

Une méthode de mesure du coefficient de frottement de glissement dynamique

par Alioune OUEDRAOGO et Hans JORDENS,
I.M.P. B.P. 7021 Université de Ouagadougou.

I. INTRODUCTION.

Le but de cet article est de présenter une nouvelle méthode de mesure du coefficient de frottement de glissement dynamique f_d et de mettre en évidence expérimentalement que le coefficient de frottement de glissement statique f_s est supérieur à f_d .

Ce sujet a déjà été traité dans le B.U.P. (1) et l'essentiel de l'article précité a été condensé sous la forme d'un exercice dans le livre de BERTIN, FAROUX, RENAULT (2).

Deux raisons nous font revenir sur ce sujet :

- La première est que le dispositif présenté a l'avantage d'être peu coûteux et peut être mis au point dans les établissements les plus démunis ;
- La seconde est que la méthode proposée nécessite l'exploitation d'une courbe d'étalonnage dont on doit évaluer l'intégrale.

II. RAPPELS.

1) Lorsqu'on essaye de faire glisser un palet en bois sur une planche horizontale en lui appliquant une force horizontale $\vec{F}$, on constate que le palet reste immobile tant que :

$$|\vec{F}| \leq |\vec{F}|_{lim}.$$

Par conséquent, on déduit d'une étude expérimentale statique que lorsque $|\vec{F}| < |\vec{F}|_{lim}$ le système de forces exercées par la planche sur le palet est réductible à une force unique $\vec{R}$ qui n'est plus verticale (fig. 1).

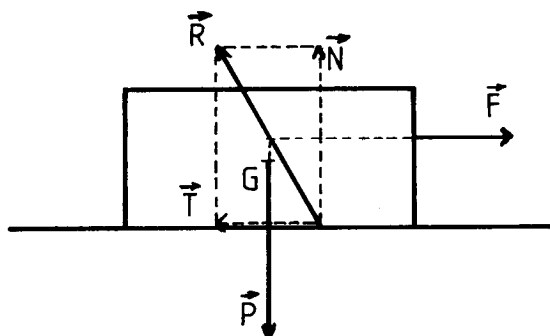


Fig. 1

A l'équilibre, on peut écrire :

$$\vec{N} = -\vec{P}$$

$$\vec{T} = -\vec{F}$$

$\vec{T}$ est la force de frottement de glissement qui ne peut varier que dans les limites suivantes :

$$0 < |\vec{T}| < |\vec{T}|_{lim}.$$

La valeur de $|\vec{T}|_{lim} = |\vec{F}|_{lim}$ est donc déterminée par la mesure de $|\vec{F}|_{lim}$.

Le rapport $\frac{|\vec{T}|_{lim}}{|\vec{N}|} = f_s$ est constant pour deux solides donnés (ici la planche et le palet); c'est le coefficient de frottement de glissement statique. Tel est l'essentiel de la loi expérimentale de Coulomb dont les applications sont présentées en détail dans divers manuels de Mécanique Rationnelle (2) (3).

2) S'il y a glissement rectiligne uniforme du palet sur la planche, nous pouvons poser l'égalité :

$$|\vec{T}| = f_d |\vec{N}|$$

f_d est le coefficient de frottement de glissement dynamique; il est inférieur à f_s comme le montre une expérience célèbre (3) (4) et ne dépend pratiquement pas de la vitesse de glissement. Dans notre manipulation, nous adoptons cette hypothèse *a priori* et nous montrons que les résultats des mesures la confirment.

III. PRINCIPE.

Un palet P en bois, de masse m et de rayon R , peut se déplacer sur une planche en bois blanc massif type « Samba ». Il est propulsé à l'aide d'un élastique fixé sur la planche en deux points A et A' . On prend comme origine des positions le point O milieu de AA' . A l'instant initial, le point du palet le plus éloigné de O est à une distance u de O et à la fin de son mouvement de translation il s'arrête à la distance s (fig. 2).

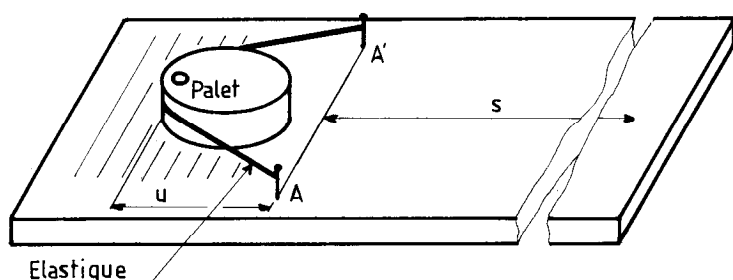


Fig. 2 a.

A chaque instant, la position de ce point est repérée par la distance x qui le sépare de O .

En glissant, l'énergie fournie au palet par l'élastique est dissipée par l'intermédiaire du travail de la force de frottement $\vec{F}_d$. Entre états initial et final, pour lesquels le palet est au repos, la variation d'énergie cinétique est nulle et donc le travail des forces appliquées sur le palet est nul.

Soit $\vec{F}(x)$ la résultante des forces exercées par l'élastique sur le palet à la position x ; (fig. 2 b).

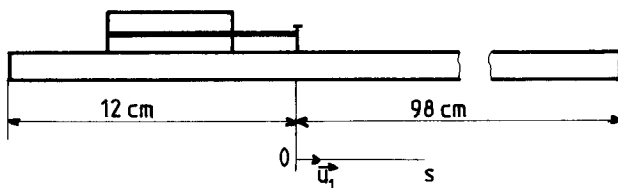


Fig. 2 b. — Longueur de la planche : 110 cm.

$\vec{F}(x)$ est dirigée selon $\vec{u}_1$, vecteur unitaire de l'axe OS . Si $F(x)$ représente le module de la force $\vec{F}(x)$, l'énergie fournie au palet par l'élastique pour un déplacement fini de O à u est :

$$E(u) = \int_0^u F(x) dx.$$

Comme nous l'avons dit, cette énergie $E(u)$ est entièrement dissipée par la force constante de frottement de glissement dynamique $\vec{F}_d$. Lorsque le palet s'arrête, il a parcouru la distance $s + u$ et nous avons :

$$-F_d (s + u) + \int_0^u F(x) dx = 0$$

$$F_d (s + u) = \int_0^u F(x) dx.$$

Les mesures de s , u et $E(u)$ permettent de déterminer F_d et connaissant la masse m du galet, d'en déduire le coefficient de frottement de glissement dynamique par la relation $f_d = \frac{F_d}{mg}$.

IV. MANIPULATION ET RESULTATS.

1) Méthode d'étalonnage de l'élastique et calcul de E .

Le point le plus délicat de la manipulation proposée est l'étalonnage de l'élastique, ainsi que l'évaluation, à partir de la courbe d'étalonnage, de l'intégrale :

$$\int_0^u F(x) dx.$$

L'élastique est tendu entre deux pointes de telle sorte que $\vec{F}(x) = \vec{0}$ pour $x = 0$. Pour l'étalonner, nous disposons de palets munis d'une punaise pour accrocher un dynamomètre (fig. 3).

Nous procédons de la manière suivante pour l'étalonnage de l'élastique. On positionne le palet à une distance supérieure à u et on le ramène doucement à la cote u où l'on fait la mesure de $F(u)$. Nous admettons que le dynamomètre indique la valeur de la résultante des forces exercées par l'élastique sur le palet à la position u .

En toute rigueur, l'équation d'équilibre du palet « *in situ* » tel que le présente la fig. 3 doit faire intervenir la force de frottement statique $\vec{F}_s$, dont on ne connaît ni la direction ni le sens ni le module : la seule chose que l'on connaisse est $|\vec{F}_s| < f_s mg$ (m étant la masse du palet).

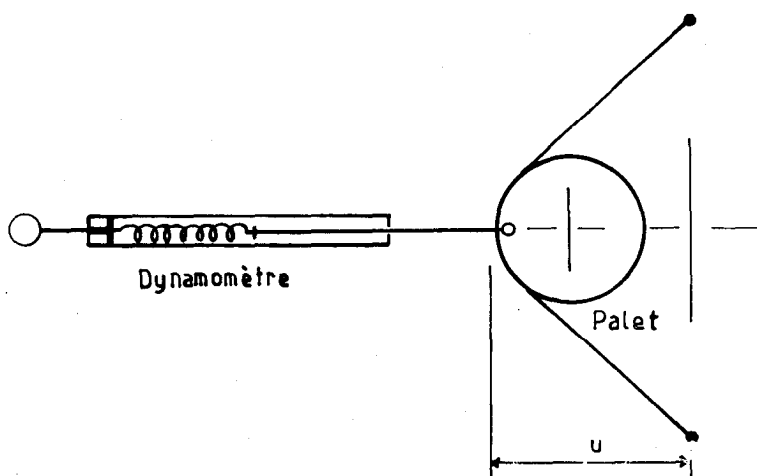


Fig. 3

Plusieurs raisons incitent à négliger $\vec{F}_s$:

a) Les palets utilisés ont un rayon $R = 3$ cm et une masse $m = 48$ g. Ainsi $|\vec{F}_s|$ vaut au maximum (voir § IV.2) $0,24$ N ; pour les valeurs de $u \geq 2$ cm, elle est toujours inférieure à l'indication du dynamomètre (fig. 4).

b) Puisque le rayon du palet $R = 3$ cm est petit par rapport à la longueur de l'élastique qui est de 20 cm lorsque $u = 0$, nous avons effectué un étalonnage de l'élastique sans palet. Les résultats fournis par les deux procédés d'étalonnage sont présentés sur la fig. 4. Sur cette figure, on voit que les résultats obtenus par les deux méthodes sont très voisins.

c) Quelle que soit la méthode d'étalonnage adoptée, les points mesurés sont entachés d'erreurs de toutes natures, difficiles à évaluer. On peut cependant raisonnablement penser que les points obtenus sont répartis au hasard autour de l'inaccessible courbe réelle. Etant donné que la courbe d'étalonnage de la fig. 4 n'est utilisée que sous sa forme intégrée, l'intégration numérique « lisse » toutes ces erreurs. Ce phénomène est bien connu des physiciens ayant eu recours aux procédés d'intégration numérique. Par contre, il faudrait être beaucoup plus prudent pour utiliser la courbe d'étalonnage telle quelle, ou pire, sa dérivée numérique.

A l'aide de la courbe de la fig. 4, on peut évaluer l'intégrale :

$$E(u) = \int_0^u F(x) dx$$

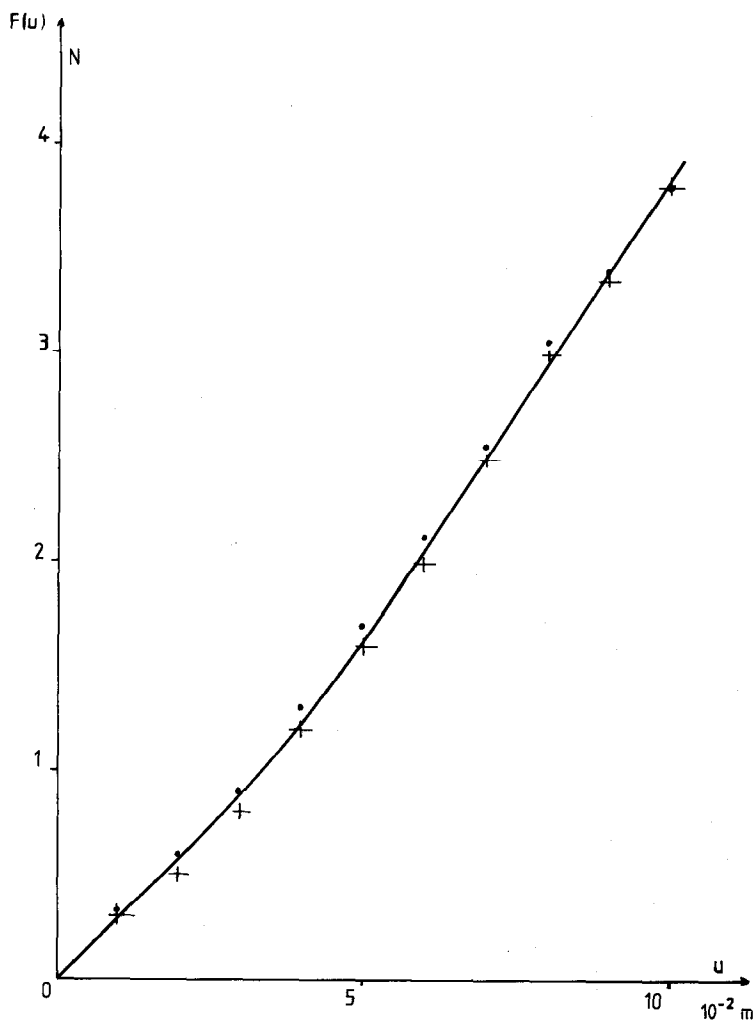


Fig. 4. — Courbe d'étalonnage $F(u)$ de l'élastique.

+ Avec palet.

• Sans palet.

par la méthode des trapèzes, en utilisant les valeurs mesurées de $F(u)$, pour les u variant de 0 à 10 cm par incréments d'un centimètre avec, bien sûr, les valeurs $F(0) = 0$ et $F(10)$. Naturellement la méthode à adopter concernant la détermination de $E(u)$ doit essentiellement dépendre du niveau de compréhension des étudiants.

2) Manipulation et résultats.

L'élastique étant étalonné, il suffit alors de mesurer la distance $s + u$ parcourue par le palet sur la planche pour différentes valeurs de u . Si on trace la courbe $E = f(s + u)$, on obtient une droite de pente F_d (fig. 5).

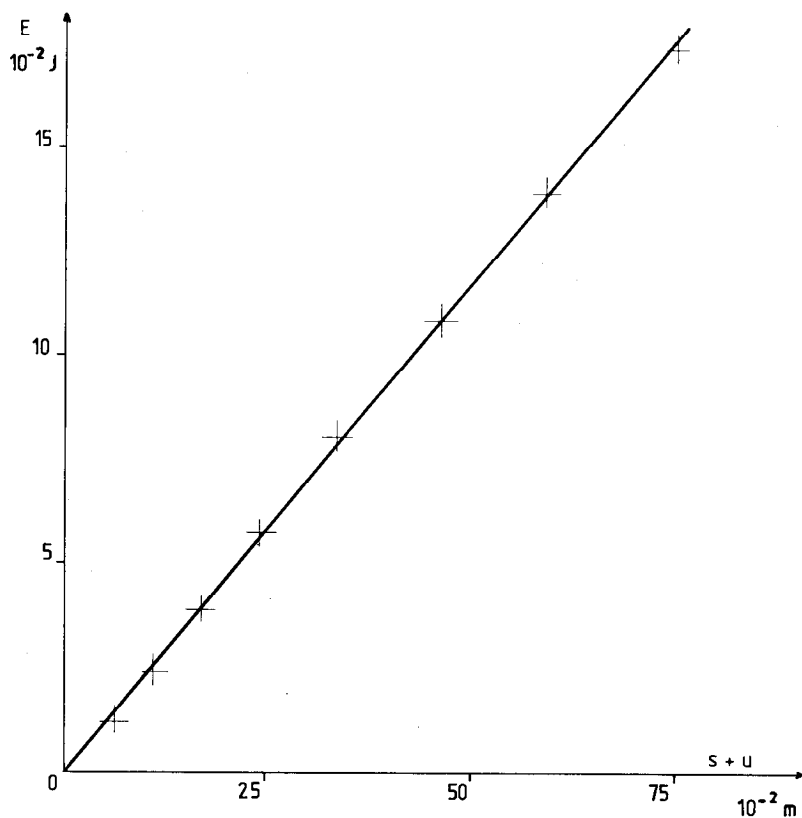


Fig. 5. — Courbe $E = f(s + u)$.

Les valeurs de E sont calculées par intégration numérique de la fonction représentée sur la courbe de la fig. 4.

On en déduit la valeur du coefficient de frottement dynamique qui ne dépend pratiquement pas de la vitesse de glissement :

$$f_d = \frac{F_d}{mg} = 0,40.$$

Remarque.

Lors de la manipulation, il faut s'assurer que le palet est lancé correctement de telle sorte que son mouvement sur la planche soit un mouvement de translation. Pour cela, on trace un diamètre sur le palet et on veille à ce qu'il soit parallèle à l'axe OS et qu'il le reste pendant le mouvement. Cela demande quelques précautions de manipulation. Si le palet tournait au cours de son déplacement, il faudrait tenir compte aussi du travail du couple de frottement de pivotement.

Pour le calcul du coefficient de frottement statique f_s , on mesure avec un dynamomètre la force $\vec{F}'$, nécessaire pour produire le mouvement en palet.

On en déduit :

$$f_s = \frac{|\vec{F}'|}{mg} = 0,47.$$

V. CONCLUSION.

Bien que la manipulation proposée fournisse des résultats entachés d'erreurs difficiles à évaluer (les lois de Coulomb concernant le frottement de glissement sont d'ailleurs approchées), celle-ci a le mérite d'être simple, peu coûteuse et elle met bien en évidence le phénomène de frottement de glissement. Elle peut d'ailleurs être prolongée en étudiant le mouvement ascendant des palets lorsque la planche fait un angle α avec le plan horizontal. Dans ce cas, l'étalonnage de l'élastique n'est pas modifié mais F_d devient $f_d mg \cos \alpha$.

L'application du théorème de l'énergie cinétique conduit à l'équation :

$$E = f_d mg (s + u) \cos \alpha + mg (s + u) \sin \alpha ;$$

dans laquelle le dernier terme représente le travail de la force de pesanteur.

Notons pour terminer que la méthode que nous proposons pour mesurer f_d repose sur l'hypothèse d'un fonctionnement réversible de l'élastique, ce qui suppose que nous négligeons les pertes

d'énergie à ce niveau ; l'étalonnage de l'élastique se faisant par une méthode statique et l'expérience proprement dite en mode dynamique.

Remerciements.

Ils vont à Messieurs Pierre TANGUY de l'Université de Rennes et Christian VIGNON, Agrégé de Mécanique à l'I.M.P., Université de Ouagadougou pour leurs critiques et suggestions.

REFERENCES

- (1) M. AZÉMA, B.U.P. n° 474 (1966).
 - (2) BERTIN, FAROUX, RENAULT, *Mécanique*. Exercice n° 2, p. 185. Dunod Université.
 - (3) P. TANGUY et D. THOUROUDE, *Les théorèmes généraux de la mécanique*, Tome 1, p. 126-149. Mc Graw-Hill.
 - (4) SOMMERFELD, *Mechanics*, p. 83-84, Academic Press.
-