

AVEC NOS ÉLÈVES

La Lune, ombre et lumière

Pierre Le Fur

Nous partons à la découverte de la topographie du sol lunaire à partir d'observations photographiques. L'étude des ombres portées par le relief permet de calculer l'ordre de grandeur des élévations des remparts d'un cratère, d'un pic central ou de la profondeur du fond de ce cirque lunaire. Enfin, nous terminons par la topographie des failles, vallées et autres lignes de crêtes qui parcourent le sol des « mers » de notre satellite naturel.

À la découverte du relief lunaire



Fig.1. Le pôle Nord de la Lune le matin, peu avant le dernier quartier. Télescope Meade LX 90 300 mm, avec camera couleur DFK 311S. Clichés de l'auteur. Technique : notes [5] à [7]

Si le Soleil est facilement observable avec des élèves au sein de l'établissement scolaire sous certaines conditions, la Lune peut également être intéressante : en période de dernier quartier, le spectacle du globe lunaire est accessible aux élèves entre 8 h et 8 h 30 les matinées de cours en décembre et janvier. Il suffit de planter les télescopes dans la cour et de viser la Lune qui a rendez-vous avec le Soleil levant. On peut alors découvrir les innombrables cratères, les montagnes tortueuses, les « mers » lisses et autres failles zébrant le sol. Muni d'une carte, on pourra même repérer les lieux d'alunissage des opérations Apollo. La lumière du jour montant n'est pas encore suffisamment intense pour gêner la vision télescopique.

De même, en ces mois d'hiver, la Lune du premier quartier est observable dès 17 h 30. Pour les plus jeunes comme pour les plus âgés, ce contact visuel avec notre voisine impressionne.

Pour réaliser des clichés, il faut préférer une nuit franche, où les contrastes ne seront pas adoucis par

la lumière bleue diffusée par l'atmosphère. Réaliser un ou plusieurs instantanés lunaires se révèle être une opération relativement simple avec une webcam, un appareil photo numérique ou une caméra astronomique spécialisée.

Que l'on photographie ou que l'on visualise le relief lunaire, l'exploration est donc à notre portée.

Jeux dans le bac à sable

Retour sur Terre. Quand on demande aux élèves du primaire ou de la maternelle « que sont ces cratères qui boursoufflent la Lune ? », la réponse la plus commune reste « ce sont des volcans ».

Les convaincre d'une autre hypothèse n'est pas difficile si l'on se munit d'un bac avec un peu de sable et d'un boulon (figure 2).



Fig.2. Impact vertical d'un boulon dans du sable fin. En faisant l'expérience, on s'aperçoit que l'angle d'incidence a peu d'influence sur la forme du cratère.

Évidemment, l'aspect visuel du cratère sableux dépendra de l'éclairage. Et l'on pourra montrer les changements d'aspect en éclairant le bac avec une lampe mobile figurant le Soleil qui suit sa course dans le ciel lunaire, du lever au coucher.

Les cratères sont donc d'autant plus visibles que le Soleil est bas sur l'horizon, au coucher ou au lever. On en déduit que c'est dans la zone de limite jour/nuit que le relief sera bien mis en évidence donc dans la région du **terminateur**.

Autre intérêt de ces moments particuliers où la lumière solaire est sous grande incidence, des ombres longues marquent le sol et l'on montre que, pour un lieu donné à un moment donné, leur longueur est **proportionnelle à la hauteur de la montagne** qui porte ombre si le sol est plan et en considérant les rayons du Soleil parallèles (figure 3). Ces quelques remarques simples vont nous permettre d'interpréter les observations lunaires qui suivent.

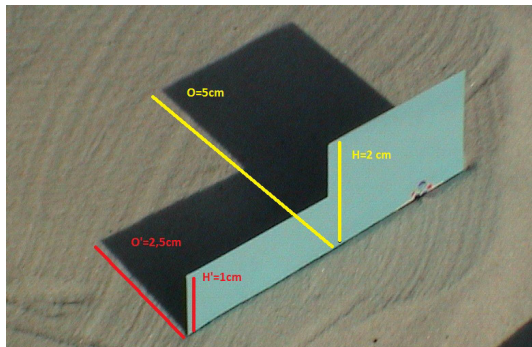


Fig.3. Un carton bleu planté verticalement dans le sable figure une montagne à deux plateaux de hauteurs 2 cm et 1 cm. Les ombres portées sont de longueurs proportionnelles 5 cm et 2,5 cm.

Exploration d'un grand cratère, Copernic

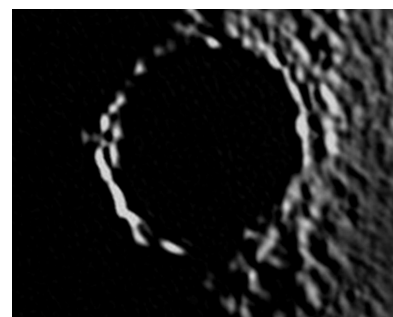
Aspects du cratère au cours de la lunaison

La série de clichés de la figure 4 montre l'évolution de l'aspect du grand cratère Copernic en fonction de l'éclairage solaire au cours de la lunaison. La carte 31 du célèbre atlas d'Antonin Rükl (Gründ 1993) nous donne l'échelle : le diamètre moyen du cratère est de 93 km. Cette donnée est confirmée par l'atlas virtuel de la Lune (AVL) [1].

Le Soleil illumine tout d'abord la crête ouest de l'arène, alors que le fond du cratère reste dans la nuit (4a). Puis les images 4b et 4c révèlent le lever de Soleil sur les montagnes centrales, comportant trois pics principaux qui se détachent sur un substrat relativement plat. Ce fond de cratère est plus lisse au nord qu'au sud. Sur le pourtour, on distingue les gradins conduisant du fond à l'arête sommitale du rempart.

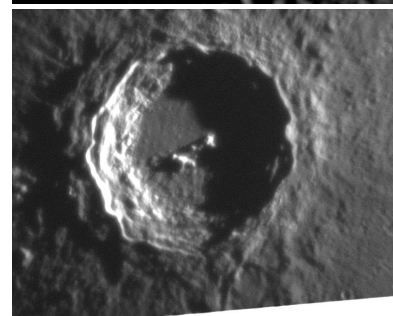
C'est une après-midi lunaire bien avancée qu'illustre la photo 3d, le relief semble aplati, écrasé de soleil. Quelques auréoles blanchâtres se laissent apercevoir découvrant ainsi la diversité géologique des sols. Enfin le soir tombe sur Copernic et les détails révélés sur le cliché 3e montrent les terrasses est éclairées, ainsi que le craterlet Copernic A visible à mi-hauteur sous un promontoire. Son diamètre est de 3 km. On le retrouve sur les images agrandies (figure 8a), montrant ainsi que la résolution photographique approche le kilomètre.

La finesse des images varie d'un cliché à l'autre, en fonction des conditions de turbulence qui dépendent de la météo et de la hauteur H de la Lune au-dessus de l'horizon de l'observateur, mais aussi du diamètre et de la focale de l'instrument.



3a.

Âge : 9,46 j
Phase : 71,3°
H = 32°
h = 2°
27/10/09
18 h 39 TL



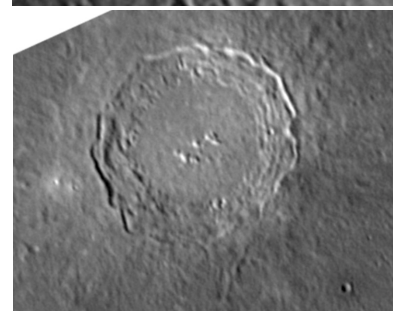
3b.

Âge : 9,66 j
Phase : 73,1°
H = 69°
h = 4°
12/02/2011
19 h 15 TL



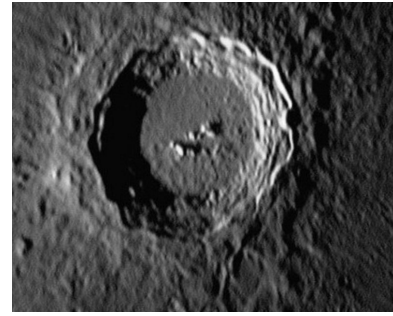
3c.

Âge : 9,93 j
Phase : 69,5°
H = 45°
h = 7°
26/11/2009
18 h 35 TL



3d.

Âge : 20,29 j
Phase : 294°
H = 53°
h = 45°
01/08/2010
4 h 34 TL



3e.

Âge : 22,66 j
Phase : 264,5°
H = 42°
h = 19°
05/07/2010
05 h 03 TL

Fig.4. Le cratère Copernic à différentes époques de la lunaison. On remarque les variations d'éclairage.

Âge = nombre de jours écoulés depuis la dernière nouvelle Lune.

Phase = angle de phase (angle Soleil Lune Terre).

H = hauteur de la Lune au-dessus de l'horizon terrestre.

h = hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon lunaire.

Images a, c, d, e réalisées avec une ToUcam noir et blanc, b avec une caméra DBK31 Imaging Source.

Hauteur des remparts par la méthode de Galilée

Le cratère Copernic s'est laissé découvrir, mais les hauteurs des reliefs restent inconnues. Pourtant le « grand » Galilée nous a laissé une méthode simple pour déterminer un ordre de grandeur de la hauteur AD d'une montagne lunaire de hauteur D , connaissant le rayon $R = CE$ de la Lune, 1740 km (figure 5a). La mesure se fait par rapport au niveau « moyen » du globe, puisqu'il n'y a pas d'océans liquides pour donner une référence 0.

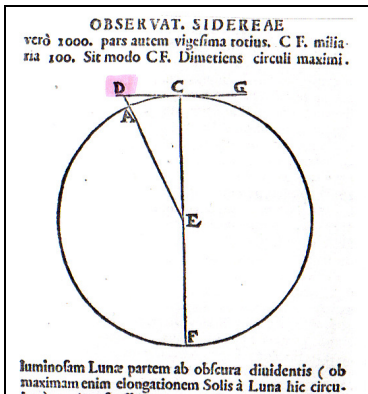


Fig.5a. Mesure de la hauteur d'une montagne d'après Galilée.

Alors que la Lune est au premier quartier, la moitié droite de la Lune est éclairée par le Soleil, la moitié gauche est dans la nuit mais le sommet de la montagne D est encore éclairé. On peut calculer son altitude AD en mesurant CD (dessin extrait du *Sidereus Nuncius*).

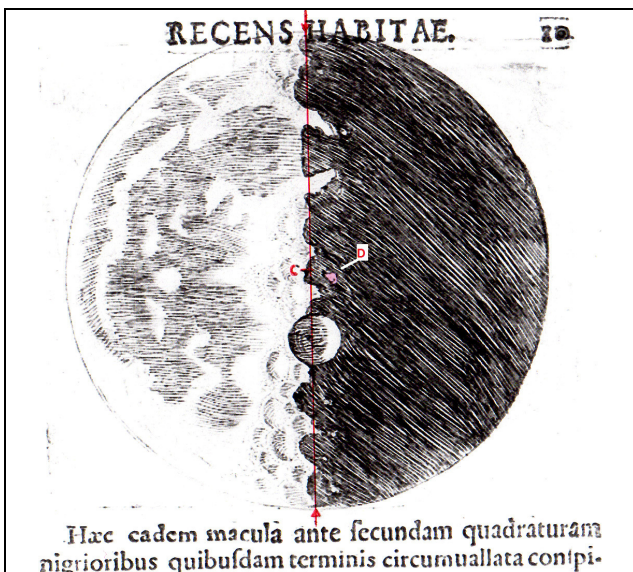


Fig.5b. Observation de la Lune gravée par Galilée extraite du « *Sidereus Nuncius* » (1610), document BNF numérique. C est le centre apparent de la Lune. La direction des rayons solaires est confondue avec l'horizon CD . On mesure CD/R sur le croquis (ici $7,6 \cdot 10^{-2}$).

Lorsqu'on ignore tout de la géométrie, on peut trouver la hauteur AD en réalisant le schéma géométrique à l'échelle de 1 km pour 1 mm. L'arc lunaire de 1740 mm de rayon est tracé à l'aide d'un ruban plastique, puis on complète avec la tangente (CD) représentant la direction des rayons solaires, on pointe D , puis on mesure DA avec la règle graduée, cela donne directement en mm la hauteur en km (figure 6).

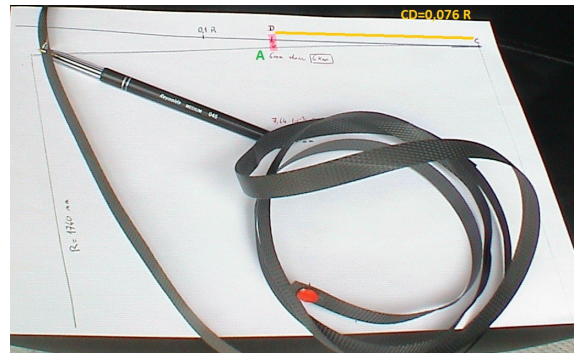


Fig.6. Méthode graphique de détermination de la hauteur. Le ruban (pour emballage), la punaise et le stylo permettent de tracer l'arc de cercle du sol lunaire (rayon $R = 1740 \text{ mm}$, échelle 1 mm pour 1 km). On trace la tangente en C pour matérialiser l'horizon CD . On place D à l'aide de la valeur expérimentale CD/R . On mesure directement $AD = 6 \text{ mm}$ sur le dessin donc 6 km en réalité ! Cette méthode graphique intuitive ne fonctionne avec une certaine précision que pour des reliefs d'au moins 1 mm (précision de la règle graduée).

On trouve une situation analogue au dessin de Galilée le 27 octobre 2009 à 18 h 39 min : la limite jour/nuit, appelée terminateur, traverse le grand cratère Copernic en passant approximativement par son centre (figures 4a page précédente et figure 7 ci-après). En fait, le logiciel AVL confirme cette situation géométrique comme exactement atteinte une heure auparavant.

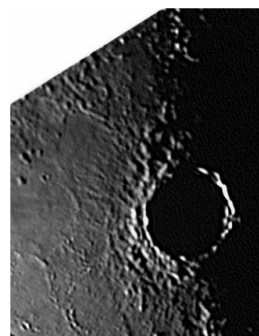


Fig.7. Le cratère Copernic est traversé par le terminateur à peu près en son centre. Le haut du rempart de droite est encore éclairé par le Soleil. On va essayer d'en déduire son altitude par le calcul.

Ici, la distance qui sépare le rempart est du terminateur (qui traverse le cratère diamétralement) est de $0,5 \times 93 \text{ km}$ (demi-diamètre). La méthode de Galilée version graphique est inutilisable car CD/R se révèle trop faible :

$$CD/R = 0,5 \times 93 \text{ km} / (1740 \text{ km}) \approx 0,027.$$

Il nous faut recourir à une autre approche.

Application aux remparts est de Copernic

La méthode graphique précédente doit donc être remplacée par un calcul utilisant le théorème de Pythagore : $DE^2 = CD^2 + CE^2$.

L'exploitation du cliché 3a du 27/10/09 donne :

$$AD = DE - AE \approx 0,68 \text{ km.}$$

(avec $CD = 48,5 \text{ km}$ et $CE = 1740 \text{ km}$)

La hauteur moyenne du rempart est d'environ 700 m au-dessus du niveau moyen.

Ombres et topographie approchée du cratère

Pour en savoir plus sur les dimensions verticales du cratère, nous pouvons utiliser les longueurs des ombres dont on sait qu'elles sont proportionnelles aux hauteurs des reliefs dans le cas idéal d'une plaine environnante plate.

Remarque : notre choix s'est porté sur le cratère Copernic car il fait partie des rares grands cirques situés non loin du centre apparent de la Lune, et placé hors des « continents » lunaires : la plaine environnante est modérément accidentée.

Nous allons maintenant comparer l'ombre du rempart sur le fond du cratère avec l'ombre du piton central en utilisant la photo 3e puis avec l'ombre du rempart sur la plaine environnante en utilisant la photo 3b (figures 8).

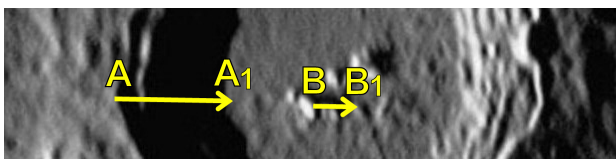


Fig. 8a (agrandissement du cliché 3e). $AA_1/BB_1 \approx 2,8$: la hauteur du rempart au dessus du fond du cratère vaut 2,8 fois la hauteur du piton central.

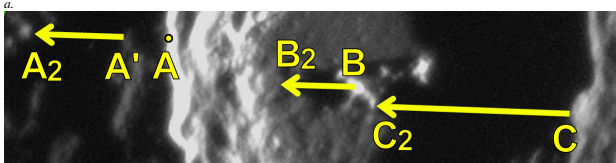


Fig. 8b (agrandissement du cliché 3b). $CC_2/BB_2 \approx 2,8$: on retrouve le même rapport qu'avec la photo précédente. Les différentes photos de la figure 3 semblent montrer que le haut des remparts entre A et A' est à peu près plat. On considère que A_2 est l'ombre de A'. $A'A_2/CC_2 \approx 2,1$: la profondeur du cratère est deux fois plus grande que la hauteur du rempart au dessus de la plaine environnante.

En résumé, le cratère est beaucoup plus profond qu'il n'est « haut ». En partant de la mesure précédente de 700 m pour la hauteur du rempart, on trouve que la profondeur du cratère est de 1500 m ($2,1 \times 700$) et que le piton central culmine à 500 m au-dessus du fond de cratère ($1500/2,8$).

Profil en coupe et sondes lunaires

Bien sûr ces valeurs dépendent de la calibration initiale utilisant la méthode de Galilée. Pour contrôler ces résultats, allons chercher les données altimétriques récentes de la sonde japonaise Kaguya [2] lancée par la JAXA et de LRO, envoyé par la NASA [3]. Par exemple, Lunar Reconnaissance Orbiter (parti de la Terre le 18 juin 2009 avec LCROSS) orbite à 50 km au-dessus du sol lunaire. Équipé du laser altimétrique LOLA et de la caméra grand angle WAC, il obtient au total une précision

altimétrique de 20 m, pour une résolution horizontale de 300 m.

À l'aide de la carte altimétrique de la figure 8 et de logiciels [4], on relève les couples (abscisse, élévation) sur un chemin traversant le cratère de part en part. On détermine ainsi une coupe du cratère, tracée avec « Excel » (figure 9).

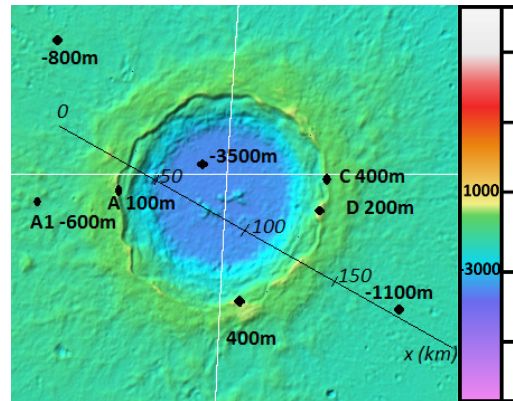


Fig. 9. Cartographie en fausses couleurs LRO (NASA) [3], Élévation indiquée par « Google earth/moon » D'après la sonde japonaise Kaguya (mission spatiale de la JAXA, voir logiciel « 3DGis » sur le site de la JAXA [4])

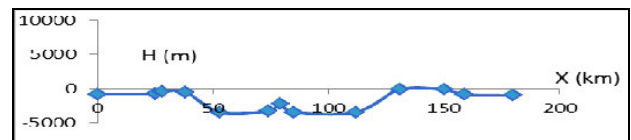


Fig. 10a. Coupe suivant Ox avec les valeurs d'altitudes données par la sonde Sélène de JAXA sauf pour le pic central (donnée par l'Atlas Virtuel de la Lune).

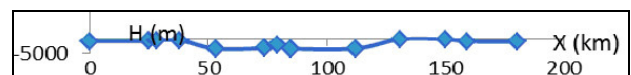


Fig. 10b. On a représenté ici la « réalité » (échelles verticales et horizontales identiques), l'ensemble paraît extrêmement aplati.

En comparant aux résultats précédents, on constate que l'élévation moyenne des remparts par rapport aux environs vaut $(1500 + 700) / 2 = 1100$ m. Notre étalonnage par la méthode de Galilée donne 700 m qui représente seulement un ordre de grandeur, il doit être rectifié. En effet un cratère n'a pas la géométrie simple d'une montagne isolée posée sur un sol régulier de niveau 0. Dans le cliché n° 3a, le rempart est projeté son ombre sur le rempart ouest.

Toutes les valeurs précédentes sont donc multipliées par $1100/700 \approx 1,6$. Le cratère est bien sûr plus profond qu'il n'est « haut » : 2,4 km pour 1,1 km. Le piton central culmine alors à 0,8 km. Les valeurs obtenues sont donc cohérentes avec la carte altimétrique. Compte tenu de la précision des images et des mesures, il ne faut pas attendre des résultats précis de la méthode « des ombres », elle ne constitue évidemment qu'une approche.

En utilisant la même échelle pour l'altitude et les distances, la figure 10b permet de montrer qu'en réalité les dénivelés sont faibles relativement au diamètre du cratère. Le relief est plus émoissé qu'il n'y paraît lors de l'observation.

Exploration de plaines lunaires

Poursuivons notre exploration, en visitant ces surfaces, très peu accidentées et cratérisées, qui constituent les « mers » lunaires.

L'image 11 montre les petits cratères coniques caractéristiques de ces régions. Cette zone est zébrée par de nombreuses rainures dont celle passant par Hyginus, sorte de longue vallée étroite à pentes douces d'origine magmatique. Une pente est plongée dans l'ombre lorsque l'autre versant est éclairé par le Soleil.

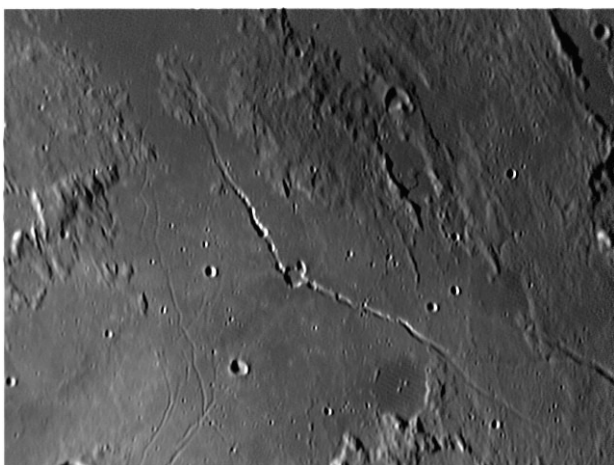


Fig.11. La rainure Hyginus traversant le cratère Hyginus. Sa concavité est dirigée vers le nord-est. Longueur 220 km. Largeur : 2 à 3 km. Profondeur : quelques centaines de mètres.

Les clichés 12a et 12b révèlent le jeu d'ombres et de lumières sur le « mur droit », dans la mer des Nuées, au cours de la lunaison. Cette fois, c'est une vraie faille à l'origine d'un dénivelé entre deux régions de cette mer. La pente douce reliant ces deux zones peut être éclairée par le Soleil proche du dernier quartier, ou plongée dans l'ombre au premier quartier.

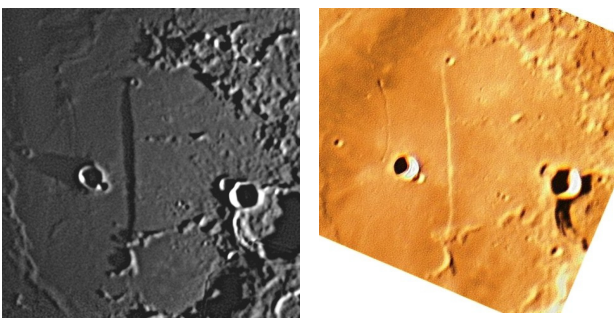


Fig.12. Le mur droit dans la mer des Nuées, aux alentours du premier quartier à gauche et du dernier quartier à droite.

Visitons ce couple énigmatique que constitue le double cirque Messier dont les diamètres valent 10 km environ (figure 13). Il ponctue la surface de la mer de la Fécondité et y dessine une double queue digne d'une comète, plus claire que le sol environnant. Cette trace ne porte d'ombre à aucun moment de la lunaison. Elle ne correspond à aucun relief détectable.

Terminons ce survol lunaire par l'observation de ces lignes de crêtes qui serpentent sur le sol des mers, signes de fortes contraintes géologiques. Les ombres courtes portées par ces dorsales témoignent d'une faible élévation de quelques dizaines à quelques centaines de mètres au maximum.

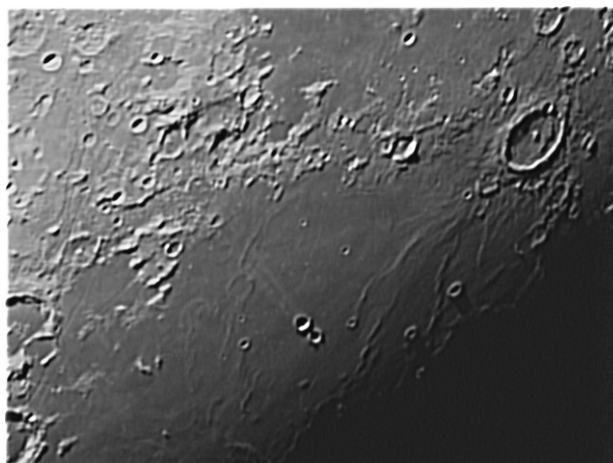


Fig.13. Cratères Messier (diamètres 13 et 9 km), d'où partent deux traînées claires vers l'est (en haut à gauche). On aperçoit les lignes de crêtes (Dorsa Geikie et Dorsa Catio) qui rident la mer de la fécondité.

Ainsi ce termine notre voyage sélène, par ces mers très anciennes, dont le relief n'a pas été sensiblement remodelé depuis 3,8 milliards d'années, date à laquelle les épanchements basaltiques ont cessé. La comparaison avec le « très récent » cratère Copernic, dont l'impact originel remonte à 800 millions d'années, nous montre l'extrême variété des formations lunaires dont nous n'avons fait qu'effleurer la riche diversité. Alors, à vos lunettes et télescopes, l'exploration continue !

Netographie :

- [1] www.ap-i.net/avl/, Atlas Virtuel de la Lune (AVL) logiciel gratuit de Legrand et Chevalley, téléchargeable.
- [2] www.jaxa.jp/press/2008/04/img/20080409_kaguya_02_e.tif
- [3] <http://lroc.sese.asu.edu/news/?archives/484-Lunar-Topography--As-Never-Seen-Before!.html>
- [4] http://wms.selene.darts.isas.jaxa.jp/3dmoon_e/index_e.html, site de la JAXA, logiciel téléchargeable, 3D GIS.
- [5] <http://www.regnier-schmit.net/faqastrocam/>
- [6] <http://www.damianpeach.com/lunarindex.htm>
- [7] <http://legault.perso.sfr.fr/sampling.html> ■