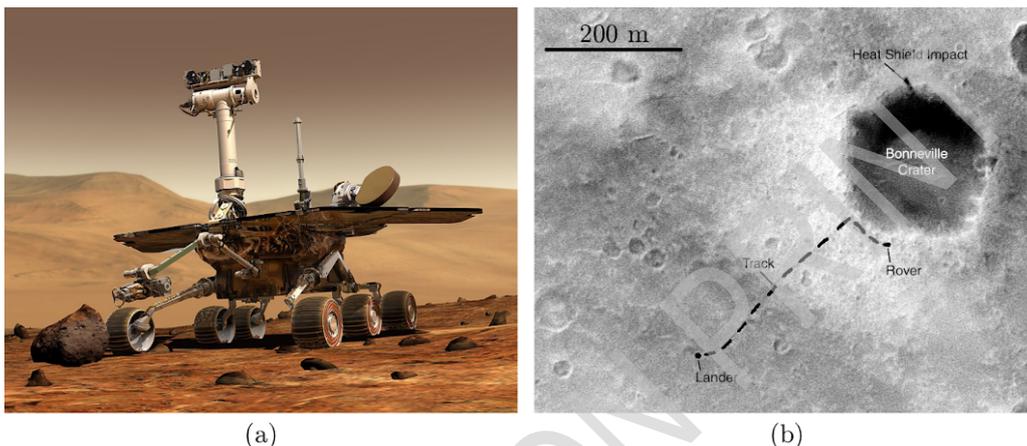


## Cratères et dunes de sable (10,0 points)

Le rover Spirit (**Fig. 1.(a)**) de la NASA s'est posé sur Mars en 2004 pour étudier sa géologie et la présence potentielle d'eau. Le site d'« atterrissage » (**Fig. 1.(b)**) est entouré de cratères de différentes tailles et de dunes de sable. Pendant l'exploration, le rover doit éviter de s'enliser dans les dunes de sable de Mars.



**Fig. 1.** (a) Vue d'artiste de Spirit. (b) Site d'atterrissage du rover sur Mars. Le trait indique une échelle de 200 m.

Le problème comporte deux parties indépendantes A (formation de cratères) et B (piégeage du sable) qui peuvent être traitées dans n'importe quel ordre. La liste du matériel est donnée ci-dessous et illustrée dans la **Fig. 2**.

- (a) Boîte en plastique, à vider. La boîte, une fois vide, servira à recueillir le sable qui déborde.
- (b) Bol.
- (c) Flacon de sable.
- (d) Six billes d'acier dans un récipient. Les billes ont quatre diamètres différents. Les trois plus petites sont identiques.
- (e) Mètre-ruban.
- (f) Support composé d'un plateau en bois avec des pieds en caoutchouc (f1), d'une tige verticale (f4), d'une noix de serrage (f2) et d'une tige horizontale (f3). Les différents éléments doivent être assemblés comme indiqué sur la photo (f).
- (g) Tamis, à utiliser pour retrouver une petite bille si elle se perd dans le sable.
- (h) Rail en aluminium, de 1 m de long.
- (i) Brosse pour ôter le sable des billes et du rail, si nécessaire.
- (j) Bac en bois.
- (k) Chronomètre.
- (l) Pâte adhésive.
- (m) Entonnoir pour aider à remettre le sable dans la boîte, à la fin de l'épreuve.
- (n) Cuillère.
- (o) Règle.

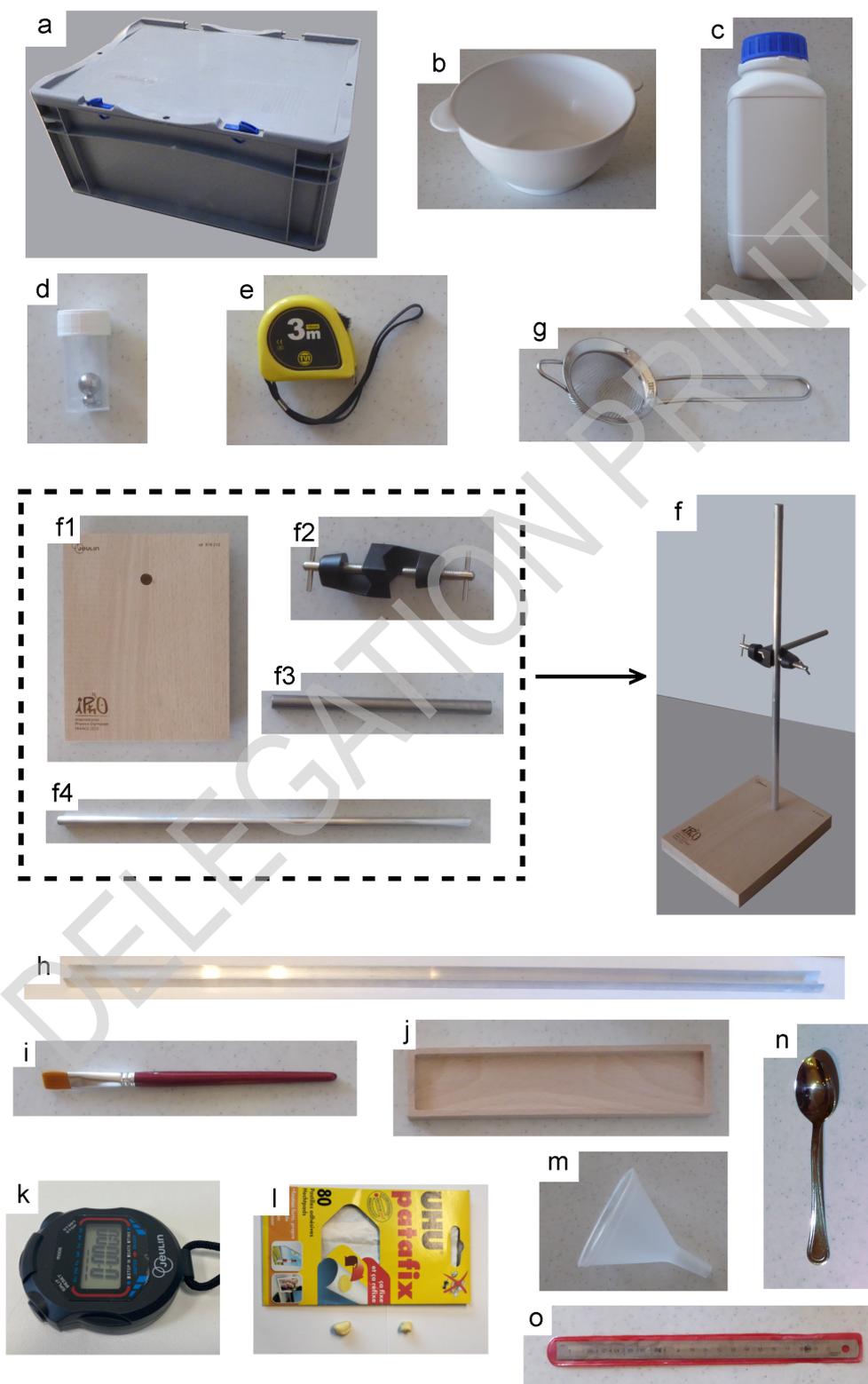
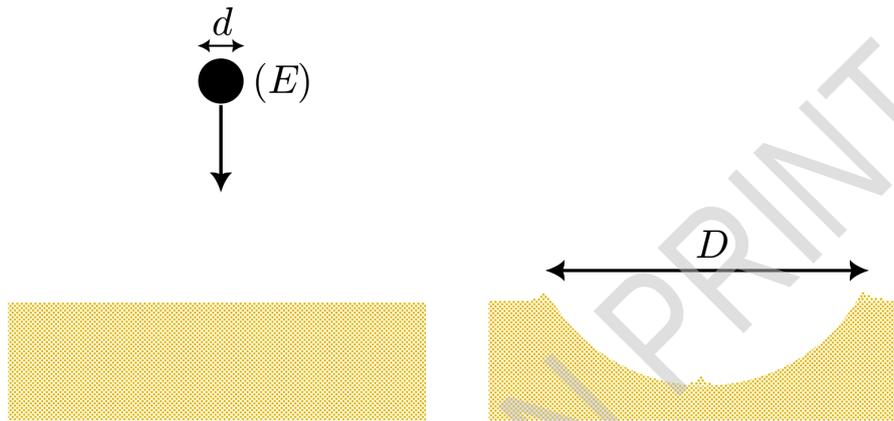


Fig. 2. Photographies de l'ensemble du matériel.

## A. Cratères d'impact

Les cratères sur Mars, dont le diamètre  $D$  varie d'environ 10 m à plusieurs centaines de km, résultent de l'impact de météorites. Différents modèles prédisent comment  $D$  dépend des paramètres de l'impact : diamètre de l'objet impactant  $d$  et énergie  $E$  (**Fig. 3**).



**Fig. 3.** Formation du cratère.

**Modèle 1 :**  $D$  dépend uniquement du diamètre de l'objet impactant  $d$

$$D = c_1 d, \quad (1)$$

où  $c_1$  est un nombre sans dimension indépendant de  $E$  et  $d$ .

**Modèle 2 :** L'énergie de la météorite  $E$  est convertie par des processus volumiques au cours de l'impact. Ce modèle prédit que  $D$  est proportionnel à  $E^{1/3}$

$$D = c_2 E^{1/3} \quad (2)$$

où  $c_2$  est un paramètre indépendant de  $E$  et  $d$ .

**Modèle 3 :**  $E$  est utilisée pour éjecter des matériaux à l'extérieur du cratère. Dans cette hypothèse

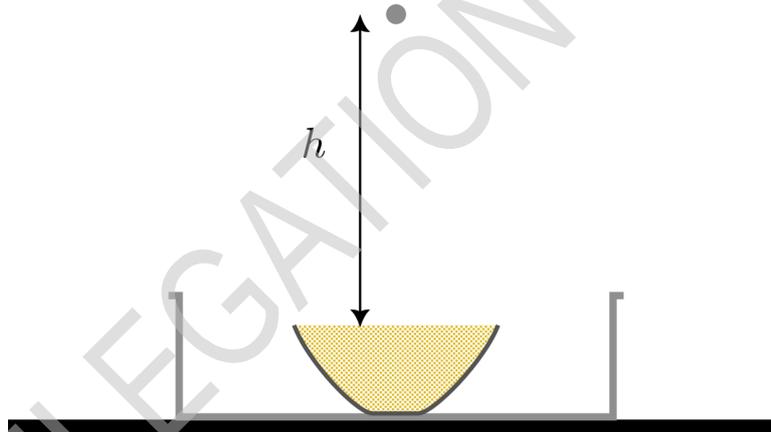
$$D = c_3 E^{1/4} \quad (3)$$

où  $c_3$  est un paramètre indépendant de  $E$  et  $d$ .

Ici, nous réalisons des expériences sur la formation de cratères à l'échelle centimétrique afin de comparer les trois modèles. Des billes d'acier de différents diamètres  $d$  et masses  $m$ , toutes d'une densité  $\rho_a = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (point **(d)** de la liste du matériel), modélisent des météorites.

Bille numéro 1	$d_1 = 2.0 \text{ mm}$	$m_1 = 0.033 \text{ g}$
Bille numéro 2	$d_2 = 5.0 \text{ mm}$	$m_2 = 0.51 \text{ g}$
Bille numéro 3	$d_3 = 9.0 \text{ mm}$	$m_3 = 3.0 \text{ g}$
Bille numéro 4	$d_4 = 16.0 \text{ mm}$	$m_4 = 17 \text{ g}$

Le bol **(b)** rempli de sable **(c)** est placé à l'intérieur de la boîte en plastique vidée **(a)** qui servira à recueillir l'excès de sable. Le bol doit être entièrement rempli de sable et la surface soigneusement nivelée à l'aide du bord de la règle **(o)**. Évitez de compacter le sable! Pour libérer la bille au-dessus du bol, on peut utiliser le support muni d'une tige et d'une noix **(f)**. La tige servira de guide pour lâcher la bille directement au-dessus du bol. Elle servira aussi à évaluer la hauteur de chute  $h$  au-dessus de la surface, qui sera mesurée à l'aide du mètre ruban **(e)**.



**Fig. 4.** Dispositif expérimental de formation de cratères.

Laissez tomber la bille 3 d'une hauteur de  $h = 50 \text{ cm}$  et mesurez le diamètre  $D$  du cratère formé. Répétez l'expérience 5 fois. Après chaque impact, mélangez le sable à l'aide de la cuillère **(n)**. La surface doit être soigneusement nivelée à l'aide du bord de la règle **(o)**. Évitez de compacter le sable! Si nécessaire, utilisez le tamis **(g)** pour retrouver la bille si elle s'est perdue dans le sable.

**A.1** Présentez vos résultats dans un tableau et donnez  $D$  avec son incertitude. 0.6pt

Pendant la chute, la force de traînée de l'air est

$$F = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_0 C_x v^2 \quad (4)$$

où  $v$  est la vitesse de la bille,  $\rho_0 \approx 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  est la densité de l'air et  $C_x$  est un coefficient sans dimension de l'ordre de l'unité.

La force de résistance de l'air est négligeable si la bille est lâchée d'une hauteur de chute inférieure à la hauteur maximale  $h_{\text{max}}$ , définie comme la hauteur depuis laquelle la force de résistance de l'air reste

inférieure à 10 % du poids tout au long de la chute.

- A.2** Déterminez l'expression théorique de la hauteur de chute maximum  $h_{\max}$ . Calculez numériquement  $h_{\max}$  pour chacune des quatre billes disponibles. 0.5pt

Étudiez expérimentalement la relation entre  $D$  et  $E$  afin de comparer les trois lois de puissance présentées dans l'introduction. Déterminez si l'exposant varie en fonction des énergies testées. Pour ce faire, prenez une série de mesures en laissant tomber les billes de différentes hauteurs. Une large gamme d'énergies doit être couverte. Les billes peuvent être lâchées d'une hauteur allant jusqu'à  $h = 2\text{m}$  afin d'atteindre des valeurs élevées de  $E$  tout en respectant la condition établie en **A.2**. Pour chaque jeu de paramètres, recommencez l'expérience seulement deux fois et calculez la valeur moyenne de  $D$ .

- A.3** Présentez vos résultats dans un tableau : masse de la bille  $m$ , hauteur de chute  $h$ , énergie d'impact  $E$ , diamètre du cratère  $D$ . 1.7pt

- A.4** Tracez vos résultats sur le papier graphique de votre choix (logarithmique ou linéaire). Sur la représentation graphique, ajoutez les lignes correspondant aux modèles 1, 2 et 3. Indiquez lequel des trois modèles théoriques correspond le mieux aux données expérimentales. 1.2pt

## B. Rouler et s'enliser dans le sable

Cinq ans après son atterrissage, le rover Spirit s'enlise définitivement dans les sables d'une dune martienne. Rouler dans le sable est particulièrement délicat car le mouvement des grains qui s'ensuit dissipe beaucoup d'énergie. Nous étudions ici le freinage d'une bille roulant dans le sable. La bille, initialement au repos, est d'abord accélérée sur un rail incliné d'un angle  $\theta$ , puis ralentie par un lit de sable.

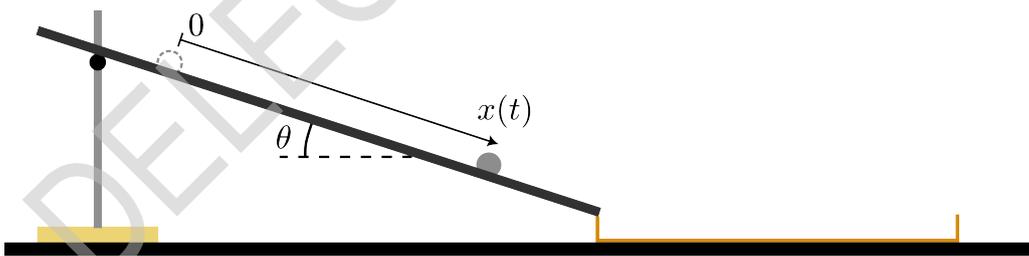


Fig. 5. Rail incliné (h) combiné au bac en bois (j).

### Mouvement de la bille le long du rail

La bille 4 est lâchée sans vitesse initiale d'un point arbitraire du rail (h), choisi comme origine ( $x = 0$ ) de l'axe ( $Ox$ ) (Fig. 5). Soit  $x(t)$  la position de la bille le long du rail. Le moment d'inertie d'une bille de masse  $m$  et de diamètre  $d$  par rapport à un axe passant par son centre est donné par  $J = md^2/10$ . L'énergie cinétique  $K$  d'une bille se déplaçant à la vitesse  $v$  tout en tournant à la vitesse angulaire  $\omega$  est la suivante :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2. \quad (5)$$

Nous supposons que la bille roule sur le rail sans glisser et négligerons toute dissipation d'énergie.

**B.1** Exprimez la position  $x$  de la bille en fonction du temps  $t$ , de l'angle  $\theta$  et de l'accélération de la gravité  $g$ . 0.4pt

Une extrémité du rail (**h**) repose sur le bord du bac en bois (**j**), qui est à ce stade vide de sable. L'autre extrémité du rail est soutenue par le support (**f**) de manière à former un angle d'inclinaison  $\theta = 5^\circ$  par rapport à l'horizontale. Veillez à effectuer ce réglage avec soin. Le rail est fixé des deux côtés à l'aide de pâte adhésive (**l**).

À l'aide d'un chronomètre (**k**), mesurez le temps  $t_{50}$  mis par la bille pour parcourir une distance  $l = 50$  cm le long du rail.

**B.2** Effectuez 5 mesures et présentez le résultat avec l'ordre de grandeur de son incertitude statistique. 0.7pt

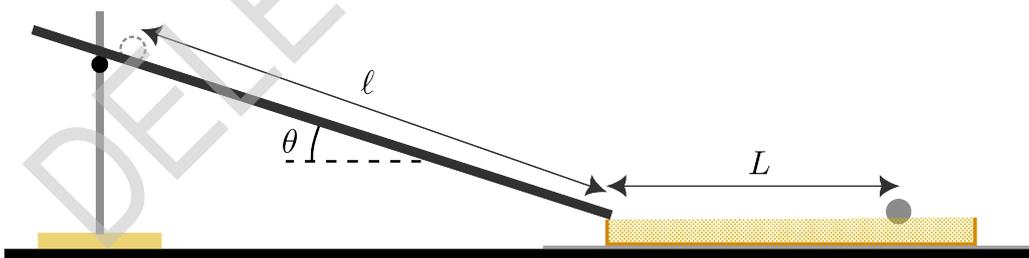
Mesurez  $t$  avec l'ordre de grandeur de son incertitude statistique pour au moins huit valeurs différentes de  $l$ .

**B.3** Présentez vos résultats dans un tableau. 0.8pt

**B.4** Représentez vos résultats sur un graphique avec les barres d'erreur pour confirmer la loi établie à la question **B.1**. Déduisez-en une estimation expérimentale de la constante  $g$  avec son incertitude. 1pt

### Mouvement de la bille dans le sable

Nous notons  $\ell$  la distance parcourue par la bille sur le rail. Sur le sable, la bille s'arrête après avoir parcouru la distance  $L$  (définie dans la **Fig. 6**).



**Fig. 6.** Accélération sur une distance  $\ell$  et freinage sur une distance  $L$ .

La bille est donc ralentie par une force de traînée  $T$  qui peut avoir deux origines possibles :

- **Modèle n° 1 (frottement solide)** : de la même manière qu'il existe entre deux solides en mouvement relatif une force de frottement solide, le sable exerce sur la bille une force de traînée constante  $T = -\mu_{\text{eff}}mg$ , où  $\mu_{\text{eff}}$  est le coefficient de traînée effectif du contact bille-sable et  $m$  est la masse de la bille.
- **Modèle n°2 (traînée fluide)** : la force de traînée dépend linéairement de la vitesse de la bille,  $T = -k\nu$ , où  $k$  est une constante et  $\nu$  est la norme de la vitesse.

L'objectif est ici de déterminer quel modèle décrit le mieux le type de freinage observé.

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# Q2-7

Français (France)

Lors de son déplacement dans le sable, la bille est modélisée comme une masse ponctuelle. Étant donnée la faible valeur de la pente du rail, nous négligerons toute perte d'énergie lors du passage du rail au bac de sable. Établissez la loi théorique reliant  $L$  à  $\ell$  dans chacune des deux situations (frottement solide ou traînée fluide). Les deux modèles conduisent à une loi de puissance de la forme  $L \sim \ell^\alpha$  dans laquelle l'exposant  $\alpha$  prend deux valeurs différentes.

<b>B.5</b>	Pour chaque modèle, 1 et 2, donnez la relation entre $L$ et $\ell$ et la valeur de $\alpha$ .	0.6pt
------------	---	-------

Placez le bac en bois **(j)** sur une feuille de papier. Remplissez le bac de sable et étalez bien le sable en lissant soigneusement la surface à l'aide de la règle. Évitez de compacter le sable! Ajustez à nouveau soigneusement l'angle du rail à  $\theta = 5^\circ$ . Lâchez la bille 4 ( $d_4 = 16.0\text{mm}$ ) sur le rail incliné de manière à ce que la distance parcourue sur le rail soit égale à  $\ell = 50\text{cm}$ .

*Avant chaque passage, videz le sable du bac, remplissez le bac et lissez à nouveau la surface du sable. Nettoyez le rail et la bille de son sable à l'aide de la brosse **(i)**. À la fin de l'expérience, utilisez la feuille de papier comme entonnoir pour remettre le sable en excès dans le flacon.*

<b>B.6</b>	Mesurez la distance $L_{50}$ parcourue dans le sable jusqu'à l'arrêt de la bille. Effectuez plusieurs mesures (au moins 5) pour déterminer $L_{50}$ ainsi que son unité et son incertitude.	0.8pt
------------	---	-------

<b>B.7</b>	Après plusieurs mesures pour au moins 8 valeurs de $\ell$ (en conservant $\theta = 5^\circ$ ), tracez $L$ avec ses barres d'incertitude en fonction de $\ell$ et concluez quant au modèle qui décrit le mieux la force de traînée $T$ .	1.5pt
------------	---	-------

<b>B.8</b>	En fonction du modèle choisi, précisez la valeur du coefficient $\mu_{\text{eff}}$ ou bien de $k$ qui caractérise alors la force $T$ .	0.2pt
------------	--	-------