue, la plupart [de ces îles] sont habitées. Il n'est pas aisé de dire comment ces petits cantons ont pu se peupler ; & il n'est pas moins difficile de déterminer, d'où les isles les plus élevées de la mer du Sud ont tiré leurs habitants*»¹. On sait

aujourd'hui que les peuples océaniques tirent leurs origines du sud-est asiatique (Indonésie, Taïwan...) mais le problème reste de savoir comment ils ont navigué d'île en île sans boussole ni compas pour couvrir la Micronésie, les îles Salomon, la Nouvelle-Zélande, Fidji, Tuvalu, Kiribati, la Polynésie et Hawaï mais aussi l'île de Pâques peuplée plus récemment (il y a 800 ou 1000 ans environ selon les auteurs). «*Quant aux habitants humains de l'île de Pâques, ils sont venus de l'Occident, des archipels de Polynésie : cela ne fait plus question. D'abord ils le disent eux-mêmes d'après la tradition de leurs vieillards, ils seraient partis, il y a quelques siècles, de l'île océanique la plus avancée vers l'Est, d'une certaine île de Râpa qui existe bien réellement et s'appelle ainsi. Et c'est en mémoire de cette très lointaine patrie qu'ils auraient nommé leur nouvelle terre : Rapa Nui (la Grande Râpa)*»². On a réfuté la théorie de Thor Heyerdahl qui, avec son radeau le Kon Tiki, voulait prouver que les Pascuans seraient venus de la côte ouest sud-américaine.

Les conquérants de cet immense océan Pacifique ont développé un sens de l'orientation assez remarquable. Ils se sont fiés aux vents, aux courants, au Soleil et surtout à leur fine connaissance du ciel. À propos de sens de l'observation, Bougainville³ avait ramené à Paris un Tahitien dont il dit : «*Quoique Aotourou estropiât à peine quelques mots de notre langue, tous les jours il sortait seul, parcourait la ville, et jamais il ne s'est égaré* ». On évoquera ici dans un premier temps la navigation dans les mers australes puis ensuite l'utilisation des astres pour cette navigation. Précisons que se déplacer sur mer avant 1772 se faisait par l'utilisation du sextant mais la longitude ne pouvait être déterminée que grossièrement. Maskeleyne (astronome du roi d'Angleterre) préconisa l'utilisation de son almanach nautique associé à l'observation de la Lune, ce que fit Cook

¹ Hawkesworth 1773 d'après les notes de James Cook.

² Pierre Loti "Journal d'un aspirant de la Flore" 4 janvier 1872.

³ Bougainville *Voyage autour du monde* Folio classique Gallimard 1982.

au cours de son premier voyage. Puis vint l'usage du chronomètre de Harrison qui garantissait une fine garde du temps et donc permettait une détermination fiable de la longitude.

Présence d'une île

Il est bien connu que les oiseaux sont des signes de terres « proches ». Cette proximité est toute relative car, même s'ils sont pélagiques, sternes, pailles-en-queue (phaetons), frégates etc., ils n'ont pas la même capacité à s'éloigner de leurs lieux de pontes. Par exemple, « dans la journée du 14 [Fév. 1768], étant par 27° 7' de latitude observée et 104° 12' de longitude occidentale estimée⁴, nous vîmes deux oiseaux... [d'une] espèce qui ne s'éloigne pas ordinairement à plus de soixante ou quatre-vingts lieues de la terre ; nous vîmes aussi un paquet de ces herbes vertes qui s'attachent à la carène des navires, et ces rencontres me firent continuer la même route ».

Par ailleurs, les sternes jouent un rôle important dans les croyances pascuanes : en effet l'île de Pâques est très isolée et en dehors des routes maritimes (environ 4 000 km des côtes sud-américaines, 2 000 km de Pitcairn – l'île des révoltés de la Bounty – ou 3 500 km des Marquises elles-mêmes éloignées de Tahiti), les sternes sont donc des signes divins puisqu'elles ne viennent d'aucune Terre apparemment. En dehors des oiseaux, les Océaniens savent interpréter les objet flottants (noix de coco, tiges de palmier etc.) qui doivent venir des terres et l'état de ces objets permet d'apprécier leur durée de présence dans l'eau. Cette durée mise en corrélation avec les courants permet d'avoir une idée de la direction et de l'éloignement de la terre ferme. Ainsi sur la route du retour de Tahiti, à bord de *La Boudeuse* de Bougainville, Aotourou aperçoit l'atoll de Tétiaroa (une des îles de cet atoll est devenue l'île de Marlon Brando), située à une soixantaine de kilomètres au nord de Tahiti.

Il veut y conduire Bougainville qui persiste à poursuivre sa route pendant trois jours. Celui-ci raconte la suite : « l'azur d'un ciel sans nuages laissait étinceler les étoiles, Aotourou, après les avoir attentivement considérées, nous fit remarquer l'étoile brillante qui est dans l'épaule d'Orion, disant que c'était sur elle que nous devons diriger notre course, et que dans deux jours nous trouverions une terre abondante qu'il connaissait (...) il courut saisir la roue du gouvernail, dont il avait déjà remarqué l'usage » mais aussi « il nous

⁴ Il était à environ 500 km ENE de l'île de Pâques.

avait nommé la veille en sa langue, sans hésiter, la plupart des étoiles brillantes que nous lui montrions, nous avons eu depuis la certitude qu'il connaît parfaitement les phases de la Lune et les divers pronostics qui avertissent souvent en mer des changements qu'on doit avoir dans le temps ».



Fig.3. Bougainville et Cook.

Aujourd'hui quand on demande à un pêcheur de Rangiroa (Tuamotu) comment il navigue pour aller pêcher l'espadon ou le *mahi-mahi* (daurade coryphène) il répond : "j'ai le GPS". Ensuite dans son lagon comme ses ancêtres, il utilise des amers, ce qui est parfois délicats dans ces grands lagons coralliens sans hauteurs remarquables. Les anciens connaissaient bien les courants, les vents et la houle du secteur Est⁵. Les îles et archipels modifient la structure de la houle qui doit les contourner créant ainsi des houles réfléchies qui interfèrent avec la houle principale ce qui apporte des renseignements aux navigateurs. Les îles hautes sont couronnées de cumulus visibles de loin (parfois plus de 200 km). C'est le cas des Marquises (1 230 m), îles de la Société (2 241 m), Nouvelle-Zélande (3 724 m), îles Hawaï (4 205 m). Ajoutons que ces cumulus sur les hauteurs sont le siège d'orages avec leurs cortèges d'éclairs repérables de fort loin la nuit. Par ailleurs dans beaucoup d'atolls, la luminosité est si forte que les nuages au-dessus prennent une couleur particulière que les navigateurs perçoivent ; de plus, la couleur de l'eau de l'océan change avec la profondeur. Selon les notes de Cook : « L'eau, dans la partie de la lagune près de nous, étoit moins profonde ; mais elle l'étoit davantage au-dessous des bois ; différence qu'on observoit aisément par la couleur plus blanche & plus bleue du bassin ». On

⁵ Est selon nos références habituelles, mais pour les Polynésiens les vents et la houle sont désignés par la direction où ils vont et non par là d'où ils viennent. Ainsi un vent d'ouest pour nous est un vent d'est pour eux. Par ailleurs, pour ces polynésiens, le passé est devant puisqu'on le connaît, on le voit, et l'avenir, inconnu, invisible est donc derrière soi.

insistera pour clore cette première partie sur le fait que les Polynésiens ont développé un sens de l'observation peu commun et une intelligence propre à interpréter toutes sortes de signes essentiels à leurs déplacements. Par exemple le clapotis le long des coques ne produit pas le même son selon la direction de navigation par rapport au sens du courants. On raconte que la température était un bon indicateur. Pour cela un occupant de la pirogue mettait son postérieur dans l'eau, et chacun sait que cette partie anatomique est très sensible à la chaleur.

Le ciel polynésien

En 1767, la Royal Society anglaise décide de faire observer, depuis les mers du Sud, le transit de Vénus prévu en 1769. Cette même année, la comète de Messier est vue à Paris⁶. Le commandement du vaisseau est confié à James Cook accompagné de l'astronome Green et du Dr Bradley de l'observatoire royal de Greenwich. Cook en profitera pour faire une étude approfondie des populations sous tous les aspects. Il a remarqué que les Tahitiens connaissent parfaitement le ciel et toutes les étoiles qu'ils associent aux îles. Lorsqu'il quitte Tahiti, il emmène avec lui Tupia (ou Tupaïa, le père d'Aotourou) : « Depuis un certain temps, avant que nous ne quittions cette île, plusieurs des indigènes nous ont proposé chaque jour de partir avec nous ; et comme nous pensions que cela pouvait nous être utile pour nos futures découvertes, nous avons décidé d'emmener celui dont le nom est Tupia, un chef et un prêtre. Cet homme avait été avec nous la plupart du temps que nous étions resté sur l'île, ce qui nous a donné l'occasion de le connaître. Nous avons trouvé que c'était une personne très intelligente, connaissant le mieux la géographie des îles situées dans ces mers... Je n'ai aucune raison de douter des informations données par Tupia sur ces îles" et selon Hawkesworth à propos des Tahitiens : "... ils observent les corps célestes d'une manière plus exacte; ils savent que les étoiles fixes ne changent pas de position, l'une à l'égard de l'autre ; une longue expérience leur a fait découvrir celles qui se lèvent & se couchent à certaines

⁶ Bougainville [?] : « La comète (...) qu'Aotourou a fort bien remarquée, m'a donné lieu de penser que les Taïtiens connaissent ces astres qui ne reparaisissent m'a-t-il dit, qu'après un grand nombre de lunes. Il nomme les comètes *evetou eave* » (cependant la comète de Messier devait être inconnue de Aotourou la période étant de l'ordre de 2 000 ans, mais il avait bien reconnu une comète).

*saisons de l'année ; & ils déterminent par-là le mouvement progressif des Planètes, & les points du compas pendant la nuit. Tupia étoit si habile sur ces matières, que, dans une navigation de près d'un an, au milieu d'une mer inconnue, il ne se trompa jamais en montrant à M. Cook de quel côté étoit Taïti ; ils distinguent chacune des Planètes & différentes étoiles, par des noms particuliers : le Soleil s'appelle Era, & la Lune, Marama ; Venus, Touroaa ; Jupiter, Matàrée, & Saturne, Na-ta-heéa les sept étoiles portent le nom de E-whettoa-owhàa, Sirius Ta-whettoo-roa...*⁷

Dans la cosmogonie tahitienne, selon certains auteurs, le monde primitif est un bivalve qui contient le dieu Taaroa. La coquille inférieure est la Terre et la coquille supérieure le ciel. Les Polynésiens considèrent qu'au-delà de l'horizon, il y a les abysses, des zones obscures d'où émergent ou plongent les astres et c'est là que naissent les vents. Le ciel est soutenu par dix piliers issus chacun d'une étoile brillante et reposant sur la coquille inférieure au pôle sud céleste. Sur chaque pilier on a donc une succession d'étoiles, pas toujours très lumineuses, alignées Nord-Sud.

Antarès	α Sco	Scorpion
Zuben-Eschamali	β Lib	Balance
Régulus	α Leo	Lion
Dubhe	α UMa	Grande Ourse
Alphard	α Hya	Hydre
Arcturus	α Boo	Bouvier
Procyon	α CMi	Petit Chien
Bételgeuse	α Ori	Orion
Phact	α Col	Colombe
Étoile Polaire	α UMi	Petite Ourse

Tab.1. Étoiles brillantes des dix piliers.

D'autre part, les étoiles décrivent dans le ciel des chemins en arcs de cercle. Douze « étoiles » ont été choisies pour repérer ces chemins, dix étoiles plus Vénus et Jupiter dont les mouvements sont parfaitement connus. Un chemin est tracé par toutes les étoiles de même déclinaison que l'étoile principale (chemin de Sirius, chemin de Deneb etc.).

⁷ La traduction en français a gardé la transcription phonétique que les anglais on faite du tahitien, soit selon l'écriture d'aujourd'hui : R?, Marama, Ta'urua, Jupiter a le même non que Vénus, Saturne : fetu tea, Sirius : Ta'ura ou Ta'ura fau papa etc... Les étoiles ou planètes peuvent avoir plusieurs noms notamment Vénus selon qu'on est le soir ou le matin.

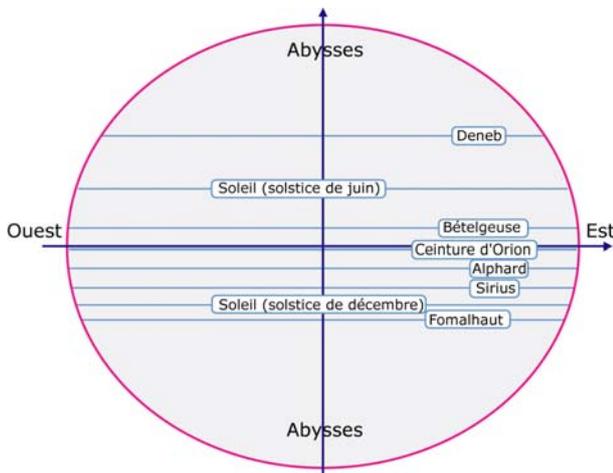


Fig.4. Les chemins du ciel.

Bételgeuse ou Alphard figurent à la fois dans les chemins et dans les piliers. À noter que les Polynésiens distinguaient bien les étoiles des planètes. Tupaïa permit à Cook d'établir une carte dite "carte de Tupaïa sur laquelle on note quelques erreurs qui sont dues à une inversion Nord-Sud, les vents ayant été mal interprétés par Cook pour les raisons évoquées en note 5.

Pour les Polynésiens, le ciel étoilé est une autre représentation de leur monde (des points isolés dans une vaste étendue bleue). Ainsi, certaines îles possèdent le même nom qu'une étoile. La plus connue est Pola-Pola (aujourd'hui Bora-Bora) qui porte le nom de Hadar (β Centauri ou Agéna) appelée Pola-Pola par les Hawaïens. Chaque île possède son étoile zénithale ('avei'a), c'est l'étoile qui passe au zénith de cette île à un moment donné de l'année. Cela signifie que la déclinaison de l'étoile est égale à la latitude de l'île.

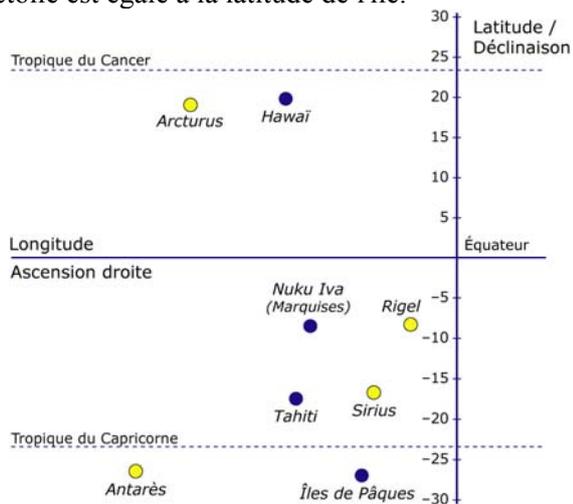


Fig.5. Correspondance étoiles / îles.

La connaissance de ces étoiles pour chaque île est importante car, par les déclinaisons, on organise le ciel en termes de latitudes terrestres, la concordance est quasi parfaite à quelques dixièmes de degrés près.

Les Polynésiens, avec leur sens si développé de l'observation, savaient garder un cap par rapport à des alignements d'étoiles tels que le baudrier d'Orion par exemple en mémorisant des angles. Selon que l'alignement penche d'un côté ou de l'autre, on est trop au nord ou trop au sud du cap fixé. On ne s'étonnera pas non plus que le calendrier soit lunaire ; de plus le jour est découpé en fonction de la hauteur du Soleil qui donne des indications précieuses sur la direction à suivre (les navigateurs utilisent la paume de la main pour apprécier la hauteur du Soleil donc l'heure).

La navigation

Les départs se font à la tombée de la nuit et les étoiles sont classées non pas par leur magnitude, mais par leur utilité dans la navigation. Le Soleil fixe les saisons et par là les levers et couchers d'étoiles utiles. Un piroguier connaît une multitude d'étoiles ; depuis son plus jeune âge il apprend par cœur les routes célestes pour aller dans les différentes îles dont il mémorise les étoiles zénithales. Cet apprentissage est facilité par différents moyens mnémotechniques, des comptines, des chants, des légendes et des histoires. Nous faisons de même avec "mais où est donc Ornicar" pour nos conjonction, "Que j'aime à faire apprendre un nombre utile aux sages" pour les décimales de π , "Monsieur Vous Tirez Mal ! Je Suis Un Novice Pardon" pour l'ordre des planètes (aujourd'hui on ne s'excuse plus puisque Pluton n'est plus planète !) etc. Se lancer sur l'océan suppose que l'on connaisse l'étoile zénithale de son île de départ, et celle de l'étoile cible.

Pour les voyages courts comme par exemple Tahiti-Îles sous le vent (Huahiné, Raiatea, Bora-Bora etc.), on se fixe essentiellement aux étoiles zénithales la nuit et aux courants, houles... le jour.

Pour les trajets plus longs on prend d'abord une direction sud-nord jusqu'à se situer sur le chemin de l'étoile zénithale de l'île à atteindre (voir le schéma en fin d'article). On s'arrange pour être à l'Est de cette cible, la navigation sera favorisée par les courants. Pour le trajet S-N, suivre une étoile au nord de sa position de départ ne suffit pas car au cours de la nuit, on aura un glissement vers l'ouest, c'est là qu'intervient l'intérêt des piliers. Quand on se dirige vers Phact par exemple, on a une direction S-N avec Alnitak (ζ Ori) mais au cours de la nuit il va falloir modifier la route en se fixant sur l'alignement Procyon-Castor et bien repérer l'orientation du triangle Procyon-Castor-Bételgeuse. On arrive de proche en proche, avec un parcours zigzaguant, à conserver une direction.

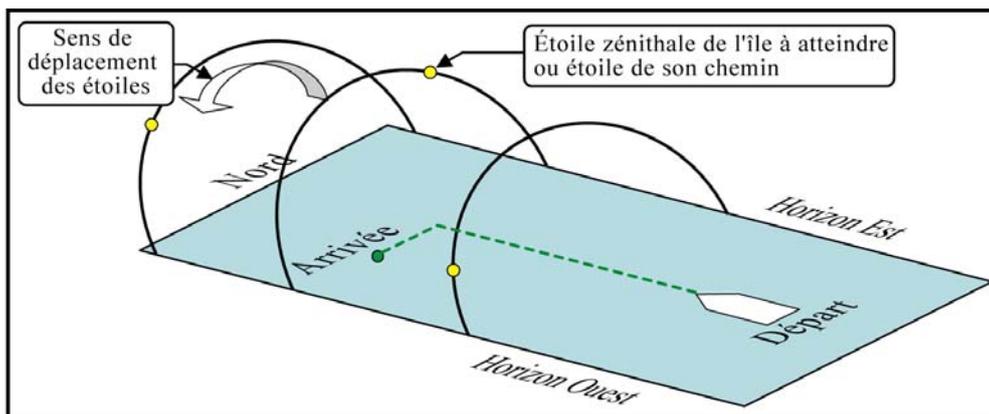
Pour le trajet Est-Ouest on s'appuie sur les étoiles qui se lèvent ou se couchent sur le chemin de l'étoile de l'île. Ensuite on se fixe sur les divers signes déjà évoqués plus haut, car la méthode des piliers et des chemins reste assez imprécise (plusieurs dizaines de kilomètres au mieux) donc atteindre l'île de Pâques très isolée est plus difficile, ce qui explique son peuplement plus tardif.

Certains musées (Hangaroa – île de Pâques –, Paris, Londres etc.) conservent des cartes formées de liens de bois représentant courants et vents et de petits

cailloux ou coquillages représentant les îles, cartes qui auraient été utilisées pour la navigation.

Conclusion

Navigateurs hors pair, les Polynésiens ont pu conquérir des immensités océanes grâce à une mémoire parfaitement exercée, un sens de l'observation particulièrement affûté et à une représentation du monde judicieuse. La connaissance approfondie du ciel a été un atout majeur.



LECTURE POUR LA MARQUISE

Qu'est-ce que la matière

Françoise Balibar, JM Lévy-Leblond,
Roland Lehoucq

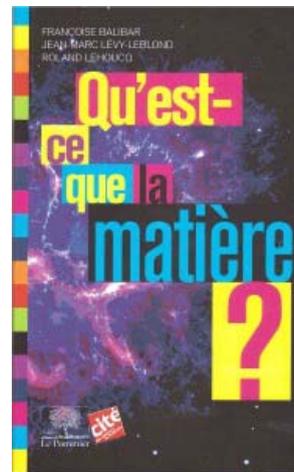
Le Pommier/Cité des sciences et de l'industrie
2014

La collaboration de trois auteurs aussi différents conduit à un petit livre d'une grande richesse. Chacun d'entre eux apporte successivement une vision particulière d'un concept assez difficile à bien définir.

Dans la première partie, **Françoise Balibar** aborde l'aspect historique ; elle montre comment progressivement les penseurs de l'Antiquité se sont dégagés des explications mythologiques pour aboutir à des explications de nature plus causale. Elle explique comment l'influence de Parménide et de son école a failli réduire la physique (du latin *physica* science de la nature) au silence. Pour ce philosophe de l'Antiquité il était fondamental de distinguer ce qui « EST » et ce qui « N'EST PAS ». Par nature on ne devrait pas pouvoir parler, ni penser ce qui n'est pas. Le verbe être a deux fonctions, d'une part « *ce qui est vrai* » en vérité et d'autre part ce dont l'essence est d'exister.

Exemple : Pour les Milésiens « CE QUI EST » existe de toute éternité et ne peut donc pas subir de changement ; de « ce qui est » on ne pourra jamais dire *qu'il était ou qu'il sera* car ce qui est présent ne peut pas procéder de « ce qui n'est pas ». Ce qui « est » ne peut pas subir de changement car du « N'EST PAS » ne peut se mêler à ce qui « EST ». Autrement dit, si une chose a changé, c'est qu'elle cesse d'être elle-même (puisqu'elle a changé). Si au contraire, elle reste identique à elle-même, c'est qu'elle n'a pas changé...

Françoise Balibar explique que toute la physique grecque n'est qu'une longue série de tentatives en vue de contourner l'argument de Parménide. La première tentative est *l'irruption du vide*, puis avec Aristote : *la matière et la forme*. Pour Aristote la statue existe déjà en puissance dans le bloc de pierre du sculpteur, l'artiste ne fait que la rendre présente



« en acte ». Plus tard Galilée se propose « *de rendre mesurable ce qui ne l'est pas encore* » en particulier la notion de masse « *qui persiste dans son être lors du mouvement* ». Newton « *ne forge pas d'hypothèse* » sur les causes de l'attraction des masses. Leibnitz, lui, anticipe la notion de champ qui apparaîtra avec Faraday.

La deuxième partie porte sur la matière dans la physique moderne. Elle part d'une question non résolue par Isaac Newton : « *Comment la Lune sent-elle la Terre qui est située à 384 000 km d'elle ?* La réponse apparaîtra avec la notion de champ qui « *acquiert un statut ontologique* ». Le concept de champ remplissant tout l'espace sert de médiateur.

Jean-Marc Lévy-Leblond suggère, depuis longtemps, d'utiliser le terme générique de « *quantons* » pour désigner les particules comme

« *électron* », « *proton* », « *photon* », « *neutron* »... Ces quantons relèvent du discontinu quant à leur quantité et du continu quant à leur spatialité (on ne peut pas localiser un quanton en un point de l'espace). Ce faisant on retrouve une certaine analogie, d'une part avec les corpuscules en ce qui concerne la qualité et, d'autre part, avec les ondes en ce qui concerne la spatialité. Mais, pour l'auteur, les quantons ne sont : « *ni ondes ni corpuscules* » mais un type d'objets qui constitue un monisme quantique.

La dernière partie s'intitule *généalogie de la matière*. **Roland Lehoucq** reprend les grandes lignes de l'histoire de l'Univers à partir de la synthèse des atomes lourds dans les chaudrons stellaires pour terminer sur les incertitudes quant à la nature de la matière sombre.

L'esprit et la matière d'Erwin Schrödinger

Précédé de *L'Élision*, par Michel Bitbol,
Seuil 2011-Points Sciences n° S199

Pour tenter de saisir la nature de la mécanique quantique, il est indispensable de relire les œuvres des pères fondateurs et parmi eux Schrödinger est acteur essentiel.

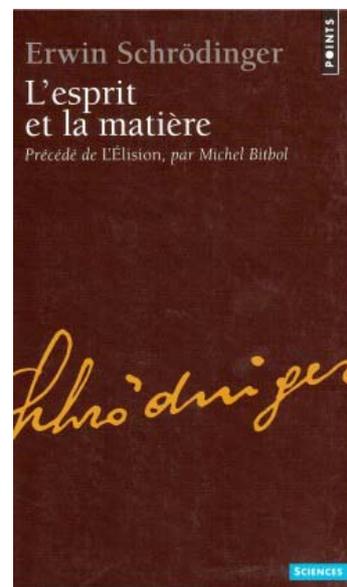
Ce livre est précédé par un long essai philosophique (presque 200 pages) de Michel Bitbol qui constitue une solide préparation pour aborder l'œuvre de Schrödinger proprement dite.

La mécanique quantique fut développée dans les années trente.

À cette époque les physiciens cherchaient à établir les lois physiques valables à l'échelle de l'infiniment petit. L'étrange comportement de la matière qu'ils observaient à ce niveau impliquait une profonde et nouvelle réflexion philosophique sur le concept de réalité qui s'écartait profondément des conceptions habituelles de la mécanique classique : plus de particules localisées et encore moins de trajectoires mais une quantification des grandeurs observables inexplicable.

Progressivement deux tendances antagonistes apparaissent.

La première était incarnée par le « *Cercle de Vienne* » dont Schrödinger, né à Vienne en 1887, faisait partie. Elle était héritière du positivisme d'Ernst Mach et reposait sur ce qui fut appelé néopositivisme ou **empirisme logique**. Selon ses adeptes, l'expérience est à la base de toute



connaissance dans tous les domaines. Tous les phénomènes peuvent se décrire d'une manière logique avec les seules lois de la physique. Ces lois ne prétendent pas expliquer « *la réalité objective* », la réalité en soi, mais faire des prédictions observables. La « *Bible* » logique des membres du cercle de Vienne est, pour l'essentiel, contenue dans le « *Tractatus logico-philosophicus* » de Ludwig Wittgenstein.

Dans l'élaboration de la physique quantique, Erwin Schrödinger ne peut accepter le concept de saut quantique ; pour lui, comme pour Einstein, la physique quantique est incomplète ; il doit exister des variables cachées. L'un comme l'autre ne peuvent accepter la perte d'une description continue dans l'espace-temps des phénomènes particuliers, car on perd par là-même le sens du réel.

L'autre tendance est « *l'École de Copenhague* » dont le leader est Niels Bohr mais qui comprend également Heisenberg, Pauli, Born etc. Pour cette école la recherche du réel n'a pas de sens, tout système se définit seulement par l'ensemble de ses propriétés et il n'y a pas de « *variables cachées* » à chercher.

Dans ce livre le concept de réalité est largement commenté. Jusqu'aux années trente, « *les sciences se sont constituées par un retrait systématique du sujet connaissant* » (Bitbol p. 118). Avec la mécanique quantique, c'est en vain que le scientifique ne puisse pas décrire la nature en se plaçant en dehors de celle-ci. L'un des précurseurs de cette position, A. Comte, indiquait déjà qu'il est impossible de « *se mettre à la fenêtre pour se regarder passer dans la rue* ». Pour Wittgenstein, le scientifique est comme l'œil dans le champ visuel : « *rien dans le champ visuel ne permet de conclure qu'il est vu par un œil* » (Tractatus 5.633) Schrödinger note que « *Le scientifique simplifie inconsciemment, presque par inadvertance, son problème qui consiste à comprendre la nature, en négligeant ou en évacuant du tableau à élaborer : lui-même, sa propre personnalité, le sujet de la connaissance* ». Plus loin (p. 233), il écrit : « *Nous excluons le Sujet de Connaissance du champ naturel que nous tentons de comprendre. Nous reculons avec notre propre personne dans le rôle d'un spectateur qui n'appartient pas au monde (...).* »

Deux formalismes apparemment contradictoires émergent donc, l'un porté par Heisenberg, l'autre par Schrödinger.

En 1925, à l'âge de 24 ans, Heisenberg regroupe dans des tableaux les propriétés observables de l'atome d'hydrogène puis cherche à les relier à l'aide d'un formalisme mathématique. En pratique il redécouvre le calcul matriciel. Celui-ci s'adapte particulièrement bien à l'aspect corpusculaire donc à l'essence discontinue de la matière. Par contre il ne rend pas compte des trajectoires des particules que l'on peut pourtant observer dans les « *chambres à brouillard* ». Finalement Heisenberg trouvera un compromis à l'aide ce qu'on appellera par la suite le « *principe d'incertitude* », mais qu'il est préférable aujourd'hui de nommer « *inégalités de Heisenberg* » car l'incertitude ne résulte pas des appareils de mesure mais de la nature intrinsèque des

phénomènes observés. Les relations (ou inégalités d'Heisenberg) définissent les limites d'utilisation des concepts classiques de position et de vitesse.

L'année suivante, en 1927, Schrödinger s'attache au formalisme ondulatoire. Depuis la toute nouvelle thèse de Louis de Broglie, on admet que l'on peut associer une onde à chaque particule. L'aspect ondulatoire présente l'immense avantage de conserver un aspect continu, les ondes occupent tout l'espace sans discontinuité. Mais que deviennent alors les particules ? Pour Schrödinger elles sont constituées d'un ensemble d'ondes différentes nommé « *paquets d'ondes* ». Dans certaines régions, ces paquets d'ondes donnent des pics, représentatifs des particules. Pour Schrödinger : « *Il vaut mieux ne pas regarder une particule comme une entité permanente, mais comme un événement instantané* ».

Ces deux formalismes qui semblent contradictoires sont en réalité équivalents, comme Schrödinger réussira à l'établir ultérieurement.

Notons l'émergence d'une conception nouvelle dans le rapport du sujet observant à l'objet observé. Ce rapport « *est une véritable interaction physique* », « *l'objet est affecté par notre observation* ». Cette conception est toujours d'actualité avec le concept moderne de décohérence.

Terminons par une belle image sur l'esprit et la matière :

« *Nous marchons sur la ligne de front des générations [...] un jour de la vie de quelqu'un [...] n'est qu'un infime coup de burin sur la statue à jamais inachevée* ». « *Nous sommes nous-mêmes le burin et la statue, conquérant et conquis à la fois* » (p. 202 et 203).

Ce livre aborde des questions essentielles d'ordre philosophique, indispensables pour aborder les bases de la mécanique quantique.

Christian Larcher ■

Solutions et précisions pour l'activité sur les phases de Vénus de la page 21

Système de Ptolémée (la Terre est immobile au centre du monde. Le Soleil tourne autour de la Terre. Vénus tourne sur un cercle, l'épicycle, dont le centre C tourne autour de la Terre sur le déférent. La Terre, le centre C et le Soleil doivent rester alignés) :

Vénus est invisible en 1 et 5. On la voit en croissant pour les autres positions.

Système de Copernic (le Soleil est au centre du monde. La Terre et Vénus tournent autour du Soleil) :

Vénus est pleine en 1, gibbeuse en 2 et 8, en quartier en 3 et 7, en croissant en 4 et 6, invisible en 5.

Système de Tycho (le Soleil tourne autour de la Terre et Vénus tourne autour du Soleil. La Terre est au centre du monde) :

on observe exactement les mêmes phases qu'avec Copernic.

COURRIER DES LECTEURS

Suite au courrier d'un lecteur concernant l'article sur la température des étoiles, voici les précisions (en italique) de l'auteur, Georges Paturel.

Lettre de Nicolas Esseiva de Amathay Vésigneux au sujet de l'article :

"La température des étoiles" (Juin 2014)

Dans le numéro de juin, vous proposez une expérience de mesure de la température du Soleil avec, pour faire rapide, une mesure de l'élévation de température en B et en V. J'ai plusieurs questions à vous soumettre (je précise que je suis enseignant de SVT et pas de physique).

1) Les filtres : vous indiquez qu'il est important de connaître leur bande passante... mais à aucun moment vous ne semblez ensuite en tenir compte ; en ce qui me concerne, j'ai des filtres CCD couleur B et V mais également des filtres photométriques (Bessel) pour lesquels la courbe de transmission est connue...mais que doit-on en faire ?

GP : *C'est une erreur d'expression. Stricto sensu, la bande passante est la largeur de la courbe de transmission. J'aurais dû dire la courbe de transmission. Si vous avez la courbe de transmission du filtre vous pouvez calculer numériquement la longueur d'onde effective.*

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot d\lambda}, \text{ où } f(\lambda) \text{ est la fonction}$$

définissant la courbe de transmission.

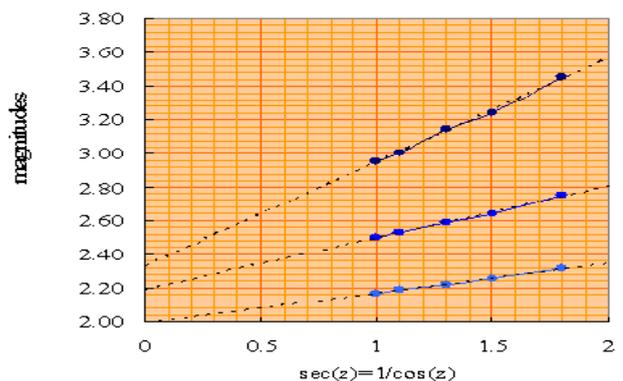
Pour parler simplement, c'est à peu près la longueur d'onde de la lumière la mieux transmise par le filtre (ceci serait rigoureusement vrai si la courbe de transmission était parfaitement symétrique autour d'un maximum unique).

2) Dans vos calculs, vous prenez en compte l'absorption atmosphérique qui n'est pas la même selon la longueur d'onde ; vous indiquez un K_b de 0,3 et K_v de 0,17. Ces valeurs sont-elles calculées (à partir des filtres justement) ou bien sont-ce des valeurs standard de correction ?

GP : *Les valeurs aux différentes longueurs d'onde de l'absorption atmosphérique peuvent se mesurer. C'est difficile car il faut que le ciel soit parfaitement clair et stable pendant plusieurs heures. Pour cela on mesure à travers un filtre donné le flux d'un objet unique (ici le Soleil) à différentes distances zénithales Z.*

On trace la magnitude $m = -2,5 \log(\text{flux})$ en fonction de $\sec Z = 1 / \cos(Z)$, ce qui donne une droite, dont la pente est le coefficient d'absorption pour la magnitude se rapportant à la longueur d'onde effective

considérée. C'est la méthode dite de la droite de Bouguer. Je vous donne une illustration pour les filtres U, B, V du système standard international. Les coefficients sont à peu près $k_u = 0,60$; $k_b = 0,30$; $k_v = 0,17$, pour les longueurs d'onde 350 nm, 450 nm et 550 nm, respectivement. Dans l'article j'ai adopté des valeurs moyennes pour un ciel clair. En $\sec Z = 0$ on a directement la magnitude hors atmosphère.



3) Sur votre montage on voit une trappe à l'avant ; j'imagine qu'elle permet d'ouvrir et de lancer les mesures en même temps sur les 2 montages.

GP : *C'est exactement ça. Le volet reste ouvert pendant toute la durée des mesures pour une distance zénithale donnée. Naturellement après un cycle de mesure il faut laisser refroidir le thermomètre. Pendant ce temps le Soleil se déplace vers une autre distance zénithale.*

4) Mais si les mesures sont faites en même temps... pourquoi n'y a-t-il qu'un seul thermomètre ?

GP : *La température monte assez doucement (en particulier en B). Donc j'avais le temps de passer le thermomètre d'un récepteur à l'autre en laissant stabiliser chaque fois. J'attendais des valeurs rondes en degrés. Évidemment deux thermomètres ce serait mieux. J'avais pensé utiliser aussi des thermomètres numériques.... peut-être un jour.*

5) Et enfin, comment est relié le thermomètre aux blocs en acier ?

GP : *Si on veut faire les choses bien il faut que le contact entre le thermomètre et le cylindre métallique soit parfait (grande surface). On peut creuser une cavité à la forme du bulbe du thermomètre, mais c'est compliqué. Je me suis contenté d'un simple contact. Un peu de graisse thermique (graisse utilisée en informatique entre le processeur et son radiateur) rend le contact bien meilleur. Mais ça marche même sans cela.*

VIE DE L'ASSOCIATION

L'École d'Été d'Astronomie se déroulera à Gap-Col Bayard
du 17 au 24 août 2015.



Au programme :
systèmes planétaires, du Soleil aux
étoiles proches et lumière,
visite de l'Institut de Radio-
Astronomie du plateau de Bures

Inscriptions
du 20 mars au 21 juin



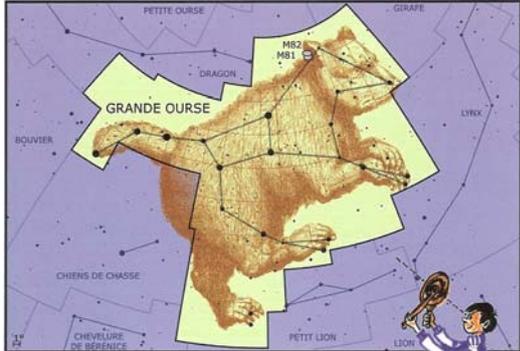
 Comité de
Liaison
Enseignants et
Astronomes
www.clea-astro.eu

LES FICHES PÉDAGOGIQUES DU CLEA

Les constellations

École élémentaire, collège, lycée

Hors série nouvelle formule des Cahiers Clairaut n° 11



Ce livret contient un CD

ISSN0758-234X

Le dernier hors série du CLEA est paru.

Merci à celles et ceux qui ont participé à sa réalisation en concevant des articles, en relisant les textes, en réalisant les schémas, en faisant la mise en pages ; et plus particulièrement à Francis Berthomieu qui a été le chef d'orchestre de cette équipe de bénévoles.

Ce hors série sur les constellations, se compose d'un livret format A5 de 200 pages et d'un CD dans lequel les différentes parties sont développées.

Il aborde différents sujets :

- À la découverte des constellations ;
- Apprentissage des constellations ;
- Légendes du ciel ;
- Instruments et maquettes ;
- Exercices.

Il est en vente sur le site du CLEA :
<http://clea-astro.eu/>

Solutions des mots croisés de la page 20

Horizontalement : 1. Effet de serre ; 2. Léon (Foucault). Iris (le golfe des Iris est au bord de la Mer des Pluies). Aa ; 3. Or. Image. CDU ; 4. Nuages. Gula (Gula Mons est un volcan vénusien qui tire son nom de la déesse mésopotamienne de la guérison) ; 5. RMN (résonance magnétique nucléaire). Venera (une dizaine de sondes soviétiques Venera ont exploré Vénus de 1967 à 1981) ; 6. Albedo (0,75 : les nuages de Vénus renvoient vers l'espace 75% de la lumière qu'ils reçoivent). Ria ; 7. Tir. Enfer. Po ; 8. Imeh (hémi inversé). Dan. Mot ; 9. Ob. Spectrale ; 10. Neith (plusieurs astronomes ont cru voir un satellite autour de Vénus. Il fut dénommé Neith au XIX^e siècle. Les sondes spatiales ont montré qu'il n'existait pas). Axe.

Verticalement : 1. Élongation ; 2. Féru. Limbe ; 3. FO. Arbre ; 4. Énigme. HST (Hubble Space Telescope) ; 5. Mende. PH (les nuages de Vénus contiennent de l'acide sulfurique) ; 6. Dias. Onde ; 7. Erg. Face ; 8. Siégèrent ; 9. Es. Unir. Râ ; 10. CLEA. Max ; 11. Radar. Pôle (Si on définit le pôle Nord d'une planète comme celui d'où l'on voit la planète tourner dans le sens direct, celui de Vénus est situé au sud du plan de l'écliptique) ; 12. Eau. Azote.

École d'Été d'Astronomie



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

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

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



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

Renseignements et vidéo sur :
accs.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 Écoles d'Été 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
5, rue Thomas Mann
case courrier 7078
75205 PARIS Cedex

École d'Été 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 2014 :	10 €
Abonnement CC pour 2014 :	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 MERCUÈS

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979
Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 148 décembre 2014