

## TP : Mesure d'un coefficient de frottement.

Les frottements sont très souvent perçus uniquement comme responsables de la diminution de la vitesse d'un mobile dont on aimerait bien qu'elle se maintienne. C'est oublier un peu vite que sans frottements il n'est pas possible de mettre en mouvement un mobile ! Il suffit pour s'en convaincre de penser à la difficulté de mise en mouvement d'un véhicule sur une route enneigée ou verglacée. La *tribologie*, science qui étudie les contacts entre deux matériaux et, par conséquent, les frottements est une science difficile. Sur le plan énergétique, les frottements peuvent être perçus comme des convertisseurs. Dans le cas, d'un pneu sur la route, il y a conversion d'une certaine quantité d'énergie mécanique en énergie interne partagée entre le pneu dont la température s'élève et la route.

### 1 Objectifs

L'objectif de ce TP est de développer un protocole expérimental pour mesurer un ou des coefficients de frottements. Nous classons les coefficients de frottements en deux catégories : celle des coefficients de frottements statiques  $f_s$  qui correspondent à la situation où les deux systèmes en contact n'ont pas de vitesse relative l'un par rapport à l'autre et celle des coefficients de frottements dynamiques  $f_d$  dans le cas contraire. La vitesse relative d'un système par rapport à l'autre est la vitesse de glissement.

### 2 Matériel

Vous disposerez pour ce travail du matériel que vous pouvez voir sur la photographie de la figure ???. Le contact que nous allons tenter de caractériser est celui entre un petit parallélépipède de bois et une planche, elle aussi en bois. Vous pourrez disposer en plus de tout matériel classique pour envisager la réalisation d'expériences comme pour mesurer des longueurs et des durées.



FIGURE 1 – Planche et petit morceau de bois

Cet équipement sera complété par une webcam HP. Si vous en éprouvez le besoin, cette webcam sera pilotée par le logiciel *Arcsoft* que vous trouverez dans *Contrôle Center* du répertoire physique-chimie. Si vous

utilisez cette webcam, il faudra la configurer de telle sorte que le nombre de points de l'image ne soit pas trop élevé. Ensuite, vous pourrez utiliser ces images vidéos dans *Tracker* et, en fonction de ce que vous aurez prévu de faire, aboutir à la mesure des coefficients de frottements. L'enregistrement de la vidéo s'effectue semble-t-il automatiquement dans le répertoire Documents/WebCamMedia/Capture. N'hésitez pas enregistrer le fichier vidéo dans votre répertoire.

### 3 Aspects théoriques

#### 3.1 Rappel des lois de Coulomb

##### 3.1.1 Glissement

Dans ce cas de figure la vitesse de glissement est non nulle. On considère l'action du solide  $\mathcal{S}_1$  considéré comme un support sur le solide  $\mathcal{S}_2$ . Cette force notée  $\vec{R}_2$  et appliquée au point  $I_2$  sera toujours décomposée en deux forces perpendiculaires. La composante normale  $\vec{N}_2$  est perpendiculaire la surface de contact en  $I$  et orientée du solide  $\mathcal{S}_1$  vers le solide  $\mathcal{S}_2$ . La composante tangentielle notée  $\vec{T}_2$  est contenue dans le plan tangent à la surface de contact en  $I$ . De plus, cette force souvent qualifiée de *force de frottement* s'oppose au mouvement du solide  $\mathcal{S}_2$  par rapport au solide  $\mathcal{S}_1$ . Elle est colinéaire et de sens opposé à  $\vec{v}_{g\ 2/1}$ , vitesse de glissement de  $\mathcal{S}_2$  par rapport à  $\mathcal{S}_1$ . Enfin selon la loi de COULOMB, la norme de  $\vec{T}_2$  est proportionnelle à la norme de  $\vec{N}_2$ . Physiquement, cela signifie que plus il y a d'appui du solide  $\mathcal{S}_2$  sur le solide  $\mathcal{S}_1$ , plus la force de frottement sera importante :

$$\text{Glissement} \quad \vec{v}_{g\ 2/1} \neq \vec{0} \quad |T_2| = f_d N_2$$

où  $f_d$  est le coefficient de frottement dynamique de l'interaction  $\mathcal{S}_1 - \mathcal{S}_2$ . Le coefficient de frottement dynamique peut encore se définir par l'angle  $\varphi_d$  que fait le vecteur  $\vec{R}_2$  avec sa composante normale  $\vec{N}_2$ , voir le schéma de la figure ???. On a en effet  $f_d = \tan \varphi_d$ .

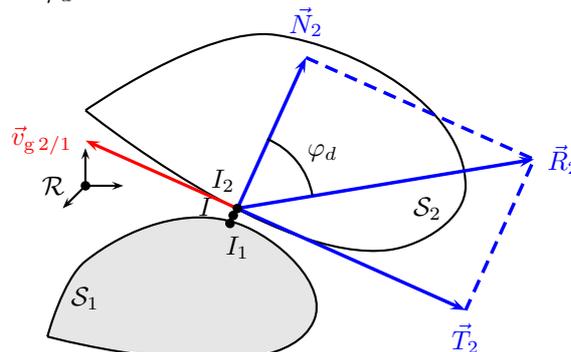


FIGURE 2 – Situation de glissement

On retiendra que dans une situation de glissement, si l'on arrive à connaître la composante normale  $N_2$  de la force de contact, alors on connaît aussitôt la norme de la force tangentielle  $|T_2|$ . Ceci est très important dans le cadre de la résolution d'un problème de mécanique. Dans le cas d'un mouvement de glissement sans frottement, on aura  $f_d = 0$ . La force de contact n'a pas de composante tangentielle, la réaction du support se limite à  $\vec{N}_2$  qui sera perpendiculaire à la vitesse de glissement.

##### 3.1.2 Non glissement

Contrairement au cas précédent, la vitesse de glissement est nulle :  $\vec{v}_{g\ 2/1} = \vec{0}$ . Dans ce cas de figure, les lois de COULOMB ne nous renseignent pas complètement sur la force de contact.

En général, elle présente toujours une composante normale et une composante tangentielle. Mais la relation entre ces deux composantes devient une inégalité :

$$\text{Non glissement} \quad \vec{v}_{g\ 2/1} = \vec{0} \quad |T_2| \leq f_s N_2$$

où  $f_s$  est le coefficient de frottement statique de l'interaction  $\mathcal{S}_1 - \mathcal{S}_2$ . Le coefficient de frottement statique peut encore se définir par l'angle maximal  $\varphi_s$  que pourra faire le vecteur  $\vec{R}_2$  avec sa composante normale  $\vec{N}_2$ , voir le schéma de la figure ???. La force  $\vec{R}_2$  est contenue dans le cône d'angle  $\varphi_s$  et de sommet  $I_2$ . La situation de non glissement est incompatible avec l'absence de frottements puisque ce sont justement les frottements qui sont responsables du non glissement. La composante tangentielle  $\vec{T}_2$  dont on ne peut évaluer qu'un majorant est toujours non nulle à l'exception des situations exceptionnelles comme celles du contact d'un objet présentant une surface

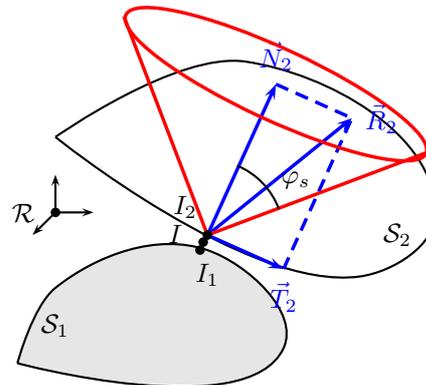


FIGURE 3 – Situation de non glissement

plane posé sur un support parfaitement horizontal. Dans ce dernier cas où l'objet est immobile par rapport au support pour respecter la condition de non glissement, la composante tangentielle est exceptionnellement nulle.

### 3.2 Équilibre sur un plan incliné

On considère un plan incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontal et un solide immobile sur ce plan incliné comme sur le schéma<sup>1</sup> de la figure ?? . Sur ce schéma, le solide n'a pas été représenté tout à fait au contact du support.

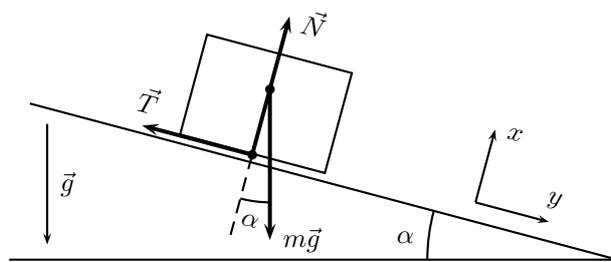


FIGURE 4 – Équilibre sur un plan incliné

1. Montrer que lorsque le solide de masse  $m$  est en équilibre sur le plan incliné, on a :

$$T = mg \sin \alpha \quad ; \quad N = mg \cos \alpha \quad ; \quad \tan \alpha < f_s$$

2. Que deviennent ces relations lorsque le plan support est horizontal ?

### 3.3 Glissement sur le plan incliné

On étudie toujours le solide de masse  $m$  de la figure ?? mais, maintenant, en mouvement de glissement a priori dans le sens de la descente.

3. Montrer que l'accélération  $\ddot{y}$  de ce solide est donnée par :

$$\ddot{y} = g (\sin \alpha - f_d \cos \alpha)$$

4. Que devient cette accélération lorsque le plan support est horizontal ?

1. La force de contact n'a pas été représentée en son point d'application, elle a été décalée pour faciliter la projection des vecteurs. Le point d'application de la force  $\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}$  est le point de concours de  $\vec{N}$ ,  $\vec{T}$  et  $m\vec{g}$ . En effet, si cela n'était pas le cas, la somme des moments des forces ne serait pas nulle et il y aurait un effet de rotation du solide ce qui ne se produit évidemment pas.

## 4 Expériences

### 4.1 Consignes

Lors de vos activités expérimentales en TP, vous devrez systématiquement :

- \* Élaborer un protocole et m'appeler pour que je le valide.
- \* Mettre en œuvre ce protocole et m'appeler pour que j'évalue vos activités.
- \* Communiquer les résultats dans le compte rendu sous forme de descriptions, de tableaux de mesures, de graphiques. . .
- \* Valider les résultats en comparant les développements théoriques et les résultats expérimentaux en ayant le souci permanent de présenter de façon rigoureuse les résultats avec leur incertitude.
- \* Remettre en fin de séance votre compte-rendu.

Vous serez évalué sur l'ensemble de ces exigences.

### 4.2 Initiative personnelle

On sera attentif au fait que certaines expériences peuvent être renouvelées un nombre de fois important car elles sont assez brèves. Dans ces conditions, pour la mesure d'un coefficient de frottement, il sera possible de mettre en œuvre un protocole de calcul d'incertitudes de type A comme cela est illustré dans le fichier *Python\_Type\_A*.

5. Vous avez toute liberté pour mesurer le coefficient de frottement de frottement statique  $f_s$  et le coefficient de frottement dynamique  $f_d$  correspondant à un contact entre le petit morceau de bois et la planche mise à votre disposition.

6. Si vous souhaitez utiliser un autre support ou un autre mobile pour effectuer des mesures de coefficients de frottement, n'hésitez pas.

### 4.3 Pour aller plus loin

#### 4.3.1 Contexte

Si vous en avez le temps, vous pouvez réaliser une mesure de coefficient de frottement statique  $f_s$  et celle d'un coefficient de frottement dynamique  $f_d$  en utilisant un pendule frottant sur le tableau blanc incliné comme vous pouvez le voir sur les photographies de la figure ??.



FIGURE 5 – Pendule frottant

### 4.3.2 Aspect théorique

On considère le mobile sur le schéma de la figure ???. On note toujours  $\alpha$  l'angle entre le plan incliné et l'horizontal comme précédemment. L'étude du coefficient statique passe par la détermination de l'angle limite  $\theta_s > 0$  pour lequel le glissement débute. L'angle  $\theta_s$  est mesuré par rapport à la ligne de plus grande pente du plan incliné. Si l'angle  $\theta_0$  est supérieur à l'angle limite, le mobile glisse. Le mobile est lâché depuis sa position initiale. On constate expérimentalement que le mobile glisse et s'arrête. Sur le schéma, on envisage le cas où le mobile a franchi la ligne de plus grande pente. Il s'arrête à la position  $\theta_1 > 0$  et repart éventuellement. Sur le schéma, les angles ne sont pas algébrisés. On note  $\ell = OA$  la longueur du pendule.

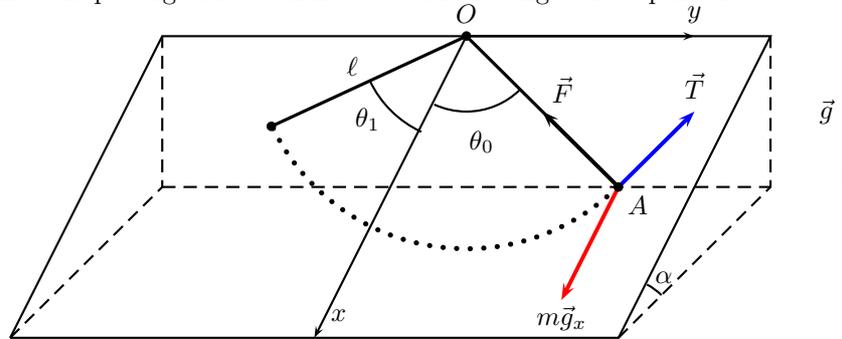


FIGURE 6 – Schéma de l'étude du pendule frottant sans représentation de  $\vec{N}$

Sur le schéma de la figure ??, seules les forces contenues dans le plan incliné ont été représentées, la composante normale au plan support,  $\vec{N}$  ne l'est pas. Comme le mobile ne quitte pas le plan incliné, son accélération perpendiculaire à ce plan est nulle. Les forces perpendiculaires se compensent, on a comme dans les cas précédents :

$$N = mg \cos \alpha$$

Dans le plan incliné, la force exercée par le fil  $\vec{F}$  du pendule est radiale. La composante du poids est orientée sur la ligne de plus grande pente, son expression est  $m\vec{g}_x = mg \sin \alpha \vec{e}_x$ . La composante tangentielle de la force de contact entre le mobile et le plan incliné est opposée à la vitesse, elle est donc orthoradiale.

Dans le cas où l'angle  $\theta_0$  n'est pas suffisant pour provoquer le glissement du mobile, il y a équilibre. La condition d'équilibre conduit à écrire que la somme des forces est nulle - nous ne prenons en compte que les forces contenues dans le plan incliné -. La traduction de cet équilibre n'est pas la plus efficace pour progresser car la force  $\vec{F}$  est inconnue. On préfère utiliser le théorème du moment cinétique en  $O$  puisqu'alors le moment de la force  $\vec{F}$  est nul. L'équilibre traduit par la somme des moments des forces amène à écrire que le moment de  $m\vec{g}_x$  compense le moment de  $\vec{T}$ . En utilisant la notion de bras de levier, on obtient facilement :  $mg \sin \alpha \ell \sin \theta_s = T \ell$ . À la limite du glissement, nous pouvons écrire que  $T = f_s N = f_s mg \cos \alpha$ . On en déduit que :

$$f_s = \tan \alpha \sin \theta_s \quad (\text{non glissement})$$

Pour l'étude du coefficient de frottement dynamique, il est préférable de réaliser une approche énergétique du problème.

7. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique entre les positions correspondant à  $\theta_0$  et  $\theta_1$ , justifier le fait que la variation d'énergie potentielle de pesanteur correspond au travail  $W(\vec{T})$  de la composante tangentielle  $\vec{T}$  de la force de contact sachant que l'on fait l'étude entre les positions  $\theta_0$  et  $\theta_1$  qui sont les deux angles extrêmes des positions de la masse.

8. Justifier le fait que :

$$W_{\theta_0 \rightarrow \theta_1}(\vec{T}) = -T \ell (\theta_0 + \theta_1)$$

9. Montrer que la variation d'énergie potentielle de pesanteur, entre les positions repérées par  $\theta_0$  et  $\theta_1$  est donnée par :

$$\Delta E_{pot} = -mgl(\cos \theta_1 - \cos \theta_0) \sin \alpha$$

10. En déduire que l'on a :

$$f_d = \tan \alpha \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_0}{\theta_0 + \theta_1}$$

### 4.3.3 Mesures

11. À vous de jouer !