

Analyse d'images lunaires : le Mur droit

Pierre Le Fur

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

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

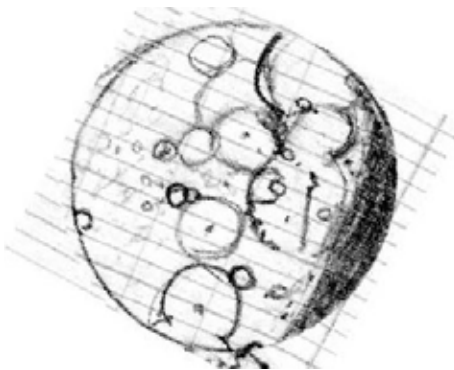


Fig.1. Dessin à l'oculaire du Mur droit par l'auteur. Lunette de 40 mm de diamètre, grossissement 30×.



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

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

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

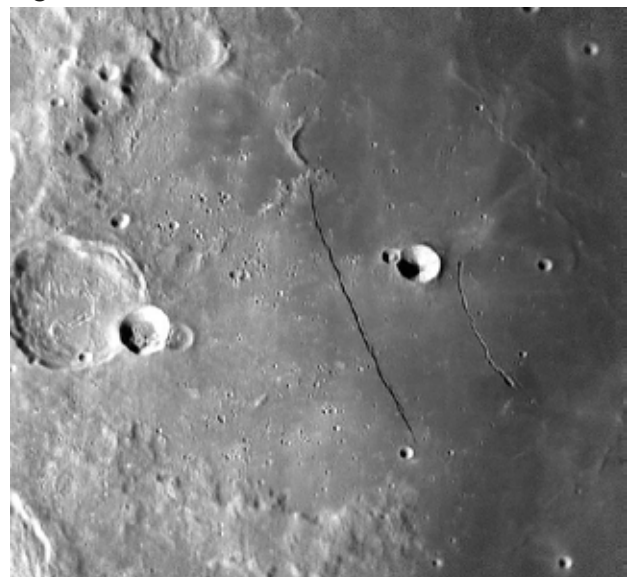


Fig.3. Le Mur droit, 2 jours après le premier quartier (le 09/01/2016). Le Soleil est à gauche. Télescope Meade 305 mm focale 7 500 mm (3 m de focale avec une barlow $\times 2,5$), 1778 images additionnées, camera INova (image de l'auteur).

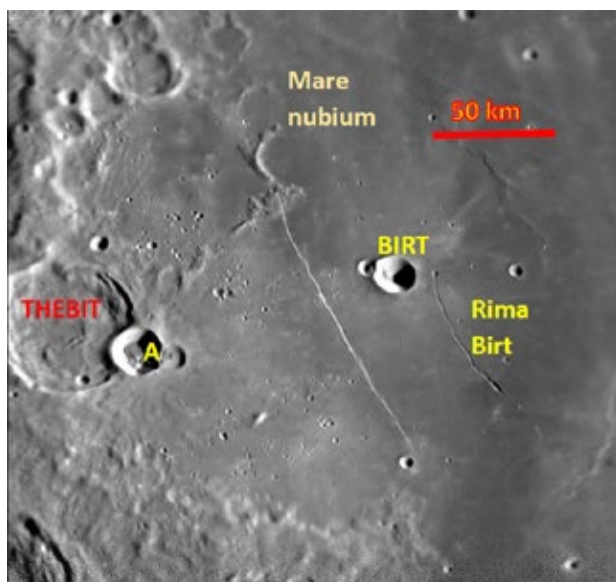


Fig.4. Le Mur droit 1 jour avant le dernier quartier (le 06/08/2015). Le Soleil est à droite. 1 057 images additionnées (image de l'auteur).

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

Mise à l'échelle

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

Utilisation d'AVL et de SalsaJ

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

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

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

Mesures de distances

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

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

Utilisation de SalsaJ (suite)

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

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

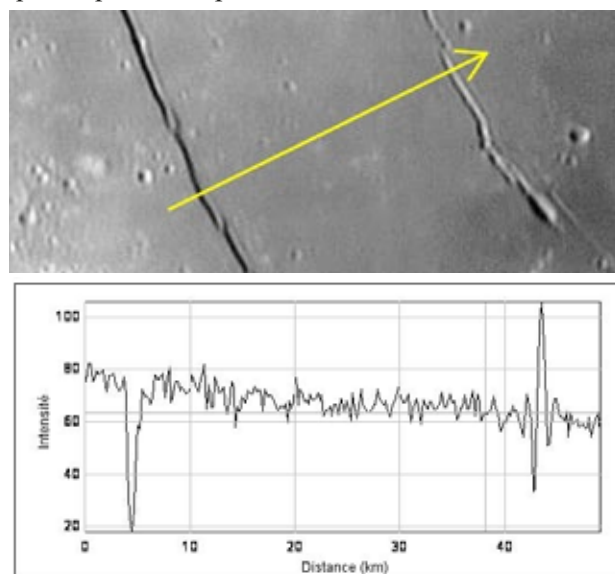


Fig.5. En haut, le Mur droit au soleil levant (agrandissement de la figure 3) avec sens de l'éclairage et trait de coupe. En bas, intensité en fonction de la distance par SalsaJ2 suivant le trait de coupe.

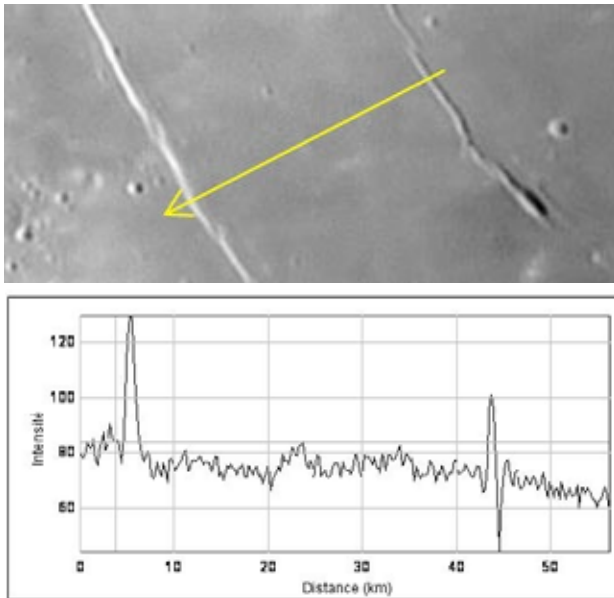


Fig.6. En haut, le Mur droit au soleil couchant (agrandissement de la figure 4) avec sens de l'éclairage et trait de coupe. En bas, intensité en fonction de la distance par SalsaJ2 suivant le trait de coupe.

Mesure de la hauteur H du mur droit

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

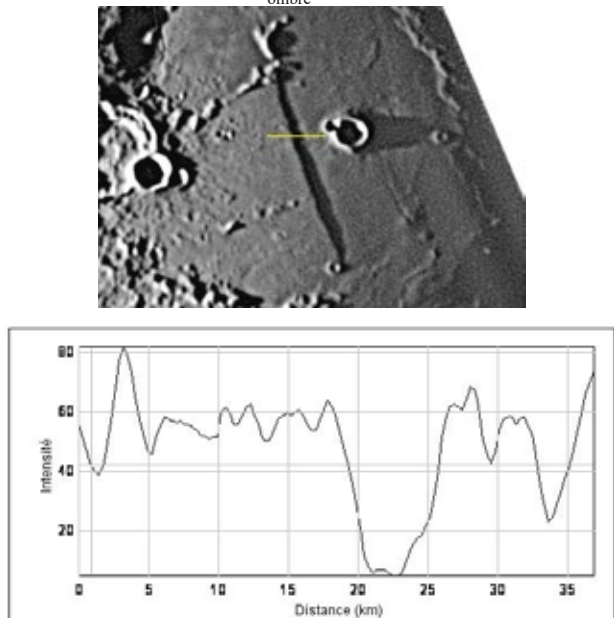


Fig.7. En haut, le Mur droit peu de temps après le lever du Soleil. Le trait de coupe est en jaune. En bas, intensité en fonction de la distance par SalsaJ2 suivant le trait de coupe.

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

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

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

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

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

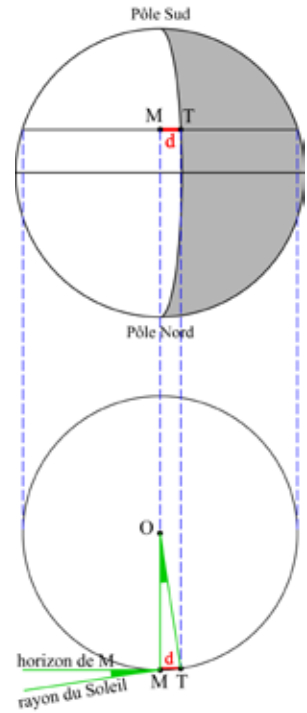
Les mesures des deux angles en vert sur la figure sont égales car les côtés sont deux à deux perpendiculaires :

- l'horizon « est » de M est perpendiculaire à [OM] ;

- le rayon du Soleil est perpendiculaire au terminateur.

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

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



La figure 8 permet d'établir l'égalité :

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

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

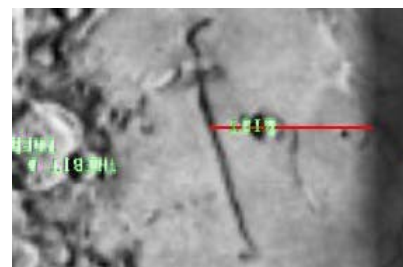


Fig.9. Extrait de l'Atlas virtuel de la Lune à l'heure de l'observation (20 h 05 TU).

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

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

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

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

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

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

Mesures de pentes et aspects géologiques avec Lunar quickmap

Premières images

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

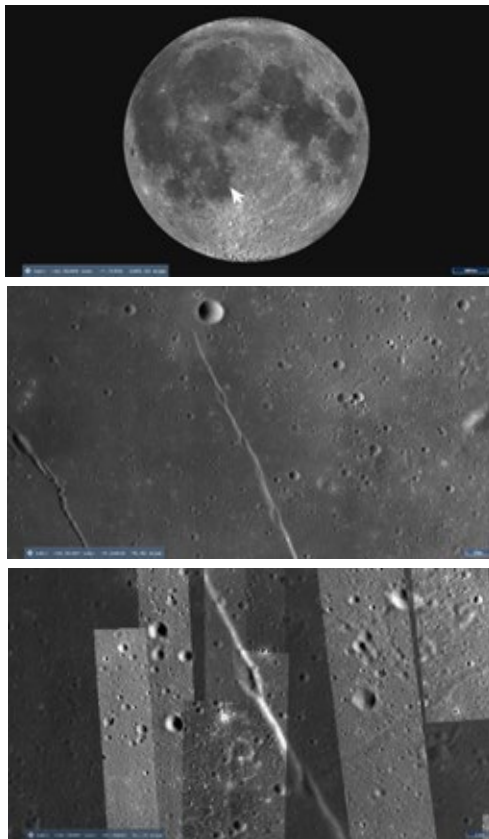


Fig.10. Image NASA de la sonde Lunar Reconnaissance Orbiter Camera extraite de Lunar quickmap. Ici, le sud est en bas, à l'inverse des images précédentes.

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

³ <https://quickmap.lroc.asu.edu/>

Mesures de pente et hauteur H

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

Les couleurs indiquent les valeurs locales de pente

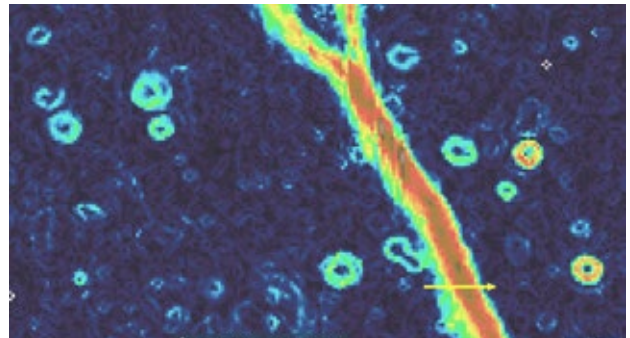


Fig.11. Pentes du terrain mesurées par la couche (LAYERS) LRO LOLA, option SLDEM 2015 SLOPE, fruit des mesures de l'altimètre laser. La pente est indiquée par la couleur : bleu clair (13°), jaune (23°), rouge (33°), rouge sombre (plus de 40°).

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

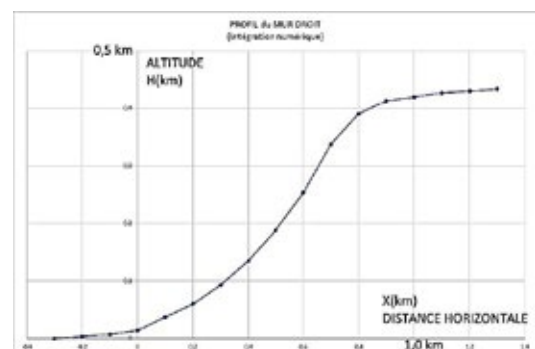


Fig.12. Reconstitution de la coupe réelle du mur droit (suivant la flèche jaune de la figure 11) par intégration numérique avec Excel. $H(n+1) \approx H(n) + \tan(\text{pente}) * \Delta X$. Le pas ΔX vaut 0,1 km. Il existe des zones plus abruptes (jusqu'à 70° de pente).

Ces résultats présentent deux surprises :

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

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

Couche géologique

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

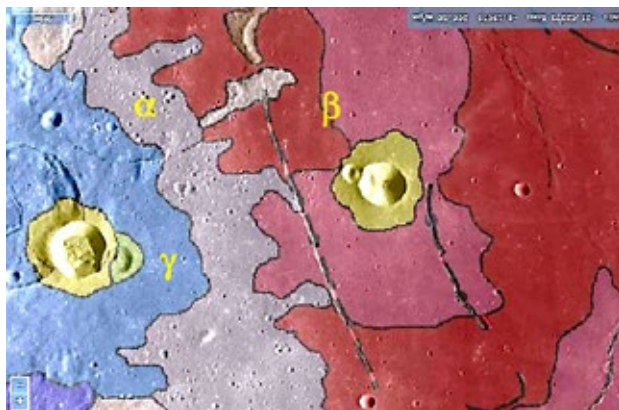


Fig.13. Nature géologique des terrains par la couche (LAYER) « Geologic features and maps », option « unified geologic layer » (document NASA).

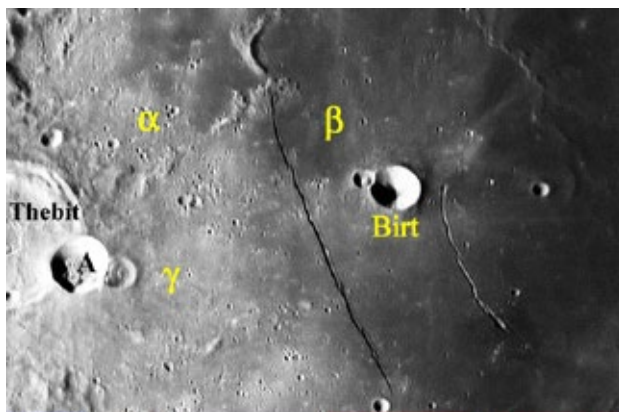


Fig.14. Comparaison contrastes-zones géologiques avec la figure 13 :

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

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

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

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

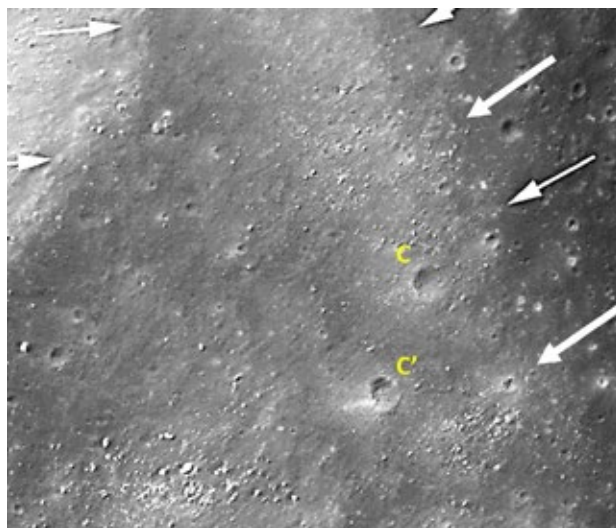


Fig.15. Gros plan sur la pente du mur droit par LROC en 2011, avec les rochers d'éboulis de taille métrique. Sur la pente, les 2 cratères (c, c') font 20 m de diamètre. En haut à droite la ligne de crête (flèches blanches). En haut à gauche ligne de crête d'un cratère connexe de taille kilométrique.

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

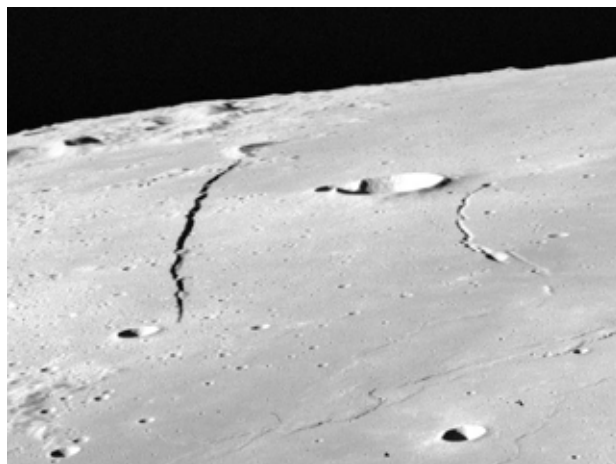


Fig.16. Rupes Recta vue par Apollo XVI fin avril 1972 (cliché NASA).

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

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

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