

Mesure du coefficient de frottement à l'aide d'un pendule balistique

par Raphaël PINET

Collège Le Petit Prétau - 71640 Givry

raphael-andre-r.pinet@ac-dijon.fr

AL'AIDE D'UN DISPOSITIF expérimental simple à mettre en œuvre, une mesure du coefficient de frottement cinétique a été réalisée sur plusieurs surfaces. Une étude théorique du pendule balistique permet d'aborder la conservation de l'énergie mécanique dans une expérience de percussion où les différentes causes de frottement sont considérées négligeables. Après percussion par le pendule, l'observation et la mesure de la distance d'arrêt de la cible en laiton permettent d'observer au contraire les effets du frottement solide-solide et la non-conservation de l'énergie qui en résulte. Les mesures effectuées permettent d'évaluer le coefficient de frottement cinétique entre les deux surfaces de glissement.

INTRODUCTION

Le frottement cinétique entre deux surfaces solides en glissement l'une par rapport à l'autre provient des liaisons faibles qui se forment instantanément au cours du mouvement entre les molécules de surface des deux parties mobiles. La variabilité de l'état des surfaces ainsi que la difficile modélisation des liaisons de Van der Waals au niveau microscopique ne permettent pas d'obtenir une relation pour décrire finement le comportement des objets en mouvement relatif.

Cependant, une approche plus empirique, basée sur les lois de Coulomb permet d'obtenir à tout le moins un coefficient de frottement entre la force tangentielle de friction et la force normale à la surface égale au poids de l'objet dans le cas d'un glissement horizontal. Ce coefficient, noté μ_c dépend de la nature des deux surfaces en contact ainsi que leur état (abrasé, lubrifié...). Les mesures effectuées en métrologie donnent en général une plage de valeur pour deux surfaces données.

Du côté anglo-saxon, des montages ont été régulièrement montrés dans la littérature pédagogique de la physique [1]. L'intérêt du dispositif expérimental présenté ici est double : il est particulièrement simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir une valeur de coefficient de frottement fiable au regard des valeurs que donne la littérature spécialisée.

1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le pendule balistique a été mis au point par Benjamin Robins pour mesurer la vitesse d'un projectile tel qu'il le relate dans son traité *New principles of gunnery* [2] (1742). Il est basé sur la collision parfaitement inélastique entre le projectile dont on mesure la vitesse et le pendule pesant proprement dit. La hauteur maximale atteinte par le pendule pesant, lesté du projectile, permet de remonter à la mesure de la vitesse recherchée moyennant deux hypothèses que nous aménagerons dans cette expérience du pendule balistique modifiée pour l'étude du frottement cinétique.

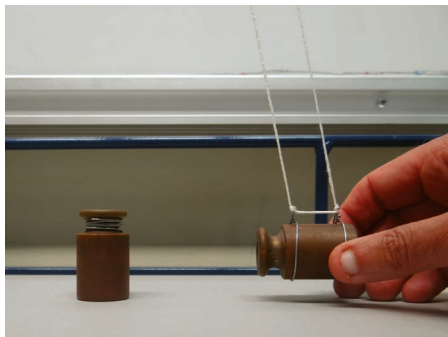


Figure 1 - Dispositif expérimental.

Dans cette expérience en effet, le choc entre le pendule pesant et la masse qui servira de cible sera considéré comme l'objet d'une collision parfaitement élastique. Le pendule aura pour fonction de donner une vitesse déterminée à la cible. La connaissance de l'énergie cinétique qui en résultera permettra de mesurer le coefficient de frottement cinétique moyennant la mesure de la distance de freinage de la cible.

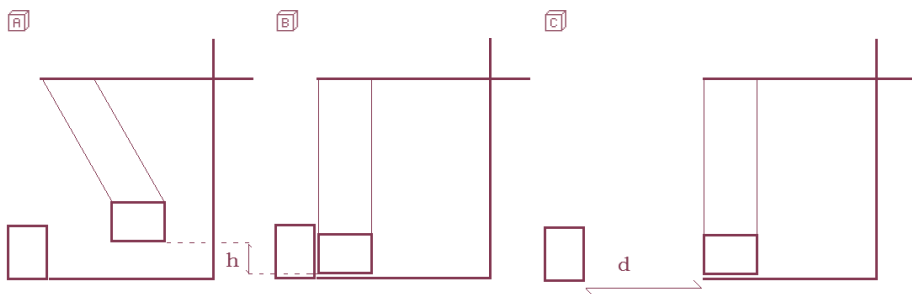


Figure 2

2. ÉTUDE THÉORIQUE

La première hypothèse pour le calcul de la vitesse maximale du pendule pesant est la conservation de l'énergie mécanique depuis le lâcher du pendule jusqu'au minimum de sa hauteur. C'est l'hypothèse qu'a retenue Robins dans son traité. La faible course du pendule – 10 cm tout au plus – ainsi que la double suspension à la potence au moyen de simples fils rendent cette hypothèse tout à fait raisonnable.

La seconde hypothèse concerne la conservation de l'énergie lors du choc entre les deux masses choisies identiques au dixième de gramme près. On suppose que la

collision entre les deux masses dures altère peu l'état interne des deux masses. C'est en définitive affirmer que les solides sont indéformables, ce qui est indéniable et que l'élévation de température locale au niveau du choc est de peu de conséquence sur la précision des mesures. De la même façon, la dissipation d'énergie sous forme sonore lors de la collision est réelle, mais trop faible pour altérer sensiblement l'énergie de la cible après collision.

Georges Bruhat a montré dans le cas de deux sphères élastiques que les vitesses sont simplement échangées dans le cas particulier où la vitesse du projectile est parallèle à la droite joignant les centres de gravité des deux masses [3].

Notons que cette condition est plus facile à réaliser grâce à la double suspension qui permet d'ajuster plus facilement l'orientation du plan d'oscillation par rapport au centre de la masse-cible. La seule différence ici est que les masses sont cylindriques et non sphériques.

On notera :

- h la hauteur de chute du projectile (cf. figures 2A et 2B, page ci-contre) ;
- m_p la masse du projectile ;
- v_p la vitesse maximale du projectile ;
- m_c la masse de la cible ;
- v_c la vitesse de la cible immédiatement après la collision ;
- d la distance de freinage (cf. figure 2C, page ci-contre) ;
- μ_c le coefficient de frottement cinétique.

D'après la conservation de l'énergie :

$$m_p gh = \frac{1}{2} m_p v_p^2. \quad (1)$$

D'après la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement du système constitué par les deux solides :

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_c. \quad (2)$$

Soit :

$$v_p = v_c. \quad (3)$$

Lorsqu'après la collision, la cible glisse jusqu'à l'arrêt complet, elle subit le travail de la force de frottement entre les deux surfaces de glissement. En application des lois de Coulomb [4]:

$$\mathbf{F}_f = \mu_c \mathbf{N} \quad (4)$$

$$\mathbf{N} = -m_c \mathbf{g} \quad (5)$$

dans le cas d'une surface de glissement horizontale.

Le travail du frottement sur la distance d de freinage s'écrit alors :

$$W_{F_f}(d) = -\mu_c m_c g d. \quad (6)$$

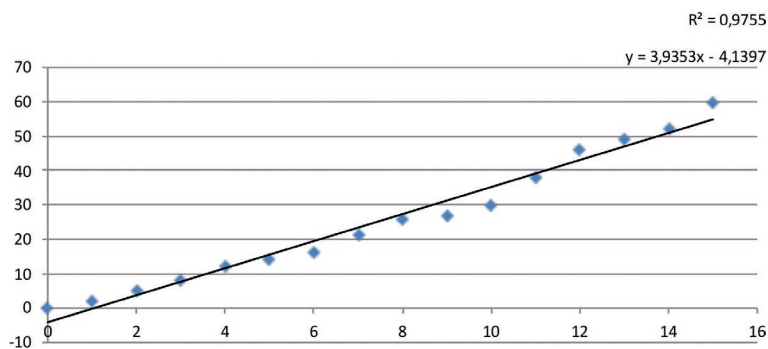


Figure 3 - Glissement sur mélamine
(hauteur h en fonction de la distance d).

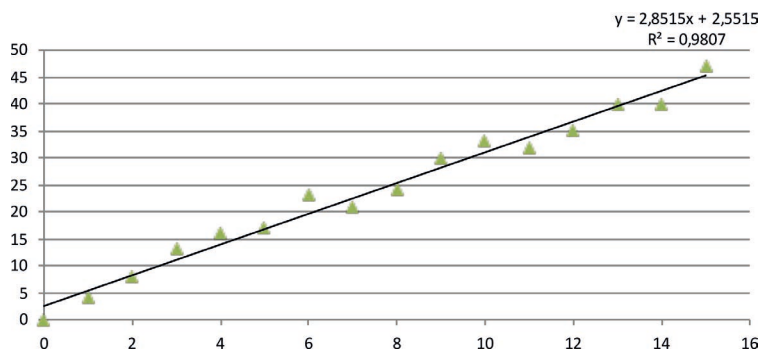


Figure 4 - Glissement sur carton
(hauteur h en fonction de la distance d).

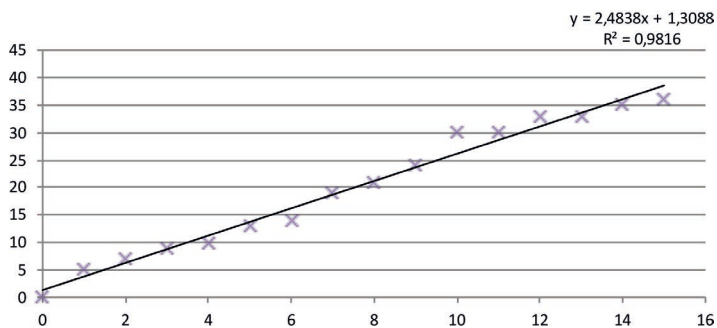


Figure 5 - Glissement sur bois
(hauteur h en fonction de la distance d).

Le théorème de l'énergie cinétique donne :

$$0 - \frac{1}{2} m_p v_C^2 = -\mu_c m_C g d. \quad (7)$$

Comme $m_p = m_C$, on obtient d'après (1) :

$$\mu_c = \frac{h}{d}. \quad (8)$$

3. MESURES DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT CINÉTIQUE

Le protocole de l'expérience a consisté en trois lancers pour une même hauteur h afin de moyenner la valeur de la distance de freinage d . Les résultats obtenus pour trois surfaces différentes sont représentés sur les figures 3, 4 et 5 (cf. page ci-contre) et montrent une très bonne corrélation entre la distance d et la hauteur h . Notons que la précision du tableau excède la précision espérée.

Les valeurs des coefficients de frottement cinétique pour les trois surfaces considérées sont résumées dans le tableau ci-dessous en tenant compte des chiffres significatifs des grandeurs utilisées (cf. tableau 1). Elles sont comparées aux valeurs trouvées dans la littérature spécialisée. La spécificité de chaque paire de surfaces mises en jeu permet rarement de trouver les mêmes surfaces. Néanmoins, les valeurs mesurées par d'autres laboratoires pour des surfaces de structure voisine permettent d'estimer que les mesures effectuées par le présent montage sont plausibles. Cette proximité valide le protocole de mesure dans son ensemble.

Surface	Coefficient de frottement cinétique	Coefficient mesuré en laboratoire
Mélamine	0,25	0,2 (métal/polythène) ⁽¹⁾
Carton	0,34	0,28 (nickel/papier) ⁽²⁾
Bois	0,40	0,2 - 0,5 ⁽³⁾

Tableau 1

CONCLUSION

Le pendule balistique s'est révélé une approche particulièrement simple à mettre en œuvre pour mesurer les coefficients de frottement cinétique dans le cas de trois couples de surfaces. Il a permis d'intéresser les élèves au concept de frottement solide, tout en abordant concrètement la conservation de l'énergie dans le cas de la chute du pendule et la non-conservation de l'énergie particulièrement évidente dans le cas du freinage de la cible.

(1) https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html

(2) <https://hypertextbook.com/facts/2005/paper.shtml>

(3) https://www.containerhandbuch.de/chb_e/stra/index.html?/chb_e/stra/stra_04_04_05.html

Une série de mesures supplémentaires pourrait être menée pour des surfaces référencées dans les manuels d'ingénierie et de recherche appliquée afin de mieux comparer les coefficients obtenus dans des conditions similaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Kinsler and E. Kinzel, "A Simple Lab Exercise to Determine the Coefficient of Static Friction", *The Physics Teacher*, 44(2), 77, February 2006)
- [2] B. Robins, *New principles of gunnery*, London, 1805
- [3] G. Bruhat, *Mécanique*, Paris : Masson, p. 234-235, 1961.
- [4] E. Hecht, *Physique Mécanique*, Montréal : ERPI, p. 180, 2006.



Raphaël PINET

Docteur en physique

Professeur

Collège Le Petit Prétau

Givry (Saône-et-Loire)