

Les Cahiers Clairaut

Été 2021

Editorial

L'équipe de rédaction des Cahiers Clairaut a le plaisir de vous présenter le cinquantième numéro réalisé sous sa responsabilité. C'est en effet au printemps 2009 avec le numéro 125 que l'équipe a pris en charge la revue du CLEA. Comme nous vous l'annoncions dans l'éditorial de 2009, chaque nouveau numéro contenait une partie thématique d'une vingtaine de pages dont l'objectif sera de revisiter les aspects fondamentaux de l'astronomie en proposant de nombreuses activités réalisables avec des élèves ou entre les membres des clubs d'astronomie. Ces parties thématiques viendront enrichir les archives du CLEA à côté de la petite encyclopédie astronomique LUNAP consultable sur le site. Par ailleurs vous aurez sans doute remarqué que, depuis six numéros, la revue est passée de 40 à 48 pages.

Ce numéro débute avec un article consacré à Buffon. Ce grand scientifique avait réalisé une série d'expériences pour essayer d'évaluer l'âge de la Terre et du Système solaire. Certes la méthode ne permettait pas d'aboutir à un résultat correct mais c'était la première visant à déduire d'un raisonnement scientifique l'âge de la Terre.

Le thème de ce numéro porte sur les satellites naturels de notre Système solaire. Deux articles de fond étudient pour l'un la promesse d'habitabilité des lunes glacées du Système solaire, pour l'autre la future mission Dragonfly sur Titan dont l'objectif est la recherche des origines de la vie.

D'autres articles proposent des activités à réaliser avec des élèves. Par exemple : vérifier une loi, calculer la masse d'une planète, réaliser une maquette, retrouver la vitesse de la lumière selon la méthode de Römer en utilisant les données de l'IMCCE. Un autre article fort instructif propose des activités sur la vision du ciel qu'aurait un « petit Martien ». Signalons un article particulièrement original intitulé : La mission Hayabusa 2 ou はやぶさ2. Cet article interdisciplinaire japonais et physique – chimie permet aux élèves d'entrer dans la culture japonaise tout en intégrant des données scientifiques récentes.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Histoire

Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon : des forges à l'astrophysique de laboratoire

Émeric Falize, Lionel Markus, Loraine Gallet, Charlotte Teyssier, Emmanuel Vernhet p 2

Avec nos élèves

La mission はやぶさ2 (Hayabusa 2) (2e partie)

Alain Ortais, Thomas Appéré p 7

Thème : les satellites naturels

Avec nos élèves

Huit activités sur les satellites naturels

Pierre Causeret p 12

Article de fond

La promesse d'habitabilité des lunes glacées du Système solaire

Ines Belgacem p 17

Article de fond

Titan et la mission Dragonfly, à la recherche des origines de la vie

Floriane Michel p 23

Avec nos élèves

Les lunes d'un petit Martien

Chantal Lecoutre et Sylvie Thiault p 26

Les satellites dans les Cahiers Clairaut

p 31

Mots croisés p 31

Observation

Le ciel de l'été 2021

Jupiter et Saturne au cours de l'été 2021 p 32

Pierre Causeret

Observation

Analyse d'images lunaires : le Mur droit

Pierre Le Fur p 34

Le coin des petits curieux

Les marées

Jean Ripert p 39

Matériel

Calculer la distance focale d'un système optique

Dominique Boust p 42

Lecture pour la marquise

Météorologie de l'espace

Jean Lilenstein, Frédéric Pitout, Marina Gruet, Joao Pedro Cadhile Marques (deboeck) p 47

École d'été d'astronomie 2021

p.48

Solutions des mots croisés

p 48

Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon : des forges à l'astrophysique de laboratoire

Émeric Falize¹, Lionel Markus², Loraine Gallet², Charlotte Teyssier², Emmanuelle Vernhet²

¹CEA-DAM-DIF, F-91297, Arpajon, FRANCE

²Musée Buffon, Place Jacques Garcia – 21500 MONTBARD

Le village de Buffon abrite un lieu fascinant dont les pierres renferment l'histoire d'une révolution scientifique. Ce lieu, la Grande Forge, a été érigé au milieu du XVIII^e siècle par Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon (1707-1788). Le « Pline de Montbard », tel qu'il était surnommé, est surtout connu pour avoir composé une œuvre encyclopédique, « l'Histoire naturelle générale et particulière ». Par sa plume précise et rigoureuse, Buffon décrit tout ce qui compose la Nature et qui s'offre aux regards contemplatifs. Pendant que Buffon écrit son Histoire de la Nature, il se laisse distraire, pendant plusieurs centaines de pages, par le chant d'Uranie. Ceci l'amène, malgré lui, à s'intéresser à l'astronomie et à réaliser des expériences mystérieuses dans des forges. C'est dans le refroidissement de boulets de différentes compositions chimiques qu'il détermine le passé, le présent et le futur du Système solaire. Ce travail est un trait d'union entre son texte « De la formation des planètes » de 1749 et son très fameux « Des époques de la Nature » de 1778. Les séries d'expériences des boulets constituent une véritable révolution scientifique. En effet, pour les concevoir, Buffon a utilisé, pour la première fois, tous les concepts qui fondent notre astrophysique expérimentale moderne.

Introduction

Buffon (voir figure 1) a marqué l'histoire des sciences grâce à la rédaction de son œuvre monumentale *l'Histoire naturelle générale et particulière* dont l'écriture l'aura occupé une quarantaine d'années de sa vie. Lorsqu'il se lance dans cette entreprise, l'âge de la Terre est estimé à environ 6 000 ans.



Fig.1. Portrait de Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon par François-Hubert Drouais (1761), Musée Buffon.

Sur cette question, ce sont les travaux de l'archevêque James Usher réalisés en 1656 sur les écritures saintes qui font autorité. Buffon comprend très vite que l'intégralité de l'Histoire de la Nature ne peut pas rentrer dans une durée aussi courte. De plus, il considère que toutes les approches physico-théologiques pour déterminer l'âge de la Terre ou expliquer certains épisodes bibliques, relèvent plus de la fable que du récit scientifique.

Ceci l'amène dès l'ouverture de son texte *De la formation des planètes* de 1749, à traiter quelques

questions d'astronomie afin de définir dans quel décor et sur quelle durée vont progresser les différents acteurs de la nature. Même s'il ne souhaite introduire que des propos généraux, son raisonnement l'amènera à bâtir un nouveau modèle de formation du Système solaire. Le fondement de ce dernier est fortement influencé par les travaux de Newton sur les comètes. Le savant anglais s'est beaucoup intéressé à la physique de la comète de 1680. Il faut dire que celle-ci avait fait couler beaucoup d'encre, tant sur le folklore¹ que pouvait encore provoquer le passage d'une comète au XVII^e siècle, que sur la physique de ces visiteuses occasionnelles. Dans cette période, on s'interroge beaucoup sur la capacité des comètes à emmagasiner la chaleur ardente du Soleil lors de leur passage à leur périhélie. Buffon connaît parfaitement les conclusions de Newton sur ces questions. Elles le guideront dans la justification de ses expériences qui ont pour objectif de déterminer l'âge de la Terre.

Dans la première partie de cet article, nous décrirons le modèle de formation du Système solaire de Buffon.

¹ Dans le palais de Maximis à Rome, la Reine de Suède vit un prodige le 4 décembre 1680. En effet, elle rapporte qu'en ce jour d'hiver 1680, une poule pondit un œuf marqué par la figure de la comète. Ces observations sont envoyées aux curieux de Paris sous la forme d'une note accompagnée d'une représentation de l'œuf en question. Dans un genre différent, W. Whiston pense que la comète de 1680 est responsable du Déluge. En utilisant la périodicité de cet objet, il date cet événement biblique du 28 novembre 2349 avant J. C.

Nous montrerons alors comment celui-ci l'a guidé dans l'élaboration d'une expérience pour déterminer l'âge de la Terre ainsi que l'âge du Système solaire. Nous décrirons, dans la seconde partie, la première série d'expériences réalisée sur les boulets de fer. Puis, dans la troisième partie, nous détaillerons la deuxième série d'expériences qui lui permettra de préciser ses résultats. Dans la dernière partie, nous montrerons la modernité du raisonnement de Buffon et comment il a posé toutes les bases de l'astrophysique de laboratoire. En réalisant la première expérience d'astrophysique de laboratoire de l'histoire des sciences Buffon a fait de sa Grande Forge le premier laboratoire de planétologie expérimental.

Le système du monde de Buffon : l'origine du Système solaire

En ce milieu du XVIII^e siècle, l'astronomie cherche à répondre à plusieurs questions concernant le Système solaire : l'origine de l'impulsion primitive des six planètes connues² et la raison qui explique que toutes les planètes tournent dans le même sens et dans un même plan (à 7,5° près). Sur ces deux derniers points, Buffon se convainc, à la suite d'un calcul de probabilité, que ces propriétés dynamiques ne peuvent pas être le fruit du hasard et qu'elles doivent avoir une origine commune. Il propose alors un modèle cosmogonique unificateur. Dans celui-ci les planètes du Système solaire résulteraient de l'impact d'une comète avec le Soleil. La violence de la collision aurait mené au détachement de 1/650^e de la masse du Soleil. Les planètes prendraient naissance de ce torrent solaire par gravitation. La chaleur intérieure des planètes devient un résidu de la chaleur originelle du Soleil. Si on sait, aujourd'hui, que ce modèle ne décrit pas la formation des systèmes planétaires, notons qu'il inspirait encore certains astronomes au début du XX^e siècle. En effet, le *Tidal model*, proposé par J. H. Jeans en 1920 s'inspirait fortement du scénario de Buffon. À la place de la collision de la comète, J. H. Jeans propose que ce soit un effet de marée provoqué par le passage d'une étoile à proximité du Soleil qui arrache de la matière à ce dernier. Pour justifier la collision, Buffon utilise des travaux de Newton sur l'origine de la perte d'impulsion des comètes au passage de leur périhélie.

Afin de s'éviter la censure et les foudres de la Sorbonne, Buffon ouvre son texte *De la formation des planètes* par une gravure allégorique (voir la



Fig.2. Allégorie de la formation des planètes ouvrant le chapitre de la formation des planètes de l'Histoire naturelle de Buffon, tome I, 1749.

figure 2) sur laquelle on retrouve tous les éléments de son modèle scientifique (comète, collision, mouvement et formation des planètes) auxquels se superposent une lecture plus religieuse.

Le modèle de Buffon est immortalisé dans *l'ode à M. de Buffon* écrit par Ponce-Denis Ecouchard Le Brun en 1779 dans laquelle on peut lire :

O Génie ! [...] Ton œil vit s'élancer la Comète brûlante Qui de la Sphère ardente A détaché ce Globe autrefois radieux.

Buffon comprend que s'il est capable de déterminer le temps qu'a mis la Terre pour passer de la température du Soleil à sa température actuelle alors il accèdera à son âge. Si Newton a réalisé des travaux théoriques sur le refroidissement de sphères de fer de la taille de la Terre et des comètes, Buffon souhaite étudier expérimentalement ce problème. Pour cela il doit accéder à des systèmes qui permettent de soumettre la matière à des températures extrêmes. L'installation technologique qui permet une telle prouesse existe. C'est le début de l'aventure des forges pour Buffon.

² Rappelons qu'Uranus sera découverte en 1781. Par conséquent, lorsque Buffon écrit son texte, le Système solaire s'arrête à Saturne et à ses cinq satellites.

L'aventure de la Grande Forge de Buffon et les expériences sur les boulets de fer

C'est dans une lettre datée du 8 octobre 1767 adressée à Guéneau de Montbeillard que Buffon fait mention de « forges » pour la première fois. En tant que structures stratégiques pour l'État, la construction d'une forge nécessite l'autorisation du Roi. C'est chose faite pour Buffon au début de 1768. Il compte bien rendre rentable sa Grande Forge (figure 3), mais aussi l'utiliser comme un laboratoire qui nourrira ses travaux sur les minéraux.



Fig.3. La grande Forge de Buffon.

Buffon travaille alors à son expérience visant à mimer le refroidissement de la Terre et qui permettra de déterminer l'âge de celle-ci. Si de nombreuses expériences ont été réalisées dans la Grande Forge, il est difficile de savoir où a eu lieu la toute première d'entre elles. Un faisceau d'indices (quelques lettres, des correspondances, la date de l'édition du tome de l'*Histoire naturelle* contenant les résultats d'expériences) nous poussent à penser que la première expérience a eu lieu en 1767, un an avant que le Roi ne permette à Buffon de construire sa propre forge. Plusieurs pistes peuvent être envisagées : la forge d'Aisy-sur-Armençon à quelques kilomètres du village de Buffon, une autre à Montbard en place du Petit Fontenet, en face de son hôtel particulier... Nous poursuivons nos recherches.

Buffon nous livre un descriptif très précis du protocole expérimental qu'il a élaboré. Il a fait fabriquer une série de dix boulets de fer forgé et battu de différentes tailles allant de $\frac{1}{2}$ pouces (1,35 cm) à 5 pouces (13,5 cm). Les masses de ces boulets varient entre 190 grains (10 g) pour le plus petit et 190 211 grains (10 kg) pour le plus grand. Ces boulets sont plongés dans le feu ardent d'un haut-fourneau pendant un temps dûment rapporté.

Une fois sortis du haut-fourneau, il laisse refroidir les boulets et deux durées sont relevées : celle à partir de laquelle le boulet chaud est supportable

pendant une demi-seconde sans se brûler et celle à partir de laquelle le boulet refroidi est à la température d'un boulet de référence maintenu à la température des caves de l'Observatoire de Paris, c'est-à-dire à dix degrés de Réaumur au-dessus de la congélation (environ 12,5 °C). L'impossibilité d'utiliser un thermomètre pour mesurer les degrés de refroidissement des boulets mène Buffon à utiliser un outil de mesure thermométrique très personnel, ses propres mains³.

Les deux durées sont méticuleusement rapportées dans le premier tome des *Suppléments*. La première durée lui permettra de déterminer l'époque à partir de laquelle la vie peut exister, la seconde lui donnera directement accès à l'âge de la Terre. Sur la figure 4, nous avons reporté graphiquement les résultats publiés par Buffon.

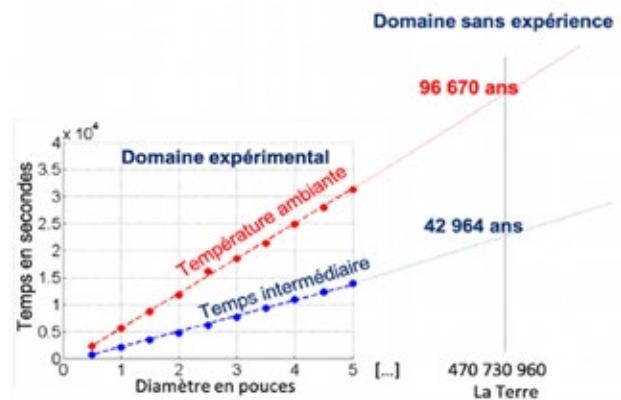


Fig.4. Les résultats de Buffon.

La courbe bleue correspond à la première durée et la courbe rouge à celle de la seconde durée. À cette première expérience il en adjoindra une seconde qui a pour but de déterminer le temps de solidification du fer liquide. Celle-ci consiste en l'étude de la solidification d'une barre de fer initialement liquide.

Dans son esprit, à l'origine, la Terre est sous forme liquide. Elle doit donc se solidifier lors de son refroidissement avant d'atteindre sa température actuelle. La première expérience ne lui permettait que d'accéder au temps de refroidissement de la Terre une fois solidifiée. Ainsi à la durée de refroidissement des boulets, il doit ajouter la durée de solidification (voir figure 5).

³ La légende veut que Buffon n'ait pas réalisé seul les expériences. Dans Vie privée du comte de Buffon publié en 1788, le Chevalier d'Aude écrira que pour deviner l'époque de la formation des planètes et calculer le refroidissement du globe terrestre, il employait le ministère de quatre ou cinq jolies femmes à la peau douce.

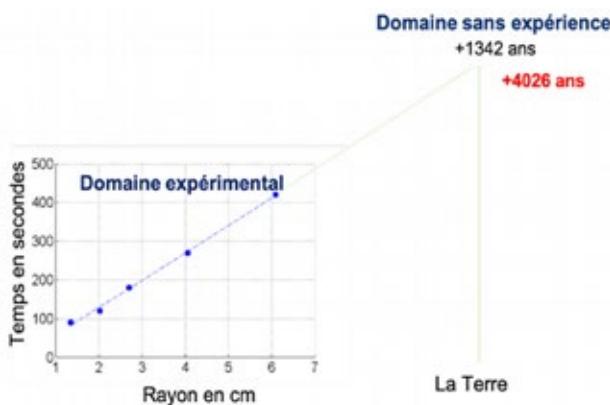


Fig.5. Temps de solidification d'une gueuse de fer et extrapolation au rayon de la Terre. La figure de droite représente les deux durées de refroidissement mesurées par Buffon et leur extrapolation aux dimensions de la Terre.

On peut noter que l'ensemble des mesures expérimentales montre des relations linéaires entre temps et dimension de l'objet étudié. L'extrapolation aux dimensions de la Terre donne les résultats suivants : un temps de solidification de 4026 ans pour que le cœur de la Terre passe de l'état liquide au solide, 46 990 ans ($42\ 964 + 4\ 026$) pour que la surface de la Terre puisse être supportable une demi-seconde, et 100 696 ans ($96\ 670 + 4\ 026$) pour qu'elle atteigne sa température actuelle.

Ainsi si la Terre n'était constituée que de fer, elle aurait un âge de 100 696 années. Buffon sait que sa maquette de fer n'est pas tout à fait représentative de la composition réelle de la Terre. C'est à cet instant qu'il imagine une deuxième série d'expériences.

Les expériences sur les boulets de différentes natures

Pour créer une Terre miniature plus représentative, Buffon réalise une seconde série d'expériences. Celle-ci est rarement citée dans les écrits sur les expériences de Buffon. Pourtant elle est tout aussi importante que celle sur les boulets de fer. Cette deuxième série consiste en l'étude du refroidissement de boulets de composition chimique différente, tous d'un pouce de diamètre. Ces travaux l'occuperont pendant six années au cours desquelles il réalisera 67 expériences toutes répétées trois fois. Pour chacune d'elles, il relèvera de nouveau les deux durées présentées dans la précédente partie. Plusieurs dizaines de pages de calculs lui permettront de publier le tableau de synthèse présenté sur la figure 6

⁴ La valeur de cette durée a fait l'objet de nombreuses estimations de la part de Buffon. Si les résultats expérimentaux lui donnent 1342 ans comme on peut le voir sur la figure 5, il aboutira à une durée de 4026 ans en prenant en compte différentes perturbations extérieures (rotation de la Terre ...).

qui consiste en un tableau de proportionnalité dans lequel les deux durées mesurées pour chaque matériau sont rapportées à celui du fer, qui est renormalisé à 10 000 en unité (de temps) arbitraire.

F E R.	
	Temps réellement mesuré. en millénaires.
Émeril.....	10000 à 9117 — 9020.
Cuivre.....	10000 à 8512 — 8702.
Or.....	10000 à 8160 — 8148.
Zinc.....	10000 à 7654 — 6020.
Argent.....	10000 à 7619 — 7423.
Marbre blanc.....	10000 à 6774 — 6704.
Marbre commun.....	10000 à 6636 — 6746.
Pierre calcaire dure.....	10000 à 6617 — 6274.
Grès.....	10000 à 5796 — 6926.
Verre.....	10000 à 5576 — 5805.
Plomb.....	10000 à 5143 — 6482.
Étain.....	10000 à 4898 — 4921.
Pierre calcaire tendre.....	10000 à 4194 — 4659.
Glaïe.....	10000 à 4198 — 4490.
Bismuth.....	10000 à 3580 — 4081.
Craie.....	10000 à 3086 — 3878.
Gypse.....	10000 à 2325 — 2617.
Bois.....	10000 à 1860 — 1549.
Pierre ponce.....	10000 à 1627 — 1268.

Fig.6. Tableau de synthèse des résultats.

Pour construire sa Terre miniature, Buffon ne gardera que sept éléments qu'il considère majoritaires sur Terre : l'émeril, le marbre blanc, le marbre commun, la pierre calcaire dure, le grès, le verre et le fer. Pour passer d'une Terre constituée de fer à sa Terre réelle (composée des sept éléments), il corrigera les durées obtenues de la première série d'expériences par un coefficient multiplicatif résultant de la somme arithmétique des durées renormalisées obtenues pour les sept éléments conservés. Ainsi, il conclura que le globe terrestre s'est consolidé en 2 905 ans, qu'il s'est refroidi au point de pouvoir le toucher en 33 911 ans (au lieu des 46 990 années dans le cas d'une Terre de fer) et à la température actuelle en 74 047 ans (au lieu de 100 696 ans). Il corrigera ces durées de la chaleur apportée par Le Soleil (+ 770 ans) et de celle de la Lune (+15 ans). Ce qui l'amène à publier un âge de la Terre et du Système solaire de 74 817 ans. Malgré un âge supérieur à celui de la Bible, celui-ci ne lui paraît pas suffisamment élevé pour expliquer toutes les évolutions géologiques qu'il a observées dans la Nature. Il conclura alors : « Quoiqu'il soit très vrai que plus nous étendrons le temps et plus nous nous rapprocherons de la vérité et de la réalité de l'emploi qu'en fait la Nature, néanmoins il faut le raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. » La voie de la détermination expérimentale de l'âge de la Terre est lancée. Dans la version manuscrite de la deuxième Époque de la nature, on peut relever l'hésitation de

Buffon quant à la pertinence des résultats obtenus. En effet, sous les ratures du document, on peut lire des millions d'années à la place des milliers d'années publiées. Entre l'intuition qu'il pouvait avoir et le résultat de l'expérience de physique, en homme des Lumières, il préférera le résultat de l'expérience à celui de l'intuition. Ce sont les milliers d'années de l'expérience qui composeront la version imprimée des Époques de la nature.

Buffon et les fondements de l'astrophysique de laboratoire

Même si nous savons aujourd'hui que le modèle de formation du Système solaire de Buffon n'est pas correct, que la taille des boulets ne lui permettait pas d'obtenir les bonnes lois d'extrapolation pour la Terre, que le mécanisme de refroidissement des planètes n'est pas le bon ou encore que ses terres miniatures chauffées dans les forges n'étaient pas représentatives des planètes, on peut tout de même être admiratif face à l'audace et à l'extraordinaire modernité du raisonnement du savant des Lumières. En effet, l'ensemble du cheminement intellectuel que nous utilisons aujourd'hui pour concevoir nos expériences d'astrophysique de laboratoire est le même que celui du Seigneur de Montbard. Rappelons que l'astrophysique de laboratoire est née en tant que discipline autonome à la fin du XX^e siècle avec le développement des nouvelles installations technoscientifiques telles que les lasers de puissance (figure 7).

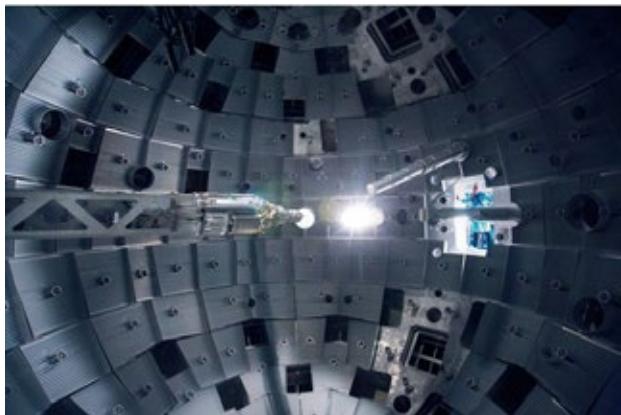


Fig.7. Chambre d'expériences du laser mégajoule.

Autour de ces installations s'est développé tout un ensemble de projets *astro-inspirés* ou d'*astromimétisme* dans lesquels on cherche respectivement à s'inspirer des phénomènes astrophysiques à des fins technologiques ou à en reproduire des miniatures pour mieux les comprendre. Une fois les lois d'échelle élaborées et

les cibles fabriquées, nous les soumettons non pas à la chaleur des forges mais aux hautes densités d'énergie extrêmes générées au cœur des installations de puissance. C'est ainsi qu'aujourd'hui, nous étudions l'intérieur des planètes géantes pour en comprendre la structure ou encore que nous reproduisons les conditions thermodynamiques qui règnent au cœur des étoiles. Sans le savoir et uniquement par un raisonnement logique, Buffon a posé toutes les briques élémentaires qui permettent de construire une astrophysique expérimentale. Même si l'expérience de Buffon nous paraît, aujourd'hui, naïve, elle nous apprend que pour qu'une expérience réponde à une véritable problématique astrophysique et qu'elle ne soit pas une *illusion lilliputienne*, il faut maîtriser parfaitement la physique de base du phénomène que l'on cherche à reproduire. C'est dans ce sens que l'astrophysicien est bachelardien (G. Bachelard, *la Poétique de l'espace*) puisqu' « il possédera d'autant mieux le monde qu'il sera habile à le miniaturiser. »

Conclusion

L'histoire de l'âge de la Terre est aujourd'hui au programme des lycées. Il y est enseigné que l'expérience de Buffon est marquante dans l'histoire des sciences car il s'agit de la première visant à déduire d'un raisonnement scientifique l'âge de la Terre. Buffon a ouvert la longue histoire qui a permis de déterminer l'âge moderne de la Terre que l'on estime aujourd'hui à un peu plus de 4,5 milliards d'années.

À travers cet article nous avons souhaité montrer que les conséquences épistémologiques de cette expérience dépassent celles associées à l'histoire de l'âge de la Terre. En effet à travers l'élaboration de son expérience, Buffon a été le premier savant à poser le raisonnement rigoureux qui permet de faire de l'astrophysique de laboratoire. Cette découverte a motivé les auteurs de cet article à tenter de reproduire en 2022 les expériences de Buffon dans le cadre du projet BUFFON2022 au Musée et Parc Buffon (<http://www.musee-parc-buffon.fr>), avec le soutien de la ville de Montbard.

En attendant les résultats de cette expérience, lorsque vous pousserez les grilles de la Grande Forge de Buffon, n'oubliez pas que vous entrez dans le premier laboratoire d'astrophysique expérimentale de toute l'Histoire des sciences.

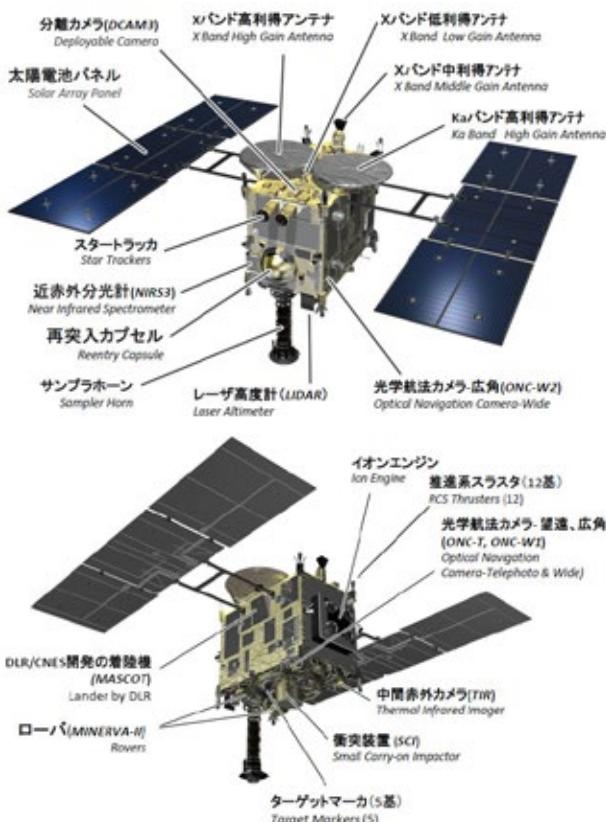
La mission はやぶさ2 (Hayabusa 2)

Bilan du projet interdisciplinaire japonais et physique-chimie

Alain Ortais, enseignant de japonais et **Thomas Appéré**, enseignant de physique-chimie et d'informatico et docteur en planétologie, lycée St Paul à Vannes.

Suite de l'article paru dans le CC 172.

Lancée en décembre 2014, la mission spatiale japonaise Hayabusa 2 (はやぶさ2, littéralement «Faucon pèlerin») a rejoint l'astéroïde Ryugu (リュウグウ ou 龍宮) en juin 2018. C'est un astéroïde carboné d'environ 875 mètres de diamètre composé de matière primitive datant de la formation du Système solaire. Lors de son séjour, la sonde spatiale a déposé plusieurs robots sur le sol dont l'atterrisseur franco-allemand MASCOT et prélevé à deux reprises des échantillons de sol. Ces échantillons ont été ramenés sur Terre le 15 décembre 2020.



Les éléments de la sonde Hayabusa 2 (crédit : JAXA).

Ce retour inédit d'échantillons d'un astéroïde est une superbe opportunité pour sensibiliser les élèves à

l'exploration spatiale et à la recherche scientifique. De plus, les élèves de notre lycée ont la chance de pouvoir suivre l'option japonais de la classe de seconde à la terminale. Nous avons donc mis en place cette année un projet interdisciplinaire japonais et physique-chimie sur le thème de la mission Hayabusa 2. Ce projet s'adresse aux 23 élèves de terminale (8 garçons et 15 filles) qui suivent l'option japonais parmi lesquels 4 (seulement) sont en spécialité physique-chimie.

Dans un précédent article des Cahiers Clairaut (voir CC 172), nous avons présenté les premières réalisations des élèves en cours de japonais ainsi que les trois exercices qu'ils ont traités en physique-chimie. Notons que l'ensemble des 7 classes de spécialité physique-chimie du lycée ont travaillé sur ces exercices ayant pour thème la mission Hayabusa 2. Pour les 4 élèves qui font également l'option japonais, le projet que nous avons mené leur offre une ouverture culturelle et linguistique complémentaire de l'aspect scientifique.

Cet article dresse le bilan de ce projet qui a suscité un fort enthousiasme chez les élèves. Nous retrançrivons tout d'abord une nouvelle de science-fiction écrite par les élèves en cours de japonais. Puis nous détaillons l'analyse d'un article de la presse japonaise publié lors du retour des échantillons d'astéroïde sur Terre. Nous étudions ensuite le vocabulaire scientifique en français et en japonais. Le projet s'est conclu par l'intervention en visioconférence de Aurélie Moussi, cheffe du projet MASCOT au CNES.

Quelques réalisations d'élèves (Alain Ortais)

Les élèves, par groupe de quatre à cinq, ont choisi chacun un thème d'expression écrite en lien avec la mission Hayabusa 2. Certains ont présenté l'agence spatiale japonaise, la JAXA, d'autres la mission

américaine OSIRIS-REx qui a elle aussi collecté des échantillons sur un astéroïde pour les ramener sur Terre. Un groupe a travaillé sur la reprise de la célèbre légende japonaise d'Urashima Tarô dans les récits contemporains de la culture populaire japonaise (mangas par exemple). Quatre élèves ont analysé la relation qu'entretiennent les Japonais avec la science, marquée par une remise en question de la science beaucoup moins prononcée que dans les pays occidentaux.

Enfin, cinq élèves ont écrit une nouvelle inspirée par la mission Hayabusa 2 puis l'ont traduite en japonais. Nous vous proposons de la découvrir.

« Cette histoire est tirée d'une histoire vraie. La navette spatiale Hayabusa 2 était arrivée sur l'astéroïde Ryugu le 25 août 2018 après 4 années d'expédition spatiale. Hippolyte avait peur. Il espérait faire des découvertes formidables.

Il descendit de sa capsule et partit explorer l'astéroïde en faisant un tour de celui-ci. Mais il ne trouva rien et rentra bredouille. Il prit quand-même des échantillons pour les analyser plus tard.

Stressé, Hippolyte ne put s'endormir avant son départ. Soudainement il vit de la lumière émanant de la fenêtre. Il remarqua le même phénomène dans ses échantillons. En les regardant au microscope, il vit alors qu'il s'agissait de petits dinosaures fluorescents qui dormaient. « Ai-je rêvé ? » se dit-il.

Cependant, c'est à ce moment qu'ils se réveillèrent et toute la lumière disparue. Toutes les lumières s'étaient éteintes sauf une. Il s'agissait du doyen des dinosaures. Ce dinosaure était malade.

« Bonjour géant, êtes-vous venu nous aider ? Je suis au bord de la mort. Si je meurs, l'astéroïde disparaîtra avec moi. Aidez-nous s'il vous plaît ! » s'exclama le doyen.

Hippolyte chercha dans son vaisseau de quoi fabriquer un médicament. Une heure plus tard, il revint voir la tribu des dinosaures pour leur donner le médicament. Il donna le fameux médicament et brusquement, l'échantillon vira au vert et des fleurs fleurirent. En regardant par la fenêtre, il vit que tout l'astéroïde était devenu vert.

Le vieux dinosaure le remercia de l'avoir sauvé et d'avoir sauvé la planète. Hippolyte décida donc de laisser les échantillons pour ne pas abîmer l'astéroïde et repartit sur Terre.

Il se vanta de sa découverte auprès de ses amis et fut content d'avoir aidé les dinosaures. Il fut tout de même un peu triste de ne plus pouvoir les revoir. »

この話はじじつからきました。

うちゅうせんは2018年8月25日、4年の旅行のあと、しょうわくせいにつきました。

イボリットはこわかったです。

しょうわくせいでかれはすごいはっけんをするとおもっていました。

イボリットはカプセルからおりました。

しょうわくせいの！しゅうしましたけどなにもみつけませんでした。

かえるまえにねました。

なにもみつけなかったけどサンブルをけんきゅうするにとりました。

ストレスでイボリットはねられました、そのことおもっていたときに、まだからすごいあかりが出了ました。

サンブルもひかっていました。かくだいきょうでみると小さいきょうりゅうがねていました。

でもきょうりゅうがおきたときにははかりがなくなりました。

「ゆめたかな？」とイボリットはおもいました、でも、また見るとまだいっぴきだけがまだひかっていました。

このきょうりゅうは1ばんとします。

このやつはすごくびょうきでした。

「今日は巨人、たすけにきましたか？」

私はしにかけです。

しんだらこのしょうわくせいもなくなります。

たすけてください！」

イボリットはうちゅうせんにかえってくすりをつくりはじめました。1時間ごイボリットはくすりときゅうりゅういちぞくここにいきました。1

きょうりゅうたちにそのくすりをあげました。

とつぜんサンブルから花がいっぱいきました。

まだからそとを見ると、しょうわくせいはかんせんにみどりになっていました。

そとにでたらきょうりゅうのとこに行ったら、リイダがおれいをしました。

イボリットはサンブルをしょうわくせいにもどしました。

イボリットははっけんのことをともだちにじまんしていました。

きょうりゅうたちをたすけてうれしかったです、でももう見れなくってちょっとさみしかったです。

La nouvelle traduite en japonais.

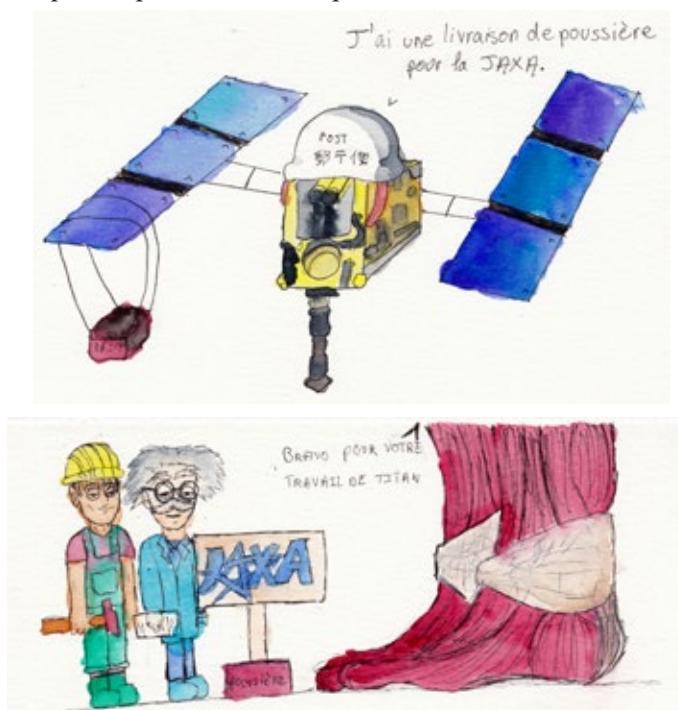
La difficulté a consisté à traduire ce texte avec le vocabulaire et les tournures de phrase adéquates. L'objet de l'exercice était de mettre les élèves en position de mobiliser les connaissances acquises depuis leur découverte des bases de la langue japonaise. Le choix du type de rédaction était libre et il ne s'agissait pas, à l'issue de ce travail, de s'en servir comme d'un support d'échange oral avec les autres élèves. De ce fait, il était entendu qu'ils pouvaient rechercher le lexique nécessaire sans limitation. Le thème même d'une mission spatiale ne pouvait que les transporter au-delà du registre de base auquel ils s'étaient familiarisés depuis la classe de seconde. L'acquisition de vocabulaire n'était pas le but recherché.

Mon objectif était de les voir utiliser un document mis à leur disposition en classe de première et qui présente, de manière synthétique, les différentes possibilités d'expression qu'autorise la langue japonaise, en adjoignant à différentes formes verbales une liste de suffixes et d'auxiliaires. Ceci est la caractéristique même de la langue agglutinante qu'est le japonais. Les structures présentées sont comme des squelettes dont la chair serait faite de

mots. Ma joie était de reconnaître ces «squelettes» dans la description de l'agence spatiale japonaise, la reprise d'œuvres populaires chez les lycéens ou encore dans le récit onirique présenté ici. En dépit de certaines erreurs que je n'ai pas corrigées, il est compréhensible pour un Japonais et conforme à la version française ci-jointe. Toutefois ce résultat tient plus au talent d'un élève déjà familiarisé avec le japonais qu'à mon talent d'enseignant.

La période actuelle n'est pas vraiment propice à un suivi rigoureux de ce genre de projet mais, dès que l'opportunité se présentera à nouveau, je serai heureux d'associer l'approche linguistique aux univers de découverte qu'offre la science.

La mission Hayabusa 2 a également inspiré un élève qui a exprimé son talent pour le dessin.



Analyse d'un article de presse (Alain Ortais)

Pour le public japonais, le choix du nom Ryūgū (dont les accents marquent les voyelles longues) pour l'astéroïde est très évocateur puisqu'il fait référence à une des légendes les plus populaires du pays. Comme le rappelle un article de presse du 27 octobre relayé par la JAXA, ce choix a été déterminé par de nombreuses analogies. Selon la légende, le héros Urashima Tarō, voyage au fond de la mer jusqu'à ce «Palais du dragon». Or c'est aussi un des aspects de la mission que de conforter l'hypothèse de l'origine extraterrestre de l'eau sur Terre. Avant de retourner dans son village de pêcheurs, Urashima Tarō se voit remettre un coffret nommé Tamatebako,

avec l'instruction de ne jamais l'ouvrir. Réalisant à son retour que plusieurs siècles se sont écoulés à la surface alors qu'il n'avait passé que quelques journées enchanteresses au Ryūgū, Urashima Tarō, ayant perdu les siens ouvre le coffret. Une fumée s'en échappe et le voilà transformé en vieillard.



Urashima ouvre le Tamatebako (Matsuki Heikichi, 1899).

Selon certaines versions du récit, du sable se déverse et des dunes recouvrent sa cabane. Tamatebako est le nom donné à la capsule d'échantillons. C'est à une équipe d'océanologues accoutumés aux prélèvements dans les fonds marins qu'est revenue la tâche de recueillir les gaz extraterrestres sans qu'ils s'échappent ! Et là où, dans la légende, Urashima était victime d'un tourbillon temporel, c'est l'occasion pour nous de plonger dans les abîmes de notre passé. L'astéroïde Ryūgū, de type carboné, est en effet composé de matière primitive datant de la formation du Système solaire. La mission Hayabusa 2 en a rapporté 5,4 g, bien plus que les 100 mg escomptés.



La capsule contenant les échantillons de Ryūgū. Le technicien est protégé en cas d'allumage intempestif d'un élément pyrotechnique destiné au déploiement du parachute.

Comparaison du vocabulaire scientifique en japonais et en français

Il est intéressant de remarquer que le système idéographique, que les Japonais ont emprunté à leurs voisins chinois, se prête très bien à la création de termes techniques. Il s'agit de juxtaposer des images simples qui, associées, produisent un sens nouveau. Des exemples de ce procédé sont donnés dans le tableau ci-dessous. Et là où le français utilise fréquemment les fonds latin et grec ancien, qui est parfois obscur pour les non-initiés, ce sont des notions de base, accessibles aux enfants, qui sont évoquées par les idéogrammes.

L'étude du vocabulaire scientifique en classe de physique-chimie et de japonais est ainsi très complémentaire. Analyser l'étymologie des mots français permet aux élèves de donner du sens au vocabulaire technique. Par exemple, le mot «télescope» vient du grec «tele» signifiant «loin» et «scope» qui veut dire «regarder, voir» : un télescope est utilisé pour voir loin. Croiser cette étude étymologique avec l'apport du vocabulaire japonais enrichit la compréhension du mot : en japonais, un télescope est un «miroir pour voir loin».

Une telle activité interdisciplinaire peut être menée de la classe de seconde à la terminale puisque la physique-chimie est maintenant enseignée à tous les niveaux du lycée via l'enseignement scientifique.

Mot français	Kanji et transcription	Traduction littérale
astronomie	天文学, temongaku	étude des motifs dans le ciel
chimie	化学, kagaku	étude des transformations
physique	物理学, butsurigaku	étude des principes des choses
télescope	望遠鏡, bōenkyō	miroir pour voir loin
satellite	衛星 Eisei	étoile qui fait le tour
carbone	炭素, tanso	élément charbon
oxygène	酸素, sanso	élément acide

Intervention de Aurélie Moussi

Pour conclure notre projet «Hayabusa 2», les élèves ont eu la chance d'écouter les explications d'Aurélie Moussi, cheffe du projet MASCOT au CNES. Son intervention s'est faite à distance en raison du contexte sanitaire. MASCOT est le nom du petit atterrisseur qui a étudié in-situ la surface de l'astéroïde Ryugu pendant 16 heures. Aurélie Moussi a présenté le

déroulement de la mission Hayabusa 2 et la façon dont son succès a été vécu au Japon. Les équipes de la mission, techniciens, ingénieurs et scientifiques, sont sources d'une grande fierté nationale.

Aurélie Moussi a ensuite décrit son rôle dans cette mission puis a répondu aux nombreuses questions des élèves. Celles-ci ont notamment porté sur les différences dans la façon de fonctionner entre l'équipe européenne et l'équipe japonaise. Mme Moussi a cité l'importance de respecter l'ordre hiérarchique lors des échanges avec les Japonais. Elle a aussi expliqué que la barrière de la langue demeure très présente entre les deux pays. Le recours à l'anglais reste parfois difficile pour communiquer.



Aurélie Moussi répond aux questions des élèves.

Des totebags à l'effigie de la sonde Hayabusa 2 et de MASCOT, offerts par le CNES, ont récompensés les élèves pour leur forte implication dans ce projet.

Conclusion

Les élèves ont beaucoup apprécié ce projet interdisciplinaire, en attestent l'un des témoignages recueillis : « J'ai appris beaucoup de choses sur la mission Hayabusa 2 que je n'aurais pas connu autrement. Cela m'a passionné bien que je ne sois pas scientifique. » Pour nous enseignants, ce fut aussi un partage de connaissances très enrichissant et stimulant. Nous renouvelerons certainement l'expérience lors de la mission spatiale japonaise Martian Moons Exploration (MMX), dont l'objectif est de ramener sur Terre un échantillon du sol de Phobos, l'un des deux satellites naturels de Mars. La sonde embarquera un petit rover fourni par les agences spatiales française et allemande. Le lancement est prévu pour 2024.

THÈME : LES SATELLITES NATURELS

Vous trouverez dans les tableaux ci-dessous les satellites de la Terre et de Mars ainsi que les plus gros satellites des planètes géantes (ceux d'un diamètre supérieur à 300 km). On indique pour chacun d'eux son diamètre, le demi grand axe (a) de son orbite (en gros sa distance moyenne à la planète) ainsi que sa période. Chaque satellite porte un nom mais également un numéro en chiffres romains. Ainsi, Ganymède, le plus gros satellite du Système solaire, s'appelle aussi Jupiter III.

Le terme « satellite » a été utilisé pour la première fois par Kepler en 1611, il provient du latin « satelles » signifiant gardien ou compagnon. Mais on utilise également couramment le terme de « lune » pour les satellites naturels.

Terre	n°	Diamètre en km	a en km	T en jours
Lune	I	3 475	384 400	27,322

Mars	n°	Dimensions en km	a en km	T en jours
Phobos	I	27, 22, 18	9 377	0,319
Déimos	II	15, 12, 10	23 460	1,262

(ces deux satellites ne sont pas sphériques)

Jupiter	n°	Diamètre en km	a en km	T en jours
Io	I	3 643	421 800	1,769
Europe	II	3 122	671 100	3,551
Ganymède	III	5 262	1 070 400	7,155
Callisto	IV	4 821	1 882 700	16,689

Saturne	n°	Diamètre en km	a en km	T en jours
Mimas	I	396	185 520	0,942
Encelade	II	504	238 020	1,37
Téthys	III	1 066	294 660	1,888
Dioné	IV	1 123	377 400	2,737
Rhéa	V	1 529	527 070	4,518
Titan	VI	5 151	1 221 830	15,945
Japet	VIII	1 471	3 561 300	79,33

Uranus	n°	Diamètre en km	a en km	T en jours
Miranda	V	472	129 390	1,413
Ariel	I	1 158	191 020	2,52
Umbriel	II	1 169	266 300	4,144
Titania	III	1 578	435 910	8,706
Obéron	IV	1 523	583 520	13,463

Neptune	n°	Diamètre en km	a en km	T en jours
Triton	I	2 707	354 800	5,877
Protée	VIII	418	117 647	1,122
Néréide	II	340	5 513 400	360,14

Jeu

Voici 11 photos de différents satellites (les échelles de taille ne sont pas respectées). Saurez-vous les reconnaître ? Et pouvez-vous trouver la sonde auteure de la photo ? Les solutions sont ci-dessous.



Solutions : 1. Encelade par Cassini. 2. Titan par Cassini. 3. Mimas par Cassini. 4. Io par Galileo. 5. Phobos par MRIO. 6. Ganymède par Galileo. 7. Mimas par Galileo. 8. Io par Galileo. 9. Europe par Galileo. 10. La Lune (par moi-même). 11. Rhea par Cassini.

Combinez avec-vous de bonnes réponses (sans compter l'autre de la photo) ? 0 : vous n'avez même pas reconnu la Lune ? 1 à 3 : petit mieux faire ; 4 à 6 : c'est déjà bien ; 7 à 10 : super ! ; 11 : vous êtes planétologue ?

Huit activités sur les satellites naturels

Pierre Causeret, Esbarres

Je vous propose ici un petit tour d'horizon d'activités autour des satellites naturels des planètes du Système solaire, activités qui ont, pour beaucoup, déjà été abordées dans les Cahiers Clairaut.

Observer des satellites naturels

Quels satellites peut-on observer ? Mercure et Vénus n'en possèdent pas. Ceux de Mars sont trop petits et surtout trop près de leur planète pour être observés facilement.

Uranus et Neptune sont bien lointaines et il faut un gros télescope pour deviner quelques satellites : on peut voir Triton, le plus gros satellite de Neptune avec un télescope de 250 mm (magnitude 13,5) ; les satellites d'Uranus, pourtant plus proches, sont plus difficiles à voir car plus petits et plus sombres (magnitude ≈ 14 pour Titania et Obéron).

Nous ne parlerons pas ici de notre Lune. Il reste donc Jupiter et Saturne qui possèdent des satellites facilement observables.

Pour admirer les quatre satellites galiléens de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto), une paire de jumelles suffit – sur pied de préférence – mais c'est plus confortable dans un instrument type lunette ou télescope. Ces quatre satellites ayant une magnitude proche (entre 4,6 pour Ganymède et 5,7 pour Callisto), il est difficile de savoir qui est qui. Un logiciel comme Stellarium est bien pratique pour s'y retrouver. On peut suivre leur déplacement d'heure en heure ou de jour en jour. Les autres satellites de Jupiter sont nettement plus difficiles à voir (magnitude supérieure à 14).

Passons à Saturne. Son principal satellite, Titan, s'observe dans un petit instrument (mag 8,2). Avec un télescope de 200 mm, on monte jusqu'à sept satellites observables avec Rhéa (mag 9,5), Téthys (10,1), Dioné (10,2), Japet (≈ 11), Encelade (11,6) et Mimas (12,7). Là aussi, la méthode la plus simple pour les reconnaître est d'utiliser un logiciel.

Photographier des satellites naturels

Une fois les satellites observés, on voudrait bien les photographier, soit pour avoir un souvenir, soit pour faire des mesures. Pour les satellites de Jupiter ou de Saturne, on peut tenter une photo derrière l'oculaire avec un smartphone ou un appareil compact mais le

résultat n'est pas garanti. On peut utiliser un système de fixation du smartphone ou de l'appareil compact sur le porte oculaire.



Fig.1. Jupiter et les 4 satellites galiléens photographiés à l'aide d'un appareil compact fixé derrière une lunette muni d'un oculaire (temps de pose : 1/10 s). Le contraste a été augmenté pour rendre plus visibles les satellites. Avec le logiciel Stellarium, on peut les identifier. On a, de gauche à droite, Callisto, Europe, Io et Ganymède.

Une bien meilleure solution consiste à fixer le boîtier d'un appareil photo reflex (sans objectif) sur la lunette ou le télescope (sans oculaire), l'instrument servant alors de téléobjectif. Il existe des bagues d'adaptation pour cela (bague T).

Pour être sûr d'avoir les satellites sur l'image, il faut un champ d'au moins 20'. Avec un instrument de 2 m de focale et un boîtier muni d'un capteur APS-C, le champ est de 40' environ, ce qui est largement suffisant.

Il faut ensuite choisir un temps de pose assez long pour que les satellites apparaissent. Mais la planète Jupiter risque alors d'être surexposée.

Avec une seule image, il est difficile d'obtenir un bon résultat mais ce peut être suffisant pour étudier le déplacement des satellites. Les spécialistes de photo astro font toute une série d'images pour ensuite les traiter avec différents logiciels. Nous ne détaillerons pas ici les différents types de traitement.



Fig.2. Jupiter avec trois de ses satellites. Image réalisée par André Debackère et ses élèves avec le matériel d'Astro à l'école (Schmidt Cassegrain de 200 mm avec réducteur de focale et webcam). Extrait d'un article du n° 130 des Cahiers Clairaut (2010).

Vérifier la 3^e loi de Kepler

La 3^e loi de Kepler, publiée en 1619, relie les périodes T de révolution des planètes au demi grand axe a de leur orbite. Elle s'écrit : $a^3/T^2 = \text{constante}$.

Cette loi, qui peut se démontrer grâce à la loi de la gravitation de Newton (voir paragraphe suivant), s'applique aussi aux satellites d'une planète. On peut la vérifier par exemple avec les 4 satellites galiléens de Jupiter.

Ex 1

Satellite	Demi grand axe a	Période T
Io	421 800 km	42,5 h
Europe	671 100 km	85,2 h
Ganymède	1 070 400 km	171,7 h
Callisto	1 882 700 km	400,5 h

Calculer a^3/T^2 pour chacun des satellites.

Solution : on obtient $4,16 \times 10^{13}$ dans chaque cas, en gardant ces unités (ou $3,21 \times 10^{15}$ en S.I. avec a en mètres et T en secondes).

Cette 3^e loi se vérifie pour n'importe quel système de satellites, de Mars à Neptune¹.

Remarque

On pourra vérifier que la période d'Europe est le double de celle de Io et que celle de Ganymède est le double de celle d'Europe. On parle alors de résonance orbitale. On retrouve ce phénomène dans le système de Saturne entre Mimas et Thétys ou entre Encelade et Dioné (résonances 2 : 1).

Calculer la masse d'une planète

On utilise cette fois la 3^e loi de Kepler généralisée sous sa forme newtonienne où la constante est égale à $G(M+m)/(4\pi^2)$. Dans cette formule, on peut négliger m, la masse du satellite, qui est faible par rapport à M, la masse de la planète. La formule devient alors :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G \times M}{4\pi^2}$$

a est le demi grand axe de l'orbite en mètres,

T la période en secondes,

G, constante de gravitation = $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

et M est la masse de la planète en kg.

Cette 3^e loi de Kepler généralisée se démontre facilement dans le cas d'une orbite circulaire de rayon R. On montre que le mouvement est uniforme

¹ Vous trouverez les données pour les autres planètes sur le site du CLEA à Lunap, onglet Satellites / En bref.

et on écrit ensuite l'égalité de la force d'attraction GMm/R^2 et de la force centripète mv^2/R , la vitesse v étant égale à $2\pi R/T$.

Ex 2

En utilisant le tableau de l'exercice 1 et la 3^e loi de Kepler généralisée, déterminer la masse de Jupiter.

Solution

$$M = 4\pi^2 a^3 / (GT^2) = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$$

C'est de cette manière que l'on a pu déterminer la masse de toutes les planètes possédant au moins un satellite².

Pour Mercure et Vénus, dépourvues de satellite, on utilise l'attraction de la planète sur une sonde spatiale passant à proximité.

Réaliser une maquette des satellites de Jupiter

La maquette de la figure 3 a été réalisée sur une planchette carrée de 40 cm de côté. On a choisi une échelle de 10^{-10} où 1 mm représente 10 000 km. Les distances des 4 satellites à Jupiter sont alors de 42, 67, 102 et 188 mm et le diamètre de la planète de 14 mm.

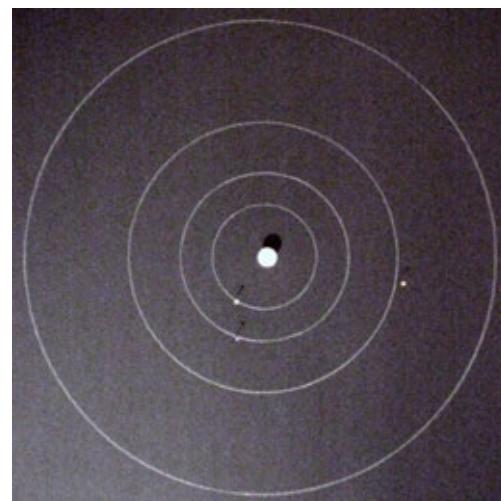


Fig.3a. Maquette vue de dessus avec la position des satellites galiléens de Jupiter pour une date donnée, ici le 15 mars 2004 à 20 h. Jupiter est représenté par une boule en polystyrène et les satellites par des épingle à tête ronde.



Fig.3b. La même maquette vue de profil. L'observateur sur Terre est supposé être sous la photo 3a. On obtient l'image des satellites tels qu'on peut les observer depuis la Terre à la date choisie.

Pour placer correctement un satellite à la date et à l'heure choisies, on pourra déjà rechercher le passage

² Voir le n° 133 des Cahiers Clairaut (2011) pour le calcul de la masse de Saturne.

de ce satellite devant la planète le plus proche dans le temps avec un logiciel comme Stellarium ou les éphémérides de l'IMCCE³. On cherche ensuite de quel angle il a tourné depuis ce passage grâce à sa période (voir tableau exercice 1). Un exemple : on trouve, avec des éphémérides, que Europe est passé devant Jupiter le 19 juin 2021 à 22 h 33 TU. On cherche sa position le 21 juin à 0 h TU, donc 25,45 h plus tard : Europe aura tourné d'un angle de $360^\circ \times 25,45 / 85,2$ soit $107,5^\circ$ (on a utilisé la période sidérale du satellite de 85,2 j comme si les planètes étaient immobiles mais cela n'entraîne pas de grosse erreur).

Vous trouverez une autre maquette dans le n° 155 des Cahiers Clairaut qui permet d'étudier les observations de Galilée⁴. Vous y trouverez également une animation GeoGebra⁵.

Créer une animation des satellites de Jupiter

Si vous voulez créer une animation montrant les mouvements des satellites autour d'une planète, il faut connaître leur vitesse angulaire et leur position à l'instant 0.

Connaissant la période T d'un satellite, on calcule facilement sa vitesse angulaire égale à $2\pi/T$.

Pour connaître la position du satellite à l'instant zéro choisi, on utilisera comme dans le paragraphe précédent son passage devant la planète.

Reprenons l'exemple d'Europe. On veut représenter son mouvement à partir du 21 juin 0 h :

- sa vitesse angulaire est de $0,0737 \text{ rad/h}$ ($2\pi/85,2$) ;
- l'angle à $t = 0$ avec la direction Jupiter-Terre est de $1,876 \text{ rad}$ ($107,5^\circ \times \pi/180$) ;
- l'angle à l'instant t est donc de $0,106 + 0,0737 \times t$
- sa distance à la planète est 671 (en milliers de km).

La position d'Europe est donc connue à l'instant t (compté ici en jours à partir du 21 juin 0 h).

En coordonnées cartésiennes, si on prend comme axe des abscisses la direction Jupiter Terre, cela donne :

$$X = 671 \times \cos(1,876 + 0,0737 \times t)$$

$$Y = 671 \times \sin(1,876 + 0,0737 \times t)$$

³ <https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/323.html>

Pour avoir le milieu du passage, faire la moyenne de PC (Passage Commencement) et PF (Passage Fin).

⁴ Cahiers Clairaut n° 155 (2016), Histoire des sciences, actualité et évaluation en classe de 3^e. Avec un document élève à imprimer.

⁵ Vous trouverez ce document sur le site du CLEA à Lunap, onglet satellites / activités.

Et si on veut représenter ce que l'on voit depuis la Terre, on ne garde que la coordonnée Y. On suppose ici que la Terre est située dans le plan de l'équateur de Jupiter ainsi que ses satellites, ce qui est proche de la réalité.

La position des satellites vus depuis la Terre est assez bonne pendant quelques jours mais se décale rapidement car on a utilisé les périodes sidérales comme si la Terre et Jupiter étaient immobiles. Il est assez facile de tenir compte du mouvement de Jupiter en utilisant les périodes synodiques des satellites (mesurées par rapport à l'axe Soleil-Jupiter) plutôt que les périodes sidérales. On reproduit alors assez bien les positions des satellites vus depuis le Soleil. La période synodique T_{syn} s'obtient à partir de la période sidérale T_{sid} et de la période de Jupiter T_{Jup} ainsi :

$$1/T_{\text{syn}} = 1/T_{\text{sid}} - 1/T_{\text{Jup}}$$

Avec $T_{\text{Jup}} = 4332,6 \text{ j}$, on obtient pour Europe une période synodique de 42,477 jours (au lieu de 42,459 j pour la période sidérale).

La vue des satellites depuis le Soleil donne une approximation de la vue depuis la Terre. Il faudrait également tenir compte de la position de la Terre mais c'est alors un peu plus compliqué.



Fig.4. Animation des satellites créée avec le logiciel Processing. Ganymède est devant Jupiter ici. L'abscisse X des formules ci-dessous est représentée ici verticalement.

$$X1=42 \times \cos(0,148 \times t) ; Y1=42 \times \sin(0,148 \times t)$$

$$X2=67 \times \cos(1,876 + 0,0737 \times t) ; Y2=67 \times \sin(1,876 + 0,0737 \times t)$$

$$X3=107 \times \cos(1,265 + 0,0365 \times t) ; Y3=107 \times \sin(1,265 + 0,0365 \times t)$$

$$X4=67 \times \cos(4,136 + 0,0156 \times t) ; Y4=67 \times \sin(4,136 + 0,0156 \times t)$$

Avec un logiciel en 3D, on peut également reproduire le mouvement des satellites dans un plan et incliner plus ou moins ce plan pour visualiser la vue « de dessus » ou la vue depuis la Terre.

Calculer la vitesse de la lumière

Quand les satellites de Jupiter tournent autour de la planète, ils peuvent se retrouver dans son ombre, on parle alors d'éclipse. Callisto, le plus éloigné de Jupiter, passe souvent au-dessus ou en dessous de l'ombre. Mais Io, le plus proche, traverse l'ombre à chacune de ses révolutions. C'est ce phénomène qui va nous intéresser ici. Contrairement aux occultations (lorsque Io passe derrière Jupiter par exemple), une éclipse se produit à un instant donné, indépendant de l'observateur.

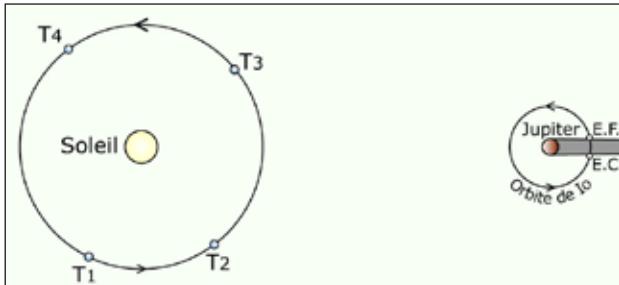


Fig.5. Une éclipse de Io se produit quand le satellite passe dans l'ombre de Jupiter. E.C. représente le commencement de l'éclipse et E.F., la fin de l'éclipse.

Quand la Terre est en T1 ou en T2, on peut observer Io rentrant dans l'ombre de Jupiter. Si ce commencement d'éclipse (EC) se produit à un instant t , nous ne l'observerons qu'un peu plus tard, à un instant t' , le temps que la lumière parcourt la distance Jupiter-Terre. On aura donc $t' = t + \Delta t$ avec $\Delta t = d/c$ (d = distance Jupiter-Terre, c = vitesse de la lumière). Quand la Terre se rapproche de Jupiter, la distance d diminue, donc Δt aussi et l'intervalle de temps entre deux éclipses est raccourci pour l'observateur.

Quand la Terre est en T3 ou en T4, on peut observer cette fois les fins d'éclipse (EF), là aussi avec un certain retard Δt . Mais ici, la Terre s'éloigne de Jupiter, la distance augmente, donc Δt aussi. L'intervalle de temps entre l'observation de deux éclipses est rallongé.

La période de Io doit donc apparaître plus courte quand la Terre se rapproche de Jupiter et plus longue quand elle s'en éloigne. Malheureusement, l'écart est faible et ne peut pas se mesurer sur une seule période. Il faut donc utiliser plusieurs périodes de Io.

L'astronome danois Ole Røemer avait remarqué les variations de période des éclipses de Io et en avait déduit que la vitesse de la lumière était finie⁶. Nous allons reprendre ici le même principe mais,

⁶ Vous trouverez des extraits de textes de Røemer ainsi qu'un calcul de la vitesse de la lumière dans l'article Vitesse de la lumière : Røemer revisité, paru dans le numéro 130 des Cahiers Clairaut (2010).

au lieu d'observer les éclipses, nous utiliserons les éphémérides de l'IMCCE.

Les données (source IMCCE)

Les dates choisies ci-dessous correspondent à des commencements ou fins d'éclipses observables.

	Date	Heure EC	N° de l'éclipse	Distance Terre-Jupiter
1	26/04/2021	3 h 47,9 min	50	5,3397 ua
2	05/08/2021	0 h 48,6 min	107	4,0473 ua

Tab.1. Commencements d'éclipses. L'IMCCE donne les horaires d'observation au dixième de minute près. Les éclipses ont été numérotées à partir du 29 janvier (conjonction de Jupiter avec le Soleil).

	Date	Heure EF	N° de l'éclipse	Distance Terre-Jupiter
3	05/09/2021	23 h 40,7 min	10	4,0546 ua
4	15/12/2021	21 h 03,9 min	67	5,3569 ua

Tab.2. Fins d'éclipses. Les éclipses ont été numérotées à partir du 20 août 2021 (opposition de Jupiter).

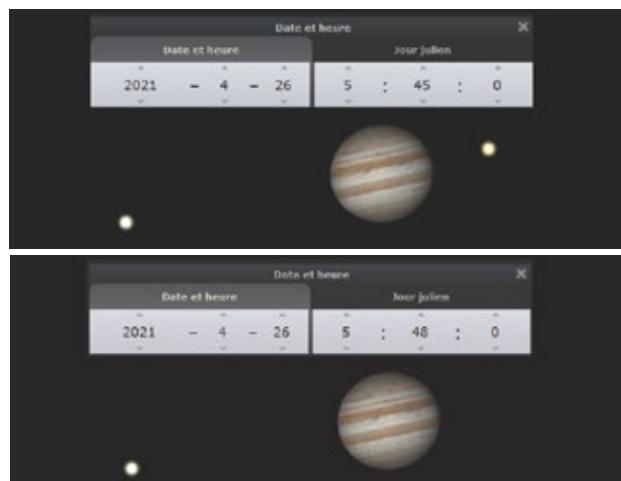


Fig.6. Le commencement d'éclipse (EC) de Io du 26 avril 2021 à 3 h 48 TU (5 h 48 en heure légale), simulé par le logiciel Stellarium. Le satellite disparaît en entrant dans l'ombre de Jupiter.

Les calculs

On supposera que la période réelle de révolution de Io est constante, nous l'appellerons P . Nous avons vu que : $t' = t + d/c$ si on appelle t l'instant du phénomène et t' l'instant de son observation depuis la Terre, d étant la distance observateur Jupiter, et c la vitesse de la lumière. Pour chaque tableau, il s'est écoulé 57 périodes entre les deux observations.

Ligne 1 du tableau 1 : $t'1 = t1 + d1/c$

Ligne 2 du tableau 1 : $t'2 = t2 + d2/c$

donc $t'2 - t'1 = t2 - t1 + (d2 - d1)/c$

Comme $t2 - t1 = 57 P$ et que $d2 < d1$, cela devient : $t'2 - t'1 = 57 P - (d1 - d2)/c$, ce que l'on peut encore écrire : $\Delta t'1 = 57 P - \Delta d1/c$ [1]

Le temps écoulé entre les deux observations d'éclipse 1 et 2 ($\Delta t'1$) est donc égal aux 57 périodes de Io diminué du temps que met la lumière à parcourir la distance $\Delta d1$ (ou $d1 - d2$).

Ligne 3 du tableau 2 : $t'3 = t3 + d3/c$

Ligne 4 du tableau 2 : $t'4 = t4 + d4/c$

donc $t'4 - t'3 = 57 P + (d4 - d3)/c$ ce que l'on peut encore écrire : $\Delta t'3 = 57 P + \Delta d3/c$ [2]

Le temps écoulé entre les deux observations d'éclipse 3 et 4 ($\Delta t'3$) est égal aux 57 périodes de Io augmenté du temps que met la lumière à parcourir la distance $\Delta d3$ (ou $d4 - d3$).⁷

En soustrayant membre à membre les égalités [1] et [2], on trouve : $\Delta t'3 - \Delta t'1 = (\Delta d3 + \Delta d1)/c$

d'où : $c = (\Delta d3 + \Delta d1)/(\Delta t'3 - \Delta t'1)$

Les calculs numériques se font facilement à l'aide d'un tableur :

$$\Delta d3 + \Delta d1 = 2,594\ 7 \text{ ua soit } 388\ 167\ 120 \text{ km}$$

$$\Delta t'3 - \Delta t'1 = 1\ 350 \text{ s}$$

$$\text{On trouve } c \approx 288\ 000 \text{ km/s}$$

Quelques remarques

La précision du résultat n'est pas très bonne (environ 4 %) mais nous avons considéré la période de Io comme constante alors qu'elle varie, suite aux perturbations exercées par les autres satellites. On peut d'ailleurs arriver à une erreur nettement plus grande en choisissant d'autres dates. Cette méthode permet néanmoins d'obtenir un bon ordre de grandeur de c .

Pour que la méthode soit correcte, il faudrait réellement observer les éclipses de Io. On utilise ici les données de l'IMCCE qui fabrique ses éphémérides en tenant compte de la vitesse de la lumière...

Mythologie, littérature et noms des satellites

Dans le cadre de travaux interdisciplinaires, on peut également s'intéresser à l'origine des noms de satellites. La plupart proviennent de la mythologie grecque, mais pas tous.

Les satellites de Mars, ont été baptisés Phobos (la peur) et Déimos (la terreur) par leur découvreur Asaph Hall en 1877, du nom de deux fils d'Arès (le dieu grec correspondant à Mars), à la suite d'une suggestion d'un Anglais, Mr Madan.

Les 4 principaux satellites de Jupiter ont d'abord été nommés étoiles médicéennes par Galilée en l'honneur des Médicis. Les noms actuels ont été proposés par Simon Marius, un contemporain de

Galilée, Il s'agit de maîtresses de Jupiter - Zeus (Io, Europe, Callisto) ou d'amants (Ganymède). Pour les satellites découverts ensuite, on a continué avec toute la mythologie liée à Zeus : Amalthée (nourrice), Himalia, Thébé, Élara (maîtresses)...

Titan, le principal satellite de Saturne a été découvert en 1655 par Huygens mais n'a reçu ce nom que deux siècles plus tard. C'est John Herschel (fils de William) qui proposa de désigner les satellites de Saturne par des noms liés aux Titans (frères et sœurs de Cronos, l'équivalent de Saturne pour les Grecs) : Japet est un Titan, Rhéa la femme de Cronos, Téthys ou Phœbe, deux Titanides...⁷

Plus original, les noms des satellites d'Uranus sont des personnages de William Shakespeare ou d'Alexander Pope, encore sur la suggestion de John Herschel. Miranda et Ariel viennent de *La Tempête*, de Shakespeare, Umbriel d'un poème de Pope, Titania et Obéron de *Songe d'une nuit d'été* de Shakespeare...

Pour les satellites de Neptune, on revient à la mythologie grecque avec des noms liés au dieu de la mer : Triton, fils de Poséidon (le dieu grec correspondant à Neptune), Protée (fils de Poséidon), Néréide (nymphe marine)...



Fig.7. Un Triton et une Néréide, deux divinités marines. Triton et Néréide sont les noms de deux satellites de Neptune, le dieu de la mer (crédit Wikimedia / Sylvain Gailloud).

On a donné à Pluton le nom du dieu des Enfers et Charon, son gros satellite (on parle souvent de planète naine double) est le passeur des Enfers. Pour les autres satellites, on reste dans le domaine de la mort avec Styx (un fleuve des Enfers), Nyx (la déesse de la nuit), Kerberos (Cerbère, le chien gardien des Enfers).

Il reste les satellites d'astéroïdes : le premier photographié fut Dactyle (divinité grecque mineure), satellite de l'astéroïde Ida (nymphe). On en connaît actuellement plus de 200. Ils ont des noms variés : Romulus (mythologie romaine), Lempo (mythologie nordique), Petit Prince... ■

⁷ Pour en savoir plus sur les noms des satellites de Saturne, un article leur a été consacré dans le n° 133 des Cahiers Clairaut (2011).

ARTICLE DE FOND

La promesse d'habitabilité des lunes glacées du Système solaire

Ines Belgacem, planétologue, chercheuse en post-doctorat à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à Madrid

Les lunes glacées du Système solaire sont au centre des intérêts des planétologues. La raison principale est qu'elles sont des candidats de choix dans la recherche d'environnements potentiellement habitables.

Dans le passé, la « zone habitable » autour d'une étoile était définie par la distance à laquelle l'eau liquide pouvait exister à la surface d'une planète orbitant autour d'elle. Avec les lunes glacées, nous avons découvert une nouvelle façon d'étudier l'habitabilité avec de potentiels habitats en profondeur et non plus à la surface.

On parle ici des lunes glacées majeures que sont Europe, Ganymède et Callisto orbitant autour de Jupiter ainsi que Titan et Encelade autour de Saturne. Bien qu'elles aient toutes leurs particularités, elles ont en commun d'abriter un océan d'eau liquide sous leur surface de glace.



Fig.1. Vue des principales lunes glacées de Jupiter (haut) et Saturne (bas). Crédit : NASA/JPL-Caltech/DLR (haut) et NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute (bas).

Leurs surfaces sont très variées et reflètent différents niveaux d'activité présente et passée avec des signes de cryovolcanisme pour les unes, de nombreux cratères d'impacts pour d'autres.

Les forces de marées engendrées par les géantes Jupiter et Saturne apportent à ces lunes de l'énergie thermique et permet aux océans d'eau liquide d'exister sous la croûte de glace. Ces forces de

marées n'affectent pas tous ces corps de la même façon. Plus ces lunes sont proches de leur planète et plus les forces de marées sont fortes.

Ces lunes glacées sont, pour la plupart, des corps complètement différenciés avec un noyau solide, un manteau rocheux et des couches d'eau et de glace. Ces modèles intérieurs sont basés en grande partie sur les mesures de gravité qui ont été permises par la mission Galileo à la fin des années 1990 pour le système de Jupiter et par la mission Cassini dans les années 2000 pour le système de Saturne. Ces hypothèses dépendent aussi grandement de la composition chimique des différentes couches, notamment des espèces qui seraient présentes dans la glace et dans l'océan. Il y a encore des incertitudes, notamment sur l'épaisseur des différentes couches. Ces modèles évoluent sans cesse et seront renforcés par les données des futures missions de la décennie.

Que veut dire habitabilité ?

L'habitabilité fait référence à la possibilité d'un environnement pouvant abriter la vie. Il faut faire la distinction stricte avec un environnement habité où la vie existe : si un environnement est habitable, cela n'implique pas nécessairement qu'on y trouvera des traces de vie présente ou passée.

Trois qualités sont nécessaires à l'habitabilité d'un environnement :

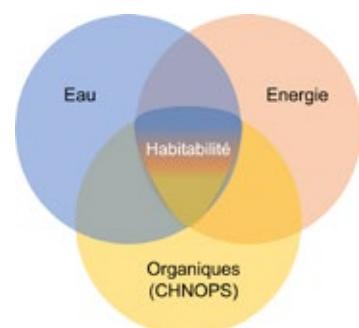


Fig.2. Définition schématique de l'habitabilité.

- la présence d'eau liquide ;
- une source d'énergie ;
- la présence de molécules organiques ou CHNOPS (pour les atomes de carbone, hydrogène, azote, oxygène, phosphore et soufre).

Europe et Encelade, les prometteuses

Europe et Encelade qui orbitent respectivement autour de Jupiter et Saturne sont certainement les plus prometteuses dans la recherche d'habitabilité.

Des signes d'activité actuelle et récente sont visibles à la surface comme les puissants geysers au pôle sud d'Encelade (figure 4). Dans le cas d'Europe, on peut voir des signes géologiques de cryovolcanisme – c.à.d. du volcanisme de glace et d'eau – comme les exemples de la figure 3.

Dans le cas d'Europe comme d'Encelade, leur océan sous la surface est en contact direct avec le manteau rocheux, favorisant les échanges chimiques entre eau et roches qui contiennent des éléments plus lourds. Par analogie avec certains environnements terrestres qui ont vu naître les extrémophiles, cette caractéristique rend ces deux lunes particulièrement intéressantes dans la recherche d'environnements habitables. La figure 4 représente une possible vision de ce que l'on imagine à l'intérieur d'Encelade, les interactions entre l'océan et le manteau ainsi qu'avec la surface. On y voit, en particulier, à quoi pourrait ressembler les fonds océaniques.

Les modèles de l'intérieur d'Europe sont similaires en termes d'interactions manteau / océan mais diffèrent un peu sur l'interaction avec la surface. En effet, on n'a pas observé de geysers de façon aussi claire sur Europe bien que des observations du Hubble Space Telescope semblent pointer vers la présence au moins transitoire de geysers de vapeur d'eau.

Les geysers d'Encelade ont été découverts et observés sans équivoque par la sonde Cassini. Après un passage à travers la vapeur d'eau, les instruments ont pu

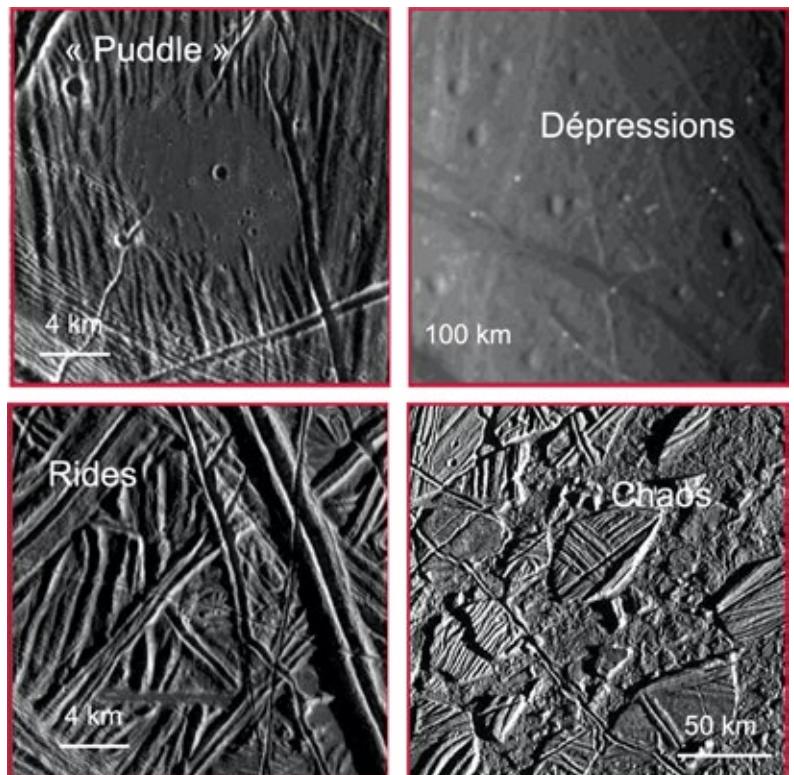


Fig.3. Exemples de structures géologiques qui indiquent des signes d'activité récente sur Europe
(crédit : NASA/JPL-Caltech/DLR).

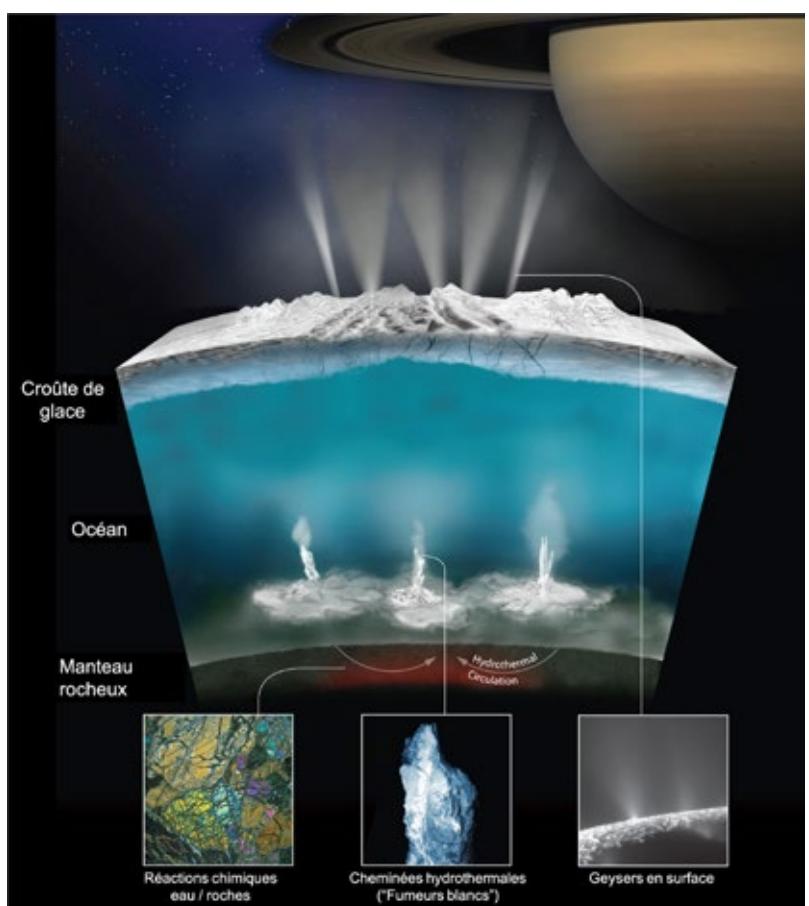


Fig.4. Vue d'artiste de l'intérieur d'Encelade et de l'activité possible (image adaptée en français de source NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute).

identifier en plus des molécules d'eau, la présence de traces de molécules organiques.

Contrairement à Encelade dont l'océan serait à peine à quelques dizaines de kilomètres de la surface (voire même à 5 km au pôle Sud !), l'océan d'Europe serait à une centaine de kilomètres de profondeur. Cela rend les futures explorations directes de l'océan très difficiles. Cependant, les modèles de cryovolcanisme – que l'on essaie encore de contraindre – ainsi que les analyses chimiques semblent pointer vers la présence d'éléments de l'océan qui remonteraient jusqu'à la surface comme les sels.

Ganymède, l'énigmatique

Ganymède est la plus grande lune du Système solaire avec un rayon même supérieur à la planète Mercure.

Contrairement à sa petite sœur Europe, l'océan de Ganymède n'est pas en contact direct avec le manteau rocheux mais est séparé par des couches de glaces haute pression. Cependant, des études ont montré qu'elles n'interdisaient pas nécessairement les échanges de matériel entre l'océan et le manteau.

Mais le caractère unique de Ganymède lui vient de son champ magnétique interne. C'est le seul satellite naturel à en posséder un. Si sa mesure ne fait aucun doute grâce aux mesures de la sonde Galileo, l'explication de cette caractéristique unique reste encore un mystère.

Ce champ magnétique crée, tout comme dans le cas de la Terre, une magnétosphère autour de Ganymède. Jupiter ayant elle-même un fort champ magnétique, on a une situation particulière de deux magnétosphères imbriquées.

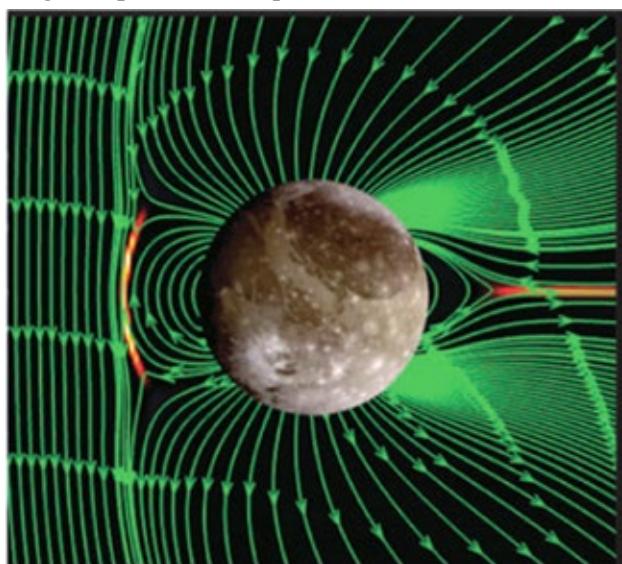


Fig.5. Représentation des lignes de champ magnétique autour de Ganymède. Crédit : X. Jia (University of Michigan) and M. Kivelson (UCLA).

La surface de Ganymède est une combinaison de terrains sombres et très cratérisés comme sur Callisto et de terrains clairs et peu cratérisés – donc plus jeunes – avec des signes d'activité récente comme sur Europe. La figure 9 compare ces trois surfaces. Plus les corps sont proches de Jupiter et plus ils ont une surface jeune et sont actifs, les effets de marées étant plus forts. Plus ils sont éloignés et moins la surface se renouvelle.

Ganymède a donc un potentiel d'habitabilité moins évident que sa voisine Europe avec une énergie thermique moins importante du fait de sa distance à Jupiter et des échanges chimiques moins faciles en profondeur. Mais elle reste une candidate sérieuse sur laquelle on a encore beaucoup à apprendre.

Callisto, l'ancienne

Bien qu'assez massive avec une taille à peine moins importante que Ganymède, Callisto est la lune galiléenne la plus éloignée de Jupiter. En conséquence, les forces de marées qui décroissent avec le cube de la distance y sont beaucoup moins fortes que pour Europe, par exemple. Le résultat est qu'aucune activité n'est visible à la surface de Callisto. Plus précisément, l'altération des paysages de Callisto est majoritairement causée par l'érosion. Ainsi, la figure 6 montre un exemple de cratères érodés créant des structures que l'on appelle « knobs » sur lesquels de la glace d'eau peut se déposer en altitude.

C'est d'ailleurs une des surfaces les plus âgées du Système solaire avec une complète saturation de la surface en cratères. Le nombre de cratères nous permet de dater une surface planétaire et quand cette surface est saturée cela signifie que tout nouveau cratère ne pourrait se former qu'au sein d'un cratère déjà existant tant ils sont nombreux (voir figure 9, troisième image).

Cependant, il semblerait qu'un océan liquide soit tout de même présent à l'intérieur de Callisto. Comme pour les autres lunes de Jupiter, il a été identifié par la sonde Galileo par des perturbations du champ magnétique de Jupiter. Ces perturbations ne peuvent être expliquées que par le fait que Callisto possède une couche conductrice. Cette couche serait un océan d'eau liquide salée.

Malgré cela, il est très peu probable que Callisto qui n'est même pas entièrement différenciée (c.à.d. qu'elle n'a pas de noyau dense séparé d'un manteau rocheux comme ses voisines) ait des propriétés habitables.

Callisto a d'autres qualités, et par l'absence d'activité à sa surface, elle a enregistré la majorité de l'histoire des grands événements du Système solaire.

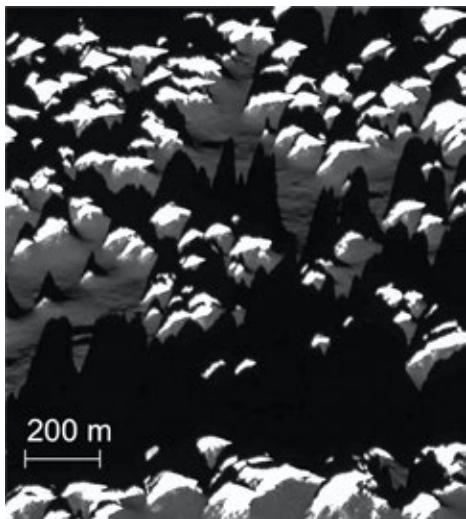


Fig.6. Illustration du processus d'érosion sur Callisto avec un champ de « knobs », seuls restes de cratères passés.

Titan, la méthaneuse

Titan est de loin la lune de Saturne la plus importante en taille, presqu'aussi grande que Ganymède. Ce qui la rend unique est la présence d'une atmosphère composée majoritairement d'azote (plus de 90 %) et de méthane (environ 6 %) environ 60 % plus dense que sur Terre. Il faut l'observer en infrarouge si on veut avoir une chance d'apprécier ses incroyables paysages. En 2005, la sonde Cassini de la NASA, alors en orbite autour de Saturne, largue l'atterrisseur de l'ESA Huygens dans le ciel de Titan. La sonde a renvoyé des images à couper le souffle qui nous ont fait découvrir des paysages étonnamment proches de ce que l'on voit sur Terre avec des dunes, des étendues glacées et des lacs. Une série de clichés au cours de la descente sont représentés à la figure 7.

Contrairement à la Terre, ces lacs ne sont pas remplis d'eau mais de méthane et d'hydrocarbures. Car une chimie bien particulière est à l'œuvre sur Titan. Là où sur Terre nous avons un cycle de l'eau, c'est bien un cycle du méthane (figure 8) que l'on a sur cette

lune avec des nuages, des précipitations et des étendues liquides de méthane. On y trouve de nombreuses molécules organiques et une chimie active à la surface que l'on pense pouvoir ressembler à celle qui dominait sur une Terre primordiale il y a de cela 4 milliards d'années. Mais avec des températures frôlant les -200 degrés Celsius, aucune chance de pouvoir trouver de l'eau liquide à la surface. La surface de Titan ne remplit donc pas les conditions que l'on définit pour l'habitabilité mais on pourrait tout à fait imaginer des habitats auxquels on n'a pas encore pensé dans cet environnement exotique dont on a encore tant à apprendre.

Tout comme Europe et Encelade, Titan possède aussi un océan d'eau qui serait directement en contact avec son manteau rocheux, favorisant ainsi les échanges eau / roches. Dans notre recherche d'habitabilité, c'est donc en profondeur une nouvelle fois que l'on retrouve notre triptyque avec de l'eau liquide, de l'énergie thermique entretenue par les forces de marées et un fort potentiel chimique qui nous laisse espérer la présence de molécules organiques dans les fonds océaniques, comme en surface.

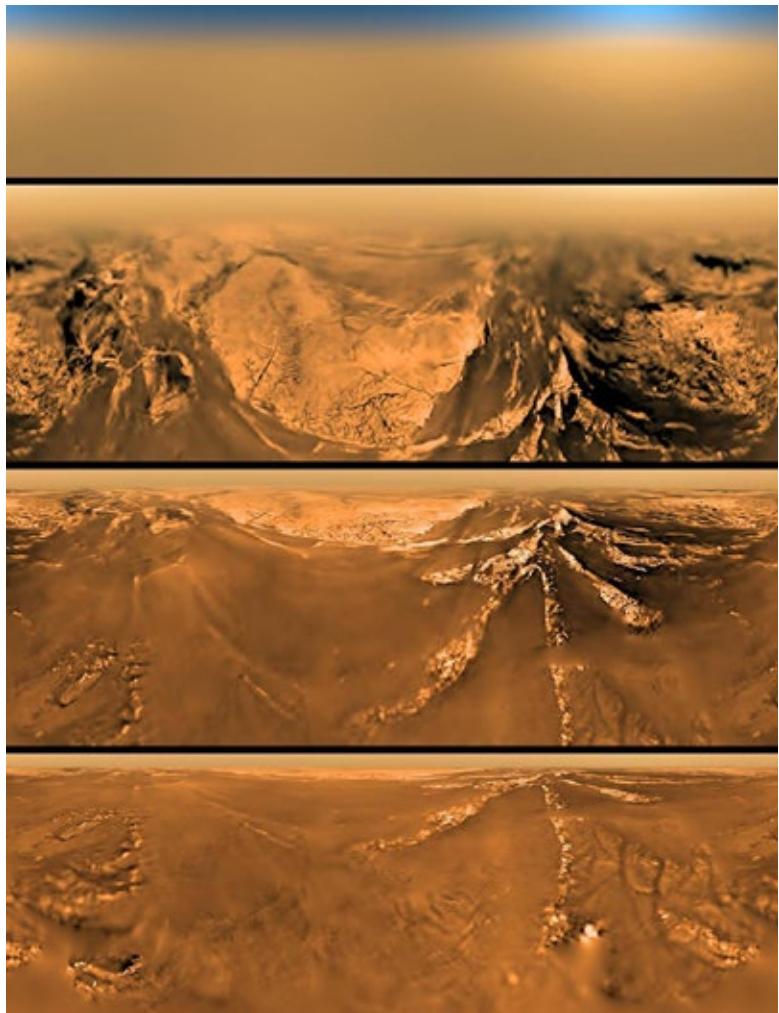


Fig.7. Images de la descente de Huygens dans l'atmosphère de Titan (crédit : ESA/NASA/JPL/University of Arizona).

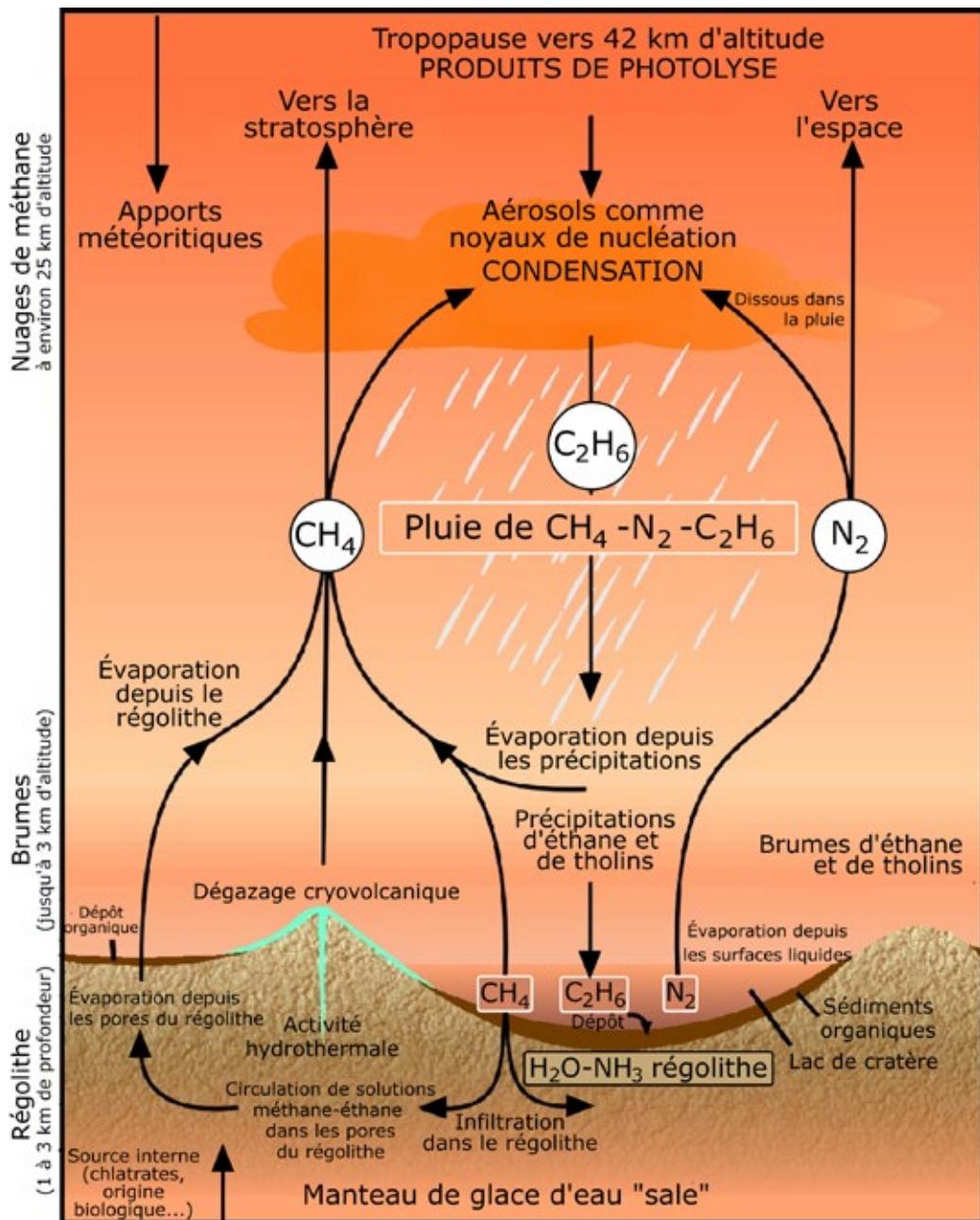


Fig.8. Cycle du méthane sur Titan (crédit : Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques / Université Paris 12).

Future exploration

De nombreuses missions ont visité les systèmes de Jupiter et Saturne mais seulement deux missions avaient dans leurs objectifs principaux d'étudier les lunes glacées – la mission Galileo pour le système de Jupiter et la mission Cassini pour le système de Saturne. La majorité de notre connaissance vient de ces deux missions mais nous avons encore beaucoup à apprendre !

Certaines missions clés sont déjà sur la ligne de départ pour creuser les questions encore en suspens,

et, en particulier, celle de l'habitabilité.

En 2022, l'ESA va lancer la mission JUpiter ICY moons Explorer (JUICE) qui arrivera dans le système jovien en 2030 avec pour mission de caractériser les lunes de Jupiter et leur environnement. En particulier, la sonde passera environ 8 mois en orbite autour de Ganymède et pourra en étudier la surface et l'environnement magnétique en détail.

Deux ans plus tard, la NASA lancera Europa Clipper qui devrait arriver dans le système jovien quasiment au même moment que JUICE. La sonde aura elle

la mission de caractériser précisément Europe, son potentiel d'habitabilité ainsi que de sélectionner de possibles sites d'atterrissement pour un futur atterrisseur.

Enfin, en 2026, la mission Dragonfly de la NASA devrait s'envoler pour Titan avec une arrivée prévue en 2034. Ce petit hélicoptère explorera la surface de la lune de Saturne à la recherche de traces de vie actuelles et passées. Grâce à son mode de

déplacement, la mission pourra explorer de nombreux environnements différents.

Ces trois missions nous promettent des résultats fascinants pour la prochaine décennie et pourront peut-être nous permettre de découvrir de nouveaux environnements habitables au sein de notre Système solaire.

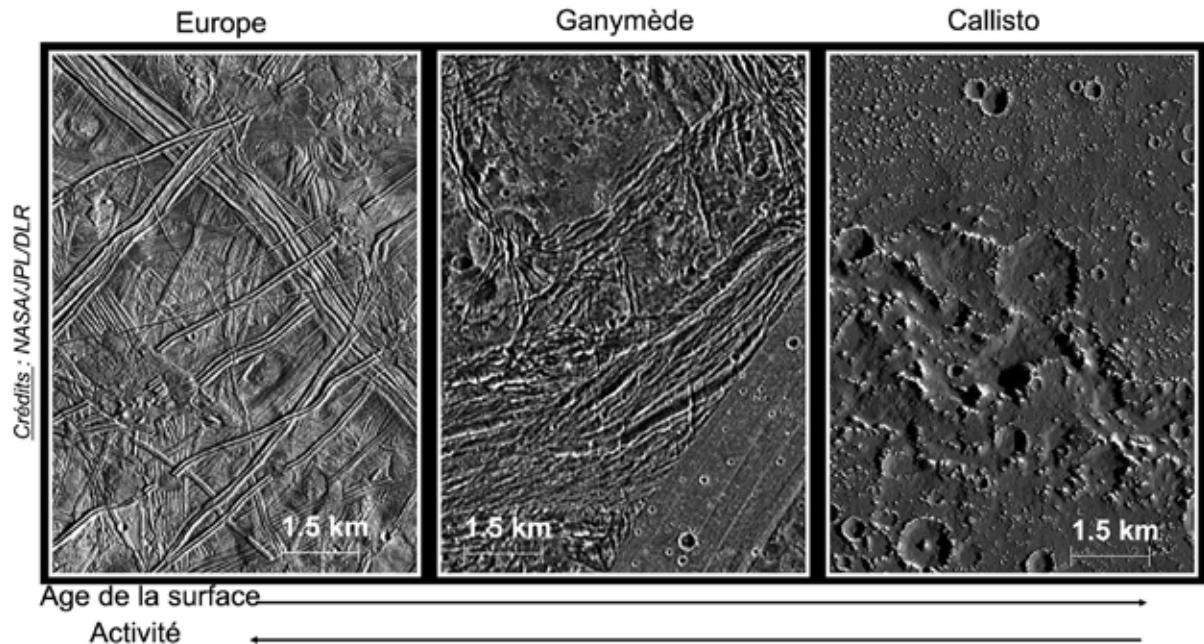


Fig.9. Vue comparée de terrains caractéristiques des trois lunes glacées de Jupiter.

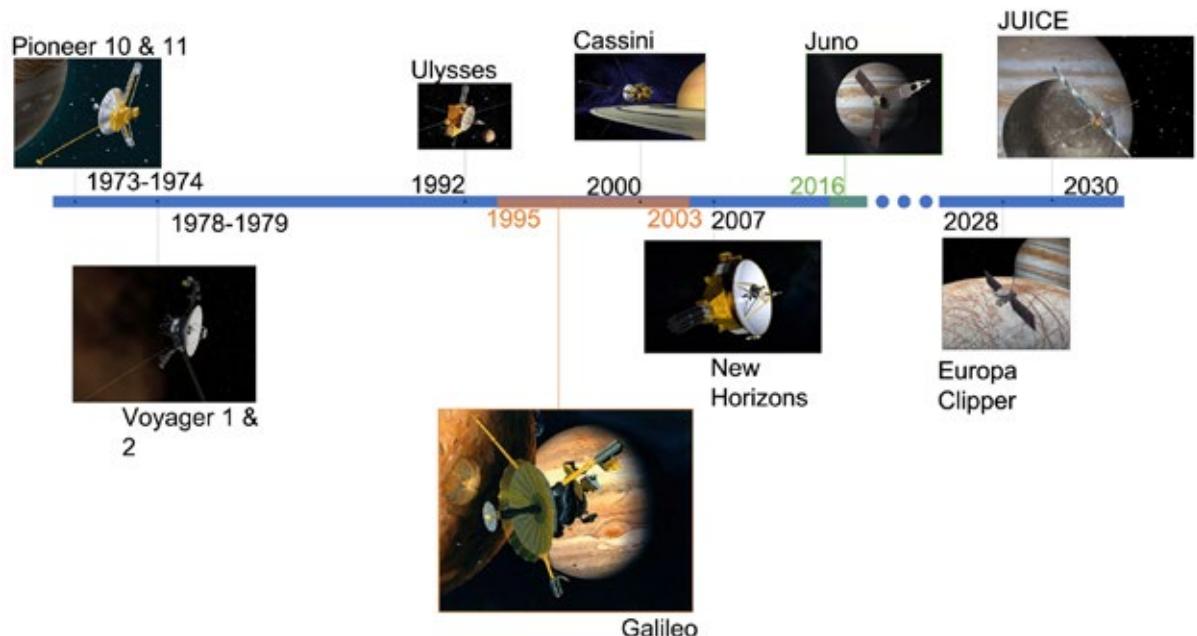


Fig.10. Frise chronologique des missions ayant visité le système jovien.

Titan et la mission Dragonfly, à la recherche des origines de la vie

Floriane Michel, Lycée La Pléiade de Pont-de-Cheruy

La description d'une future mission sur Titan, l'un des satellites de Saturne. Cette mission pourrait se révéler riche de promesses pour étudier un milieu qui ressemble à la Terre primitive avant l'apparition de la vie. Une opportunité pour tenter de reconstituer la genèse de la vie dont les traces sur Terre ont disparu.

Après avoir reçu la visite de la mission Cassini-Huygens en 2005, Titan, l'immense satellite de Saturne découvert en 1655 par Christiaan Huygens, va à nouveau recevoir de la visite !

Titan a la particularité d'être le seul objet du Système solaire autre que la Terre avec un liquide qui coule à sa surface. En effet, il y pleut du méthane, neige du méthane, sa surface possède des lacs et des mers de méthane, d'éthane et d'acétylène. Ces informations ont pu être collectées par la mission Cassini-Huygens qui nous a fourni les premières images d'un monde avec des paysages qui paraissent presque terrestres. La présence de méthane liquide pose la question de la présence d'un cycle autour du méthane, tel que celui autour de l'eau sur Terre et en fait donc un objet d'étude prioritaire pour les astrobiologistes et l'origine de la vie. Dans le cadre de son programme New Frontiers⁽¹⁾, la NASA a donc décidé d'envoyer un nouveau visiteur : Dragonfly.

Pourquoi Titan ?

Titan est très particulier dans le Système solaire. Parmi les satellites et les planètes rocheuses, c'est le seul dont on ne peut pas voir la surface dans le visible tant son atmosphère est dense. Titan pourrait être ce qui ressemble le plus à une Terre primitive, avant que n'y apparaisse la vie. Or nous ne comprenons encore pas les étapes qui amènent à cette apparition, la majorité des indices permettant de la comprendre ayant, sur Terre, été effacé par la vie elle-même. L'atmosphère et le sol de Titan, encore vierges de tout être vivant sont donc un fantastique laboratoire

pour comprendre la chimie de l'apparition de la vie, la chimie prébiotique.

L'atmosphère si dense de Titan est comme sur Terre composée en majorité de diazote. La température sur place est de 94 kelvins, environ -180 °C au sol ; il n'y a donc pas d'eau liquide mais du méthane liquide. Celui-ci, présent jusque dans les hautes couches de l'atmosphère, y est décomposé par la lumière (UV) et se recombine en molécules organiques qui retombent sur la surface.

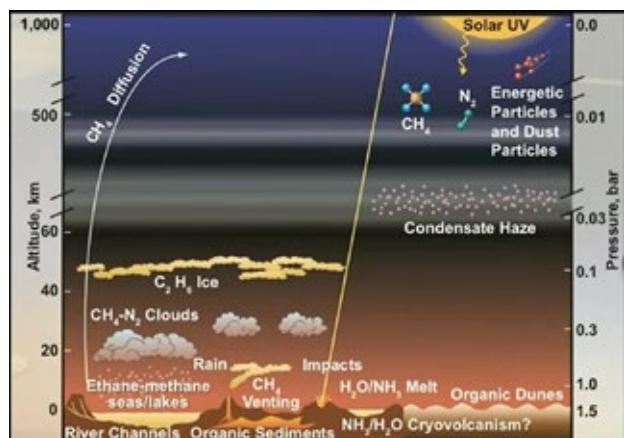


Fig.1. Le cycle du méthane sur Titan, analogue au cycle de l'eau sur Terre.

Cette chimie complexe autour de composés carbonés, combinée à la présence d'un liquide et d'énergie (par le Soleil) est très prometteuse pour étudier l'apparition de la vie. Ce cycle autour du méthane sur Titan en fait, après la Terre, l'objet ayant la plus grande quantité de carbone et les molécules les plus complexes du Système solaire (voir figure 2).

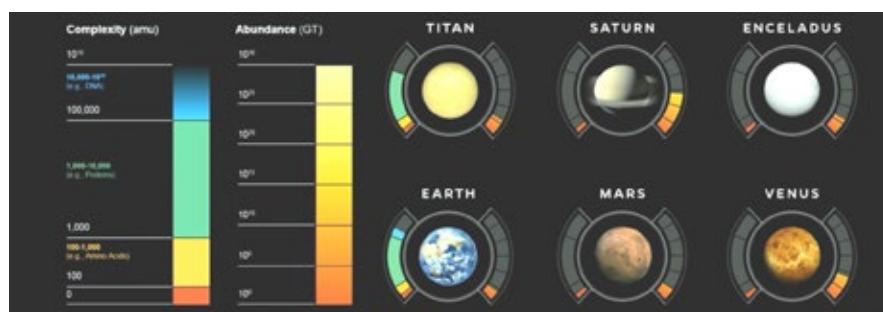


Fig.2. Abondance et complexité des éléments carbonés sur plusieurs mondes du Système solaire.

À gauche, du bleu au rouge, comparaison de la molécule carbonée la plus lourde (la plus complexe) connue sur chaque monde.

À droite, en orange, estimation de l'abondance totale du carbone dans l'atmosphère et à la surface de ce monde.

La surface de Titan, cartographiée grâce à la mission Cassini-Huygens et ses 127 survols, ressemble à celle de la Terre par les paysages et la diversité des formations qu'elle possède : lacs et rivières de méthane, désert avec des dunes de composés organiques mais également des volcans qui crachent de l'eau provenant de l'océan présent sous la surface. C'est donc toute une variété de paysages et formations « rocheuses » qui sont à explorer !

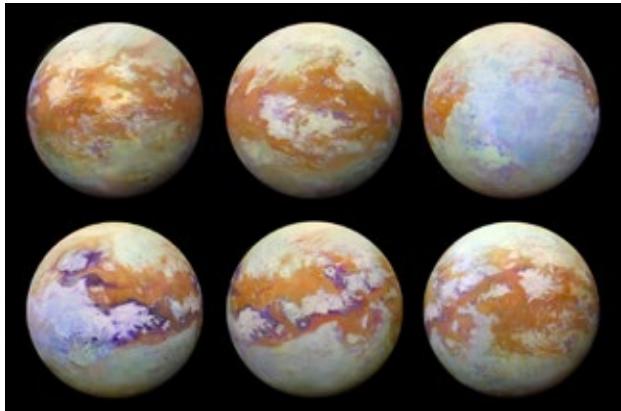


Fig.3. Images de Titan faites en infrarouge par la mission Cassini-Huygens.

Le drone Dragonfly

Il fallait donc choisir un objet capable de se déplacer facilement pour explorer le plus de zones différentes et qui ne reste pas bloqué dans des boues présentes à la surface de Titan.

Dragonfly ressemble à un drone mais en beaucoup plus grand. Il a la taille d'un rover martien : plus de deux mètres d'envergure, 450 kg, huit hélices et des patins qui lui permettront de se poser sur différents types de surface. Il est capable de parcourir environ 10 km par charge de batterie et a donc la mobilité nécessaire, contrairement à un rover, pour étudier différents types de paysage. Il est prévu que le drone parcourt environ 175 km lors de sa mission qui devrait durer environ 3 ans sur place. Le choix du drone permet d'exploiter le fait que l'atmosphère de Titan est quatre fois plus dense que celle de la Terre et la gravité de $1,35 \text{ m.s}^{-2}$, soit l'équivalent $0,14 \text{ g}$. Il est donc bien plus facile de faire voler un engin sur Titan que sur la Terre : la force nécessaire pour le soulever est plus faible et la portance créée par le mouvement des hélices est plus grande.

L'énergie solaire disponible sur Titan est cent fois plus faible que sur la Terre pour deux raisons : le satellite est beaucoup plus loin du Soleil que la Terre, mais son atmosphère filtre encore dix pour cent des rayons qui y arrivent. Dragonfly ne peut donc pas compter dessus et dispose d'un générateur thermoélectrique à radio-isotope, ici le plutonium

238. Ce générateur produira environ 120 watts d'électricité au moment du départ de la Terre. Une fois arrivé sur Titan huit ans plus tard, les ingénieurs tablent sur une puissance d'environ 70 W. Durant la nuit sur Titan, le générateur rechargea une batterie qui permettra à Dragonfly de voler le jour suivant. Les pertes thermiques produites serviront quant à elles à garder les composants à une température de fonctionnement. Pour cette raison, (presque) tous les composants se trouvent à l'intérieur du drone et seules les caméras disposent de petites fenêtres (voir figure 5, les cercles noirs que l'on peut voir sous Dragonfly).

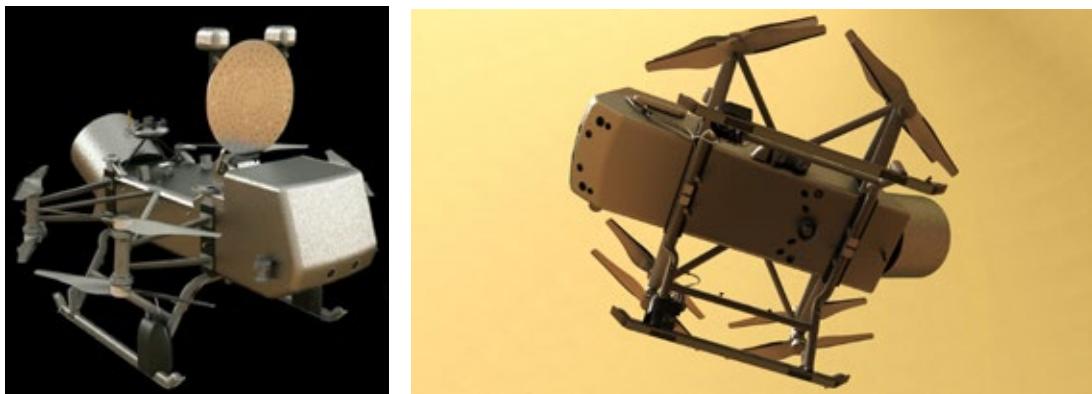
Un jour sur Titan est l'équivalent de seize jours terrestres, soit l'équivalent de huit jours de lumière et de huit jours de nuit. Étant donné que Dragonfly naviguera grâce à ses caméras, il est important qu'il y ait des contrastes pour distinguer les variations d'altitude. Il est donc prévu que les vols aient lieu plutôt les matins.

Le drone prendra son envol jusqu'à une altitude de 500 m puis fera une première partie de vol de prospection pour choisir un lieu d'atterrissement pour une étape à venir. Il ira ensuite se poser sur la zone choisie par les scientifiques lors des repérages précédents (voir figure 6).

Dragonfly dispose d'un spectromètre gamma et neutron pour analyser la composition du sol en dessous de lui-même sans avoir à faire de prélèvement. Il donne la proportion en différents atomes carbone, azote, hydrogène et oxygène. Cela permet de faire une première classification du sol qui peut ensuite être complétée par d'autres analyses. Pour celles-ci, il existe deux sources de prélèvement possible : l'une est une prise d'air, pour analyser l'atmosphère pendant les phases de vol et ainsi obtenir son profil par exemple, l'autre provient des pieds du drone où est installé un foret. Ce foret permet de rompre les glaces du sol et de les transformer en poussières qui seront ensuite aspirées. Celles-ci sont amenées vers une des cuves de prélèvement organisées sur un carrousel.

Celui-ci permet ensuite de diriger l'échantillon vers le spectromètre de masse et de faire une analyse des molécules qui le compose. Les résultats sont transmis à la Terre via une antenne montée sur le haut du drone. Celle-ci doit pouvoir tourner dans toutes les directions pour pouvoir communiquer dans la bonne direction.

Les ingénieurs en ont donc profité pour y ajouter deux caméras qui permettront de prendre des photos panoramiques (les deux petites boîtes que l'on voit sur l'antenne sur la figure 4).



*Fig. 4 et 5.
Images de Dragonfly.*

Les scientifiques ayant besoin de mettre les analyses en contexte, Dragonfly dispose de toute une gamme de capteurs météorologiques, sismiques et géologiques. Ils permettront de mesurer la température, la pression, la vitesse du vent, la constante diélectrique des matériaux... Le sismomètre donnera une idée de l'activité sismique de Titan et ainsi d'en connaître plus sur sa structure interne.

Une série de caméras complète l'arsenal de Dragonfly. Microscopique, panoramique, caméra de vol, basse résolution, très haute résolution... elles permettront de voir Titan sous toutes les coutures et de faire atterrir le drone dans les zones les moins accidentées.



Fig.7. Remplissage d'une cuve du carrousel.

Dragonfly devrait être lancé en 2027 et atterrir sur Titan après plus de sept ans de voyage. La zone

prévue pour l'atterrissement est proche de l'équateur sur des dunes dans une zone peu accidentée. C'est l'option préférée des scientifiques car c'est à cet endroit qu'a atterri Huygens en 2005. En raison de la période de l'année, les conditions météorologiques devraient être similaires au moment de l'atterrissement, ce qui évite les mauvaises surprises. Titan étant à environ 1,5 milliard de km de la Terre, les signaux de communication mettront entre 70 et 90 minutes pour faire le voyage, ce qui ne laisse que très peu de marge pour réagir en cas de problème.

Dragonfly est une mission originale et pionnière dans son genre dont nous suivrons l'aventure avec beaucoup de curiosité !

Source de toutes les figures : APL (applied physics Laboratory).

Un grand merci à Athena Coustenis pour sa relecture !

À écouter : l'émission Du vent dans les synapses sur France Inter où elle est interviewée sur cette mission.

(1) New Frontiers est un programme de la NASA qui finance des projets dans le Système solaire avec un coût plafonné à un milliard de dollars.

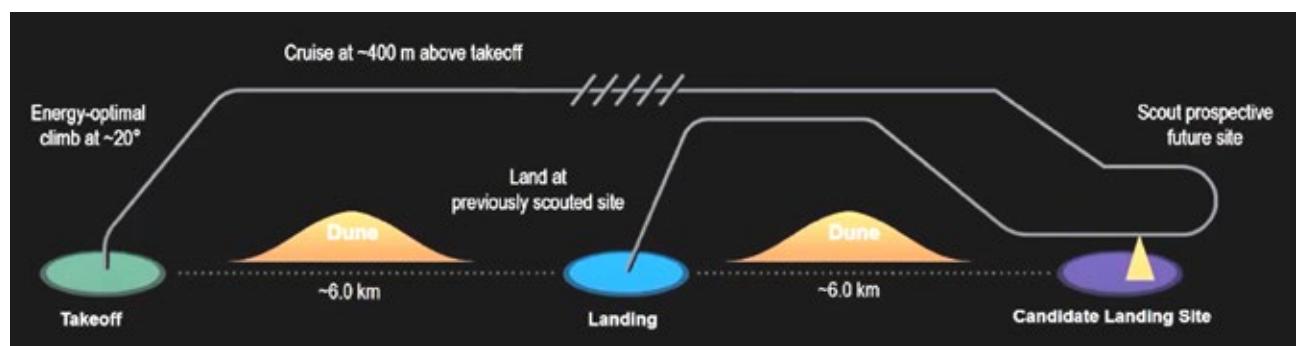


Fig.6. Plan de vol de Dragonfly.

AVEC NOS ÉLÈVES

Les lunes d'un petit Martien

Chantal Lecoutre, Sylvie Thiault

Le 18 février dernier, le rover Perseverance s'est posé sur Mars. De nombreuses photos et vidéos font la une de l'actualité spatiale et scientifique. C'est l'occasion de proposer à nos élèves une activité pour comprendre ce qu'un observateur placé à la surface de Mars verrait dans son ciel.

Mars possède deux satellites naturels aux comportements surprenants, PHOBOS (la peur) et DÉIMOS (la terreur). Du fait de leur petitesse et de leur proximité avec Mars ils ne furent découverts qu'en 1887 par Asaph Hall. Lors des oppositions de Mars leur magnitude apparente (pour un observateur sur Terre) est estimée à 11,3 pour Phobos et 12,4 pour Déimos.

En utilisant les données physiques mesurées depuis la Terre ou les sondes spatiales, nous allons essayer de reconstituer et de comprendre ce que voit un « petit Martien ». Cette activité est adaptée d'un « atelier du mercredi » qui avait été proposé et animé par Philippe Merlin à l'observatoire de Lyon.

Dans une première partie nous nous intéresserons au diamètre apparent et à la magnitude des satellites vus de Mars ainsi qu'aux possibilités d'éclipses totales sur la planète.

Dans une deuxième partie, avec le logiciel GeoGebra, nous modéliserons les mouvements des satellites sur leurs orbites vus de Mars afin de comprendre ce que voit notre « petit Martien » et ce que voyait le héros de *Seul sur Mars* : « Je navigue donc grâce à Phobos, qui traverse le ciel d'ouest en est et tourne si vite autour de la planète qu'il se lève et se couche deux fois par jour » (Andy Weir, l'auteur du roman *Seul sur Mars*).

Données

- Unité astronomique : 1 ua = 149 600 000 km.
- Rayon du Soleil : $R_{\text{H}} = 696 000 \text{ km}$.

	TERRRE	MARS
Rayon	$R_{\text{T}} = 6 370 \text{ km}$	$R_{\text{M}} = 3 390 \text{ km}$
Demi-grand axe	$a_{\text{T}} = 1 \text{ ua}$	$a_{\text{M}} = 1,52 \text{ ua}$
Période de révolution sidérale	$P_{\text{T}} = 365,26 \text{ jours}$	$P_{\text{M}} = 686,99 \text{ jours}$
Période de rotation	$p_{\text{T}} = 1 \text{ jour}$	$p_{\text{M}} = 1,03 \text{ j} (24,6 \text{ h})$
Longitude écliptique à $t = 0^*$	$\lg 0_{\text{T}} = 100,5^\circ$	$\lg 0_{\text{M}} = 65,7^\circ$

* On a choisi $t = 0$ le 01/01/2021 à 0 h

	PHOBOS	DÉIMOS
Demi-grand axe	$a_1 = 9 380 \text{ km}$	$a_2 = 23 460 \text{ km}$
Dimensions	en km (18 ; 22 ; 27)	en km (11 ; 12 ; 15)
Période de révolution	$P_1 = 0,32 \text{ jour}$	$P_2 = 1,26 \text{ jour}$

Première partie

Diamètres apparents des satellites

Il est intéressant de connaître les diamètres apparents de Phobos et Déimos vus de Mars pour les comparer au diamètre apparent de la Lune vue de la Terre.

Nous allons calculer l'angle maximum α sous lequel on voit chaque satellite, sous sa plus grande dimension, dim_{max} , en supposant qu'il passe à la verticale du lieu d'observation.

Sur la figure 1, M désigne le centre de la planète Mars.

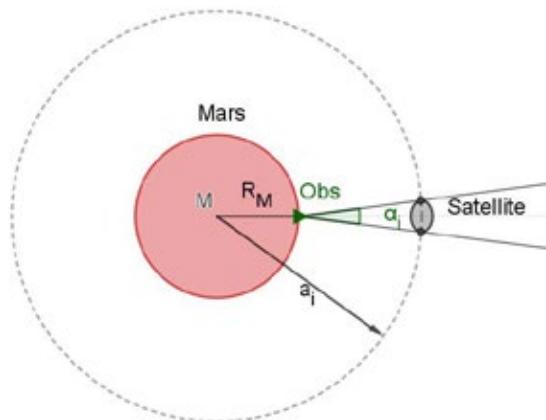


Fig.1. Calcul du diamètre apparent d'un satellite de Mars.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\text{dimension max du satellite}}{2(a_i - R_M)}$$

formule que l'on peut simplifier ainsi, les angles étant petits :

$$\alpha_i = \frac{\text{dimension max du satellite}}{a_i - R_M} \times \frac{180}{\pi}$$

On obtient pour Phobos $\alpha_1 \approx 15,5'$
pour Démos $\alpha_2 \approx 2,6'$

En comparant au diamètre apparent de la Lune vue de la Terre qui est de 30 minutes d'arc, on s'aperçoit que, pour un Martien, le diamètre apparent de Phobos est d'environ la moitié de celui de la Lune alors que celui de Déimos est beaucoup plus petit.

Les photos ci-dessous montrent les tailles respectives de Déimos et Phobos vus depuis Mars (photographiés par le robot Curiosity) et de la Lune vue depuis la Terre (figure 2).



Fig.2. À gauche, Phobos et Déimos photographiés par Curiosity depuis la surface de Mars. À droite, la Lune vue depuis la Terre, à la même échelle. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems/Texas A&M Univ).

Est-il possible pour un observateur martien d'assister à une éclipse totale de Soleil ?

Pour qu'une éclipse totale ait lieu à la surface de Mars il faut tout d'abord que la planète, son satellite et le Soleil soient alignés comme sur la figure ci-dessous (figure3).

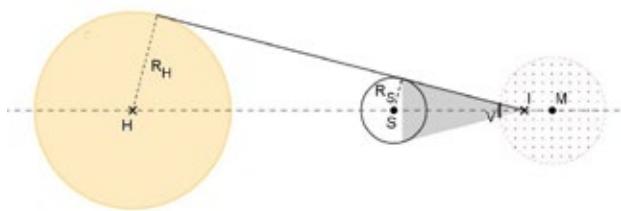


Fig.3. Situation d'éclipse de Soleil.

Pour simplifier, nous considérerons que le satellite est une sphère de rayon R_s (plus grande dimension). S désigne le centre du satellite et I le sommet du cône d'ombre.

V est le point d'intersection de (SI) avec la surface de Mars, où est placé notre observateur.

Il y a éclipse totale quand le sommet du cône d'ombre est plus éloigné de S que l'observateur :

$$SI > SV.$$

En appliquant le théorème de Thalès on obtient :

$$\frac{SI}{HI} = \frac{R_s}{R_H}$$

et en estimant que HI est très peu différent de a_M :

$$\frac{SI}{a_M} = \frac{R_s}{R_H} \text{ et } SI = a_M \times \frac{R_s}{R_H}$$

Attention aux unités ! a_M est donné en unité astronomique, ne pas oublier de multiplier par la valeur de l'ua en km.

Pour le calcul de SV, a_s désigne le demi-grand axe de l'orbite du satellite. On trouve :

	Phobos	Démos
SI = distance (satellite - sommet du cône d'ombre) en km	4 410	2 450
SV = $a_s - r_M$ (distance satellite-surface de Mars) en km	5 990	20 070

Conclusion : pour les deux satellites on trouve $SI < SV$ donc le sommet du cône d'ombre n'atteint pas la surface de Mars. Il ne peut y avoir d'éclipse totale de Soleil à la surface de Mars.

Lorsque les satellites passent entre le Soleil et sa planète notre « petit Martien » observe simplement des transits.

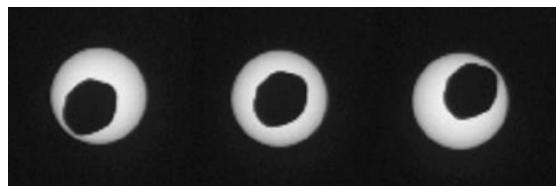


Fig.4. Passage de Phobos devant le Soleil photographié par Curiosity le 20 août 2013 (une image toutes les 3 s). On trouve une animation de ce passage sur le site <https://apod.nasa.gov/apod/ap190410.html>.

Crédit NASA/JPL-Caltech/Malin Space Science Systems/Texas A&M Univ.

Une autre solution consiste à calculer le diamètre apparent du Soleil vu depuis Mars. On trouve 21', plus que les 16' de Phobos, qui ne peut donc éclipser le Soleil.

Magnitude des satellites vus de Mars

Mars est au plus près de la Terre quand elle est à l'opposition c'est à dire quand la Terre est entre le Soleil et Mars. La distance Terre - Mars est alors $TM = a_M - a_T$. Elle est en moyenne de 0,524 ua.

Dans cette configuration les magnitudes de Phobos et de Déimos vus de la Terre sont respectivement de 11,3 et 12,4. Nous allons calculer les magnitudes lorsque les deux satellites sont vus de la surface de Mars et qu'ils passent au zénith.

La **luminosité** apparente L d'un astre est inversement proportionnelle au carré de sa distance.

Donc la luminosité du satellite S vu de Mars est :

$$L_M = \frac{k}{(a_s - R_M)^2} \text{ où } a_s \text{ est le demi-grand axe du}$$

satellite et k une constante (voir figure 5).

La luminosité du satellite S vu de la Terre est

$$L_T = \frac{k}{TS^2} \text{ donc } \frac{L_M}{L_T} = \frac{TS^2}{(a_s - R_M)^2}.$$

Mais TS et TM étant très proches (figure 5) on a :

$$\frac{L_M}{L_T} = \frac{TM^2}{(a_s - R_M)^2} \quad (1)$$

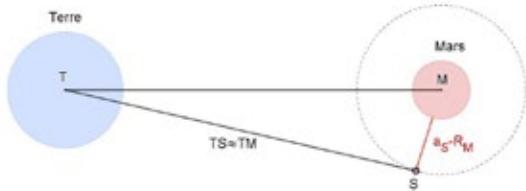


Fig.5. La distance observateur-satellite vaut TS (environ TM) pour un Terrien et $a_s - R_M$ pour un Martien.

La magnitude apparente M est définie par :

$$M = -2,5 \log L + \text{Constante.}$$

En partant de l'égalité (1), prenons les log et multiplions par 2,5 :

$$-2,5 \log(L_T) + 2,5 \log(L_M) = 5 \log\left(\frac{TM}{a_s - R_M}\right)$$

En désignant par m_M la magnitude du satellite vue de Mars et par m_T la magnitude du satellite vue de la Terre :

$$m_T - m_M = 5 \log\left(\frac{TM}{a_s - R_M}\right)$$

$$\text{ou encore } m_M = m_T - 5 \log\left(\frac{TM}{a_s - R_M}\right)$$

attention aux unités ! TM est donné en unité astronomique et R_M en km !

On obtient :

magnitude de Phobos vue de Mars -9,3

magnitude de Déimos vue de Mars -5,6

On peut alors comparer à Vénus qui, à son maximum d'éclat, a une magnitude de -4,6 vue de la Terre et à la pleine Lune qui a une magnitude de -12,6.

Remarque : nos calculs ne sont cependant qu'approximatifs.

Deuxième partie : modélisation des mouvements avec GeoGebra

Nous vous proposons ici de modéliser les mouvements apparents des satellites Phobos et Déimos dans le ciel martien à l'aide du logiciel GeoGebra.

Les commandes Geogebra sont indiquées en caractère gras.

« Les calculs d'éphémérides de position de Mars ont été réalisés par le service de calcul des éphémérides de l'IMCCE à travers son portail Système solaire (<https://ssp.imcce.fr>) ».

1. Préparation fichier de travail satmars0.ggb

Avec les élèves il peut être préférable de démarrer avec un fichier comportant tous les outils nécessaires.

Commençons par ouvrir une nouvelle feuille GeoGebra et dans Affichage choisissons Tableur.

Vous récupérerez depuis votre tableur favori une liste de dates à coller en A2. Ici on a choisi 1095 dates pour couvrir 3 ans à partir du 1^{er} janvier 2021.

Sur le site <https://ssp.imcce.fr> en suivant la démarche décrite dans le CC 168 page 16 (article en libre accès sur notre site clea-astro.eu, « archives des Cahiers Clairaut » année 2019), vous récupérerez la liste des longitudes écliptiques de Mars correspondantes à coller en B2. Attention, ici le centre du repère est : héliocentre !

En sélectionnant les 1095 dates et par clic droit, on crée une liste qu'on nommera « dates ».

Dans la barre de saisie, on tape :

npt=Longueur[dates]

Dans la barre de saisie, toujours, on tape toutes les données nécessaires dont les valeurs sont données en tête de cet article: **ua, R_H, R_T, R_M, a_T, a_M, a_I, a_2, P_T, P_M, p_M, P_I, P_2, lg0_M**.

Dans la barre de saisie, on tape : **lg0_M=B2**

On crée un curseur **tps** qui, pour l'instant, varie de 0 à **npt-1** avec un incrément de 1.

Dans propriétés, on choisit d'afficher **tps**, et dans position : position absolue.

On crée un texte (*icône du curseur puis menu déroulant*) en tapant dans champ vide :

Elément[dates, tps-1]

Pour passer d'un point de vue héliocentré à un point de vue centré sur Mars, on crée un booléen **a** en tapant dans la fenêtre de saisie : **a=false**

Par clic droit dans propriétés on remplit la légende en tapant **Héliocentrisme/Martiocentrisme ?** puis on coche « afficher l'objet », « afficher l'étiquette » et on fixe.

On crée un texte « Héliocentrisme » et un texte « Martiocentrisme ».

Pour chacun de ces textes, par clic droit propriétés/ avancé on renseigne la condition pour l'afficher.

(**a=true** pour héliocentrisme, **a=false** pour martiocentrisme)

On ajuste leur place à l'écran et dans propriétés / position on coche : position absolue.

2. Construction du système Soleil, Terre, Mars

On fera l'hypothèse que les planètes ont des orbites circulaires.

Les deux planètes seront repérées en coordonnées polaires : (demi-grand axe ; longitude écliptique).

Nous utiliserons ici comme unité le rayon martien.

On crée le point représentant le centre du Soleil $H'=(0,0)$ de couleur jaune et de dimension 6.

Créer le demi-grand axe de la Terre a'_T , le demi-grand axe de Mars a'_M , l'orbite de la Terre c'_T , l'orbite de Mars c'_M :

$$\begin{aligned} a'_T &= a_T * u_a / R_M \\ a'_M &= a_M * u_a / R_M \\ c'_T &= \text{Cercle}(H', a'_T) \\ c'_M &= \text{Cercle}(H', a'_M) \end{aligned}$$

Maintenant plaçons sur leur orbite les points Terre T' et Mars M' en fonction de leur longitude écliptique (figure 6).

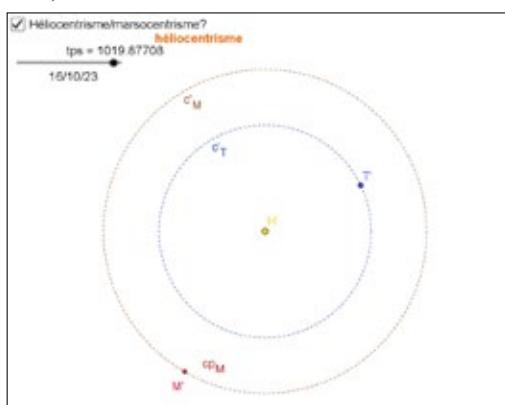


Fig.6. Orbites de la Terre et de Mars.

Dans la fenêtre Algèbre sont données les longitudes écliptiques au temps $tps = 0$, notées $lg0_T$ et $lg0_M$.

On a aussi les périodes de révolution des deux planètes PT et PM.

Au bout d'un temps tps (en jours), la Terre a tourné sur son orbite de $360/PT * tps$ et Mars a tourné sur son orbite de $360/PM * tps$. Leurs longitudes écliptiques respectives au temps tps sont :

$$\begin{aligned} lg_T &= 360/P_T * tps + lg0_T \\ lg_M &= 360/P_M * tps + lg0_M \end{aligned}$$

On place les points T' et M' :

$$\begin{aligned} T' &= (a'_T ; lg_T) \\ M' &= (a'_M ; lg_M) \end{aligned}$$

Attention, le séparateur est ici un « ; » ! Pour l'angle ne pas oublier le « ° » des degrés !

On peut alors faire défiler le temps à l'aide du curseur tps et observer les mouvements de Mars et la Terre autour du Soleil.

Pour l'observation des satellites depuis la surface de Mars il va falloir se placer dans un repère centré sur Mars.

Mettre Mars à l'origine revient à appliquer une translation de vecteur $\vec{MH'}$.

H' , T' , M' , c'_T , c'_M ne seront affichés qu'en héliocentrisme. Pour cela, pour chacun de ces objets, aller dans Propriétés, Avancé, et mettre la valeur logique a.

En martiocentrisme seront affichés H , T , M , cT , cM tels que :

$$\begin{aligned} H &= \text{Si}[a, H', \text{Translation}[H', \text{Vecteur}[M', H']]] \\ T &= \text{Si}[a, T', \text{Translation}[T', \text{Vecteur}[M', H']]] \\ M &= \text{Si}[a, M', \text{Translation}[M', \text{Vecteur}[M', H']]] \\ c_T &= \text{Si}[a, c'_T, \text{Translation}[c'_T, \text{Vecteur}[M', H']]] \\ c_M &= \text{Si}[a, c'_M, \text{Translation}[c'_M, \text{Vecteur}[M', H']]] \end{aligned}$$

H' étant au centre du repère héliocentrique, ces commandes peuvent être simplifiées.

$$\begin{aligned} H &= \text{Si}[a, H', H'-M'] \\ T &= \text{Si}[a, T', T'-M'] \\ M &= \text{Si}[a, M', H'] \\ c_T &= \text{Si}[a, c'_T, \text{Translation}[c'_T, -M']] \\ c_M &= \text{Si}[a, c'_M, \text{Translation}[c'_M, -M']] \end{aligned}$$

En jouant sur la boîte héliocentrisme / géocentrisme et sur le zoom on visualise les mouvements dans les deux référentiels. On peut activer la trace du point T (figure 7).

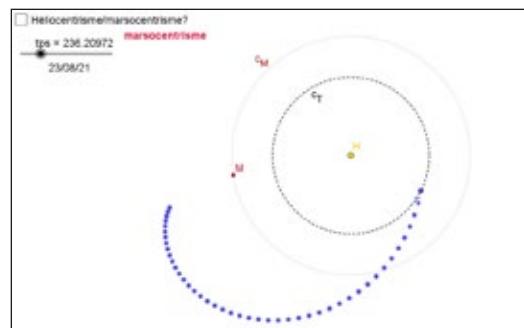


Fig.7. La Terre vue de Mars.

SAUVEGARDEZ ! et maintenant intéressons-nous aux satellites...

3. Les satellites sur leurs orbites

Cacher c_T et c_M , ou dans style choisir un trait pointillé fin. Phobos sera le satellite 1 et Déimos le satellite 2.

On se place maintenant dans le référentiel martiocentrique... Zoomer sur le point M. Beaucoup !

On crée la planète Mars :

cercle nommé cp_M , centre M, rayon unité, couleur brun, opacité 50%: $cp_M = \text{Cercle}(M, 1)$

On crée ensuite les orbites c_1 et c_2 des satellites, centre M, rayon les demi-grands axes a_1/R_M et a_2/R_M car l'unité est toujours le rayon martien :

$$\begin{aligned} c_1 &= \text{Cercle}(M, a_1/R_M) \\ c_2 &= \text{Cercle}(M, a_2/R_M) \end{aligned}$$

On place les satellites S1 et S2 sur leur orbite autour de Mars : nous n'avons pas leur position à l'origine

du temps, nous prendrons ces valeurs égales à zéro (ce n'est qu'une simulation).

P1 et P2 étant les périodes de révolution respectives des satellites sur leur orbite.

$$S_1 = (a_1/R_M; (360/P_1 * tps)^\circ) + M$$

$$S_2 = (a_2/R_M; (360/P_2 * tps)^\circ) + M$$

On choisira deux couleurs différentes pour les représenter (figure 8).

Reste maintenant à faire varier le curseur de temps **tps** et à observer les mouvements du système.

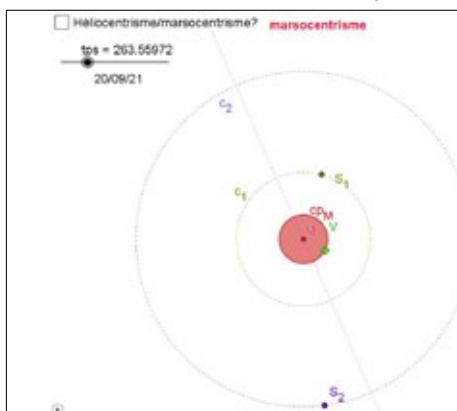


Fig.8. Avec les satellites en orbites fenêtre graphique 1.

4. Que voit un observateur martien ?

On place sur l'équateur martien un point V vert, représentant le « petit Martien », tournant avec Mars, de période de rotation sidérale p_M :

$$V = (1; (360/p_M * tps)^\circ) + M$$

On trace v_V demi-droite [MV] verticale du lieu, puis la droite projection du plan horizontal sur le plan de vue et tangente au cercle Mars cp_M en V :

$$v_V = \text{DemiDroite}[M, V] (\text{outil demidroite})$$

$$h_V = \text{Tangente}[V, cp_M] (\text{outil tangente})$$

On ouvre maintenant (dans Affichage) la fenêtre graphique2.

Pour simplifier, le mouvement apparent du Soleil sera représenté par un demi-cercle de rayon unité (couleur orange) passant par le zénith. L'axe (x' x) sera l'axe Est-Ouest (figure 9).

On crée le ciel dans la barre de saisie :

$$\text{Ciel} = \text{DemiCercle}[(-1,0), (1,0)]$$

On crée trois objets texte « zénith », « Est » et « Ouest » en les fixant en place.

Le Soleil, Phobos et Démos seront chacun représentés, lorsqu'ils sont au-dessus de l'horizon, par un point en coordonnées polaires de distance 1 et d'angle son angle horaire en prenant 0° au zénith.

$$AH_H = -\text{Angle}[V, M, H]$$

Attention ! signe – car l'angle horaire est compté dans le sens rétrograde.

De même :

$$AH_1 = -\text{Angle}[V + \text{Vecteur}[M, V], V, S_1]$$

$$AH_2 = -\text{Angle}[V + \text{Vecteur}[M, V], V, S_2]$$

On crée une valeur logique **fsol** qui sera « vrai » si le Soleil est au-dessus de l'horizon et « faux » sinon.

$$fsol = \text{Si}[\cos(AH_H) > 0, \text{true}, \text{false}]$$

On crée alors le Soleil puis Phobos et Démos.

$$\text{Soleil} = \text{Si}[fsol, (1; -AH_H + \pi/2)]$$

$$\text{Phobos} = \text{Si}[\cos(AH_1) > 0, (1; -AH_1 + \pi/2)]$$

$$\text{Deimos} = \text{Si}[\cos(AH_2) > 0, (1; -AH_2 + \pi/2)]$$

On va alors modifier le curseur de temps **tps** pour observer dans le ciel de Mars, le mouvement apparent de ses satellites et celui du Soleil.

On crée dans la barre de saisie les listes **incn** et **incd** :

$$\text{incn} = \{\text{"jour"}, \text{"heure"}, \text{"minute"}\}$$

$$\text{incd} = \{1, 1/24, 1/1440\}$$

On crée le curseur **inc** variant de 1 à 3 avec un incrément de 1. Et à côté du curseur **inc**, on crée le texte **Elément(incn,inc)** dans « champ vide ».

On choisit de ne pas afficher l'étiquette de **inc**. En faisant varier **inc**, il s'affiche successivement jour, heure, minute.

On choisit d'afficher **tps** dans la fenêtre graphique 2 (*clic droit, avancé, cocher graphique 2*). On remplace son incrément par **Elément(incd, inc)**.

On peut alors jouer sur le curseur **inc** pour faire apparaître le texte « minute » et animer **tps**.

Observons alors les mouvements apparents de Démos, Phobos et du Soleil dans le ciel de notre martien.

Le Soleil se lève en direction de l'est, se couche en direction de l'ouest. Pas de quoi faire perdre ses repères à un Terrien débarqué sur Mars.

Mais pour Phobos, le lever se fait en direction de l'ouest et le coucher en direction de l'est.

Quand on observe ensuite que Démos s'est levé en direction de l'est et vient croiser la trajectoire apparente de Phobos, il y a matière à réflexion...

Le lecteur aura compris que la réponse se trouve dans la comparaison des périodes de révolution des deux satellites et de la période de rotation de Mars.

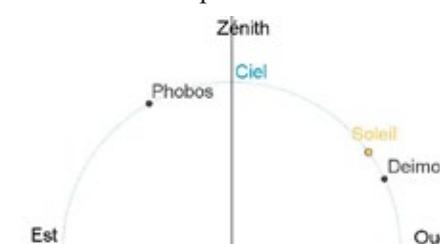


Fig.9. Modélisation des mouvements apparents des satellites et du Soleil au-dessus de l'horizon.

Les satellites naturels dans les productions du Clea

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (<http://clea-astro.eu/archives>).

(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu / archives des CC).

Utilisations des nouvelles éphémérides de l'IMCCE, CC 168, 2019 (réalisation d'un graphique montrant l'évolution des quatre satellites galiléens de Jupiter en janvier 2020).

Les glaces de surfaces du Système solaire, CC 165, 2019.

Galilée observe les satellites de Jupiter, CC 155, 2016 (avec une maquette pour positionner les satellites de Jupiter aux dates d'observation de Galilée).

Quand le LP2I surfe sur Jupiter, CC 144, 2013 (à propos de Io et Jupiter).

Comment peser Saturne ? CC 133, 2011 (à partir d'observations de Titan et de la 3^e loi de Kepler).

Le système de Saturne, d'un solstice à l'autre, CC 133, 2013 (où l'on parle de Titan, Phoebe, Japet et Encelade).

D'où viennent les noms des satellites de Saturne ? CC 133, 2013 (mythologie autour des noms de ces satellites).

Identification des satellites galiléens de Jupiter à partir d'images CCD, CC 130, 2010 (un travail réalisé par des élèves d'un atelier scientifique sur des images réalisées lors de soirées d'observation).

Vitesse de la lumière : Römer revisité, CC 130, 2010 (le calcul de la vitesse de la lumière avec la méthode de Römer et les éphémérides de l'IMCCE de 2010).

Les planètes médicéennes de Jupiter : de la "découverte" aux calculs astronomiques de Galilée, CC 130, 2010 (essais de production de tables de position des 4 satellites principaux de Jupiter par Galilée).

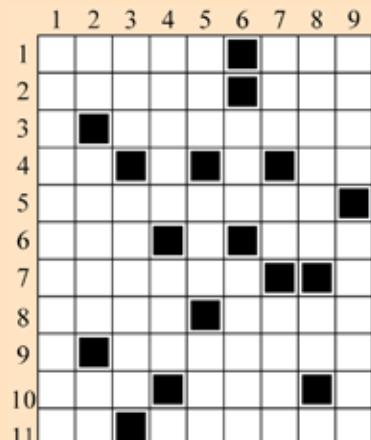
La découverte de la vitesse finie de la lumière par Roemer - Aspects historiques, CC 67, 1994.

Sur le site du CLEA (<http://www.clea-astro.eu>), onglet lunap puis Vitesse de la lumière / Activités

Une activité permettant de réfléchir aux notions de distance et de durée en relation avec la vitesse de la lumière se prolongeant par la détermination de la valeur de la vitesse de la lumière, par la méthode historique de Römer, puis par une méthode plus approfondie basée aussi sur l'observation des satellites de Jupiter.

Mots croisés : les satellites naturels

Horizontalement



1. Petit satellite de Saturne, de forme quasi sphérique, et fils d'Ouranos et de Gaia. Astéroïde possédant un satellite, Dactyle.
2. Petit satellite de Jupiter, du groupe d'Himalia. Il s'est posé sur notre satellite.
3. Petit satellite de Jupiter dans le même groupe qu'Elara.
4. Pronom. 1/3 600 000 h.
5. Satellite galiléen de Jupiter, le plus éloigné de sa planète parmi les quatre.
6. Petit Cheval. Le nouveau portail du Système solaire de l'IMCCE.
7. Satellite galiléen de Jupiter, le plus petit des quatre.
8. Un n° 10 qui n'est ni Platini, ni Zidane. Comme M65, M66 et NGC3628 dans le Lion.
9. Le troisième plus grand satellite de Neptune et le deuxième découvert (par Kuiper).
10. Auf Satelliten wie Ganymed. Il commence le 21 décembre à Melbourne.
11. Azimut 45° pour les astronomes. Déesse de l'astronomie.

Verticalement

1. Qualificatif que Galilée a donné aux lunes de Jupiter.
2. Pronom. Comme un canard parfois. Satellite de Jupiter.
3. Tête de maharaja. Habituellement joyeux.
4. Quatrième plus gros satellite d'Uranus. Un anglais.
5. Oncle américain. Il jouxte l'observatoire de Paris. A, B, C, D ou E.
6. Révolutions. Raccourcit.
7. Il passe à Strasbourg. On y étudie le mouvement des satellites. Vide.
8. Satellite de Mars. Même chose.
9. Ils peuvent regrouper des étoiles ou des galaxies. Petit satellite de Saturne découvert par William Pickering.

Solution p. 48

OBSERVATION



Document photocopiable

Le ciel de l'été 2021

Nord

Ciel valable
le 01/07 à 2 h
le 01/08 à 0 h
le 01/09 à 22 h
(heures légales)

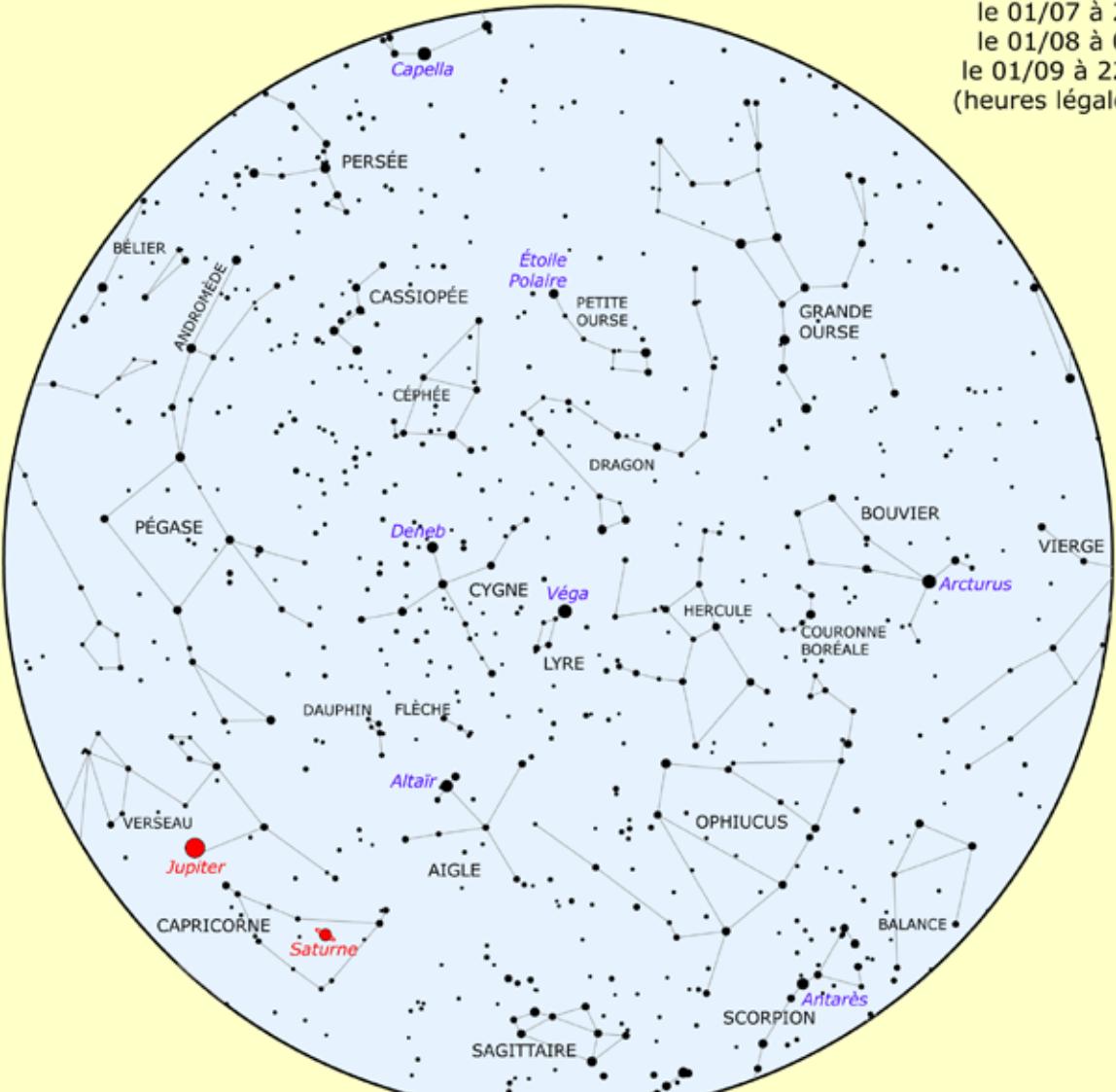
Est

Ouest

Sud

Les planètes sont placées
pour le 1er août 2021

Carte du ciel calculée
pour la latitude de 47°



Visibilité des planètes

On pourra rechercher **Mercure** le matin début juillet avant le lever du Soleil,

Vénus est visible le soir à l'ouest mais reste assez basse au-dessus de l'horizon (moins de 20° au coucher du Soleil en métropole).

Mars continue à s'éloigner, elle est à plus de 350 millions de km et peut être devinée le soir dans le Cancer puis le Lion.

Jupiter et **Saturne** sont bien visibles tout l'été puisque Jupiter passe à l'opposition le 20 août et Saturne le 2 août.

Quelques évènements (heures légales)

21/06 : solstice d'été à 5 h 32 min.

6/07 : la Terre au plus loin du Soleil, à 152 100 527 km.

12 juillet (soir) : rapprochement Vénus Mars (< 1°)

2/08 : Saturne à l'opposition.

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

20/08 : Jupiter à l'opposition.

22/09 : équinoxe d'automne.

Lune

Pleine Lune : les 24/06, 24/07, 22/08.

Nouvelle Lune : les 10/07, 8/08, 7/09.

Jupiter et Saturne au cours de l'été 2021

Les deux planètes géantes seront bien observables tout cet été. C'est l'occasion de s'intéresser à leur mouvement. La figure qui suit montre les positions de la Terre, de Jupiter et de Saturne au cours de l'été 2021, en vue héliocentrique.

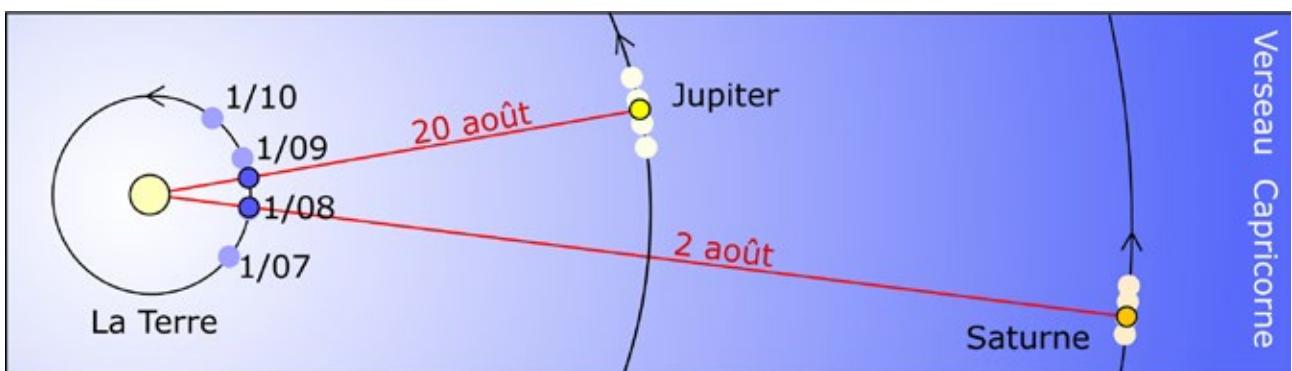


Fig.1. La Terre, Jupiter et Saturne le 1^{er} de chaque mois du 1^{er} juillet au 1^{er} octobre 2021 et aux dates d'opposition (2/08 et 20 /08).

Les oppositions de Saturne et de Jupiter

Le 2 août 2021, le Soleil, la Terre et Saturne sont alignés (ligne rouge du bas de la figure 1). Ce qui revient à dire que, depuis la Terre, Saturne est à l'opposé du Soleil. Ce jour-là, la planète se lève au coucher du Soleil et se couche au lever du Soleil. Elle est donc visible toute la nuit.

L'opposition de Jupiter a lieu quelques jours plus tard, le 20 août.

Saturne est visible dans la constellation du Capricorne et Jupiter dans celle du Verseau.

Les rétrogradations de Jupiter et Saturne

On parle plus souvent des rétrogradations de Mars (voir par exemple le n° 127 des Cahiers Clairaut p 24) mais Jupiter et Saturne rétrogradent également. Habituellement, on voit ces planètes se déplacer d'ouest en est à cause de leur mouvement autour du Soleil. Mais au moment de l'opposition d'une de ces planètes, la Terre, qui est plus rapide, va la doubler et on peut voir alors la planète se déplacer dans l'autre sens, on dit qu'elle rétrograde.

La rétrogradation de Saturne a lieu cette année du 23 mai au 11 octobre, celle de Jupiter du 20 juin au 18 octobre (figure 2). Jupiter rétrograde sur 9,9°, Saturne, plus lointaine, sur 6,6°.

Si les plans des orbites des planètes étaient tous confondus, on verrait les planètes rétrograder sur une ligne, l'écliptique. Mais ce n'est pas tout à fait le cas comme on peut le remarquer sur la figure 2, ceci parce que le plan de l'orbite de Jupiter est incliné de 1,3° sur l'écliptique, celui de Saturne de 2,5°. Mais, comparativement à Mars, les boucles de rétrogradation de Jupiter et de Saturne sont beaucoup plus aplatis à cause de leur distance beaucoup plus grande.

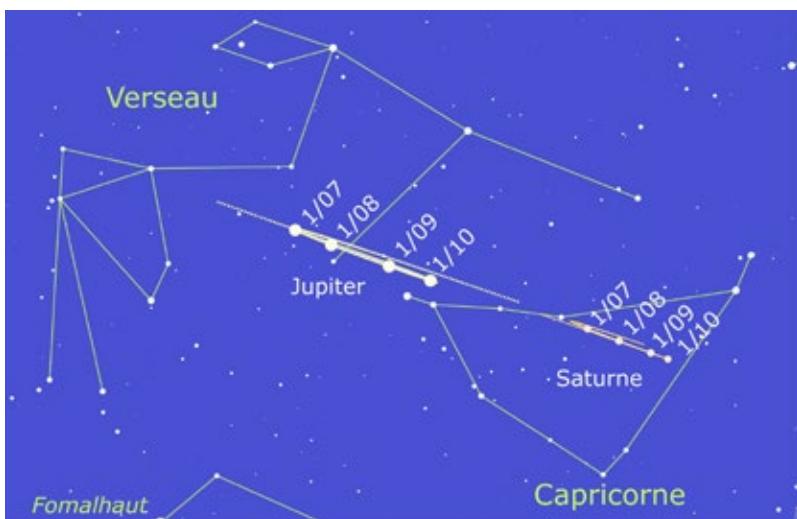


Fig.2. On a représenté en petit les positions de Jupiter et de Saturne tous les jours du 1^{er} mars 2021 au 31 janvier 2022 pour montrer la rétrogradation de ces deux planètes géantes.

Les positions du 1^{er} de chaque mois entre le 1/07 et le 1/10 sont plus grosses. Pendant toute cette période, les deux planètes sont en train de rétrograder.

D'une année sur l'autre, l'opposition de Jupiter se décale en moyenne de 34 jours (donc sa rétrogradation aussi), la prochaine aura lieu le 26 septembre 2022.

Pour Saturne, le décalage est de 13 jours par an prochaine opposition, le 14 août 2022.

OBSERVATION

Analyse d'images lunaires : le Mur droit

Pierre Le Fur

Une étude quantitative de certains détails observés à la surface de la Lune selon l'éclairement. Des activités envisageables avec de bons élèves ou dans le cadre des activités pratiquées dans des clubs astronomiques.

Les observateurs utilisant les premières lunettes astronomiques, comme Galilée, Hevelius ou Cassini, ont d'emblée réalisé des images du relief lunaire, sous forme de dessins ou d'aquarelles. En les analysant, ils ont cartographié, mesuré et dénommé ces cratères, ces mers et ces montagnes. Mais ils ont aussi remarqué des détails inattendus comme des failles ou des vallées sinuées. C'est ainsi que vers 1650, Christian Huygens a remarqué une coupure linéaire dans le sol lunaire appelée Rupes Recta ou Mur droit.

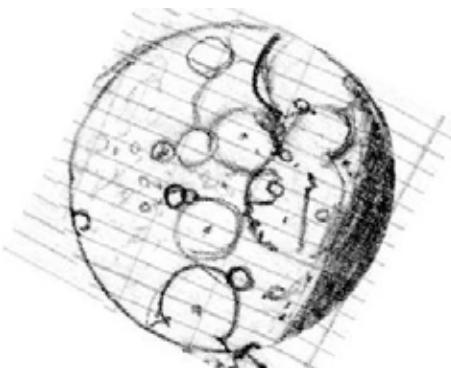


Fig.1. Dessin à l'oculaire du Mur droit par l'auteur. Lunette de 40 mm de diamètre, grossissement 30×.



Fig.2. Carte de 1692 par John Keill (1671-1721). En jaune, le champ représenté sur la figure 1 (bibliothèque numérique de l'observatoire de Paris).

Ce trait rayant la mer des Nuées (Mare Nubium), appelé aussi l'épée dans la Lune, est tout à fait visible par le débutant, près du terminateur, un à deux jours après le premier quartier (voir figure 1). La carte ancienne présentée figure 2 permet de localiser ce relief original, dans l'hémisphère sud non loin du célèbre Tycho et ces éclatantes rainures en étoile. Pour toutes les vues représentées ici, le sud est en haut, l'image étant inversée comme dans de nombreux instruments.

Les moyens actuels d'observation permettent à l'astronome amateur d'obtenir des images numériques détaillées du sol lunaire qui ouvrent la possibilité de mesurer et d'analyser de nombreux éléments morphologiques et géologiques de la Lune. Essayons tout d'abord de dresser un portrait géométrique de Rupes Recta à partir de trois observations (figures 3, 4 et 7) réalisées avec un télescope Schmidt-Cassegrain de 305 mm de diamètre équipé de caméras numériques (I Nova, DMK). Passons ces images au crible de différents logiciels courants.



Fig.3. Le Mur droit, 2 jours après le premier quartier (le 09/01/2016). Le Soleil est à gauche. Télescope Meade 305 mm focale 7 500 mm (3 m de focale avec une barlow ×2,5), 1778 images additionnées, camera INova (image de l'auteur).

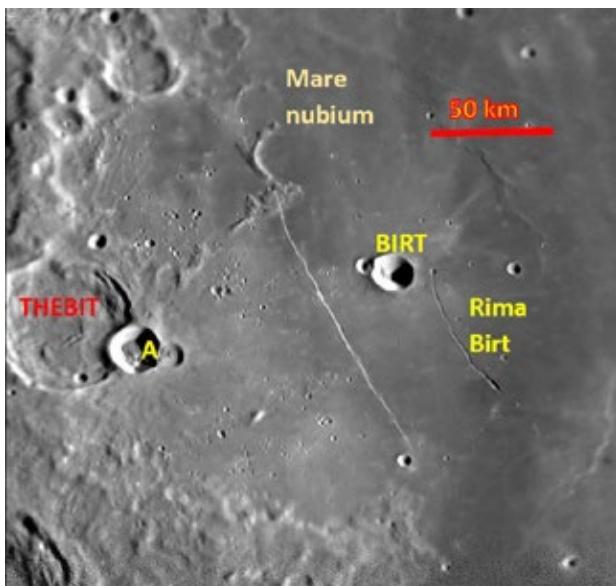


Fig.4. Le Mur droit 1 jour avant le dernier quartier (le 06/08/2015). Le Soleil est à droite. 1 057 images additionnées (image de l'auteur).

Mesures de dimensions à l'aide des logiciels «Atlas virtuel de la Lune¹» et «SalsaJ2²»

Mise à l'échelle

Dans un premier temps, il faut identifier les formations lunaires. On trouvera ensuite l'échelle de la photo. Les résultats sont indiqués sur la figure 4. Le détail des manips se trouve au fur et à mesure dans les encadrés. Les plus petits cratères visibles ont une taille minimale d'environ 500 m de diamètre, au télescope de 305 mm avec une focale de 7 500 mm. C'est l'ordre de grandeur de la résolution théorique due à la diffraction.

Utilisation d'AVL et de SalsaJ

Avec l'Atlas virtuel de la Lune, on identifie les principaux cratères et formations des photographies télescopiques (figure 4). Avec son outil «distance», zoom au maximum, on mesure la distance entre le centre de Birt et celui de Thebit A. On trouve 104 km. Ce seront nos cratères repères. On ouvre le logiciel SalsaJ2, on fait glisser la photographie à étudier sur l'étiquette SalsaJ2 pour ouvrir l'image. On agrandit avec la loupe et la souris (clic gauche). On cible les deux cratères repères avec le menu «main». Enfin on utilise l'outil «sélection rectiligne» en tirant un trait du centre de Birt à celui de A. On active l'«analyse» puis «échelle»; là, on place la distance réelle (104) et l'unité (km) puis on valide par oui. On peut faire apparaître l'échelle. Par exemple 50 km.

¹ Téléchargeable gratuitement sur le site : http://www.astrosurf.com/avl/V35/FR_index.html

² Disponible sur Hands-On Universe : <http://fr.euhou.net/index.php/le-logiciel-mainmenu-9/tlcharger-mainmenu-10>

Mesures de distances

Une fois l'échelle connue, il est facile de calculer les dimensions des différentes formations. On obtient 105 km pour la longueur du Mur droit et 1,8 km pour sa largeur. Celle-ci varie entre 1 et 3 km suivant les points considérés.

Formation	Longueur (km)	Largeur (km)
Rupes Recta	105	1,8 (moyenne)
Rima Birt	50	1,6
Distance entre les deux	39	
Diamètre du cratère Birt	17	

Utilisation de SalsaJ (suite)

Par le même outil «sélection rectiligne» on trace un trait d'une extrémité à l'autre du mur droit. Dans «analyse», l'outil «coupe» fait apparaître un graphique d'intensité lumineuse en fonction de la position sur l'écran. En déplaçant d'une extrémité à l'autre le point courant avec la souris, on obtient la longueur de cette faille : 105 km. Ce qui est tout à fait en accord avec la littérature [1]. On fait de même pour Rima Bert. On reprend la méthode pour déterminer les largeurs (voir les diagrammes présentés, figures 5 et 6).

L'utilisation de SalsaJ2 nous donne les profils d'intensité le long de la ligne de coupe (figures 5 et 6). Les deux formations se distinguent clairement : le mur droit ne correspond qu'à un seul pic d'intensité ou creux suivant que le mur est éclairé (dernier quartier) ou dans l'ombre noire (premier quartier). Le couple creux/pic d'intensité caractérise Rima Birt qui est une vallée ou rainure en creux dont l'une des pentes est éclairée, l'autre étant dans la nuit, cela quelle que soit la phase.

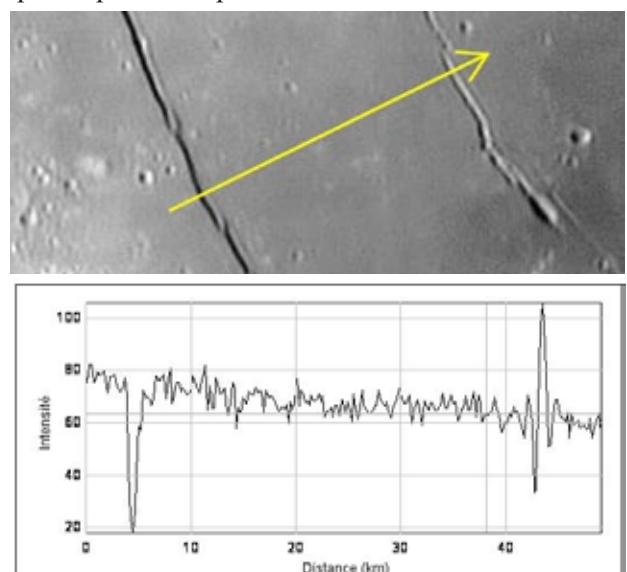


Fig.5. En haut, le Mur droit au soleil levant (agrandissement de la figure 3) avec sens de l'éclairage et trait de coupe. En bas, intensité en fonction de la distance par SalsaJ2 suivant le trait de coupe.

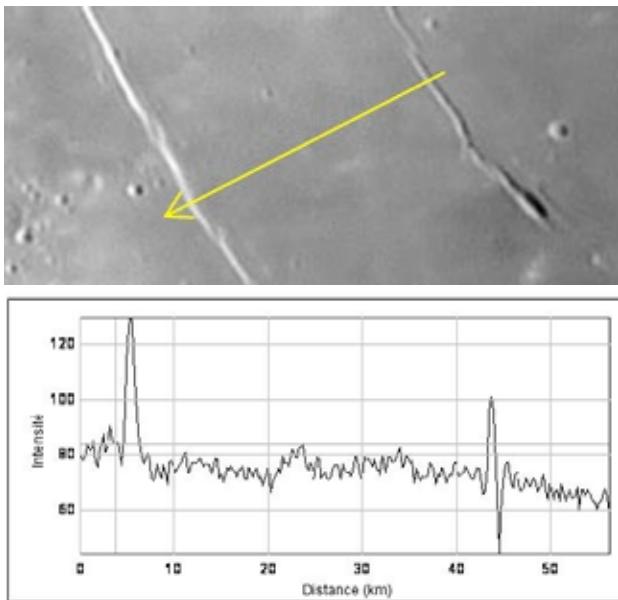


Fig.6. En haut, le Mur droit au soleil couchant (agrandissement de la figure 4) avec sens de l'éclairage et trait de coupe. En bas, intensité en fonction de la distance par SalsaJ2 suivant le trait de coupe.

Mesure de la hauteur H du mur droit

En réalisant une coupe sur un cliché pris peu de temps après le lever du soleil, lorsqu'il est bas sur l'horizon, on peut mesurer la longueur L_{ombre} de l'ombre portée par le mur sur la plaine de Mare Nubium (figure 7). La direction de la coupe est celle du Soleil. On trouve $L_{\text{ombre}} = 7,7 \text{ km}$.

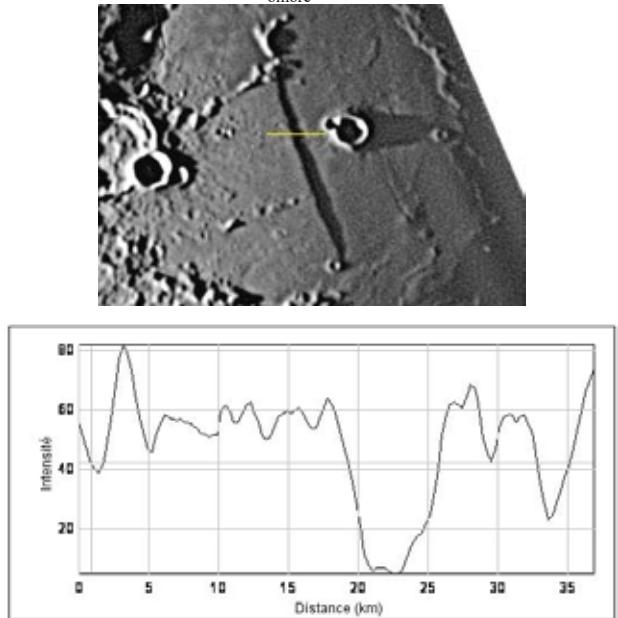


Fig.7. En haut, le Mur droit peu de temps après le lever du Soleil. Le trait de coupe est en jaune. En bas, intensité en fonction de la distance par SalsaJ2 suivant le trait de coupe.

Il reste à calculer la hauteur h_s (en °) du Soleil au-dessus de l'horizon. Pour cela, on raisonne dans le plan perpendiculaire au terminateur (limite jour/

nuuit) passant par le trait de coupe qui est supposé de latitude quasi constante λ (figure 8). On suppose ici le plan de l'équateur lunaire confondu avec celui de l'écliptique (c'est vrai à $1,5^\circ$ près).

Fig.8. En haut, une vue depuis la Terre.

M est un point du mur droit et T un point du terminateur situé à la même latitude. Le Soleil est sur la gauche, dans le plan de l'équateur lunaire. d est la distance du mur droit au terminateur.

En bas, vue depuis le pôle Sud de la Lune.

Les mesures des deux angles en vert sur la figure sont égales car les côtés sont deux à deux perpendiculaires :

- l'horizon « est » de M est perpendiculaire à $[OM]$;
- le rayon du Soleil est perpendiculaire au terminateur.

Le rayon OM ou OT du parallèle du point M est égal à $R_{\text{Lune}} \times \cos \lambda$.

La distance d a été obtenue à partir de la figure 7.

La figure 8 permet d'établir l'égalité :

$$\sin h_s = \frac{d}{R_{\text{Lune}} \times \cos \lambda}$$

Ici $\lambda = 21^\circ$ sud (atlas virtuel), $R_{\text{Lune}} = 1740 \text{ km}$. Au jour et à l'heure de l'observation, avec le logiciel Atlas virtuel de la Lune on mesure $d = 89 \text{ km}$ (voir figure 9).

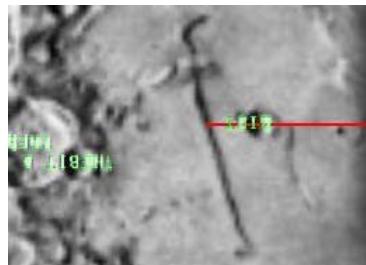


Fig.9. Extrait de l'Atlas virtuel de la Lune à l'heure de l'observation (20 h 05 TU).

La distance d du Mur droit au terminateur vaut 89 km.

On obtient la hauteur du Soleil pour le point du mur droit considéré : $h_s = 3,14^\circ$.

En final, la hauteur H du mur droit est donc :

$$H = L_{\text{ombre}} \times \tan h_s \text{ soit ici } H \approx 420 \text{ m.}$$

Cette valeur semble plus élevée (de 30 à 40 %) que les 200 à 300 m de la littérature [1]. Aujourd'hui, les images satellitaires sont très accessibles sur internet. Aussi il semble indispensable de compléter ces études sur photographies télescopiques par d'autres sur données spatiales. Intéressons-nous au satellite lunaire Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) de la NASA, lancé en juin 2009 et toujours en orbite

autour de la Lune, entre 50 et 200 km d'altitude [2], [3].

Mesures de pentes et aspects géologiques avec Lunar quickmap

Premières images

Sur le site de Lunar quickmap³, les images sont regroupées sous la forme d'une carte interactive d'accès rapide. Plaçons la souris sur la région du mur droit, légèrement en haut et à gauche de Tycho (ici le sud est en bas). Et agrandissons la zone avec la molette. On obtient les résultats des figures 10, suivant l'échelle voulue, qui s'affiche en bas à droite. Les coordonnées apparaissent en bas à gauche. Les zooms forts correspondent à des photos LROC. Toute la surface lunaire n'est alors pas accessible. Lorsque la pente du mur droit est éclairée, le matériau du sol pentu brille intensément.

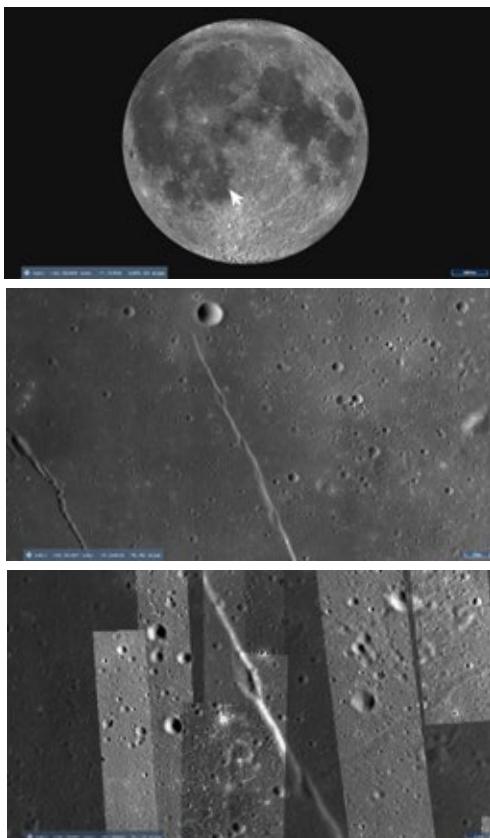


Fig.10. Image NASA de la sonde Lunar Reconnaissance Orbiter Camera extraite de [Lunar quickmap](#). Ici, le sud est en bas, à l'inverse des images précédentes.

- a. On place la souris sur la mer des Nuées.
- b. Avec un premier zoom, les plus petits cratères visibles font environ 180 m de diamètre.
- c. En zoomant davantage, les plus petits cratères visibles font environ 40 m de diamètre. La pente est recouverte de matériau à fort albédo (brillance).

³ <https://quickmap.lroc.asu.edu/>

Mesures de pente et hauteur H

L'altimètre laser embarqué (Lunar Orbiter Laser Altimeter = LOLA) a permis de déterminer les pentes et altitudes. Ces dernières donnent lieu à des cartes difficiles à exploiter à l'échelle du kilomètre. Aussi, intéressons-nous aux pentes : la couche de leurs valeurs locales en degrés peut être superposée à l'image. Il suffit de cliquer sur les trois traits horizontaux à gauche (« layers »). Sélectionnons « LRO LOLA » puis « SLDEM 2015 SLOPE ». Ne pas oublier de lancer l'application en cliquant sur le petit carré jouxtant « SLDEM ... ». On obtient alors une image du type de la figure 13.

Les couleurs indiquent les valeurs locales de pente

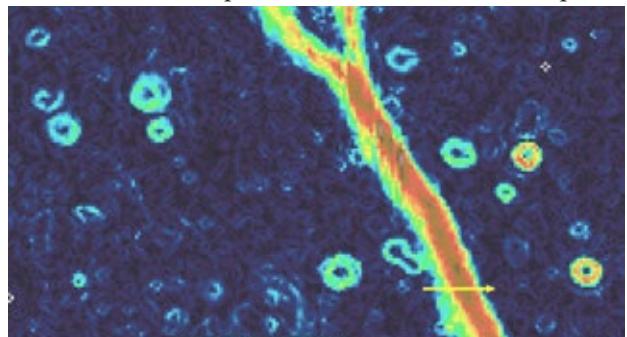


Fig.11. Pentes du terrain mesurées par la couche (LAYERS) LRO LOLA, option SLDEM 2015 SLOPE, fruit des mesures de l'altimètre laser. La pente est indiquée par la couleur : bleu clair (13°), jaune (23°), rouge (33°), rouge sombre (plus de 40°).

en degrés ; de plus, en déplaçant la souris-pointeur dans le champ, la pente locale s'affiche. On peut donc la mesurer suivant un axe privilégié et reporter le résultat dans un tableau. Par une intégration numérique simple on retrouve le profil et l'altitude H (figure 12).

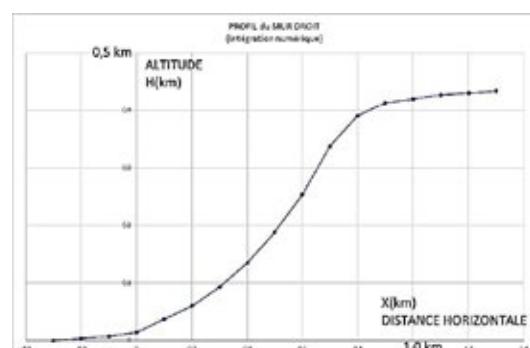


Fig.12. Reconstitution de la coupe réelle du mur droit (suivant la flèche jaune de la figure 11) par intégration numérique avec Excel. $H(n+1) \approx H(n) + \tan(\text{pente}) * \Delta X$. Le pas ΔX vaut 0,1 km. Il existe des zones plus abruptes (jusqu'à 70° de pente).

Ces résultats présentent deux surprises :

- la largeur du mur est plus faible que celle déterminée au télescope, et communément admise : plutôt 1 km que 2 km ;

- la hauteur H approche les 430 m dans la zone de mesure, en accord avec la mesure télescopique précédente mais plus élevée que celles de la littérature [1]. En résumé, en moyenne, la pente est plus raide que ce qui est admis couramment. On confirme avec les cartes d'altitude, toutefois moins locales.

Couche géologique

En activant la couche « Geologic features & Maps » puis « Unified Geologic Map » on voit apparaître les différentes zones géologiques (figure 13).

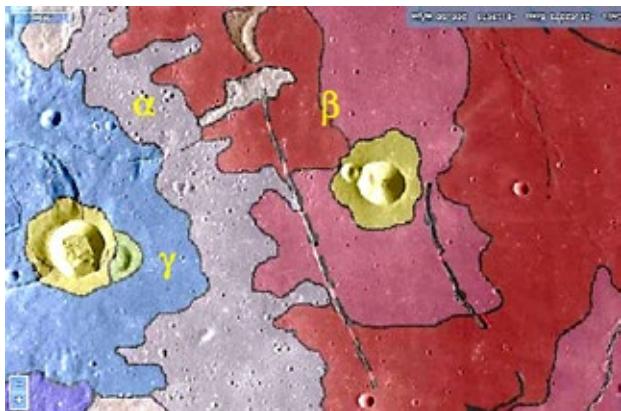


Fig.13. Nature géologique des terrains par la couche (LAYER) « Geologic features and maps », option « unified geologic layer » (document NASA).

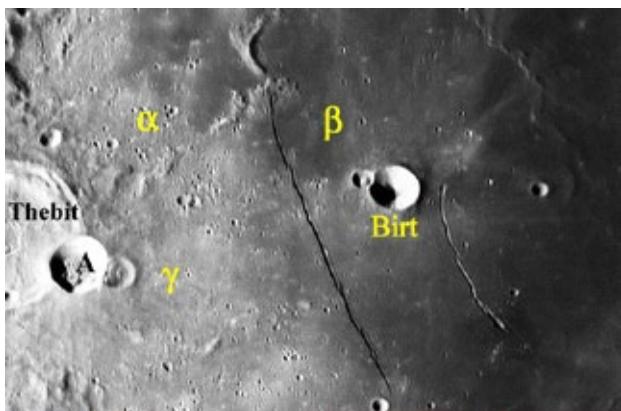


Fig.14. Comparaison contrastes-zones géologiques avec la figure 13 :

- α : zone la plus ancienne fortement cratérisée (terra unit) ;
- β : zone plus récente faiblement cratérisée (upper mare unit) ;
- γ : zone supérieure remodelée par Thebit (upper crater unit) ;
- A et Birt sont parmi les formations les plus récentes (crater unit).

Les plus anciennes, « terra unit », sont les plus cratérisées. 500 millions d'années plus tard, ces zones primitives ont été envahies et recouvertes partiellement par les laves des mers « mare unit ». C'est peut-être lors du refroidissement qu'une succession de 5 ou 6 failles alignées – toujours visibles – ont constitué le mur droit. Puis les impacts de météorites ont créé les cratères Thebit A et Birt (« crater unit »). Enfin un cratère secondaire est venu

déformer Thebit A (« secondary crater unit »). Tous ces événements ont été probablement étalés entre -4 milliards et -2 milliards d'années environ.

Pour terminer notre voyage dans le temps et l'espace, offrons cette une vision très détaillée (métrique) de la pente et de ses rochers d'éboulis :

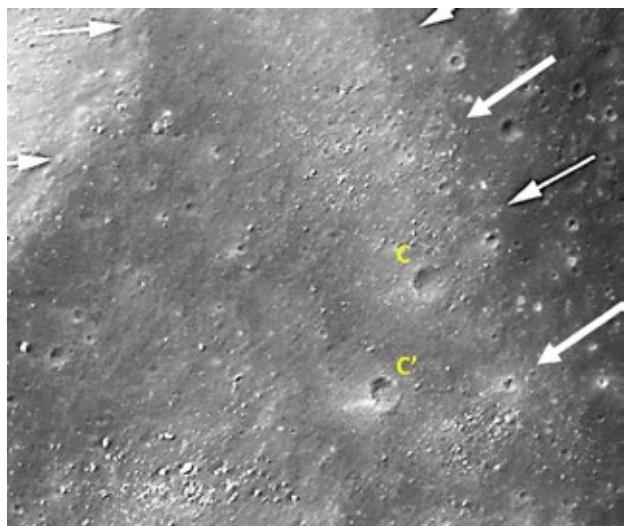


Fig.15. Gros plan sur la pente du mur droit par LROC en 2011, avec les rochers d'éboulis de taille métrique. Sur la pente, les 2 cratères (c, c') font 20 m de diamètre. En haut à droite la ligne de crête (flèches blanches). En haut à gauche ligne de crête d'un cratère connexe de taille kilométrique.

Enfin le cliché pris par les astronautes d'Apollo XVI, figure 18, nous emporte dans un rêve d'exploration future mais bien réelle cette fois.

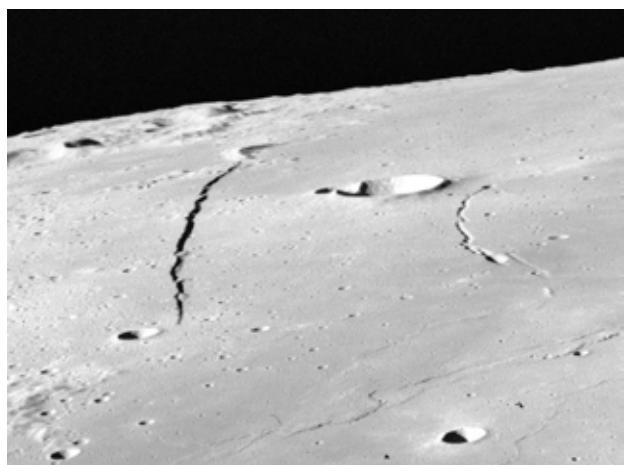


Fig.16. Rupes Recta vu par Apollo XVI- fin avril 1972 (cliché NASA).

[1] Atlas de la lune chez Gründ par Antonin Rükl p134 carte 54, p201).

[2] <https://www.lroc.asu.edu/about>

[3] <https://www.lroc.asu.edu/about/whereislro>

LE COIN DES PETITS CURIEUX

En cette période hivernale et pluvieuse, Émilie est chez elle. Un jeune garçon frappe à sa porte.

- Bonjour, tu es Émilie ? – Oui.

- Moi, je suis Damien, le frère d'Alexis. Tu te souviens de lui ?

E. – Oui, mais cela doit faire plus de cinq ans qu'il venait me voir. Que fait-il maintenant ?

D. – Il est en terminale et il fait des sciences, il aime ça.

E. – Et toi en quelle classe es-tu ?

D. – Moi je suis en CM2. Alexis m'a dit de venir te voir car tu connais beaucoup de choses et que tu pourrais m'expliquer.

E. – Tu as des devoirs de calculs à faire ?

D. – Non c'est à cause de Maël mon copain. Il m'a dit que chez lui, parfois dans le port, il n'y a plus d'eau et que les bateaux reposent sur la vase.

E. – Où habite-t-il ?

D. – C'est en Bretagne, dans le Morbihan. Mais c'est un menteur. Cet été je suis allé faire de l'Optimist. Je suis resté plusieurs jours, j'ai bien regardé et je n'ai jamais vu le port vide.

E. – Où étais-tu en vacances ?

D. – J'étais à Hyères.

E. – Tu as tout à fait raison, comme tu l'as observé, à Hyères le port ne se vide jamais.

D. – Ah ! Je savais qu'il m'avait raconté des blagues.

E. – Et non, ton copain a également raison. Sur les côtes de Bretagne parfois la mer se retire au loin et les ports se vident. C'est ce que l'on appelle les marées.

D. – Ah bon ! Et elle va où toute cette eau ?

E – Tu vois tu as de la chance, j'étais justement en train de lire un article là-dessus.

Et elle montre à Damien l'écran de son ordinateur sur lequel il découvre :

Force d'attraction de cette étoile sur B : $F_A = G \frac{m_A \times m_B}{(d+r)^2}$

Force de marée : $F_A - F_B = G \frac{m_A \times m_E}{(d-r)^2} - G \frac{m_B \times m_E}{(d+r)^2}$

$$F_A - F_B = G \times m_A \times m_E \times \left(\frac{(d+r)^2 - (d-r)^2}{(d-r)^2(d+r)^2} \right)$$

D. – oh ! là là ! mais ça veut dire quoi tout ça ?

E. – Ne t'inquiète pas, en CM2 nous n'avons pas besoin de ces formules.

D. – Peut-être que je les comprendrai plus tard. Mais les marées c'est quoi ?

E. – Regarde le stylo que j'ai entre mes doigts. Que se passe-t-il si je le lâche.

D. – Il tombe.

E. – Oui, mais pourquoi tombe-t-il ?

D. – Parce que tu l'as lâché.

E. – En fait c'est la Terre qui l'attire.

D. – Ah bon !

E. – C'est la même chose pour la goutte de pluie, la feuille de l'arbre ou toi quand tu rates une marche d'escalier. On dit que la Terre exerce une force sur ces objets. C'est la gravitation.

D. – Alors quand une pomme tombe de l'arbre c'est que la Terre exerce une force sur elle !

E. – Tu ne crois pas si bien dire ! Mais en plus le stylo exerce aussi une force sur la Terre.

D. – Oui, mais cette force est plus faible.

E. – Non elle a même valeur que la force exercée par la Terre sur le stylo.

D. – Ce n'est pas possible. Alors pourquoi la Terre ne bouge pas ?

E. – Toi tu as une certaine force physique. Essaie de pousser le vase qui est sur la table. ... Bien. Essaie maintenant de déplacer le meuble contenant la vaisselle.

D. – Je ne peux pas.

E. – Tu vois que la même force peut déplacer un vase, mais pas un meuble. C'est la même chose avec la Terre et le stylo. La force exercée par la Terre sur le stylo permet de le déplacer, mais la même force exercée par le stylo sur la Terre n'a aucun effet. Plus le corps sera gros, plus la force qu'il exercera sur les autres corps sera grande.

Connais-tu des corps ou des objets très gros ?

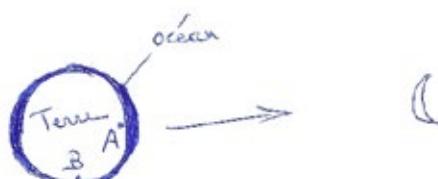
D. – Oui, la Terre, les planètes, le Soleil, la Lune...

E. – Nous y voilà ! La Terre attire la Lune, ...

D. – C'est pour ça qu'elle reste toujours près de la Terre.

E. – Et la Lune attire la Terre sur laquelle il y a des océans constitués d'eau liquide...

Émilie fait un schéma.



Et bien quand la Lune passe au-dessus d'un océan, elle va attirer l'eau, déformer l'océan et créer un bourrelet, la mer sera haute.

E. – Par exemple si une personne est en A, elle voit une marée haute. Par contre la personne qui est en B verra une marée basse.

D. – Alors c'est pour ça que le port se vide.

E. – Oui, mais est-ce que le port va rester toujours vide ?

D. – Euh !

E. – La Lune sera - elle toujours au-dessus de A ?

D. – Non parce que la Lune tourne autour de la Terre.

E. – Oui, mais en combien de temps la Lune fait un tour autour de la Terre ?

D. – Ça je sais. Alexis m'a expliqué, c'est presque un mois.

E. – Et la Terre, elle fait un tour sur elle-même en combien de temps ?

D. – Un jour.

E. – Regarde le schéma. Quand la Terre tourne, le point A revient sous la Lune (marée haute) au bout de 24 h. En fait il faut un peu plus car en un jour la Lune s'est déplacée.

D. – Alors il y a une marée haute par jour et le port se vide une fois par jour. Maël avait raison.

E. – Attends ce n'est pas fini. Viens avec moi au garage.

Le jeune Damien trop pressé d'aller raconter ce qu'il sait à son frère, n'a pas trop envie de suivre Emilie. Mais celle-ci insiste et Damien la suit dans l'escalier qui mène au garage. D'un tiroir elle sort une chambre à air.

D. – Tu vas réparer ton vélo ?

E. – Non, c'est pour toi.

D. – Mais je voulais comprendre les marées et je n'ai pas besoin de chambre à air.

Emilie prend des ciseaux, coupe un morceau de chambre à air, le coupe dans le sens de la longueur et le met à plat. À l'aide d'un compas elle trace un cercle bleu sur le caoutchouc. Elle dépose au centre du cercle une rondelle de diamètre inférieur. Damien est de plus en plus intrigué.

E. – Voilà, je vais essayer de te faire comprendre ce qui se passe avec la Lune. D. – Parle plus fort, avec ton masque je n'entends pas bien.



E. – OK ! ... La rondelle représente la Terre et le cercle bleu l'eau des océans.

D. – Oui, mais n'y a pas d'eau partout autour de la Terre.

E. – Tu as raison mais c'est pour te faire comprendre le phénomène. On va dire que le petit point bleu sur la rondelle c'est toi au bord de l'océan. Les clous sont fixes. Je coince un côté du caoutchouc dans l'eau et mes mains à droite vont représenter la Lune.

D. – Et alors ?

E. – Regarde si la Lune (mes mains) attire l'eau, que se passe-t-il ?

D. – Ah oui ! Il y a marée haute où je suis et après quand la Terre va tourner il y aura marée basse.

E. – Oui, mais regarde bien.

Émilie recommence l'expérience.

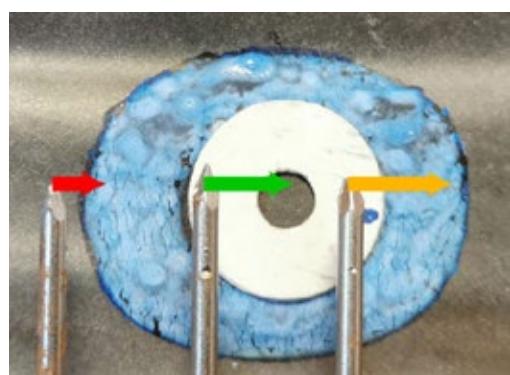


D. – C'est ce que j'ai dit, il y a marée haute où je suis.

E. – Regarde bien l'ensemble de la Terre.

D. – Ah oui ! De l'autre côté aussi il y a marée haute.

E. – Tu vois également que par rapport aux clous, sur le caoutchouc, la rondelle « terre » et l'eau se sont déplacées.



D. – Comme la Lune qui attire la Terre.

E. – Exactement. Et ce qui est important, c'est que les parties proches de la Lune sont plus attirées que les parties qui en sont éloignées. C'est pour cela qu'il y a deux bourrelets.

D. – Et ils sont opposés.

E. – Quand la Terre aura fait un tour que se passe-t-il pour le point bleu ?

D. – Il aura fait un tour.

E. – Oui, et pour les marées ?

D. – Il va y avoir deux marées hautes par jour et le port de Maël va se vider deux fois par jour.

E. – Bravo tu as compris.

Damien qui était excité d'avoir compris a le regard qui s'égare, il semble soucieux et finalement réagit.

D. Mais ça ne marche pas ton truc avec la Lune.

E. – Et pourquoi ?

D. Si c'est vrai ce que tu dis, le port de Hyères devrait aussi se vider. Et ça je l'ai vu de mes yeux, il ne se vide jamais. ... Hein !

E. – Tu sais dans la nature les choses sont complexes et il n'est pas facile de tout expliquer simplement.

Ce que je t'ai dit c'est vrai pour de grandes quantités d'eau. Ce phénomène des marées se produit dans les océans. Hyères se trouve sur les bords de la Méditerranée. C'est une petite mer. Il y a aussi des marées mais la variation de niveau est de l'ordre de vingt centimètres.

D. Et dans les océans c'est combien ?

E. – Cela dépend du lieu. Il faut tenir compte des fonds marins, de la découpe de la côte. Par exemple à l'île de Ré il y a des variations de 4 à 5 m, mais dans la baie du Mont Saint-Michel cela peut atteindre 15 m.

D. – Ouaaah ! C'est un record !

E. Il y a plus ailleurs, au Canada, dans la baie d'Ungava on peut avoir 17 à 20 m.

D. – Il faut que je le dise à Maël.

E. – Je vais te dire quelque chose qui va encore plus t'étonner.

D. – Dis-moi.

E. Quand la Lune passe au-dessus d'un pays, le sol se soulève.

D. – De combien de mètres ?

E. – Non, juste quelques centimètres. Si un jour tu vas visiter la Cité de l'Espace à Toulouse, tu verras à l'extérieur, une dalle de béton qui montre de combien se soulève le sol (environ 20 cm) à Toulouse

Damien reste rêveur. Il va de surprise en surprise.

E. – Mais tu vois je ne t'ai pas tout dit car les marées dépendent de la Lune mais aussi du Soleil, du lieu où elles se produisent. De plus la marée haute ne se produit pas quand la Lune est au plus haut dans le ciel, mais il y a toujours un décalage.

Ce qu'il te faut surtout retenir c'est ...

D. – ... Qu'il y a deux marées hautes par jour et qu'il faut beaucoup d'eau, des océans.

E. – Tiens tu me fais penser à quelque chose. J'ai un voisin qui m'a dit que le corps humain est constitué de 60 % d'eau et que la Lune qui crée les marées devait avoir une action sur lui. Qu'est-ce que tu en

penses ?

D. – Je pense que ce n'est pas possible. Si la Lune n'arrive pas à faire des marées dans la Méditerranée comment elle pourrait agir sur lui.

E. – C'est bien, tu as retenu les points importants. Tu sais c'est bien que tu te sois intéressé aux marées. Le phénomène a été observé il a des millénaires. Au début les Grecs ne le connaissaient pas car ils ne naviguaient que sur la Méditerranée, mais dès qu'ils sont allés sur les océans atlantique et indien, ils l'ont constaté.

Certains comme Ératosthène et Pythéas ont même noté qu'il y avait marée haute en présence de la Lune. À l'époque personne n'avait la possibilité d'expliquer ce phénomène.

Au Moyen Âge, diverses explications ont été avancées. Adélard de Bath pensait que les marées étaient dues aux courants marins, Paul Diacre imaginait des gouffres sous-marins qui se remplissaient et se vidaient.

D. – Ça c'est pas trop bête !

E. – Robert Grossetête et Roger Bacon pensaient que c'était la lumière de la Lune qui créait les marées.

Kepler expliquait que la Lune avait une action magnétique sur les eaux de la Terre.

Tu vois même des personnes comme Galilée ou Descartes qui n'avaient pas les outils scientifiques nécessaires se sont trompés, l'un pensait que les marées étaient dues aux mouvements de rotation et de révolution de la Terre et l'autre que c'était l'action de tourbillons.

D. – Dis-moi, c'est toi qui as expliqué les marées ?

E. – Non, c'est Newton. Grâce à la loi de la gravitation. Tu sais ce que c'est ?

D. – Oui tu m'as dit tout à l'heure. Tous les corps s'attirent entre eux, mais s'ils ne sont pas très gros, on ne voit pas les effets. Maintenant il faut que je file, je vais raconter cela à mon frère.

E. – N'hésite pas à venir me voir une prochaine fois. Tu sais cela me fait très plaisir. Au revoir.

Damien enfourche son vélo et disparaît. Émilie un peu rêveuse reprend la lecture de son article.

Jean Ripert

Le coin des petits curieux en ligne

- La gravitation CC 142 p. 21-22 ;
- Qu'est-ce qu'une comète ? CC 144 p. 37 ;
- Les étoiles sont-elles loin ? CC 145 p. 28 ;
- De la vie sur 186f ? CC 146 p. 28 ;
- Vénus dévoilée. CC 148 p. 27-28 ;
- Que d'eau ! CC 149 p. 25 ;
- Arc-en-ciel. CC 150 p. 15-17 ;
- Que de lumière ! CC 151 p. 36-37.

Calculer la distance focale d'un système optique

Dominique Boust, Président et le fondateur du Groupe Astronomique de Querqueville (Banlieue de Cherbourg)

Une série de manipulations simples avec les instruments courants dans les clubs astronomiques : appareils photos numériques ou caméras CCD. L'article décrit des méthodes permettant de mesurer la distance focale d'une lunette à partir de la distance entre deux étoiles ou à partir d'images planétaires.

Dans cet article, nous nous proposons de présenter quelques méthodes pour calculer l'échelle des images réalisées avec des capteurs numériques (APN, caméras CCD) associés à des objectifs photographiques ou des télescopes ou lunettes astronomiques. L'échelle de l'image est la grandeur qui relie un angle mesuré sur le ciel (exprimé en degrés, minutes ou secondes, par exemple) à son équivalent linéaire sur le capteur (exprimé en mm ou μm , par exemple) ; l'échelle de l'image s'exprime en $^{\circ}/\text{mm}$, par exemple. Cela revient donc à déterminer avec quelle focale une image a été réalisée.

Paramètres descriptifs des systèmes optiques utilisés en astronomie

Les instruments ou les montages optiques mis en œuvre pour observer les objets célestes peuvent être caractérisés simplement par deux grandeurs :

- **le diamètre (D)** : c'est-à-dire le diamètre de la pièce optique qui regarde vers le ciel (lentille simple ou système complexe dans le cas d'une lunette ou d'un téléobjectif ; miroir concave dans le cas d'un télescope ou de certains téléobjectifs). Le diamètre d'un instrument détermine son pouvoir collecteur (sa capacité à faire parvenir une certaine quantité de lumière vers l'œil de l'observateur ou vers le capteur) et son pouvoir séparateur (sa capacité à permettre de distinguer des détails). En photographie,

on peut limiter la quantité de lumière parvenant jusqu'au capteur en réduisant le diamètre utile par un diaphragme ;

- **la focale (F)** : c'est la distance qui sépare le centre du système optique de son foyer, c'est-à-dire du lieu où se forme l'image d'un objet situé à l'infini ; la taille de l'image produite par le système optique ne dépend que de sa focale. La connaissance de la focale permet de relier la dimension apparente d'un objet sur le ciel à sa taille linéaire sur le capteur. La focale nominale d'un montage optique peut être modulée par différents systèmes réducteurs ou amplificateurs ou le tirage (télescopes Schmidt-Cassegrain). Elle peut alors être appelée *focale résultante*.

On appelle rapport d'ouverture, le rapport F/D ; en photographie, il est communément et improprement appelé *diaphragme*.

Quelques rappels d'optique géométrique

Dans un système optique simple, la focale F est donnée par la formule ci-dessous où x est la taille de l'image produite au foyer et α l'angle sous-tendu sur le ciel :

$$F = x / \tan \alpha \quad (1)$$

Le schéma ci-dessous (figure 1) permet de comprendre pourquoi.

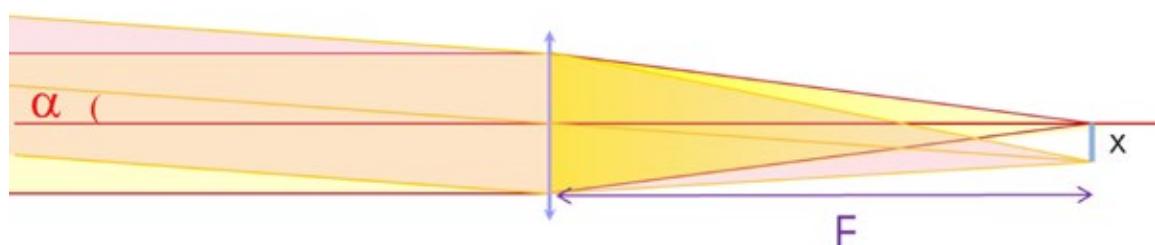


Fig.1. Production d'une image de taille x d'un objet situé à l'infini, sous-tendant un arc α sur le ciel, par une lentille simple de focale F . Rappelons que les rayons lumineux passant par le centre de la lentille ne sont pas déviés.

On pourrait penser que la focale d'un objectif, d'une lunette et d'un télescope est une valeur connue avec précision ; en fait, il n'en est rien. En voici quelques exemples :

- la focale réelle d'un objectif photographique n'est pas forcément celle affichée ;
- la focale d'un zoom photographique est variable de sorte qu'il n'est pas aisément connue la valeur précise pour une prise de vue spécifique ;
- la focale réelle d'une lunette ou d'un télescope n'est pas nécessairement celle affichée sur le tube ;
- la focale réelle d'une lunette ou d'un télescope peut être modifiée par l'utilisation de systèmes optiques qui l'augmentent (lentille de Barlow) ou la réduisent (réducteur de focale) ;
- la focale réelle d'un télescope de type Schmidt-Cassegrain ou Ritchey-Chrétien dépend de la distance entre les miroirs primaire et secondaire. Dans la plupart des télescopes du commerce, la mise au point se fait par déplacement du miroir primaire, ce qui se traduit donc par une variation de la distance focale. Dans ces télescopes, une image nette peut être obtenue pour des tirages très différents, donc avec des focales résultantes différentes (cf. annexe).

La formule (1) montre que pour connaître la focale, il faut être capable de :

1. déterminer la taille x (en mm, par exemple) d'un objet (Lune, écart entre deux étoiles) sur une image numérique ;
2. calculer α (en degrés décimaux, par exemple) d'après des données connues. Ces étapes font l'objet des deux sections suivantes.

Déterminer la taille d'un objet sur une image numérique

Une image numérique est composée de pixels rangés en lignes et colonnes (matrice) ; chaque pixel est caractérisé par ses coordonnées dans la matrice et sa valeur qui dépend de la quantité de lumière qu'il a reçue. De nombreux logiciels permettent d'avoir accès aux coordonnées des pixels d'une image. La taille x d'un objet sur l'image est donc donnée par la formule suivante :

$$x = p \times N$$

où p est la taille d'un pixel (c'est une donnée constructeur par exemple $3,7 \mu\text{m}$) et N , le nombre de pixels entre deux points : diamètre lunaire, écart entre deux étoiles...

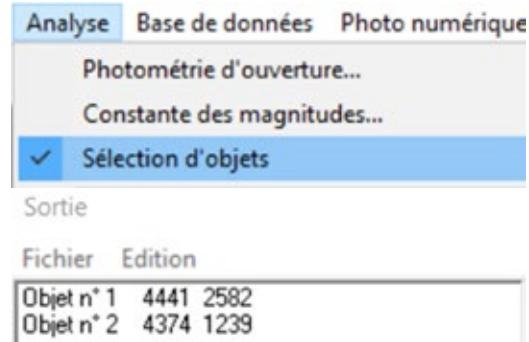
Pour mesurer N , on peut faire la différence entre les coordonnées x_1 et x_2 de deux points situés sur une même horizontale, ou entre les coordonnées y_1 et y_2

de deux points situés sur une même verticale. Dans le cas le plus général, le nombre de pixels N recherché sera donné par la formule suivante :

$$N = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Pour les images à grand champ, on préférera faire la mesure près du centre de l'image pour éviter les problèmes de distorsion qui ne sont pas traités ici. Tout dépend de la précision recherchée.

Sous Iris, on peut facilement mesurer les coordonnées d'un point en utilisant l'onglet Analyse, puis en cochant Sélection d'objets ; en cliquant sur les points à mesurer, Iris génère un fichier de Sortie qu'on peut enregistrer (Onglet Fichier) qui contient les coordonnées x et y des objets pointés sur l'image.



Cas particulier : déterminer le diamètre de la Lune en pixels

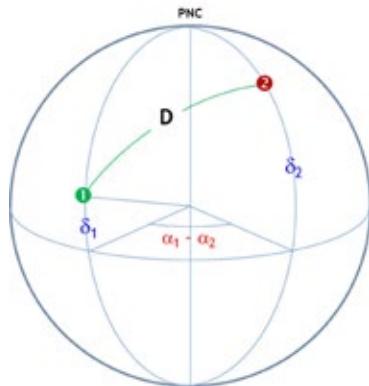
La commande CIRCLE [SEUIL] d'Iris permet de générer un cercle dont le programme renvoie les coordonnées du centre et le rayon. La valeur [SEUIL] est affinée jusqu'à ce que le cercle calculé passe au mieux par les contours de l'objet, comme sur l'image ci-dessous. La valeur du rayon conduit à un diamètre de 505 pixels ; la taille du pixel étant de $3,7 \mu\text{m}$, on obtient la taille de la Lune sur le capteur, soit $1,868 \text{ mm}$. Cette méthode vaut aussi pour les disques planétaires.



Commande	
>circle 100	
>	
Sortie	
Fichier	Edition
X = 3008.62	Y = 1935.54
R = 252.46	

Calculer l'angle sous-tendu sur le ciel

Dans le cas le plus général, il s'agit de déterminer l'angle D qui sépare deux étoiles connaissant leurs coordonnées équatoriales : l'ascension droite α (équivalent à la longitude sur Terre) et la déclinaison δ (correspondant à la latitude sur Terre). Le schéma ci-dessous définit les éléments utiles au calcul dans un système de coordonnées célestes équatoriales : les étoiles 1 et 2, séparées par l'angle D , ont pour coordonnées respectives (α_1, δ_1) et (α_2, δ_2) . PNC est le pôle Nord céleste.



L'angle D recherché est donné par la formule suivante :

$$D = \arccos(\sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2))$$

Il faut bien sûr mettre toutes les valeurs dans la même unité, typiquement en degrés décimaux (format DD.ddd). Les ascensions droites sont habituellement données en heures, minutes, secondes ; il convient donc de les convertir (format HH.hhh puis DD.ddd).

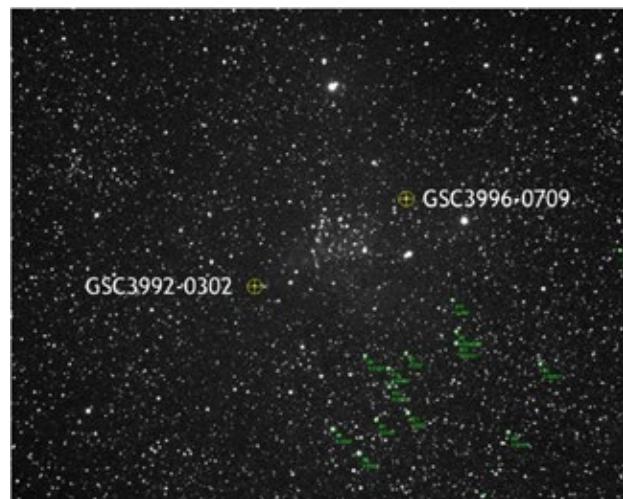
Attention, sous Excel, les formules trigonométriques fonctionnent avec des radians (format RR.rrr). Voici un exemple numérique réalisé sous Excel.

Ascension droite						
h	m	s	HH.hhh	DD.ddd	RR.rrr	
Etoile 1	5	26	18	5,438	81,6	1,424
Etoile 2	4	56	60	4,950	74,2	1,296
Déclinaison						
°	'	"	DD.ddd	RR.rrr	RR.rrr	
Etoile 1	28	36	27	28,608	0,499	1,424
Etoile 2	33	9	58	33,166	0,579	1,296

Distance Etoile 1 - Etoile 2
7,761 ou 7° 45' 40"

Calcul de la distance focale d'une lunette à partir de la distance de deux étoiles

Nous sommes maintenant en mesure de déterminer la distance focale de l'instrument avec lequel a été réalisée une image numérique. Voici une image de l'amas NGC7380 dans la constellation de Céphée ; elle a été réalisée avec une lunette de 80 mm de diamètre et de 480 mm de focale, équipée d'une caméra ATIK460ex en binning 2×2. La taille des pixels de cette caméra est de 4,54 μm.



On y a repéré deux étoiles dont on a récupéré les coordonnées sur un logiciel de cartographie céleste qui ont été reportées dans le tableau ci-dessous.

	AD				DEC			
	hh	mm	ss	°	dd	mm	ss	°
GSC3996-0709	22	46	6,21	341,526	58	12	23,62	58,207
GSC3992-0302	22	48	55,6	342,232	58	0	27,97	58,008

Ces valeurs conduisent à une distance entre les deux étoiles de $0,423^\circ$ ou $1521''$. Cette donnée peut aussi être obtenue à partir d'un logiciel de carte du ciel, bien sûr. Connaissant la taille du pixel (qu'il faut multiplier par 2 puisque l'image a été faite en binning 2×2), on peut obtenir la distance entre les deux étoiles qui est de 3,534 mm. Avec ces valeurs, on peut calculer une distance focale de 479 mm, ce qui est vraiment conforme avec la valeur annoncée par le constructeur. L'échelle de l'image est de $3,91''/\text{pixel}$; c'est aussi l'échantillonnage de l'image. D'autres mesures faites sur la même image conduisent à estimer l'incertitude à environ ± 1 mm. Dans le cas des images planétaires (Soleil, Lune, planètes), on peut suivre une démarche analogue illustrée dans les exemples qui suivent.

On peut aussi signaler le site nova.astrometry.net qui donne l'échantillonnage à partir de l'ensemble d'une image.

Calcul de la distance focale à partir d'images planétaires

Image du disque lunaire

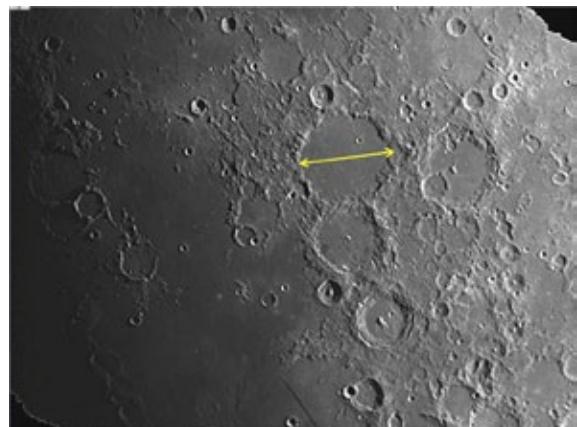


L'image ci-dessus a été réalisée avec un télescope de 200 mm de focale, le 18/10/2020 à 16 h 28 TU. Le diamètre apparent de Lune était alors de $2002,3''$. Le diamètre de la Lune, déterminé comme précédemment exposé (nombre de pixels \times taille du pixel) y est de 1,87 mm. Ces données conduisent à une focale de 192,5 mm. D'autres mesures ont confirmé cette valeur sensiblement différente de celle attendue.

Image d'un cratère lunaire

L'image de la Lune qui suit a été réalisée avec une caméra DMK31 (pixels de $4,65 \mu\text{m}$) à la focale d'un télescope Schmidt-Cassegrain de 203 mm de diamètre, équipé d'un porte-oculaire JCD, le 01/05/2020 à 19 h 26 TU. La taille du cratère Ptolémée (double flèche sur l'image) sur le capteur,

déterminée comme précédemment exposé est de 178,5 pixels, soit $830 \mu\text{m}$. La distance de la Lune (calculée en coordonnées topocentriques pour Paris¹) est de 367 058 km. Dans la mesure où le cratère utilisé est proche du centre du disque lunaire, on pourra se contenter de retrancher de la distance Terre-Lune, le rayon de la Lune pour déterminer la distance réelle du cratère. Comme le cratère Ptolémée fait 153 km de diamètre, on peut en déduire son diamètre apparent, soit $86,4''$. Ces données conduisent à une focale de 1 982 mm. Si l'on n'avait pas retranché le rayon lunaire de la distance Terre-Lune (cas d'un cratère mesuré sur le limbe), on aurait trouvé une focale de 1 991 mm.



Autres mesures sur des cratères lunaires

D'autres mesures réalisées avec un télescope de Schmidt-Cassegrain et différentes combinaisons conduisent à des focales sensiblement différentes de celles attendues (1 639 mm au lieu de 1 200 mm avec un réducteur $\times 0,6$; 4 404 mm au lieu de 4 000 mm avec une Barlow $\times 2$) comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Combinaison optique	Focale résultante
Meade 203 mm + porte-oculaire JCD + réducteur $\times 0,6$ + DMK31	1 639 mm
Meade 203 mm + porte-oculaire JCD + Barlow $\times 2$ + DMK31	4 404 mm

Attention, si l'on veut retrouver la même focale d'une fois à l'autre, il ne faut absolument pas manipuler la molette de mise au point du télescope Schmidt-Cassegrain.

Conclusion

Nous avons vu que la distance focale (ou la distance focale résultante) d'un système optique, aussi

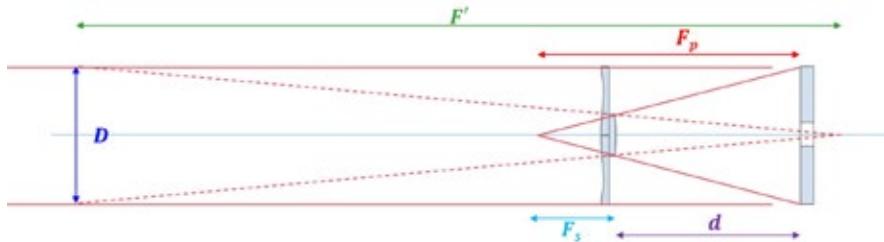
¹ <http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?for ms>

complexe soit-il (objectifs photographiques, lunettes, télescopes et leurs combinaisons optiques associées), produisant une image réelle d'un objet donné situé à l'infini, est le seul paramètre instrumental qui détermine la taille de l'image ainsi produite au foyer dudit système optique. La détermination de

la focale permet bien sûr de connaître l'échelle de l'image et donc d'y opérer toutes sortes de mesures astrométriques. Elle permet aussi de connaître le champ apparent couvert par un capteur donné : appareil photographique numérique ou caméra...

Annexe. Calcul de la focale résultante d'un télescope Schmidt-Cassegrain

Le schéma optique ci-dessous fournit les caractéristiques des éléments constitutifs d'un télescope Schmidt-Cassegrain et les valeurs utiles au calcul.



F_p et D : focale et diamètre du miroir primaire ;

F_s : focale du miroir secondaire (valeur négative car ce miroir est divergent) ;

d : distance entre le miroir primaire et le miroir secondaire ;

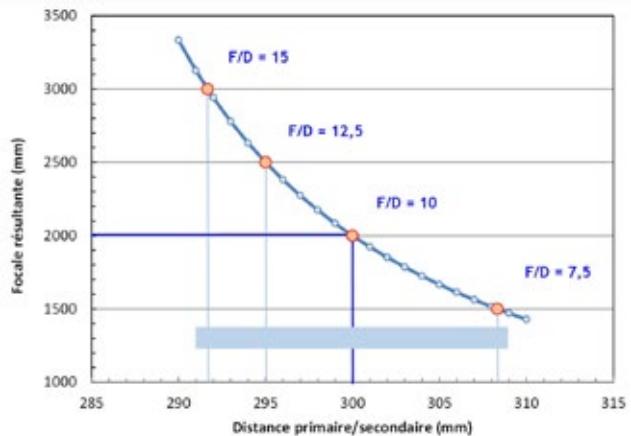
F' : focale résultante du système.

Par exemple, pour un Schmidt-Cassegrain de diamètre 200 mm, en prenant les valeurs suivantes :

$F_p = 400$ mm ; $d = 300$ mm ; $F_s = -125$ mm, on obtient une focale résultante $F' = 2\ 000$ mm ($F'/D = 10$; valeur annoncée par le constructeur), en appliquant cette formule :

$$\frac{1}{F'} = \frac{1}{F_p} + \frac{1}{F_s} - \frac{d}{F_p \cdot F_s}$$

Elle permet d'explorer la gamme des focales résultantes qui peuvent être obtenues en faisant varier la distance entre les miroirs primaire et secondaire. Sur le graphe ci-dessous, on a représenté la focale résultante, F' en fonction de la distance primaire secondaire, d . Y figurent également les rapports d'ouverture obtenus avec les focales résultantes 1 500, 2 000, 2 500, 3 000 mm. Les segments bleus matérialisent la configuration nominale ($D = 200$ mm et $F' = 2\ 000$ mm). La barre bleu ciel représente la gamme des valeurs de d accessibles. On voit que la focale résultante varie de 1 500 à 3 000 mm pour des variations de la distance primaire secondaire relativement modestes, soit entre 308,6 et 291,7 mm. Les accessoires ajoutés derrière le télescope (porte-oculaire Crayford motorisé, roue à filtres, réducteur de focale, système d'autoguidage hors axe) conduisent nécessairement à augmenter le tirage et donc la focale résultante.



On pourra voir à ce sujet l'excellent article de Michel Vampouille sur la mise au point du télescope de Schmidt-Cassegrain sur le site de la Société d'astronomie populaire de Limoges².

² <https://saplimoges.fr/variation-de-la-focale-d-un-schmidt-cassegrain-avec-la-mise-au-point/>

LECTURE POUR LA MARQUISE

Météorologie de l'espace

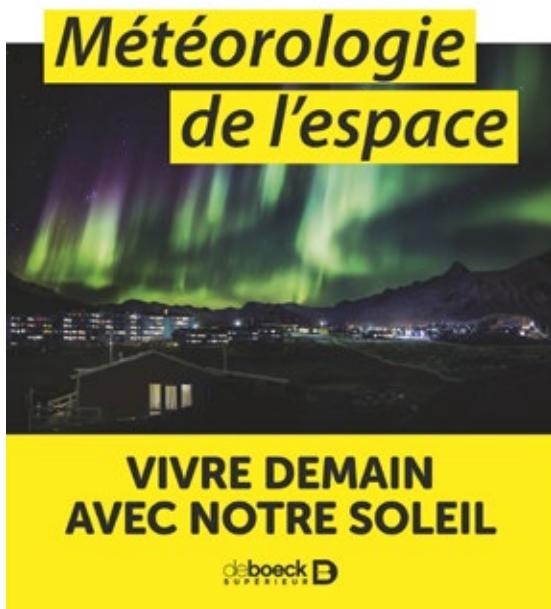
Jean Lilensten, Frédéric Pitout, Marina Gruet,
Joao Pedro Cadhile Marques (deboeck)

Cet ouvrage est structuré en cinq grandes séquences qui engendrent les cinq chapitres du livre :

- Le temps des interrogations ;
- Le temps de la découverte de notre espace ;
- Le temps de la complexité ;
- Le temps des impacts ;
- Le temps de la prévision.

J. LILENSTEN • F. PITOUT
M. GRUET • J.P. MARQUES

Préface d'Alain Cirou



Dans l'introduction les auteurs indiquent que la météorologie de l'espace est une discipline récente qui vise à prévoir « les variations de l'activité solaire et à quantifier leurs effets sur l'environnement spatial et notre monde technologique ».

L'approche est délibérément historique avec des détours variés : la vie spécifique d'un scientifique, un instrument particulier, l'histoire de l'ère spatiale française, les débris spatiaux, les bases de la modélisation ou de l'intelligence artificielle...

L'objectif est aussi de « rendre hommage aux précurseurs et de mettre en perspective les progrès acquis ».

Le temps des interrogations

Dans l'introduction de l'ouvrage, les auteurs annonçaient que les deux premiers chapitres « regorgent de noms scientifiques ». Effectivement en débutant l'histoire avec Thalès de Milet, puis l'ambre jaune, la pierre d'aimant, l'électrostatique, les hémisphères de Magdebourg, la bouteille de Leyde, le paratonnerre de Franklin... il y a beaucoup de monde qui défile avant d'arriver à Christian Birkeland et sa sphère « Terrella », premier à imaginer et réaliser une expérience pour modéliser le phénomène des aurores. Vient ensuite la description des nombreuses expéditions polaires et la rencontre avec cet étrange « phénomène naturel qui empourpre le ciel septentrional ».

Le chapitre se termine en notant le peu de connaissances sur le Soleil et les nombreuses interrogations sur la nature de son énergie, sur l'apparition de taches et sur l'étrange ballet des comètes qui se précipitent vers lui.

Le temps de la découverte de notre espace

Il est surtout consacré à l'étude du Soleil. C'est la découverte dans le Soleil de l'hélium, un élément inconnu sur Terre ; c'est la mise en évidence du vent solaire, ce flux de plasma, globalement neutre, composé de particules électrisées puis la découverte qu'il transporte avec lui le champ magnétique solaire. C'est enfin l'étroit couplage entre le vent solaire et le champ géomagnétique, qui provoque la déformation du champ géomagnétique.

Le temps de la complexité

Avec ce troisième chapitre, on s'intéresse au cœur du mécanisme qui régit les étroites relations existantes entre le Soleil et la Terre. Ce mécanisme d'une grande complexité a été mis en évidence il y a peu. Il explique l'origine des aurores polaires.

L'étude de l'interaction Soleil-Terre en 3D fut possible surtout grâce à l'utilisation de satellites groupés selon une géométrie particulière permettant d'étudier l'évolution du phénomène dans l'espace et dans le temps. Le phénomène essentiel est celui de la reconnexion magnétique qui permet un transfert d'énergie à la matière ; elle se produit lorsque les lignes de champ issues du Soleil se recombinent avec celles du champ géomagnétique pour adopter une nouvelle configuration. L'ouvrage décrit

minutieusement ce processus. Le reste du chapitre est consacré à l'étude dynamique du Soleil, suite à une série de missions : OSO, Ulysses, SoHO, STEREO. Ces études ont mis en évidence les caractéristiques de la couronne solaire, en particulier la découverte des trous coronaux, situés près des pôles du Soleil et à l'origine du vent solaire rapide.

Le temps des impacts

Ce chapitre étudie des effets parfois très spectaculaires. Celui du 13 mars 1989 au Québec reste particulièrement célèbre. Il fut provoqué par une puissante éjection de masse coronale issue du Soleil. L'orage magnétique engendre des courants induits qui circulent dans tous les milieux conducteurs : voies ferrées, lignes électriques, pipe-lines etc. Brutalement tous les transformateurs du Québec se sont écroulés en cascade et six millions de personnes ont été privées d'électricité pendant 9 h.

Ces orages magnétiques causent des dégâts sur les satellites, perturbent les télécommunications et peuvent même entraîner la perte de satellites de plusieurs millions d'euros.

Dans ce chapitre on donne une indication du nombre de satellites qui peuplent la banlieue terrestre et des risques qui résultent de l'abondance des débris spatiaux.

Sur Terre les perturbations concernent le positionnement GPS, l'électronique embarquée dans les trains, les communications HF, les radars, les centrales électriques, la prospection pétrolière etc. Une partie particulièrement intéressante concerne l'influence de l'activité solaire sur le climat.

Le temps de la prévision

Cela devrait couronner tout ce qui précède. Les auteurs pensent en effet que demain nous devrions présenter la météo du Soleil et de l'espace à côté de la météo classique.

L'étude fait pour cela une large place aux données massives (*big data*), au développement fulgurant des réseaux de neurones artificiels et à l'intelligence artificielle, en particulier aux classes d'algorithmiques d'apprentissage automatique (*machine learning, deep learning*). Une occasion de revisiter l'histoire depuis la *machine de Turing*.

En conclusion, ce livre un peu encyclopédique montre surtout que l'Univers est dynamique et instable ; nous vivons dans l'atmosphère solaire et les risques pour l'industrie et les milieux militaires sont importants.

Christian Larcher

École d'été d'astronomie

L'école d'été d'astronomie 2021 se déroulera à Col Bayard-GAP

du 18 au 25 août.

C'est un moment privilégié d'échanges entre enseignants, médiateurs et professionnels de l'astronomie.

Thème : « Temps et astronomie »

Des ateliers diurnes et nocturnes en petits groupes permettront d'aborder l'astronomie à l'école, au collège et au lycée.

Évidemment, les mesures sanitaires en vigueur seront respectées.

URGENT : Réservation d'inscription et d'hébergement avant le 27 juin

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

Solutions des mots croisés de la page 31

Horizontalement

1. Mimas. Ida. **2.** Élara. Lem. **3.** Himalia. **4.** Il. ms. **5.** Callisto. **6.** Equ (abréviation de la constellation Equuleus). SSP (Système solaire portail sur <https://ssp.imcce.fr>). **7.** Europe. **8.** Néon. Trio. **9.** Néréide. **10.** Eis. Été. **11.** SO. Uranie.

Verticalement

1. Médicéennes. **2.** Il. Laqué. Io. **3.** Mah. Lurons. **4.** Ariel. One. **5.** Sam. IAP (Institut d'astrophysique de Paris). RER. **6.** Ans. Étête. **7.** Ill. TS. Rien. **8.** Déimos. Id. **9.** Amas. Phoebe.