

OBSERVATOIRE DE PARIS – FORMATION DES MAÎTRES – 2004/2005

Travaux Pratiques sur les cratères de météorites

Introduction

Les cratères sur la Lune, Mars ou la Terre sont formés par la chute de météorites (astéroïdes). Leur étude nous permet de mieux comprendre l'histoire de la formation de notre système solaire, et des bouleversements occasionnés par ces impacts d'une puissance extraordinaire.



Objectifs

Nous allons simuler l'aspect de la surface lunaire, reproduire des cratères de différentes tailles par la chute libre d'objets de masses variées depuis différentes hauteurs dans un bac rempli de farine, semoule de blé ou sable, et mener une étude quantitative des effets physiques en jeu. Pour finir, nous pourrions donner une estimation de l'âge de la planète Mars par l'étude de la taille de ses cratères à l'aide d'une photo. Par comparaison avec la Lune, dont on connaît l'âge géologique grâce aux échantillons ramenés sur Terre par les missions Apollo, nous élaborons un scénario homogène de formation du système solaire.

Source : inconnue

TP en trois parties

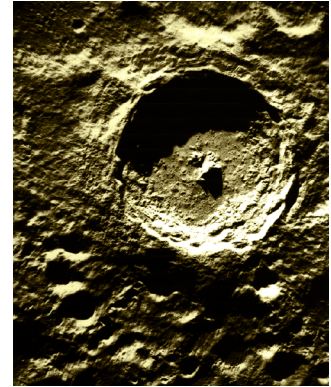
- simulation qualitative des surfaces lunaires ou martiennes,
- étude quantitative de l'effet des masses et vitesses des météorites sur la taille des cratères (manipulation),
- datation de Mars par l'étude de ses cratères et la comparaison avec la Lune (mesures sur photo)

Matériel

- Deux récipients : bac en plastique ou couvercle de boîte en carton (format A4).
- Farine, semoule de blé moyenne (couscous fin) et fine, sable (matériau sec, environs 2 kg de chaque, pour remplir le bac sur 5 cm en hauteur).
- Cacao en poudre (au moins 3 saupoudrages sur la farine, avec une cuillère par exemple).
- Une règle (15 - 20 cm) pour mesurer les tailles de cratères.
- Des billes (16 mm de diamètre) et des calots (25 mm de diamètre) et un pèse-lettre pour les peser.
- Journaux (pour couvrir le sol afin de ne pas le salir et de le protéger des chutes hors du bac).
- Ficelle (2m pour mesurer la hauteur de chute, à graduer).
- Cellophane (pour enrober les billes avec tige verticale afin de les retirer facilement du sol sans abîmer le cratère).
- Une lampe de poche puissante (pour simuler les parties ombrées et ensoleillées du cratère).
- Divers : ruban adhésif de couleur ou marqueur (pour graduer la ficelle), 1 chiffon (pour s'essuyer les mains et écrire), papier millimétré ou tableur (pour enregistrer et présenter les résultats sous forme de courbes, Microsoft Excel ou OpenOffice.org).

TP cratères première partie : surface de la Lune

La photo ci-contre est un exemple des nombreux cratères que l'on peut trouver sur la Lune. Les reliefs observés sont accentués par l'éclairage rasant du Soleil (situé en haut à gauche par rapport à la photo). Pour simuler ce contraste, nous utilisons de la farine légèrement saupoudrée par du cacao. On peut aussi utiliser de la semoule de blé (fine ou moyenne) ou du sable. Sans cacao, il faudra se munir d'une lampe de poche puissante. Il n'est pas possible de reproduire le pic central, résultat d'une fusion suite à un impact de très haute énergie. Les astéroïdes produisent cet effet car ils ont une vitesse plusieurs milliers de fois supérieure à la vitesse de chute libre de notre bille.



Expérimentation

Couvrir le sol avec les journaux, placer le bac au centre. Le remplir de farine sur au moins 3 cm **sans la tasser**. Recouvrir entièrement la farine avec du cacao (saupoudré légèrement et uniformément). Envelopper la bille avec du cellophane de façon à former une tige de 5 cm à peu près, rigidifiée en la vrillant. Faire de même pour le calot. Laisser tomber la bille et le calot de différentes hauteurs sans recouvrir les cratères de façon à noter la différence (2 chutes différentes, puis noter le résultat). Faire de même avec de la semoule de blé moyenne, fine ou du sable et noter la différence qualitativement. Éclairer les cratères de façon rasante avec une lampe de poche.

Source : inconnue

Questions

Comment expliquez-vous que le cratère formé ait un contour blanc ? L'aspect est-il similaire à la photo de la Lune ? Les cratères ont-ils tous la même taille ? Sont-ils plus grands avec le calot ou la bille ? La taille dépend-elle de la hauteur de lâcher ? Essayez de produire un cratère de même taille avec la bille et le calot.

TP cratères deuxième partie : effets physiques en jeu

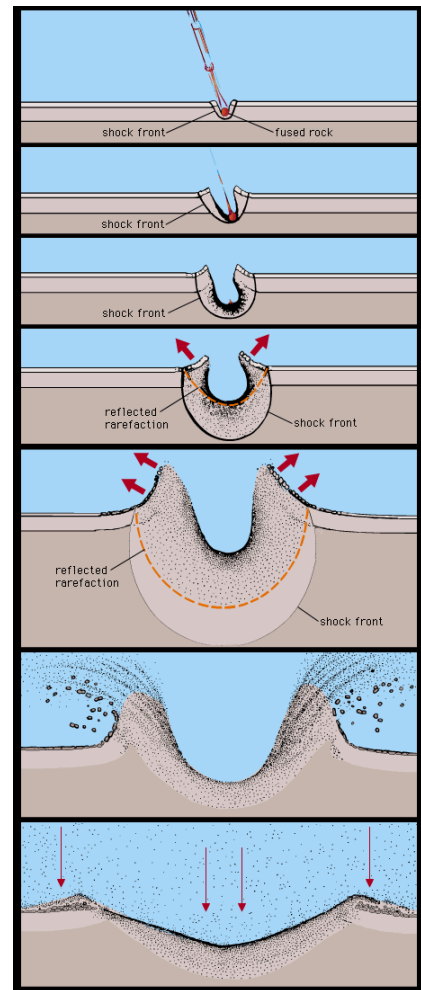
Lors de l'impact d'une météorite, son énergie cinétique est entièrement convertie en cinq composantes : 1) chaleur émise, 2) pulvérisation et fragmentation des matériaux (de la météorite et du sol), 3) déformation et 4) éjection des matériaux, enfin 5) propagation d'ondes sismiques au sol. Par la mesure précise des diamètres de cratères en fonction du poids du projectile et de sa hauteur de chute, les mesures reportées sur un graphique nous permettront de déterminer quel est l'effet dominant entre la déformation du sol et l'éjection des matériaux.

Expérimentation

Construire une échelle avec la ficelle, le ruban adhésif de couleur et la règle : coller des bouts de ruban adhésif tous les 50 cm, le tout sur 2 m. Laisser de la ficelle dépasser des deux côtés. Scotcher la ficelle sur le bac, la première graduation en face au niveau de la surface du matériau. A deux et à tour de rôle, l'un(e) tient la ficelle le plus verticalement possible tandis que l'autre lâche la bille aux 4 hauteurs repérées (le centre de la bille au centre du repère) et noter les tailles des cratères (faire 2 mesures par hauteur et prendre la moyenne). Supprimer le tassement de la semoule après chaque lâcher, en passant la main dans le bac, puis en l'agitant de façon à l'aplanir. Ne pas propulser la bille. Faire de même avec le calot. Faire cette expérience avec de la semoule moyenne puis fine. Faire un graphique du diamètre du cratère en fonction de l'énergie, puis un graphique du diamètre en fonction de la hauteur (échelles log-log dans les 2 cas). Faire passer au mieux une droite pour chaque ensemble de mesures et mesurer leur pente. Peser la bille et le calot.

Questions

Trouve t-on réellement des droites ? Si oui, la pente est-elle la même pour les 3 courbes ? Cette pente dépend t-elle du poids (calot ou bille) ? Dépend t-elle du matériau ? Dans le graphique, une pente de $1/3$ correspond à la déformation, et une pente de $1/4$ correspond à l'éjection du matériau. Pour chaque matériau, déterminer quel est l'effet physique dominant. Retrouve t-on le rapport des poids entre le calot et la bille à partir du second graphique ?



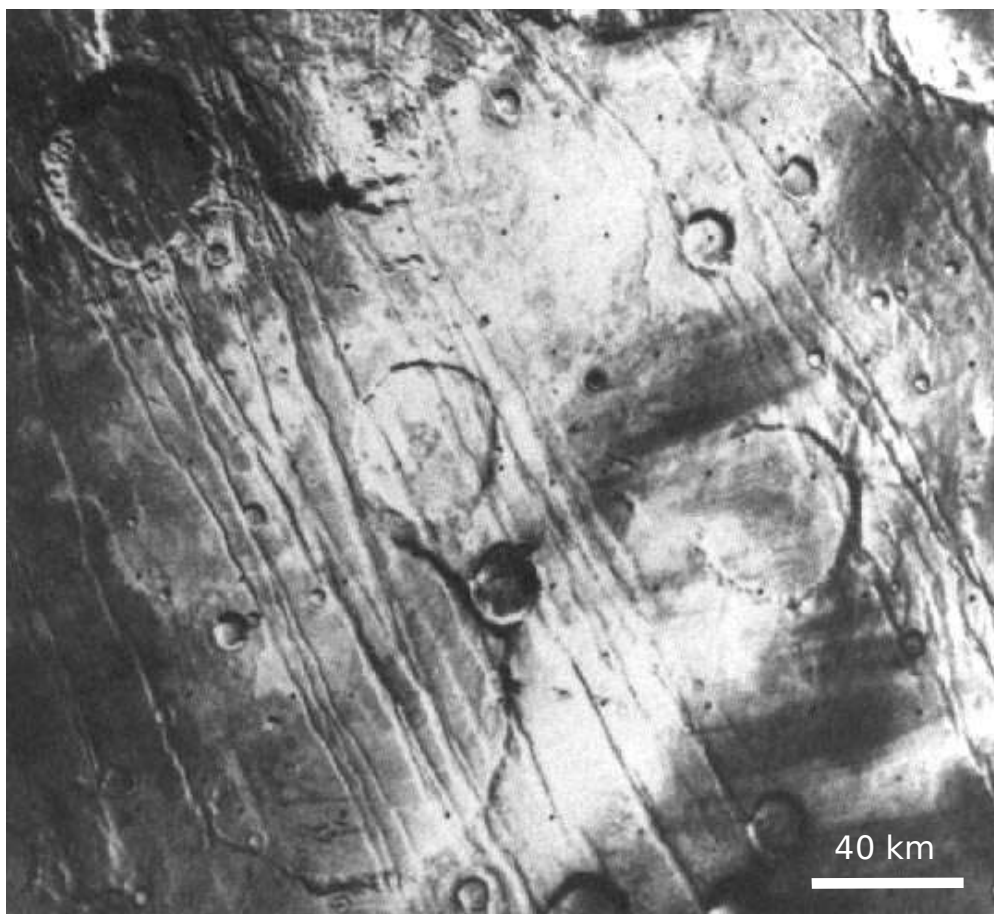
Source : inconnue

TP cratères troisième partie : âge de Mars

Vous disposez d'une photo prise en orbite autour de Mars, et d'une figure.

La photo représente une partie des flancs du volcan bouclier Tharsis. Sa largeur est de **250 km** (voir échelle sur image). Vous y voyez des cratères d'impact de météorites et des traces allongées qui sont des cassures formées probablement lors du gonflement du volcan.

La figure vous donne, pour la Lune, le nombre cumulé de cratères par millions de kilomètres carré en fonction du diamètre de ces cratères. Chaque courbe correspond à une région particulière de la surface de la Lune. Le point X par exemple indique que, pour une région donnée, il y a 50 cratères par millions de km² dont le diamètre est égal ou supérieur à 50 km. Un point situé en bas à gauche du diagramme correspond à une zone où la densité de cratère est faible et où ils sont de petite taille. Inversement, un point situé en haut à droite indique une zone à forte densité de cratères de grande taille. Les différentes périodes reconnues sur la lune sont de la plus ancienne à la plus récente : Pré Nectarien (-4,5 à -3,92 Ga), Nectarien (-3,92 à -3,85 Ga), Imbrien (-3,85 à -3,2 Ga), Eratosthenien (-3,2 à -1,1 Ga) et Copernicien (-1,1 Ga à aujourd'hui), où 1 Ga correspond à 1 milliard d'années.



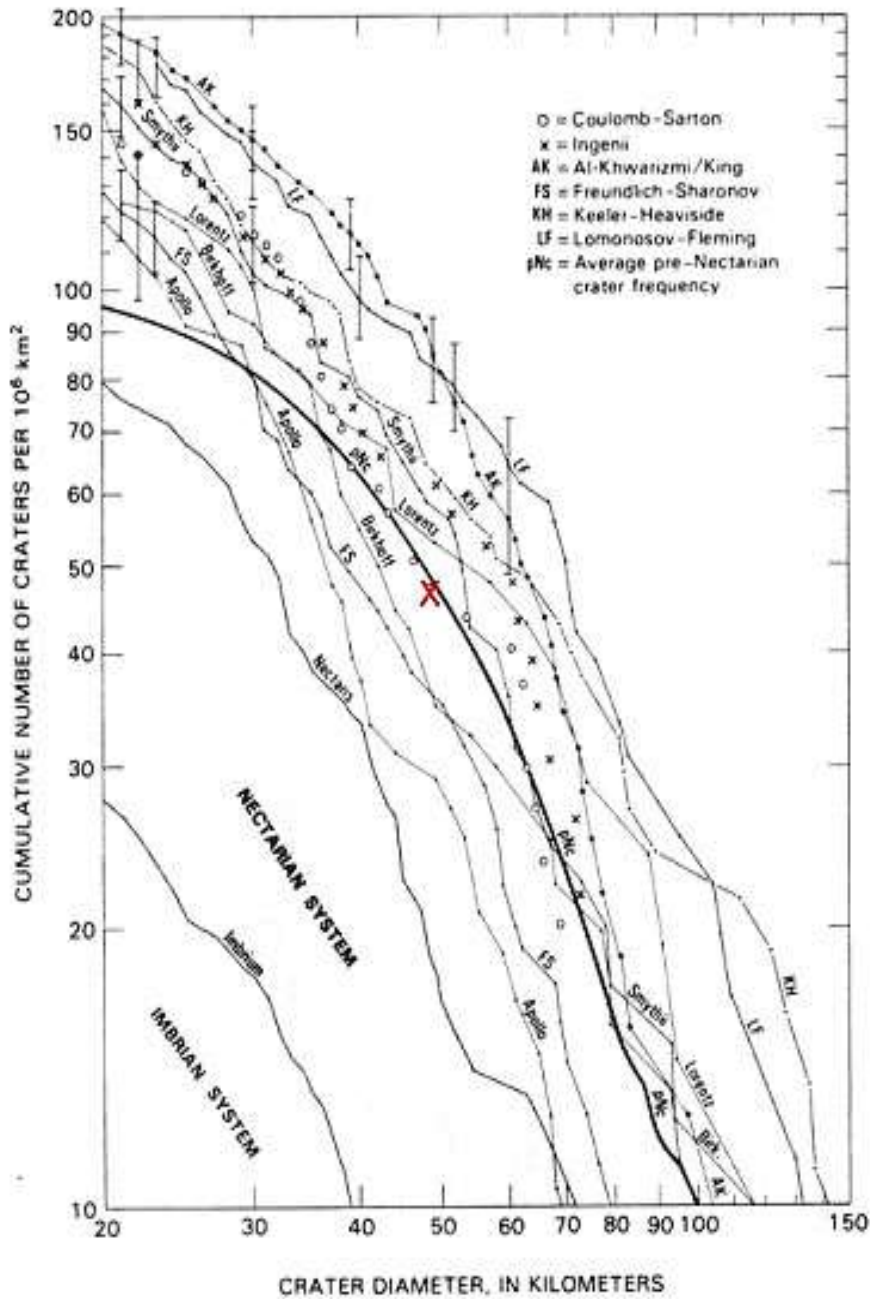
Source : inconnue

Expérimentation

Faites un schéma précis de cette photo. Mesurez la taille de tous les cratères apparents sur la photo (en millimètres puis en kilomètres connaissant son échelle). Comptez le nombre de cratères ayant un diamètre de plus de 80, 40, 20, 10 et 1 kilomètres. Reportez ces résultats sur la figure.

Questions

Établissez la chronologie relative des différents événements que vous pouvez identifier. Précisez les relations entre cette chronologie et la dimension des cratères. Retrouve-t-on la courbe la plus foncée ? Quel est l'âge de la surface de Mars ? Est-ce le même que la Lune ? Comment peut-on dater les autres planètes ?



Source : inconnue

OBSERVATOIRE DE PARIS – FORMATION DES MAÎTRES – 2004/2005

Travaux Pratiques sur les cratères de météorites - Corrigé

Réponses pour la première partie

Comment expliquez-vous que le cratère formé ait un contour blanc ?

L'impact de l'astéroïde a soulevé la farine sous la couche de cacao pour l'expulser hors du cratère, recouvrant la couche de cacao autour du cratère. On note que le cratère a une forme sphérique très prononcée, même si le diamètre du cratère est plus important que le diamètre de l'astéroïde. Cela vient du fait que l'onde de choc causée par l'astéroïde est isotrope.

L'aspect est-il similaire à la photo de la Lune ?

Oui, à part le pic central, qui ne peut être reproduit qu'avec des projectiles ayant des vitesses très importantes, de l'ordre de mille fois plus importante que dans notre expérience.

Les cratères ont-ils tous la même taille ?

Non. Cela dépend de la hauteur de lâcher et de la masse du projectile.

Sont-ils plus grands avec le calot ou la bille ?

Apparemment oui, bien que la bille lâchée suffisamment haut puisse créer des cratères aussi grands que le calot.

La taille dépend-elle de la hauteur de lâcher ?

Oui, pour un projectile donné. On le voit mal avec de la farine, et il faut lâcher la bille d'une hauteur au moins double de la précédente pour s'apercevoir d'une différence (sans mesurer).

Essayez de produire un cratère de même taille avec la bille et le calot.

La théorie est détaillée à la partie suivante, mais on peut déjà dire que le diamètre D du cratère ne dépend que de l'énergie $E = mgh$ du projectile, où m est sa masse, h la hauteur de lâcher et g la constante de gravité. Pour avoir un cratère de même taille pour la bille (masse m_b) et le calot (masse m_c), il faut une même énergie, donc que le rapport des hauteurs soit inversement proportionnel au rapport des masses. La bille a une masse de 5.5 g et le calot de 21.5 g. Le rapport vaut 3.9 : approximativement 4. Il faut lâcher la bille de 1 m 20 et le calot de 30 cm par exemple.

Réponses pour la deuxième partie

Ces mesures peuvent se révéler très peu précises, selon le degré d'humidité affectant le matériau, la précision de l'échelle, et surtout la difficulté de mesurer le diamètre du cratère dont l'aspect va changer au cours de l'expérience (transition de rebords francs à des rebords plus larges et mal contrastés). Le tassement du matériau a une influence très importante, et il est nécessaire de passer la main ou un peigne entre chaque lâcher et de secouer le bac afin d'aplanir la surface. On aura un aperçu direct de ces incertitudes en faisant 2 mesures systématiquement (chacun son tour).

L'échelle log-log sur les graphiques va tasser ces incertitudes, tout en permettant de mettre en valeur quantitativement les effets physiques recherchés.

Si la déformation des matériaux est le processus dominant, le volume V du cratère doit être directement proportionnel à l'énergie E de la météorite. Comme $V \propto D^3$ où D est le diamètre du cratère, on obtient : $D \propto E^{1/3}$. Si c'est l'éjection du matériel qui absorbe la plupart de l'énergie, alors l'énergie cinétique est convertie en énergie potentielle gravitationnelle nécessaire pour soulever un volume $V \propto D^3$ à une hauteur approximativement égale à la profondeur du cratère. Comme cette profondeur est proportionnelle au diamètre D on obtient : $D \propto E^{1/4}$ ($E = mgh = \rho Vgh$ donc $E \propto D^4$).

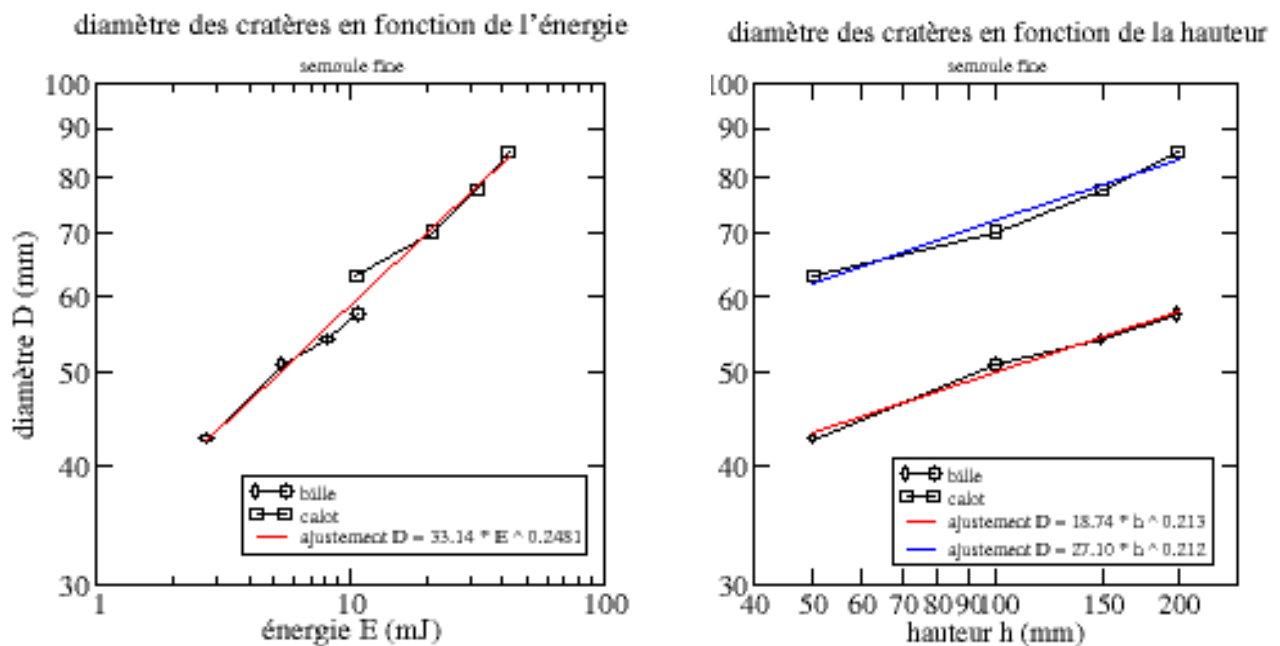
Références :

Joseph, C. Amato and Roger E. Williams, 1998, Crater formation in the laboratory: An introductory experiment in error analysis. American Journal of Physics, vol. 66 (2), pp. 141-143.

Bille 5,5g				Calot 21,5g				Rapport des masses
Diamètre D (mm)				Diamètre D (mm)				
Energie (mJ)	Mes 1	Mes 2	Moyenne	Energie (mJ)	Mes 1	Mes 2	Moyenne	
2,70	40	45	42,5	10,55	60	66	63	4,83
5,40	50	52	51	21,09	75	65	70	3,55
8,09	55	53	54	31,64	75	80	77,5	4,24
10,79	58	57	57,5	42,18	80	90	85	4,78

Trouve t-on réellement des droites ?

Oui, sur les 2 graphiques. On ne traite que le cas de la semoule fine. Sur le graphique selon l'énergie on trouve une pente égale à 0.248. Sur le graphique selon la hauteur, on trouve une pente égale à 0.212, pour les 2 courbes. On peut faire passer une droite de pente 0.25 par ces courbes, en se concentrant sur les premiers et derniers points des courbes relatives à la bille et au calot, respectivement.



Si oui, la pente est-elle la même pour les 3 courbes ?

Pas exactement à cause des incertitudes de mesure, mais elles sont tout de même très proches. En théorie elles devraient être égales.

Cette pente dépend t-elle du poids (calot ou bille) ? Dépend t-elle du matériau ?

La pente ne dépend pas du poids du projectile puisque on trouve la même pour la bille et le calot (graphique selon l'énergie). Elle dépend du matériau. La semoule a tendance à favoriser l'expulsion. La farine aurait tendance à se tasser plus que d'expulser de la matière.

Pour chaque matériau, déterminer quel est l'effet physique dominant.

La pente de la droite est très proche de $\frac{1}{4}$, indiquant que la majeure partie de l'énergie d'impact sert à expulser la matière. Si la compression avait dominé l'expulsion, on aurait trouvé une pente de $\frac{1}{3}$.

Retrouve-t-on le rapport des poids entre le calot et la bille à partir du second graphique ?

Le rapport des masses du calot et de la bille est $21.5 / 5.5 = 3.9$. On devrait retrouver ce rapport en calculant pour chaque mesure le rapport des diamètres de cratères, à la puissance 4 ($1/0,25$). On trouve 4.35 (voir tableau), ce qui est une estimation à 12 %, très acceptable compte-tenu des incertitudes de mesure.

Réponses pour la troisième partie

D'après la photo, on voit 3 générations de cratères :

- 1ère génération : le très gros cratère dont la moitié NW est partiellement effacée
- 2ème : cratères de taille moyenne; antérieurs aux système de failles NW-SE puisque celles-ci les recouperent
- 3ème: les plus petits cratères qui sont postérieurs aux failles puisqu'ils les recouperent.

La taille des cratères diminue donc notablement des plus anciens aux plus récents.

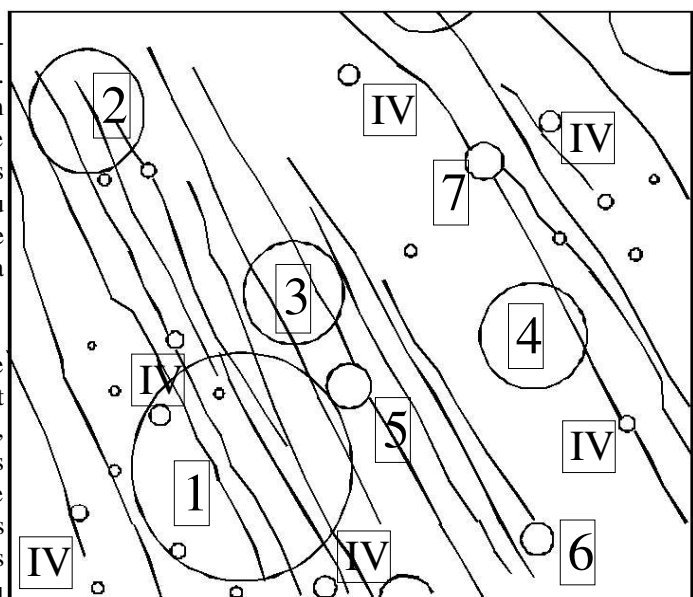
Echelle : 250km = 135 (mm)			
Indice ou Famille	Taille des cratères		Nombre de cratères
	(mm)	(km)	
1	46	85	1
2	26	48	1
3	21	39	1
4	22	41	1
5	7	13	1
6	9	17	1
7	7	13	1
IV	3,5 – 5	6,5 – 9,3	6
V	1 – 3	1,8 – 5,6	16

Famille	Taille (km)		Nombre
	Mini	Maxi	
I	80	100	1
II	40	45	3
III	10	20	3
IV	6	10	6
V	2	6	16

Après avoir fait le schéma ci-contre, on compte 29 cratères entièrement visibles, que l'on peut classer en 5 familles.

La répartition cumulée selon la taille est énumérée ci-dessous (pour une surface carrée de 250 km de côté). Comme on ne trouve aucun cratère entre 20 et 40 km (ce qui est dû à la taille faible de notre échantillon de terrain) et que les cratères entre 10 et 20 km sont plus proches de 15 km, on estime qu'il participent au comptage des cratères plus grands que 20 km. Ce point explique le fait que 2 valeurs sont données à la ligne ≥ 20 .

On ne peut pas placer les cratères de 1 km de diamètre sur la figure de l'énoncé. Néanmoins la statistique est suffisante pour constater que de même, sur la Lune, les terrains les plus anciens (Nectarien) sont marqués par des cratères nombreux et de grande taille alors que les terrains récents (Imbrien) sont affectés par des cratères plus petits et moins nombreux. Les petits cratères semblent être plus nombreux que les gros du fait de l'échelle et que ce sont les plus récents donc les mieux préservés.



Source : inconnue

La décroissance de la densité des cratères (qui va de pair avec celle de leur taille) est très rapide jusqu'à 3,5 Ga (Fig. 3) puis moins rapide après. On retrouve pour Mars la courbe moyenne correspondante à la Lune. Mars s'est formée dans la période pré-nectarienne (3,92 – 4,5 Ga). Les observations sur la Lune et sur Mars concordant on peut les généraliser au système solaire.

Taille (km)	Nombre cumulé	Densité cumulée (million de km carré)
>= 80	1	16
>= 40	4	64
>= 20	4 – 7	64 – 112
>= 10	7	112
>= 1	29	464

