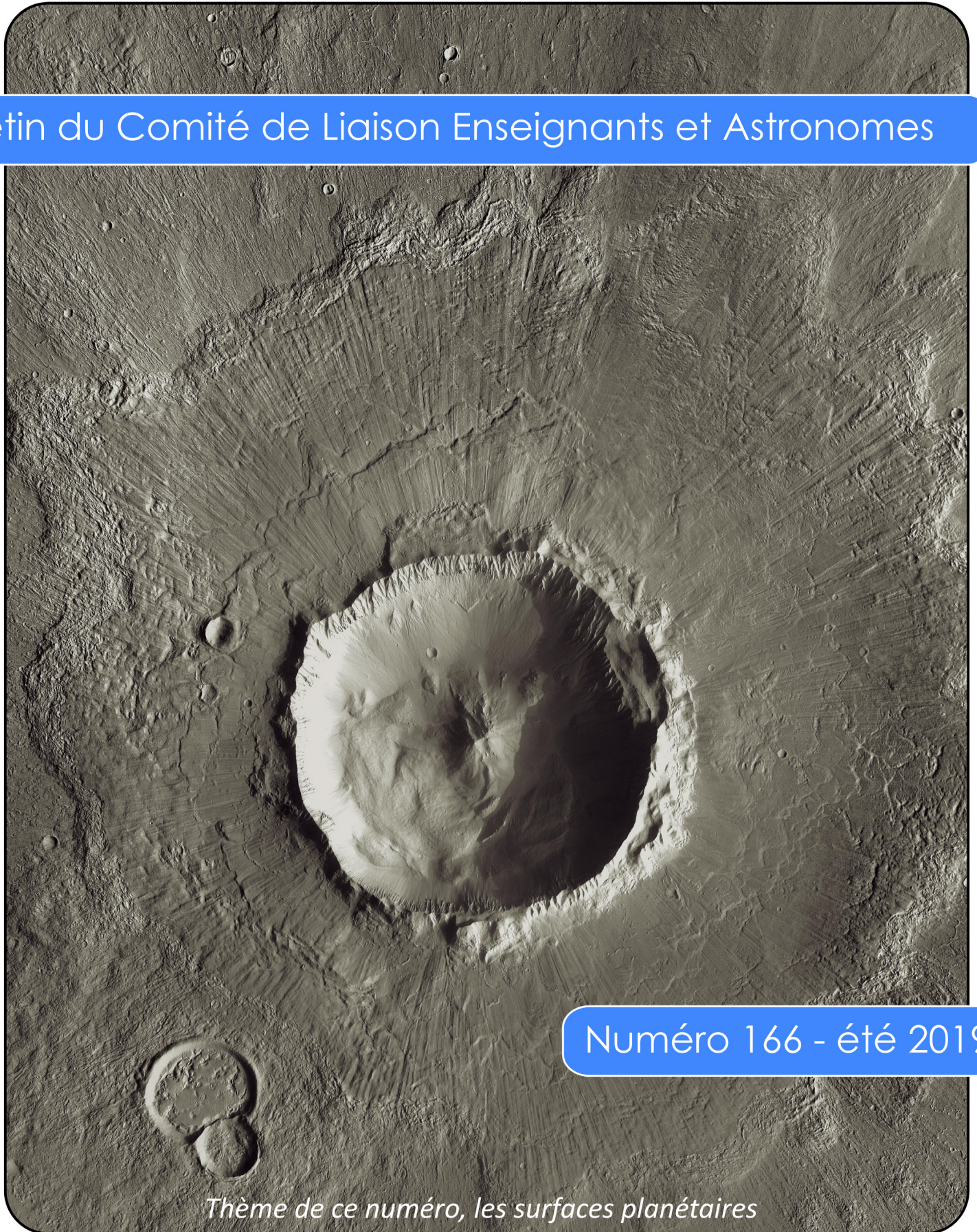


LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 166 - Juin 2019 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 166 - été 2019

Thème de ce numéro, les surfaces planétaires



ISSN 0758-234X

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

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

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

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

Présidents d'honneur :

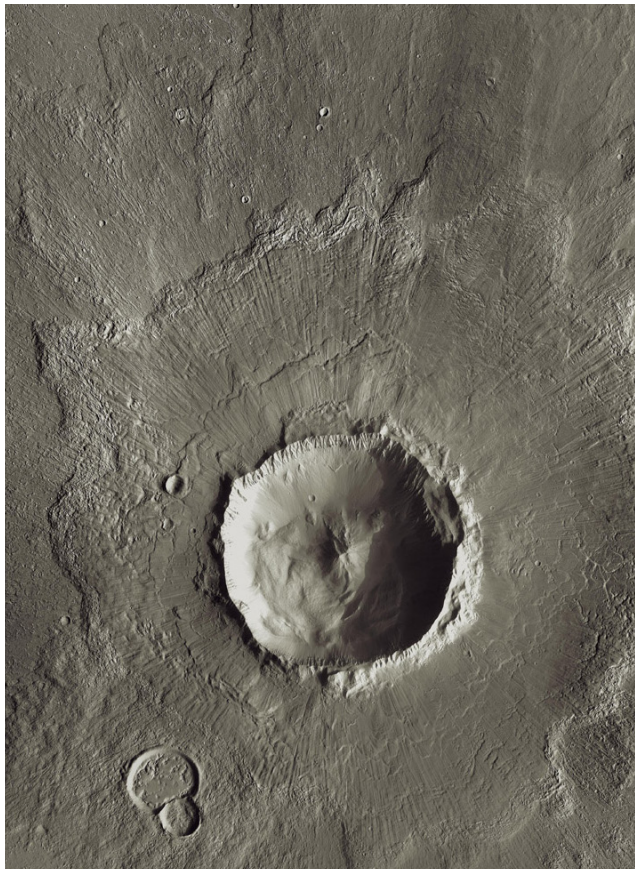
Jean-Claude Pecker
Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel

Bureau du CLEA pour 2019

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Danièle Imbault
Secrétaire adjointe : Nathalie Cartier

Responsables des groupes

Vie associative : Jean-Michel Vienney
Cahiers Clairaut : Christian Larcher
Productions Pédagogiques : Pierre Causeret
École d'Été d'Astronomie : Danièle Imbault
Responsables du site : Jean-Michel Vienney



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

Thomas Appéré, Michel Bobin, Sylvain Bouley, Danielle Briot, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Bernard Colomb, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Pierre Magnien, Chloé Michaud, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Sylvie Thiault, Pierre Thomas, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 166 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Le cratère Bacolor sur Mars

Les surfaces des planètes telluriques, des astéroïdes et des satellites sont parsemées de cratères d'impact. Celui-ci, situé sur Mars, mesure une vingtaine de km de diamètre.

On peut remarquer sur la photo que les éjectas consécutifs à l'impact sont eux-mêmes parsemés de quelques petits cratères plus récents (crédit NASA/JPL-Caltech/Arizona State University).

Les Cahiers Clairaut

Été 2019

Éditorial

Le 29 mai 1919, il y a donc un siècle, la Lune éclipsa le Soleil pendant 5 minutes... rendant mondialement célèbre Albert Einstein. En effet, ce phénomène permit de répondre à la question : les rayons lumineux provenant des étoiles sont-ils déviés en passant à proximité du Soleil, et si oui est-ce selon les lois de la gravitation de Newton ou celles de la nouvelle théorie d'Albert Einstein ? Vous retrouvez le principe de la méthode dans ce numéro.

Le thème du numéro est consacré aux « surfaces planétaires ». Toutes les planètes du Système solaire ont été visitées par des sondes truffées d'appareils scientifiques les plus performants. Les résultats obtenus ont permis d'obtenir une quantité importante d'informations que des spécialistes ont retravaillées pour déterminer la structure, la composition et éventuellement l'évolution de chaque planète.

Un article vous invite à proposer à vos élèves une activité à la fois ludique et formatrice. Il s'agit de leur demander de concevoir une expédition sur la planète Mars en utilisant les données disponibles les plus récentes. L'activité s'inscrit dans l'actualité de l'atterrissage de la sonde spatiale InSight le 26 novembre dernier. Cette sonde a déposé un sismomètre de construction française ultra-sensible, qui enregistra sa première secousse le 6 avril 2019.

Ce numéro ne pouvait pas manquer d'évoquer la Lune dont la surface fut foulée pour la première fois par l'homme il y aura 50 ans, le 21 juillet 1969. C'est également l'occasion de vous proposer des conseils pour réaliser de belles photos de notre satellite naturel.

Enfin, un test d'erreurs à trouver sur les abondantes représentations de Séléné occupera vos vacances d'été.

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

Avec nos élèves

Faire des images de la Lune

Jean-Michel Vienney p 2

Thème : les surfaces planétaires p 6

Article de fond

Pluton, une planète naine à la morphologie étonnante !

Pierre Thomas p 7

Article de fond

Le volcanisme des planètes telluriques (1)

Chloé Michaut p 13

Avec nos élèves

Les cratères de la Lune

Sylvie Thiault p 18

Avec nos élèves

Conception d'une mission spatiale à destination de la planète Mars

Thomas Appéré p 21

Mots croisés surfaces planétaires p 25

Article de fond

Les cratères d'impact à la surface des corps planétaires, un chronomètre géologique pour retracer l'histoire géologique

Sylvain Bouley p 26

Observation

Éclipse partielle de Lune le 16 juillet 2019 au soir p 29

Observation

Ciel de l'été 2019

Pierre Causeret p 30

Notions de base

Cartes du ciel, cartes de la Terre (3)

Michel Bobin, Pierre Causeret p 31

Devoir de vacances

Cherchez les erreurs

Danielle Briot p 35

Article de fond

Il y a 100 ans, le triomphe de la relativité générale

Pierre Magnien p 37

Vie associative

Nouveau président au CLEA

Frédéric Pitout, p 40

Solutions des mots croisés p 40

Faire des images de la Lune

Jean-Michel Vienney, vienney_j_m@orange.fr

Comment photographier la Lune ? Et quels renseignements peut-on tirer d'une image ? Voici quelques pistes exploitables avec des élèves.

Les choix techniques

Objectifs et capteurs

Nous nous intéressons ici exclusivement aux photographies que l'on peut faire avec un appareil photo de type reflex¹. Première solution, on utilise un téléobjectif de grande focale. Deuxième solution, on fixe le boîtier seul, sans objectif, au foyer d'un instrument, lunette ou télescope, sans oculaire, à l'aide d'une bague dite « T2 » ; l'instrument remplace alors le téléobjectif. Il est aussi possible d'intercaler un doubleur (ou multiplicateur) de focale entre le boîtier et la bague T2.

Le choix de la focale de l'objectif (ou de l'instrument) dépendra du projet, selon qu'on cherche à obtenir une image de la Lune entière, ou à montrer des détails les plus petits possibles à sa surface. Le diamètre angulaire de la Lune étant de l'ordre de $0,5^\circ$ (il varie en fait entre $0,49^\circ$ et $0,56^\circ$) on obtient au foyer d'un objectif de 1 m de focale une image dont le diamètre sera au plus de 9,75 mm. Elle tient donc aisément sur le capteur de la plupart des appareils reflex numériques au format APS-C (variable selon les marques, de l'ordre de 22 mm \times 15 mm). Avec un téléobjectif ou une lunette de 600 mm de focale on pourra à la fois voir le disque entier et distinguer de très nombreux détails. Au delà de 1,5 m de focale, l'image de la Lune sera bien sûr beaucoup plus détaillée, mais le disque sera plus grand que le capteur.

Si on cherche à obtenir des images de très petits détails à la surface de la Lune, il faudra disposer d'un instrument de focale beaucoup plus grande et, pour s'affranchir de la turbulence atmosphérique dont les effets deviennent alors très visibles, il sera plus avantageux d'utiliser une caméra rapide reliée à un ordinateur, pour réaliser des séquences vidéo. Des logiciels permettent d'extraire de ces dernières

les images les plus contrastées, supposées les moins affectées par la turbulence, puis d'« empiler » les images sélectionnées pour améliorer le rapport « signal/bruit ». Nous ne développerons pas plus ici cette technique, aussi utilisée pour l'imagerie planétaire : elle a été décrite dans le numéro 130 des Cahiers Clairaut² et de nombreux tutoriels sont disponibles sur la toile pour s'y initier.

Soigner la mise au point

Opération cruciale et toujours délicate, la mise au point est grandement facilitée depuis que les appareils disposent du mode « live view » il suffit d'agrandir l'image sur l'écran de contrôle et d'utiliser le bord du disque si on veut procéder manuellement.

Si on utilise un téléobjectif, la mise au point automatique peut aussi donner de bons résultats sous réserve de bien choisir parmi les différents modes proposés. Il est en revanche préférable de désactiver le stabilisateur d'image.

Pour obtenir une bonne qualité d'image, il est aussi important de choisir une nuit avec peu de turbulence atmosphérique et sans vent.

Sensibilité et temps de pose

Le plus souvent, l'ouverture numérique (f/D) est fixée par l'instrument. Il ne reste donc qu'à choisir la sensibilité (en ISO) et le temps de pose afin d'exploiter au mieux la dynamique du capteur, tout en faisant attention à ne pas le saturer. Le choix de la bonne sensibilité résulte d'un compromis : une sensibilité plus élevée se traduisant par une image plus « bruitée ». Selon les appareils le meilleur choix se situe entre 200 et 400 ISO.

Par ailleurs la luminosité de la Lune est telle que le temps de pose sera pratiquement toujours de l'ordre d'une fraction de seconde : typiquement de l'ordre de 1/500 s pour la Pleine Lune avec un téléobjectif de 600 mm ouvert à $f/8$ mais il peut varier dans de fortes proportions selon la hauteur et la phase de la Lune.

¹ On peut aussi photographier la Lune avec un appareil non reflex ou même un smartphone fixé derrière l'oculaire d'un instrument mais les résultats seront moins bons. Voir par exemple le n° 116 des Cahiers Clairaut p. 27 de 2006 (clea-astro.eu onglet archives des Cahiers Clairaut).

² http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_130_05.pdf

Heureusement, les appareils actuels permettent de multiplier les essais et de déterminer facilement et rapidement le temps de pose correct, d'autant plus que beaucoup d'appareils permettent d'afficher les zones saturées de l'image, et l'histogramme (voir encadré page 5).



Fig.1. La Lune gibbeuse photographiée avec un téléobjectif de 600 mm ouvert à 8 (1/1000 s à 400 ISO).



Fig.2. Extrait d'une photographie réalisée avec un boîtier reflex avec doubleur de focale fixé sur une lunette de 100 mm de diamètre et 900 mm de focale, ce qui donne l'équivalent d'un téléobjectif de 1,8 m (400 ISO. 1/160 s).

On peut voir ici les cratères Tycho (en haut, avec son piton central), Logomontanus (le plus grand, en dessous à droite)... La formule du 1^{er} encadré p. 5 donne 0,49»/pixel.

Le suivi est-il indispensable ?

Le temps de pose étant en général très court (sauf dans certains cas comme pour photographier la lumière cendrée par exemple), le déplacement de l'image de la Lune au cours de la pose restera inférieur à un pixel³. Il n'est donc pas indispensable de disposer d'une monture équatoriale motorisée. En revanche un pied bien stable est absolument recommandé et

3 Par exemple, le déplacement maximal sera de 1 pixel pour une pose de 1/50 s avec une focale de 3 m et un capteur APS-C de 6 Mpixels.

on veillera à éviter au maximum toutes les sources de vibrations en utilisant un déclencheur souple ou le retardateur et même pour les appareils reflex en relevant le miroir avant la pose (c'est d'ailleurs le cas si on part du mode « live-view »).

Les formats d'enregistrement

La valeur de l'intensité lumineuse enregistrée par chaque pixel est représentée par un nombre entier. Selon les appareils, ce nombre peut prendre 256 (codage sur 8 bits) à 65 536 (codage sur 16 bits) valeurs discrètes (des codages sur 12 ou 14 bits sont aussi courants). Chacune de ces valeurs sera ensuite associée à un niveau de luminosité sur l'écran de visualisation et les logiciels de traitement permettent de dilater plus ou moins certaines plages pour mieux mettre en évidence les détails et améliorer le contraste et la lisibilité de l'image. Plus la profondeur de numérisation sera élevée, plus il sera possible de faire apparaître a posteriori des détails dans les régions sombres ou des nuances dans les tons moyens de l'image. Or, dans la plupart des cas la profondeur de numérisation en JPEG est de 8 bits (soit 24 bits par pixel pour une image en couleurs qui est constituée des 3 plans). On a donc tout intérêt, malgré le volume beaucoup plus important des fichiers produits, à enregistrer les images au format RAW qui conserve la totalité de l'information enregistrée par chaque photosite. Il sera toujours possible ensuite convertir les images traitées au format compressé JPEG, le retour en arrière étant en revanche impossible.

Quelques pistes d'exploitation

Disque ou sphère ?

Une question qui peut paraître à première vue naïve, mais à laquelle l'étude de l'image en utilisant un logiciel d'analyse comme AstroImageJ⁴ permet d'apporter des réponses précises et argumentées.

Pour commencer on peut préciser la forme et les dimensions du disque lunaire en ajustant manuellement un cercle. L'ajustement se fait sans difficulté et le menu « Mesures » du logiciel nous permet directement d'en obtenir le diamètre. Avec le croissant de la figure 3, on obtient $R=1226$ pixels. Connaissant l'échantillonnage $\varepsilon = 1,44''/\text{pixel}$ (voir encadré page 5), on obtient directement le diamètre angulaire :

$$\alpha_L = 1765'' = 29' 44''.$$

On peut comparer cette valeur avec celle donnée par Stellarium pour la même date : $\alpha_{LS} = 29' 33''$.

4 <https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>

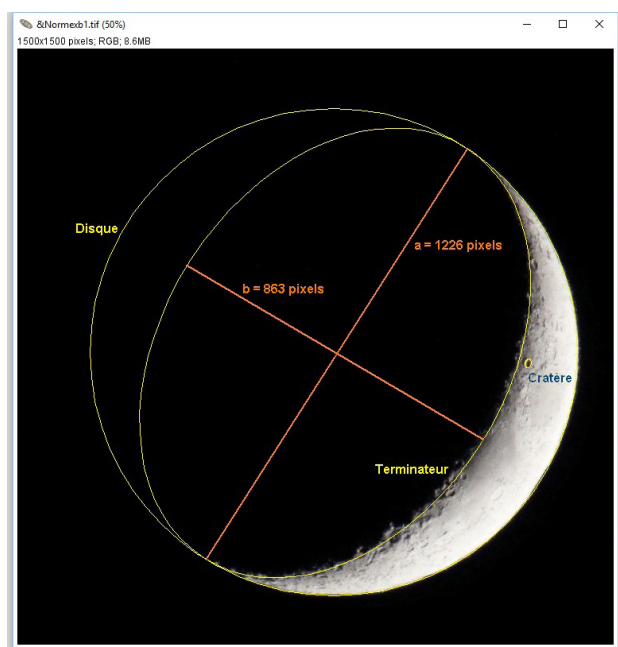


Fig.3. Exploitation de l'image d'un croissant de Lune avec AstroImageJ.

Intéressons-nous maintenant au terminateur (la limite jour-nuit sur la Lune) : avec le même logiciel on peut vérifier que sa forme est bien une ellipse ce qui constitue un bon argument pour une Lune sphérique. En effet, sur une sphère, la limite de la partie éclairée est un grand cercle qui, vu depuis la Terre, apparaît en perspective comme une ellipse. Difficile de l'expliquer autrement...

Le logiciel permet de mesurer ses axes :

$a = 1\,226$ pixels et $b = 863$ pixels.

On peut en tirer la valeur de l'angle Soleil - Terre - Lune ou élongation (figure 4) : $\cos \theta = b/a = 0,705$ soit $\theta = 45^\circ 10'$ (Stellarium donne $\theta_L = 45^\circ 47'$).

En faisant l'hypothèse d'un mouvement uniforme de période $T = 29,53$ jours on peut même retrouver un

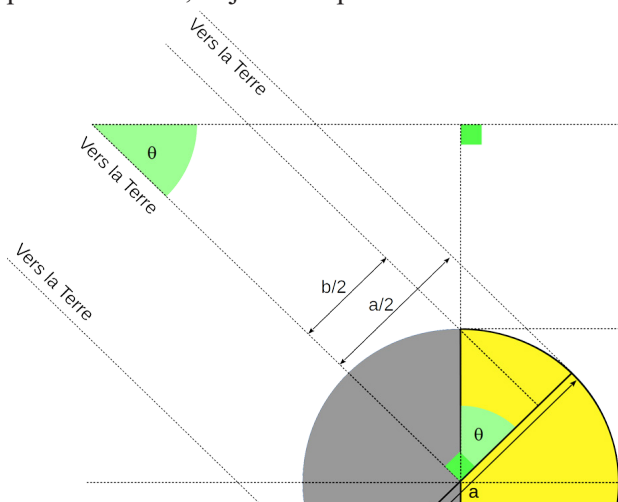


Fig.4. Détermination de l'élongation à partir du rapport des axes de l'ellipse.

âge approximatif de la Lune de 3,7 jours (3,8 selon Stellarium).

En procédant de la même manière sur une série de photos obtenues au cours d'une même lunaison, on peut alors suivre l'évolution du diamètre apparent donc de la distance Terre-Lune, retrouver approximativement les dates de passage à l'apogée et au périgée, et même tenter de montrer que le mouvement de la Lune n'est pas uniforme en évaluant son avance ou son retard par rapport au mouvement moyen déduit de sa période synodique.

Mesurer les cratères et les reliefs

Un autre argument en faveur d'une Lune sphérique vient de l'observation de ses cratères : on constate qu'ils sont pratiquement circulaires vers le centre du disque, et qu'ils apparaissent de plus en plus elliptiques quand on se rapproche du bord.

L'échantillonnage ayant été déterminé, il est relativement aisé d'ajuster une ellipse, la taille réelle du cratère supposé circulaire étant alors celle du grand-axe (figure 5).

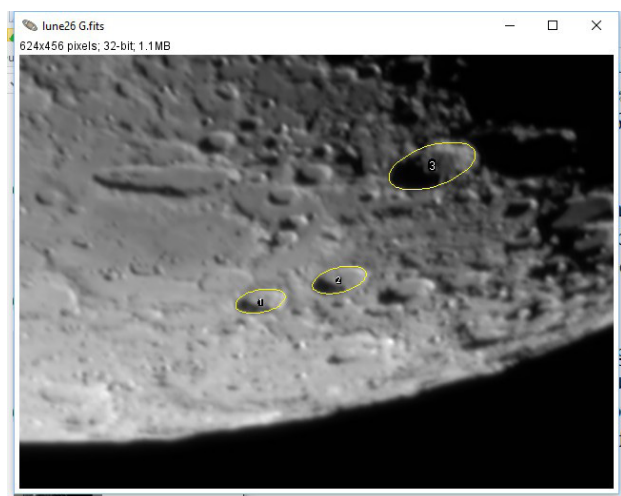


Fig.5. Image du pôle Sud de la Lune obtenue avec une caméra ToUCam au foyer d'un télescope de 1,8 m de focale et 20 cm de diamètre.

Taille d'un pixel : $5,6 \mu\text{m}$.

Échantillonnage : $3,11 \times 10^{-6}$ rad/pixel

Échelle déduite de la distance Terre-Lune (391 000 km) et de l'échantillonnage : $1,22 \text{ km/pixel}$.

Grand-axe des ellipses donné par AstroImageJ (en pixels) :

$a_1 = 52,7$ pixels soit 64 km ;

$a_2 = 58,2$ pixels soit 71 km ;

$a_3 = 94,9$ pixels soit 116 km .

Il s'agit des cratères Zucchius, Bettinus et Scheiner dont les diamètres donnés par l'atlas virtuel de la Lune sont 65 km , 71 km et 111 km .

On peut aussi tenter la mesure de la hauteur des reliefs à partir des ombres en suivant les méthodes proposées par Pierre Le Fur dans le numéro 139⁵ ou les exercices du HS10 Maths et Astronomie (voir

5 http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_139_08.pdf

Histogramme

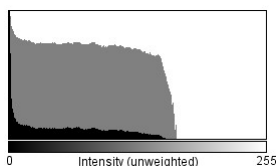
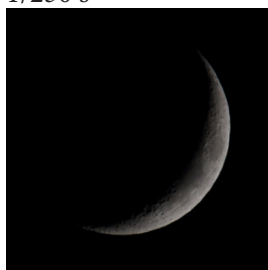
L'histogramme est un graphique sur lequel on représente le nombre de pixels (en ordonnée, échelle linéaire en noir, logarithmique en gris) correspondant à chaque intervalle d'intensité (échelle de gris en abscisse). Pour une image correctement exposée, aucun pixel ne devrait atteindre la valeur maximale (saturation) tout en utilisant au maximum la plage de la dynamique.

Les trois images ci-dessous ont été prises le 22 novembre 2017 vers 19 h 30 avec un EOS 70D et un objectif de 600 mm ouvert à f/8 avec une même sensibilité (400 ISO) et des temps de pose différents.

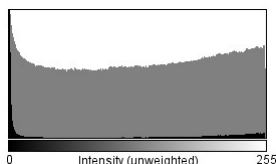
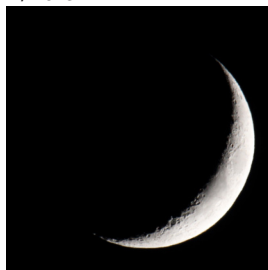
La première est « sous exposée » : une grande partie de la dynamique n'est pas exploitée, la seconde est à la limite de la surexposition, la troisième est très nettement surexposée.

On peut remarquer au passage que le rapport de luminosité est tel qu'avec une échelle linéaire de 256 niveaux il est impossible de faire sortir la lumière cendrée sans saturer le croissant.

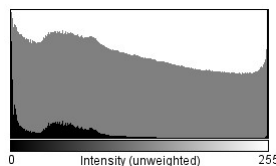
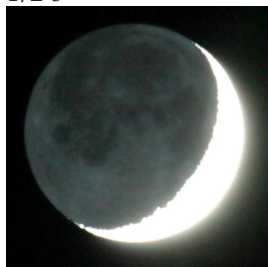
1/250 s



1/25 s



1/2 s



aussi sur l'orientation des ombres l'article de Pierre Causeret dans le numéro 140⁶ de notre revue).

Déterminer l'albédo et la nature du sol

Contrairement à l'idée souvent énoncée, la photographie de la Pleine Lune peut aussi être très intéressante. Il est en effet possible de déterminer, à partir d'une image au format RAW les albédos relatifs de diverses régions de la Lune (mers, cratères, éjectas...) ou encore comme l'a fait un groupe d'élèves dans un travail présenté aux Olympiades de Physique en 2012⁷. Mais nous devrions revenir sur ces mesures d'albédo dans un prochain article. ■

Échantillonnage

L'échantillonnage ϵ , souvent exprimé en secondes d'arc par pixel correspond à la taille angulaire de la région du ciel vue par un photosite (pixel) du capteur. C'est aussi l'angle sous lequel le côté de ce photosite est vu depuis le centre optique de l'objectif. Les dimensions du capteur (et a fortiori des pixels) étant petites devant la focale de l'objectif, on peut se limiter à un photosite situé sur l'axe optique et confondre son côté a et l'arc de cercle qu'il sous-tend.

En radian par pixel sa valeur est alors donnée par la relation

$$\epsilon_{rad} = \frac{a}{f}$$

En secondes d'arc par pixel :

$$\epsilon'' = \frac{a}{f} \times \frac{180 \times 3600}{\pi} \approx 2 \times 10^5 \times \frac{a}{f}$$

Par exemple pour l'image de la figure 1, obtenue avec un APN EOS 70D dont les pixels mesurent (selon la notice) $4,11 \mu\text{m}$ et un téléobjectif de 600 mm de focale, l'échantillonnage vaut en principe

$$\epsilon = 1,41''/\text{pixel}.$$

En fait le plus souvent, on ne connaît précisément ni la valeur du côté du pixel ni celle de la focale de l'objectif (données du constructeur). Il est donc pertinent de déterminer plus précisément l'échantillonnage, par exemple à partir de la réduction astrométrique d'une image du ciel. Dans le cas d'espèce, on a ainsi vérifié qu'il est plutôt voisin de $1,44''/\text{pixel}$, valeur utilisée pour les calculs de l'article et qui correspondrait à une focale de 590 mm.

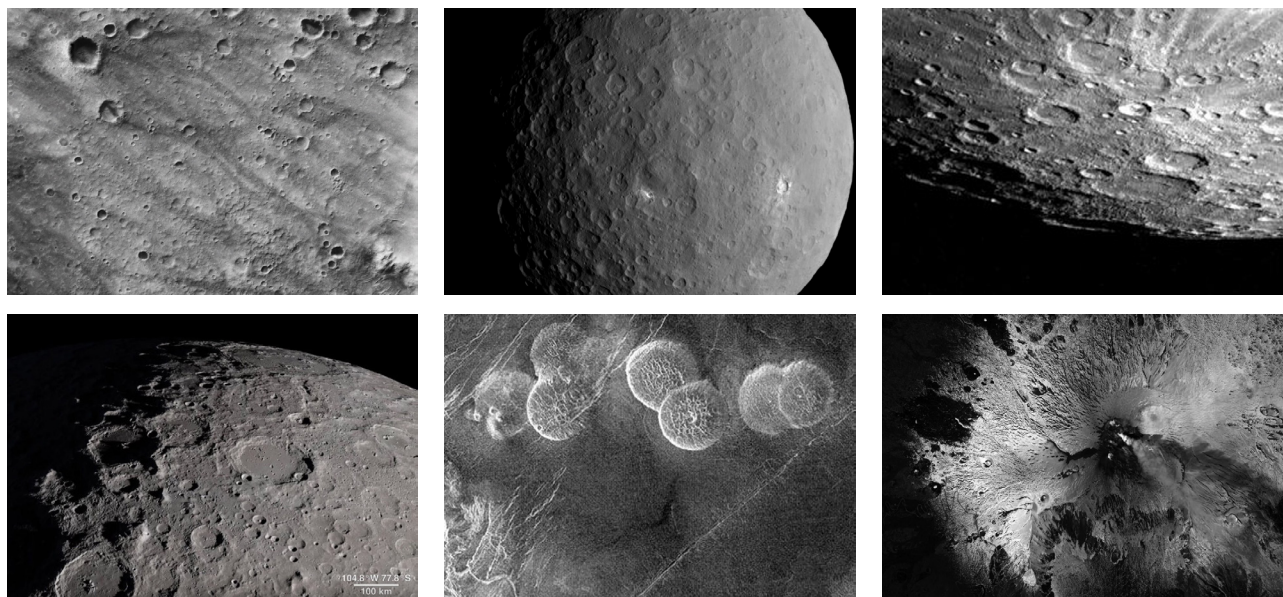


6 http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_140_07.pdf

7 https://odpf.org/images/archives_docs/19eme/memoires/groupeQ/memoire.pdf

THÈME LES SURFACES PLANÉTAIRES

Sauriez-vous reconnaître à quel astre appartient chacun de ces paysages ? Les images sont toutes en noir et blanc. Pour vous aider, en voici la liste : Cérès - Lune - Mars - Mercure - Terre – Vénus.



Réponses en bas de page.

Les surfaces planétaires dans les productions du CLEA

Les articles des pages qui suivent se rapportent aux surfaces des planètes, principalement aux cratères et aux volcans. Pour prolonger ce thème, vous trouverez des compléments dans les hors-séries et dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC, les numéros plus récents sont réservés aux abonnés numériques).

Dans le hors-série n° 10 Mathématiques et Astronomie

Hauteur d'une montagne sur la Lune p 27

Diamètre d'un cratère et hauteur des remparts p 28

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

Curiosity sur Mars n° 163 (2018)

Mercure, sœur de nébuleuse n° 153 (2016)

Vénus, la planète oubliée ? n° 148 (2014)

Ombre d'une montagne sur la Lune n° 140 (2012)

Simulation d'un cratère de météorite n° 139 (2012)

La Lune, ombre et lumière n° 139 (2012)

L'exploration de la planète Mars à l'aube du 3^e millénaire n° 127 (2009)

La hauteur des montagnes sur la Lune n° 111 (2005)

Mars et Vénus n° 73 (1996)

Réponses (de gauche à droite et de haut en bas)

1. Mars (Photo Mars Global Surveyor). On y voit les traces du rover Spirit.
2. Cérès (Crédit NASA / JPL-Caltech / UCLA / MPS / DLR / IDA / Justin Cowart).
3. Mercure, pôle Sud (Crédits NASA/Mariner).
4. Lune (NASA / LRO).
5. Vénus, Alpha Regio, avec ses « pancakes » (sonde Magellan / NASA).
6. Terre. L'Etna vu depuis l'ISS par Thomas Pesquet (ESA NASA).

ARTICLE DE FOND

Pluton, une planète naine à la morphologie étonnante !

Pierre Thomas, ENS-OSU Lyon

La sonde New Horizon a traversé le système plutonien, le 14 juillet 2015 en passant entre la planète naine Pluton (ex neuvième planète du système solaire) et son satellite Charon à la vitesse relative de 49 000 km/s. Malgré la distance et la vitesse de passage, le nombre de données et ce qui résulte de leur exploitation est stupéfiant, comme l'illustre cet article.

À part les études télescopiques effectuées depuis la Terre, la petite planète Pluton n'est connue que grâce au survol unique qu'a effectué la sonde New Horizons le 14 juillet 2015. Cette mission a permis de préciser certains paramètres physiques et chimiques : rayon (1 186 km), masse volumique ($1860 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), température superficielle (40 à 50 kelvins), pression au sol (environ 1 pascal), composition de l'atmosphère (90 % de N_2 , 9 % de CO , des traces de CH_4 ...). Pour le reste, on s'attendait à des résultats inédits sur la composition des glaces de surface (cf. article de Thomas Appéré CC 165), sur la dynamique de la très faible atmosphère, sur l'interaction entre les glaces et l'atmosphère... et on n'a pas été déçu. Mais c'est surtout de la morphologie et de l'activité géologique de surface de cette petite planète que sont venues les principales surprises.

Comme il n'y a eu qu'un seul survol, et que seule la moitié éclairée lors de ce survol est connue avec une bonne résolution. Les conclusions « générales » doivent donc être considérées avec réserve.

Un examen morphologique global de la planète révèle trois résultats « majeurs ».

- Il y a une bande sombre à l'équateur, entre les latitudes $+15^\circ$ et -15° . Cette zone correspond à la bande latitudinale la plus chaude au long de toutes

les années plutoniennes (248 années terrestres) qui se suivent pendant un cycle de variation de l'inclinaison de l'axe de rotation (inclinaison variant de 103° à 127° avec une périodicité de 2,8 Ma), bande où il n'y a jamais de nuits polaires. Toutes les glaces superficielles de cette zone se sont sublimées, et il ne reste qu'un mélange de composés « organiques » rougeâtres. Seules les hautes montagnes peuvent être recouvertes de neige de méthane.

- La topographie de Pluton est assez monotone, avec une anomalie majeure : une dépression de plus de 3 000 m de profondeur et de plus de 1 000 km de diamètre, Sputnik Planum, centrée par $+30^\circ$ de latitude nord et 180° de longitude. Cette dépression est sans doute un ancien bassin d'impact, bien qu'on n'en ait pas la preuve formelle. Elle est remplie de glace de diazote (mélangée à un peu de monoxyde de carbone) alors qu'ailleurs dominent les glaces d'eau, de méthane ou des macro-molécules organiques.

- La cratérisation de la surface est très variable, ce qui signifie que l'âge de la surface varie de -4 Ga à -1 Ga . Des processus (érosion, volcanisme ...) ont donc rajeuni inégalement la surface de Pluton. La surface de la dépression Sputnik Planum se caractérise par une absence de cratère de météorite, et a donc un âge géologiquement « nul ».

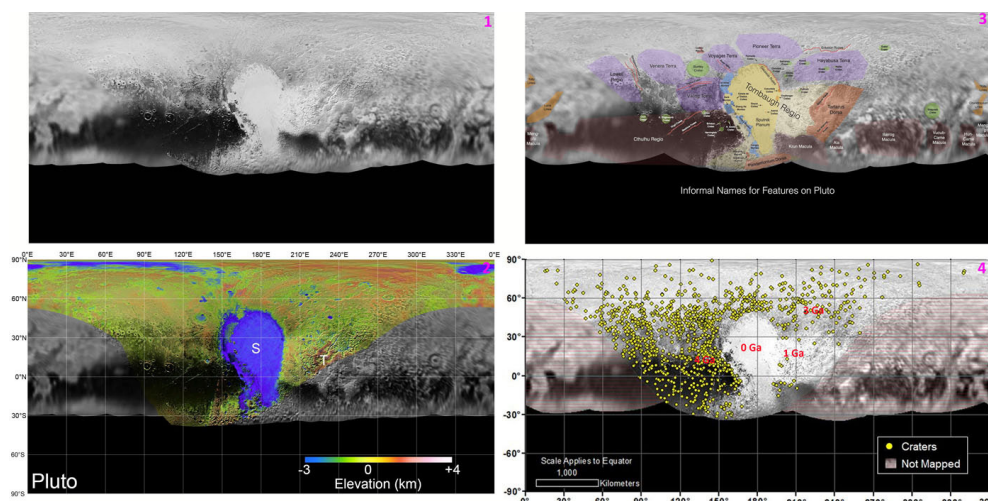


Fig.1. Quatre planisphères (projection cylindrique équivalente de Mollweide) de Pluton, montrant :

(1) la morphologie et l'albédo ;

(2) la topographie ;

(3) les noms (encore informels) des différentes provinces ;

(4) la répartition des cratères d'impact (le faible nombre des cratères aux hautes latitudes est dû à un effet de la projection ; les chiffres en rouge indiquent l'âge des surfaces).

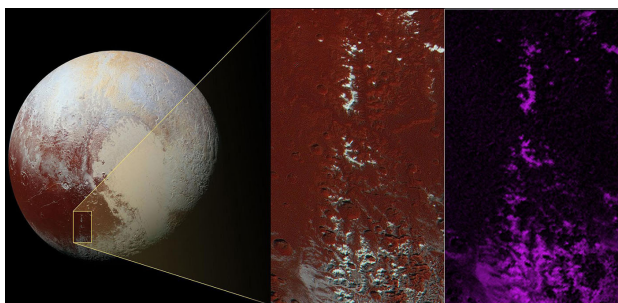


Fig.2. À gauche, vue globale de Pluton (fausses couleurs). Au centre détail d'une montagne couverte de neige au sein de la bande sombre équatoriale. À droite image spectrale montrant l'intensité des bandes d'absorption de la glace de méthane, prouvant que la « neige » est principalement constituée de méthane gelé.



Fig.3. Cratères d'impacts nombreux (surface très âgée) montrant des « terrasses » internes révélant un litage, une « stratification » des premiers kilomètres superficiels de la croûte de glaces. L'origine de ce litage reste à déterminer: La plaine entre les cratères présente un aspect cannelé (fluted en anglais). L'origine de ces cannelures n'est pas claire (érosion éolienne ?). L'image mesure environ 80 km de large.

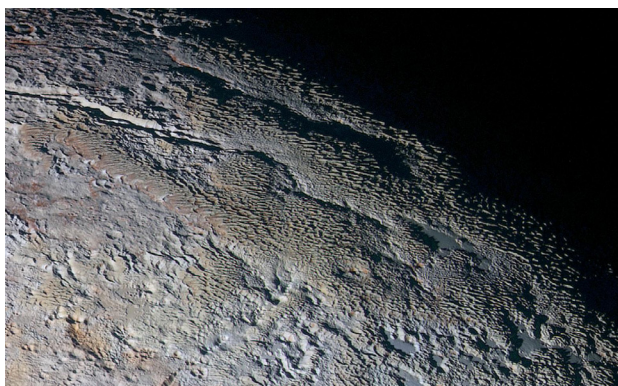


Fig.4. Les terrains en lames (bladed terrain) de Tartarus Dorsa. Des « ondulations » de 70 km de large pour plusieurs centaines de km de long (dorsa) sont découpées en « lames » espacées en moyenne de 5 km. L'origine d'une telle morphologie (appelée snakeskin = peau de serpent lors de sa découverte) serait à rechercher dans la sublimation de la glace, sublimation orientée par des vents ayant une direction dominante de gauche à droite. Ces lames seraient les équivalents de giga-pénitents de neiges connues sur Terre au niveau des hautes altitudes équatoriales. L'image mesure 530 km de gauche à droite.

Dans le détail, l'examen des images (hors Sputnik Planum) permet de tirer des conclusions de 1^{er} ordre sur la structure superficielle de la croûte, la nature de l'érosion, le volcanisme, la tectonique... et aussi des conclusions de 2^e ordre sur l'évolution des conditions de pression et de température de surface, sur la structure profonde...

En plus de l'érosion par le vent qui, si elle génère des formes surprenantes, n'est pas une surprise, la surface de Pluton montre des morphologies ressemblant étonnement à des figures d'érosion par un liquide (dissection des versants, réseaux « fluviaux » dendritiques...). Si cette interprétation est exacte, cela signifie qu'à certaines périodes, un liquide a coulé à la surface de Pluton. Quel composé pourrait être liquide à 45 K et 1 Pa ? De tous les composés présents dans l'atmosphère, c'est le diazote qui semble le plus facile à liquéfier. Mais pour être liquide, N₂ doit être à une température et une pression supérieures à 63,15 K et 1 252 Pa (point triple du diazote). Il faudrait donc, au moins localement, augmenter la température d'une vingtaine de degrés (ce qui ne semble pas insurmontable), et aussi multiplier la pression par plus de 1 252, ce qui semble plus difficile.

Ce serait malgré tout possible parce que l'excentricité de l'orbite de Pluton est de 0,25 (Terre 0,016), et que si l'inclinaison actuelle de l'axe de rotation de Pluton est de 120° (Terre 23,26°), elle varie de 103° à 127° (Terre de 22,1° à 24,5°) avec une période de 2,8 Ma (Terre 41 000 ans). On peut donc modéliser l'insolation (locale ou globale), et calculer les températures superficielles. De là, on peut modéliser la sublimation du diazote et du méthane, calculer la pression, modéliser l'effet de serre et les feedbacks que cela produit... Avec la très grande excentricité de l'orbite, et avec l'inclinaison actuelle de l'axe de rotation (120°), on calcule que la pression peut varier d'environ 10⁻² à 10 Pa au long des 248 ans (terrestres) d'une révolution de Pluton. Mais quand l'inclinaison de l'axe de rotation est minimale (103°), ce qui arrive tous les 2,8 Ma (c'est arrivé il y a 800 000 ans, et cela arrivera de nouveau dans 2 Ma), la pression et la température peuvent dépasser légèrement les conditions du point triple du diazote pendant 1/10 de l'année plutonienne (25 ans terrestres) au cours de l'année plutonienne (de 248 ans terrestres). Il pourrait donc pleuvoir du diazote pendant quelques saisons chaudes et « humides », saisons humides qui durent une vingtaine d'années terrestres et qui reviennent toutes les 11 300 années plutoniennes (2 800 000 années terrestres environ). Pendant ces « brèves » et rares saisons chaudes et humides, des lacs de diazote

liquide pourraient exister quelques « mois » plutoniens (quelques années terrestres).

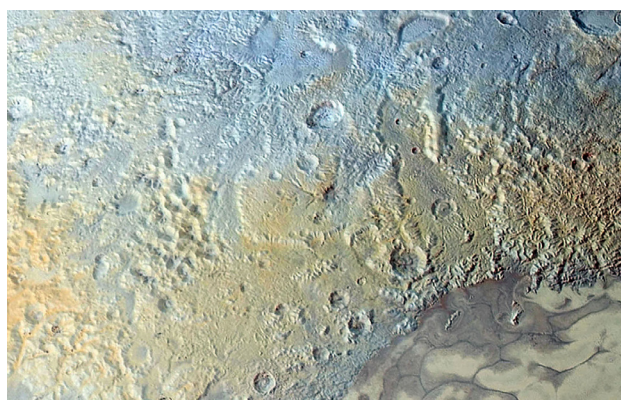


Fig.5. Région d'environ 450 km d'est en ouest montrant de nombreuses figures ressemblant à des réseaux « hydrographiques » (doit-on dire nitrographiques ?) asséchés. Un réseau avec des petits cours de diazote liquide se rassemblant pour former un cours de diazote principal est bien visible au centre de l'image.



Fig.6. Un lac de diazote gelé (frozen pond en anglais). Ce lac mesure environ 30 km de long. En haut à droite, le contexte général. En haut à gauche, la vue la plus détaillée de ce lac qui montre des terrasses de retrait. En bas, pour comparaison, un lac tibétain (non gelé donc très sombre) avec les mêmes terrasses de retrait. Ce lac plutonien est la preuve que pression et température ont permis l'existence de diazote liquide dans des temps pas si lointains dans le passé de Pluton.

À côté des manifestations d'une activité géologique d'origine externe, la surface de Pluton montre aussi des manifestations d'activité d'origine interne : volcanisme et tectonique.

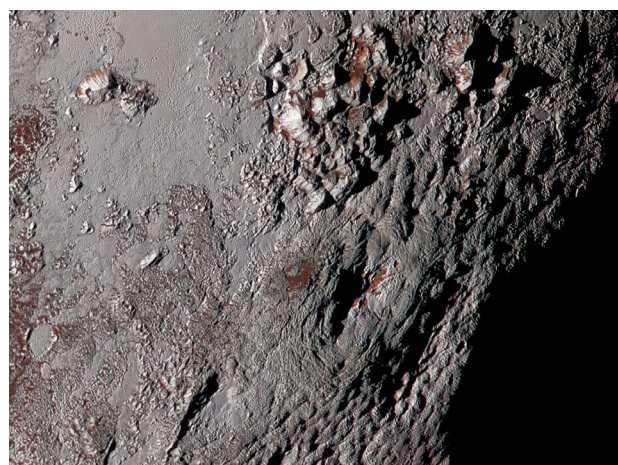


Fig.7. Vue sur Wright Montes, une « montagne » (150 km de diamètre, 4 000 m de haut) affectée d'un cratère sommital, qui fait penser à un volcan, à un cryovolcan puisque la « lave » qui en sortait était sans doute un mélange d'eau et de matières organiques en train de geler. Un seul cratère d'impact est identifiable sur Wright lui-même, suggérant que ce « volcan » a été actif très tardivement dans l'histoire de Pluton.



Fig.8. Réseau de failles normales et de graben recoupant de nombreux cratères d'impact, dont le cratère Elliot au centre droit de l'image. Comme toute faille normale, ces failles résultent d'une extension. Les failles recoupant tous les cratères sont géologiquement « jeunes ». La photo couvre une région d'environ 240 km de large.

On trouve de nombreuses failles normales (associées en graben) semblables à celles de la figure 8 un peu partout à la surface de Pluton. Elles sont partout géologiquement « jeunes ». Rappelons que les failles normales sont dues à une extension. Et, chose étonnante, on ne connaît aucune structure que l'on puisse interpréter en termes de compression (pas de plis, pas de faille inverse...). Si on voit de nombreuses structures extensives et aucune structure compressive, c'est que la surface de Pluton est partout en extension. Pluton aurait donc « gonflé ». Comment faire gonfler une planète ?

Pluton a une masse volumique de $1\,860\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Si on suppose qu'il est constitué d'un mélange de glaces, principalement de glace d'eau (masse volumique voisine de $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et de « roches » (mélange

silicates + fer, de masse volumique voisine de $4000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), et si on suppose que Pluton est entièrement différencié (roches au centre, glaces en périphérie), on obtient un Pluton constitué d'un manteau d'environ 300 km d' H_2O et autres composés volatils et organiques, surmontant un noyau d'environ 900 km de rayon fait de « roches ». Les modélisations thermiques montrent qu'il est possible que la base de ces 300 km d' H_2O ait été ou soit encore liquide et qu'il ait existé ou existe encore un océan liquide profond sous une épaisse couche de glaces. Pour faire gonfler Pluton, il suffit de faire geler entièrement ou partiellement cet océan majoritairement constitué d'eau liquide. On peut peaufiner le raisonnement. Quand de l'eau gèle à basse pression, elle donne de la glace I, ce qui s'accompagne d'une augmentation de volume. Par contre, si elle gèle à haute pression, elle donne des glaces de haute pression (glace III, V, VI ou VII) ce qui s'accompagne d'une diminution de volume¹. Sur Pluton, en fonction notamment de la faible gravité, de l'eau gelant à une profondeur inférieure à 260 km donnerait de la glace I, ce qui se traduirait par une augmentation de volume. Par contre, de l'eau gelant à une profondeur supérieure à 260 km traduirait des glaces III, V ou VI, ce qui se traduirait par une diminution de volume. Comme aucune structure compressive n'a été observée, c'est que jamais des glaces de haute pression n'ont cristallisé.

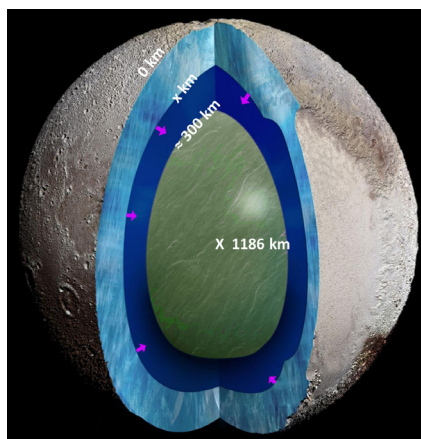


Fig.9. Modèle probable de la structure interne de Pluton : environ 300 km d' H_2O (couleurs bleues, bleu clair pour la glace, bleu foncé pour l'eau liquide) surmontant environ 900 km de roche (couleur verte). Les modélisations thermiques montrent qu'il est possible que la base de cette couche d' H_2O soit encore liquide. Les modèles comportent trop d'inconnues pour que l'on puisse raisonnablement calculer la profondeur x de la limite solide/liquide. L'absence de structure compressive visible à la surface montre que la profondeur x du front de congélation est inférieure à 260 km. Dans le cas d'une couche d' H_2O de 300 km d'épaisseur, l'océan liquide basal aurait donc une épaisseur supérieure à 40 km.

¹ Voir <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/eau-glace-pression.xml>

Si la couche d' H_2O fait bien 300 km d'épaisseur, cela signifie que le front de congélation n'a pas encore atteint 260 km de profondeur, et qu'il reste au moins 40 km d'épaisseur d'eau liquide.

Sputnik Planum (figures 10-11) est une caractéristique morphologique majeure de Pluton. Sa position au centre de la face « anti-Charon » suggère qu'elle correspond à une anomalie de masse positive, due à une épaisseur de glace d'eau plus faible (donc à une épaisseur d'océan liquide plus forte) et à un remplissage par de la glace de diazote (de masse volumique $\rho = 1\,030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, supérieure à celle de la glace d'eau $\rho = 930 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Son origine, sans doute un ancien bassin d'impact de plus de 1 000 km de diamètre, n'est pas totalement comprise. Mais, à côté de ces questions « géophysiques », Sputnik Planum montre des morphologies de surface étonnantes. Voyons en quelques-unes.



Fig.10. Vue oblique globale de Sputnik Planum vue depuis l'OSO. Noter les terrains chaotiques à gauche de la plaine, terrains chaotiques détaillés sur les deux images suivantes.

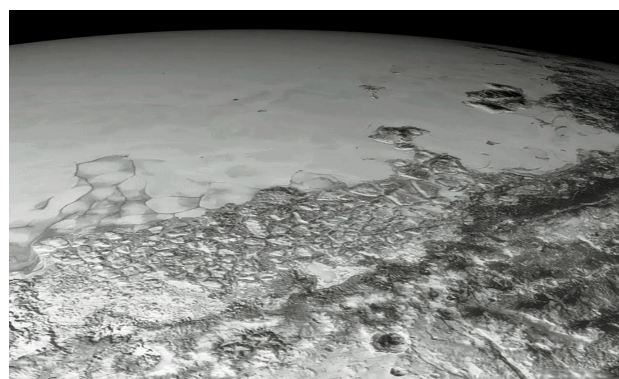


Fig.11. Vue rasante de la bordure nord-ouest de Sputnik Planum. Entre le plateau cratérisé (en bas de l'image) et la plaine de Sputnik Planum (en haut), se trouve un terrain chaotique fait de gros blocs basculés. Le rebord du plateau se serait fracturé et aurait « glissé » vers Sputnik Planum. Cette image couvre environ 500 km de gauche à droite.

Toutes les images de Pluton présentées dans cet article proviennent des différents sites web de la NASA et de l'université Johns Hopkins de Washington.

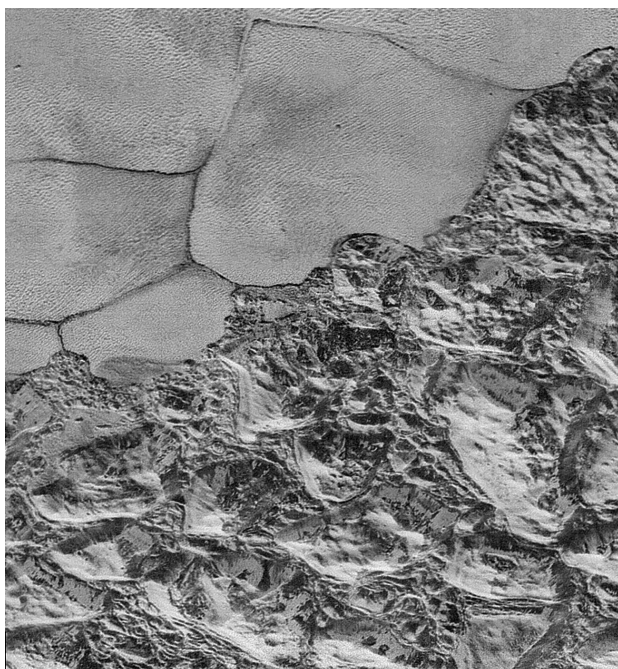


Fig.12. Détail de la limite entre la plaine de Soutnik Planum et les terrains chaotiques, giga blocs de glace d'eau ayant glissé depuis le plateau en direction de la plaine. Cette image couvre environ 75 km de gauche à droite.

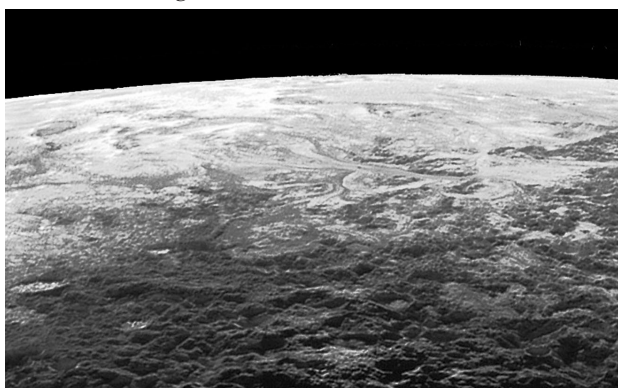


Fig.13. Photo oblique de la bordure SSE de Sputnik Planum. Des montagnes de glace d'eau noircies par des molécules organiques (au 1^{er} plan) dominant Sputnik Planum (à l'arrière-plan). Des glaciers de glace de diazote sont visibles au centre de l'image. Ils descendent des montagnes pour s'étaler dans la plaine.

Des glaciers de diazote coulent des montagnes sud vers Sputnik Planum et s'y étalent. Par contre, ce qui ressemble à des glaciers dans Sputnik Planum semble s'écouler vers le nord, en direction de sa bordure, pourtant constituée de montagnes. Des modélisations climatiques, prenant en compte la topographie, les paramètres astronomiques..., ont été développées par le Laboratoire de Météorologie Dynamique de Paris et peuvent expliquer ce qui ne semble pas logique. Ces modélisations montrent que sur un cycle de variation de l'obliquité de l'axe de rotation de Pluton (cycle de 2,8 Ma), la partie nord de Sputnik Planum perd de la matière par sublimation du diazote. Cette perte de glace de diazote peut être estimée à 1 000 m d'épaisseur sur un cycle de 2,8 Ma.

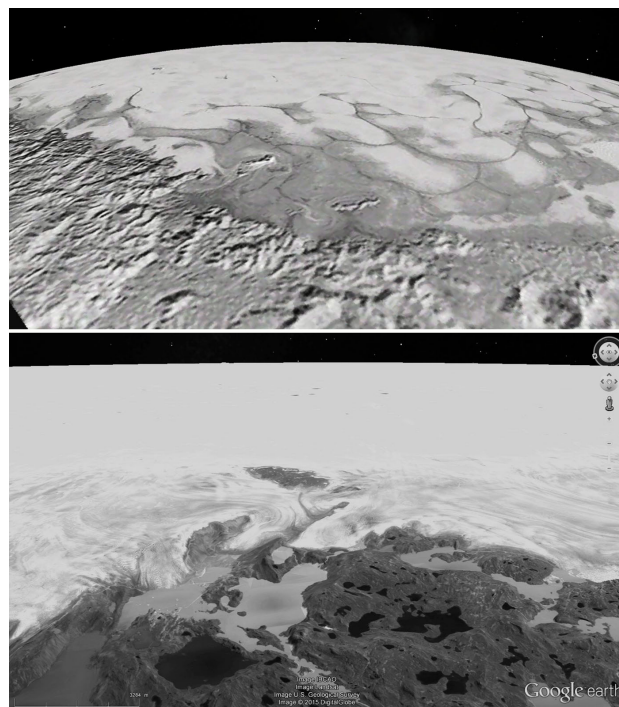


Fig.14. En haut, vue rasante (prise en direction du sud) de la limite nord de Sputnik Planum. Ce qui ressemble à des glaciers coule de la plaine (en haut de l'image) vers la limite Plaine-montagne (en bas de l'image). Ce sens d'écoulement suggère que le centre de Sputnik Planum a une altitude plus élevée que sa bordure nord. Cette image couvre une zone d'environ 300 km de gauche à droite.

En bas, pour permettre une comparaison morphologique, image de glaciers de la bordure ouest du Groenland.

Selon ces mêmes modèles, ce diazote va se condenser au sud de Sputnik Planum et sur les montagnes bordières (condensation estimée à 750 m d'épaisseur sur un cycle de 2,8 Ma).

Si ces simulations montrent une condensation globale au sud de Sputnik Planum sur un cycle de 2,8 Ma, elles montrent que ce même sud de Sputnik Planum subit (temporairement) une sublimation globale au cours de l'année plutonienne (248 ans) dans la situation orbitale actuelle. Cette sublimation qui a lieu au sud depuis quelques années plutoniennes expliquerait les étranges puits que la sonde New Horizons a découverts dans ces régions.

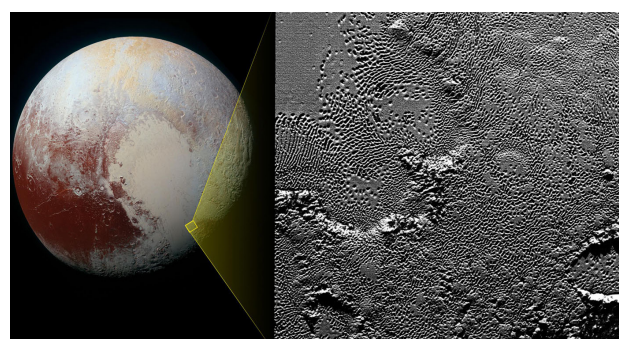


Fig.15. Puits affectant la région SSE de Sputnik Planum. Ces multiples dépressions sont interprétées en termes de sublimation.

La surface de Sputnik Planum montre un réseau polygonal de bombements limités par des sillons. Ces figures sont interprétées comme l'expression superficielle d'une convection (à l'état solide) de la glace de diazote constituant le plancher de Sputnik Planum. À un facteur 1000 près, cette surface ressemble à celle d'un lac de lave figée, comme on peut en voir à Hawaï par exemple. En donnant à la glace de diazote des paramètres physiques « normaux », et avec un flux thermique « classique » vu la taille et la masse de Pluton, on peut calculer que la convection est possible pour une épaisseur de remplissage supérieure à 1 500 m.

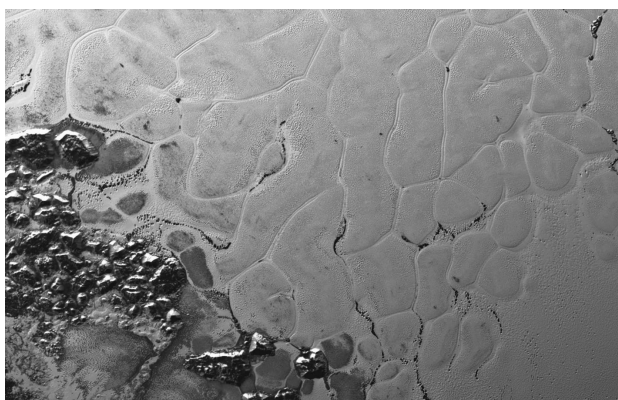


Fig.16. Réseau de cellules polygonales affectant la surface de Sputnik Planum. Ce réseau polygonal est interprété comme l'expression superficielle d'une convection à l'état solide de la couche de glace de diazote remplissant Sputnik Planum. Chaque cellule mesure de 20 à 30 km de « diamètre ». Ces cellules sont bombées en leur centre (panache ascendant). Les sillons bordiers correspondraient aux parties descendantes des cellules.

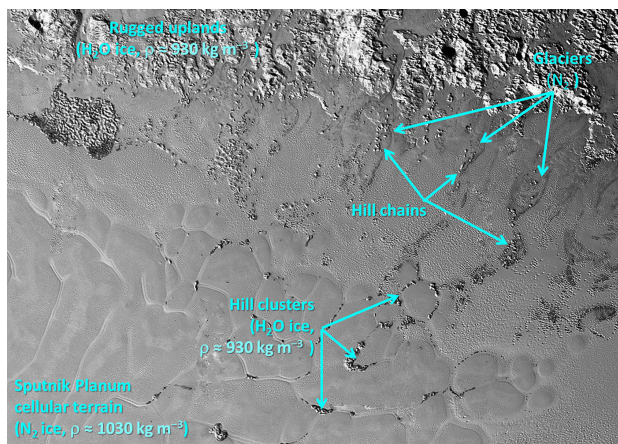


Fig.17. Image annotée de la bordure SE de Sputnik Planum. Des glaciers de diazote descendent des montagnes (rugged uplands) faites de glace d'eau. Ces glaciers transportent des blocs de glace d'eau jusqu'à la plaine, où ils vont former des « cordons morainiques » (hill chains). Ces blocs de glace d'eau sont repris et déplacés par la convection de la glace de diazote. Ne pouvant couler à cause de leur faible masse volumique, ils s'accumulent au niveau des sillons, branches descendantes des cellules de convection vues en coupe figure 18 (Hill clusters).

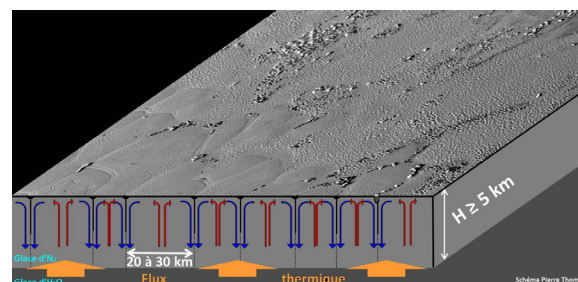


Fig.18. Schéma simplifié de la convection interne à Sputnik Planum expliquant la morphologie de surface (réseau polygonal, hill clusters...).

Il y a une interaction « étrange » entre la convection interne à Sputnik Planum et les glaciers venus des montagnes au SE de la région. Les glaciers de diazote « coulent » sur des montagnes faites de glace d'eau. Ces glaciers arrachent des blocs de glace (qui ont signification de moraines) et les transportent jusqu'à la plaine. Arrivés au niveau de la plaine, ces blocs de glace d'eau ($\rho = 930 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) flottent sur la glace de diazote ($\rho = 1\,030 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et « dérivent » vers le centre de la plaine. Puisque ces icebergs de glace d'eau dérivent, c'est qu'ils flottent sur la glace de diazote sans en toucher le fond. L'estimation de la hauteur des plus grands de ces icebergs (500 m) et l'application du principe d'Archimède montrent que la glace de diazote a une épaisseur d'au moins 5 000 m.

Depuis 1959 avec la face cachée de la Lune puis 1965 avec la mission Mariner 5 qui a survolé Mars, l'humanité explore le Système solaire, ses planètes et ses satellites. À quelques rares exceptions près, chaque survol a révélé un monde extraordinaire, avec une morphologie souvent totalement inattendue. Pluton, le dernier gros corps (plus de 1 000 km de diamètre) à être survolé a lui aussi fourni son lot de surprises. Qui aurait imaginé les terrains en lames, les réseaux hydrographiques, les champs de puits, l'extraordinaire Sputnik Planum... ? Espérons que chacun d'entre nous a bien profité des nouvelles de cette année 2015. En effet, Pluton est le dernier « gros » corps (à morphologie totalement inconnue) à être survolé, et il n'y aura pas de prochains survols semblables avant longtemps. Toutes les planètes et leurs satellites, les plus gros astéroïdes... ont déjà été visités, et il va falloir attendre les survols des autres planètes naines (Eris, Makemake, Haumea...) pour avoir d'aussi belles surprises sur des « gros » corps. Et aucune mission vers ces corps lointains n'est pour l'instant programmée. Heureusement, il reste des petits corps à explorer, qui eux aussi révèlent des surprises comme nous l'a montré Ultima Thulé survolé le 1^{er} janvier 2019 par la même sonde New Horizons.

ARTICLE DE FOND

Le volcanisme des planètes telluriques (1)

Chloé Michaut, Professeur à l'École Normale Supérieure de Lyon

Le volcanisme est un acteur important du modelage des surfaces planétaires. Chloé Michaut nous propose ici un tour d'horizon de ce phénomène en commençant par la Terre et la Lune. Mercure, Vénus et Mars suivront dans le prochain numéro.

Sur la Terre, le volcanisme nous fascine, non seulement par son caractère spectaculaire mais aussi par sa grande diversité. La multiplicité des expressions du volcanisme sur Terre est due à la forme bien particulière (et encore a priori unique) de la dynamique du manteau terrestre : la tectonique des plaques. Les autres planètes telluriques du Système solaire ne présentent pas de tectonique des plaques ; pour autant le volcanisme est un phénomène géologique que l'on trouve sur toutes ces planètes. Le volcanisme a pour origine la fusion des roches du manteau et conduit à la formation et à l'évolution de la croûte (partie superficielle d'une planète, figure 1).

Cependant, à cause des différences intrinsèques entre ces planètes, il peut s'y exprimer de manières différentes. Le transport du magma depuis sa source jusqu'à sa zone de stockage au sein de la croûte ou jusqu'en surface, est en effet sensible à divers facteurs, variant d'une planète à l'autre, en particulier la composition et l'état thermique et mécanique des croûtes planétaires.

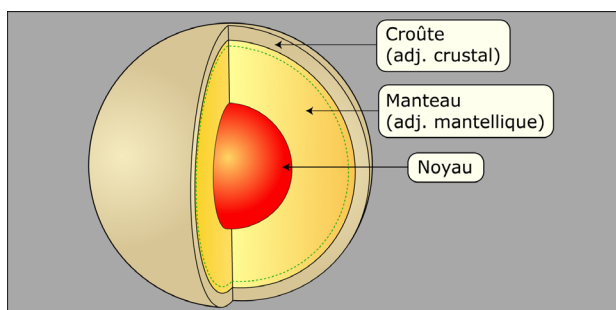


Fig.1. Structure d'une planète tellurique avec noyau, manteau et croûte. Les pointillés verts indiquent la limite inférieure de la lithosphère, partie rigide de la surface, constituée de la croûte et d'une partie du manteau supérieur.

Transport des magmas dans le manteau et les croûtes

Les liquides formés par fusion partielle dans le manteau supérieur étant plus légers que les roches encaissantes, ils s'élèvent par compaction au travers de cette matrice mantellique. Lors de leur ascension, les liquides magmatiques acquièrent une certaine

surpression qui peut leur permettre de remonter au sein des croûtes planétaires, de densité variable, malgré parfois leur flottabilité négative (densité plus importante des magmas que de la croûte environnante) ; mais cette surpression n'est pas toujours suffisante à leur éruption en surface. Il se forme alors des réservoirs magmatiques crustaux ou sub-crustaux. La composition globale de la croûte lui confère une densité caractéristique, plus ou moins grande selon sa teneur en fer, en magnésium et en silicium. Ainsi, pour la Terre, la croûte océanique, continuellement extraite du manteau au niveau des dorsales et de nature basaltique a une masse volumique de l'ordre de $2\,900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La croûte continentale est, elle, plus enrichie en silice, sa composition chimique globale est similaire à celle d'une andésite (roche volcanique légèrement enrichie en silice par rapport à un basalte) ce qui lui confère une masse volumique plus faible, d'environ $2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ainsi, les magmas basaltiques produits par fusion partielle des roches du manteau possède une flottabilité plus grande au sein de la croûte océanique qu'au sein de la croûte continentale. On estime que le volume de magma mis en place en surface est environ 10 fois plus faible que le volume stocké en profondeur dans un contexte continental, contre 5 fois plus faible dans un contexte océanique. La gravité joue elle aussi sur la force de flottabilité (i.e. la poussée d'Archimède) et varie d'une planète à l'autre (de $1,62\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ sur la Lune à $9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ sur la Terre).

Les affleurements géologiques montrent que les magmas sont rapidement transportés au sein de conduits ou « dykes » dans la croûte. Ainsi, entre les zones de fusion partielle et la croûte, le transport des magmas est chenalisé au sein de fractures par des processus encore peu contraints. L'ouverture de ces fractures est sensible à l'état mécanique de la partie rigide de la surface, la lithosphère. Or le refroidissement des planètes au cours de leur histoire entraîne un épaississement de cette lithosphère, qui joue sur l'ascension des magmas mantelliques. D'autre part, l'existence de charges et de décharges

en surface de cette lithosphère modifie aussi son état mécanique et influe donc sur la trajectoire des magmas et le volcanisme en surface des planètes telluriques.

Ainsi, l'étude des différentes formes du volcanisme sur les planètes telluriques nous renseigne sur la structure en composition et l'état thermique et mécanique des croûtes planétaires et leur évolution.

Contrairement à la Terre où la croûte primaire et les objets volcaniques précoces ont été effacés par la tectonique des plaques, les planètes telluriques telles que la Lune, Mars et Mercure présentent des surfaces qui datent des premiers temps du Système solaire. Elles détiennent donc des indices importants pour notre compréhension des phénomènes géologiques précoces et donc de l'évolution de la Terre à une période clé où la tectonique des plaques s'est mise en route et où la vie a émergé.

Le volcanisme sur Terre : origine des volcans « rouges et gris »

Le manteau terrestre est chaud car, comme pour les autres planètes telluriques, il contient des éléments qui, par décroissance radioactive, produisent une grande quantité de chaleur ; ces éléments sont l'uranium, le thorium et le potassium. Pour évacuer la chaleur interne produite, le manteau des planètes telluriques est animé de lents mouvements de convection : le matériel chauffé en profondeur, plus léger, remonte sous la forme de panaches chauds alors que le matériel refroidi en surface se densifie et replonge vers les profondeurs. La décompression des roches mantelliques au sein des panaches chauds conduit à la fusion partielle de ces roches (figure 2).

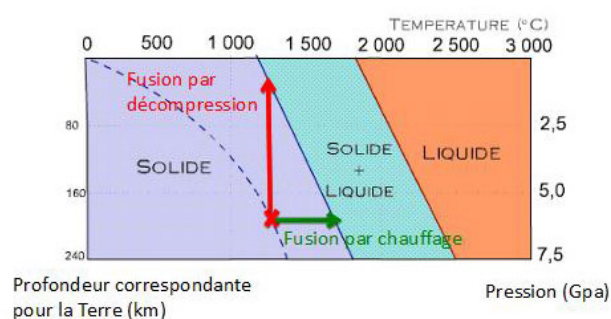


Fig.2. Diagramme de phase. La matière solide peut devenir liquide soit en augmentant la température, soit en diminuant la pression. La ligne pointillée représente un profil de température (géotherme) moyen sur Terre.

C'est à l'aplomb de ces grands panaches ascendants que l'on observe les plus grands volcans boucliers, comme le volcan Mauna Loa (Hawaï), caractérisés par des pentes très faibles. Ces volcans, souvent

nommés volcans « rouges », ont en effet été formés par accumulation de lave basaltique très fluide, s'étalant sur de très grandes surfaces. On observe aussi ce type de volcans sur Mars et sur Vénus : Olympus Mons et Maat Mons étant les deux plus grands volcans respectifs de ces planètes. Cette forme de fusion (par décompression des roches au sein de panaches mantelliques ascendants) est la plus grande cause de volcanisme sur les planètes telluriques exceptée la Terre.

Sur la Terre en effet, les lents mouvements de convection du manteau se traduisent en surface de manière unique par le mouvement des plaques tectoniques avec une vitesse classique de quelques centimètres par an. Au niveau des zones de dorsales océaniques, du matériel chaud remonte jusqu'en surface en se décompressant, entraînant ainsi la fusion partielle des roches du manteau et la formation du plancher océanique.

Au niveau des zones de plaques convergentes, du matériel froid, souvent hydraté au contact de l'océan, plonge en subduction dans le manteau terrestre. L'augmentation de pression lors de la plongée en subduction provoque des réactions de déshydratation des minéraux hydratés, ce qui enrichit en eau le manteau sus-jacent. Lorsque les roches mantelliques s'hydratent, leur point de fusion s'abaisse (figure 3) ; il se forme ainsi un liquide de fusion riche en eau.

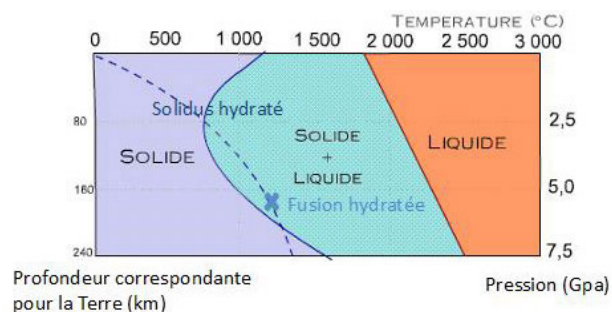


Fig.3. Pour une température donnée et une pression donnée, par exemple 1200 °C et 6 GPa, une roche peut être solide si elle n'est pas hydratée (croix rouge de la figure 2) ou en partie liquide si on lui ajoute de l'eau (croix bleue de cette figure).

Lors de son ascension vers la surface, ce liquide rencontre la croûte de la plaque chevauchante (souvent de type continentale) peu dense. Sa flottabilité, souvent négative au sein de cette croûte peu dense, entraîne son stockage dans des réservoirs crustaux au sein desquels le magma cristallise des minéraux enrichis en fer et en magnésium. La composition du liquide s'enrichit en silicium (on dit que le magma se différencie) et en eau, et sa densité diminue, lui permettant de remonter davantage en surface. La différenciation du magma entraîne

une forte augmentation de sa viscosité. Ainsi, les magmas de type andésitique ou rhyolitique, enrichis en silice par rapport à des liquides de fusion de type basaltique, forment en surface des dômes de lave visqueuse qui s'écoule difficilement. Les édifices volcaniques formés ainsi d'empilement de laves plus visqueuses sont caractérisés par des pentes beaucoup plus abruptes que les larges volcans boucliers.

À l'évent des conduits volcaniques, ces dômes génèrent des bouchons qui empêchent l'éruption des magmas. La décompression générée par l'ascension de ces liquides, enrichis en éléments volatils de par leur genèse, entraîne cependant l'exsolution¹ de ces éléments volatils de la phase liquide (leur solubilité étant diminuée à basse pression) et la formation d'une phase gazeuse.

Lorsque la phase gazeuse atteint une fraction volumique de l'ordre de 75 % du volume total, elle forme la phase continue avec du magma sous forme de gouttelettes en suspension : c'est la fragmentation. Une éruption explosive est ainsi générée (figure 4).

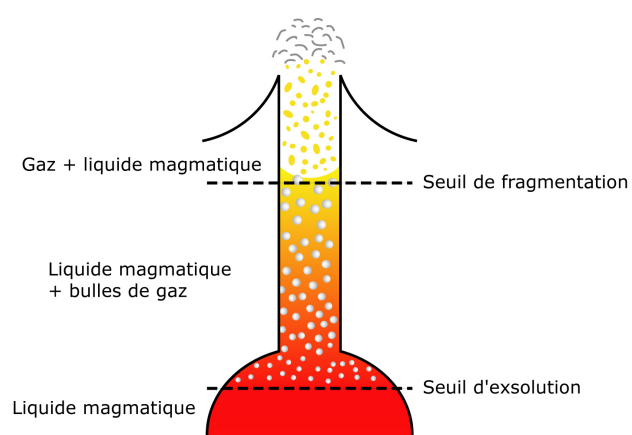


Fig.4. Étapes d'une éruption explosive
(d'après image GeoWiki / Stephane Poussineau).

Différents types d'éruptions explosives formées d'un mélange de particules de magma et de gaz volcanique à haute pression existent au niveau de ces volcans parfois appelés « gris » : verticales (colonnes pliniennes avec parfois le développement d'une ombrelle) ou plutôt horizontales (écoulements gravitaires pyroclastiques²).

D'autre part, la forte pression de gaz générée par l'exsolution des éléments volatils permet de déstabiliser de manière intermittente le bouchon de laves denses, qui se fracture, générant parfois, du fait

de l'abaissement de pression soudaine, de petites explosions de types « vulcaniennes ». Ainsi la coexistence des deux phases aux propriétés physiques très différentes (magma très visqueux et gaz compressible) entraîne un volcanisme qui alterne entre des phases explosives et des phases effusives avec éruptions de laves visqueuses bouchant l'évent du conduit et contribuant à générer un nouvel épisode de fortes pressions de gaz.

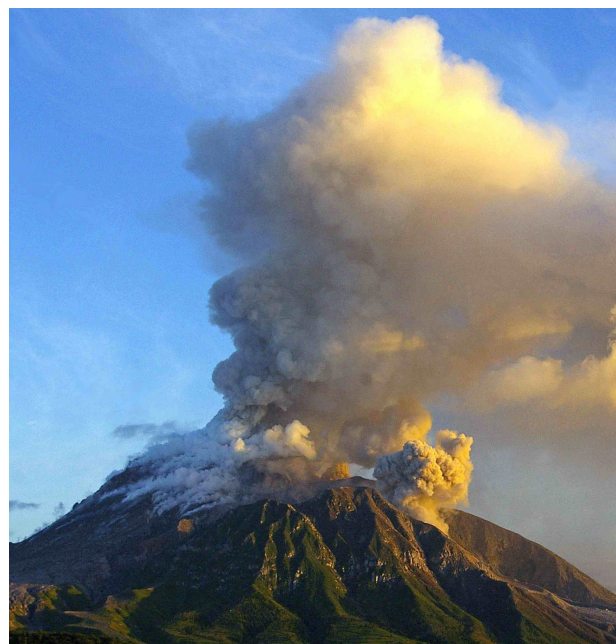


Fig. 5. Éruption du volcan de la Soufrière de Montserrat.
(photo A. Finizola IPGP).

La Lune

La Lune s'est probablement formée suite à un impact géant sur la proto-Terre, qui aurait entraîné l'éjection et la mise en orbite de matériel fondu, sinon partiellement vaporisé autour de la Terre, matériel qui se serait ensuite ré-accrété pour former la Lune. Une partie non négligeable de la Lune (sinon toute) aurait ainsi été initialement fondue, et la Lune aurait été caractérisée par un état d'océan de magma initial.

Lerefroidissementetlalentecristallisationfractionnée de l'océan de magma lunaire aurait ensuite conduit à la formation d'une croûte primaire par flottaison des minéraux légers de plagioclase riche en calcium (l'anorthite) à la surface de l'océan de magma tandis que les éléments les plus incompatibles, dont les éléments les plus producteurs de chaleur, se seraient concentrés dans les derniers liquides magmatiques résiduels entre la croûte primaire et les cumulats³ de minéraux denses (olivine et pyroxènes) formant le manteau (fig. 6).

³ Roche formée par accumulation et sédimentation de cristaux denses en base de réservoir magmatique.

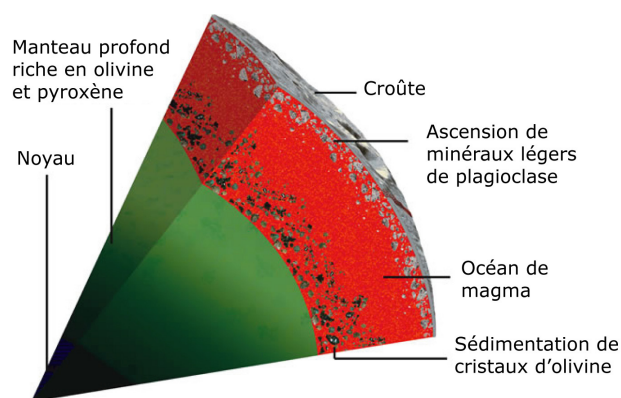


Fig.6. Schéma présentant le scénario de cristallisation de l'océan de magma lunaire (crédit LPI).

Les échantillons lunaires récoltés lors des différentes missions Apollo et Luna ainsi que les météorites lunaires témoignent en effet de la formation violente et ancienne de notre satellite. Ceux-ci montrent que les terres hautes lunaires, de couleur claire, visibles à l'œil nu, seraient majoritairement composées d'anorthosite, une roche très riche en anorthite.



Fig.7. Échantillon d'anorthosite lunaire. Mission Apollo 16 (crédit NASA/Johnson Space Center photograph).

La datation des échantillons lunaires donne d'autre part des âges très anciens, supérieurs à 4,29 Ga pour les anorthosites ferreuses, en accord avec ce scénario.

Finalement, une province géologique très ancienne, concentrée au niveau de l'océan Procellarum (océan des Tempêtes) sur la face visible montre une très forte concentration en éléments incompatibles dont les éléments producteurs de chaleur.

Cette province pourrait résulter de l'éruption en surface du liquide résiduel de l'océan de magma lunaire.

La Lune semble être le seul corps tellurique qui possède encore à l'heure actuelle une croûte primaire conséquente, formée lors de sa différenciation initiale.

La très récente mission GRAIL de la NASA, lancée en septembre 2011, a permis de décrire avec une précision sans précédent le champ de gravité lunaire et d'estimer une densité moyenne de la croûte formant ces terres hautes à seulement $2\,550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette valeur très faible provient non seulement de la composition de la croûte, mais aussi de sa forte porosité, qui pourrait être supérieure à 12 % sur des profondeurs de plusieurs kilomètres, porosité liée à l'âge ancien de la surface lunaire et à sa forte cratérisation. L'épaisseur de cette croûte lunaire, estimée à partir des mesures de champ de gravité et des données sismologiques, n'est d'autre part pas négligeable : en moyenne entre 34 et 43 km.

Les magmas lunaires étant riches en fer et donc denses, cette croûte de faible densité et d'épaisseur conséquente a sans doute joué un important rôle de filtre à l'éruption des liquides de fusion sur la Lune, dont la flottabilité était négative au sein de cette croûte. Visibles elles aussi à l'œil nu, les mers basaltiques lunaires, d'aspect global circulaire, se sont en effet mises en place au sein de grands bassins d'impact, là où tout ou une partie de cette croûte légère a été enlevée et redistribuée suite à l'impact. De manière assez générale, le volcanisme sur la Lune semble lié aux cratères d'impacts. De nombreux cratères lunaires, de diamètres plutôt grands (quelques dizaines de kilomètres de rayon), sont aussi remplis de lave sur des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres. De tels impacts sont trop petits pour être à l'origine de l'épisode de fusion ayant donné lieu à une telle quantité de liquide. D'autres cratères, de diamètres allant de 10 à 150 km, semblent avoir été modifiés après leur formation, sans doute par des processus magmatiques : leurs sols, surélevés comparés à des cratères non modifiés, montrent des fractures radiales et circulaires. Ces « cratères à sols fracturés » semblent avoir enregistré un processus endogène de soulèvement du sol qui résulterait de la mise en place d'un réservoir ou intrusion magmatique centrée sous ces cratères. Il semble que les cratères constituent des dépressions locales qui aident à l'ascension du magma en dé comprimant le milieu encaissant sous-jacent et en générant des contraintes mécaniques favorables à l'ascension du magma déjà présent en profondeur.

Étonnamment sur la Lune, aucun volcan bouclier n'a été identifié de façon certaine, alors qu'ils sont bien visibles sur Mars et Vénus. Les éruptions volcaniques ont majoritairement eu lieu le long de fissures. La densité du magma était peut-être trop importante par rapport à la densité de la croûte lunaire pour permettre une activité volcanique prolongée et focalisée. Il

semble que les grands impacts (de type bassins) ont joué un grand rôle en amincissant la croûte, permettant ainsi au liquide d'atteindre la surface. Ces grands bassins, zones de croûte amincie et donc de remontée mantellique de nature dense et remplis de liquide basaltique solidifié, dense lui aussi, sont ainsi associés à des fortes anomalies de masse positives appelées mascons. Ces fortes anomalies de masse ont sans doute exercé de fortes charges au sein de la lithosphère lunaire. Il est ainsi proposé que ceci a pu générer un état mécanique particulier au sein de la lithosphère permettant l'ascension de magma dense sur les bords de ces mascons, malgré leur flottabilité négative. Certaines mers basaltiques particulièrement denses (car riches en fer) se sont sans doute mises en place de cette manière sur le bord des bassins remplis de lave. De même, les cratères à sol fracturé, probablement issus de l'ascension et du stockage de magma sous un cratère d'impact, sont distribués autour de mascons et de mers lunaires.

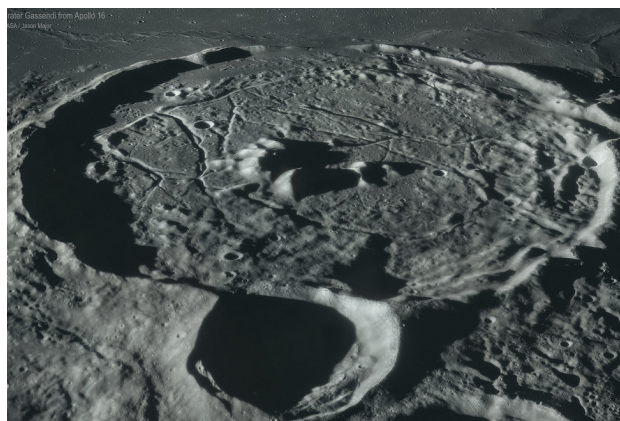


Fig.8. Un cratère à sol fracturé, ici Gassendi (photo Apollo 16).

Les grandes mers basaltiques sont en effet concentrées sur la face visible, qui montre une croûte plus mince que la face cachée. L'origine de cette concentration de l'activité volcanique essentiellement sur la face visible reste débattue. Les grands bassins d'impact présents sur la face visible ont sans doute joué un rôle dans cette asymétrie.

Cependant, le bassin du Pôle Sud, pourtant très ancien, ne présente pas de tels épanchements volcaniques. Cette asymétrie pourrait aussi être liée à une plus forte concentration en éléments producteurs de chaleur, si l'on suppose que la composition de surface de l'océan Procellarum reflète la composition plus profonde. Une cristallisation asymétrique de l'océan de magma serait alors à l'origine de cette différence entre les deux faces de la Lune⁴.

4 L'effet de la marée terrestre est symétrique entre la face visible et cachée et ne peut donc pas conduire à une telle asymétrie.

Sur la Lune, très peu de traces de laves riches en silice ont été trouvées. On note quelques dômes à fortes pentes, de plusieurs kilomètres de rayon, montrant une forte viscosité et donc une importante teneur en silice. Ces dômes se trouvent généralement dans des zones où la surface présente une forte teneur en thorium, des zones enrichies en éléments producteurs de chaleur, permettant le maintien d'une activité volcanique.

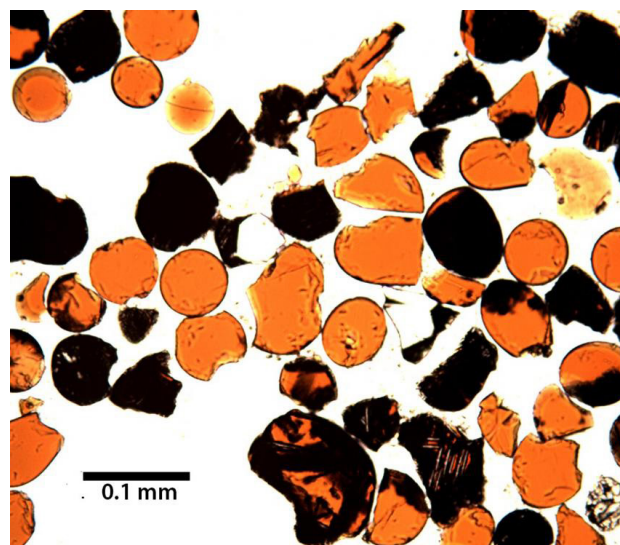


Fig.9. Billes de verre pyroclastiques. Mission Apollo 17.

Parmi les échantillons issus des missions Apollo, on trouve des billes de verre de silicates mafiques orangées. Ces échantillons sont interprétés comme issus d'anciens dépôts pyroclastiques (figure 9). Ces dépôts sont visibles à la surface de la Lune sous la forme de dépôts sombres à marge diffuse et se localisent eux aussi très souvent au sein des cratères lunaires (en particulier à sols fracturés) ou encore au sein des mers basaltiques lunaires.

La Lune n'ayant pas d'atmosphère, il suffit d'une faible quantité de gaz pour que celui-ci, par décompression jusqu'en surface, prenne une place suffisante pour générer une éruption explosive.

Les matériaux lunaires étant pauvres en eau, l'élément volatil majeur causant la fragmentation n'est pas comme sur Terre, de l'eau, mais du monoxyde de carbone (CO) issu d'une réaction d'oxydation du graphite à faible pression (inférieure à 40 MPa, correspondant à des profondeurs de l'ordre de 8 km).

■

Dans le prochain numéro, le volcanisme sur Mercure, Vénus et Mars...

Les cratères de la Lune

Sylvie Thiault, Lyon

Voici un exemple d'activité originale à réaliser à partir d'une photo de la surface de notre satellite, compter les cratères...

Les élèves du Club Astronomie du lycée Jean Paul Sartre de Bron (69), encadrés par José Vilas-Boas, professeur de mathématiques ont pris prétexte du cinquantième anniversaire du premier pas d'un humain sur la Lune pour mieux connaître notre satellite.

Après avoir repéré des zones plus accidentées que d'autres, des structures différentes, ils se sont demandés ce que la répartition des cratères en nombre et/ou en taille peut nous apprendre ? Est-il possible de déterminer l'âge des terrains et comment ?

Activités préparatoires

Dans une première séquence les élèves ont appris à partir de l'Atlas Virtuel de la Lune¹ à repérer et nommer quelques-unes des structures remarquables de la face visible de la Lune.

Des recherches ont été faites sur la théorie de formation de la Lune, le mode de formation des cratères, des mers...

Ils ont recherché si, comme sur la Terre avec la longitude et la latitude, il existe un système de coordonnées permettant de localiser un lieu particulier sur notre satellite.

Une soirée d'observation était prévue, mais la mauvaise météo de cet hiver nous a empêché de sortir les instruments.

Dans une séquence suivante, nous nous sommes penchés sur l'histoire de l'exploration lunaire. Nous avons positionné sur le globe lunaire les différentes missions Apollo qui ont atterri sur la Lune ainsi que les missions chinoises Chang'e 3 et 4.

Nous avons fait une recherche documentaire pour connaître les caractéristiques principales des différentes missions. Quelles régions ont été explorées ? Des échantillons de roches ont-ils été rapportés sur Terre ? Que sait-on de l'âge des terrains des régions explorées ?

De nouvelles questions sont apparues : que nous ont appris ces expéditions de la « géologie » de notre satellite ? Comment dater les terrains lunaires ?

Datation de terrains lunaires

Les missions Apollo ont permis la collecte de près de 400 kg de roches lunaires.

Ces roches ont été datées par les méthodes classiques de datation des roches : potassium / argon².

On sait maintenant que la Lune s'est formée il y a 4,55 milliards d'années.

Les différentes périodes reconnues sur la Lune sont données dans le tableau suivant de la plus récente à la plus ancienne.

Âges géologiques	en milliards d'années (Ga)	Cratères remarquables
Copernicien récent	0,5 à 0,1	Copernic, Tycho
Copernicien ancien	1,1 à 0,5	
Ératosthénien	3,1 à 1,2	Ératosthène
Imbrien	3,84 à 3,2	Platon, Archimède, Arzachel
Nectarien	3,91 à 3,85	Clavius, Longomontanus
Pré-Nectarien	4,30 à 3,92	Ptolémée, Hipparque

Nous avons construit une échelle des ères géologiques de la Lune.

Mais ce n'est qu'une très petite partie de la surface lunaire qui a été explorée. Est-il possible, sans collecter d'échantillon, d'estimer l'âge d'un terrain ?

Une première idée a vite émergé : en observant comment des cratères, des failles se recoupent, se chevauchent, on peut classer les événements du plus ancien au plus récent.

¹ Logiciel gratuit d'étude et d'observation de la Lune.

² Pour en savoir plus, voir le site planetTerre de l'ENS : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/datation-k-ar.xml>

Autre idée : les élèves ont constaté que le nombre et la taille des cratères ne se répartissent pas uniformément. Pourtant on peut penser qu'il n'y a pas de raison pour qu'une zone soit plus exposée qu'une autre aux météorites.

Sur la Lune, il n'y a pas de vent, pas de pluie donc pas d'érosion. Un cratère d'impact ne pourra être affecté que par un autre impact ou par un épanchement de lave.

Une coulée de lave « lisse » le terrain. Les élèves ont alors compris que plus un terrain est cratérisé plus il est ancien.

Après avoir daté les échantillons qui ont été ramenés par les différentes missions et étudié la cratérisation des zones dont ils provenaient, les chercheurs ont obtenu une relation âge / densité de cratères.

Elle est représentée par le graphique ci-dessous (figure 1).

Alors comptons les cratères ! Oui mais comment ?

Nous avons choisi d'utiliser des images de la sonde Lunar Reconnaissance Orbiter, en tirant parti de l'outil QuickMap de LRO³.

Les coordonnées apparaissent en bas de l'image à gauche. L'échelle est en bas de l'image à droite (figure 3).

Utilisation du QuickMap de LRO

La barre d'outils est décrite sur la figure 2.

Deux options pour ce qui suit : papier crayon ou GeoGebra.

Nous exposons ici la méthode utilisant GeoGebra, facile à adapter pour une utilisation « manuelle ».

Dans les deux cas la démarche est la même à partir du moment où on connaît l'échelle de l'image.

Les images de LRO portent toutes une indication d'échelle. Avec un outil de capture d'écran, on capture l'image en veillant à ce que l'échelle apparaisse et on enregistre l'image en jpg.

Dans l'explorateur, en faisant un clic droit propriétés sur l'image on obtient sa taille en pixels. L'exemple de la figure 3 concerne une zone à l'intérieur du cratère Ptolémée.

Pour cette image la taille en pixels est 1920×1080 .

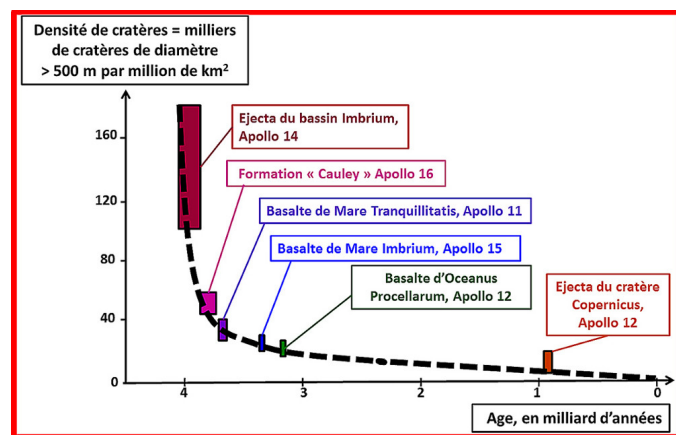


Fig.1. Densité de cratères et âge d'un terrain (source <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/Images/impacts-crateres-planetes/08-relation-age-densite-crateres.jpg>)

De haut en bas :



1. Choix de la projection. Nous utiliserons orthographique Near Side
2. Layers : on choisit la nature des informations qu'on veut faire apparaître sur la carte. Par défaut, la surface brute : tout est décoché.
3. Permet de superposer des couches d'informations. Sans objet ici.
4. En cliquant sur un point, on obtient ses coordonnées.
En cliquant sur un point puis double clic sur un deuxième point (par exemple sur un diamètre de cratère) on peut obtenir le profil altimétrique du terrain.
5. Réglages de paramètres d'affichages (graduation, type de coordonnées) et de téléchargement d'images.
6. Image en plein écran.

Fig.2. Barre d'outils du site QuickMap de LRO.



Fig.3. Le cratère Ptolémée (image LROC NASA).

³ <https://quickmap.lroc.asu.edu/>.

Premier travail : déterminer et vérifier l'échelle de l'image

On ouvre une fenêtre GeoGebra, on insère l'image de la région à étudier. On choisit pour coin 1 : A=(0,0) ; pour coin 2 : B=(1920,0) ; 1 920 est ici la longueur de notre image en pixel.

Il faut penser à fixer les points A, B et l'image (par clic droit, sélectionnez, objet fixe).

On mesure avec l'outil « segment » le segment [CD] qui donne l'échelle. On vérifie que l'échelle est la bonne : on s'assure que le segment [CD] a une longueur de 100 pixels. On remplit un tableau comme ci-dessous.

Échelle de l'image	
pixel	mètres
100	10 000
1	100

Après discussion et lecture de la littérature dont nous disposons sur le sujet, nous avons décidé de suivre le protocole suivant.

Délimiter la zone à explorer : un rectangle c'est mieux ! (il faudra ensuite calculer l'aire de cette zone). On choisit au mieux les sommets de ce rectangle. Il faut penser là encore à fixer la zone.

On remplit le tableau suivant dans un tableur :

Surface étudiée			
	Pixel	m	
Longueur	1 100	110 000	
Largeur	600	60 000	
Aire	660 000	6 600 000 000	en km ² 6 600

On repère le plus grand cratère de la zone étudiée et on mesure son diamètre dans l'unité choisie (ici le pixel).

On voudrait ensuite compter les cratères en les regroupant par classe. On décide que, d'une classe à l'autre, l'aire sera divisée par 2, il faut donc que le diamètre soit divisé par $\sqrt{2}$.

On remplit dans le tableur, diamètre en pixels et diamètre en mètres :

- En A9 la mesure du plus grand diamètre.
- En B9 : =A9/RACINE(2)
- En A10 : =B9.
- Et en B10, on copie B9 vers le bas.

	A	B	C	D	E	F
7	Diamètre en pixel		Diamètre en m		Diamètre moyen en km	Nombre de cratères
8	Max	Min	Max	Min		
9	81,0	57,3	8100,0	5727,6	6,9	1
10	57,3	40,5	5727,6	4050,0	4,9	0
11	40,5	28,6	4050,0	2863,8	3,5	1
12	28,6	20,3	2863,8	2025,0	2,4	3
13	20,3	14,3	2025,0	1431,9	1,7	16
14	14,3	10,1	1431,9	1012,5	1,2	25
15					total	46

On copie ensuite vers le bas les cellules A10 et B10. Pour savoir « jusqu'où il faut aller », on estime le plus petit cratère mesurable. On ne prendra en compte que les cratères de plus de 10 pixels de diamètre, donc 1 km.

On remplit les colonnes C, D et E.

Avec GeoGebra, on mesure les diamètres des cratères du plus grand au plus petit, systématiquement. On relève dans le tableur de GeoGebra les valeurs obtenues : il suffit patiemment de recopier dans le tableur les noms des variables segments qui ont été créées. On les recopie dans la feuille du tableur et on les trie. Il ne reste plus qu'à compter et remplir la colonne F.

Sans surprise, on observe qu'il y a plus de petits cratères que de gros.

On a trouvé 46 cratères de plus d'un km de diamètre pour 6 600 km², soit environ 7 cratères de plus d'un kilomètre de diamètre pour 1 millier de km² dans cette zone soit 7 milliers de cratères de plus de 1 km de diamètre pour un million de km². On peut traiter des images d'autres zones en respectant le même protocole. Et comparer les résultats...

Pour dater le terrain en utilisant le graphique de la figure 1, il aurait fallu également compter les cratères de 500 m à 1 km de diamètre, ce qui n'est pas facile à partir de cette image.

Utiliser l'outil QuickMap a été très motivant. Les élèves ont acquis une certaine familiarité avec les structures de la face visible de notre satellite.

Ils ont été confrontés à des questions « très pratiques », pour lesquelles il n'y a pas forcément eu de réponse tranchée. Par exemple :

- Quelle zone choisir ?
- Quelle est la taille limite des cratères à prendre en compte ?
- Faut-il tenir compte des cratères « effacés » ?
- Comment prendre en compte « un chapelet » de petits cratères ?
- Nous savons qu'il y a eu des périodes de « grands bombardements »... Quelles conséquences sur nos relevés ?
- Quelle information peut-on tirer de la densité de surface cratérisée ? (surface totale des cratères / surface étudiée)...

Ressources documentaires

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/dation-k-ar.xml>

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/impacts-crateres-planetes.xml>

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1945-5100.2009.tb01211.x>

Remarque : le taux mesuré de 0,007 cratères au km² donnerait, d'après la figure 4 de la page 27 un âge d'environ 3,7 Ga contre plus de 3,9 d'après AVL (Prénectarien), ce qui n'est pas si mal...

AVEC NOS ÉLÈVES

Conception d'une mission spatiale à destination de la planète Mars

Thomas Appéré, enseignant agrégé de Physique-Chimie au lycée St Paul (Vannes) et docteur en planétologie

Comment intéresser les élèves à la physique au lycée ? L'activité proposée ici pourrait répondre à la question. Tous les ingrédients y sont : une situation-problème réelle liée à l'actualité astronomique, de vraies solutions à découvrir, le plaisir de découvrir par soi-même ou en équipe...

InSight Education

Le 26 novembre 2018, nous suivions l'atterrissage réussi de la sonde InSight à la surface de Mars, dans la plaine désertique d'Elysium. Quelques mois plus tard, la sonde déployait le sismomètre français SEIS qui enregistra son premier séisme martien le 6 avril 2019, inaugurant l'étude de la structure interne de Mars. Cette mission est une occasion idéale pour sensibiliser nos élèves aux sciences planétaires. L'équipe d'éducation et de sensibilisation (Education & OutReach Team) du laboratoire GéoAzur (Université Côte d'Azur) a été choisie pour réaliser le volet éducatif du projet InSight, baptisé InSight Education. L'un de ses objectifs est de donner aux élèves l'accès aux données qui seront envoyées depuis Mars, notamment les sismogrammes enregistrés par SEIS, tout en proposant des ressources à la communauté éducative pour exploiter ces données avec les élèves. Actuellement, une cinquantaine d'enseignants sont associés à cette initiative.

Dans le cadre du programme InSight Education, j'ai élaboré six activités autour de la conception d'une mission spatiale à destination de la planète Mars :

1. Conception de la sonde spatiale ;
2. Choix du site d'atterrissage ;
3. Détermination de la densité de rochers en surface au laboratoire ;
4. Détermination de la densité de rochers en surface, application à Mars ;
5. Simuler l'atterrissage de la sonde InSight sur Mars ;
6. L'alimentation électrique du rover Curiosity et de l'atterrisseur InSight.

Je présente dans cet article ces différentes activités. Elles ont été menées par un groupe de seize élèves de Première S. Les quatre premières activités peuvent être proposées aux autres niveaux du lycée voire au collège. L'activité 5 est un programme informatique à compléter par les élèves, on pourra la mener

en classe de Première en spécialité Numérique et Sciences Informatiques (NSI). L'activité 6 traite de la désintégration radioactive et de l'énergie solaire, on pourra l'aborder en classe de Première en Enseignement Scientifique.

Ces activités (comprenant les objectifs, préparatifs, déroulement, document-élève) sont à télécharger sur le site Internet du programme InSight Education :

<https://insight.oca.eu>

Activité 1 - Conception de la sonde spatiale

Dans cette première activité, les élèves conçoivent une sonde spatiale (rover ou atterrisseur) à destination de la planète Mars. La mission de cette sonde sera de répondre à l'une des questions scientifiques majeures qu'on se pose sur Mars. Les élèves disposent pour cela d'un jeu de 41 cartes de la NASA écrites en anglais (voir figure 1).

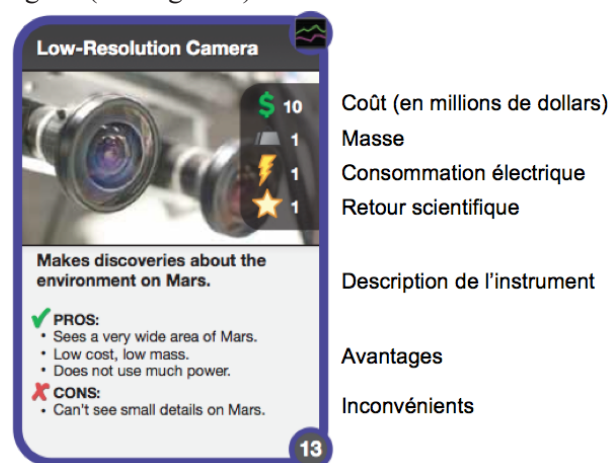


Fig.1. Exemple de carte «Instrument».

Pour introduire le sujet, la séance débute par le visionnage d'une vidéo présentant la planète Mars et les questions que se posent les scientifiques à son sujet. J'ai retenu la vidéo «Mars InSight : écouter battre le cœur de Mars» de la chaîne YouTube «Besoin d'Espace». Les deux premières minutes de cette vidéo résument très bien le sujet.

Les élèves listent les problématiques qu'ils ont retenues, par exemple : « La planète Mars a-t-elle été habitable ? », « La vie est-elle apparue sur Mars ? », « Quelle est la structure interne de Mars ? ». On met les problématiques en commun puis les élèves, par groupe de quatre, en choisissent une.

On distribue ensuite à chaque groupe le jeu de 41 cartes de la NASA. Parmi ces cartes, chaque groupe sélectionne son lanceur et les différents systèmes de la sonde : alimentation électrique, communication, instruments..., en respectant un budget de 400 millions de dollars. La masse totale de la sonde et donc le nombre d'instruments embarqués dépendront du lanceur choisi. Cependant, plus la charge utile à envoyer vers Mars sera importante, plus le coût du lanceur sera élevé. Il en est de même de l'alimentation électrique de la sonde. Par ailleurs, les instruments sélectionnés doivent permettre de répondre à la problématique scientifique choisie. Les élèves doivent donc faire preuve de stratégie pour concevoir leur rover ou leur atterrisseur martien.



Fig.2. Les élèves conçoivent leur sonde.

Afin de les aider à décompter le budget, la masse et la puissance électrique restante, un tableau est proposé dans l'activité.

System	Spacecraft Component	Budget 400	Mass	Power	Science Return
1.Launch		-100	+125	0	0
	Medium-Lift Rocket A	300	125	0	0
	Rocket Nose Cone	-10	-7	0	0
		290	118	0	0
2.Power		-15	-15	+25	0
	Medium-Power Solar Panel	275	103	25	0
	On-board Battery	-5	-5	-5	0
		270	98	20	0

Fig.3. Tableau pour aider à concevoir sa sonde.

Le jeu ainsi que le tableau sont téléchargeables sur le site de InSight Education. J'ai également créé deux cartes supplémentaires pour les instruments ChemCam et SEIS. Je conseille d'imprimer ces cartes en recto-verso puis de les plastifier.

Il faut prévoir environ 1 h 30 pour mener cette activité. Pour terminer la séance, on pourra demander à chaque groupe de présenter au groupe-classe sa sonde en argumentant sur le choix des équipements. Les cartes « Instruments » disposent d'un certain nombre de points de « Retour Scientifique ». On

pourra désigner le groupe vainqueur comme celui qui aura obtenu le meilleur score de retour scientifique.

On peut aussi envisager d'utiliser le jeu de cartes pour reproduire les sondes martiennes : Viking, InSight, les rovers MER ou MSL/Curiosity...

Activité 2 - Choix du site d'atterrissage

Maintenant que leur sonde a décollé pour la planète Mars, les élèves choisissent le site d'atterrissage. Celui-ci devra répondre à plusieurs contraintes scientifiques et techniques. Les contraintes scientifiques dépendent de la problématique choisie par les élèves. Par exemple, si un groupe d'élèves veut déterminer si Mars a été habitable, il devra envoyer sa sonde à un endroit où la présence passée d'eau liquide est très probable. Les contraintes techniques sont les mêmes que celles imposées pour le choix du site d'atterrissage du rover Mars 2020 :

- **altitude < 500 m** pour que la sonde freine suffisamment dans l'atmosphère ;
- **latitude comprise entre 30° S et 30° N** pour que l'énergie solaire captée soit suffisante ;
- **terrain plat** car la pente peut être défavorable pour l'ensoleillement ;
- **terrain pas trop sablonneux** pour que la sonde ne s'enlise pas ;
- **terrain pas trop accidenté**, éviter les falaises ;
- **densité de rochers au sol < 7%** pour que la sonde ne se pose pas de façon bancale ou soit abîmée à l'atterrissage.

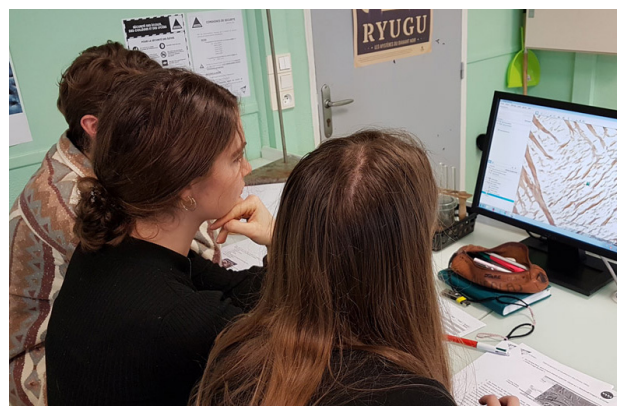


Fig.3. Recherche du site d'atterrissage.

La recherche du site d'atterrissage pourra se faire sur Google Mars, disponible sur le logiciel Google Earth. Google Mars permet de visiter le site d'atterrissage des rovers et atterrisseurs qui se sont déjà posés sur Mars. Cela peut donner des idées aux élèves. L'enseignant pourra aussi fournir la liste des sites d'atterrissage candidats pour les sondes Mars 2020, ExoMars, InSight, ... qu'on trouve sur les sites Wikipédia des différentes missions. Il faut prévoir 1 h pour cette séance.

Activité 3 - Détermination de la densité de rochers en surface au laboratoire

L'une des contraintes techniques essentielles qui s'impose pour le choix du site d'atterrissage concerne la densité de rochers en surface ; elle doit être la plus faible possible. Par exemple, l'atterrisseur InSight a une garde au sol de 55 cm et a déployé deux panneaux solaires en éventail qui lui donnent une envergure de presque 6 m. Un bloc rocheux trop gros aurait pu détruire la sonde à l'atterrissage. Il a donc fallu viser une zone de Mars où la probabilité de se poser sur un rocher est quasi nulle.

La surface de la planète rouge a été photographiée à haute résolution par la caméra HiRise de la sonde américaine Mars Reconnaissance Orbiter. Cette caméra est capable de distinguer des détails de 30 cm ! Comme la couleur des rochers se confond généralement avec celle de la surface nue, il est plus facile de voir l'ombre des rochers que les rochers eux-mêmes. Sur les photographies HiRise, les ombres des rochers apparaissent comme des taches noires de quelques pixels de surface (voir figure 5).

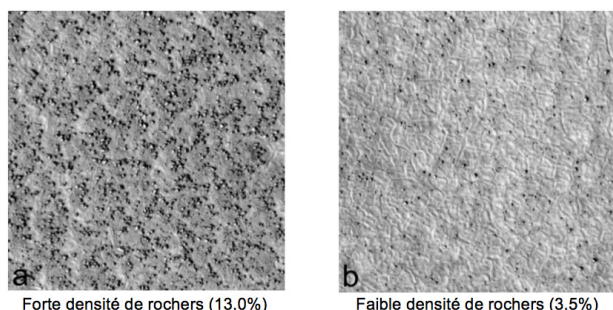


Fig.4. Surfaces martiennes de différentes densités de rochers photographiées par la caméra HiRise.

Matthew Golombek, chercheur au Jet Propulsion Laboratory de la NASA, a développé un traitement d'images pour mesurer la surface couverte par les ombres sur une photographie HiRise et en déduire ainsi la proportion de la surface couverte par des rochers. En première approximation, on considère que la surface des ombres correspond à la surface couverte par les rochers. Cette approximation n'est à priori valable que pour un éclairement incident de 45° et des rochers «cubiques». Elle s'avère globalement correcte dans les conditions d'éclairage pour lesquelles les photographies HiRise sont obtenues (Soleil à environ 55° au-dessus de l'horizon).

Dans cette activité, on procède à un traitement d'images identique, effectué grâce au logiciel ImageJ. Afin que les élèves comprennent la technique utilisée, on crée une surface martienne synthétique en disposant des pierres sur une feuille A3 blanche. Puis on éclaire cette surface latéralement avec un

rétroprojecteur et on éteint toute autre source de lumière. Un élève photographie à la verticale et en noir et blanc la surface martienne synthétique en faisant attention à avoir uniquement la feuille blanche avec les pierres dans le champ visuel et un éclairage homogène sur la feuille.



Fig.5. Surface martienne synthétique.

La photographie obtenue est partagée sur les postes de chaque groupe d'élèves qui traitent la photo en binômes sur ImageJ. Le traitement d'images consiste à isoler le contour des ombres pour calculer la surface couverte par chaque ombre, en pixels-carré. ImageJ fournit le résultat sous la forme d'un tableau csv qu'on pourra ouvrir sous Excel pour calculer la surface totale couverte par les ombres. Les élèves déterminent ensuite la surface de l'image (largeur et hauteur de l'image sont indiquées sur ImageJ). Ils obtiennent enfin le pourcentage de l'image couverte par les ombres.

Il faut prévoir 1 h pour cette activité. Une vérification de la densité réelle de rochers en surface peut être faite en entourant sur le logiciel Paint le contour de chaque pierre puis en remplissant de noir l'intérieur des surfaces obtenues. Les élèves suivent ensuite le protocole sur ImageJ. Ce sera l'occasion de discuter des erreurs induites par cette méthode et de son domaine de validité.

Activité 4 - Détermination de la densité de rochers en surface, application à Mars

Dans l'activité précédente, les élèves se sont appropriés le protocole pour déterminer la surface couverte par les ombres sur une photographie donnée. Ils appliquent maintenant ce protocole à une photographie haute résolution de la surface de Mars. Pour cela, ils téléchargent via Google Mars une photographie HiRise couvrant leur site d'atterrissage candidat. La version à la plus haute résolution de ces photographies est au format .jp2 et fait généralement plusieurs centaines de méga-octets : il faut être patient pendant le téléchargement ! On pourra prévoir une photographie HiRise téléchargée en amont de la

séance pour que les élèves l'analysent en attendant d'avoir la photographie de leur site d'atterrissage. L'image au format .jp2 sera ouverte à l'aide du logiciel HiView. Les élèves zooment sur cette très grande photographie et la parcourent jusqu'à trouver une zone appropriée pour l'atterrissage de leur sonde. Ils enregistrent une capture de l'écran et l'analysent sur ImageJ.

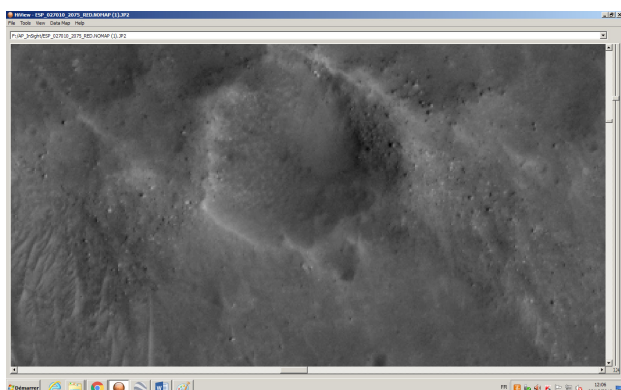


Fig.6. Capture d'écran du logiciel HiView.

Cette séance dure environ 1 h. Il peut être nécessaire d'analyser plusieurs portions de la grande image HiRise pour trouver une zone où les rochers couvrent moins de 7 % de la surface, critère retenu pour la mission Mars 2020. On pourra conclure la séance en demandant à chaque groupe de présenter au groupe-classe le site d'atterrissage retenu, en argumentant son choix.

Activité 5 - Simuler l'atterrissage de la sonde InSight sur Mars

Le site d'atterrissage étant choisi, il reste une étape critique : l'atterrissage de la sonde !

Cette activité s'inscrit dans l'enseignement de spécialité NSI de Première. Elle peut être menée indépendamment des autres activités. Denis Lesouëf, enseignant de Mathématiques et d'Informatique au lycée St Paul et moi-même avons élaboré et testé cette activité cette année avec nos élèves de Première S option Informatique et Création Numérique (ICN).

L'objectif de cette activité est de compléter un programme informatique simulant l'atterrissage de la sonde InSight sur Mars. Le programme est écrit en langage Java mais peut être traduit en Python. Le programme ouvre une fenêtre affichant un paysage martien ainsi que l'atterrisseur InSight en haut de l'écran.

À l'aide du clavier, on contrôle la poussée des rétrofusées pour que InSight atteigne la surface avec une vitesse verticale inférieure à 10 m/s. Si la sonde s'écrase, on remplace l'image de InSight par des débris.

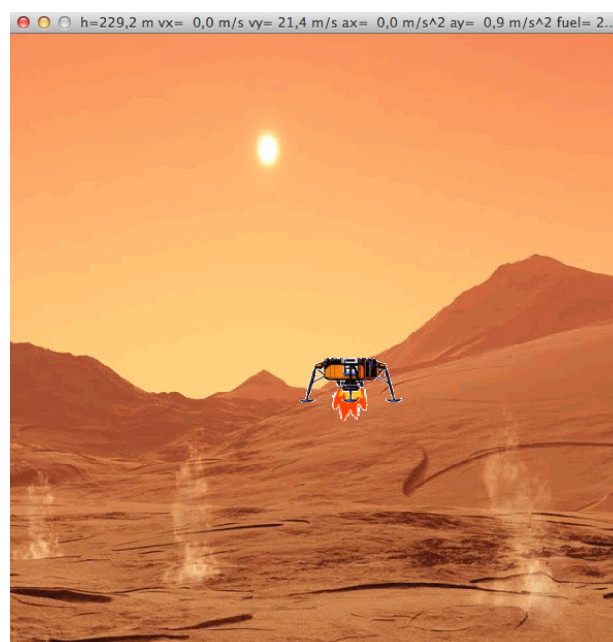


Fig.7. Capture d'écran de la simulation Java.

Suivant le niveau des élèves en informatique et le moment où cette activité est abordée dans l'année, on pourra demander aux élèves de compléter différents éléments du programme.

Par exemple, nous avons demandé aux élèves de chercher la valeur de l'intensité de pesanteur martienne, de coder les équations du mouvement de la sonde et de définir les conditions initiales de la descente. Ils ont également codé l'affichage des flammes sous la sonde et le calcul de l'accélération verticale en fonction du niveau de poussée.

On peut également imposer une quantité limitée de carburant ou ajouter des propulseurs latéraux pour augmenter la difficulté de la simulation.

Il a fallu aux élèves trois séances de 1 h pour mener ce projet.

Activité 6 - L'alimentation électrique de Curiosity et InSight

Cette dernière activité propose deux exercices sur l'alimentation électrique du rover Curiosity et de l'atterrisseur InSight. Le rover Curiosity est alimenté par un générateur thermoélectrique à radioisotope (RTG) qui convertit en énergie électrique l'énergie thermique issue de la désintégration radioactive de 4,8 kg de plutonium 238. Par une série de questions guidant les élèves, le premier exercice a pour but de déterminer la puissance électrique du rover Curiosity au 4 702^e jour martien de sa mission. Les élèves comparent la valeur obtenue à celle donnée par les ingénieurs de la NASA. On pourra aussi proposer cet exercice en résolution de problème.



Fig.8. L'atterrisseur InSight, panneaux solaires déployés.

L'atterrisseur InSight dispose de deux panneaux solaires d'une surface totale de 4,2 m² (figure 9). Le but de l'exercice est de déterminer la puissance électrique fournie par ces panneaux solaires à midi connaissant la puissance lumineuse émise par le Soleil, la distance moyenne Soleil-Mars, l'angle solaire incident à midi et le rendement de conversion énergie solaire - énergie électrique.

Le retour des élèves sur ces activités a été très positif. Ils ont beaucoup apprécié le caractère ludique, le travail de groupe et le lien direct avec une mission spatiale en cours dont nous suivions l'avancée chaque semaine. Je continue actuellement de travailler avec mes élèves autour de la mission InSight. Ils s'initient à la sismologie lunaire et martienne grâce aux activités du programme InSight Education afin d'être prêt à étudier les premiers sismogrammes martiens lorsqu'ils seront mis à notre disposition.

N'hésitez pas à consulter le site Internet de InSight Education (lien en début d'article) pour découvrir toutes les activités à mener avec vos élèves. Si vous êtes intéressés soit pour recevoir la lettre d'information d'InSight Education, soit pour être mis en relation avec les enseignants du programme ou proposer vos propres activités, contactez Jean-Luc Bérenguer (jean-luc.berenguer@ac-nice.fr), enseignant de SVT au Lycée International de Valbonne, chargé de mission académique géoscience auprès de Géoazur et animateur du programme InSight Education.

Mots croisés surfaces planétaires

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

Horizontalement

1. Se trouve sur Terre mais on en a vu aussi sur Mars, Vénus ou la Lune.
2. Alpha ou Bêta sur Vénus par exemple.
3. Cité engloutie. Il a vu de nombreux canaux sur Mars.
4. Il n'y en a qu'un sur la Lune (mais plusieurs sur Terre).
5. Une planète où le volcanisme était encore actif récemment. Water on Mars.
6. Pas off. Se trouve sur Terre mais on en a vu aussi sur Mars ou la Lune.
7. Des songes sur la Lune par exemple (mais il y en a aussi sur Terre). 1 de la Terre au Soleil. III×III.
8. Comme un vieux relief planétaire.
9. Le premier. Paradis.
10. Comme un point d'éclipse. Pour observer l'hémisphère sud.
11. Thomas Pesquet y est resté plus de 6 mois. Celui d'une surface se mesure au nombre de cratères.

Verticalement

1. On en trouve sur Encelade, Triton ou Pluton, mais ni sur Vénus, ni sur Terre ni sur Mars.
2. Histoires.
3. Comme un désert martien. Préposition. Constitué de grands cristaux.
4. Sonde lunaire désordonnée. At five o'clock.
5. Aller dans le futur. Elle perd un membre. Pour s'accorder.
6. Orleans en Louisiane. Imbrium par exemple sur la Lune.
7. Inspiratrice. Peut être reçue ou fixe.
8. Il a vu de nombreux pharaons. Mer lunaire.
9. Cri d'indignation. Noble, rare et cher.

ARTICLE DE FOND

Les cratères d'impact à la surface des corps planétaires, un chronomètre géologique pour retracer l'histoire géologique

Sylvain Bouley, planétologue et maître de conférences à l'Université Paris Saclay

Dans cet article vous découvrirez comment les géologues parviennent à faire une étude des couches géologiques successives (stratigraphie) des planètes telluriques, sans même y avoir jamais mis les pieds.

Les échantillons de roches lunaires rapportées sur Terre furent d'une grande utilité pour élaborer un modèle applicable ailleurs.

Comment raconter l'histoire géologique d'une planète sans avoir accès aux roches de surface ? Telle est la problématique des planétologues. Sur Terre, les géologues ont depuis près d'un siècle la possibilité de dater certaines roches grâce aux méthodes radiogéniques basées sur la désintégration d'éléments radioactifs. Ces datations ont aujourd'hui permis de retracer assez précisément l'histoire de la Terre même si de nombreuses incertitudes existent sur les périodes anciennes. En effet, sur Terre, peu de roches âgées de plus de 3 milliards d'années existent. Sur la Lune ou sur Mars, c'est l'inverse, la majorité des terrains ont plus de 3 milliards d'années. Malheureusement, l'accès à des échantillons de roches est pour le moment très difficile. Il existe bien des météorites lunaires ou martiennes que l'on retrouve sur Terre et que l'on peut dater mais il est impossible de savoir leur contexte géologique passé. Si l'on veut un jour retracer l'histoire géologique de ces planètes, il faudrait pouvoir extraire des milliers d'échantillons pour les dater. Aujourd'hui la technologie ne nous permet ni de les dater in situ ni de les ramener sur Terre automatiquement.

La Lune, notre meilleure alliée pour dater

Une méthode indirecte de datation a été proposée voici une cinquantaine d'années et est aujourd'hui largement utilisée par les géologues planétaires. La première stratigraphie lunaire est établie en 1962 par Shoemaker et

Hackman. Cinq subdivisions stratigraphiques sont proposées et seront par la suite peu modifiées. La stratigraphie utilisée aujourd'hui est ainsi divisée en 5 périodes principales basées sur le nom de différentes formations lunaires, cratères et mers (figures 1 et 2).

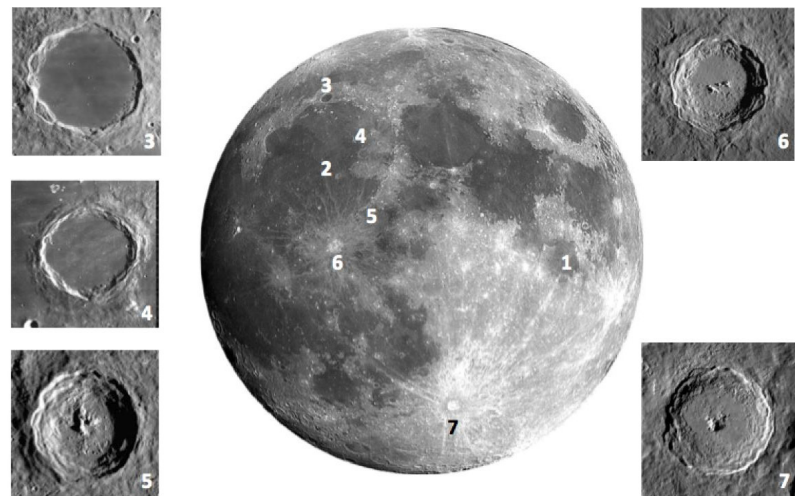


Fig.1. Les cinq régions lunaires ayant donné leur nom aux cinq grandes périodes géologiques : la mer du Nectar (1), la mer des Pluies ou Mare Imbrium (2), le cratère Autolycus (4), le cratère Ératosthène (5) et le cratère Copernic (6). On a indiqué également les cratères Platon (3) et Tycho (7).

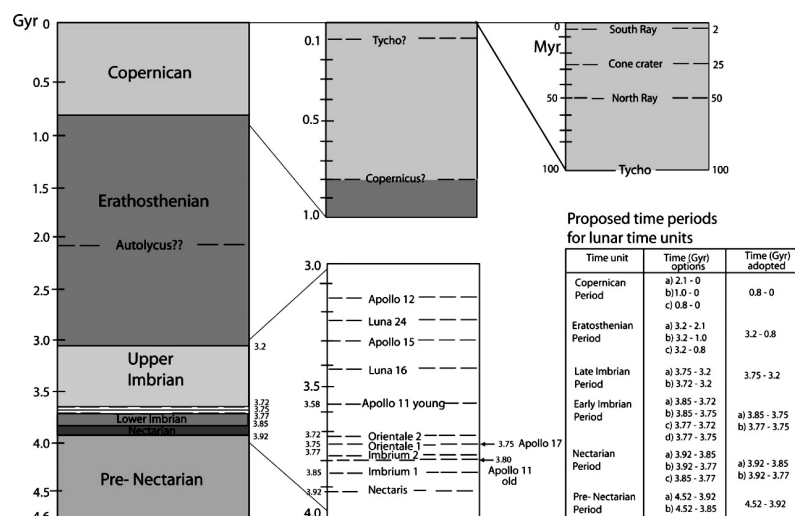


Fig.2. En grisé, dates des principales périodes en milliards d'années (Gyr) ou millions d'années (Myr). On a aussi indiqué en blanc au centre l'âge des échantillons récoltés.

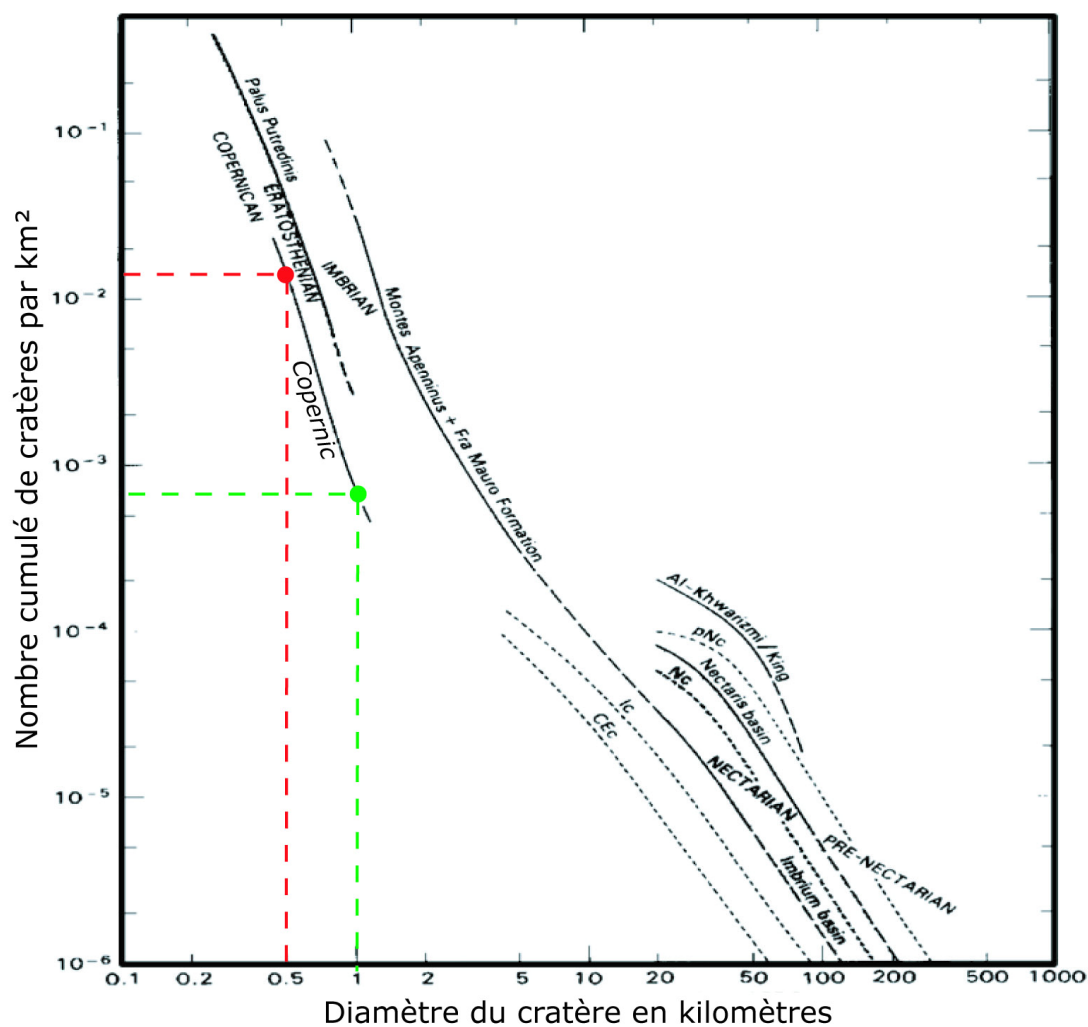


Fig.3. En ordonnée, le nombre cumulé de cratères au km² et en abscisse, le diamètre des cratères. Dans le cratère Copernic par exemple, on trouve environ 10⁻² cratère de plus de 0,5 km de diamètre par km² (point rouge) soit 10 cratères pour 1000 km² ou 10⁻³ cratère de plus de 1 km de diamètre par km² (point vert).

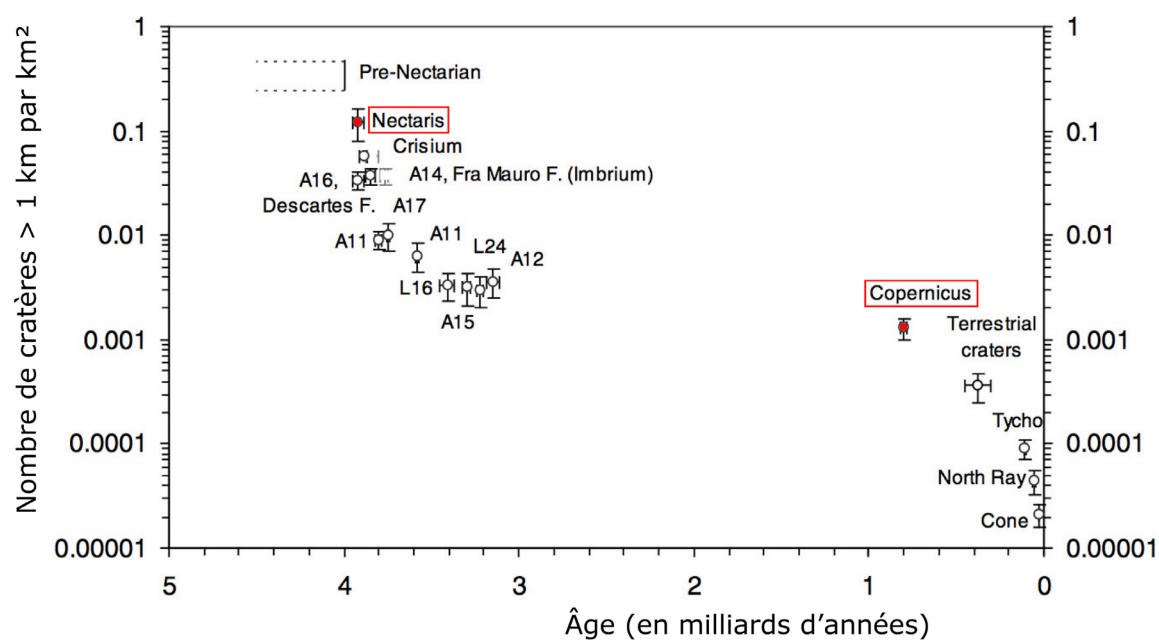


Fig.4. Dans quelques régions dont on connaissait l'âge grâce à des échantillons rapportés, on a comptabilisé les cratères de plus d'un km de diamètre. Deux exemples : Copernic en compte environ 0,001 par km² et son âge est estimé à près d'un milliard d'années ; la mer du Nectar compte beaucoup plus de cratères (0,1 par km²) et est beaucoup plus ancienne (4 milliards d'années).

Pour chaque unité stratigraphique, les cratères d'impact ont été comptés. Plus l'unité est vieille, plus la densité des cratères est importante et ce, quelle que soit la gamme de diamètres considérée. Ainsi, chaque unité est définie par une courbe décroissante reliant diamètre du cratère et densité cumulative des cratères (figure 3).

Grâce aux missions américaines Apollo (1969 - 1972) et Luna (1969 - 1976), près de 400 kg de roches lunaires ont été échantillonnées sur une dizaine de sites et ont été rapportées sur Terre pour être étudiées et datées. Les roches échantillonnées ont été datées grâce aux méthodes radiogéniques (Rb-Sr, Sm-Nd, ^{40}Ar - ^{39}Ar). On a attribué à chacune d'elle un âge de cristallisation pour les roches ignées et impactées et un âge de métamorphisme pour les roches recristallisées. C'est ainsi que la stratigraphie lunaire a été calibrée en fonction du temps (figure 2). Ces roches ont majoritairement des âges compris entre 3 et 4 milliards d'années même si certaines sont plus récentes (moins d'un milliard d'années). Alors que les âges du Pré-Nectarien à l'Imbrien sont relativement bien contraints par les datations réalisées in situ, il est plus difficile d'attribuer un âge à la formation des cratères récents. Par exemple, l'âge du cratère Copernic a été établi à partir de roches du site Apollo 12 situé à plus de 380 km de celui-ci. Les éjectas du cratère traversant le site d'Apollo 12, il a été accepté que des verres d'impact retrouvés sur ce site pouvaient dater la formation du cratère, ce qui peut être largement débattu. Pour le cratère Tycho, l'hypothèse est encore plus forte puisque l'âge retenu a été réalisé sur des roches échantillonnées dans un glissement de terrain du Massif Sud (Apollo 17) considéré comme ayant été déclenché par l'impact situé à 2 200 km.

Grâce à la datation absolue des roches lunaires, il est ainsi possible de relier les âges des différents terrains avec la densité de cratères en fonction du diamètre (figure 4).

Une loi de taux de cratérisation en fonction du temps peut être ainsi déterminée.

Pour chaque terrain avec un âge absolu, une densité de cratères a été déterminée par comptage permettant ainsi de déterminer l'évolution du flux d'impacts avec le temps. Neukum (1983) propose une loi permettant de relier sur la Lune $N(1)$, le nombre de cratères d'un diamètre égal ou supérieur à 1 km par km² et le temps d'accumulation de cratères T en milliard d'années.

$$N(1) = 5,44 \times 10^{-14} (e^{6,93T} - 1) + 8,38 \times 10^{-4} T \quad (1)$$

Cette loi propose une décroissance du flux d'impacts entre 4 et 3 Ga d'un facteur 500 et un flux constant depuis 3 Ga. Bien établie entre 4 et 3 Ga, il existe de nombreuses incertitudes sur le flux durant la période pré-nectarienne (> 4 Ga) et les périodes ératosthénienne et copernicienne (< 3 Ga).

L'absence d'observation de terrain entre 4,5 et 4 Ga ne permet pas d'avoir des informations sur le flux d'impacts à cette époque et entraîne ainsi de nombreuses spéculations sur un possible bombardement tardif. Si l'analyse de certaines météorites lunaires propose un pic de cratérisation autour de 3,9 Ga, certaines études ont tendance à montrer que la cratérisation devait être tout aussi intense jusqu'à au moins 4,2 Ga.

Dater Mars à partir de la Lune

Après avoir travaillé sur cette loi lunaire, les scientifiques ont décidé de l'appliquer à la planète Mars après quelques adaptations. Comme sur la Lune, il a été possible de proposer une stratigraphie relative martienne. Grâce aux images de Mariner IV, Hartmann (1966, 1973) observe que la densité de cratères n'est pas homogène sur Mars. Grâce à ces données puis à celles des missions Viking, les premières cartes géologiques permettent de définir 3 grandes périodes basées sur 3 grands types de terrains :

- des terrains très cratérisés (figure 5 en rouge) dont les unités géologiques de référence sont les plaines intercratères à l'est d'Argyre Planitia (n° 1), les terrains situés à l'ouest d'Hellas Planitia (n° 2), les monts de Charitum (n° 3) et Nereidum (n° 4) et les terrains de Noachis Terra (n° 5). Ces terrains sont donc considérés comme très anciens et sont définis comme appartenant à une époque ancienne nommée **Noachienne**, en relation au nom de la région de référence ;
- des terrains relativement moins cratérisés (figure 5 en bleu) dont les unités géologiques de référence sont les plaines intercratères ridées d'Hesperia Planum (n° 6) et de Vasistas Borealis (n° 7). Ces terrains sont considérés plus jeunes que ceux décrits précédemment. Ils sont définis comme appartenant à l'époque appelée **Hespérienne** ;
- des terrains peu cratérisés (figure 5 en vert) dont les unités géologiques de référence sont les plaines volcaniques d'Amazonis Planitia (n° 8), d'Acidalia Planitia (n° 9) et du sud d'Elysium Planitia (n° 10). Ces terrains récents sont associés à l'époque **Amazonienne** en référence au nom de la région type.

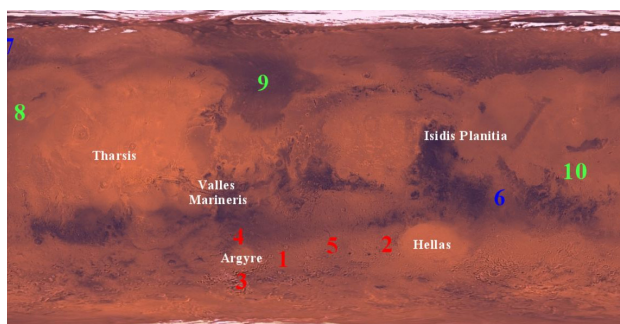


Fig.5. Planisphère de Mars. Les numéros rouges indiquent les régions les plus cratérisées donc les plus anciennes.

L'un des problèmes majeurs sur Mars est qu'aucune roche n'a été datée dans son environnement. Il n'est donc pas possible comme sur la Lune de calibrer la stratigraphie à partir de datation absolue. La stratigraphie absolue martienne a donc été calibrée à partir du travail réalisé sur la Lune en prenant en compte 2 hypothèses :

- la distribution en taille des objets qui heurtent la Lune est la même que la distribution en taille des objets qui heurtent Mars ;
- le rapport entre le nombre d'impacts sur la Lune et sur Mars est constant au cours du temps (s'il est moyenné sur une période d'au moins une dizaine de millions d'années).

À partir de ce travail, il est possible de calculer une loi de taux de cratérisation en fonction du temps. La différence entre la densité de cratère martienne et lunaire dépend :

(1) du rapport de gravité de surface Lune/Mars ($g_{\text{Lune}} = 1,622 \text{ m/s}^2$ et $g_{\text{Mars}} = 3,711 \text{ m/s}^2$) ;

(2) de la différence de vitesse d'impact moyenne entre les deux corps ($v_{\text{Lune}} = 10 \text{ km/s}$ et $v_{\text{Mars}} = 14 \text{ km/s}$) ;

(3) du rapport du taux de cratérisation Mars/Lune R_{bolide} ($R_{\text{bolide}} = 2.6 \pm 0.7$). Ainsi Mars capte davantage de projectiles que la Lune et ces objets y font des cratères plus petits que sur notre satellite. Basé sur la loi lunaire, Ivanov (2001) propose :

$$N(1) = 2,68 \times 10^{-14} (e^{6,93 T} - 1) + 4,3 \times 10^{-4} T \quad (2)$$

avec $N(1)$ le nombre de cratères d'un diamètre égal ou supérieur à 1 km et T le temps d'accumulation de cratères en milliards d'années.

Si les âges déterminés sont assez imprécis, cette méthode a le mérite de proposer une chronologie des événements géologiques sur la planète rouge. En effet, il suffit de compter les cratères, de comparer les densités de cratères des différents terrains pour savoir quels sont les terrains les plus récents et les plus anciens. Par exemple, le volcan Olympus Mons montre très peu de cratères à sa surface et est donc le témoin d'un volcanisme récent. Sur les autres surfaces des planètes (Mercure, Vénus), des astéroïdes ou des satellites des planètes géantes, il est également possible d'appliquer cette méthode mais les âges dépendront toujours du taux de cratérisation utilisé très variable en fonction de la localisation dans le Système solaire. ■

La version numérique sur le site contient en plus de nombreuses références de publications.

OBSERVATION

Éclipse partielle de Lune le 16 juillet 2019 au soir

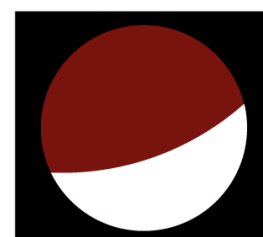
Les horaires (heures légales)

Entrée dans l'ombre : 22 h 02.
Maximum de l'éclipse : 23 h 31.
Sortie de l'ombre : 1 h 00.

Comment l'observer

En France métropolitaine, la Lune se lèvera entre 20 h 50 en Corse et 22 h 12 à Brest. Il faudra observer la Lune côté nord-est, assez bas au-dessus de l'horizon.

La grandeur de cette éclipse est de 0,65, ce qui signifie que, au maximum de l'éclipse, 65 % du diamètre lunaire sera dans l'ombre.

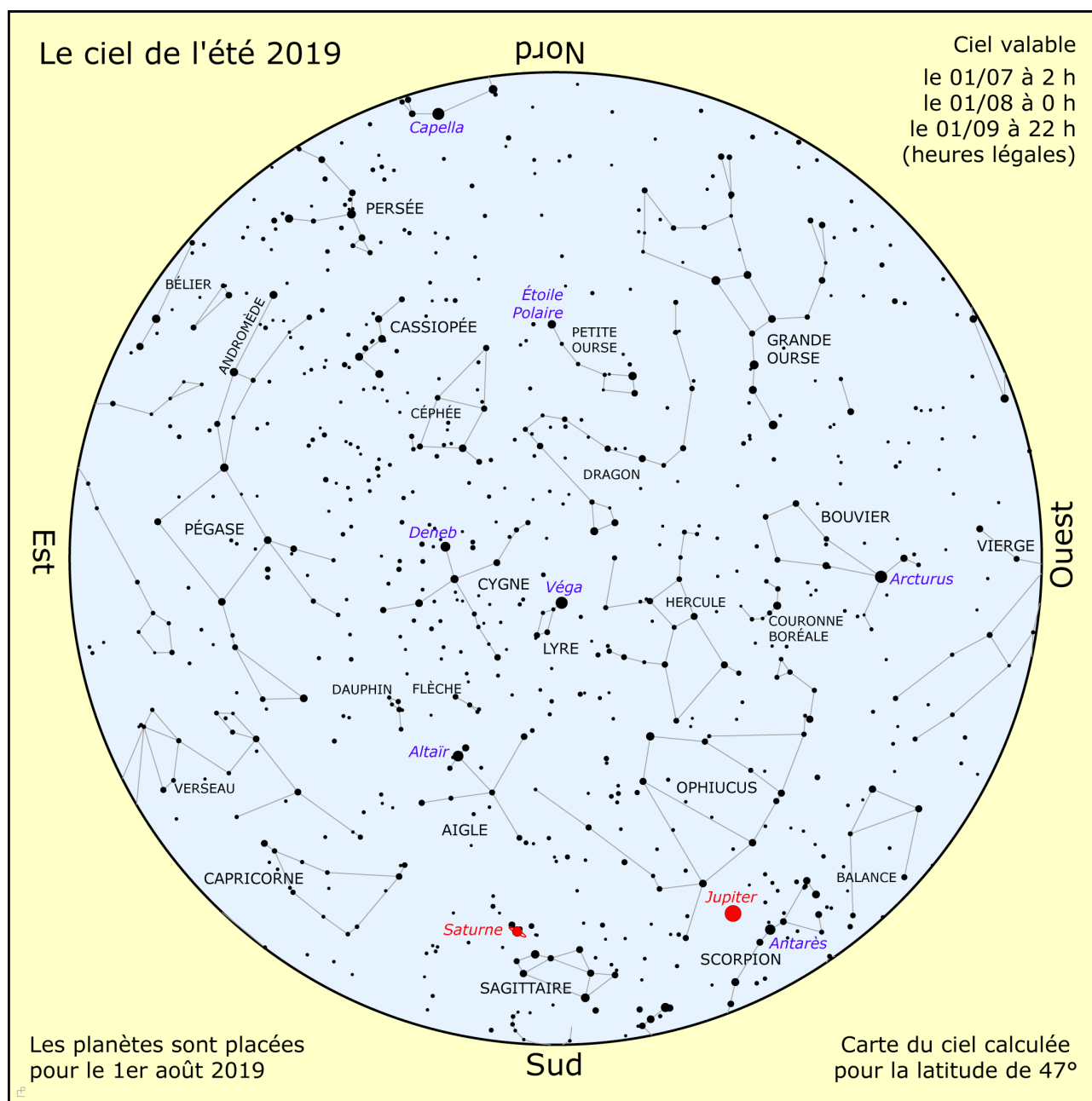


La Lune au maximum de l'éclipse

Observation de la Lune les 12-13 juillet

À l'occasion des 50 ans du 1er homme sur la Lune, sortez vos lunettes ou télescopes pour faire découvrir notre satellite aux passants ! Cette opération, « On the moon again » devance la date anniversaire du 21 juillet, la Lune se levant bien tard (après minuit) à cette date.

OBSERVATION



Visibilité des planètes (été 2019)

Mercury peut être aperçue le soir fin juin début juillet. On la retrouve tôt le matin autour du 10 août.

Vénus ainsi que **Mars** passent derrière le Soleil et sont donc invisibles actuellement.

Jupiter était à l'opposé du Soleil le 10 juin. Elle est maintenant visible le soir tout l'été, dans la constellation d'Ophiucus.

Saturne passe à l'opposition le 10 juillet. Elle sera donc visible tout l'été, dans le Sagittaire. Ses anneaux sont toujours bien ouverts.

Quelques événements (heures légales)

21/06 : solstice d'été à 17 h 54.

2/07 : éclipse totale de Soleil visible depuis l'Amérique du Sud.

4/07 : aphélie. La Terre à 152 104 000 km du Soleil.

16/07 : éclipse partielle de Lune (voir page 29).

12-13/08 : maximum des Perséides (étoiles filantes).

23/09 : équinoxe d'automne à 9 h 49.

11/11 : passage de Mercure devant le Soleil.

Lune

Nouvelle Lune : 2/07, 1/08, 30/08.

Pleine Lune : 16/07, 15/08, 14/09.

NOTIONS DE BASE

Cartes du ciel, cartes de la Terre (3)

Michel Bobin, Pierre Causeret

Quelles sont les différentes projections utilisées pour représenter la Terre et le ciel ? Voici la troisième partie de l'article commencé dans le n° 164, avec ici les projections coniques.

Projections coniques (cône tangent)

On projette la sphère sur un cône dont le sommet S appartient à l'axe (ON). Nous choisirons ici un cône tangent à la sphère suivant un parallèle de latitude φ_0 (il est aussi possible de considérer un cône sécant à la sphère suivant deux parallèles, cas que nous aborderons plus loin).

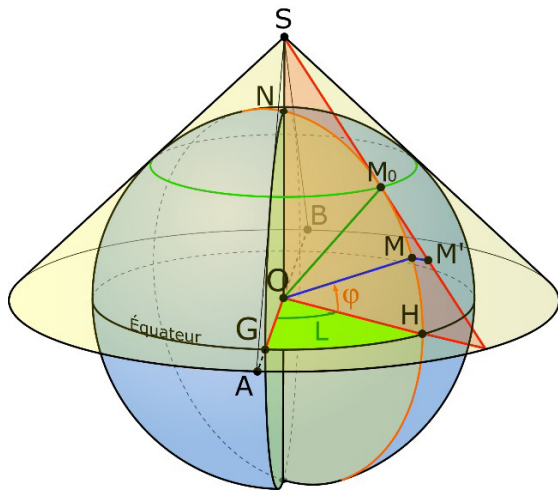


Fig.18. Le cône est tangent à la sphère suivant le parallèle vert. M est un point de la sphère de coordonnées (L, ϕ) . Le demi-plan de frontière (ON) passant par M (représenté en rose) coupe le parallèle vert en M_0 . Le point M de la sphère est projeté sur le cône en un point M' situé sur la demi-droite $[SM_0]$.

On découpe ensuite le cône suivant $[SB]$, à l'opposé du méridien origine, et on le déroule (figure 19). Cette famille de projection est intéressante car elle admet comme cas limite les projections cylindriques si S est à l'infini (voir CC n° 165) et les projections azimutales si S est en N (voir le prochain article).

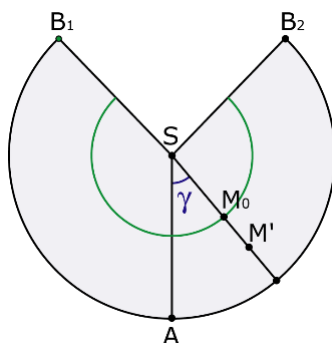


Fig.19. Le cône une fois déroulé.

Cette forme de carte, en cône déplié, ressemble peu à une sphère. On l'utilise rarement pour représenter la sphère (terrestre ou céleste) en entier. Par contre, on l'emploie couramment pour représenter une partie seulement de sphère. Dans ce cas, on choisit le parallèle de tangence au milieu de la région qui nous intéresse.

Le développement du cône

(notions mathématiques niveau collège)

Calcul de l'angle $\widehat{B_1SB_2}$ de la figure 19

Sur la figure 20 : $\widehat{HOM_0} = \varphi_0$ (latitude du parallèle tangent).

$\widehat{SOM_0} = z_0 =$ complémentaire de $\widehat{HOM_0}$ donc de φ_0 .

$\widehat{KSM_0} =$ complémentaire de $z_0 = \varphi_0$.

$\sin \widehat{KSM_0} = KM_0 / SM_0$ donc $SM_0 = KM_0 \sin \varphi_0$

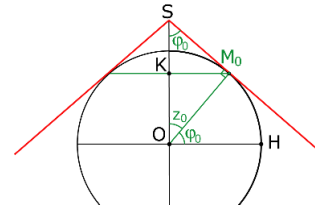


Fig.20. Coupe dans le plan rose de la figure 18.

L_1 , longueur du parallèle vert (fig. 18-19-20) $= 2\pi \times KM_0$

L_2 , longueur du cercle entier de rayon SM_0 de la figure 19 :

$$2\pi \times SM_0 = 2\pi \times KM_0 \sin \varphi_0 \text{ donc } L_2 = L_1 \sin \varphi_0$$

Puisque $L_2 / L_1 = \sin \varphi_0$, l'angle au centre $\widehat{B_1SB_2}$ sur la figure 19 est égal à $2\pi \times \sin \varphi_0$.

Sur les figures précédentes, on a pris $\varphi_0 = 49^\circ$: $\widehat{B_1SB_2}$ mesure alors 272° ($360^\circ \times \sin 49^\circ$).

Calcul de l'angle γ en fonction de L (figure 16)

L varie de $-\pi$ à π et γ varie de $-\pi \times \sin \varphi_0$ à $\pi \times \sin \varphi_0$.

On aura donc : $\gamma = L \times \sin \varphi_0$

M' sur la figure 19 sera repéré en coordonnées polaires (ρ, γ) . La distance SM' , notée ρ , n'est fonction que de φ , la latitude de M , alors que l'angle γ est une fonction linéaire de L (voir encadré ci-dessus) :

$$\rho = r(\varphi) \text{ et } \gamma = L \sin \varphi_0$$

Dans les exemples de projections coniques qui suivent, on fera en sorte que les déformations au voisinage du parallèle de tangence soient nulles : on parle alors de parallèle automécoïque.

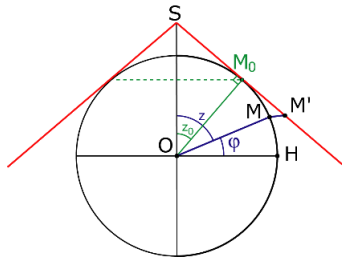


Fig.21. Au lieu d'exprimer ρ en fonction de φ , on peut l'exprimer en fonction de z , son complémentaire (colatitude). On aura alors : $\rho = f(z)$ et $\gamma = L \cos z_0$

Projection conique mérid-équidistante

On veut que l'échelle locale de distance sur les méridiens soit constante. Les parallèles sur la carte seront alors équidistants (voir figures 22). On doit aussi s'arranger pour que l'échelle de distance sur ces méridiens soit la même que sur le parallèle de tangence (le parallèle vert de la figure 18), ceci pour que les cartes soient peu déformées au niveau des régions traversées par ce parallèle (dit automécoïque). Pour cela, on doit avoir : $M_0M' = \widehat{M_0M}$ (longueur de l'arc). Les calculs donnent alors (voir encadré) :

$$\rho = z - z_0 + \tan z_0$$

(ou z est le complémentaire de φ)

C'est la projection de Delisle.

Calculs pour une projection conique mérid-équidistante

Quand on déroule le cône, le parallèle de tangence ne change pas de longueur, et l'échelle locale de distance y est égale à 1.

Pour avoir la même échelle locale de distance sur les méridiens, on doit avoir (figure 21) :

$$M_0M' = \widehat{M_0M} = z - z_0 \text{ (la sphère a pour rayon 1).}$$

$$\text{D'où } \rho = SM' = SM_0 + M_0M' = \tan z_0 + z - z_0.$$

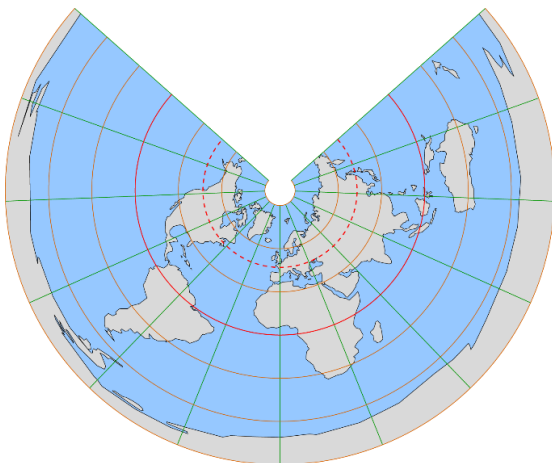


Fig.22a. Carte de la Terre en projection conique mérid-équidistante. Projection sur un cône tangent au parallèle $+47^\circ$, indiqué en pointillés rouges (latitude moyenne en France métropolitaine).

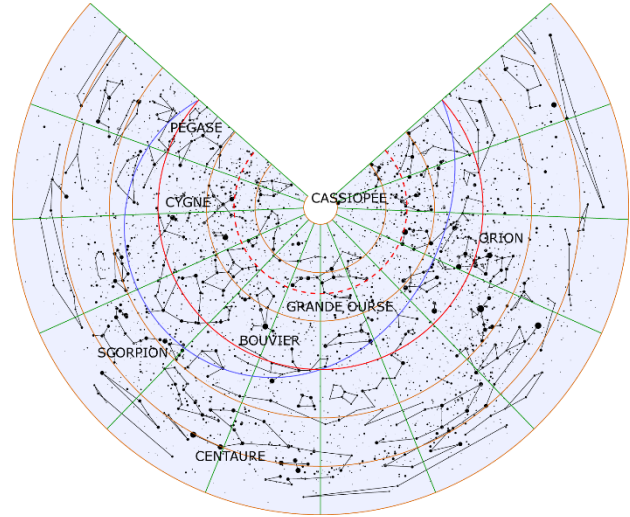


Fig.22b. Carte du ciel en projection conique mérid-équidistante. Projection sur un cône tangent au parallèle $+47^\circ$. On remarque sur ces deux cartes que le pôle Nord n'est pas ponctuel, mais étalé sur un arc de cercle.

Projection conique équivalente (d'Albers)

Nous avons vu dans la partie 1 (CC n° 164 p 11) la condition pour qu'une projection soit équivalente (conserve les aires).

De plus, pour que le parallèle de tangence soit automécoïque, l'échelle locale de distance sur les méridiens aux alentours du parallèle de tangence doit être la même que sur le parallèle tangent (où elle vaut 1). Les calculs (dans l'encadré) donnent alors :

$$\rho = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \varphi_0} - 2 \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0}} \text{ et } \gamma = L \sin \varphi_0$$

Calculs pour une projection conique équivalente

Une projection est équivalente si (cf partie 1 CC n° 164) :

$$\frac{\rho}{\cos \varphi} \times \left(\frac{d\rho}{dL} \times \frac{d\gamma}{d\varphi} - \frac{d\rho}{d\varphi} \times \frac{d\gamma}{dL} \right) \text{ est constant} \quad (1)$$

Comme $\gamma = L \sin \varphi_0$, $d\gamma/d\varphi = 0$ et $d\gamma/dL = \sin \varphi_0$, la condition

$$(1) \text{ devient : } \frac{\rho}{\cos \varphi} \times \left(-\frac{d\rho}{d\varphi} \times \sin \varphi_0 \right) = a \quad (2)$$

ou encore $\rho d\rho \times \sin \varphi_0 = -a \cos \varphi d\varphi$

soit, en intégrant : $\rho^2/2 \times \sin \varphi_0 = -a \sin \varphi + b \quad (3)$

On calcule a et b à partir des deux conditions suivantes (fig 20) 1. Pour φ proche de φ_0 , l'échelle locale de distance doit être égale à 1. On aura donc $d\rho/d\varphi = -1$ au voisinage de φ_0 (quand φ augmente, ρ diminue, d'où le signe $-$).

On remplace dans l'égalité (2) ρ par ρ_0 (soit $1/\tan \varphi_0$), φ par φ_0 et $d\rho/d\varphi$ par -1 :

$$\frac{1}{\tan \varphi_0 \times \cos \varphi_0} \times \sin \varphi_0 = a \text{ d'où } a = 1$$

2. Si $\varphi = \varphi_0$, $\rho = 1/\tan \varphi_0$. En remplaçant dans (3), on obtient :

$$1/\tan^2 \varphi_0 / 2 \times \sin \varphi_0 = -\sin \varphi_0 + b$$

$$\text{ce qui donne } b = (1 + \sin^2 \varphi_0)/(2 \sin \varphi_0)$$

En remplaçant a et b par leur valeur dans l'égalité 3, on arrive

$$\text{finalement à : } \rho^2 = 1 + \frac{1}{\sin^2 \varphi_0} - 2 \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0}$$

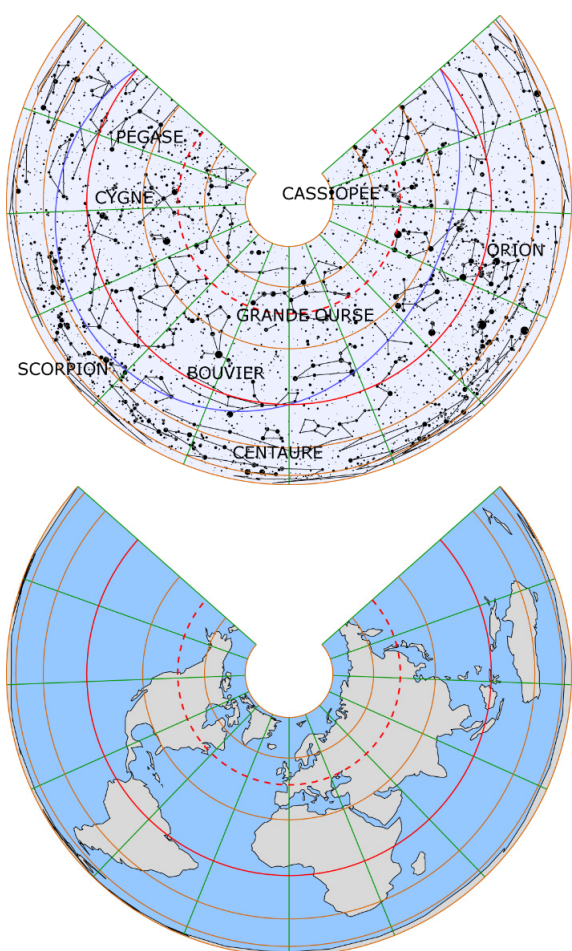


Fig.23. Cartes du ciel et de la Terre en projection conique équivalente jusqu'à la déclinaison de -60° . Projection sur un cône tangent au parallèle $+47^\circ$ (pointillés rouges). Ici, les aires sont conservées et non les formes. Le Scorpion ou l'Australie sont étirés en largeur et aplatis en hauteur.

Projection conique conforme (de Lambert)

Nous avons vu dans la partie 2 (CC n° 165 p. 33) les conditions pour qu'une projection soit conforme (conserve les formes donc les angles). Pour une projection conique, on obtient la formule suivante (calculs dans l'encadré) :

$$\rho = \tan z_0 \times e^{\cos z_0 \times \ln \left(\frac{\tan(z/2)}{\tan(z_0/2)} \right)}$$

Lorsque l'on s'éloigne du pôle Nord, les parallèles deviennent de plus en plus espacés. On ne peut pas représenter ainsi toute la sphère (terrestre ou céleste). Les cartes qui suivent vont du pôle Nord au parallèle -60° .

Les formes sont conservées à petite échelle : la France ou Madagascar sont bien reconnaissables sur la première carte ainsi que la Grande Ourse ou le Scorpion sur la seconde.

Calculs pour une projection conique conforme

La projection étant conique, nous avons :

$\rho = r(\varphi)$ et $\gamma = L \cos z_0$ donc $d\gamma/d\varphi = 0$ et $d\gamma/dL = \cos z_0$,
Pour une projection conforme, nous avons vu (CC n° 165 p. 33) deux conditions (C1) et (C2).

(C1) se vérifie facilement avec la formule ou en remarquant simplement que, sur la carte projetée, les parallèles sont bien perpendiculaires aux méridiens.

Pour la condition (C2), on obtient, en remplaçant $d\gamma/d\varphi$ par 0 et $d\gamma/dL$ par $\cos z_0$, dans la formule :

$$\left(\frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 + 0 = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \times (0 + \rho^2 \sin^2 \varphi_0)$$

Si le parallèle tangent est dans l'hémisphère nord, φ_0 est positif ; $\cos \varphi$, ρ et $\sin \varphi$ sont aussi positifs alors que $d\rho/d\varphi$ est négatif car $\rho = r(\varphi)$ est décroissant. Si φ_0 négatif, $\sin \varphi_0$ est négatif mais tous les autres termes, y compris $d\rho/d\varphi$ sont positifs. On a donc :

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = -\frac{1}{\cos \varphi} \times \rho \sin \varphi_0$$

ce que l'on peut écrire : $\frac{1}{\rho} d\rho = -\sin \varphi_0 \times \frac{1}{\cos \varphi} d\varphi$ (1)

On a trouvé une primitive de $1/\cos \varphi$ dans la recherche d'une projection cylindrique conforme (CC n° 165 p. 33 encadré 2). On peut donc intégrer la formule (1) et on obtient :

$$\ln \rho = -\sin \varphi_0 \times \ln \left(\tan \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right) + k$$
 (2)

Si on remplace φ par $\pi/2 - z$ (voir figure 21), cette formule devient :

$$\ln \rho = \cos z_0 \times \ln(\tan z) + k$$
 (3)

On sait que, si $z = z_0$, alors $\rho = \tan z_0$ (1^{er} encadré de la page précédente). En remplaçant dans la formule (3), on en déduit k :

$$k = \ln(\tan z_0) - \cos z_0 \times \ln(\tan z_0)$$

La formule (3) peut alors s'écrire :

$$\ln \rho - \ln(\tan z_0) = \cos z_0 \times \ln(\tan z) + \cos z_0 \times \ln(\tan z_0)$$

ou encore

$$\rho = \tan z_0 \times e^{\cos z_0 \times \ln \left(\frac{\tan(z/2)}{\tan(z_0/2)} \right)}$$

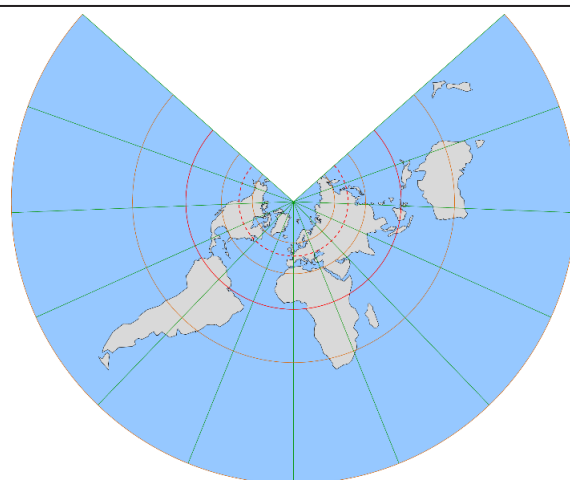


Fig.24a. Carte de la Terre en projection conique conforme jusqu'à la déclinaison de -60° . Projection sur un cône tangent au parallèle $+47^\circ$ (en rouge).

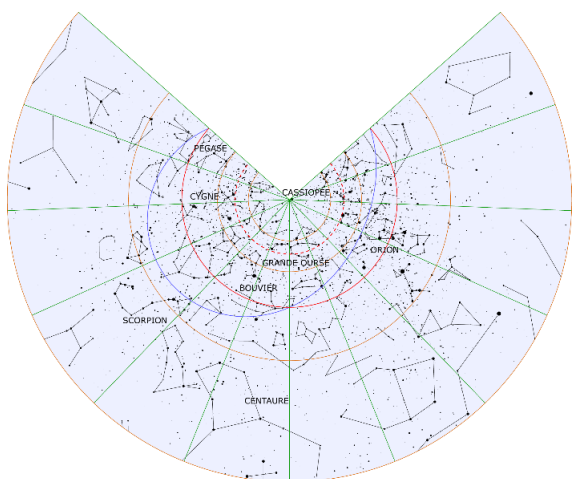


Fig. 24b. Carte du ciel en projection conique conforme jusqu'à la déclinaison de -60° . Projection sur un cône tangent au parallèle $+47^\circ$ (en rouge).

Projections coniques (cône sécant)

On peut remplacer le cône tangent par un cône sécant suivant deux parallèles (figure 25). Il est possible de faire en sorte que ces deux parallèles soient automécoïques (déformations locales nulles autour de chacun de ces deux parallèles). Pour une carte de France avec peu de déformation, on choisira par exemple comme parallèles auto-mécoïques, les latitudes 44° et 49° .

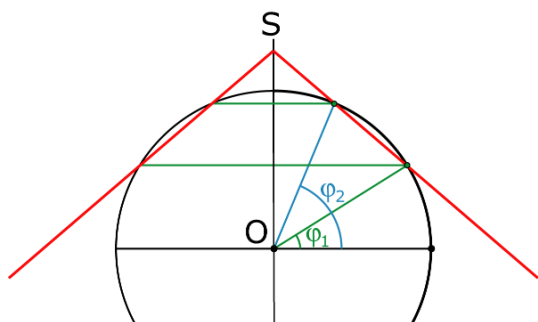


Fig. 25. Le cône est ici sécant à la sphère suivant deux parallèles de latitude φ_1 et φ_2 .

On peut alors chercher des formules pour une projection mérid-équidistante, équivalente ou conforme. Si l'on veut avoir deux parallèles automécoïques, il n'est plus possible de déplier

le cône comme dans le paragraphe précédent et d'utiliser la formule $\gamma = L \sin \varphi_0$.

On utilise alors une formule de la forme $\gamma = L \times n$, ce qui revient à ouvrir ou fermer le cône déplié à la manière d'un éventail.

Les formules obtenues ne sont pas simples mais elles sont utilisées couramment, aussi bien pour les cartes terrestres que pour les cartes célestes. Nous ne les démontrerons pas ici, elles sont justes données dans l'encadré qui suit, où φ_1 et φ_2 sont les latitudes des parallèles intersection.

Formules avec cône sécant

Projection conique mérid-équidistante (de Delisle)

$$\gamma = \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1} \times L \quad \text{et} \quad \rho = -\varphi + \frac{\varphi_2 \cos \varphi_1 - \varphi_1 \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}$$

Projection conique équivalente (d'Albers)

$$\gamma = \frac{\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2}{2} \times L$$

$$\rho = \frac{2}{\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2} \sqrt{(1 + \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2) - \sin \varphi \cdot (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2)}$$

Projection conique conforme (de Lambert)

$$n = \frac{\log(\cos \varphi_1) - \log(\cos \varphi_2)}{\log\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_1}{2}\right) - \log\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2}\right)\right)}\right)$$

$$\gamma = n \times L \quad \text{et} \quad \rho = \frac{\cos \varphi_1}{n} \left(\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1}{2}\right) \right)^n \times \left(\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \right)^n$$

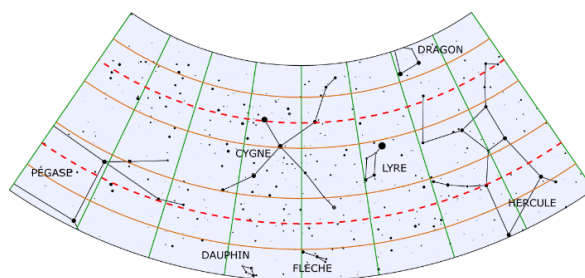


Fig. 26. Carte partielle du ciel en projection conique conforme ($14^\circ < \delta < 56^\circ$ et $16 \text{ h} < \alpha < 24 \text{ h}$). Les deux parallèles automécoïques sont en pointillés rouges (25° et 45°). Les parallèles sont tracés en orange tous les 10° et les méridiens en vert toutes les heures.

Propriétés des projections coniques

Projection	merid-équidistante	conique d'Albers	conique de Lambert
Images des parallèles	arcs de cercle		
Images des méridiens	segments (ou demi-droites)		
Longueurs sur un parallèle	non conservées		
Longueurs sur un méridien	conservées	non conservées	non conservées
Angles	non conservés	non conservés	conservés
Aires	non conservées	conservées	non conservées

DEVOIR DE VACANCES

Cherchez les erreurs

Danielle Briot, observatoire de Paris

Les devoirs de vacances : des erreurs pour apprendre...

Comme nul ne peut plus l'ignorer, 2019 est l'année de la Lune. Elle nous est familière depuis toujours, bien visible dans le ciel, et nous pensons bien la connaître. Cependant, voici quelques images concernant la Lune, glanées ça et là, dont aucune n'a été trafiquée par l'auteur du présent article, et qui présentent toutes au moins une erreur.

Le but sera alors de faire faire le même exercice par vos élèves. La suite de l'exercice, si cela les amuse, consistera à ce qu'ils recherchent eux-mêmes des images de la Lune et qu'ils déterminent si elles sont, ou non, correctes. Le but est aussi d'exercer leur esprit critique et de leur apprendre à ne pas accepter sans réfléchir tout ce qui est imprimé ou publié.



Passage d'étoiles filantes... Meilleurs Vœux

Fig.1. Meilleurs vœux.



Fig.2. Visage d'un soir.



Fig. 33. Une erreur astronomique a été faite par le peintre qui avait dessiné ce paysage. Laquelle ?

Fig.3. Extrait de *L'astronomie récréative* de Yakov Perelman.



Fig.4. Cendrillon.



Fig.5. Publicité pour un whisky écossais.

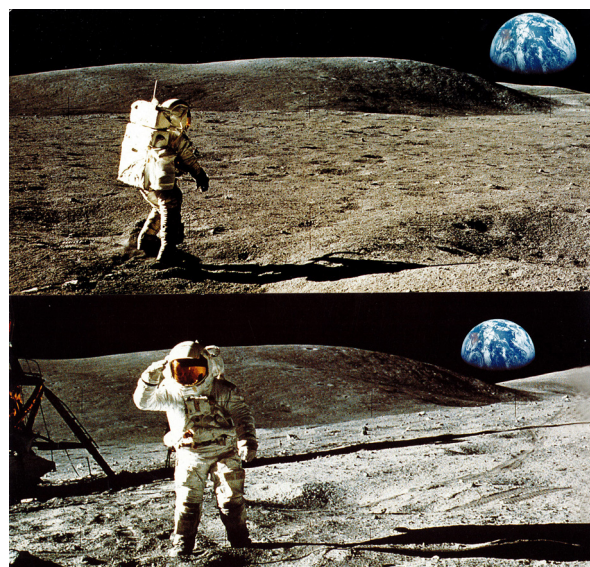


Fig.6. Levers de Terre.



Fig.7. « ET SE RÉVEILLERENT AU CLAIR DE LA LUNE ».



Fig.8. Pierrot.

Les solutions seront données à la rentrée, dans le numéro de septembre.

Il y a 100 ans Le triomphe de la relativité générale

Pierre Magnien

Le 29 mai 1919 moins d'un an après la fin d'une guerre meurtrière, la théorie révolutionnaire d'un Allemand était vérifiée à l'occasion d'une éclipse totale de Soleil par deux équipes d'astronomes anglais !! Nous célébrons donc en ce mois de mai 2019 le centenaire d'un événement exceptionnel confortant une théorie, la relativité générale conçue par l'esprit d'un seul homme, Albert Einstein, dont les prolongements sont encore aujourd'hui en plein développement. On détaille ici cette dernière étape de validation de ce monument de la pensée humaine après avoir exposé quelques éléments aux origines de ces expéditions scientifiques.

INTRODUCTION

La relativité générale est avant tout une théorie de la gravitation développée par un seul homme¹ entre 1907 et 1915. Auparavant ce dernier avait construit et publié en 1905 la théorie de la relativité restreinte dont le but initial était de mettre en accord la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell.

Pour y parvenir il avait posé comme principe de base que « les lois générales de la nature (par exemple les lois de la mécanique ou les lois concernant la propagation de la lumière dans le vide) ont exactement la même forme dans tous les référentiels se déplaçant les uns par rapport aux autres dans des mouvements rectilignes uniformes² ».

Mais pour A. Einstein le travail n'était pas terminé car, dans son esprit, il n'y avait aucune raison que le principe de relativité se limite aux référentiels galiléens et ne puisse pas être étendu à des mouvements relatifs quelconques entre référentiels.

Il se remet au travail sur la question dès 1907. Le chemin suivi jusqu'à ce 25 novembre 1915 où il présente devant l'Académie des Sciences de Prusse, à Berlin, la version « définitive » de sa théorie de la relativité générale, va être tortueux, souvent abrupt et lui demander des efforts considérables.

L'ouvrage final constitue une refonte totale de la manière d'appréhender la gravitation. Il ne s'agit pas d'une extension de la théorie newtonienne et A. Einstein n'a pas cherché à la modifier - par



exemple pour comprendre certains phénomènes que cette dernière ne parvenait pas à expliquer, comme le reliquat d'avance du périhélie de Mercure (découvert par Urbain Le Verrier en 1857 par le calcul) - mais a reconstruit intégralement l'édifice depuis ses fondations les plus profondes. Comme l'explique Marie Antoinette Tonnelat³ « [En relativité générale, dans l'espace physique,] le rôle des masses n'est pas de créer des forces d'attraction, mais de courber l'univers dans leur voisinage. Dans cet univers courbe ainsi formé, les particules d'épreuve se

1 Même si A. Einstein a reçu l'aide de différents collègues à plusieurs occasions, l'architecture globale de la relativité générale doit lui être intégralement attribuée.

2 « La relativité » - Albert Einstein - Petite Bibliothèque Payot. De tels référentiels sont dits galiléens ou inertiels.

3 « Histoire du principe de relativité » - M.A. Tonnelat - Flammarion 1971.

meuvent librement et décrivent les géodésiques⁴ de cet univers ». Cependant, aussi « belle » soit-elle, une théorie ne peut s'imposer que si les faits expérimentaux en confirment ses conséquences calculables.

LES EXPÉDITIONS EN VUE DE VÉRIFIER LA THÉORIE

Parmi les tests possibles, la mesure de l'angle de déviation d'un rayon lumineux lors de son passage à proximité d'un objet massif est étudiée par A. Einstein et, dès 1911 dans le cadre d'une première version de sa théorie, il avait calculé cet angle pour un rayon rasant le Soleil et avait trouvé une valeur de 0,84" d'arc.

À la suite de cette prévision il contacta plusieurs astronomes pour avoir leur avis sur la manière de procéder pour la vérifier. Tous étaient d'accord pour dire qu'il fallait effectuer l'expérience au moment d'une éclipse de Soleil au cours de laquelle des photographies du champ stellaire contenant notre étoile seraient prises pour être comparées ultérieurement à d'autres photographies du même champ prises à un autre moment où le Soleil y serait absent. L'écart de position des mêmes étoiles sur les documents correspondrait à l'angle de déviation recherché.

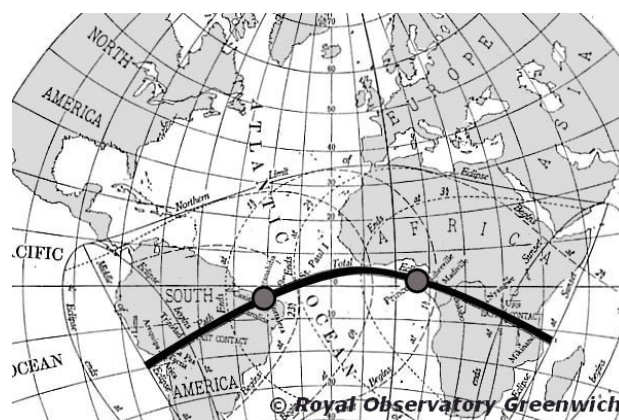
La première éclipse pouvant convenir pour une telle expédition était prévu le 21 août 1914 en Russie occidentale. Malheureusement l'Histoire en décida autrement puisque, début août, l'Europe s'embrasait dans le conflit de la première guerre mondiale : sur les terres russes l'équipe d'astronomes allemands ne pourra pas installer son matériel et rien ne pourra être tenté sérieusement avant la fin des hostilités⁵.

Ce contretemps sera mis à profit par A. Einstein pour finaliser sa théorie et réviser sa première prévision de la déviation d'un rayon lumineux à proximité du Soleil. En effet, dans sa version antérieure, le calcul s'appuyait uniquement sur son principe

d'équivalence⁶ posé dès 1907 et ne tenait pas compte de la courbure de l'espace-temps. Dans sa version définitive – et correcte ! – la valeur calculée était de 1,75" d'arc.

Cependant, en Angleterre, Arthur Eddington, alors à l'observatoire de Greenwich, suit depuis 1911 l'évolution des travaux d'A. Einstein et commence sérieusement à réfléchir à l'organisation d'une expédition lors d'une éclipse de Soleil. En 1917 l'Astronome Royal Frank Dyson, en poste à Greenwich, attire l'attention de ses collègues sur la possibilité d'utiliser l'éclipse du 29 mai 1919 pour réaliser ce test et demande à A. Eddington, devenu depuis 1914 directeur de l'observatoire de Cambridge, de réfléchir à une mission.

Cette éclipse est particulièrement intéressante car, à cette date, le Soleil se trouve dans un riche champ stellaire qui est celui des Hyades dans la constellation du Taureau. Sa ligne de centralité passe sur le Brésil, traverse l'océan Atlantique et s'achève en Afrique équatoriale.



Bien que la guerre semble toujours contrecarrer leurs efforts, la fin brutale des hostilités en novembre 1918 survient juste à temps pour rendre leur programme possible.

Pour doubler ses chances de réussite et améliorer la précision des résultats, A. Eddington, appuyé dans son projet par Frank Dyson, prévoit de monter deux expéditions : la première à Sobral, au Brésil, sera sous la direction de deux astronomes de Greenwich (C. Davidson et A. Crommelin) et la seconde sur l'île de Principe, au large du Congo, sous la direction d'A. Eddington lui-même accompagné de Cottingham.

4 Dans un espace courbe, on appelle géodésique la ligne reliant deux points de cet espace et ayant une longueur extrémale (la plupart du temps minimale). Dans un espace euclidien c'est une droite.

5 L'éclipse totale de Soleil du 8 juin 1918 traversait essentiellement les USA et aurait pu permettre de faire cette vérification mais les astronomes américains n'avaient pas encore récupéré leur matériel resté en Russie en 1914. Réalisées avec des instruments mal adaptés, les observations ne donneront pas des résultats probants.

6 Pour en savoir plus sur la construction de la relativité générale par Albert Einstein on peut consulter le document suivant sur le site du CLEA :

http://clea-astro.eu/lunap/Relativite/relativite-restreinte-principes-et-applications/HISTOIRE_RG.pdf

Le 8 mars 1919 les deux expéditions partent ensemble d'Angleterre et se séparent à Madère pour aller, chacune de son côté, installer leur matériel. À Principe, le matin du jour de l'éclipse, une pluie battante commence à tomber. Ce n'est que vers midi, pendant l'éclipse, que les nuages se dispersent à plusieurs reprises pendant quelques secondes.

Les astronomes en profitent pour prendre seize photographies - dont seulement deux seront pleinement exploitables - avec l'objectif de l'astrographe⁷ de Cambridge ayant 33 cm d'ouverture. Les scientifiques de Sobral ont plus de chance et parviennent avec un instrument du même type et une lunette de 10 cm, à prendre vingt-sept photographies permettant de faire des mesures.

De retour en Angleterre les deux équipes dépouillent les plaques de verre. C'est une tâche délicate. En effet les 1,75" d'arc calculées par A. Einstein ne concernent que le cas où l'étoile est dans une direction qui rase le disque solaire. Par exemple, à une distance de deux rayons solaires, l'angle est réduit à 0,6" d'arc.

Quand on sait que sur une plaque photographique en verre utilisée derrière la lunette de l'expédition sur l'île de Principe, un décalage d'une seconde d'arc est visualisé par une distance de seulement 0,026 millimètres, on imagine facilement l'ampleur des difficultés ! De plus, la turbulence de l'air toujours présente déforme l'image des étoiles et la réfraction atmosphérique perturbe également le positionnement de ces images sur le support de gélatine.

Le 6 novembre, A. Crommelin présente les résultats finaux⁸ lors d'une réunion conjointe de la Royal Society et de la Royal Astronomical Society : à Principe un rayon lumineux rasant le Soleil était dévié de $1,60'' \pm 0,31''$ d'arc et à Sobral de $1,98'' \pm 0,18''$ d'arc⁹ : A. Einstein était victorieux dans son affrontement avec I. Newton !

7 Les astrographes utilisés sur chaque site sont ceux mis en œuvre depuis 1887 dans le cadre du programme international « Carte du ciel » lancé par l'amiral Mouchez, directeur de l'observatoire de Paris. Pour cette observation les deux objectifs de 33 cm ont été diaphragmés à une ouverture de 20 cm afin d'améliorer la qualité des images.

8 On trouvera le rapport final de des deux expéditions en se connectant à l'URL suivante : <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.1920.0009>

9 Des doutes ayant été exprimés à plusieurs reprises à propos de l'exactitude de ces valeurs, les plaques de 4 pouces de l'expédition de Sobral ont été remesurées en 1979 par F.G. Smith et A. Murray à l'aide d'instruments modernes à l'Observatoire Royal de Greenwich : le résultat final de $1,90 \pm 0,11$ seconde d'arc confirme les résultats du travail de 1919.

On a beaucoup discuté de l'impartialité d'Eddington dans le traitement des plaques et qu'il voulait avant tout confirmer la théorie de la relativité. L'affaire est compliquée mais on remarquera simplement que, s'il n'est pas sûr qu'A. Einstein ait eu raison à ce moment-là, il est presque sûr que I. Newton a alors eu tort !

La gloire s'abat sur Albert Einstein

Le 7 novembre 1919, le *London Times* intitule l'un de ses articles « Révolution en science : une nouvelle théorie de l'univers - Les idées de Newton renversées ». De même le *New York Times* écrivait en première page de son édition du 10 novembre : « Les lumières du ciel vont de travers ».

Mais contrairement à l'accueil enthousiaste de la presse anglo-saxonne, les médias allemands étaient étrangement plus réticents à titrer sur le sujet. Ce n'est que le 14 décembre 1919 que le *Berliner Illustrierte Zeitung* publiait une photographie d'Einstein accompagnée d'un article intitulé : « Un nouveau phare dans l'histoire du monde : Albert Einstein, dont les recherches représentent une révolution complète dans notre vision du monde et dont les résultats sont à l'égal de ceux d'un Copernic, d'un Kepler ou d'un Newton. »

Cette célébrité du savant l'accompagnera le restant de sa vie mais la relativité générale va voir rapidement l'intérêt des scientifiques retomber, rebutés par le caractère abscons de son outillage mathématique et par le faible nombre de cas concrets où on peut la mettre en œuvre.

Il faudra attendre le début des années 1970 pour voir renaître une activité de recherche importante autour de cette théorie qui, aujourd'hui, est extrêmement dynamique.

Quelques éléments bibliographiques

« Interaction lumière matière » CC 121 automne 2010 p. 23 – C. Larcher

« Einstein le livre du centenaire » – A.P. French & Co – Hier & Demain 1979

« Lumière et gravitation » - J. Einsenstaedt – l'Astronomie Mai 1994

« Einstein et la relativité générale » - J. Einsenstaedt – CNRS Éditions 2007

« La quête d'Einstein » - J.M. Vigoureux – Éditions Ellipses 2005



VIE ASSOCIATIVE

Chères toutes et chers tous,

Après dix années à la barre du Clea, Cécile Ferrari a souhaité passer la main et voguer en des mers plus calmes pour se concentrer sur d'autres responsabilités. J'ai l'honneur et le plaisir de prendre sa suite ; me voilà donc le quatrième président de l'association après Lucienne Gouguenheim, Georges Paturel et donc Cécile. (Je vous laisse apprécier la parfaite alternance femme/homme !)

Je suppose qu'une petite présentation s'impose. Après un parcours universitaire en physique et astrophysique, j'ai fait mes premières armes en recherche dans le domaine des plasmas spatiaux et des interactions Soleil – environnements planétaires, à l'Institut suédois de physique spatiale, à l'Agence spatiale européenne au Pays-Bas et à l'Institut Max Planck en Allemagne. En 2007, j'ai été recruté comme astronome adjoint par le Conseil national des astronomes et physiciens (Cnap) avec l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble comme première affectation. J'ai ensuite rejoint l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse en 2010 où je travaille toujours. Mon statut d'astronome adjoint d'observatoire implique une part de recherche (env. 50% de mon temps de travail) ; une activité de service (env. 30%) qui inclue dans mon cas la valorisation de données au Centre de données de la physique des plasmas (CDPP) et la responsabilité scientifique de Climso, l'ensemble d'instruments d'observation solaire au Pic du Midi ; et un service d'enseignement universitaire et de diffusion des savoirs (env. 20%).

Mais revenons au Clea. Nos activités sont connues et reconnues pour leur qualité – grâce à vous tous – et évidemment nous ferons en sorte que cela continue. En plus de cela, il y a des points qui me tiennent particulièrement à cœur comme davantage toucher

les professeurs des écoles à qui on demande tant et mieux nous faire connaître auprès des professeurs de SVT qui enseignent les sciences de la Terre et des planètes. Aussi, un travail – un combat même – de tous les instants doit être mené sur l'esprit critique de nos jeunes (et moins jeunes) concitoyens pour les aider à faire face au flot continu d'informations douteuses auxquelles ils sont exposés. Une équipe de volontaires prépare d'ailleurs un hors-série des Cahiers Clairaut sur le sujet. Il conviendra aussi de répondre rapidement aux besoins des enseignants de lycée qui découvrent les nouveaux programmes d'enseignement scientifique.

Du côté de la vie associative, je voudrais encourager les activités en réseaux régionaux pour partager vos expériences et projets. Cela pourrait prendre la forme de rencontres occasionnelles sur une journée ou une demi-journée. Aussi, j'aimerais que les membres élus de conseil d'administration soient davantage sollicités et consultés. Notez au passage que l'association vit par l'implication très active d'un trop petit groupe de personnes et je sollicite par ce billet toutes les bonnes volontés pour venir les épauler. Quel que soit votre niveau d'engagement dans l'association, le succès du Clea est le vôtre donc un grand merci à vous toutes et tous.

Je finirai ces quelques lignes comme je les ai commencées, avec une pensée pour Cécile Ferrari. Merci Cécile pour tout le temps que tu as consacré au Clea et pour avoir fait tout le nécessaire pour que la transition de présidence se déroule idéalement.

Au plaisir de vous rencontrer prochainement, peut-être en août à l'école d'été.

Bien amicalement,

Frédéric Pitout.

Solutions des mots croisés page 25

Horizontalement

1. Continent. 2. Regio. 3. Ys. Lowell. 4. Océan. 5. Vénus. Ice. 6. On. Mer. 7. Lac. UA. IX. 8. Cratérisé. 9. Aîné. Eden. 10. Nodal. ESO. 11. SSI. Âge.

Verticalement

1. Cryovolcans. 2. Scénarios. 3. Nu. En. Candi. 4. Laun. Tea. 5. Irons. UE. La. 6. New. Mare. 7. Égérie. Idée. 8. Nil. Crises. 9. Tollé. Xénon.



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

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

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



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

Renseignements et vidéo sur :
<http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie>

Les productions du CLEA

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

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

Fiches pédagogiques

Ce sont des hors-série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de recherche pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, mathématique et astronomie, le Soleil, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

HS14 Le Soleil (2018)

Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

Maquettes

Astrolabes, cartes du ciel, fuseaux horaires, lunoscopes, nocturlabes, zodiaques ou lot des six maquettes.

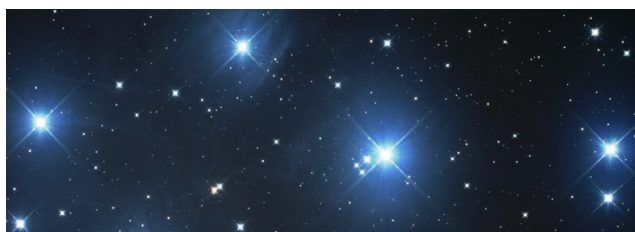
Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Le formulaire de commande est sur le site.

Le site web

Une information toujours actualisée

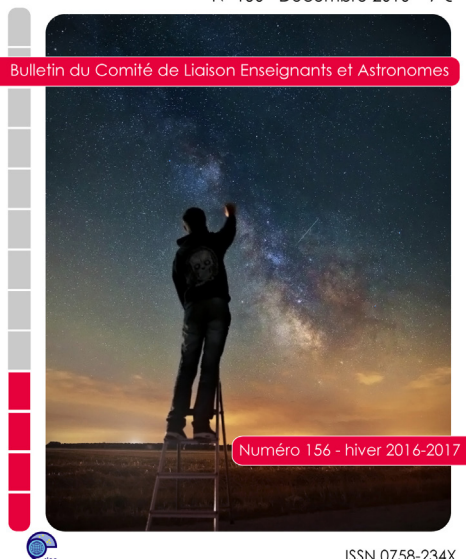
<http://www.clea-astro.eu>



LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €



Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :

Articles de fond
Réflexions
Reportages
Textes (extraits, citations, analyses)
Pédagogie de la maternelle au supérieur
TP et exercices
Curiosités
Histoire de l'astronomie
Réalisations d'instruments et de maquettes
Observations
Informatique
Les Potins de la Voie Lactée

COMMENT NOUS JOINDRE ?

Informations générales :

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

Siège social :

CLEA
Case courrier 7018
Université Paris Diderot - Paris 7
Bâtiment Sophie Germain
IREM de Paris
8, place Aurélie Nemours
75205 Paris cedex 13

École d'Été d'Astronomie :

daniele-imbault@laposte.net

Cahiers Clairaut :

christianlarcher3@gmail.com

Ventes des productions :

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

Site web :

contact@clea-astro.eu

Adhésion / Abonnement :

Adhésion CLEA pour 2019 :	10 €
Abonnement CC pour 2019 :	30 €
Adhésion + abonnement CC :	35 €
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	40 €

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

Directeur de la Publication : Frédéric Pitout

Rédacteur de publication : Christian Larcher

Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979

Numéro CPPAP : 0315 G 89368

Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 166 été 2019