

AVEC NOS ÉLÈVES

Simulation d'un cratère de météorite

Olivier Gayrard,

Celui qui observe pour la première fois la Lune à travers un instrument d'optique, contemple, bien souvent émerveillé, la multitude des creux, reliefs et cavités qui recouvrent la surface sélène. Nous admettrons l'origine météoritique de la plupart de ces cratères. Par des expériences simples, nous chercherons à les simuler, puis étudierons qualitativement et quantitativement leur taille en fonction de l'énergie qui les a produits. Nous finirons par estimer l'ordre de grandeur des astéroïdes qui les ont engendrés.

Une vidéo de ces expériences, réalisée par l'auteur, est disponible sur le site du CLEA pour les abonnés numérique :

(<http://acces.ens-lyon.fr/clea/vieclea/nouvelles-productions/cc/cc139/cahier-clairaut-nb0139-automne-2012/>)

Critères de similitudes

Examinons la figure 1. La présence des pics centraux, les bords relevés, les dépôts de projectiles témoignent que de la matière a été expulsée lors de la formation du cratère. Ce dernier est donc de nature explosive. Pour en reproduire un simulacre en classe, nous utiliserons un matériau finement divisé : poudre de cacao, farine, sable ou semoule... (l'usage d'un matériau tel la glaise, produirait un simple trou de pénétration).

Matériel utilisé

Récipients, billes d'acier et de verre, balance, tige magnétique, fil à plomb, passoire, mètre, et lampe de poche.



*Fig.1. Cratères lunaires dans la région du golfe torride...
À gauche, Copernic, un cratère de 93 km de diamètre.*

L'expérience

Remplissons suffisamment le récipient de farine, puis saupoudrons la surface de cacao. Laissons tomber une bille loin des bords pour éviter tout effet indésirable. Utilisons pour cela le fil à plomb. Éclairons de biais puis de face. Comparons les

figures 2 et 3 avec celle du véritable cratère de référence. La forme attendue est bien circulaire. La taille du cratère est supérieure à celle de l'impacteur, signe qu'il ne s'agit pas d'un simple trou de chute. En lumière rasante, nous distinguons les bords relevés du cratère (figure 2). Pour finir, la présence d'une structure blanche en étoile de farine sous-jacente (figure 3) prouve que la matière a bien été expulsée hors du cratère. Par contre, les pics centraux, résultat de la fusion de la matière et du rebond sont impossibles à reproduire avec les vitesses mises en jeu ici. Nous nous appuierons donc sur ce protocole.



Fig.2. Cratère d'impact dans de la poudre de cacao sur farine.

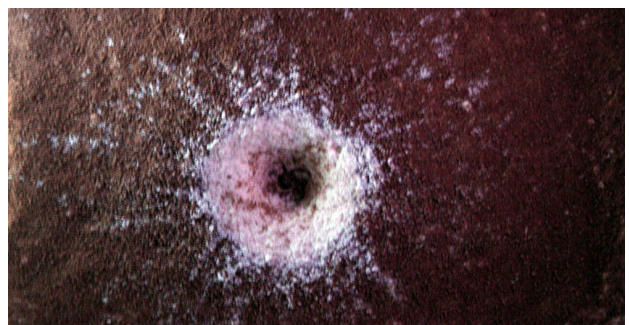


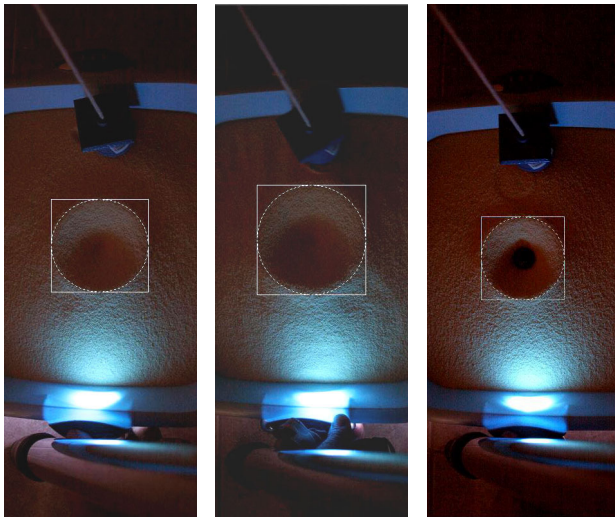
Fig.3. Ici, la farine sous-jacente est davantage visible.

Étude qualitative

Avec les plus jeunes, et tout particulièrement les élèves de la classe de troisième⁴, recherchons les facteurs influençant la taille des cratères.

Pour cela abandonnons à différentes hauteurs une même bille, puis pour une hauteur fixée, laissons chuter des billes de masses différentes.

L'expérience indique que le diamètre **D** des cratères augmente avec la hauteur **h** de l'« astéroïde », ainsi qu'avec sa masse **m** (figures 4abc).



a. Bille d'acier
 $m = 80 \text{ g}$
 $h = 1 \text{ m}$
 $D = 596 \text{ pixels}$

b. Bille d'acier
 $m = 80 \text{ g}$
 $h = 2 \text{ m}$
 $D = 723 \text{ pixels}$

c. Bille de verre
 $m = 21 \text{ g}$
 $h = 2 \text{ m}$
 $D = 557 \text{ pixels}$

Fig.4. Cratères de diamètre D formés par la chute d'une bille de masse m lâchée d'une hauteur h .

Étude quantitative

Avec les plus grands, je pense ici aux élèves de 1^{ère} S⁵, menons une réflexion sur les grandeurs. Hauteur de chute h , masse m et vitesse v sont-elles les mieux adaptées pour décrire le phénomène de formation du cratère de diamètre D et de profondeur H ?

Indépendamment, non, mais toutes interviennent via les expressions des énergies transférées. L'énergie potentielle E_p est convertie en énergie cinétique E_c . Lors de l'impact la matière absorbe l'énergie cinétique ; celle-ci est convertie en énergie potentielle gravitationnelle E_i (éjection de la matière) nécessaire pour soulever un volume V à une hauteur

⁴ Extrait des programmes de 3^{ème} : « La somme de ses énergies de position et cinétique constitue l'énergie mécanique. Conversion d'énergie au cours d'une chute ».

⁵ Extrait des programmes de 1^{ère} S : « Énergie d'un point matériel en mouvement dans le champ de pesanteur uniforme : énergie cinétique, énergie potentielle de pesanteur, conservation ou non conservation de l'énergie mécanique ».

approximativement égale à la profondeur H du cratère.

Si l'on suppose que tous les cratères ont des formes semblables, cette profondeur est proportionnelle au diamètre D et le volume de matière éjectée à D^3 .

$E_i = mgH = \rho VgH$. E_i est donc proportionnelle à D^4 . Autrement dit **D est proportionnel à $E_i^{1/4}$** (1). Si on cherche une formule de la forme $a \times E_i^b$ pour calculer D , on s'attend à trouver 1/4 comme exposant (on peut aussi passer par les logarithmes)⁶.

Retour sur la mise en œuvre des mesures

La relation (1) indique que pour une énergie libérée double, soit une hauteur de chute double à masse égale, le diamètre du cratère n'augmente que d'un facteur $2^{1/4} \approx 1,2$. Il s'agit alors de prendre certaines précautions lors de la réalisation des jets afin d'être précis. D'une part, on prendra la moyenne d'au moins 5 chutes. D'autre part, on fera en sorte que les conditions expérimentales restent les mêmes en tassant le matériau de façon identique, et en le lissant avec une règle. Ces biais étant évités autant que possible, les mesures des cratères seront faites sous lumière rasante ou en saupoudrant d'une poudre de couleur différente. Des photographies peuvent être envisagées à condition de garder une distance fixe au sujet. Ici les mesures des cratères sont faites en pixels avec l'aide d'un logiciel (fig. 5).

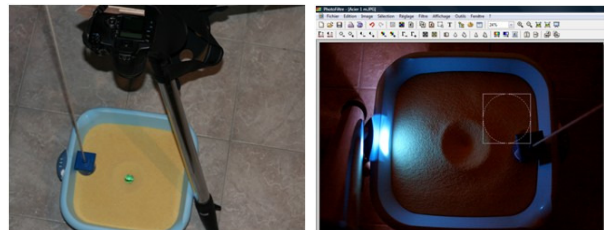


Fig.5. Les photos sont prises à l'aide d'un appareil sur pied et les diamètres sont mesurés avec le logiciel PhotoFiltre.

h (cm)	E_i (mJ)	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_{mov}
50	391	625	621	629	608	633	623
100	782	707	670	691	658	699	685
150	1173	755	753	782	782	761	767
200	1564	860	827	823	815	840	833
250	1955	873	877	877	848	885	872
300	2346	885	944	898	922	914	913
350	2737	952	919	923	935	939	934

Fig.6. Tableau des diamètres des cratères (en pixels) lors d'une série d'expériences dans de la semoule de blé moyenne avec une bille d'acier de 79,72 g.

⁶ http://ufe.obspm.fr/IMG/pdf_TP_crateres_complet.pdf

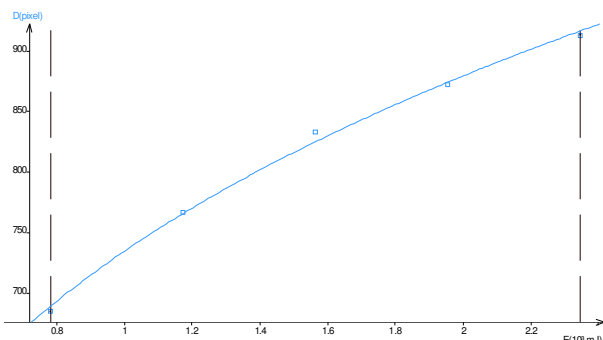


Fig.7. On a placé les points de coordonnées (E_i, D_{moy}) du tableau 6. Si on demande au logiciel Regressi une courbe de la forme $a \times E_i^b$ au plus proche des points, on obtient $a \approx 122$ et $b \approx 0,259$ proche de $1/4$. Regressi donne un écart relatif de 0,55 % pour $D(E)$. On peut aussi utiliser les logarithmes de D et de E et chercher une droite de régression.

Sur la figure 7, le diamètre en fonction de l'énergie est bien modélisé par une fonction de la forme $D = a \times E_i^b$ avec $b \approx 1/4$, à condition de retirer la première valeur. Pour des hauteurs trop faibles, la semoule n'est pas éjectée et nous ne sommes pas dans le même type de cratère.

Conclusion

L'exposant 0,259 est voisin de la valeur $1/4$ prévue par la relation (1). La simulation de la formation d'un cratère d'impact par la chute d'un astéroïde à

l'aide d'une bille d'acier dans de la semoule moyenne donne satisfaction.

Allons plus loin. Puisque D est proportionnel à $E^{1/4}$, alors $E_{réel} = (D_{réel}/D_{simulation})^4 \times E_{simulation}$.

Par exemple, pour une hauteur h de 3 m et une bille de 79,72 g, on a $E_i = 2,346$ J. Nous avons mesuré un diamètre de 110 mm à l'échelle de la photographie (0,12 mm/pixel). L'astéroïde de Rochechouart est estimé quant à lui avoir un diamètre de 20 km.

$E_{Rochechouart} = (20 \times 10^3) / (110 \times 10^{-3})^4 \times 2,346$ soit environ $2,6 \times 10^{21}$ J, ce qui correspond bien à l'ordre de grandeur donné par la littérature ⁽¹⁾ : $1,2 \times 10^{21}$ J.

Après ce résultat encourageant, testons cette méthode avec le cratère Aristote de 88 km de diamètre. Un calcul identique nous amène à :

$$E_{Aristote} = 9,6 \cdot 10^{23} \text{ J.}$$

Dans le cas d'une vitesse v au moment de l'impact de 20 km/s (les météorites ont habituellement des vitesses de quelques dizaines de km/s), pour une météorite de masse volumique $\rho = 3,4 \text{ g/cm}^3$ et en écrivant que $E_{Aristote} = \frac{1}{2} \rho V v^2$, (où V est le volume de l'astéroïde) nous trouvons que l'astéroïde qui a donné naissance à ce cratère avait un rayon de l'ordre de 7 km.

(1) CC n°66, été 1994 pages 8 et 9

