Les Cahiers Clairaut

Automne 2022

Éditorial

Au début de ce numéro vous pourrez prendre connaissance des dernières nouvelles astronomiques transmises par notre Président. En particulier concernant le JWST, positionné au point de Lagrange L2 (les propriétés particulières de ce point sont décrites mathématiquement à la page 19).

Dans la partie documentaire nous poursuivons l'étude de l'œuvre de Johannes Kepler, initiée dans le n° 177 (printemps 2022). Avec l'œuvre posthume de Kepler *Le Songe* on découvre que cette fiction scientifique avait une valeur didactique puissante et anticipative : établir que tous les corps dans l'Univers ont des mouvements relatifs.

Avec des élèves de terminale scientifique, une simulation informatique bien conduite permet de tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

D'autres manipulations dans la rubrique « avec nos élèves » :
À l'école élémentaire on se propose de répondre à la question « comment atteindre un objet en mouvement (Mars) à partir d'un objet lui-même en mouvement (la Terre) ?
Au lycée ou dans un club astronomique :
- comment obtenir des photographies spectaculaires d'un lever d'une pleine Lune géante ?
- comment évaluer le degré de pollution lumineuse au moment d'un crépuscule dans les environs d'une ville comme Albi ?

La description d'une action de formation qui se déroulait au Château Observatoire Abbadia près d'Hendaye vient clore ce numéro.

Christian Larcher pour l'équipe de rédaction

Sommaire

Actualités
Brèves d'observatoires et autres nouvelles
Frédéric Pitout p 2

Actualités
Alignement planétaire
Philippe Malburet p 5

Avec nos élèves
Retour vers le futur ou comment faire voyager...
Gilles Bouteville p 11

Dossier : les lois de Kepler (2) p 14

Histoire
Songe de Kepler
Christian Larcher p 15

Article de fond
JWST Point de Lagrange
Pierre Causeret p 19

Maquette
La représentation mécanique des mouvements planétaires
Roland Trotignon p 20

Article de fond
Kepler et Feynman
Pierre Causeret p 23

Mots croisés
Pierre Causeret p 27

Avec nos élèves
Kepler et Python
Thomas Appéré p 28

Article de fond
Application de l'équation de Kepler
Daniel Descout p 32

Observation
Le ciel de l'automne
Pierre Causeret p 35

Avec nos élèves
Observation d'un crépuscule
Olivier Gayrard p 38

Photographie
Enquête sur un lever de Lune
Pierre Causeret p 42

Le CLEA agit
Formation chez Abbadie
Roseline Primout p 44

VIE ASSOCIATIVE
EEA 2022
Solution mots croisés p 47

BRÈVES D'OBSERVATOIRES ET AUTRES NOUVELLES

Frédéric Pitout, IRAP Toulouse

Les premières images du JWST

Difficile de ne pas commencer cette rubrique par ce qui est assurément l'événement astronomique du moment et qui, parions-le, occupera bon nombre d'astronomes pour les années à venir. Le télescope spatial James Webb a livré ses premières images. Et quelles images ! Bien entendu, il est encore trop tôt pour relater quelques trouvailles et révélations d'importance. Il est davantage question de vérifier que le télescope et ses instruments (caméras et spectrographes) fonctionnent correctement.



Fig.1. **Nébuleuse de l'anneau austral (NGC 3132) vue par les caméras proche infrarouge NirCam (à gauche) et infrarouge moyen Miri (à droite) à bord du JSWT. (Nasa, Esa, CSA, STScI).**

Quelques objets et régions de l'Univers ont été visés comme la Nébuleuse de l'anneau austral (figure 1). Les images du JWST permettront de préciser la distribution des éléments lourds dans l'expulsion des couches externes des étoiles de type solaire lors de leur phase de géante rouge. Dans le cas de cette nébuleuse planétaire, on voit bien la naine blanche, reste de l'étoile initiale, au centre de la nébuleuse.

Fig.2. **L'amas de galaxies SMACS 0723.**



Un autre genre de cliché est illustré figure 2 qui montre l'amas de galaxies SMACS 0723 en champ profond. Cette image a été obtenue à partir de plusieurs clichés acquis avec la caméra NirCam à différentes longueurs d'onde et totalisant 12,5 h de pose. On distingue nettement des arcs gravitationnels dus à la distorsion de la lumière d'objets plus lointains encore par les galaxies – et la matière sombre – de l'amas. Ce genre de cliché permettra, entre autres choses, d'étudier la répartition de la matière sombre dans l'Univers.

Mais ce n'est pas tout. Le JWST possède le spectromètre Niriss qui permet aussi de faire de la spectroscopie par transmission lors de transit exoplanétaire et ainsi analyser l'atmosphère de l'exoplanète. Le « jeu » consiste à regarder la profondeur du transit

dans chaque longueur d'onde (ou domaine de longueur d'onde). La profondeur donne alors la manière dont l'atmosphère de l'exoplanète a absorbé ou laissé passer chaque longueur d'onde de la lumière de l'étoile. Cela permet de former le spectre de transmission et de remonter aux principaux composants de l'atmosphère de l'exoplanète (figure 3). Ainsi, il a été possible de déterminer que l'exoplanète Wasp-96 b possède de l'eau à l'état liquide (brouillard) et de glace (nuages) dans son atmosphère.

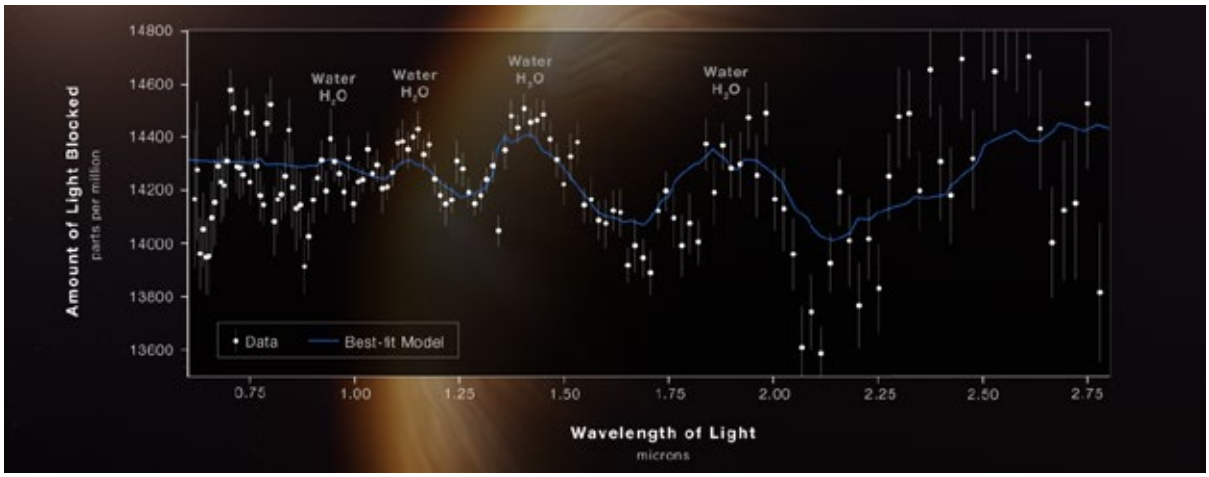


Fig.3. Spectre en transmission de Wasp-96 b produit par le spectromètre Niriss. (Nasa, Esa, CSA, STScI).

La mission Comet interceptor sélectionnée par l'Esa

L'Agence spatiale européenne a confirmé la sélection d'une mission constituée de trois sondes qui iront observer sous toutes ses coutures une comète « dynamiquement jeune » (qui provient directement du nuage d'Oort) ou un objet interstellaire. Comme on ne peut pas vraiment prévoir la survenue de tels objets, les trois sondes seront envoyées attachées les unes aux autres sur une orbite d'attente autour du point de Lagrange L2 en attendant qu'un objet intéressant soit repéré. Elle ne se sépareront que quelques semaines avant l'arrivée à destination et fourniront des images et des mesures multipoints de l'objet. Lancement prévu en 2029.

https://presse.cnes.fr/fr/la-mission-dexploration-spatiale-comet-interceptor-adoptee-par-lesa

Le vent stellaire de Bételgeuse révélé par des images 3D

Les étoiles massives comme Bételgeuse forment des éléments lourds en leur cœur tandis que l'hydrogène continue à former de l'hélium dans ses couches externes. C'est l'étape supergéante rouge. Ces couches externes sont dominées par la convection, c.-à-d. que la chaleur produite s'évacue par mouvement de matière vers le haut. La matière chaude une fois arrivée à la surface (la photosphère) se refroidit et retombe dans les profondeurs de l'astre. Sur le Soleil, ce sont des milliers de cellules de convection qui donnent l'aspect granulé à la photosphère (la granulation). Sur Bételgeuse, ces cellules de convection sont gigantesques. C'est la conclusion de chercheurs de Montpellier et Toulouse qui sont parvenus à reconstruire des images en 3D de l'étoile grâce aux spectropolarimètres Narval puis néo-Narval installés sur le télescope Bernard Lyot au pic du Midi. Ils ont aussi conclu qu'une partie de la matière ascendante maintient une vitesse radiale vers l'extérieur et ne retombe jamais vers l'étoile, alimentant ainsi un puissant et continu vent stellaire.

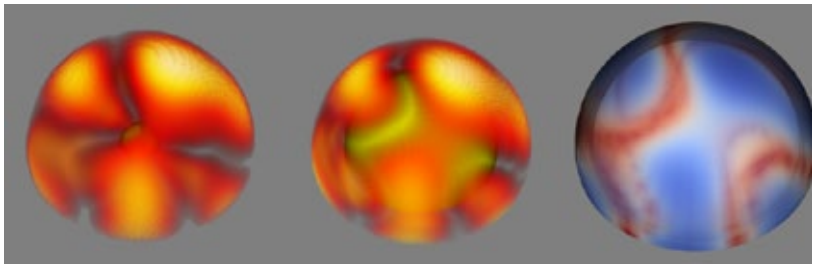


Fig.4. Images reconstruites de Bételgeuse montrant les cellules de convection à deux hauteurs au-dessus de l'étoile (à gauche et au milieu) ainsi que la vitesse radiale, bleue vers l'extérieur, rouge vers l'intérieur, de la matière. (Lopez Ariste et al.).

https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/lorigine-du-vent-stellaire-de-betelgeuse-devoilee-par-les-premieres-images-3d

Atelier Shaw-IAU de l'astronomie pour l'éducation

L'Office de l'astronomie pour l'éducation (OAE) organise le 4e atelier Shaw-IAU de l'astronomie pour l'éducation sur le thème « Tirer parti du potentiel de l'astronomie dans l'éducation formelle ».
Comment enseignons-nous l'astronomie en tant que matière à part entière ? Quel est le rôle de l'astronomie dans l'enseignement de la physique ou de la chimie – ou dans la communication d'un sujet d'avenir aussi central que le changement climatique ? Les avis des enseignants sont particulièrement attendus. Sera également abordée la question de nos relations avec nos tutelles : comment amener nos administrations ou, à un niveau beaucoup plus élevé, nos ministères de l'éducation, à nous écouter ? Enfin, nous examinerons les manières de combler le fossé entre les fondamentaux couramment enseignés à l'école et les résultats de la recherche de pointe, qui fascinent élèves comme grand public.



L'atelier se tiendra en ligne du 15 au 17 novembre 2022. Les inscriptions pour y assister peuvent se faire jusqu'au 15 novembre à midi (temps universel).

https://www.astro4edu.org/shaw-iau/

Des affiches pour décorer votre classe

Si vous êtes à la recherche de belles affiches pour décorer votre classe, sachez que les grands organismes en proposent à télécharger. Il ne vous restera qu'à les (faire) imprimer. Des affiches imprimées sont aussi proposées à la vente.

Cnes :
https://enseignants-mediateurs.cnes.fr/.

Esa :
https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/ESA_Posters.

Eso :
https://www.eso.org/public/products/ (propose une foule d'autres choses). Notons que les enseignants et médiateurs pourront, après accord, commander gratuitement certains articles à vocation éducative pour une valeur maximale de 180 € : https://eso.org/public/shop/freeorder/

Nasa :
https://solarsystem.nasa.gov/resources/682/space-tourism-posters/

Série « Comment les scientifiques savent ? »

Comment les scientifiques élaborent des théories scientifiques à partir des observations, des mesures, des calculs et des réflexions ? Pour répondre à ces questions, l'Institut national des sciences de l'Univers (Insu) propose des ressources pour faire le point sur la manière dont les savoirs se sont construits. Des sujets comme l'expansion de l'Univers, l'âge du Soleil, l'existence de matière sombre et d'autres sont abordés. Sur chaque sujet, des kakemonos et un livret d'accompagnement sont téléchargeables et pourront être imprimés.

https://www.insu.cnrs.fr/fr/supports-demarche-scientifique



■

LES ALIGNEMENTS PLANÉTAIRES

Philippe Malburet, planétarium Aix-en-Provence

Parmi les événements astronomiques connus du grand public il en est beaucoup qui présentent un réel aspect scientifique ou esthétique. On rencontre ainsi les éclipses de Soleil ou de Lune qui en sont certainement les plus populaires par divers aspects, dont celui de leur faible fréquence pour un lieu donné. Il en est d'autres, moins spectaculaires, qui sont pourtant largement annoncés et commentés dans la presse. Il s'agit de l'alignement de plusieurs planètes. On se propose dans ce qui suit d'aborder cette question en tentant de décrire au mieux l'événement, mais aussi d'en voir les limites. Et tout particulièrement, que faut-il entendre par « alignement » planétaire ?

Retour sur un phénomène astronomique

La presse de ces derniers mois a été abondamment prolixe sur un phénomène astronomique qu'elle qualifie de « rare » et devant se dérouler en mai et juin 2022. Citons quelques titres très accrocheurs.

Franceinfo Région

25 juin 2022

Astronomie : alignement de sept planètes et de la Lune, un phénomène rare, visible à l'œil nu jusqu'au 27 juin.



Fig.1.

© Pixabay

Starwalk.space

24 juin 2022

5 planètes vont s'aligner : parade de planètes en juin 2022.



Fig.3.

© Starwalk

BBC News Afrique

21 juin 2022

Astronomie : vous pouvez observer l'alignement de cinq planètes avec la Lune le 24 juin.



Fig.2.

© Getty Image

TV7 Sud Ouest

26 juin 2022

Alignement rare de sept planètes et de la Lune : ce phénomène exceptionnel surnommé « la grande parade » est visible jusqu'au 27 juin.

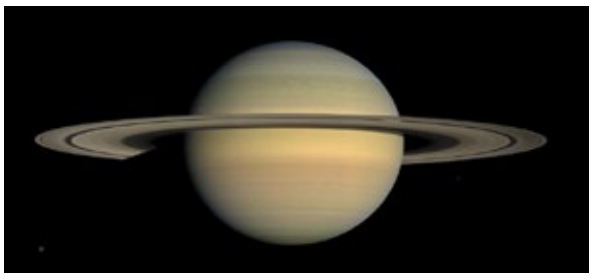


Fig.4.

© AFP

CNews

16 avril 2022

Espace : ce dimanche 17 avril, vous pourrez observer un alignement exceptionnel des planètes dans le ciel



Fig.6.

© Stellarium

Géo

24 juin 2022

Cinq planètes vont s'aligner dans le ciel ce week-end.



Fig.5.

© Gettyimages

Avouons que ce florilège est alléchant : l'événement doit être important ! À y regarder de plus près cependant, on note que l'événement intéresse beaucoup la gent journalistique, mais la précision n'est pas toujours de mise. Aucun de ces supports ne s'embarrasse quant à l'illustration retenue : les quatre premières images n'ont strictement rien à voir avec le phénomène annoncé, la dernière se contente de publier l'image fournie par un logiciel libre utilisé en planétarium (Stellarium). Ce phénomène « rare » était-il pour le mois de juin 2022, plus précisément pour le 24, le 22 ou le 27, ou bien déjà pour avril 2022 ? Un événement dont il est dit qu'il se reproduira le 17 avril et le 27 juin, concerne-t-il le même se produisant à plusieurs reprises, ou bien s'agit-il d'un seul événement, à plusieurs jours d'intervalle ? Plus précisément, celui annoncé pour juin 2022 doit-il être considéré comme une répétition des précédents, ou bien d'un même événement s'étalant sur plusieurs jours ? Ou bien d'un événement nouveau ? Dans toutes ces hypothèses, s'agit-il d'un événement rare ?

Recherche d'une explication

Il convient tout d'abord de donner un sens au terme « alignement ». S'agit-il de dire, ainsi que le suggèrent les figures 1 et 3 précédentes, que toutes les planètes se trouvent sur une même ligne droite passant par le Soleil ? Cette situation ne se présente jamais pour plusieurs raisons.

Tout d'abord les planètes gravitent autour du Soleil dans des plans distincts (et distincts de celui de la Terre, l'écliptique). Géométriquement parlant, on ne peut trouver une droite qui contiendrait en même temps les planètes et le Soleil.

Chacun sait que les planètes du Système solaire gravitent sur des courbes fermées (ellipses) situées dans des plans qui sont très « voisins » de l'écliptique (qui est le plan contenant l'orbite terrestre). Chacun de ces plans orbitaux est « incliné » sur l'écliptique. Les valeurs des inclinaisons des plans orbitaux des planètes sont très faibles (sauf pour Mercure), de l'ordre de quelques degrés.

Pour mieux saisir la situation, un petit croquis aidera à mieux se la représenter. Le schéma de la figure 7 permet de comprendre le terme « inclinaison » par rapport à l'écliptique (E) : le plan (P) contenant l'orbite d'une planète V coupe (E) selon une droite appelée « ligne des nœuds » (NN') : l'inclinaison de (P) par rapport à (E) est l'angle *i*. L'orbite de la Terre (T) autour du Soleil (S) est représentée sur le schéma par l'ellipse bleue, alors que celle de la planète (V) est de couleur lie de vin.

Le Soleil étant la référence absolue, le repère décrit ici porte le qualificatif d'héliocentrique.

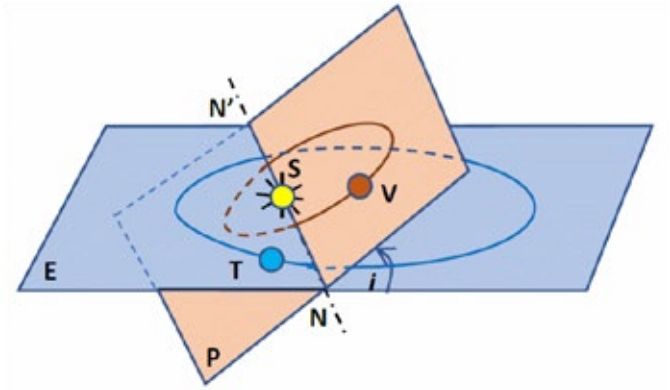


Fig.7. **Deux plans orbitaux ont été représentés : en bleu, celui contenant l'orbite de la Terre (T) ; il porte le nom d'écliptique ; en rose celui contenant l'orbite d'une planète (V). Ces plans se coupent selon une droite (NN') portant le nom de « ligne des nœuds », les nœuds étant les points d'intersection de l'orbite avec l'écliptique. On désigne par i l'angle que font ensemble les plans (E) et (P). Il s'agit de l'inclinaison de (P) sur (E). Selon la 1re loi de Kepler, le Soleil est placé au foyer commun aux ellipses de (E) et de (P).**

Pourtant, si l'on regardait le ciel au petit matin du 22 juin 2022, voici ce que l'on observait :

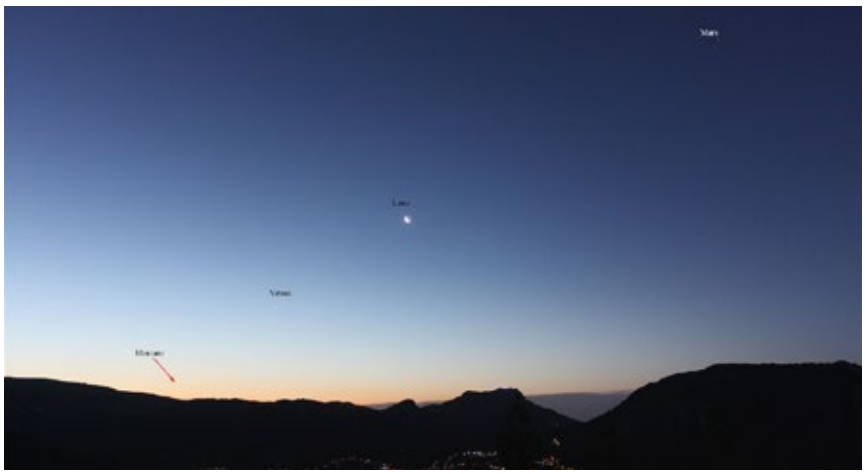


Fig.8. **Ce très beau cliché a été pris depuis le Baou près de Toulon le 25 juin au matin. L'auteur (Patrice Le Guen) s'est ensuite attaché à porter des indications permettant de distinguer les différents astres alignés ce jour-là. Le grand hasard a voulu que la Lune soit aussi de la partie, intercalée entre Vénus et Mars. Le Soleil étant proche de se lever (il est 5 h du matin) rend difficile le repérage de Mercure qui le précède de peu. On est cependant à même d'imaginer l'écliptique, arc de courbe passant par Mercure, Vénus et Mars. Étant donnée la très grande dispersion de l'« alignement » complet, les planètes Jupiter et Saturne n'ont pas pu être photographiées en même temps.**
© Observatoire du Pic des Fées

Pour arriver à mieux comprendre l'effet observé, il intéressant de chercher à modéliser la situation.

Modélisation de la situation de juin 2022

Pour se convaincre que la situation n'est pas due au hasard, utilisons le logiciel Stellarium qui permet de projeter le ciel vu dans un planétarium. Voici ce que l'on obtient :

Les planètes Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne se trouvent effectivement très proches de l'écliptique et peuvent sembler être sur une même ligne (qui n'est pas une droite). Pour analyser correctement la situation, il est intéressant de connaître les positions réelles des planètes dans le plan de l'écliptique.

Un programme informatique construit à l'aide de plus de 800 coefficients (théorie VSOP87[1]) permet d'avoir une idée assez précise des positions occupées par les planètes le 22 juin 2022 à 5 h du matin.

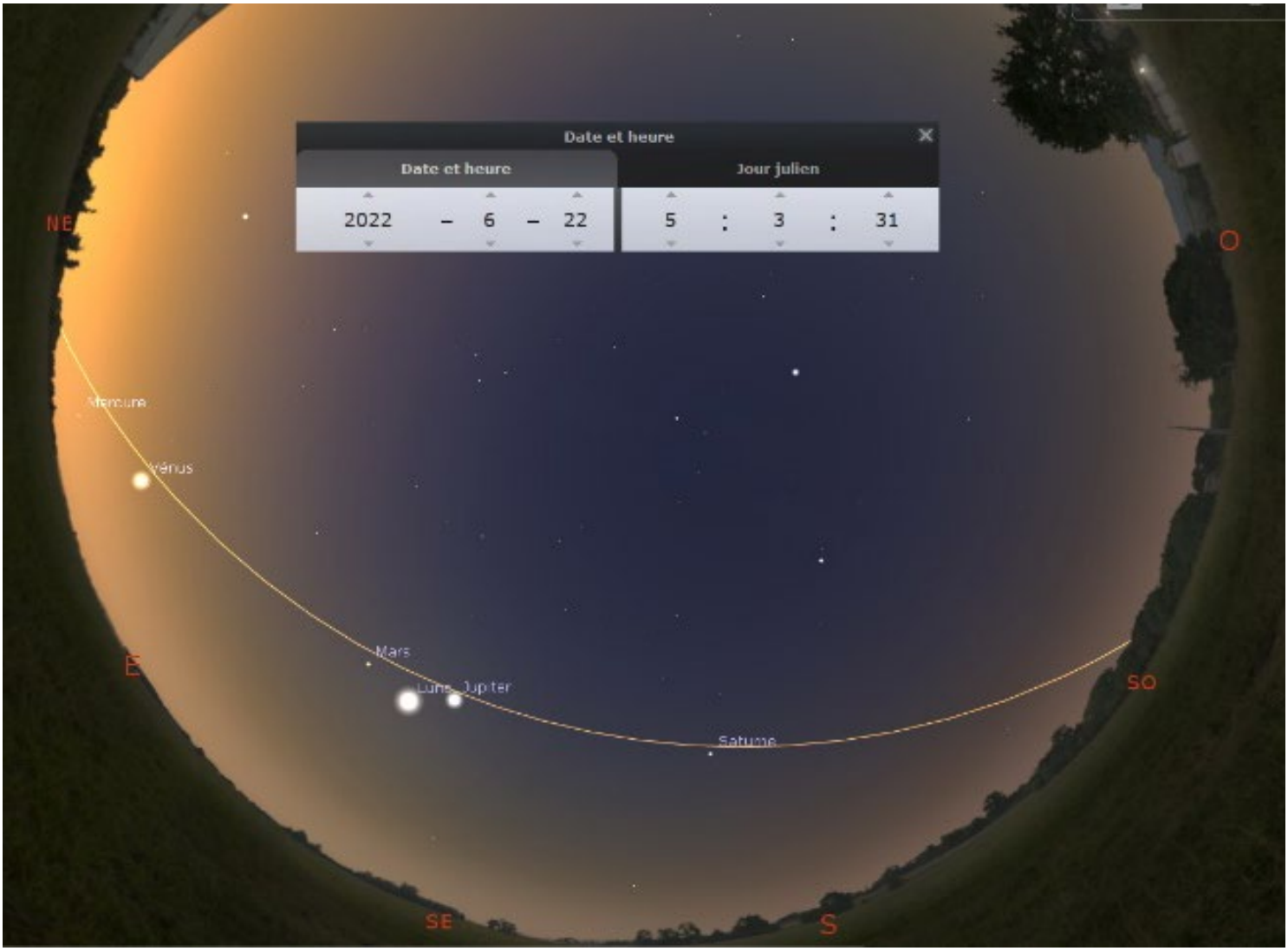


Fig.9. **Image du ciel du 22 juin 2022 à 5 h du matin ; la ligne orange représente l'écliptique. © Stellarium**

1 VSOP87 signifie Variations Séculaires des Orbites Planétaires. Il s'agit d'une théorie mise en place par deux chercheurs de l'IMCCE (Institut de mécanique céleste et de calculs d'éphémérides de l'Observatoire de Paris), Pierre Bretagnon et Gérard Francou, en 1987. Des tables de coefficients (plus de 800) ont été ensuite mises à la disposition du public par Jean Meeus (SAF, 2014). Ce sont ces données qui ont été utilisées ici.

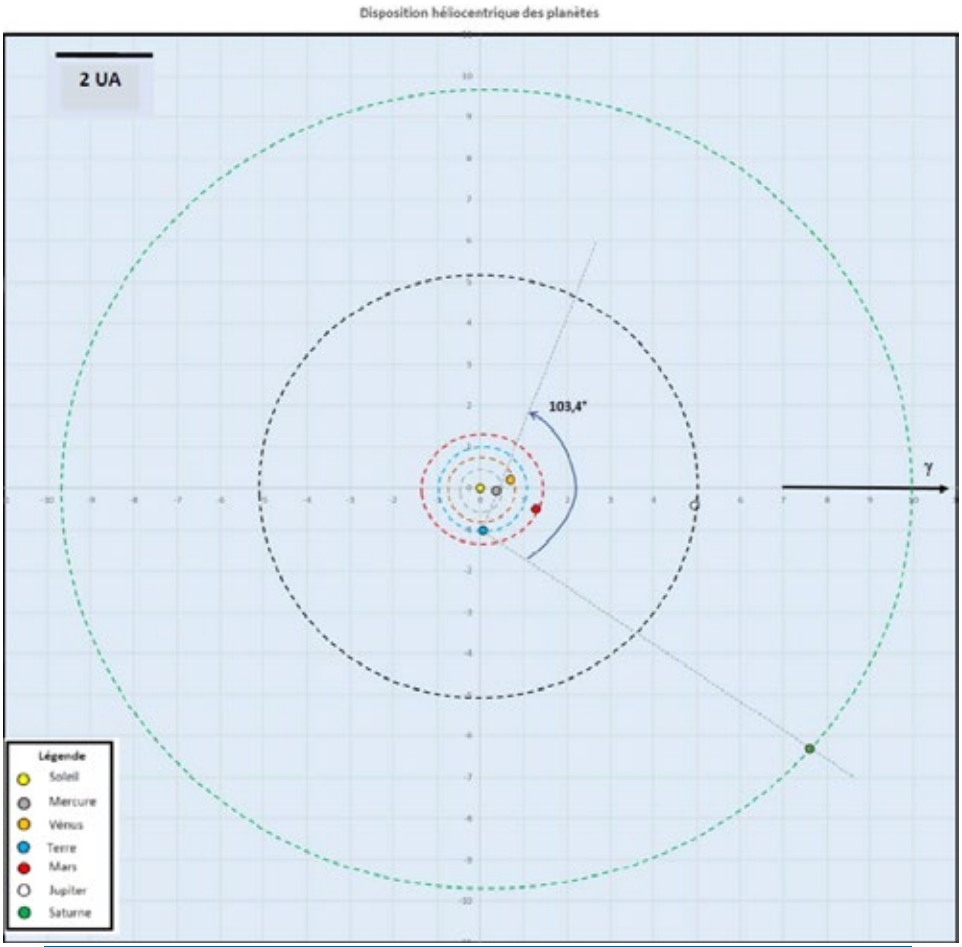


Fig.10. **Positions réelles des planètes dans l'écliptique le 22 juin 2022 à 5h du matin.**

La figure 10 montre à l'évidence que les planètes présentées comme « alignées » le 25 juin 2022 sont très loin de l'être en réalité. Vues depuis la Terre, elles se trouvent toutes à l'intérieur d'un angle mesurant environ 103,4°.

Si l'observateur les voit alignées, c'est donc dû à un effet de perspective du fait que la Terre (donc l'observateur lui-même) se trouve également dans le plan de l'écliptique.

Dans la figure 10 les cercles en pointillé représentent les orbites des planètes. Chacune de celles-ci est représentée par un disque coloré de même diamètre dont le seul intérêt est de les repérer plus facilement les unes par rapport aux autres. La direction γ désigne ce que l'on nomme équinoxe de printemps : lorsque le Soleil, vu depuis la Terre, est dans cette direction, c'est le jour du printemps. On constatera que la position occupée par la Terre sur son orbite dans ce graphique (22 juin) est celle du début de l'été (elle est située à 90° de l'équinoxe de printemps, dans le sens direct). Les longitudes héliocentriques se mesurent à partir de la direction de γ.

La Newsletter de juin 2022 publiée par l'IMCCE donne une ouverture de 104° et propose un schéma semblable à celui de la figure 10.

Le schéma 11 suivant reproduit les positions relatives observées depuis la Terre.



Fig.11. **On retrouve bien l'aspect observé, avec, dans l'ordre de gauche à droite : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Une figure complète montrerait qu'Uranus et Neptune se trouvent aussi sur cette ligne. Seules des limitations imposées à la figure ne permettent pas de les représenter.**

Les positions des planètes sont caractérisées essentiellement par un angle appelé « longitude géocentrique écliptique ». Voici les longitudes des planètes calculées pour le 22 juin :

Planète	Longitude
Mercure	68,7°
Vénus	59,0°
Mars	20,7°
Jupiter	6,6°
Saturne	-34,9°

On en déduit les écarts suivants :

Mercure – Vénus	9,7°
Vénus – Mars	38,3°
Mars - Jupiter	13,1°
Mercure - Saturne	103,6°

Comme les figures 10 et 11 le laissaient supposer, l'écart le plus important était entre Mercure et Saturne ; cet angle est généralement désigné par « ouverture » du regroupement planétaire.

Notes.

1. La révolution copernicienne, que Galilée fut le premier en mesure de justifier, obligea les astronomes à changer de paradigme : à partir d'un système géocentrique alors universellement admis, ils furent obligés d'interpréter les événements qu'ils pensaient pouvoir interpréter dans un repère géocentrique, en les transposant dans un repère héliocentrique. Le Monde avait changé de centre…
2. Le terme d'écliptique provient précisément de ce qu'une éclipse de Soleil (ou de Lune) ne peut se produire que si les deux astres sont voisins de leurs nœuds, donc dans l'écliptique : il n'y a donc que quatre situations où elles peuvent être alignées au sens géométrique du terme.

Qu'en est-il de la rareté de ces phénomènes ?

Chacun sait que les premiers astrologues ont conquis leur pouvoir grâce aux prédictions qu'ils étaient capables de faire. Bons observateurs, ils avaient remarqué la répétition de certains phénomènes d'ordre astronomique qui, pensaient-ils, les rendaient capables de faire des prédictions dans toutes sortes de domaines, dont le caractère des gens ou le succès dans un conflit militaire. Ils ont tiré leur puissance de ce fait.

Mais aujourd'hui ? L'informatique n'est-elle pas capable de prévoir, encore mieux que les astrologues, les événements de nature astronomique ? Bien sûr que si !

L'un des problèmes qui se pose dans ces circonstances consiste à bien définir l'événement astronomique dont il est question, ce qui implique d'avoir une parfaite connaissance des divers mouvements qui lui donnent naissance. Évoquons la « conjonction » de deux planètes : elle se produit lorsque ces planètes sont apparemment proches l'une l'autre, cette proximité étant évaluée en degrés. Dire : « cette conjonction entre Jupiter et Saturne (dénommée grande conjonction), se reproduira dans vingt ans » nécessite de bien connaître les mouvements de ces astres. L'accumulation des observations, au fil des siècles, permet aussi d'avoir une certaine idée de sa valeur ; les techniques informatiques actuelles fournissent une valeur très exacte.

En dehors des grandes conjonctions, les autres conjonctions présentent des intervalles de répétition très variables. Revenons à l'événement du 25 juin 2022.

Un tel regroupement n'est soumis à ***aucune*** périodicité. L'IMCCE, dont il a déjà été question, a recensé les regroupements des 7 planètes qui se sont produits depuis l'an 133, jusqu'à celui de 2124. Trente-trois regroupements ont ainsi été trouvés. Leurs caractéristiques sont très différentes : au cours de l'année 947 il y en eut deux : en mai (ouverture de 37° pour 5 planètes et 58° pour les 7) et en novembre (102°) ; de même 1164, vit deux regroupements en septembre (107°) et en octobre (93°). Nombreux sont ceux dont l'écart angulaire était plus faible que l'actuel : les valeurs s'étalent entre 53° et 110°. Notons que le 28 janvier 1984, il y eut un regroupement plus serré que l'actuel (il était de 68°, contre 104° en 2022). Curieusement, peu de spectateurs de cet événement en ont gardé un franc souvenir.



Fig.12. **Positions des planètes le 24 mai 947 (en longitudes géocentriques). On constate que les planètes sont beaucoup plus groupées (37°) que dans le cas de 2022.**

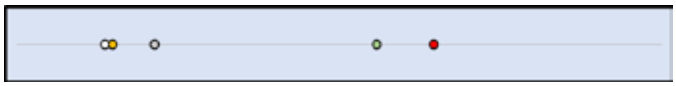


Fig.13. **Regroupement du 24 janvier 1984 (en longitudes géocentriques). Les planètes étaient aussi plus groupées (52°) qu'en 2022 et que Vénus et Jupiter étaient en conjonction serrée.**

La même Newsletter de l'IMCCE (juin 2022) fournit un graphique concernant la « reproduction » de tels événements, mais concernant les 7 planètes visibles[2].

Alignement du 8 septembre 2040

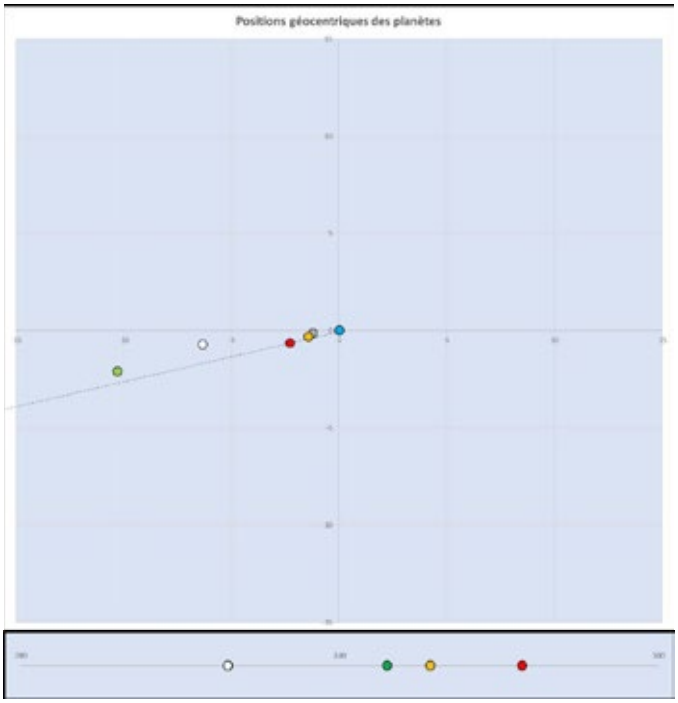


Fig.14. **Disposition des planètes (longitudes géocentriques) Sur le second schéma Mercure et Vénus coïncident).**

Le 8 septembre 2040, nous pourrons voir le soir les cinq planètes visibles à l'œil nu, de Mercure à Saturne,

2 https://www.imcce.fr/lettre-information/archives/191

accompagnées de la Lune regroupées sous un angle inférieur à 10° (Uranus et Neptune n'en feront pas partie).

Conclusion

Parler de « l'alignement » du 25 juin 2022 est donc évoquer un non-événement astronomique, car
1 Les planètes ne circulent pas dans un même plan.
2. Leurs projections sur le plan de l'écliptique (figure 13) montrent qu'elles sont, au contraire, loin d'être « alignées ».
3. Cet événement s'est réalisé pendant plusieurs jours consécutifs du mois de juin 2022, avec de très légères différences d'ouverture.
Alors on est en droit de se poser la question de savoir l'intérêt qu'il y a à conserver un tel terme, car il ne correspond en rien à la réalité physique.
Certes ce que l'on « voit » en juin 2022, ce sont bien des planètes qui, sur le fond du ciel, semblent positionnées sur une même ligne que le Soleil. Le terme d'alignement provoque pourtant de la confusion chez ceux qui s'emploient à comprendre la réalité, ajoutant ainsi comme un peu de poids à l'astrologie toujours vivace qui, même au XXIe siècle, continue à remplir les magazines de fausses nouvelles auxquelles peut croire un public non averti (et ce ne sont pas les enseignements actuels de l'astronomie en lycée qui permettront de mieux comprendre le monde dans lequel nous vivons).

On a vu que cet « alignement » se faisait sur la ligne écliptique, et non dans le plan écliptique : il s'agit donc d'un événement vu en perspective.

Pour terminer, précisons que l'expression « alignement des planètes » au sens alignement sur un même grand cercle de la sphère céleste est une tautologie : les planètes appartenant à peu de choses près à l'écliptique, sont toujours alignées dans le ciel que nous observons. Donc annoncer un « prochain alignement » n'est pas une nouvelle. Si, au lieu de parler d'alignement, on évoque un regroupement apparent particulièrement serré de planètes (ou regroupement angulaire), on est plus près de la vérité. Il convient d'avoir présent à l'esprit que le spectacle auquel on nous convie est la vue en perspective d'un événement se déroulant dans l'espace physique à trois dimensions. Accoler à ce terme le qualificatif « rare » est encore ajouter à la confusion ; dire qu'il ne se reproduira pas avant quelques dizaines d'années, c'est manifestement ici encore jouer avec le goût du public. Quant à en tirer des prévisions sur les caractères des gens ou sur l'annonce d'un événement à venir, il n'y a que les astrologues qui s'en prétendent capables !

Remerciements. L'auteur tient à remercier tous ceux qui l'ont aidé à mieux maîtriser certaines questions dont la qualité première n'est pas, quoiqu'on en pense, l'évidence : Pierre Causeret, Christian Larcher, Jean Ripert (Comité de liaison enseignants astronomes) et Pierre Fernandez (planétarium Peiresc, Aix-en-Pce).

■

Des phrases comme la suivante : « *Dans le ciel de ce mois de juin se présente un ballet spectaculairement rare, celui de cinq planètes alignées. Mars, Jupiter, Vénus, Mercure et Saturne sont visibles à l'œil nu. Mais au-delà de la beauté de leur parade, cette conjonction aux énergies exacerbées pourrait bien influer sur nos destinées* » ont-elles encore leur place dans ce XXIe siècle naissant ?

Cette phrase est extraite d'un magazine récent, dont le nom ne sera pas donné.

« RETOUR VERS LE FUTUR »
OU COMMENT FAIRE VOYAGER DES ENFANTS VERS MARS

Gilles Bouteville

Une belle activité qui permet de sensibiliser les jeunes élèves (école et collège) aux contraintes d'un voyage vers Mars.

Le but de cet atelier était de faire prendre conscience à des enfants de primaire (CM1-CM2) des difficultés d'un voyage interplanétaire : comment atteindre un objet céleste en mouvement (Mars) à partir d'un objet lui aussi en mouvement (la Terre) ?
J'ai imaginé cette activité pour un atelier des Nuits étoilés d'Auvergne (NEA) organisées tous les 2 ans par le CARA (Collectif d'astronomie de la région Auvergne), manifestation destinée aux écoliers et collégiens.
L'atelier se déroule en 2 parties :
La première est destinée à fixer les connaissances des élèves :
- en termes d'astronomie : étoiles, planètes… ;
- en termes de physique : attraction terrestre, gravité.

La deuxième est expérimentale en simulant le voyage Terre Mars sur une maquette.
L'activité de questionnement est animée avec un tableau ou un paperboard.

Première partie

Elle permet d'établir les connaissances des élèves.

Le questionnement

Chute des corps : « pourquoi ça tombe » ?
Que se passe-t-il si on jette un objet de plus en plus loin ?

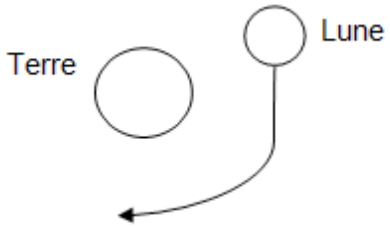


L'activité

On fait dessiner au tableau les trajectoires possibles : droite, courbe, portion de cercle, ellipse, en éliminant celles qui contredisent l'observation.

Les questions

Si on lance avec une vitesse encore plus élevée peut-on « échapper » à l'attraction terrestre ?
Connaissez-vous des objets qui ne « tombent » pas sur Terre mais qui ne s'en éloignent pas indéfiniment ?
Et la Lune : « tombe-t-elle » ?
On teste les hypothèses.
La Lune n'est pas libre sinon elle s'éloignerait à l'infini.
La Lune est-elle fixe ? L'observation montre que non sinon elle tomberait verticalement.
Elle ne s'éloigne pas. Qui l'attire ? Quel est son mouvement ?
La Terre est-elle, elle aussi en mouvement ?
Si oui par quoi ou par qui est-elle attirée ?



Et dans le Système solaire, les planètes « tombent-elles ? » (analogie avec la Lune).

Cette première partie permet de conclure sur les mouvements simplifiés circulaires des planètes autour du Soleil.

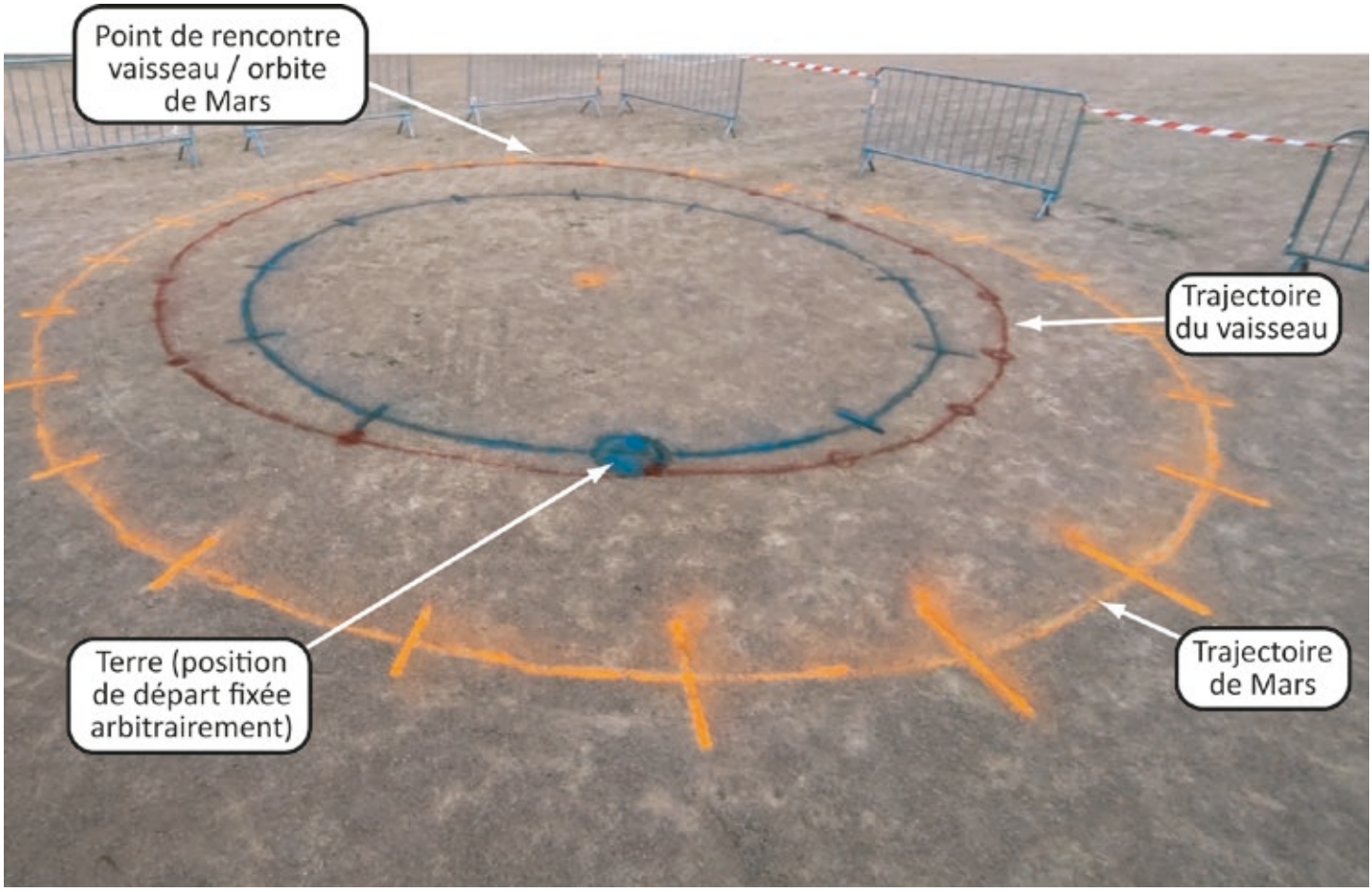
Deuxième partie : le voyage vers Mars

L'activité

On fait dessiner au tableau les orbites supposées circulaires de la Terre et de Mars.
Problématique : comment relier les 2 orbites ? Faut-il une droite, une portion de cercle ou d'ellipse ?
Comment quitter la Terre ? Comment se libérer de l'attraction terrestre ? Qui attire alors les objets ?

La partie expérimentale

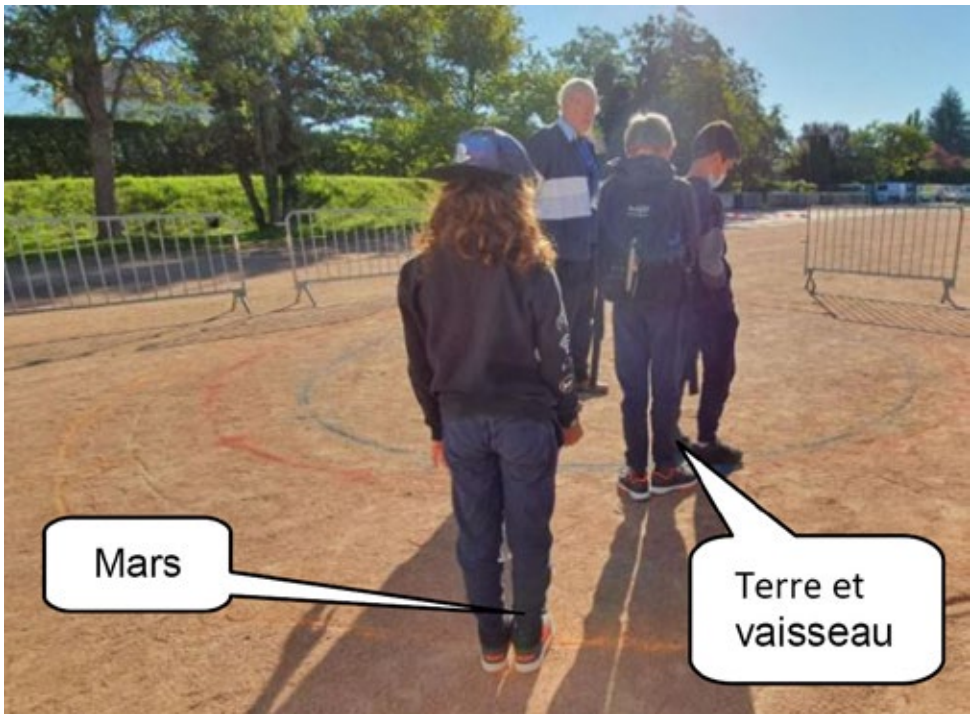
Le matériel
Terrain dégagé (surface utile minimum 10 m × 10 m)
Bombes de peinture de 3 couleurs : rouge-jaune-bleu.
Ballons ou objets pour jouer les rôles du Soleil, des planètes et du vaisseau spatial.
La maquette
Orbite de Mars : diamètre 6 m.
Orbite de la Terre : diamètre 4 m.
Trajectoire : ellipse de demi grand axe 2,5 m et demi petit axe 2,0 m.



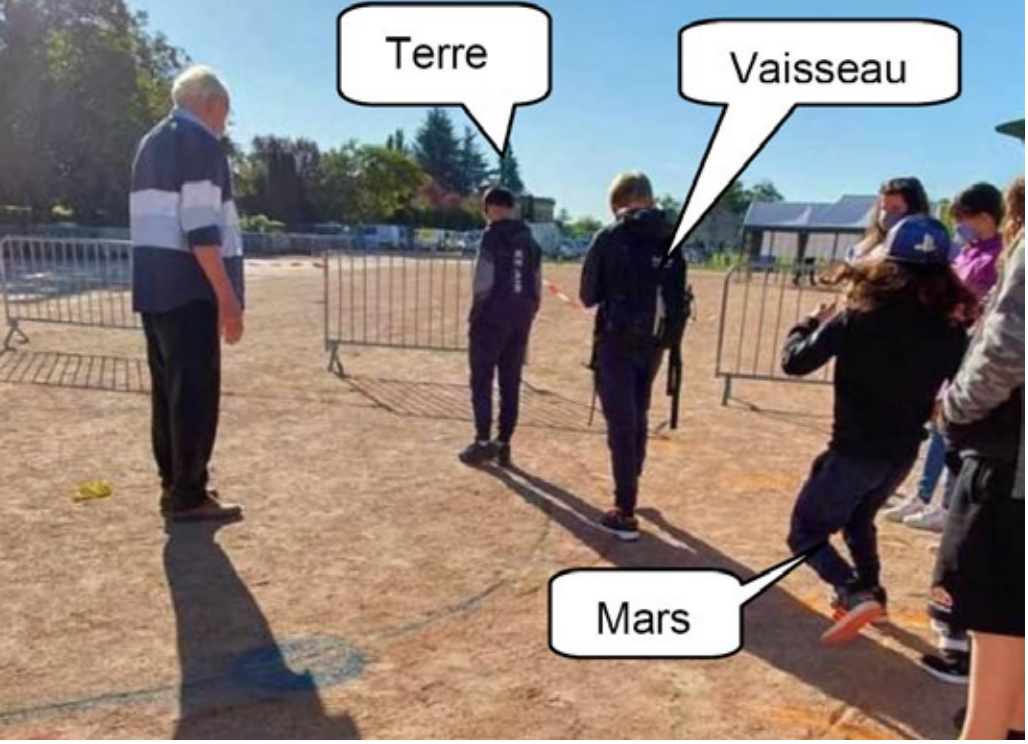
Tous les tracés (orbite de Mars, orbite de la Terre et trajectoire du vaisseau) ont été réalisés à l'avance, avant l'animation. Cela prend d'ailleurs pas mal de temps, il faut charger un peu en peinture pour pouvoir l'utiliser plusieurs fois avec chaque classe.

Les orbites sont graduées en mois terrestres arrondis à 30 jours.
L'orbite de la Terre est découpée en 12 mois et celle de Mars en 23 mois.
La trajectoire du vaisseau est découpée en 18 mois.

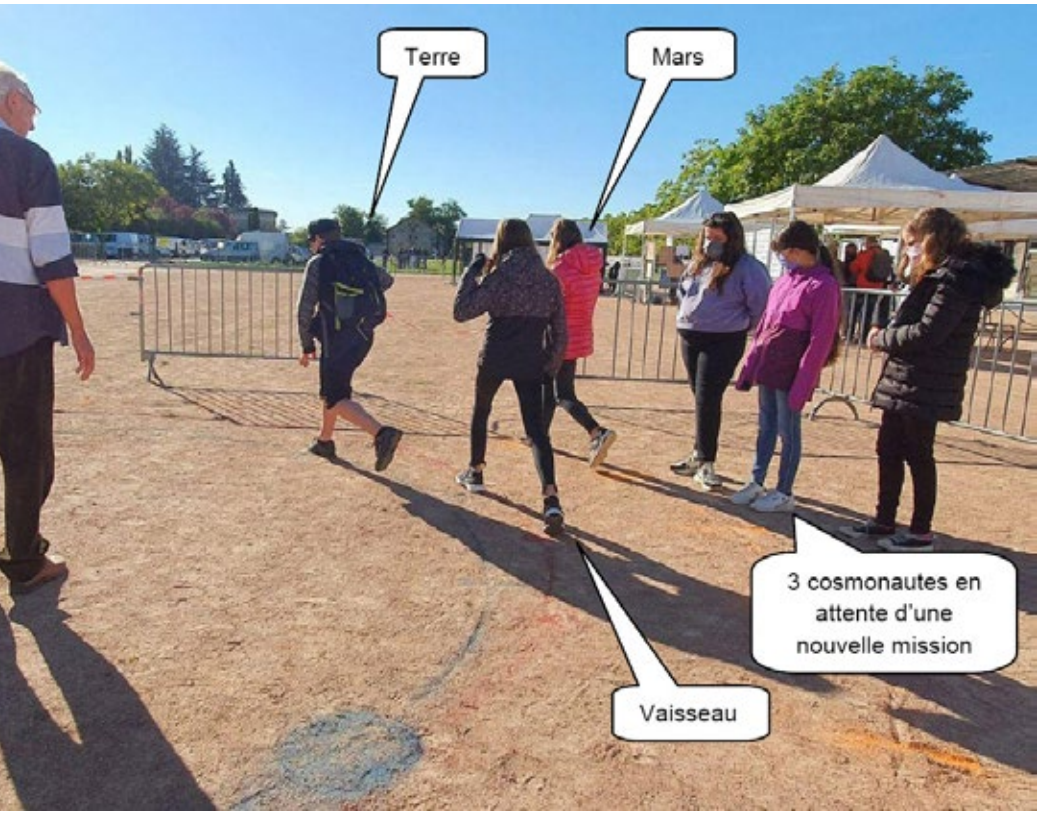
Déroulement
La position initiale de la Terre/vaisseau est fixée arbitrairement.
Par équipe de 3, les élèves testent, sur le terrain, différentes positions de Mars lors du départ du vaisseau (tester au moins 2 positions de Mars ne permettant pas la réussite de la mission).



Position de départ.



Le vaisseau a quitté la Terre.



En route vers Mars. On ne sait pas si le vaisseau pourra rejoindre la planète. Échec ou réussite de la mission ?

En cas d'échec de la mission, on laisse les élèves faire des commentaires. Conclusions attendues : on ne peut pas partir n'importe quand. On subit les lois de la physique.
Il faut anticiper la situation de départ pour réussir la mission.

Que se passe-t-il quand Mars n'est pas au rendez-vous ? Que devient le vaisseau ?
On émet des hypothèses pour le retour : est-il possible ou non ? Si oui après combien de temps ?
On laisse les élèves continuer la simulation sur plusieurs orbites et on réfléchit sur les observations.

Avec un peu de maths on peut vérifier que 3 années terrestres représentent le plus petit nombre de révolutions de Mars et de la Terre permettant de revenir aux positions initiales.
Où était Mars lorsque le vaisseau est arrivé au point de rendez-vous ?
Si Mars est en avance, le départ est trop tardif.
Si Mars est en retard, le départ est trop tôt.
On en déduit la bonne configuration.

Lors d'une mission réussie (position de Mars déterminée pour le départ à 9 intervalles avant le moment du rendez-vous), le retour est-il possible immédiatement ?

Où doit se trouver la Terre par rapport à Mars pour un retour réussi. ?
(On ne demandera pas les positions réelles car le problème est beaucoup trop complexe pour des élèves de primaire).
Situation de départ :
Le vaisseau étant posé sur Mars, on émet des hypothèses pour le retour puis on cherche à vérifier quelle doit être la position que doit occuper la Terre, lors du départ pour le voyage vers la Terre.

En conclusion

Les élèves doivent percevoir :

- que la mission vers Mars nécessite une connaissance approfondie de la mécanique céleste du Système solaire ;
- qu'une mission demande plusieurs années et qu'il sera difficile de résoudre tous les problèmes (eau, oxygène, nourriture) pour une mission habitée ;
- que pour le moment ces missions ne peuvent être confiées qu'à des robots.

■

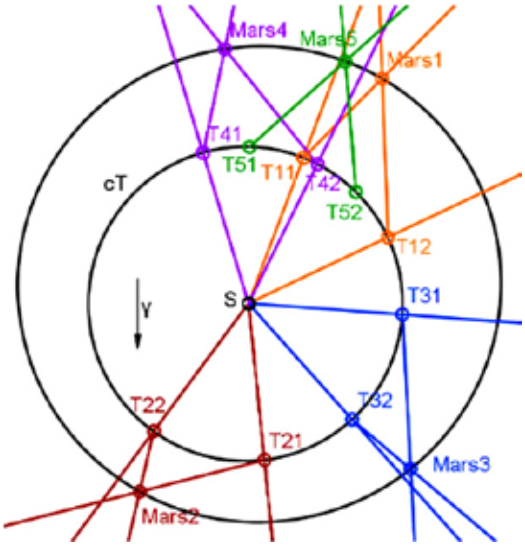
Les lois de Kepler (2)

Nous vous proposons à nouveau une série d'articles sur Kepler.
Mais avant de lire ce dossier, sauriez-vous répondre aux questions pour chacune de ces illustrations ?



1. Statue de Kepler et Tycho Brahe à Prague (crédit Wikimedia/Both Előd).

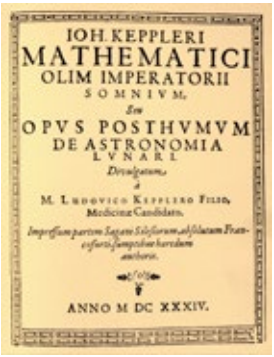
Pourquoi associe-t-on ces deux personnages ?



3. Après avoir reconstitué l'orbite de la Terre, Kepler construit l'orbite de Mars en utilisant des relevés réalisés par Tycho de la position de la planète (schéma de Michel Cauchois extrait d'un article du n° 127 des CC).

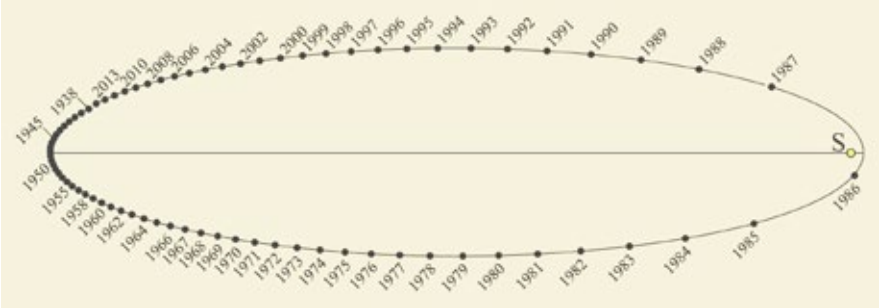
Comment Kepler a-t-il dû choisir ces observations ?

2. Couverture du *Somnium, seu opus posthumum de astronomia lunari* (Le Songe ou l'Astronomie lunaire), ouvrage de Kepler publié en 1634, soit 4 ans après sa mort, par son fils. Il y raconte comment on voit la Terre depuis la Lune (voir l'article page 15). Il y parle en particulier de Volva, Subvolva et Privolva.


IOH. KEPPLERI
MATHEMATICI
OLIM IMPERATORII
SOMNIVM,
Seu
OPVS POSTHVMVM
DE ASTRONOMIA
LVNARI
ANNO M DC XXXIV.

Pourriez-vous deviner ce que désignent ces trois termes pour les habitants de la Lune ? Pour vous aider, Subvolva et Privolva sont deux parties de la Lune.

4. Ce schéma représente la position de la comète de Halley le 1er janvier, de 1938 à 2013 (image extraite de l'article de Michel Bonin sur la comète de Halley dans le n° 141 des CC).



Imaginez que l'on trace tous les segments joignant S à une position de la comète. On découpe ensuite la figure en suivant l'ellipse et tous les segments tracés. On pèse alors les différents secteurs d'ellipse ainsi obtenus sur une balance de précision. Quel sera le plus lourd ?

Réponses

1. C'est grâce aux relevés de Tycho Brahe (qui atteignent la précision de la minute d'arc) que Kepler a pu reconstituer l'orbite de Mars.
2. Volva est la Terre (celle qui tourne), Subvolva désigne l'hémisphère de la Lune depuis lequel on peut voir la Terre alors que Privolva est l'hémisphère depuis lequel elle est invisible.
3. D'après le schéma, on peut comprendre que les observations sont regroupées par 2 (T11 et T12, T21 et T22, T31 et T32…) et qu'entre deux de ces observations, Mars doit être revenue dans la même position. Kepler a donc choisi des observations espacées de 687 jours, la période sidérale de Mars.
4. Si la feuille découpée a une épaisseur constante, tous les secteurs d'ellipse auront le même poids d'après la loi des aires de Kepler.

LE SONGE OU L'ASTRONOMIE LUNAIRE
DE JOHANNES KEPLER

Christian Larcher

Dans cet ouvrage Kepler utilise la fiction pour faire passer un message scientifique. Il imagine le monde que l'on verrait si on était sur la Lune. Ce changement de point de vue est essentiel pour se familiariser avec la notion de relativité du mouvement et admettre la nouvelle astronomie de Copernic.

Introduction

Cet ouvrage rédigé en latin et intitulé : *Somnium, seu opus posthunum de astronomia lunari* fut publié en 1634, soit quatre ans après le décès de Kepler et un an après la condamnation de Galilée par l'Inquisition. Kepler était méfiant ; on était en pleine guerre de religions et sa propre mère était accusée de sorcellerie.



JOANNIS KEPPLERI
Somnium, sivè Astronomia Lunaris.

CUm anno 1608. ferverent dissidia inter fratres Imp: Rudolphum et Matthiam Archiducem; eorumque actiones vulgo ad exempla referrent, ex historia Bohemica petita; ego publica vulgi curiositate excitus, ad Bohemica legenda animum appuli. Cumque incidissem in historiam Libussæ Viraginis, arte Magica celebratissimæ: factum quadam nocte, vt post contemplationem siderum et Lunæ, lecto compositus, altius obdormiscerem: atque mihi per somnum visus sum librum ex Nundinis allatum perlegere, cuius hic erat tenor:

Mihi Duracoto nomen est, patria Islandia, quam veteres Thulen dixère: mater erat Fiolschildis, quæ nuper mortua, scribendi mihi peperit licentiam, cujus rei cupiditate pridē arsi. Dum viveret, hoc diligenter egit, ne scriberem. Dicebat enim, multos esse perniciosos osores artium, qui quod præ hebetudine mentis non capiunt, id calumnientur; leges q̃ figant injuriosas humano generi; quibus sanè legibus non pauci damnati, Hecla voraginibus fuerint absorpti. Quod nomen esset patri meo, ipsa nunquam dixit, piscatorem fuisse, & centum quinquaginta annorum senem.

A deces-

Le *Songe* à proprement parer n'est qu'un petit fascicule d'une trentaine de pages mais il fut complété, durant 30 ans, par 223 notes regroupées en annexe. Ces notes donnent de nombreuses explications scientifiques complémentaires liées, entre autres, aux travaux de Galilée et de Tycho Brahé. Elles donnent également des précisions sur la manière d'interpréter certaines parties du texte.

Il s'agit d'un songe, on peut donc à loisir multiplier les allégories, les métaphores, mettre dans la bouche d'un démon les théories coperniciennes…
Au-delà de la fantasmagorie ce livre a d'abord une vocation de fiction scientifique didactique.

On considère que le *Songe* est le véritable premier ouvrage de science-fiction de la littérature occidentale. Il existait précédemment de nombreux récits fictionnels décrivant des voyages vers la Lune mais celui-ci s'appuie sur des bases rationnelles dans le cadre de l'astronomie de Copernic.

L'objectif de l'auteur est clairement indiqué par la note n° 4 :
« Le but de mon Songe est de donner un argument en faveur du mouvement de la Terre ou, plutôt, d'utiliser l'exemple de la Lune pour mettre fin aux objections formulées par l'humanité dans son ensemble qui refuse de l'admettre. Je pensais que cette vieille ignorance était bien morte, et que les hommes intelligents l'avaient arrachée de leur mémoire, mais elle vit toujours, et cette vieille dame survit toujours à l'Université ».

Le récit du Songe

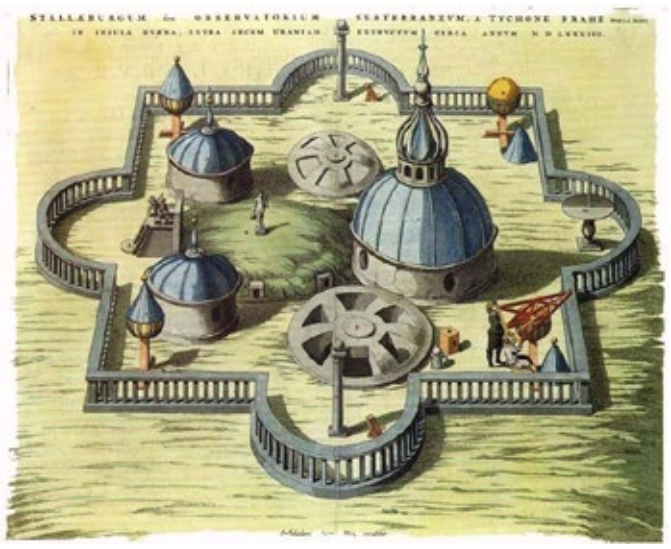
L'idée initiale du *Songe* était déjà contenue dès 1593 dans une *Dissertatio* rédigée par Kepler, alors étudiant à Tübingen, dont le titre était : *Comment les cieux apparaissent-ils à un homme situé sur la Lune ?*
Le livre comprend trois récits intriqués les uns dans les autres.
Le premier concerne Kepler. Il raconte qu'en 1608 il lisait un livre consacré à l'histoire de Libussa, une princesse de Bohême connue pour ses talents de magicienne. Un soir, après avoir contemplé la Lune et les étoiles, il s'endormit. « Au plus profond de mon sommeil, je crus lire un livre rapporté de la foire (de Francfort) » et voici ce qu'il raconte.

Commence alors, un second récit : « Je m'appelle Duracotus, ma patrie est l'Islande (Thulé, pour les anciens), et ma mère avait pour nom Fioxhilde ». Selon un rite spécifique sa mère « cueillait des herbes dont elle tirait des décoctions à la maison et dont elle remplissait des sachets en peau de chèvre qu'elle allait vendre sur le port aux capitaines ». En d'autres termes elle pratiquait magie et sorcellerie.
L'enfant est abandonné par sa mère à un capitaine de navire qui l'embarque à son bord. Le navire se rend sur

l'île de Hven située entre le Danemark et la Norvège. Sur cette petite île de 7,5 km², Tycho Brahé (astronome de Frderik II de Danemark) a fait construire l'observatoire d'Uraniborg[1]. L'enfant y débarque et devient un élève très assidu du grand savant. Il reste sur l'île pendant cinq années et il acquiert une vaste et riche culture astronomique. Il décide alors de revenir dans son village natal où il retrouve sa mère, toujours vivante.



Rudolphe II.



Observatoire d'Uraniborg de Tycho Brahé.

1 Thycho Brahé deviendra plus tard mathematicus de Rudophe II Empereur du Saint–Empire romain germanique.

Avant de mourir sa mère lui indique qu'elle a la capacité d'échanger avec « les esprits les plus sages » que l'on appelle « démons ». Kepler précise (dans la note 34) que ce mot vient du grec δαεμων qui désigne « celui qui sait », « ces esprits sont les sciences qui dévoilent les causes des phénomènes. Le terme grec daimon m'a suggéré cette allégorie ».
Fioxhilde connaît bien l'un d'eux, « pour l'invoquer, vingt-et-un caractères sont nécessaires ». On apprendra qu'il s'agit des 21 lettres contenues dans *Astronomia Copernicana*. L'intention de l'auteur est donc clairement réaffirmée, il s'agit de privilégier le système copernicien.
« Ma mère s'éloigna sur-le-champ […] prononça quelques mots à voix haute, formula sa requête puis revint […] s'asseoir à mes côtés. […] il s'éleva (alors) le raclement d'une voix rauque, surnaturelle, confuse et sourde, murmurant en islandais »…
Le troisième récit, celui du démon, commence alors. Il explique comment les démons procèdent pour transporter des humains sur la Lune.

Comment aller sur l'île de Levania (la Lune)

D'après le démon il faut attendre une éclipse totale de Lune et profiter du cône d'ombre produit par le passage de la Terre entre le Soleil et la Lune. Le voyage est facile pour les démons mais il est « extrêmement difficile d'y transporter des hommes, ils risquent leur vie ».

« Pour compagnons, nous n'acceptons pas d'hommes inactifs, corpulents ou délicats ».
Les Allemands ne conviennent pas « la corpulence et la gloutonnerie des allemands sont aussi fameuses que l'intelligence, la finesse de jugement et la frugalité des espagnols » (note 61). Mais « Nous conviennent à merveille les femmes desséchées ; lorsqu'elles ont pour habitude, depuis l'enfance, de chevaucher la nuit des boucs, des fourches ou de vieux manteaux ».

Le voyageur humain est propulsé par l'esprit des démons mais le voyage doit se faire en moins de quatre heures dans des conditions plutôt rudes.
Le choc initial lui est très pénible, « il souffre comme s'il était un projectile lancé par un boulet de canon […]. Il faut donc l'endormir lors du départ à l'aide de narcotiques et d'opiats et déployer ses membres pour que […] la violence du choc se répartisse dans chacun de ses membres […]. Quand la première partie du trajet est accomplie, le transport devient plus facile […] ».
Il arrive un moment où l'attraction de la Lune devient prépondérante.
La description du voyage relève de la magie mais différents aspects techniques restent d'actualité : le

choc du départ, l'air raréfié, le froid sidéral, la phase de mouvement inertiel et le ralentissement nécessaire pour un atterrissage en douceur.

Les conditions du voyage sont assez conformes aux conceptions actuelles. Il y a une phase d'accélération pour se libérer de l'attraction terrestre puis un mouvement à vitesse constante lorsque les forces d'attraction des deux corps tendent à s'équilibrer. « Nous l'accélérons en usant comme je l'ai dit, de notre volonté. Nous arrivons avant le corps afin qu'il ne se fasse pas de mal en atteignant trop violemment la surface de la Lune ».

Ce que Kepler voulait faire comprendre par ce voyage imaginaire transparaît dans le choix d'un vocabulaire explicite. La Terre est désignée par **Volva** (du latin *volvere* tourner) mais le mot signifie aussi « fée » en islandais... La Lune est désignée par **Levania** ce mot d'origine juif accentue le caractère insolite. Par ailleurs Lavan signifie blanc en hébreu.
La face de la Lune qui voit la Terre est appelée « ***Subvolva*** » (sub en latin signifie sous) ; la face qui ne la voit pas « ***Privolva*** » car elle est privée de Terre.

« Sélénographie » de Levania (la Lune)

Les deux hémisphères de Levania sont soumis à l'alternance du jour et de la nuit. « Cependant, la longueur des jours ne varie pas au cours de l'année, comme chez nous. Le jour est en effet toujours à peu près égal à la nuit mais la durée d'un jour et d'une nuit ajoutés l'un à l'autre, ont une durée égale à un de nos mois ». En d'autres termes un jour sur Levania a environ la même durée que quinze de nos jours terrestres.

Vue depuis Volva (la Terre), Levania présente toujours la même face car son mouvement de rotation est synchrone avec son mouvement de révolution autour de la Terre : la durée d'une révolution est égale à la durée d'une rotation. Un observateur lunaire situé sur Subvolva aperçoit la Terre toujours à la même place dans le ciel (à la libration près) comme si elle était « clouée au ciel » nous dit Kepler. La Terre ne se lève pas, ne se couche pas. Mais Volva apparaît avec un diamètre environ quatre fois supérieur à celui de la Lune vue depuis la Terre. « Leur Volva croît et décroît, tout autant que, pour nous, notre Lune ». C'est-à-dire qu'elle présente des phases (nouvelle Volva, pleine Volva, premier et dernier quartier).

« Le mouvement de Volva permet d'établir l'heure. Bien qu'on ne la voie jamais se déplacer, elle effectue sur place […] un mouvement de rotation, en laissant voir une suite de taches exceptionnellement variée. Pour les habitants de Subvolva, cette rotation s'achève avec le retour des mêmes taches et correspond à une heure, l'équivalent d'un peu plus d'un jour et une nuit. Voilà l'unique et invariable moyen de mesurer le temps ».

<u>Du visage de la Lune vu depuis la Terre au visage de la Terre vu depuis la Lune</u>
Kepler avait traduit du grec au latin l'ouvrage écrit par Plutarque intitulé : *Du visage que l'on voit sur la Lune.*

Dans son rêve savant il décrit quel visage serait vu depuis Levania au moment de la pleine Volva.
« On voit, à l'Est, comme un buste humain coupé à la hauteur des épaules, qui s'approche pour donner un baiser à une jeune fille vêtue d'une longue robe, qui étend le bras vers l'arrière afin d'interpeller un chat qui saute ».

Images Guillaume Canat.



L'homme correspond à l'Afrique du Nord, la tête de la jeune fille à l'Espagne, le baiser se situe au niveau du détroit de Gibraltar. Les bras de la jeune fille sont représentés par l'Italie et la Grande-Bretagne, tandis que le chat est constitué par la Scandinavie. (notes 153 à 172). On sait que la vue de Kepler était plutôt assez mauvaise…

Le *Songe* de Kepler s'interrompt brutalement. « J'en étais là dans mon rêve, lorsque le vent qui s'était levé, avec la pluie qui l'accompagnait, me réveillèrent et ne me permirent pas de lire la fin du livre rapporté de la foire de Francfort ».

Pourquoi ce petit fascicule de trente pages et ses notes présentent-ils autant d'intérêt ?

Le *Songe* de Kepler permet une médiation entre le monde des vérités usuelles de l'époque et le monde nouveau que les scientifiques viennent d'établir (celui de Copernic). Il extrapole les vérités d'aujourd'hui afin d'anticiper les vérités futures d'un monde nouveau, tout en respectant le plus rigoureusement possible la cohérence scientifique.



La fiction scientifique favorise indéniablement ce passage, elle a des propriétés heuristiques facilitant le passage d'un monde géocentrique à un monde héliocentrique. Il s'agit d'opérer un changement profond de paradigme, d'une véritable révolution culturelle au sens de Thomas Kuhn in *La structure des révolutions scientifiques*. Le changement de « point de vue » c'est-à-dire de référentiel est didactiquement d'une grande richesse.

L'observateur sur Terre ne perçoit pas le mouvement de celle-ci mais il voit clairement le déplacement de la Lune ainsi que ses différentes phases. « Les luniens pensent que la surface de leur Lune est immobile » (note 135). Le lecteur peut se mettre à la place de l'observateur sur la Lune qui lui non plus ne perçoit pas le mouvement de l'astre sur lequel il se trouve mais peut observer la rotation de la Terre en 24 h. Il peut imaginer qu'elle a aussi des phases. Il s'agit, en quelque sorte de transposer par l'imagination l'œil du terrien sur la Lune (note 22).

Bibliographie

- Kepler J : *Le Songe ou l'astronomie lunaire* trad. du latin Michèle Ducos, Presses Universitaires de Nancy, 1984 ou trad. Th Miocque éditions M. Waknine 2013.
- Koestler : *Les Somnambules* ; Les Belles Lettres 2010.
- Koyré : *Études galiléennes* ; Hermann 1966.
- Luminet JP : *L'œil de Galilée* ; JC Lattes 2009.
- SAF : Quatrième centenaire de la naissance de Kepler 1973.
- Simon G. : *Kepler, astronome, astrologue* ; Gallimard, Paris 1979.
- Verdet JP : *Une histoire de l'astronomie* ; collection Points Sciences Seuil 1990.
- Plutarque « Le visage qui apparaît dans le disque de la Lune ». Traduction A. Lenould : https://www.septentrion.com/fr/livre/?GCOI=27574100122720

■



Uraniborg.

JWST, GAIA... 3e LOI DE KEPLER ET POINT DE LAGRANGE L2

On trouve de nombreux satellites au point de Lagrange L2 : le James Webb Space Telescope dont on a beaucoup parlé et dont on commence à publier les résultats, mais aussi Spitzer et Herschel (eux aussi spécialisés dans l'infrarouge), WMAP et Planck (rayonnement à 3 K), Gaia (astrométrie) et bientôt Euclid (mesure de redshift). Mais qu'a de particulier ce point L2 ?

La troisième loi de Kepler relie la période de révolution d'une planète, notée T, au demi grand axe de son orbite noté a (en gros la distance Soleil planète). Elle s'écrit a^3/T^2 = constante. Elle se démontre simplement à partir de la loi de la gravitation dans le cas simple d'orbites circulaires uniformes (encadré 1).

Encadré 1

Pour une planète située à une distance a du Soleil et orbitant avec une période T :

- l'accélération centripète A est égale à ω^2 a, où ω est la vitesse angulaire (c'est de la cinématique).

Comme ω est égal à $2\pi/T$, on a : $A = 4\pi^2 a/T^2$;

- le champ de gravitation g au point où se trouve la planète est égal à GM_S/a^2 (M_S = masse du Soleil).

En écrivant l'égalité entre les deux, on obtient :

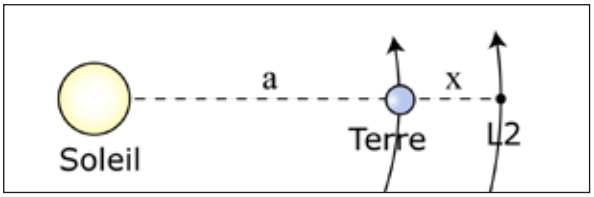
$$\frac{4\pi^2 a}{T^2} = \frac{GM_S}{a^2} \quad \textbf{[1]}$$

ce que l'on peut transformer en $\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM_S}{4\pi^2}$

C'est la 3e loi de Kepler généralisée grâce à Newton.

Une conséquence directe est que, plus une planète est éloignée du Soleil, plus sa période est grande.

Venons-en maintenant au JWST : il doit rester aligné avec le Soleil et la Terre en un point appelé point de Lagrange L2.



Pour rester dans cet alignement, il doit donc tourner autour du Soleil en un an comme la Terre. Mais d'après la 3e loi de Kepler, il devrait tourner autour du Soleil en plus d'un an puisqu'il est situé plus loin du Soleil que la Terre. Comment résoudre ce problème ?

La 3e loi de Kepler est valable si on ne considère que l'attraction du Soleil. Or, pour le JWST, il faut également tenir compte de l'attraction de la Terre. La masse de la Terre augmente le champ de gravitation en L2, « obligeant » ainsi le JWST à tourner un peu plus vite. Si on se place à la bonne distance de la Terre, on doit pouvoir obtenir pour le JWST une période d'un an permettant de conserver l'alignement Soleil Terre L2. On peut calculer qu'en plaçant ce point L2 à 1,5 million de km de la Terre, le champ de gravitation dû au Soleil et à la Terre induit une période d'un an, égale à celle de la Terre autour du Soleil (encadré 2).

Pour terminer, précisons qu'il existe 5 points de Lagrange illustrés dans l'article sur le JWST du n° 177 et que le point L2 est instable, le JWST se déplaçant autour de ce point.

Encadré 2

Au point L2 :

- l'accélération centripète A est égale à ω^2 r

avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$ et $r = a + x$, ce qui donne $A = \frac{4\pi^2(a+x)}{T^2}$

- le champ de gravitation g_S dû au Soleil est égal à $\frac{GM_S}{(a+x)^2}$
- le champ de gravitation g_T dû à la Terre est égal à $\frac{GM_T}{x^2}$
- le champ de gravitation total est donc

$$g_S + g_T = \frac{GM_S}{(a+x)^2} + \frac{GM_T}{x^2}$$

- En écrivant l'égalité entre les deux, on obtient :

$$\frac{4\pi^2(a+x)}{T^2} = \frac{GM_S}{(a+x)^2} + \frac{GM_T}{x^2} \quad \textbf{[2]}$$

Il s'agit d'une équation qui n'est pas simple à résoudre ! On peut la simplifier on divisant membre à membre l'équation [2] par l'équation [1] de l'encadré 1. La période T est identique dans les deux puisqu'on veut que le JWST suive la Terre. Ce qui donne :

$$\frac{a+x}{a} = \frac{a^2}{(a+x)^2} + \frac{M_T}{M_S}\frac{a^2}{x^2}$$

Si on appelle y la valeur de la distance recherchée en unités astronomiques, on a alors $y = x/a$ et l'équation devient :

$$1 + y = \frac{1}{(1+y)^2} + \frac{M_T}{M_S}\frac{1}{y^2} \quad [3]$$

On voit ainsi que l'équation ne dépend que du rapport des masses de la Terre et du Soleil mais elle reste compliquée à résoudre telle quelle. On utilise alors une approximation. On sait que le JWST est relativement proche de la Terre, donc que y est petit devant 1.

On a alors : $\frac{1}{(1+y)^2} \approx 1 - 2y$. L'équation [3] devient :

$$3y = \frac{M_T}{M_S}\frac{1}{y^2} \text{ ou } y^3 = \frac{M_T}{3M_S} \text{ d'où } y = \sqrt[3]{\frac{M_T}{3M_S}}$$

Avec $M_S = 1{,}989\times10^{30}$ kg et $M_T = 5{,}974\times10^{24}$ kg.

On trouve y ≈ 0,01 UA soit **1 500 000 km** environ. C'est bien la distance donnée dans la littérature.

Merci à Béatrice Sandré pour ses calculs avisés. ■

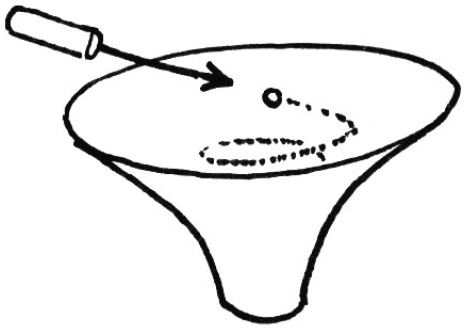
LA REPRÉSENTATION MÉCANIQUE DES MOUVEMENTS PLANÉTAIRES

Roland Trotignon, Société astronomique populaire de Toulouse

Bien avant les simulations numériques, des systèmes mécaniques rendaient compte des mouvements des planètes. L'auteur présente quelques exemples.

Si de nombreux sites internet proposent des simulations informatiques des mouvements planétaires, les représentations par maquettes mettant en jeu des objets matériels sont beaucoup plus rares.

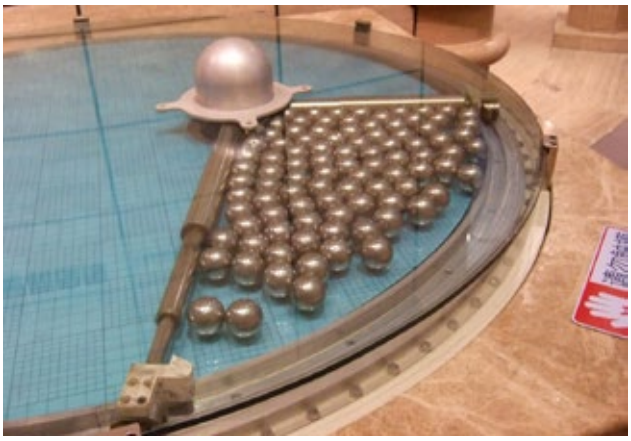
Les musées des sciences représentent souvent l'action de la force de gravitation sur un corps en mouvement par un entonnoir en matière plastique, un vortex, dans lequel on injecte une bille avec une vitesse et une orientation réglables.



On donne ainsi une bonne idée qualitative des différentes orbites possibles ; on voit nettement en cas d'orbite elliptique les différences de vitesse entre le passage à l'apoastre et au périastre. On ne peut cependant s'assurer de la validité de la deuxième loi dite « loi des aires ».

Vers une représentation de la loi des aires.

Peut-on représenter plus précisément la 2e loi de Kepler sur une maquette ?



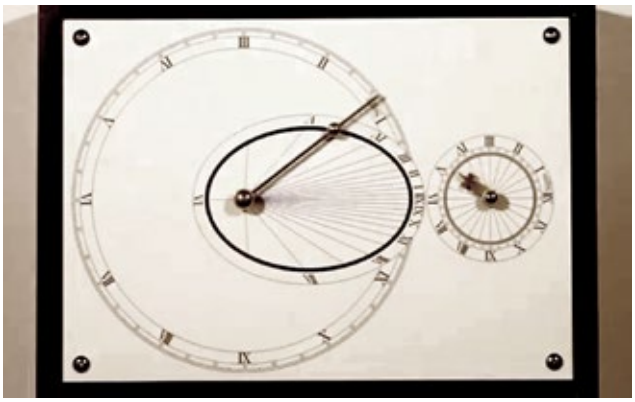
Une solution originale est donnée au musée des sciences de Guangzhou (Chine). Comme représenté sur la figure, un secteur est empli de billes. Lorsque le secteur se déplace, le nombre de billes restant constant, et le secteur garde approximativement la même surface.
Bien qu'astucieux, ce mode de représentation semble poser des problèmes ; le glissement des billes n'est pas assuré et lorsque j'ai visité le musée en question, la maquette ne fonctionnait pas.

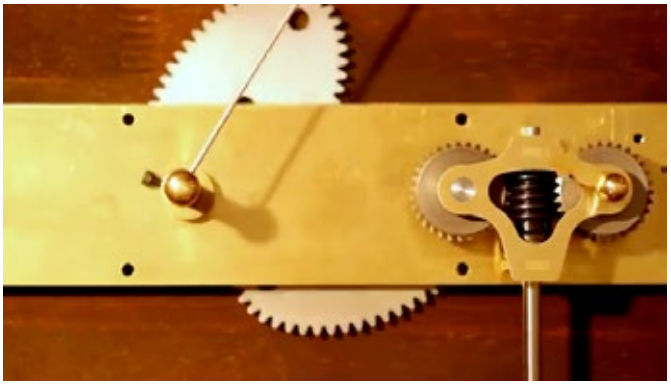
Le cométarium

Au XVIIIe siècle, John Theophilus Desaguliers a conçu un instrument qui fut nommé cométarium car il pouvait représenter le mouvement des comètes sur des orbites elliptiques. Le mécanisme consiste en 2 roues elliptiques dentées engrenant l'une sur l'autre.



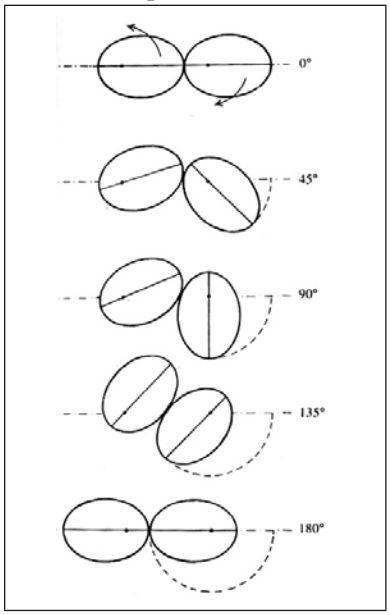
Bien que l'on puisse démontrer que la loi des aires n'est pas parfaitement reproduite, le fonctionnement est impressionnant et donne une bonne idée des variations de vitesse selon la distance.
Les deux vidéos figurant dans la bibliographie montrent le cométarium en fonctionnement.





Le schéma ci-dessous, tiré de l'ouvrage de Henry C. King « Geared to the stars » montre la façon dont les deux engrenages elliptiques engrènent en donnant une vitesse de rotation variable à l'ellipse de gauche à partir d'une vitesse de rotation constante de l'ellipse de droite.

Le rapport de vitesse entre les deux roues dentées est celui des dimensions des deux rayons instantanés de rotation.
Si e est l'excentricité des ellipses, dans la position du haut (0°), le rapport est de (1-e) / (1+e) ; dans la position indiquée -135°, le rapport instantané est égal à 1 ; dans la position du bas (-180°), le rapport est (1+e) / (1-e).

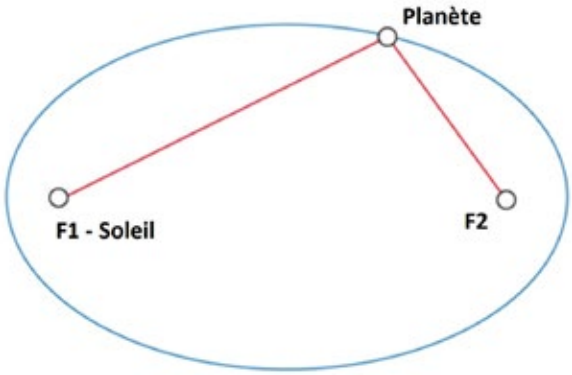


Le rapport entre la vitesse maximale et la vitesse minimale de la roue de droite est de $(1+e)^2 / (1-e)^2$.

Le dispositif à foyer vide

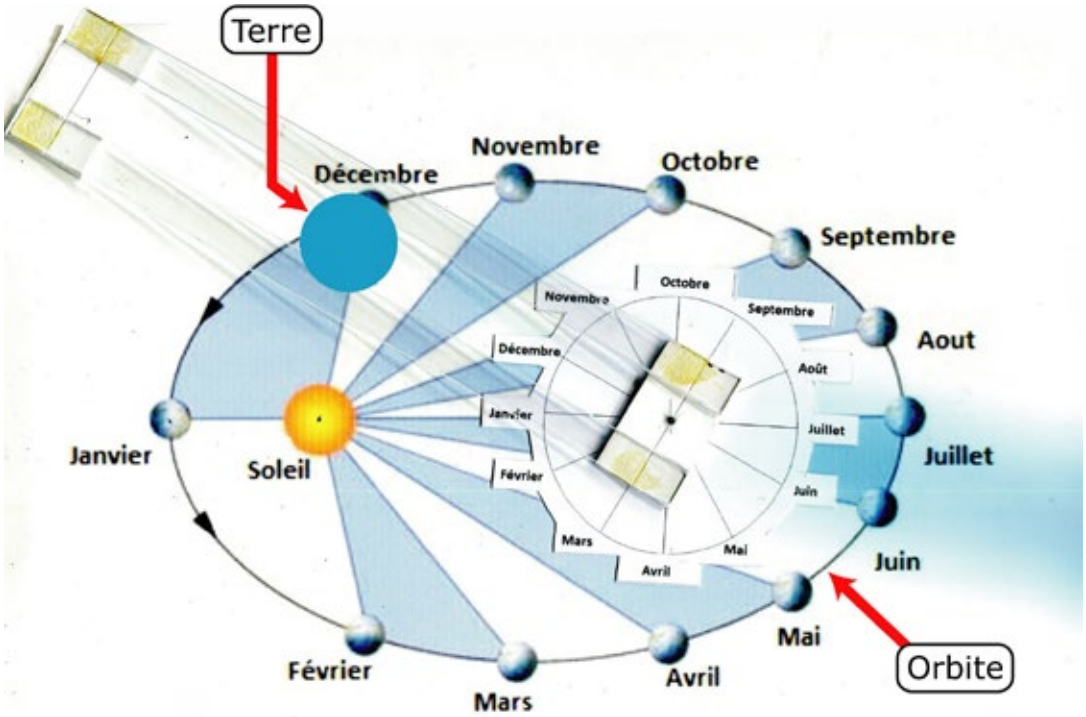
Un autre dispositif, celui du 'foyer vide » consiste à faire se mouvoir la planète sur une ellipse en l'entraînant à partir du foyer qui n'est pas le foyer du corps exerçant l'attraction centrale.
La droite F2-Planète tournant à une vitesse de rotation uniforme, la droite F1-Planète tourne en respectant approximativement la loi des aires. Une maquette n'est pas très difficile à réaliser.

Ici aussi, on démontre qu'en toute rigueur la loi des aires n'est pas respectée ; si l'excentricité de l'ellipse est faible, la démonstration est suffisante pédagogiquement.



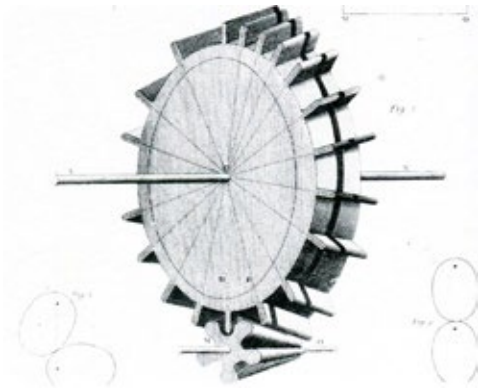
Une réglette tournante centrée sur la petite roue de droite porte la planète Terre. Lorsque la réglette tourne à une vitesse de rotation uniforme, la planète Terre représentée par une petite bille bleue a une vitesse sur orbite différente selon son éloignement du Soleil.

Le modèle ci-dessous s'inspire du dispositif à foyer vide :

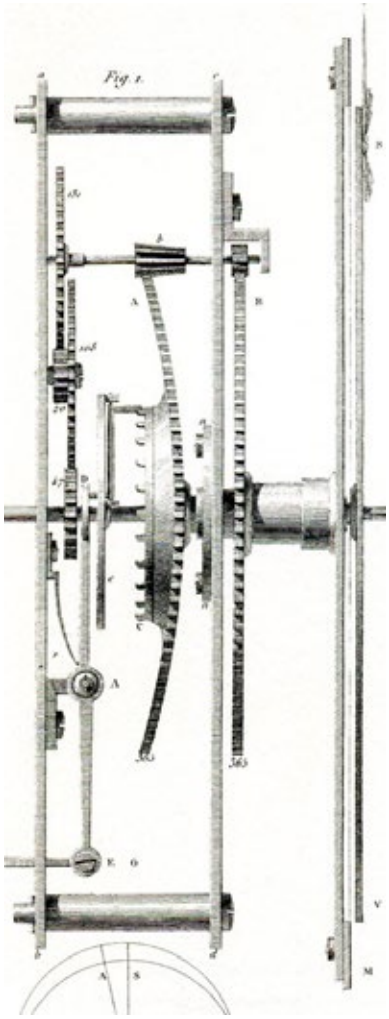


Réalisations horlogères

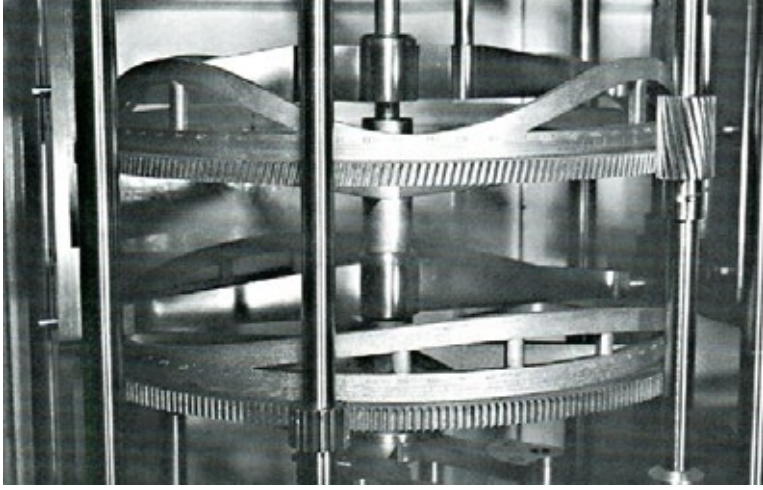
Dans les horloges astronomiques ou dans les planétaires, la représentation des mouvements non réguliers a été réalisée par des engrenages coniques. Par exemple Ole Roemer a proposé l'emploi de roues coniques à dents irrégulièrement espacées.

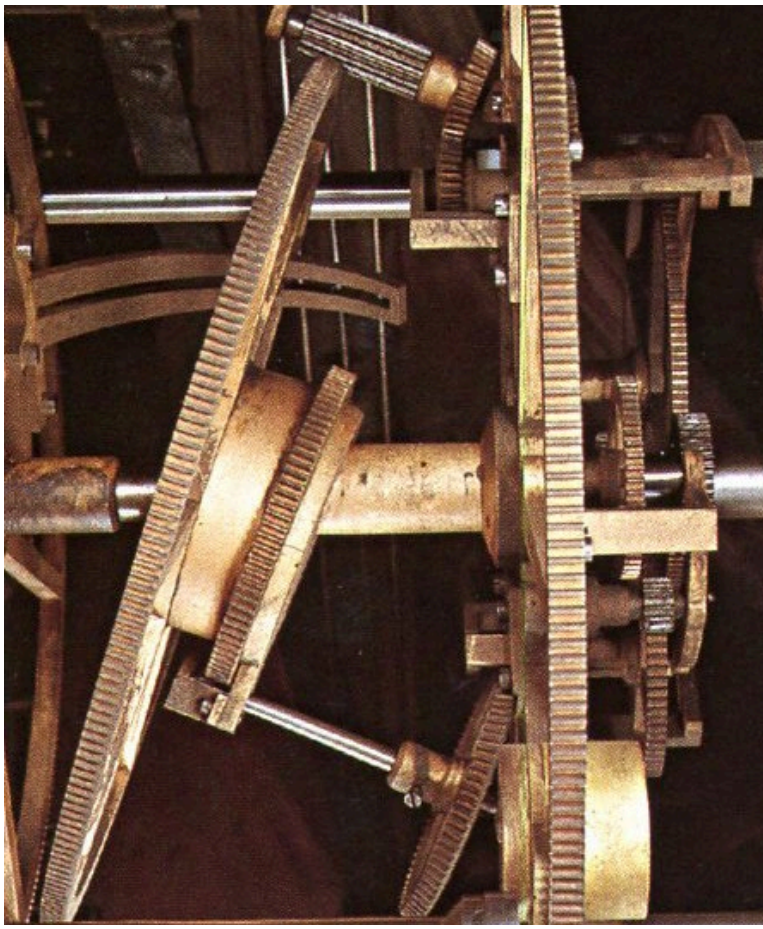


Antide Janvier a utilisé dans ses magnifiques horloges astronomiques des roues dentées courbées venant engrener sur un pignon conique.



Ces dispositifs horlogers ne peuvent rectifier que les petites inégalités par rapport aux moyens moyens.
Les deux dernières photos sont des détails de l'horloge astronomique de Strasbourg réalisée par Jean-Baptiste Schwilgué.





Sources

Henry C.King *Geared to the Stars* - University of Toronto Press.

Martin Beech *On Ptolemy's equant, Kepler Second Law, and the Non-existant"Empty-Focus Planetarium* –Regina Center.

Martin Beech *The mechanics and origin of cometaria* –JAHH 5(2):155-163.

Yasuo Ogawara *Using a Vortex to Teach Kepler's Laws and Potential Energy* Keto Senior High School, Kanagawa, Japan.

Henri Bach *Les trois horloges astronomiques de la cathédrale de Strasbourg* - Éditions Ronald Hirle.

Recueil de machines composées et exécutées par Antide Janvier - Jules Didot aîné.

Vidéo du cometarium sur :

https://www.youtube.com/watch?v=h7i7I5IhB70

https://www.predictionx.org/cometarium

■

LA 1re LOI DE KEPLER EXPLIQUÉE PAR FEYNMAN

Pierre Causeret, Esbarres (21)

Richard Feynman (1918 – 1988), prix Nobel 1965, était connu pour sa faculté à rendre simple et accessible des problèmes compliqués. Il reste célèbre pour avoir trouvé une représentation schématique visuelle des interactions des particules en théorie quantiques des champs. Ici il s'agit d'établir d'une manière différente la première loi de Kepler.

Les orbites des planètes sont des ellipses C'est la première loi de Kepler, la plus connue des trois. Pour la trouver, Kepler a utilisé les observations précises de la planète Mars réalisées par Tycho Brahe. Ce n'est donc au départ qu'une loi empirique obtenue par l'observation. Est arrivé ensuite Newton et sa loi de la gravitation pour comprendre pourquoi les trajectoires des planètes et des comètes sont toujours des coniques – ellipse, parabole ou hyperbole – à condition de supposer que le Soleil est le seul corps attracteur. Mais comment passer de la loi de la gravitation en $1/R^2$ à une conique ? Une des solutions est de le démontrer par l'algèbre, ce qui n'est pas évident[1].

Le célèbre physicien Richard Feynman a proposé dans l'un de ses cours une méthode géométrique originale. À partir d'un enregistrement et de notes retrouvées de Feynman, ce cours a été publié par David et Judith Goodstein et traduit en français[2].

Dans ce cours, Feynman commence par démontrer la loi des aires. Cette loi provient uniquement du principe d'inertie et du fait que la force d'attraction du Soleil est centripète. Il démontre ensuite que la 3e loi de Kepler induit une force en $1/R^2$ (R est la distance Soleil-planète). Ces deux démonstrations sont disponibles sur le site du CLEA[3].

Il continue en démontrant que les orbites sont des ellipses, ou du moins peuvent être des ellipses. Pour cela, il utilise la loi des aires et la force en $1/R^2$. La démonstration est subtile et un peu longue. C'est une démonstration qui manque parfois de rigueur, en particulier pour les passages à la limite, mais elle a le mérite de faire appel à des notions mathématiques simples. En voici le principe.

Propriétés des ellipses

Définition

On définit géométriquement une ellipse ainsi : un point M appartient à une ellipse si la somme des distances de M aux foyers est constante.

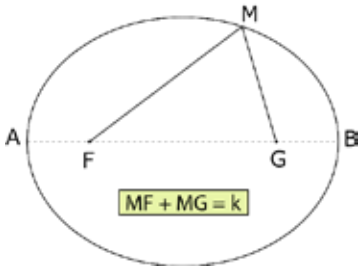


Fig.1. **Définition d'une ellipse de foyers F et G.**

Ce qui s'écrit MF + MG = k si F et G sont les deux foyers. C'est cette méthode qui permet de tracer une ellipse avec une ficelle.

Remarque : k est le grand axe AB de l'ellipse.

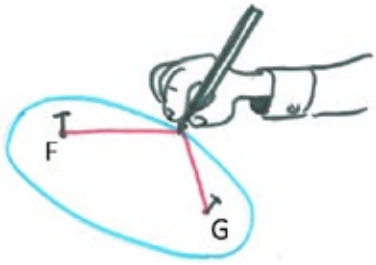


Fig.2. **Tracé d'une ellipse avec la méthode du jardinier (dessin de Georges Paturel extrait du n° 118 des CC).**

En effet, comme le point A appartient à l'ellipse, on a AF + AG = k. Or, AF + AG = AF + AF + FG et AF + AF + FG = AF + BG + FG = AB. d'où k = AB.

Propriété

Un point P est à l'intérieur de l'ellipse (E) si PF + PG < k (figure 3).

Cette propriété se démontre facilement ainsi :
PF + PG < MF + MG car PG < PM + MG .

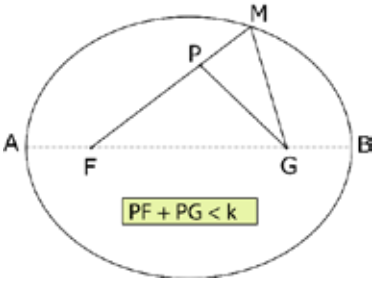


Fig.3. **Point intérieur à l'ellipse.**

1 On pourra regarder par exemple sur Wikipedia l'article « Démonstration des lois de Kepler ».
2 *Le Mouvement des planètes autour du Soleil* (Diderot Éditeur, Arts et sciences, 1997).
3 Sur clea-astro.eu, cliquer sur productions récentes, puis sur 179 (il faudra vous identifier).

De même, un point P est à l'extérieur de l'ellipse (E) si PF + PG > k

Construction d'une ellipse point par point avec ses tangentes

Soient deux points F et G et une longueur k définissant une ellipse (E) de foyers F et G et de grand axe k. On peut tracer cette ellipse point par point ainsi :

- On trace le cercle (C) de centre G et de rayon k.
- P est un point quelconque de (C). La médiatrice (d) de [PF] coupe [PG] en un point M.
- On peut montrer que M est un point de l'ellipse et que (d) est tangente à (E) en M (voir encadré).

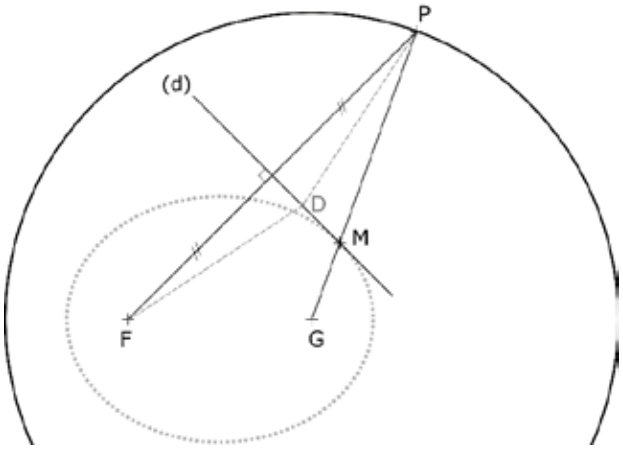


Fig.4. **Tracé d'une ellipse point par point.**

Démonstration

* MF + MG = MP+MG = PG = k donc M ∈ (E). Et on peut vérifier que tout point de (E) peut se construire ainsi.

* Pour démontrer que (d) est tangente à l'ellipse, il suffit de démontrer qu'aucun de ses points n'est à l'intérieur de l'ellipse. Pour tout point D de (d) :

DF + DG = DP + DG ≥ PG donc DF + DG ≥ k, le point D est à l'extérieur de l'ellipse.

Remarque : on peut montrer que l'intersection de (d) avec (GP) se trouve bien entre G et P.

M ne peut pas être au-delà de G car PM = FM <k.

Les orbites des planètes sont des ellipses

Découpe de l'ellipse

On découpe la trajectoire en choisissant des angles « au centre » (ou plutôt au foyer) égaux. Sur la figure 5, les angles tracés à partir du Soleil mesurent tous 10°. Les aires des secteurs ne sont donc pas égales et les arcs d'orbite ne sont pas parcourus dans le même temps. Cette astuce de Feynman va servir à déterminer le diagramme des vitesses.

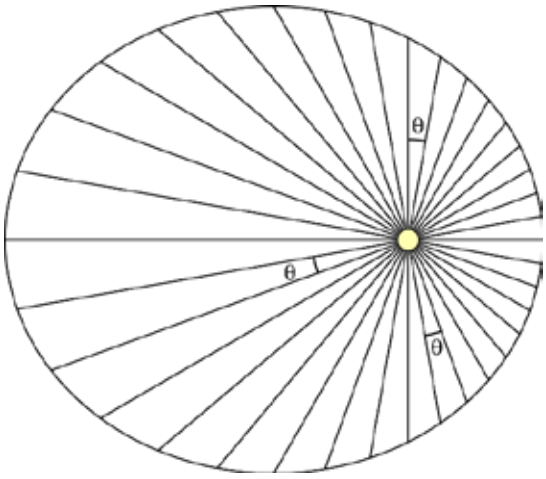


Fig.5. **Découpe d'une orbite « à la Feynman ». Les angles dont le sommet est le Soleil sont égaux (on a pris 10° chacun sur la figure).**

Calculs d'aires

Feynman commence par montrer que les aires des différents secteurs sont proportionnelles à R^2 où R est la distance du Soleil au point de l'ellipse.

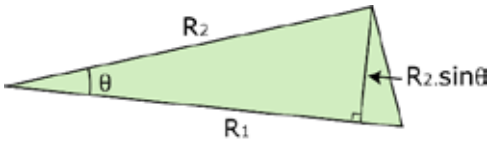


Fig.6. **Chaque secteur d'ellipse est assimilé à un triangle.**

L'aire du triangle de la figure 6 vaut $R_1 \times R_2 \times \sin\theta / 2$.

Pour θ assez petit, $R_1 \approx R_2$ et l'aire du triangle peut s'écrire $R^2 \sin\theta / 2$ avec θ constant. Ce qui est bien proportionnel à R^2.

On utilise maintenant la loi des aires : les aires sont proportionnelles au temps de parcours.

Comme on vient de montrer qu'elles étaient également proportionnelles à R^2, on en déduit que les Δt (temps pour parcourir un arc d'ellipse) sont aussi proportionnels à R^2.

Or la force d'attraction F est proportionnelle à $1/R^2$.

Donc F×Δt est constant.

On sait depuis Newton que la force est proportionnelle à l'accélération.

Si F est proportionnelle à $\|\overrightarrow{\Delta V}\|/\Delta t$ (qui représente l'accélération) et que F×Δt est constant, cela signifie que $\|\overrightarrow{\Delta V}\|$ est constant (en intensité, pas en direction).

On peut dire que la planète subit des changements de vitesse égaux dans des angles égaux.

Tracé du diagramme des vitesses

Feynman utilise maintenant un diagramme des vitesses (appelé aussi hodographe). Pour cela, il trace à partir d'un même point une série de vecteurs vitesses.

Sur ce type de diagramme, deux vecteurs vitesses $\overrightarrow{V_1}$ et $\overrightarrow{V_2}$ sont représentés à partir du même point O, ici par $\overrightarrow{OA_1}$ et $\overrightarrow{OA_2}$ (figure 7).

On a : $\overrightarrow{OA_1} + \overrightarrow{A_1A_2} = \overrightarrow{OA_2}$

donc $\overrightarrow{A_1A_2} = \overrightarrow{OA_2} - \overrightarrow{OA_1} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$.

$\overrightarrow{A_1A_2}$ est donc la variation de vitesse, ou $\overrightarrow{\Delta V}$ entre les positions 1 et 2.

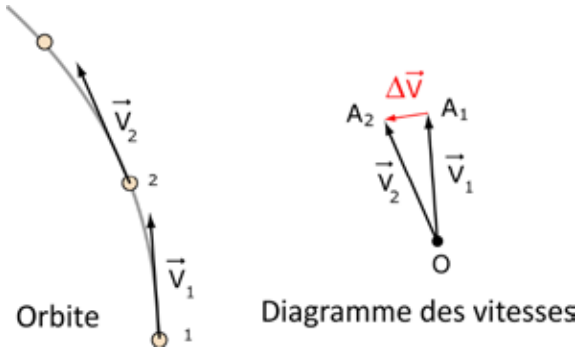


Fig.7. **Principe de construction du diagramme des vitesses.**

Nous allons tracer les vitesses OA_1, OA_2, OA_3, OA_4... à partir d'un point O sachant que :
1. Les $\|\overrightarrow{\Delta V}\|$ sont constants donc $A_1A_2 = A_2A_3 = ...$
2. La force d'attraction étant exercée par le Soleil, les $\overrightarrow{\Delta V}$ doivent être dirigés vers le Soleil ; dans la découpe « à la Feynman », ils se décalent donc à chaque fois du même angle (10° sur la figure 7) et les angles. $\widehat{A_1A_2A_3}$, $\widehat{A_2A_3A_4}$, $\widehat{A_3A_4A_5}$ ... sont tous égaux (170° sur la figure 8).

Conclusion : les points A_1, A_2, A_3, A_4... sont situés sur un polygone régulier à n côtés.

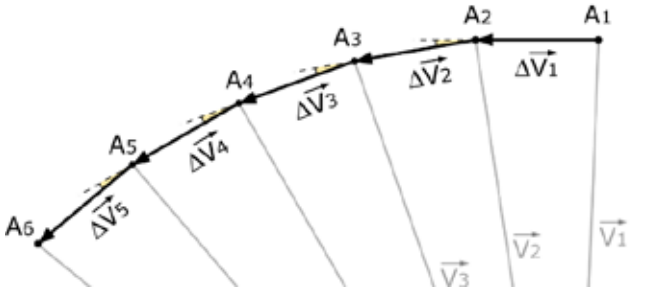


Fig.8. **Le diagramme des vitesses pour une orbite découpée « à la Feynman » (avec des angles « au foyer » égaux).**

Conclusion : $A_1A_2A_3A_4$... est un polygone régulier (le point O, l'origine des vitesses n'a aucune raison d'en être le centre).

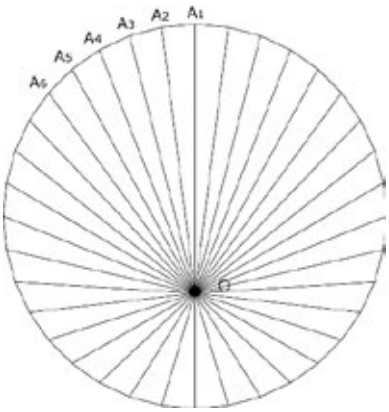


Fig.9. **Diagramme des vitesses d'une planète.**

En passant à la limite, le diagramme des vitesses est un cercle.

Reconstitution de l'orbite

Connaissant le diagramme des vitesses, un polygone régulier qu'on assimile à un cercle, on peut reconstituer la trajectoire de la planète. Pour cela, on fixe tout d'abord l'origine des vitesses (le point O) à l'intérieur du cercle. Nous étudierons le cas où O est situé à l'extérieur du cercle plus loin.

On sait que la vitesse est maximale au périhélie (loi des aires), on peut donc placer cette vitesse $\vec{V}_1$ (sur la figure 10) sur le diagramme : c'est $\overrightarrow{OA_1}$ où $[OA_1]$ passe par le centre C du cercle ou du polygone régulier (figure 10).

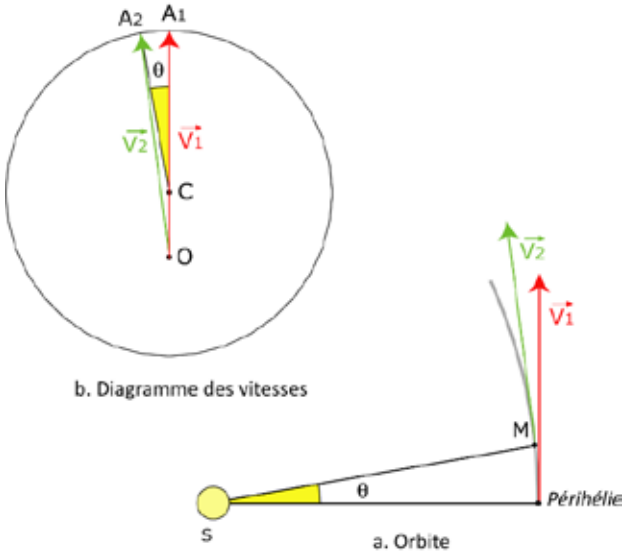


Fig.10. **Position du périhélie sur le diagramme des vitesses.**

On a partagé l'orbite en n angles « au foyer » égaux. L'angle θ sur la figure 10 vaut donc 360°/n.
$A_1A_2A_3A_4$... est un polygone régulier à n côtés donc l'angle (figure 10b) vaut aussi 360°/n, il est donc égal à θ.

Pour comparer les deux figures, nous faisons effectuer une rotation de 90° à la figure 10 (fig.11).

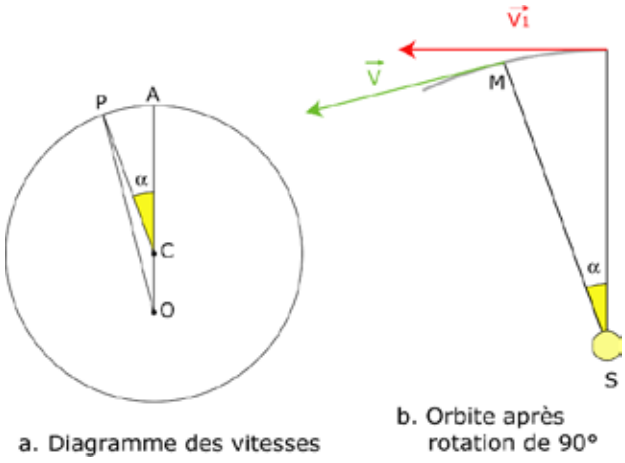


Fig.11. **Diagramme des vitesses et orbite après une rotation de 90°.**

Le point P est un point quelconque du cercle du diagramme des vitesses et nous remplaçons l'angle élémentaire θ par un angle quelconque α.

Les côtés des deux angles notés α sont maintenant parallèles (sur le tracé de l'orbite et sur le diagramme des vitesses). La vitesse $\vec{V}$ représentée à droite, tangente à l'orbite, est maintenant perpendiculaire à (OP).
Pour tout angle α, on connaît la vitesse et donc la direction de la tangente à la courbe. Comment, à partir de ces données, reconstituer l'orbite ?

Nous allons tracer une orbite possible sur le diagramme des vitesses (à l'échelle près).
Pour cela, nous reprenons la construction géométrique de l'ellipse avec ses tangentes :
On trace la médiatrice de [OP] qui coupe [CP] en un point M. On a montré précédemment qu'avec cette construction, le point M appartient à une ellipse dont C et O sont les foyers (le Soleil est en C ici) : en effet, CM + MO = CM + MP = CP = constante. De plus, la médiatrice est tangente à l'ellipse.

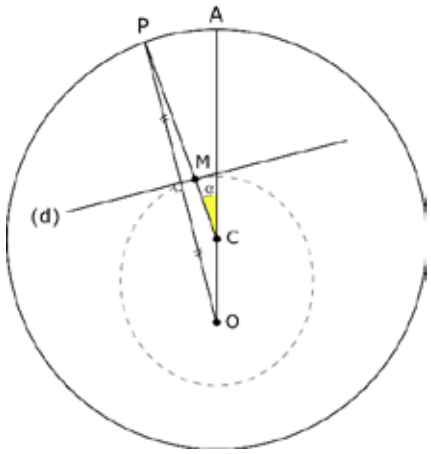


Fig.12. **Construction de l'orbite.**

Le point M remplit donc la condition posée : pour un angle α donné, la tangente en M à la courbe est perpendiculaire à [OP] et l'angle périhélie – Soleil – planète est égal à α.

Feynman conclut ainsi : « Par conséquent, la solution au problème est une ellipse – ou plutôt, c'est l'inverse que j'ai démontré : l'ellipse est une solution au problème » ; Il laisse ensuite le soin aux étudiants d'étudier le cas où le point O est sur le cercle des vitesses puis à l'extérieur du cercle.

Complément
Prenons déjà le cas où le point O, origine des vitesses est à l'extérieur du cercle. La construction avec la médiatrice de [OP] est la même que précédemment. Seule différence : la médiatrice (d) coupe la droite (PC) en un point extérieur au segment [PC].

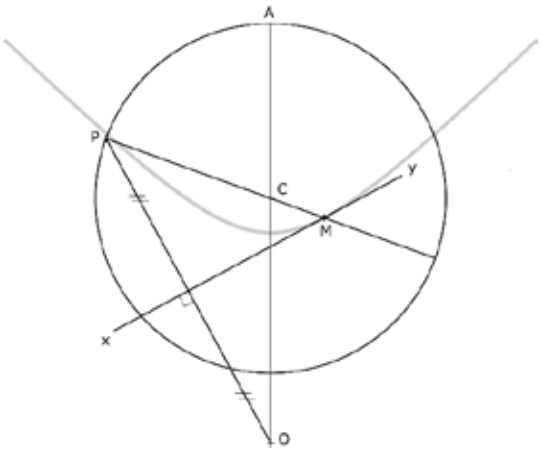


Fig.13. **En prenant O extérieur au cercle, on obtient une hyperbole.**

On peut écrire :
MO – MC = MP – MC = PC = rayon = constante
C'est la définition bifocale d'une hyperbole !

La situation intermédiaire entre l'ellipse et l'hyperbole devrait s'obtenir en plaçant le point O ni à l'intérieur ni à l'extérieur mais sur le cercle.
Manque de chance, si O appartient au cercle, la médiatrice de [PO] coupe [PC] toujours au même point, en C. On n'obtient donc pas ainsi le cas limite de la parabole. Mais un de nos relecteurs nous a proposé une solution.

■

Origine de la démonstration

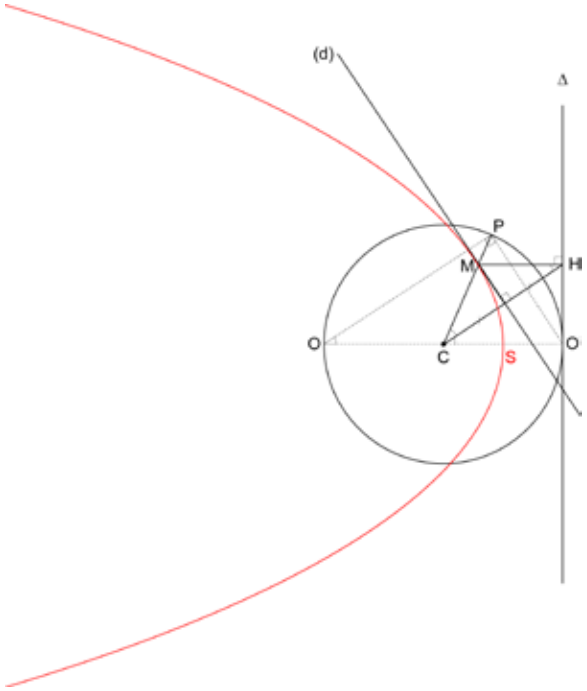
Feynman attribue le fait que le diagramme des vitesses soit un cercle à certain M. Fano. Le même principe de démonstration apparaissait déjà dans un livre de James Clerk Maxwell en 1877 et Maxwell attribue la méthode à Sir William Hamilton.

(D'après les commentaires de David & Judith Goodsteil dans *Le mouvement des planètes autour du Soleil*).

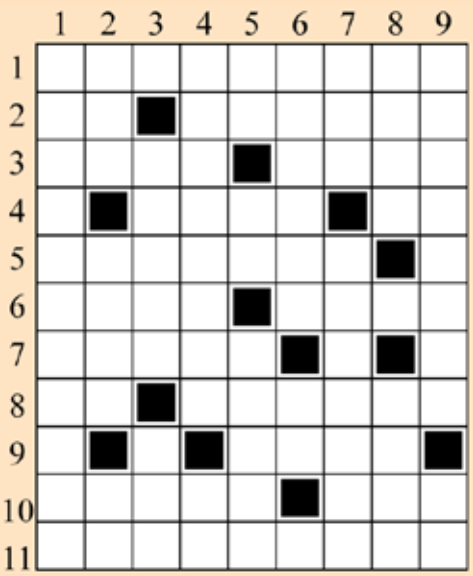
Solution proposée par Béatrice Sandré

Dans l'article précédent, nous avons trouvé ellipse et hyperbole comme trajectoires possibles à partir d'un hodographe circulaire, en prenant le point O, origine des vitesses, à l'intérieur puis à l'extérieur du cercle. Que se passe-t-il si le point O est sur le cercle ? Voici une solution que nous a envoyée Béatrice Sandré.

Hodographe d'origine O : cercle de centre C passant par O. La droite Δ est tangente à ce cercle en O' diamétralement opposé à O.
Soit H un point quelconque de Δ. On construit la médiatrice (d) de CH et le point M de cette médiatrice tel que MH soit perpendiculaire à Δ. Par construction, M appartient à la parabole de foyer C et de directrice Δ. De plus, la tangente à la parabole en M est la droite (d) bissectrice de l'angle CMH (propriétés des paraboles).
Soit P l'intersection de CM et du cercle hodographe. D'après la figure ci-dessus, PO' est parallèle à (d) et OP est perpendiculaire à (d).
Le point M remplit donc la condition posée : pour un angle O'CM = α donné, la tangente en M à la courbe est perpendiculaire à OP.
J'ai donc démontré que la parabole est une solution au problème lorsque le point O se trouve sur le cercle hodographe.



■



Mots croisés képlériens

Horizontalement

1. C'est Kepler qui, le premier, utilisa ce mot dans le système jovien.
2. Ancien. Histoire de mailles.
3. À nouveau vérifié. Constante pour Kepler si l'intervalle de temps ne change pas.
4. Poèmes. Un (en abrégé) pour la Terre en un an.
5. Orbite pour Kepler.
6. Comme l'*Astronomia* de Kepler. La Seine la reçoit et la traverse.
7. Plats.
8. Un. Les rudolphines sont dues à Kepler.
9. Le Somnium de Kepler s'y passe.
10. La mère de Kepler a dû en entendre plus d'un sur son compte. Présent.
11. La supernova de Kepler en fut un en 1604.

Verticalement

1. Kepler y a vu une supernova en 1604, dans son pied.
2. Petit ou grand dans une orbite képlérienne. Trois pour Kepler. Pas AR.
3. La Terre dans le *Somnium* de Kepler. Celui de Kepler : 58 ans à sa mort.
4. S'il l'est en astronomie, il devra s'intéresser à Kepler. Pronom.
5. Élément ou parti. Initiales de l'astronome qui a donné son nom à la sonde qui étudie actuellement le Soleil au plus près. Celle de Kepler était fragile.
6. Se fait avec des billets. Cru.
7. C'est bien là. Père fondateur des mathématiques.
8. Ce qu'ont toujours les absents. Boris Johnson est passé par là.
9. Les amas ouverts ne le sont pas, les amas globulaires le sont peut-être. mg ?

Solution p. 48

DÉCOUVRIR LES LOIS DE KEPLER AVEC LE LANGAGE DE PROGRAMMATION PYTHON

Thomas Appéré, Enseignant agrégé de physique-chimie et d'informatique au lycée St-Paul (Vannes) et docteur en planétologie

Un exemple clair et bien détaillé de manipulations informatiques réalisables avec des élèves de Terminale pour étudier les trois lois de Kepler à l'aide du langage de programmation Python.

L'idée de s'appuyer sur la programmation et le codage dans l'enseignement de la physique-chimie remonte à plusieurs années, on trouve des propositions en ce sens dès 1968 [1]. C'est à partir des années 1990 que le numérique a trouvé sa place en lycée grâce à l'équipement à grande échelle en moyens informatiques. Les enseignants de physique-chimie ont mis en application les outils numériques dans deux domaines : l'acquisition et le traitement de données expérimentales d'une part, et la simulation de phénomènes et de lois physiques et chimiques d'autre part. Dans les deux cas, les élèves manipulent des logiciels dédiés dans lesquels les possibilités de programmation sont restreintes voire absentes. Grâce aux logiciels de modélisation d'un phénomène, les élèves observent les effets induits par la variation d'un ou plusieurs paramètres.

Des études ont montré que ce type d'« expérimentation numérique » améliore les apprentissages [2]. Cependant, ces logiciels dédiés peuvent apparaître comme des « boîtes noires » dont le principe de fonctionnement est inconnu. L'apport didactique est indubitablement renforcé si l'élève peut appréhender le principe de l'algorithme utilisé, les lois physiques ou chimiques mises en jeu dans celui-ci ou les hypothèses effectuées dans la modélisation. La programmation de la simulation par l'élève, en totalité ou en partie, peut ainsi contribuer à améliorer les apprentissages [3].

Avec la réforme du lycée en 2019, la programmation et le codage ont fait leur entrée en physique-chimie. Notre discipline est un terrain privilégié de contextualisation pour les mathématiques et l'informatique. Plusieurs notions des programmes de la seconde à la terminale font ainsi explicitement le lien avec des capacités numériques associées à l'utilisation d'un langage de programmation. Cela consiste généralement à adapter et compléter un code existant pour, par exemple, représenter des vecteurs vitesse d'un système, simuler la propagation d'une onde périodique, calculer le taux d'avancement final d'une transformation, tracer le diagramme de distribution des espèces d'un couple acide-base, etc.

Dans le programme de la spécialité physique-chimie de terminale, l'une de ces capacités numériques entre dans le chapitre associé au mouvement dans un champ de gravitation. Elle consiste à « exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler. » [4] Je propose ici une activité répondant à cet objectif, mise en œuvre deux années de suite avec mes groupes-classes de terminale. Le langage de programmation utilisé est Python, comme préconisé dans le Bulletin officiel [4]. Les ressources liées à cette activité (fiche élève et sa correction, fichiers de données astronomiques au format CSV, programme Python élève et sa correction) sont à retrouver sur le site web du CLEA.

Présentation de l'activité

Cette activité traite des trois lois de Kepler. Elle consiste (i) à décrire le contenu de fichiers contenant des données astronomiques, (ii) à compléter plusieurs parties d'un programme Python et (iii) à exécuter ce programme pour afficher les orbites de plusieurs planètes et d'une comète, vérifier la loi des aires et la troisième loi de Kepler. Cette activité est généralement menée à son terme par les élèves en une séance de 2 heures.



L'idéal est que chaque élève dispose d'un poste informatique sur lequel est installé un environnement de développement (IDE) Python, tel que EduPython ou Pyzo (logiciels gratuits). Ce n'est cependant pas toujours possible. Lorsque l'activité est mise en œuvre avec un ordinateur par binôme ou trinôme, je conseille aux élèves de se relayer pour que chacun se confronte à l'écriture dans un langage de programmation. Certains élèves ont suivi la spécialité Numérique et sciences informatiques (NSI) en classe de première voire la suivent toujours en terminale. Ils sont plus à l'aise avec les notions d'algorithmique et de programmation et il est préférable de répartir ces élèves dans les différents binômes ou trinômes afin qu'ils aident leurs camarades.

Données astronomiques utilisées

J'ai choisi de faire travailler les élèves sur les orbites des quatre planètes telluriques et de la comète Encke. Pourquoi cette comète plutôt qu'une autre plus connue comme la comète de Halley ? Parce que son aphélie, point de sa trajectoire le plus éloigné du Soleil, est à seulement 4 unités astronomiques. Ainsi, il est possible de représenter sur un même graphique, de façon lisible, la totalité de l'orbite de la comète Encke et des quatre planètes telluriques.



Fig.1. **Formulaire de l'IMCCE pour calculer les éphémérides d'un corps céleste.**

Les données astronomiques (éphémérides) ont été téléchargées sur le site de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), sur le portail Miriade dédié aux éphémérides des corps du Système solaire[1].

Les dates sélectionnées pour ces éphémérides, en UTC, couvrent une orbite avec un pas de temps d'un jour, le nombre de données est donc plus important pour la planète Mars que pour Mercure. Dans le formulaire (voir figure 1), on renseigne comme plan de référence l'écliptique et on demande des coordonnées rectangulaires. Les données générées, au format texte, ont été enregistrées au format CSV en choisissant le séparateur approprié.

Il est possible de demander aux élèves de générer eux-mêmes ces éphémérides à partir du site de l'IMCCE, en leur indiquant la date de début et le nombre de dates nécessaires pour chaque corps céleste. Cependant, cela demande du temps qui ne pourra pas être consacré à la suite de l'activité et l'opération est assez répétitive. J'ai fait le choix de leur projeter au tableau la page d'accueil du portail des éphémérides en leur présentant la démarche suivie pour la planète Mercure et le tableau de données obtenu. On pourra le cas échéant faire générer par chaque groupe les éphémérides d'un corps céleste différent, dont ils mettront le fichier de données astronomiques sur un espace commun.

Première loi de Kepler

Dans un premier temps, les élèves s'approprient le contenu des fichiers de données astronomiques. Grâce au logiciel Excel ou Bloc-notes, ils ouvrent l'un des fichiers CSV, par exemple Mercure.csv et indiquent à quoi correspond chacune des colonnes. La colonne «Date» est facile à interpréter ; on pourra leur faire remarquer que la date est donnée dans le système anglo-saxon, avec le mois indiqué avant le jour. Viennent ensuite les trois coordonnées spatiales (X ; Y ; Z) dans le système héliocentrique. On pourra leur demander ce que signifie le sigle «au» (astronomical unit) et de justifier le choix de cette unité de mesure. Les élèves ont généralement plus de difficulté à identifier la signification des trois coordonnées suivantes (Xp ; Yp ; Zp). Je les guide vers l'unité de ces coordonnées : unité astronomique par jour, ce qui correspond à l'unité d'une vitesse. Ce sont donc les coordonnées de la vitesse selon les trois axes du repère.

On demande ensuite aux élèves de lancer l'IDE Python installé sur leur ordinateur, d'ouvrir le fichier Python Kepler_ELEVE.py et de l'exécuter. Les orbites de Mercure, Vénus et la Terre s'affichent à l'écran. On invite les élèves à comparer les orbites de Mercure et de Vénus. On s'attend à ce qu'ils remarquent que leurs orbites semblent circulaires, celle de Mercure étant décentrée par rapport au Soleil. En effet, la notion d'ellipse n'a pas encore été abordée.

La première partie du programme informatique contient les lignes de code permettant de lire les données relatives à Mercure, Vénus et la Terre et d'afficher leur orbite. Par analogie, on demande aux élèves de compléter le programme pour qu'après exécution, il affiche les orbites de Mars et de la comète Encke. Les données astronomiques sont stockées dans des « tuples », qui sont des tableaux de données non modifiables. Dans le cas du tuple associé à Mercure, on accède à la première colonne du tableau en tapant `mercure[0]`, à la deuxième colonne en tapant `mercure[1]`, etc. Puis on affecte les données de la première colonne à une variable appelée `X_mercure` et ainsi de suite. Les élèves n'ont pas à savoir ce qu'est un tuple pour accomplir la tâche demandée. Il suffit de copier les lignes correspondant à la lecture des données relatives par exemple à la Terre, de les coller à la suite puis

1 http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms
Il existe depuis peu un nouveau portail plus convivial et en français https://ssp.imcce.fr/

de remplacer le mot `terre` par `mars` pour que le programme fonctionne. Ensuite, il s'agit de copier la ligne permettant de tracer l'orbite de la Terre, de la coller à la suite, de remplacer `terre` par `mars` et de choisir une couleur différente du bleu pour le tracé de l'orbite (par exemple rouge). Les élèves suivent le même cheminement pour tracer l'orbite de la comète Encke.

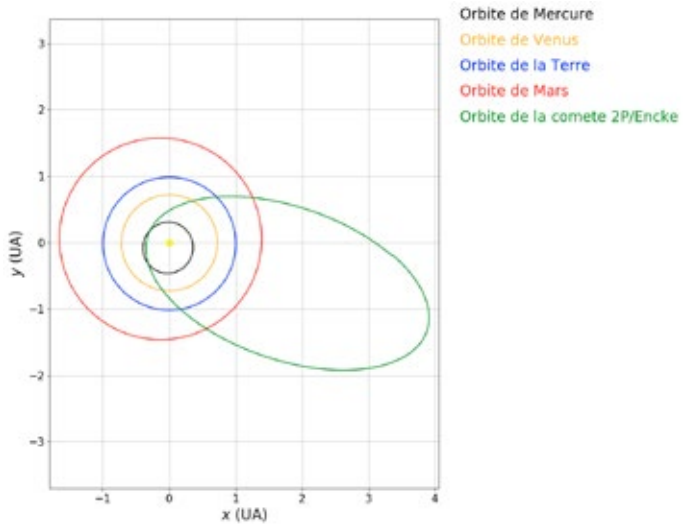


Fig.2. **Tracés obtenus à l'issue de la partie 1.**

Cette partie ne pose généralement pas de problème et les élèves sont satisfaits de voir s'afficher les orbites demandées. Certains personnalisent la couleur des orbites. Il arrive que les élèves ne parviennent pas à faire fonctionner leur programme du premier coup car l'orthographe est primordiale dans un langage de programmation comme Python. Ainsi, `X_terre` et `X_Terre` désignent deux variables différentes.

Comment qualifier l'orbite de la comète Encke ? C'est la question qu'on pose ensuite aux élèves. Certains connaissent la notion d'ellipse, on la prolonge en précisant ce que sont les foyers d'une ellipse. On conclut cette première partie en construisant avec les élèves la définition de la première loi de Kepler.

Deuxième loi de Kepler

Dans cette deuxième partie de l'activité, l'objectif est de comparer l'aire balayée par le segment reliant les centres de masse du Soleil et d'un astre (planète ou comète) pendant des durées égales. J'ai choisi deux points particuliers d'une orbite, le périhélie et l'aphélie, et j'ai écrit le code permettant de calculer l'aire parcourue par le rayon vecteur pendant une durée déterminée au voisinage du périhélie et de l'aphélie. C'est la fonction `calcul_aire()` qui se charge de ce calcul. Cependant, cette fonction prend entre autres paramètres d'entrée la distance séparant le Soleil et l'astre ainsi que sa vitesse orbitale. L'évolution de ces deux grandeurs au cours du temps est stockée dans deux listes, `distance_au_Soleil` et `vitesse`. C'est aux élèves de compléter les lignes de code pour calculer ces deux grandeurs et les stocker dans les listes appropriées. La position des lignes de code à compléter est indiquée en annexe de l'activité.

Il s'agit tout d'abord d'exprimer la distance au Soleil de l'astre en fonction des coordonnées spatiales de sa position :

$$\text{distance} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

De même, les élèves ont à trouver l'expression de la vitesse de l'astre :

$$\text{vitesse} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Ces expressions mathématiques sont à traduire en langage de programmation Python. Les traductions de la racine carrée, `np.sqrt()`, et de l'exposant, `nombre**exposant`, sont données dans le document. La difficulté réside surtout dans la manière de faire référence aux coordonnées spatiales de la position et de la vitesse de l'astre. En effet, ces données sont stockées sous forme de listes. Par ailleurs, les calculs de la distance au Soleil de l'astre et de sa vitesse se font dans une boucle *Pour*. Il convient d'expliquer aux élèves le fonctionnement de cette structure itérative, si cela n'a pas été fait dans une précédente activité numérique. Ici, la boucle incrémente sur l'indice i de 0 à (longueur de la liste X) - 1, par pas de 1. Cet indice i désigne en fait le jour pour lequel les coordonnées de la position et de la vitesse de l'astre ont été calculées dans les éphémérides. On accède au i-ème élément de la liste X en tapant `X[i]`. De plus, la fonction `append()` permet d'ajouter un élément (valeur numérique, chaîne de caractères...) à une liste, ici `distance_au_Soleil`

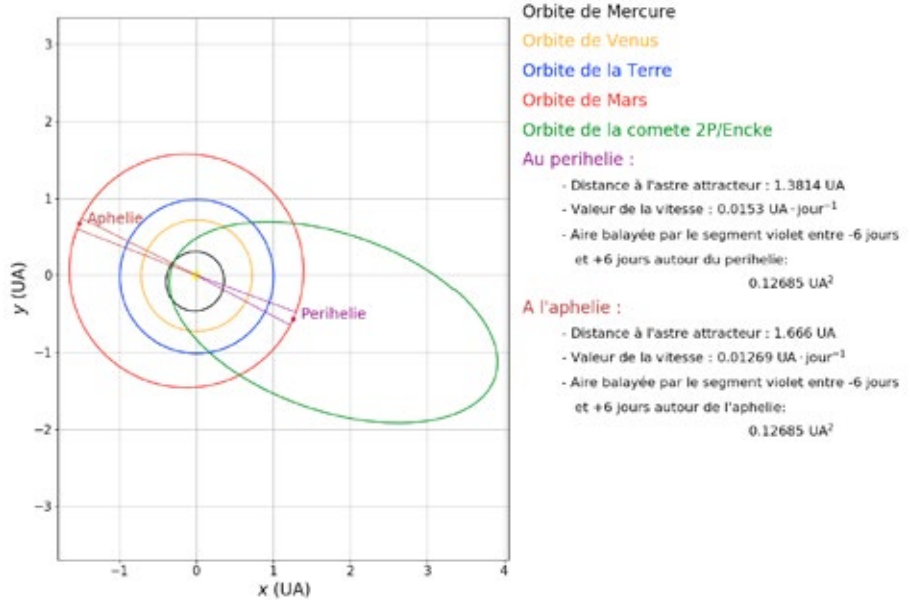


Fig.3. **Tracés obtenus dans la partie 2 pour Mars.**

et `vitesse`. Ces informations sont généralement suffisantes pour permettre aux élèves de compléter les deux boucles *Pour*.

Une fois le code complété, les élèves exécutent le programme et voient s'afficher la position du périhélie et de l'aphélie de Mars. On leur demande de définir ces deux positions en justifiant leur réponse à l'aide du code. Il s'agit ici de repérer dans le code que les variables `perihelie` et `aphelie` sont respectivement égales à `min(distance_au_Soleil)` et `max(distance_au_Soleil)`.

Ensuite, les élèves comparent les aires balayées par le segment de droite reliant le Soleil et la planète Mars au périhélie et à l'aphélie en des durées égales. Ils remarquent qu'elles sont égales. On pourra suggérer aux élèves de modifier cette durée pour vérifier que l'égalité des aires balayées est toujours valable.

De cette information, les élèves en déduisent que la vitesse au périhélie est maximale et qu'elle est minimale à l'aphélie. Enfin, ils modifient la valeur de la variable astre pour lui donner la valeur «`comete`», afin de vérifier que l'égalité des aires balayées est également valable dans le cas de l'orbite de la comète Encke.

Pour finir cette deuxième partie, on co-construit avec les élèves la définition de la deuxième loi de Kepler.

Troisième loi de Kepler

Dans cette dernière partie de l'activité, trois lignes du code sont à compléter pour :

1. Calculer la valeur de la variable `a`, demi-grand axe de l'orbite, en mètres.
2. Calculer la valeur de la période de révolution `T` de l'astre, en secondes.
3. Calculer la valeur du rapport $\frac{T^2}{a^3}$ et l'afficher.

Dans le cas du premier point, il s'agit de repérer que le calcul du demi-grand axe `aUA` est effectué à la ligne précédente, en unités astronomiques. Il faut donc convertir les unités astronomiques en mètres.
La période est quant à elle déjà calculée en jours et nommée `Tj`, il faut la convertir en secondes.
Enfin, le calcul du rapport $\frac{T^2}{a^3}$ se fait en traduisant l'expression en langage Python : `T**2/a**3`.

Les tâches à réaliser par les élèves dans cette partie consistent donc à interpréter un code existant pour le compléter, sans nécessairement avoir à comprendre l'intégralité des fonctions et structures itératives et conditionnelles utilisées.

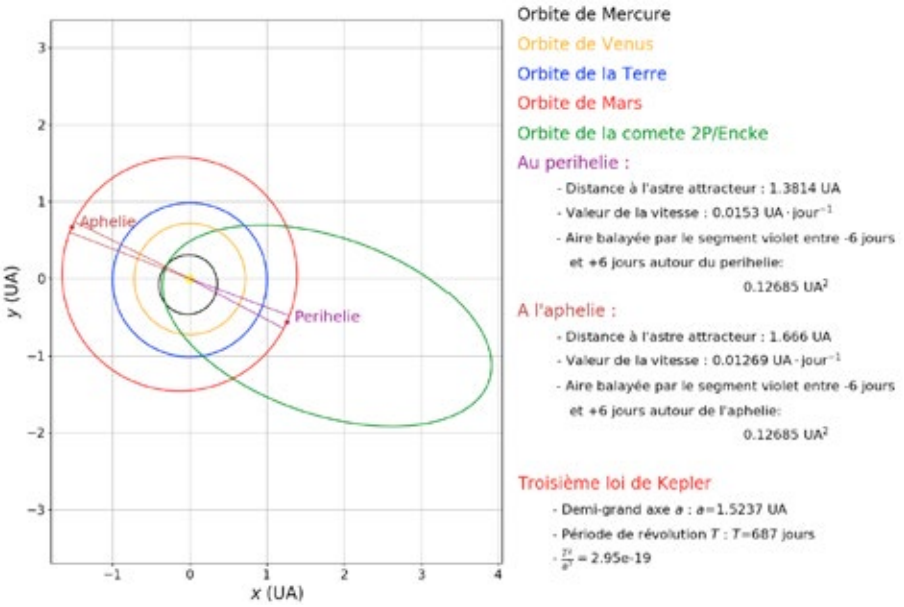


Fig.4. **Tracés obtenus dans la partie 3 pour Mars.**

Après exécution du programme, les élèves comparent la valeur du rapport $\frac{T^2}{a^3}$ pour la planète Mars et la comète Encke. Ils constatent que dans les deux cas, le rapport est égal à quelques décimales près.
Puis ils calculent le rapport $\frac{4\pi^2}{GM_S}$ et remarquent que sa valeur est égale au rapport . Ainsi ils peuvent donner la définition de la troisième loi de Kepler et conclure ainsi cette activité numérique.

De manière générale, cette activité n'a pas posé trop de difficultés aux élèves les deux années où ils l'ont réalisée. L'ayant menée au mois de novembre, j'ai pu traiter au préalable trois activités numériques sur trois autres chapitres permettant aux élèves de se familiariser avec le langage Python.

On peut envisager d'améliorer le programme Python en ajoutant un aspect dynamique, sous la forme de disques représentant les planètes et la comète et qui se déplaceraient sur leur orbite respective. Cela permettrait de mettre en évidence que la période de révolution d'un astre augmente lorsque le demi-grand axe de son orbite augmente. Une telle animation montrerait également que la vitesse orbitale d'un astre diminue lorsque le demi-grand axe de son orbite augmente.

Références bibliographiques

[1] *Computers in High School Physics*, A.M. Borl, The physics teacher **6**, 296 (1968).
[2] *The learning effects of computer simulations in science education*, N. Rutten, W.R. van Joolingen, J.T. van der Veen, Computers & Education **58**, 136-153 (2012).
[3] *Programmer en physique-chimie*, eduscol.education.fr, Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse (2018).
[4] *Physique-Chimie, classe terminale, enseignement de spécialité, voie générale*, BO spécial n°1 du 22 janvier 2019.

■

APPLICATIONS DE L'ÉQUATION DE KEPLER

Daniel Descout

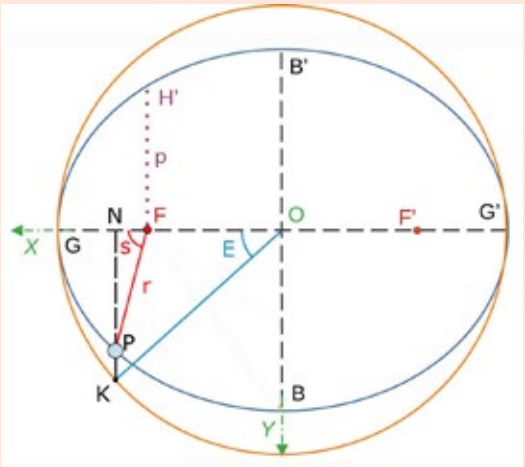
Dans le numéro de mars 2022 des Cahiers Clairaut, Daniel Descout introduisait l'équation de Kepler. Dans cette deuxième partie, il nous propose quelques applications de cette fameuse équation, tout d'abord à la comète de Halley. La partie concernant la sonde Giotto est à retrouver sur le site du CLEA.

Application à la comète de Halley

Tycho Brahé (1588), cité par Pierre Louis (2019 ; Académie des sciences et des lettres de Montpellier) : « Je montrerai à la fin de mon ouvrage, principalement à partir du mouvement des comètes, que la machine du ciel n'est pas un corps dur et impénétrable rempli de sphères réelles comme cela a été cru jusqu'à présent par la plupart des gens. Je prouverai que le ciel s'étend dans toutes les directions, parfaitement fluide et simple sans présenter nulle part le moindre obstacle, les planètes circulant librement dans ce milieu, gouvernées par une loi divine en ignorant la peine et l'entraînement des sphères porteuses »[1].

Les observations d'Edmond Halley en 1681-82, et les observations historiques (antérieures au XVIIe siècle) de l'astre nommé aujourd'hui 1/P Halley, ont été faites lorsque la comète était « proche » du Soleil (soit lorsque sa distance au Soleil est de l'ordre d'une unité astronomique, ou moins) et de la Terre. En première approximation, la portion de sa trajectoire proche de l'orbite terrestre est assimilable à une portion de parabole, avec le Soleil à son foyer. Isaac Newton, dans la première version des *Principia* (1687), avait envisagé cette modélisation. Mais avec ce modèle approché de trajectoire, il n'est pas possible d'écrire l'équation de Kepler, puisque la notion de mouvement moyen – la fonction M(t) – perd sa signification, l'orbite parabolique n'étant pas fermée. De même, l'anomalie excentrique E, définie comme un angle au centre de l'ellipse, n'est plus définie, la parabole n'ayant pas de centre de symétrie.[2]

Encadré 1
Quelques rappels utiles de l'article du numéro 177 de mars 2022.
La planète P suit une orbite elliptique (voir figure, tracé bleu) avec une période T. Le Soleil est au foyer F de l'ellipse.
Notations : demi-grand axe : a = OG = OG' ; distance centre-foyer : c = OF ; excentricité : e = c/a ; paramètre de l'ellipse : p = FH' = a(1-e^2).



On appelle E l'anomalie excentrique (angle GOK de la figure).
On appelle M l'anomalie moyenne égale à 2π/T. M est l'angle au centre (en radians) correspondant à une planète fictive en mouvement uniforme de période T, sur une orbite circulaire de diamètre égal à 2a. La variable t est le temps écoulé depuis le passage de la planète au périhélie G.
L'équation de Kepler s'écrit alors :
E - e. sin E = M.
Une fois E calculé, on peut déterminer la position de la planète P repérée par s (anomalie vraie) et r avec les formules suivantes :
r = a(1-e.cos E) et
tan(s/2) = ε.tan(E/2) avec ε = [(1 + e)(1-e)]$^{1/2}$

Au XXIe siècle, après avoir observé le retour de la comète de 1682 à son périhélie en 1759, 1835, 1910 et 1986, nous savons que la modélisation correcte de son orbite est celle d'une ellipse d'excentricité proche de l'unité (si l'on néglige l'influence des autres planètes du Système solaire).

Dans cette partie consacrée à la comète, on notera e, a et T, respectivement l'excentricité de son orbite, son demi grand-axe et sa période orbitale. On notera par ailleurs T_0 la durée de l'année julienne (365,25 jours de 86 400 s), et a_0 la valeur de l'unité astronomique (1 UA ≈ 1,496.10^{11} m), respectivement période orbitale de la Terre et demi grand-axe de l'orbite terrestre.

Nous serons amenés à utiliser la troisième loi de Kepler, sous la forme : $a^3/T^2 = a_0^3/T_0^2$.

Ou, $(a/a_0)^3 / (T/T_0)^2 = 1$. Donc, dans l'expression de la troisième loi de Kepler, lorsque a et T sont exprimés

1 https://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/academie_edition/fichiers_conf/LOUIS-2019.pdf
2 https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1986_num_39_4_4034 (pages 292 et suivantes).

respectivement en unités astronomiques et en années terrestres, la constante vaut exactement 1.

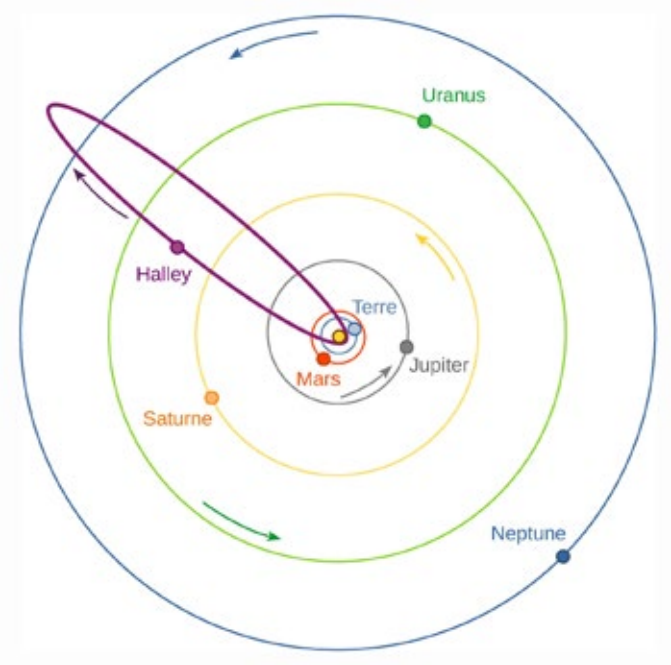


Figure 1.

Dans le Système solaire, et par rapport aux étoiles extérieures, l'orbite de la comète de Halley est assimilable à une ellipse d'excentricité e ≈ 0,967. Le périhélie est à 0,587 UA du Soleil (plus proche du Soleil que Vénus, mais plus éloigné que Mercure), et son aphélie en est à 35,33 UA (plus éloigné du Soleil que Neptune).
Le demi-grand-axe de l'orbite est a = 17,96 UA (environ $2{,}7.10^9$ km). La période orbitale est T = 76,09 ans.
En appliquant la troisième loi de Kepler à ces paramètres orbitaux, on trouve : $a^3/T^2 \approx 1$, avec comme choix d'unités l'année terrestre (T_0) et l'unité astronomique.
La figure 1 représente (en violet) la projection de l'orbite de la comète sur le plan de l'écliptique, comparée aux orbites des planètes.

L'équation de Kepler s'écrit avec les données ci-dessus : E – e.sin(E) = M(t) ; et l'anomalie moyenne de la comète est : M(t) = 2π.t/T, avec l'origine des temps au passage par le périhélie.
Nous nous proposons de répondre à plusieurs questions au sujet de la comète de Halley.

Question 1 : au cours d'une période orbitale, pendant quelle durée la comète est-elle à une distance du Soleil inférieure au ***paramètre (noté p) de l'ellipse trajectoire ?***
Analyse : On cherche la solution en appliquant l'équation de Kepler, avec M(t) comme inconnue.
Le schéma support (figure 2) pour l'analyse de cette question est le transposé, pour la comète, de la figure 6 de la première partie (CC 177 page 28). La durée cherchée (notée D) est associée au secteur d'ellipse HFH'GH (couleur mauve).
Le Soleil est en F. Le paramètre de l'ellipse est la distance

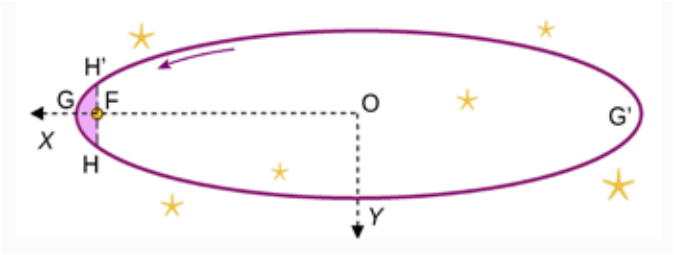


Figure 2.

FH, soit p = a.(1 – e²) = 1,156 UA. La comète passant au périhélie G à la date 0, ses passages en H' et H ont lieu aux dates – D/2 et + D/2.
Pour la date + D/2 : s(D/2) = + π/2.
Sur la figure de l'encadré 1, la condition s = + π/2 amène le point N en F, et FK devient perpendiculaire à OF. Comme OK = OG = a : cos E = OF/OK = c/a = e. On en déduit : E = 0,256 5 (rad).

Par l'équation de Kepler : M(D/2) = E – e·sin E ;
sin E = 0,253 7 ; donc M(D/2) = 0,011 11 (rad) (ou 0,636°).
Avec M(D/2) = π.D/T , la réponse attendue est :
D = 0,269 année (98,3 jours environ).

Cette durée est très courte devant la période orbitale de la comète. En effet, D/T = M/p = 0,003 5 (≈ 1/300). C'est au cours de cette phase de son mouvement que la comète se trouve deux fois à la même distance du Soleil que la Terre (1 UA) et deux fois à la même distance du Soleil que Vénus (0,72 UA). Au cours de cette courte phase, il arrive que la comète soit vue de la Terre à une distance très inférieure à la distance [Terre – Soleil] (comme en l'an 837 de notre ère, avec environ 5 millions de km seulement).

Question 2 : À quelle distance du Soleil se trouve la comète un an après le passage au périhélie ?
Analyse : Les données sont les caractéristiques de l'orbite (demi-grand-axe a, période T, excentricité e) et une date de passage (t = T_0, une année de 365,25 jours). À partir de l'anomalie moyenne M(T_0), il faut calculer l'anomalie excentrique E à la date T_0, et en déduire l'anomalie vraie s(T_0), et accessoirement r(T_0).
L'anomalie moyenne de la comète est la fonction M(t) = 2π·t/T.
Avec t = T_0 , et T_0/T = 1/76,09 = 0,013 14, M = 0,082 58 (rad).
L'équation de Kepler s'écrit :
M(T_0) = E – 0,967 3·sin E = 0,082 58.
Calcul de E
** Avec la méthode de Kepler (voir CC 177 page 31).*
La suite $u_{n+1} = M + e \sin u_n$ avec $u_0 = 0$ converge vers la limite 0,721 4. Mais la convergence est assez lente (précision du millième au 24e rang), cette méthode étant peu adaptée aux grandes excentricités.

** Avec la méthode de Newton-Raphson (voir les compléments à l'article du n° 177), la convergence est beaucoup plus rapide (précision du millième au 5e rang, voir encadré 2)*

Encadré 2 avec la méthode de Newton-Raphson
Principe : recherche du zéro de la fonction $f(x) = x - e\cdot\sin(x) - M(T_0)$.
Les constantes de l'équation sont $e = 0{,}967\ 3$ et $M(T_0) = 0{,}082\ 58$ (rad).
La fonction dérivée $f'(x)$ est $1 - e\cdot\cos(x)$.
Méthode itérative : étude de la suite $\{v_n\}$ telle que $v_{n+1} = v_n - f(v_n)/f'(v_n)$ termes de la suite en radians).
On choisit $v_0 = 0$. Les premières valeurs de v_n et de $f(v_n)$ sont rassemblées dans le tableau.
On trouve $v_6 = 0{,}721\ 4$ et ensuite $v_{n+1} = v_n$. Donc **E = 0,721 4 (rad).**

n	0	1	2	3	4	5	6	7	L
v_n	0	≈ 2,523 3	≈ 1,471 9	≈ 1,000 1	≈ 0,783 2	≈ 0,725 5	≈ 0,721 4	≈ 0,721 4	E
$f(v_n)$	-M	≈ 1,870 0	≈ 0,426 8	≈ 0,103 5	≈ 0,018 2	≈ 0,001 1	$\approx <10^{-4}$	$\approx <10^{-8}$	0

Donc : tan(E/2) = 0,377 2 ; et comme ε = 7,753, tan(s/2) = 2,925. On en déduit : ***s(T0) = 142,2°.***
Avec cos E = 0,750 9, on calcule r(E) = a(1 – e.cos E), soit : ***r(T0) = 4,916*** UA.
Donc, une année terrestre après son passage au périhélie, la comète de Halley est à une distance du Soleil un peu inférieure au rayon moyen de l'orbite de Jupiter (5,2 UA environ).
Contrôle du résultat par le calculateur d'éphémérides (https://ssp.imcce.fr/forms/ephemeris) :
En 1986, la comète de Halley est passée à son périhélie le 09 février (à 11 h 0 TU). Elle devrait atteindre son aphélie en décembre 2023 (à 35,14 UA du Soleil ; cette distance a varié au cours de l'histoire de la comète). Le calcul d'éphémérides est fait dans le référentiel héliocentrique, avec le plan de l'écliptique comme référence. Les coordonnées écliptiques de la comète sont données : longitude (l) et latitude (b). Le point γ est l'origine des longitudes, et les nœuds de l'orbite de la comète correspondent à b = 0.

P/Halley (comète)

Date	λ (deg)	β (deg)	d_{obs} (UA)	m_v (mag)	Phase (deg)	Δλcosβ (arcsec/min)	Δβ (arcsec/min)	v_r (km/s)
1986-02-09T11 :00 :00.000	305°49'00,244	16°26'37,638	0,587103319487	1,93	0	-7,5999468	-0,9825266	0,0000644
1987-02-09T17 :00 :00.000	165°17'53,322	-17°03'31,955	4,914882868822	15,77	0	-0,1077686	-0,0089332	16,4089244

La première ligne concerne le passage de la comète au périhélie de son orbite (vitesse radiale quasi nulle, en km/s, distance au Soleil égale à 0,587 1 UA, latitude b = + 16,5° environ). La seconde ligne donne la distance de la comète au Soleil un an plus tard : 4,915 UA, à comparer avec la réponse précédente 4,916 UA pour $r(T_0)$.

Question 3 : calculer les dates approximatives pour lesquelles la comète se trouve à la même distance du Soleil que les planètes, de Mars à Neptune, pendant la demi-période qui s'étend de 1986 à 2023.
Analyse : Les données relatives aux cinq planètes sont les rayons de leurs orbites supposées circulaires et centrées sur le Soleil. Le rayon de chaque orbite planétaire s'identifie donc avec la distance r(E) de la comète au Soleil. De r(E) = a.(1 – e .cos E), on déduit E, puis à l'aide de l'équation de Kepler, on calcule M(t) puis la date inconnue t qui lui correspond avec M(t) = 2π.t/T.
Pour simplifier, nous choisissons a = 18 UA et T = 76 années (a^3/T^2 = 1,01 au lieu de 1 juste).
Exemple de la planète Neptune
Le rayon de l'orbite de la planète est pris pour simplifier égal à 30 UA. C'est aussi la valeur de r(E).
On en déduit : cos E = – 0,69. Donc E = 134°, ou 2,33 (rad). Alors sin E = 0,73, et d'après l'équation de Kepler : M = 1,63 (rad). Finalement : t = 20 années.

La comète passe à la même distance du Soleil que Neptune en 2005.

La même méthode appliquée aux planètes Mars (r(E) = 1,5 UA), Jupiter (r(E) = 5,2 UA), Saturne (r(E) = 9,5 UA) et Uranus (r(E) = 19 UA) donne les dates de passage suivantes :
Mars : t = 0,20 année, passage en avril 1986 ; Jupiter : t = 1,1 année, passage en mars 1987 ; Saturne : t = 2,6 années ; passage en août 1988 ; Uranus : t = 8,0 années ; passage en février 1994.

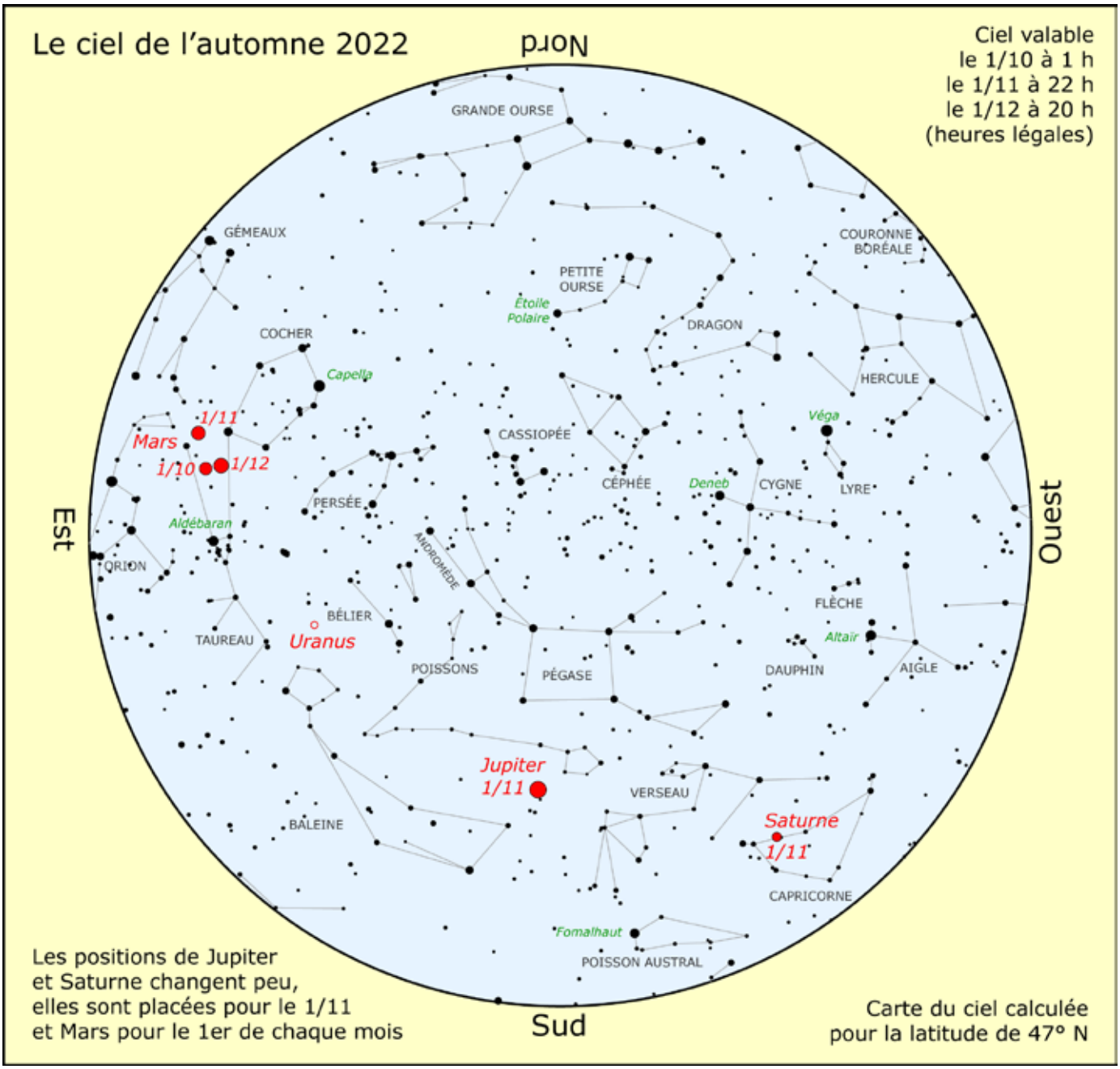


Plaque située dans l'abbaye de Westminster (Wikipedia).

Le prochain passage au périhélie de la comète de Halley est annoncé pour l'année 2061. Une évaluation plus précise de la date de son retour nécessite la prise en compte des attractions gravitationnelles des planètes majeures du Système solaire (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), qui perturbent la trajectoire de la comète. Ce très long travail avait été fait en 1757 et 1758 par Alexis Clairaut, Jérôme de Lalande et Nicole-Reine Lepaute (à une époque où les planètes Uranus et Neptune n'étaient pas encore connues). Ce qui leur avait permis d'annoncer avec une précision d'un mois le retour de la comète pour avril 1759, retour prédit par Edmond Halley en 1705.

Suite de l'article sur clea-astro.eu, cliquer sur Cahiers Clairaut 179 ■

Document photocopiable



Visibilité des planètes

Mercure est à rechercher le matin début octobre, entre le 5 et le 15 (élongation maximale le 8).
Vénus passe derrière le Soleil le 22 octobre (conjonction supérieure), on la retrouvera dans le ciel du soir cet hiver.
Enfin, revoilà **Mars** qui passe à l'opposition le 8 décembre (voir page 37).
Jupiter est visible tout l'automne le soir (opposition le 26/09).
Saturne est également observable le soir pendant tout l'automne.
Uranus peut être recherchée dans le Bélier (opposition le 19/11).

Quelques évènements (heures légales)

23/09 : équinoxe d'automne.
21/10 : maximum des Orionides (étoiles filantes).
25/10 : éclipse partielle de Soleil (voir page suivante).
30/10 : passage à l'heure d'hiver.
7/11 : éclipse totale de Lune invisible en Europe.
17/11 : maximum des Léonides, un bel essaim d'étoiles filantes.
1/12 : Mars au plus près de la Terre (à 81 Mkm).
14/12 : Géminides (étoiles filantes).
21/12 : solstice d'hiver à 22 h 48.

Lune
Nouvelle Lune : les 25/09, 25/10, 23/11.
Pleine Lune : les 9/10, 8/11, 8/12.

L'ÉCLIPSE PARTIELLE DE SOLEIL DU MARDI 25 OCTOBRE 2022

La dernière éclipse partielle de Soleil visible en France date d'il y a un peu plus d'un an, c'était le 10 juin 2021. Le 25 octobre 2022, nous pourrons observer à nouveau une éclipse partielle de Soleil. Ce phénomène se produisant à la nouvelle Lune, on peut vérifier que l'on a un nombre entier de lunaison entre ces deux dates, exactement 17.

Le 25 octobre, l'éclipse sera partielle, le cône d'ombre de la Lune passant au nord de la Terre. Elle sera visible depuis toute l'Europe. En France métropolitaine, la fraction du disque solaire éclipsé – ce qu'on appelle l'obscuration – sera assez faible, de 19,5 % à Strasbourg à 2,8 % à Biarritz.



Éclipse partielle de Soleil. Le cône d'ombre de la Lune passe au nord de la Terre. Un personnage situé en A verra une partie du Soleil occulté par la Lune, alors qu'en B, on ne verra pas d'éclipse.

L'heure du maximum est prévue autour de midi, heure légale. Le Soleil ne sera donc pas trop bas, entre 24 et 35° de hauteur. Ce n'est pas une éclipse exceptionnelle mais suffisamment intéressante pour prévoir des observations.

Ville	Début	Milieu	Fin	Obsc.
Strasbourg	11 h 12	12 h 09	13 h 07	19,5 %
Lille	11 h 09	12 h 02	12 h 57	17,2 %
Dijon	11 h 15	12 h 07	13 h 00	14,4 %
Paris	11 h 12	12 h 02	12 h 54	13,7 %
Lyon	11 h 18	12 h 07	12 h 58	11,8 %
Nice	11 h 22	12 h 12	13 h 04	11,7 %
Caen	11 h 12	11 h 59	12 h 48	11,4 %
Ajaccio	11 h 26	12 h 16	13 h 07	11,0 %
Marseille	11 h 24	12 h 10	12 h 57	9,0 %
Poitiers	11 h 18	12 h 01	12 h 46	8,3 %
Nantes	11 h 17	11 h 59	12 h 42	7,4 %
Brest	11 h 16	11 h 55	12 h 35	6,5 %
Toulouse	11 h 25	12 h 04	12 h 45	5,4 %
Bordeaux	11 h 23	12 h 01	12 h 40	5,2 %

Horaires de l'éclipse et obscuration (pourcentage du disque solaire éclipsé) pour quelques villes de France, classées par ordre d'obscuration, du nord-est au sud-ouest. Les heures indiquées sont les heures légales.

Comment l'observer ?

Il faut le rappeler à chaque fois, on n'observe JAMAIS le Soleil sans protection sous peine de s'abîmer sérieusement les yeux. Voici trois manières d'observer une éclipse sans danger.

1. L'observation à l'œil nu derrière un filtre certifié (comme un « Viséclipse » par exemple).
2. L'observation par projection. On projette avec une lunette ou une paire de jumelles l'image du Soleil partiellement éclipsé sur un écran ou une feuille de papier. C'est une méthode sans aucun danger à condition de surveiller en permanence que personne ne mette l'œil à l'oculaire.
3. L'observation avec un instrument, lunette ou télescope, muni d'un filtre pleine ouverture certifié, à placer à l'entrée de l'instrument (ne surtout pas utiliser les filtres qui se fixent sur l'oculaire, qui peuvent chauffer et se fendre).

Que verra-t-on ?

Entre le début et la fin de l'éclipse, on verra la Lune se déplacer de droite à gauche pour obscurcir la partie nord du Soleil. Les heures sont données dans le tableau précédent, en heure légale.

Le Soleil tel qu'il apparaîtra au moment du maximum de l'éclipse depuis Strasbourg.
Dans les autres villes de France, la partie éclipsée du Soleil sera plus petite.



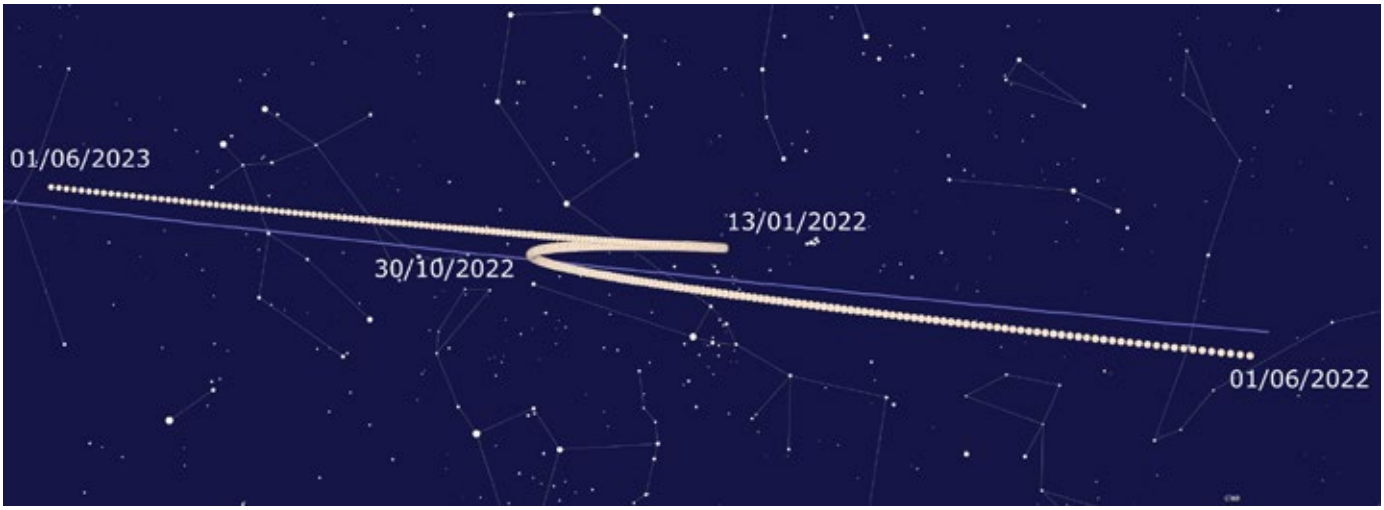
Pour en savoir plus

∗ Sur notre site https://clea-astro.eu à l'onglet Lunap puis Éclipse de Soleil et activités, vous trouverez :
- comment observer une éclipse de Soleil ;
- comment la photographier ;
- des idées d'activité, en particulier comment calculer la distance de la Lune à partir de deux observations.

∗ Pour plus de détails, le hors-série n° 14 sur le Soleil explique comment observer et photographier le Soleil sans danger.

∗ Le site de l'IMCCE donne les circonstances locales de cette éclipse :
https://ssp.imcce.fr/forms/solar-eclipses/2022-10-25

LA RÉTROGRADATION DE MARS



Positions de la planète Mars du 1er juin 2022 au 1er juin 2023. L'écliptique est tracé en bleu.

Tous les 780 jours, le Soleil, la Terre et Mars se retrouvent alignés. À ce moment-là, la Terre, plus rapide, double Mars qui semble reculer au milieu des constellations. On parle alors de rétrogradation.

Cette rétrogradation commence le 30 octobre 2022 et se poursuit jusqu'au 13 janvier 2023.

C'est au milieu de la rétrogradation, le 8 décembre 2022 que Mars est située à l'opposé du Soleil : on parle d'opposition de Mars et la planète est alors visible toute la nuit.

La forme de la courbe de rétrogradation varie suivant les oppositions : elle peut se présenter sous la forme d'une boucle, d'un S ou d'un Z comme ici. Le plan de l'orbite de Mars est incliné de près de 2° par rapport au plan de l'orbite terrestre (le plan de l'écliptique). La trace de ce plan est en bleu sur la figure ci-dessus. Jusque mi-octobre 2022, la planète Mars est située au sud du plan de l'écliptique. Le 20 octobre, elle passe au « noeud ascendant » et se retrouve au nord de ce plan. C'est pour cette raison que l'on voit la courbe de rétrogradation traverser l'écliptique à ce moment-là.

Distance et diamètre apparent

L'orbite de Mars est elliptique et sa distance au Soleil varie entre 207 et 249 millions de km alors que la distance Terre Soleil varie entre 147 et 152 millions de km. Au moment de l'opposition de Mars, la distance Terre Mars peut descendre sous les 56 millions de km comme ce fut le cas en 2003 mais elle peut également dépasser 101 millions de km comme ce sera le cas en 2027.

Le 8 décembre 2022, la distance sera intermédiaire avec 82,16 millions de km. Il se trouve que, à cause de la forme elliptique de l'orbite martienne, la distance minimale sera atteinte une semaine avant, le 1er décembre, avec 81,45 millions de km.

Ce n'est donc pas une opposition exceptionnelle mais Mars sera dans la constellation du Taureau donc assez haut dans le ciel. Son diamètre apparent sera de 17'', environ 100 fois plus petite que la pleine Lune. Pour observer des détails à sa surface, il vaut mieux utiliser un fort grossissement.

Pour en savoir plus

De nombreux articles des Cahiers Clairaut ont été consacrés aux rétrogradations de Mars. Vous les trouverez sur notre site clea-astro.eu dans Archives des Cahiers Clairaut avec le mot clé rétrogradation. En voici quelques-uns (en libre accès) :

* Images de la rétrogradation de Mars, CC 156 (hiver 2016).
* Les boucles de rétrogradation de Mars, CC 120 (hiver 2007).
* La rétrogradation de Mars en CM2, CC 110 (été 2005).

Vous trouvez également d'autres informations sur notre site, onglet Lunap puis RetroMars.

Campagne photo
rétrogradation de Mars 2022

Depuis 2005 c'est une tradition : nous vous proposons de participer activement au suivi de la rétrogradation de Mars en nous envoyant vos images et, surtout, celles réalisées par vos élèves.

Elles seront, comme lors des campagnes précédentes, mises en ligne sur un calendrier sur le site http://clea-astro.eu à la rubrique « Avec nos élèves ».

Vous trouverez aussi dans cette rubrique d'autres documents permettant de suivre la rétrogradation dont des cartes imprimables, des animations, des scripts pour Stellarium et un planétaire héliocentrique.

■

OBSERVATION D'UN CRÉPUSCULE

Olivier Gayrard

Une étude détaillée de la pollution lumineuse autour de la ville d'Albi en Occitanie. Toute une série de manipulations scientifiques quantitatives, soigneusement décrites, étaye le niveau de dégradation actuel du ciel nocturne de la région.

Dans cet article nous tenterons d'estimer grossièrement l'intensité lumineuse, la couleur et la forme d'un halo de nuisance lumineuse de ville moyenne. Pour cela nous commencerons par décrire l'image d'un crépuscule avant d'en suivre son évolution dans le temps. Enfin par comparaison nous pourrons qualifier à quel type de crépuscule correspond le halo, et ainsi répondre à la problématique suivante : la nuit noire existe-t-elle encore autour de la ville d'Albi ?

Pour beaucoup d'entre nous, la lumière naturelle des étoiles et de la Lune a depuis longtemps été remplacée par des éclairages artificiels. Cet éclairage nocturne parfois non justifié, comme celui des bureaux, par des besoins réels porte le terme de pollution lumineuse. L'éclairage nocturne a permis entre autres de sécuriser nos villes, mais il existe des conséquences négatives sur la faune, la flore, les écosystèmes, la santé et la visibilité du ciel, qui sera l'objet de cet article. L'Humanité a toujours observé le ciel, que ce soit pour savoir quand semer, se repérer en mer, mais aussi répondre aux questions portant sur notre origine. Plus récemment, de nombreuses technologies utilisées dans nos vies quotidiennes sont dérivées des découvertes faites par l'astronomie.

Notre planète Terre est entourée d'une enveloppe d'air, juste assez épaisse pour permettre de nombreux jeux de lumière. Une atmosphère plus ou moins dense, comme pour respectivement Vénus et Mars, et les féeries des divers météores colorés ne nous seraient pas offerts.

Définitions des crépuscules

Intéressons-nous plus particulièrement aux crépuscules, durées au cours desquelles le Soleil sous l'horizon éclaire encore le ciel. Dans les faits, on distingue trois crépuscules ; civil, nautique et astronomique, suivant que le Soleil se trouve entre 0° et 6°, 6° et 12° et 12° et 18° sous l'horizon. Au cours du crépuscule civil, les corps les plus brillants, planètes et étoiles de faibles magnitudes, apparaissent. La lumière diffusée par l'atmosphère continue alors d'éclairer le sol avec suffisamment d'intensité pour permettre les activités humaines. Durant le crépuscule nautique, le ciel s'assombrissant, de nouvelles étoiles deviennent visibles. Sur les océans, la luminosité du ciel se détache de la noirceur des eaux. L'utilisation d'un sextant permet alors de mesurer des hauteurs d'étoiles au-dessus de l'horizon et de déterminer sa position. Pendant le crépuscule astronomique, et à condition d'être éloigné de toute source de pollution lumineuse, les étoiles des dernières magnitudes visibles à l'œil nu apparaissent à leur tour. La lumière diffusée par les hautes couches atmosphériques peut encore gêner l'observation des objets les plus ténus comme la lumière zodiacale, lumière du Soleil diffusée par les particules interplanétaires qui orbitent dans le même plan que celui des planètes. Le meilleur moment de l'année dans l'hémisphère nord pour l'observer le soir est au printemps, lorsque l'écliptique est le plus incliné par rapport à l'horizon. En effet, pour le matin, c'est à l'automne que l'écliptique est plus inclinée.

Réalisation et interprétation de la photographie d'un crépuscule

La soirée du 3 mai 2021 à Saint-Benoît-de-Carmaux, (Tarn), se prêtait particulièrement bien à des travaux de photographies de crépuscules, la Lune ne se levant que le lendemain matin. La figure 1 a été réalisée à 21 h 22, soit 7 minutes avant la fin du crépuscule civil, le Soleil étant à h = -5,0°. Un appareil photographique numérique (APN) Canon EOS 60D muni d'un objectif EF-S18-55 mm a été utilisé. Pour essayer de restituer la sensation visuelle de ce demi-jour, les réglages suivants ont été utilisés : ouverture 4,5 ; sensibilité ISO 100 ; temps d'exposition 1/50 s ; température de couleur 5300 K. La distance focale réelle était de 21 mm. Cette photographie a été en outre corrigée des aberrations de distorsion et de vignetage introduites par l'objectif. L'utilisation d'astrometry.net ainsi que d'une photographie du ciel étoilé prise plus tard dans la nuit a permis de remonter à la taille de la photographie : 61,2° par 40,8°. Comme les dimensions de la photographie sont de 5 184 pixels par 3 456 pixels, chacun d'eux recouvrent 42,5 secondes d'arc, et 1° correspond à 85 pixels. La hauteur h = 0° de la ligne d'horizon a été estimée à partir d'une photographie du même paysage prise de nuit et de sa comparaison à l'aide du logiciel Stellarium. En effet, ce dernier permet de simuler la vue du ciel depuis le lieu de l'observateur. Une grille azimutale a alors permis de relever les positions des étoiles de la constellation du Cocher visibles dans cette direction cette nuit-là. Stellarium donnant la hauteur de ces étoiles, l'horizon du site d'observation peut alors être tracé. Dans le cas de la figure 1 l'horizon est à la ligne 3 305, la hauteur au-dessus de l'horizon H = 5° ligne 2 880, et ainsi de suite.

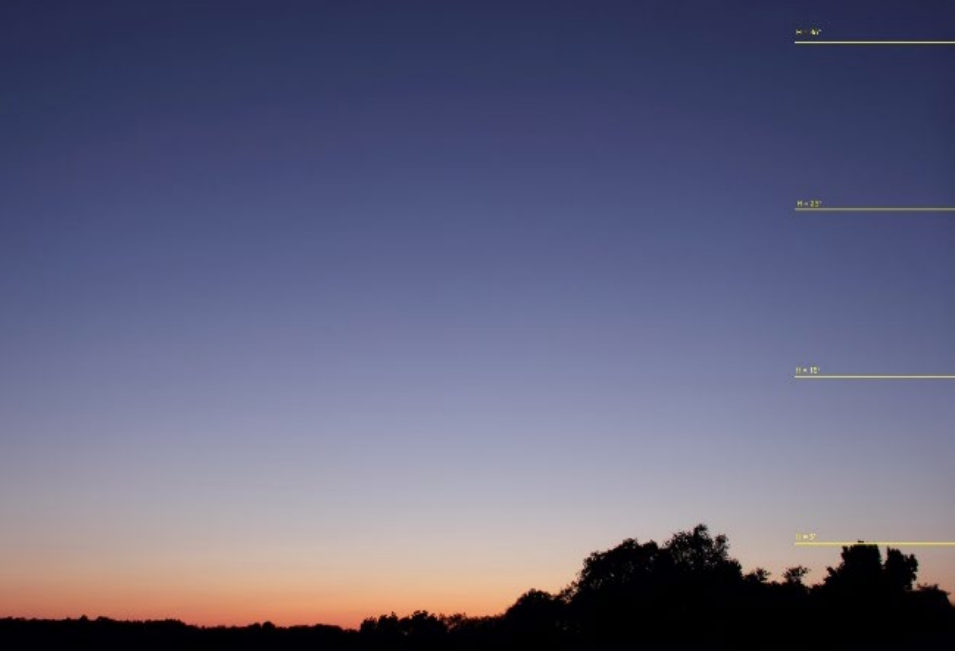


Fig.1. **Fin d'un crépuscule civil ; hauteur du Soleil, h = -5°. Les lignes jaunes correspondent aux hauteurs au-dessus de l'horizon H = 5°, 15°, 25° et 35°.**

Détaillons à présent cette photographie. Chaque pixel de l'image est formé par trois sous-pixels rouge vert et bleu dont les intensités peuvent prendre des valeurs comprises entre 0 et 255 (2^8). Le rendu des couleurs est assuré par leur synthèse additive (sur l'écran d'un ordinateur), ce qui permet une palette de couleurs de plus de 16 millions de nuances, (2^{8*3}). Pour décrire cette image il sera utile de récupérer les valeurs RVB de ces différents sous-pixels. Pour ce faire, nous avons utilisé un petit programme écrit en Python.

Les figures 2 à 5 représentent les variations des intensités des sous-pixels rouges verts et bleus en fonction du numéro de colonne pour des hauteurs H allant de 35° à 5° au-dessus de l'horizon. Le cercle solaire vertical, ligne joignant le centre du Soleil au zénith passe par la colonne 2 592, milieu de l'image. Aussi toutes ces courbes sont-elles symétriques par rapport à cette verticale centrale. On observe que quelles que soient les hauteurs H et les lumières colorées, les intensités lumineuses diminuent lorsqu'on s'éloigne de la colonne 2 592 par valeur supérieure ou inférieure. En effet, pour une ligne fixée, la distance angulaire entre le Soleil et le point de l'image visé augmente en se rapprochant des bords du cliché. Nous constatons pareillement que plus nous nous éloignons de l'horizon et plus les intensités lumineuses diminuent. La combinaison de ces deux phénomènes produit la formation de l'arche crépusculaire.

Par ailleurs, nous remarquons que les pentes de ces courbes augmentent lorsque la hauteur H diminue. En prenant comme référence la pente de la figure 2 où H = 35°, elles sont respectivement multipliées par environ 2, 3 et 4 pour H = 25°, H = 15° et H = 5°. La luminosité du ciel augmente lorsqu'on se rapproche de l'horizon car la lumière traverse une quantité plus importante d'atmosphère. La probabilité de diffusion des photons, quelle que soit leur longueur d'onde, augmente exponentiellement avec l'épaisseur de la couche traversée. Notons pour terminer cette description l'inversion des lumières colorées prépondérantes entre les hauteurs H = 15 ° et H = 5°. Le contraste produit par ce changement de teinte dominante donne aux crépuscules toute leur beauté éphémère.

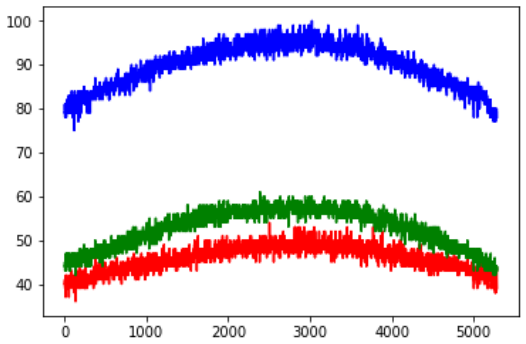


Fig.2. **Hauteur au-dessus de l'horizon H = 35°, le Soleil étant à h = -5,0.**

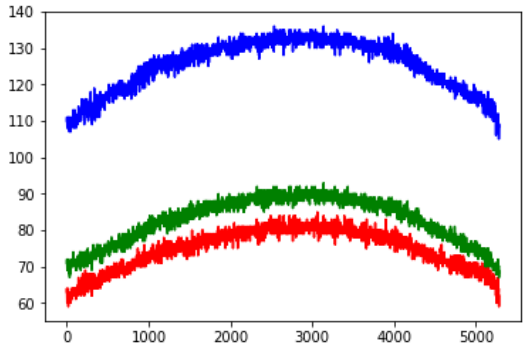


Fig.3. **Hauteur au-dessus de l'horizon H = 25°, le Soleil étant à h = -5,0°.**

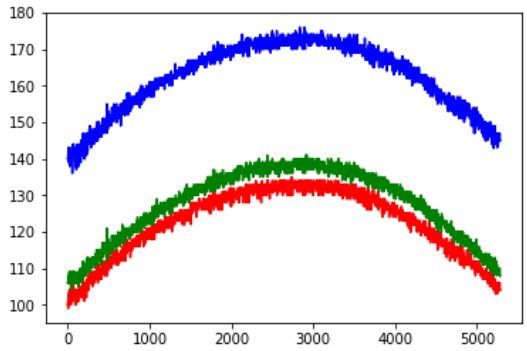


Fig.4 **Hauteur au-dessus de l'horizon H = 15°, le Soleil étant à h = -5,0°.**

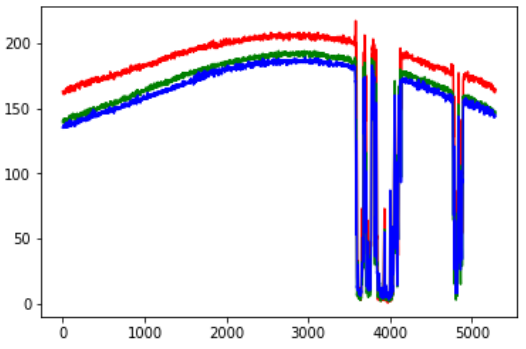


Fig.5. **Hauteur au-dessus de l'horizon H = 5°, le Soleil étant à h = -5,0°.**

D'après la théorie de Lord Rayleigh sur la diffusion moléculaire, la probabilité pour qu'un photon soit diffusé par une molécule de l'air est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de sa longueur d'onde. C'est ainsi qu'un photon « bleu » de longueur d'onde 450 nm a 3,2 fois plus de chance d'être diffusé qu'un autre photon de longueur d'onde 600 nm, « rouge », $(600/450)^4 = 3,2$. L'arche est constituée par la lumière diffusée par l'atmosphère dans notre direction, le Soleil étant déjà couché. Pour des hauteur H importantes, la *masse* d'air traversée (voir encadré) par la lumière est relativement faible, et la diffusion préférentielle des photons « bleus » donne sa couleur au ciel. Lorsqu'on regarde vers l'horizon au crépuscule, la *masse* d'air traversée est plus importante. Elle a diffusé une part importante des photons de courte longueur d'onde en dehors de la direction d'observation, donnant maintenant les teintes jaune et rouge. C'est ce que nous pouvons mesurer sur les figures 4 à 5 où l'intensité de la lumière bleue passe environ de 172 à 186 tandis que celle de la lumière rouge passe de 133 à 208. Ce phénomène de rougissement est accentué par la présence dans l'atmosphère de particules de diamètre inférieur à 100 nm, telles les poussières, fumées et gouttelettes d'eau.

Réalisation et interprétation d'une série la photographique en continu

Poursuivons maintenant nos observations des crépuscules en prenant une photographie toutes les minutes. L'APN est posé sur un plateau horizontal muni d'un index, lui-même posé sur un cercle gradué en degré. Ainsi en suivant en temps réel sur Stellarium les azimuts du Soleil, il a été possible de faire en sorte que le cercle solaire vertical soit au mieux centré sur la colonne du milieu des photographies. Un programme écrit en Python a permis de récupérer les valeurs des intensités des lumières colorées rouge verte et bleue pour cette colonne aux lignes de hauteur 5°, 15°, 25° et 35° au-dessus de l'horizon. La première photographie a été prise à 21 h 55 et la dernière à 22 h 33.

Le choix a été fait de régler l'APN sur un temps d'exposition de 6 s avec une sensibilité de 800 ISO, l'ouverture étant fixée à 5. Ces réglages ont permis de faire en sorte de ni surexposer, ni sous-exposer les photos au cours de ces prises de vues. La quinzième image prise à 22 h 09 correspond à la fin du crépuscule nautique et au début du crépuscule astronomique dont la fin avait lieu ce soir-là à 22 h 53 soit 20 minutes après la fin du dernier point représenté sur les figures 6. En effet, les valeurs des intensités étaient trop proches du bruit de lecture pour être prises en compte. La fin du crépuscule civil, début du crépuscule nautique (21 h 29, soit 26 minutes avant la première photo) n'apparaît pas pour la raison inverse, les photographies étant en grande partie saturées.

Bien entendu un autre réglage aurait permis de mettre en évidence un autre type de passage du crépuscule. Ceci dit dans le travail ici présenté, nous recherchions à construire des courbes permettant de comparer le halo lumineux produit par la pollution des lumières nocturnes de la ville d'Albi ; halo visible lors du crépuscule astronomique. (Voir figure 7 a, b et c).

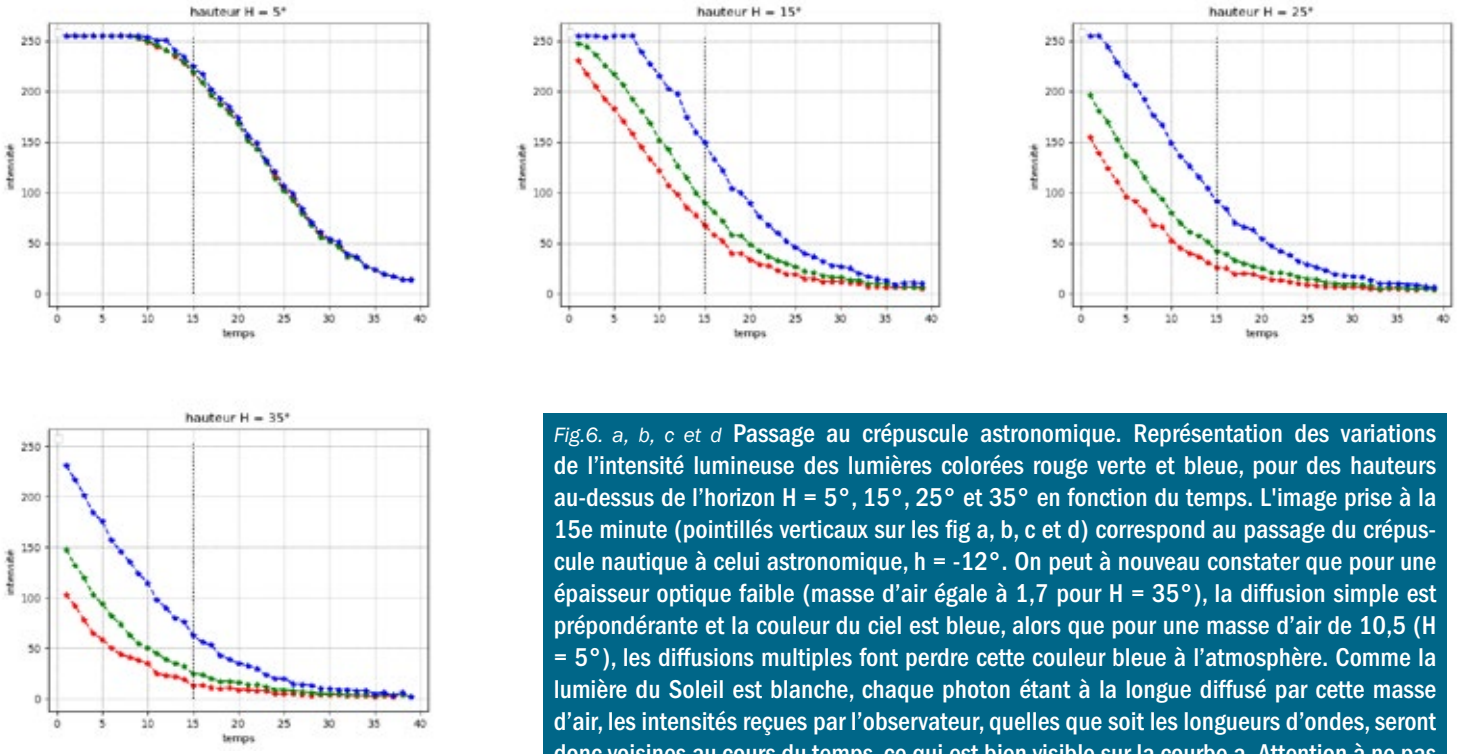


Fig.6. a, b, c et d **Passage au crépuscule astronomique. Représentation des variations de l'intensité lumineuse des lumières colorées rouge verte et bleue, pour des hauteurs au-dessus de l'horizon H = 5°, 15°, 25° et 35° en fonction du temps. L'image prise à la 15e minute (pointillés verticaux sur les fig a, b, c et d) correspond au passage du crépuscule nautique à celui astronomique, h = -12°. On peut à nouveau constater que pour une épaisseur optique faible (masse d'air égale à 1,7 pour H = 35°), la diffusion simple est prépondérante et la couleur du ciel est bleue, alors que pour une masse d'air de 10,5 (H = 5°), les diffusions multiples font perdre cette couleur bleue à l'atmosphère. Comme la lumière du Soleil est blanche, chaque photon étant à la longue diffusé par cette masse d'air, les intensités reçues par l'observateur, quelles que soit les longueurs d'ondes, seront donc voisines au cours du temps, ce qui est bien visible sur la courbe a. Attention à ne pas tenir compte des seuils d'intensité égale à la valeur 255 correspondant à une saturation du capteur.**



Fig.7a. **11 août 2021 à 00 h 18, photo prise dans les mêmes conditions que celles ayant permis de construire les courbes des figures 6 depuis le site de Cap Découverte en direction de la ville d'Albi. La photo est centrée vers la cathédrale et le centre-ville, distant de 6 km. Jupiter est le point visible en haut à gauche. La Lune est couchée depuis plus de 2 heures. Le Soleil est à h = -27°.**

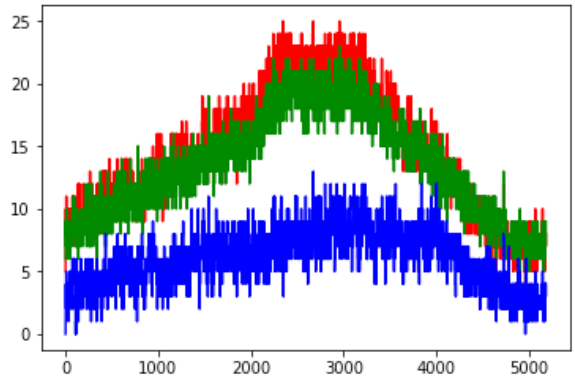


Fig.7b. **La coupe à la hauteur de 5° rappelle par sa forme d'arche, sa couleur jaune et son intensité celle d'un milieu de crépuscule astronomique.**



Fig.7c. **Le halo de pollution lumineuse est ici mis plus clairement en évidence en utilisant un objectif fish-eyes, une pause de 15 s, ISO 800, ouverture 3,5. Le rendu exagère la pollution et n'est pas celui de la vision nocturne. La constellation du Dauphin au-dessus de Jupiter était par exemple facilement identifiable à l'œil nu et 65° plus à l'est de Jupiter la galaxie d'Andromède était visible en vision décalée.**

Comparaison du halo lumineux de la ville d'Albi avec un crépuscule

Si nous comparons maintenant les figures 6a et 7b, nous constatons que les intensités lumineuses des composantes rouge et verte sont voisines de celles de la vingtième minute du crépuscule astronomique qui durait cette nuit-ci 44 minutes, (de 22 h 09 à 22 h 53). Or le Soleil était à une hauteur h = -27°, très en dessous l'horizon. Il ne s'agit donc pas de lumière solaire diffusée, mais bien de lumière artificielle. Nous supposons que le halo lumineux est de forme sphérique. L'observation étant faite à 6 km du centre-ville d'Albi, il est ainsi mis en évidence que sur un territoire de plus de 100 km² centré sur la ville d'Albi, un halo de lumière était décelable par les moyens photographiques présentés ci-dessus.

Cela doit nous interroger sur l'impact de ces lumières artificielles sur les écosystèmes, au premier rang duquel les oiseaux figurent. En effet, pour éviter leurs prédateurs, deux espèces d'oiseaux migrateurs sur trois voyagent de nuit. Plus largement, les animaux utilisent, seuls ou en combinaison, des boussoles solaire, lunaire, polarisée et stellaire[1]. L'obscurité dans le cas de cette dernière boussole est donc essentielle afin de mener à bien les migrations et de ne pas perturber ces espèces. Malheureusement, au cœur des trajets migratoires, les lumières de nos villes sont parfois un piège mortel pour ces oiseaux. Les halos de lumière perturbent leur trajectoire et allongent leur itinéraire. De nombreux oiseaux meurent ; les scientifiques estiment que 100 millions d'oiseaux en migration sont tués chaque année aux USA lors de collisions avec des bâtiments éclairés[2].

D'autres oiseaux, tels les chouettes et hiboux vivent la nuit. Leurs yeux sont très sensibles et détectent des intensités lumineuses aussi faibles que la lumière des étoiles. Quand une chouette chasse, elle sera facilement éblouie par la lumière artificielle. Elle ne parviendra pas à atteindre sa proie du premier coup et s'épuisera plus facilement. Et c'est sans compter que la pollution lumineuse peut faire fuir les proies potentielles qui ont besoin de la nuit pour se cacher. L'éclairage public des édifices servant habituellement de gîte aux rapaces nocturnes (églises, vieilles maisons) réduit d'autant plus le nombre de refuges potentiels pour ces espèces. Il en va de même pour de nombreuses autres espèces nocturnes qui sont sensibles à la lumière.

Il est important de réorienter les politiques d'éclairage public et privé. Tout en assurant ses missions de sécurisation des espaces urbains, les lampadaires des villes de demain doivent évoluer et mieux tenir compte des aspects environnementaux.

■

L'auteur remercie vivement Renaud Mathevet, enseignant chercheur à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III) et vice-président de l'association « Lumière en Midi Pyrénées », pour ses précieux conseils et ses critiques constructives dans l'élaboration de cet article.

1 L'astronomie n°162 / juillet-août 2022 La question du mois. Yaël Nazé.

2 https://www.darksky.org/

ENQUÊTE SUR UN LEVER DE PLEINE LUNE

Pierre Causeret



Cette photographie représente la pleine Lune se levant derrière l'observatoire de Lick situé aux États-Unis (Californie). Elle a été réalisée par Rick Baldridge et nous la publions ici avec son aimable autorisation. Certains d'entre vous l'ont peut-être déjà vue sur le site apod.nasa.gov (astronomy picture of the day).

La photo a été réalisée le 7 mars 2012, le diamètre apparent de la Lune vue depuis la Californie était alors de 32,8' (d'après Stellarium). La Lune était proche du périgée (qui a eu lieu 2 jours plus tard), il ne s'agissait pas particulièrement d'une super Lune...

Si vous êtes perspicace et avec quelques outils mathématiques, vous pouvez calculer à quelle distance de l'observatoire se trouvait le photographe. Une aide, la coupole de droite mesure 75 pieds (22,86 m).

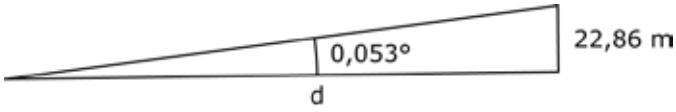
On peut également se demander quel type d'instrument il a utilisé.

Comment calculer la distance du photographe à l'observatoire ?

La Lune mesure 15,6 cm de diamètre sur la photo, pour 32,8' ; l'échelle est donc de 2,1' par cm.

La coupole mesure 1,5 cm sur la photo donc 3,15' (1,5×2,1) ou 0,053°.

À quelle distance d faut-il se placer pour voir une coupole de 22,86 m sous un angle de 0,053° ?



On peut écrire tan 0,053° = 22,86/d ou, en assimilant la tangente à l'angle en radians, 0,053×π/180 = 22,86/d.

On trouve d ≈ 25 000 m ou 25 km ! Cela paraît énorme...

J'ai envoyé le calcul à Rick Baldridge qui a eu la gentillesse de me répondre et de m'envoyer les détails

techniques de sa prise de vue (je n'étais pas le premier à lui demander !). Sa distance à l'observatoire lors de la photo était de 14,6 miles. Convertis en km, cela donne 23,5 km, soit une erreur de 6 % environ. Ce n'est pas si mal étant donné l'imprécision sur le diamètre de la coupole sur la photo.

Quel type d'instrument faut-il utiliser à cette distance ?

Difficile de répondre avec la seule photo car celle-ci a été recadrée. Par chance, l'auteur donne la photo d'origine sur son site [1]. La voici :



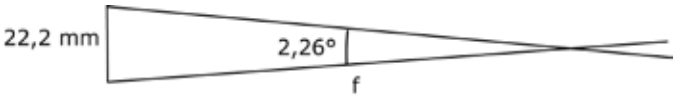
La photographie originale complète.

Si le diamètre apparent de la Lune vaut 32,8', avec une règle de trois on trouve que la longueur de la photo correspond à 135,6' soit 2,26°. Il faut connaître également le type de capteur utilisé. On trouve toujours sur ce même site [1] le type d'appareil utilisé : un Canon XTi, dont le capteur mesure 22,2 mm de long.



Le photographe et sa cible.

Quelle longueur focale f utiliser pour qu'une longueur de 22,2 mm correspondent à un angle de 2,26° ?



$2{,}26\times\pi/180 = 22{,}2/f$. On trouve $f \approx 563$ mm.
Rick Baldridge dit avoir utilisé une lunette StellarVue ED de 560 mm de longueur focale et de 80 mm de diamètre ! Moins de 1 % d'erreur, c'est mieux !

On peut donner quelques précisions techniques sur la prise de vue :
- lunette et APN sur trépied fixe.
- déclencheur souple pour réduire les vibrations.
- exposition 1/100 sec, f7.0, ISO 200.
- balance des blancs réglée sur «Sunlight».

Ici, l'observatoire est encore éclairé, le Soleil venait à peine de se coucher. Nous étions donc un peu avant l'heure de la pleine Lune.
Techniquement, ce type de photo est facile à faire. La grosse difficulté réside dans le choix du lieu de la prise de vue. Une erreur de quelques dizaines de mètres et le bâtiment ne sera plus centré. Un écart de 200 m et il ne sera même plus devant la Lune !

Pour déterminer sa position, Rick Baldridge se sert d'un vieux programme DOS appelé SKYMAP utilisé pour le suivi des satellites.
On peut également utiliser le site de l'IMCCE (https://ssp.imcce.fr) pour obtenir avec précision l'azimut et la hauteur de la Lune à une heure précise depuis un lieu donné. Il suffit de cliquer sur l'onglet « Observation des planètes », de rentrer le lieu d'observation, la date et l'heure, le nombre de dates et le pas (vous pouvez calculer la position de la Lune toutes les minutes par exemple), le corps du Système solaire (ici la Lune) et vous obtenez les coordonnées de la Lune. Celles qui vous seront utiles sont l'azimut (Az) et la hauteur (H).
À vous ensuite de choisir votre premier plan et votre lieu d'observation en utilisant une carte IGN ou un logiciel...

[1] https://wordlesstech.com/lick-observatory-moonrise/
Sur ce site, Rick Baldridge explique les détails de la prise de vue.

■

FORMATION CHEZ ANTOINE D'ABBADIE

Roseline Primout, enseignante en physique-chimie et formatrice

Fin mai 2022, s'est tenu au Château-Observatoire Abbadia à Hendaye une formation à destination d'enseignants du secondaire organisée par la Maison pour la science en Aquitaine[1] (MPSA) suite à une proposition faite par le Clea. En effet, suite à une demande de la Délégation académique de l'action culturelle du rectorat (Daac), l'autrice et Frédéric Pitout, membres du Clea, ont répertorié les ouvrages présents dans la bibliothèque du Château-Observatoire d'Antoine d'Abbadie ainsi que sa correspondance située aux archives départementales de Bayonne[2] afin de valoriser l'observatoire créé par Antoine d'Abbadie. La chargée de mission patrimoine et culture pour l'Académie des sciences, Céline Davadan, a apporté son éclairage pour aider à resituer les documents dans leur contexte. La MPSA, partenaire du rectorat de Bordeaux, était tout indiquée comme partenaire puisque le Château-Observatoire appartient à l'Académie des sciences.

Cette formation constitue la première médiation de ce patrimoine via la correspondance d'Antoine d'Abbadie. Elle réunissait des enseignants de physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre, mathématiques, technologie, littérature, documentation et histoire-géographie.

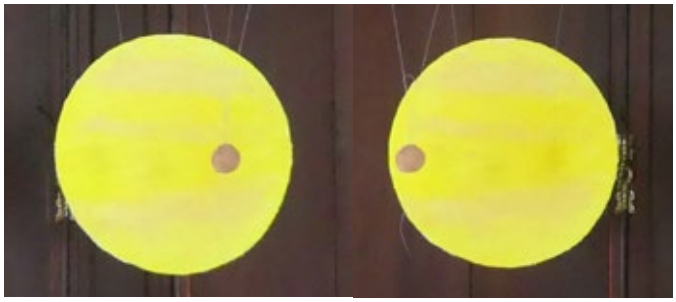
Antoine d'Abbadie était un savant du XIXe, géographe, linguiste et astronome, membre de l'Académie des sciences puis président de cette institution. Il a fait construire sa demeure de style irlandais à Hendaye. Grand explorateur, il est le premier à avoir réalisé la cartographie de l'Éthiopie. Il a utilisé la méthode de la triangulation et a dû adapter la technique pour effectuer, seul, les mesures sur le terrain en se faisant aider parfois par des autochtones. Pour mesurer la distance d'une base, il s'aidait de la vitesse du son en tirant un coup de fusil : il chronométrait le temps entre la vue de l'éclat du coup de feu et le son qui lui parvenait. Il a simplifié le théodolite par un appareil ne possédant que trois vis, qu'il a surnommé *abba*. Sa méthode appelée *géodésie expéditive e*t ses cartes sont présentées dans son ouvrage *Géodésie d'Éthiopie*[3].

Le thème de la cartographie s'intègre dans les programmes de collège et de lycée. Pendant la formation, les enseignants devaient réaliser la cartographie d'une



Photo prise par Célia Mira – cartographie du parc du Château-Observatoire Abbadia.

partie du parc du Château-Observatoire. Pour cela, un atelier d'une précédente école d'été du Clea encadré par Francis Berthomieu en 2012 a été reproduit, utilisant un rapporteur avec un axe en rotation permettant la visée. Seule la méthode graphique a été pratiquée (voir article de Véronique Haugel dans le n° 170 des Cahiers Clairaut).

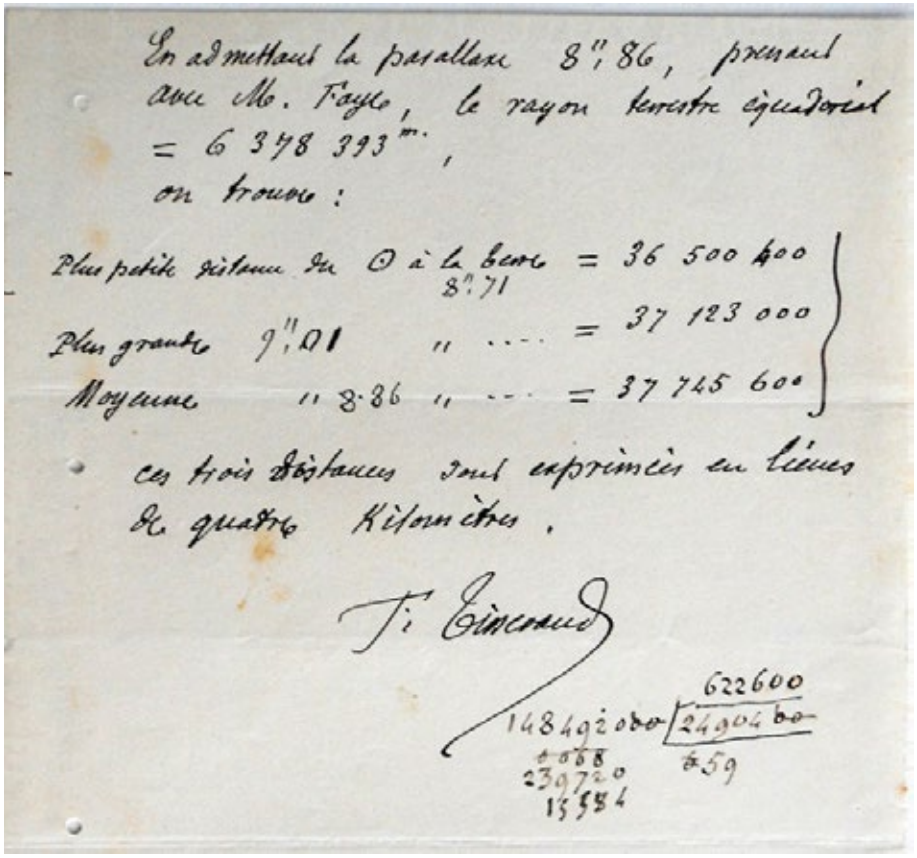


Modélisation de la parallaxe lors d'un passage de Vénus. Images prises de deux points de vue différents.
Photos prises par Célia Mira.

Pendant 10 ans, Antoine d'Abbadie a participé à l'élaboration des expéditions françaises pour aller observer le passage de Vénus de 1882. Il s'est rendu à Haïti, à l'âge de 72 ans, en tant que chef de mission. Pour expliquer l'intérêt scientifique d'un passage de Vénus, nous avons recyclé des articles des Cahiers Clairaut relatifs au passage de Vénus de 2004 pour étudier celui du 6 décembre 1882. Les stagiaires ont pu comprendre le principe de la parallaxe en observant le passage de Vénus comme Antoine d'Abbadie situé à Haïti ou comme Tisserand, directeur de l'observatoire de Toulouse et chef de mission en Martinique (la maquette sur les photos ci-dessus est sans échelle). Une maquette similaire offrait l'observation du passage de Mercure dans l'objectif de montrer que vue de la Terre, la parallaxe est moindre car Mercure est de plus petite taille que Vénus et est plus proche du Soleil. Ainsi, le passage de Mercure est peu exploitable contrairement au passage de Vénus,

1 https://www.maisons-pour-la-science.org/node/1489512
2 http://earchives.le64.fr/archives-en-ligne/ead.html?id=FRAD064_IR0590&c=FRAD064_IR0590_de-150&qid=eas1656166660616
3 http://www.babordnum.fr/items/show/1443

raison pour laquelle ce dernier a entraîné des expéditions internationales de grande envergure du XVIIIe au XIXe.
Parmi la correspondance d'Antoine d'Abbadie située aux archives de Bayonne, on trouve un document écrit par Tisserand, relatif au calcul de la distance Terre-Soleil à partir du passage de Vénus. En revanche, on ne sait pas s'il est issu du phénomène de 1874 ou de 1882.


En admettant la parallaxe 8",86, prenant avec M. Faye, le rayon terrestre équatorial = 6 378 393 m.,
on trouve :
Plus petite distance du ☉ à la terre 8",71 = 36 500 400
Plus grande 9",01 " .... = 37 123 000
Moyenne " 8.86 " ... = 37 745 600
ces trois distances sont exprimées en lieues de quatre Kilomètres.
F. Tisserand

Archives de Bayonne. Photo prise par Frédéric Pitout.

Les articles de Francis Berthomieu et de Pierre Causeret dans les CC n° 105, 107 et 148 ont permis d'adapter deux ateliers en parallèle : l'un portait sur le calcul de la distance Terre-Soleil à partir d'un passage de Vénus et l'autre d'obtenir les conditions de ce phénomène. Des schémas ont été adaptés afin de réaliser une maquette très appréciée ; celle-ci illustre les phases de Vénus vues de la Terre en 1882.



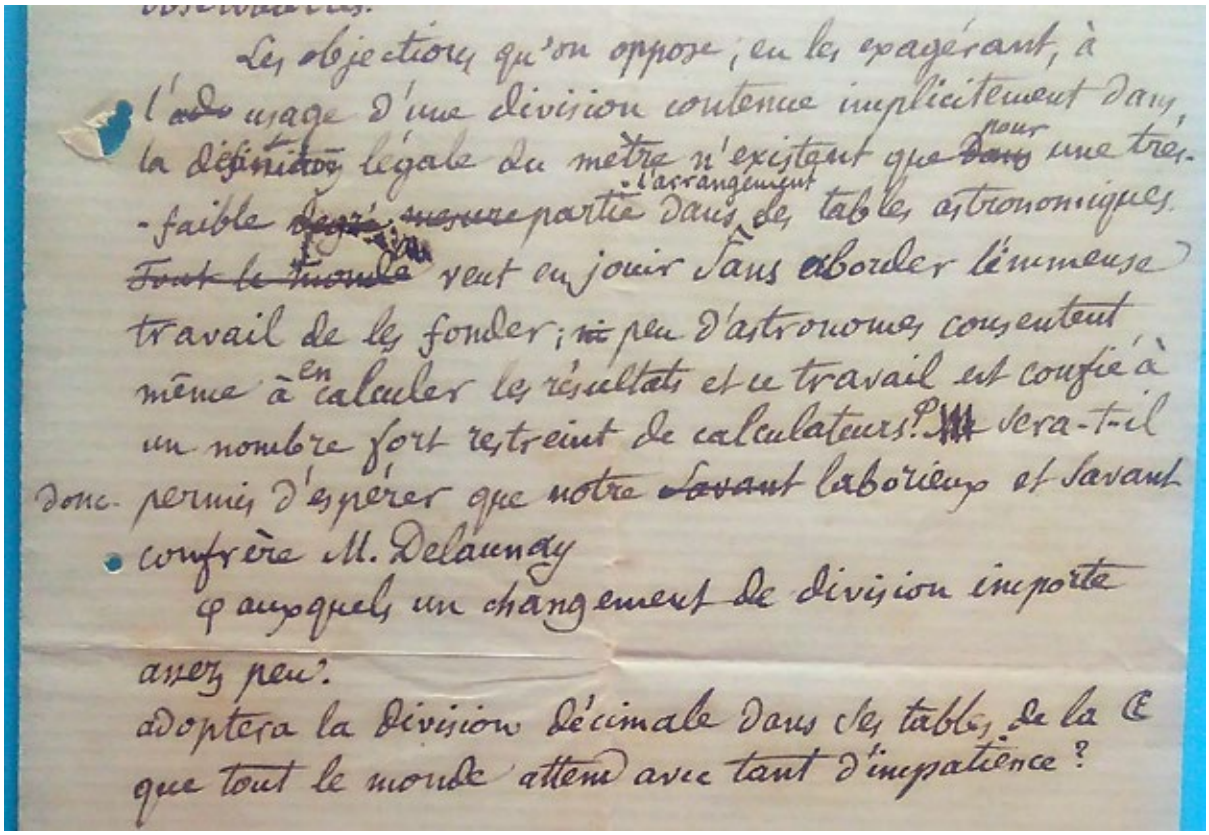
Maquette du Clea illustrant les phases de Vénus vues de la Terre.
Photo prise par Célia Mira.

En fin de formation, l'une des stagiaires a exprimé qu'elle avait été émerveillée du fait que l'on puisse trouver la distance de la Terre au Soleil à partir d'un écart mesurant seulement quelques millimètres entre deux photos du positionnement de Vénus sur le Soleil.



Horloge décimale de l'Observatoire Abbadia.
Photo prise par Roseline Primout.

Cette formation a été l'occasion de renforcer les liens du Clea avec la Société d'astronomie populaire du Pays basque (SAPCB) en leur faisant appel pour donner une conférence. Celle-ci portait sur l'astrométrie avec comme point de départ le rôle de la lunette méridienne de l'observatoire utilisée jusqu'en 1975 (année de fermeture de l'observatoire) puis ouvrait vers l'ère spatiale avec les satellites d'astrométrie (Hipparcos, Gaïa) qui prennent la relève pour effectuer les mesures de positions des étoiles avec une plus grande précision.


Les objections qu'on oppose, en les exagérant, à l'adoption d'une division contenue implicitement dans la définition légale du mètre n'existant que pour une très-faible partie dans l'arrangement des tables astronomiques. Tout le monde veut en jouir sans aborder l'immense travail de les fonder; peu d'astronomes consentent même à en calculer les résultats et le travail est confié à un nombre fort restreint de calculateurs? Sera-t-il donc permis d'espérer que notre savant laborieux et savant confrère M. Delaunay
à quoi un changement de division importe assez peu?
adoptera la division décimale dans les tables de la C
que tout le monde attend avec tant d'impatience?

Archives de Bayonne. Photo prise par Roseline Primout.

Antoine d'Abbadie étant un défenseur de la division décimale des angles et du temps, sa lunette est très particulière car il l'avait fait graduer en grade et il possédait une horloge décimale[4]. Dans un extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* datant de 1870, Antoine d'Abbadie s'exprime à ce sujet[5], ainsi que dans l'extrait de lettre destiné à l'Empereur, Napoléon III, datant aussi de 1870.

L'étude de l'évolution du système des unités fut un autre thème étudié par les stagiaires au travers de deux conférences.

Cette formation, montée en partenariat avec la MPSA, a permis de valoriser les savoir-faire du Clea. Lors du passage de Vénus en 2004, qui aurait pensé que les travaux réalisés avec les élèves pourraient resservir quelques années plus tard pour expliciter un précédent passage et permettre d'enseigner l'histoire des sciences ? Des ateliers réalisés lors des écoles d'été ont pu être réexploités. Le Clea propose des ressources pour mener des formations auprès des enseignants en toute tranquillité car les propositions faites ont été testées. De plus, cela donne aux enseignants des idées de projets à mener avec leurs élèves. Cette formation sera reconduite l'an prochain au Château-Observatoire peut-être deux fois, l'une sous le même format et l'autre adaptée aux professeurs des écoles si une formation Graine de sciences est montée.

■

4 https://abbadia.imcce.fr/fr/deci-fr.html
5 http://www.babordnum.fr/items/show/1108

COMPTE-RENDU DE L'ÉCOLE D'ÉTÉ DU CLEA 2022

François Thuard et **Christophe Boussin**





Cette année encore, le CLEA a proposé une école d'été d'astronomie à une quarantaine de participants venus de toute la France, et même de Suisse. Le thème principal choisi était très évocateur : les exoplanètes ! Les stagiaires, habitués ou néophytes, ont été encadrés par les organisateurs et formateurs, venus nombreux, pour approfondir leurs connaissances sur le sujet et s'adonner à la contemplation du ciel pur et préservé du col Bayard.

Le programme, dense et varié, a été l'occasion pour les stagiaires de confronter leurs points de vue lors de formations portant notamment sur les méthodes de détection d'exoplanètes, de revoir les principes physiques fondateurs, de participer à des campagnes de mesures à l'œil nu ou avec des instruments (estimation de la magnitude de l'étoile delta Céphée et suivi photométrique du transit de l'exoplanète TrES-5b).

Entre conférences du matin délivrées par des spécialistes amateurs ou des astronomes professionnels, les ateliers de l'après-midi animés par des amateurs passionnés, et les séances d'observation le soir (aidées par une météo quasi-optimale), le rythme a été intense pour les petits nouveaux.

Spectres, décalage de raies, vitesse radiale, fentes de Young, référentiels,







relativité, transits d'exoplanètes, tels furent quelques mots techniques parmi tant d'autres qui ont fait chauffer les cerveaux.

Mais ce n'est pas tout ce qui les attendait. Le summum de cette semaine scientifique a été concrétisé par la visite de l'Observatoire de Haute-Provence, haut lieu de l'astrophysique marqué par la découverte de la première exoplanète orbitant autour d'une étoile de type solaire et récompensée par le prix Nobel de physique 2019.

Chacun aura eu l'occasion de prêter une oreille attentive aux histoires humaines - contées avec passion par Auguste le Van Suu, le directeur de l'Observatoire - aux défis techniques relevés et de voir de leurs yeux les systèmes ingénieux – comme le spectrographe Elodie - mis au point par une petite communauté scientifique. Sans nul doute astronomie rime avec gastronomie car ce programme a été sublimé par la qualité d'une restauration qui en aura agréablement surpris plus d'un. Alors, c'est sûr, la fatigue a fait aussi partie du parcours, « passage initiatique » oblige. Mais devant un ciel et une Voie lactée qui se sont offerts à tous, pour ces félés d'astro comment ne pas succomber ? « Vous reprendrez bien un peu de Céphée ? ». Terminons cette semaine sur une question d'actualité : « les exoplanètes les plus proches : une opportunité pour rechercher la vie extraterrestre ? », conférence de Xavier Delfosse astronome à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble.

.■





Solutions des mots croisés page 27

Horizontalement

1. Satellite (Galilée les a découvert autour de Jupiter mais les nommait étoiles errantes, c'est Kepler qui les nomme satellites en 1611, du latin satelles signifiant « gardien » ou « compagnon »), **2.** Ex. Tricot. **3.** Revu. Aire (c'est la 2e loi de Kepler). **4.** Odes. Tr (tour). **5.** Ellipse. **6.** Nova (Kepler présente ses deux premières lois dans *Astronomia Nova*). Eure. **7.** Tians. **8.** As. Tables (Kepler a publié les *Tables rudolphines* en 1627). **9.** Nuit. **10.** Ragot (sa mère a été accusée de sorcellerie). Don. **11.** Évènement.

Verticalement

1. Serpentaire (Kepler a d'ailleurs écrit *De Stella nova in pede serpentarii*). **2.** Axe. Lois. AV. **3.** Volva. Âge. **4.** Étudiant. On. **5.** LR (Lawrencium). EP (Eugène Parker, décédé en mars dernier). Santé. **6.** Liasse. Bu. **7.** Ici. Euclide. **8.** Tort. Eton. **9.** Éternels. nt (1 nanotonne = 1 milligramme).