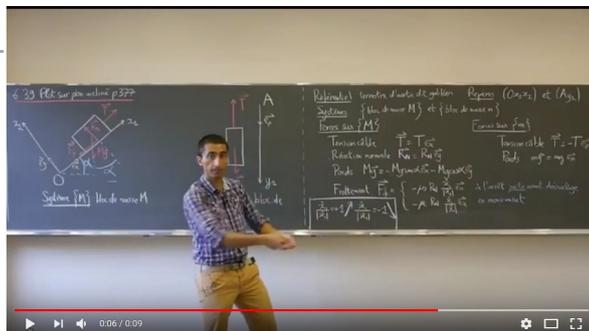


Mise en situation :

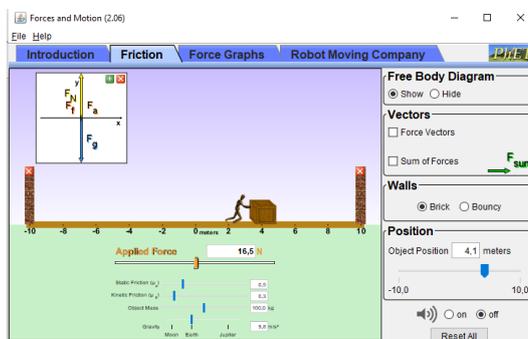
Qui n'a pas un jour été confronté à l'expérience de pousser un meuble et de se rendre compte qu'une fois qu'il a commencé à glisser, c'est plus facile...  
(extrait de « Exercices mécaniques EPFL »).



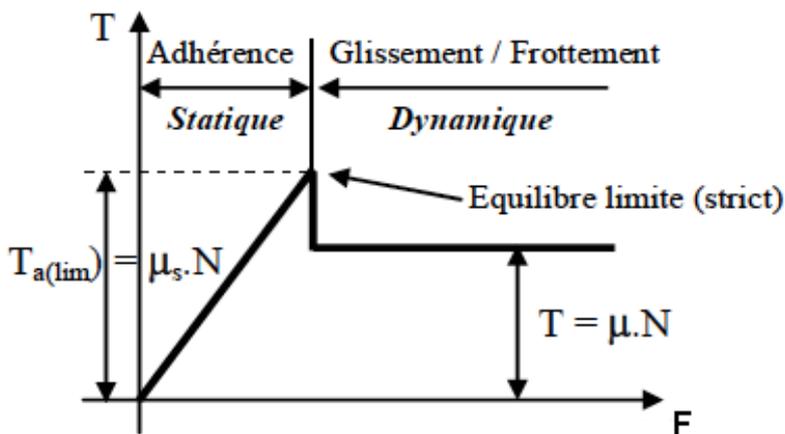
Mise en évidence par l'expérience :



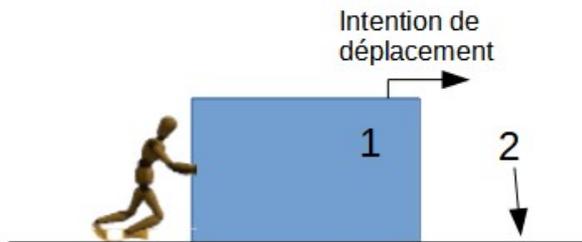
Animation à télécharger



Concept adhérence / glissement : « Loi de Coulomb »



Bilan des actions mécaniques sur la pièce 1 :



- $\vec{F}$  est la force appliquée par l'homme sur la caisse ;
- $\vec{N}$  est la réaction Normale du sol sur la caisse ;
- $\vec{T}$  est la réaction Tangentielle du sol sur la caisse (elle tend à s'opposer au déplacement) ;
- $\vec{P}$  est le poids de la caisse (orienté vers le bas et peu visible sur l'image).

## Mots clés :

---

Adhérence → Les deux surfaces en contact tendent à glisser l'une par rapport à l'autre (sans déplacement).

Frottement → les deux surfaces en contact glissent l'une par rapport à l'autre.

## Les formules

---

Deux paramètres permettent de caractériser l'**adhérence** et le **glissement** et son fonction de la **paire** de matériaux en contact (exemple d'une voiture : pneu / enrobé) :

- Coefficient de frottement statique :  $\mu_s$  (on est donc à l'adhérence)
- Coefficient de frottement cinématique :  $\mu$  (on est donc en glissement)

Pour la plupart des **paires** de matériaux,  $\mu_s > \mu$  mais pour simplifier les calculs, on les prends en général égaux.

*Moyen mnémotechnique : le freinage ABS sur les véhicules permet de rester toujours à l'adhérence. En cas de glissement, le conducteur perd le contrôle du véhicule et en théorie parcourrait une distance plus grande pour s'arrêter.*

### A l'adhérence :

Formules	Traductions
$T = F$	A l' <b>adhérence</b> l'effort tangentiel T est proportionnel à F
$T = \mu_s \cdot N$	La <u>valeur maximale</u> que peut prendre T (avant le décrochage et donc le glissement) est égale à $\mu_s \cdot N$ Si F dépasse $\mu_s \cdot N$ , l'objet sera mis en mouvement car F sera supérieur à T (principe fondamental de la dynamique) $\vec{F} + \vec{T} = m \cdot \vec{a}_G$ et après projection $F - T = m \cdot a_G$

### Au glissement :

Formules	Traductions
$T = \mu \cdot N$	Après le décrochage (donc en phase de glissement), T vaut $\mu_c \cdot N$

## Quelques coefficients

---

Paire de matériaux	Adhérence ( $\mu_s$ )		Frottement ( $\mu$ )	
	Sec	Lubrifié	Sec	Lubrifié
Acier / acier	0.18	0.12	0.15	0.09
Acier / fonte	0.19	0.1	0.16	0.08 à 0.04
Téflon / acier	0.04		0.04	
Métal / glace			0.02	
Fonte / Caoutchouc	0.8	0.2	0.3	0.1
Pneu voiture / route	0.8		0.6	

Source : wikipédia

# Utilisation du cône de frottement

[Animation à télécharger](#)

Le cône de frottement est un outil graphique très utilisé pour connaître la situation (adhérence ou frottement) dans laquelle on se trouve.

Le cône de frottement est tracé en dessinant un cône dont l'angle avec la normale au plan de contact est  $\Phi$ .

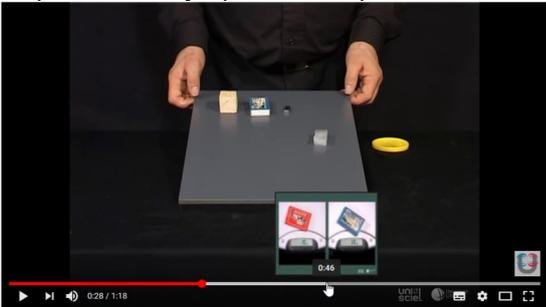
Cet angle est déterminé à partir du coefficient de frottement statique :  $\mu_s$

à l'aide de la relation suivante :  $\mu_s = \tan \phi$

$$\Rightarrow \phi = \tan^{-1} \mu_s$$

Ce cône ainsi formé est immuable (ne peut donc être modifié) car il est fonction de la paire de matériaux en contact.

Le poids de l'objet posé ainsi que sa surface en contact n'ont aucune incidence (cf. expérience ci-après).

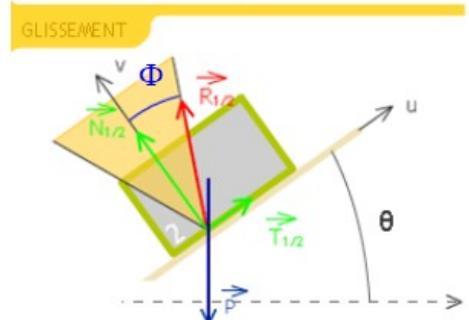
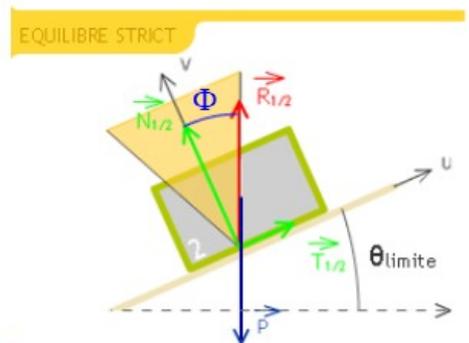
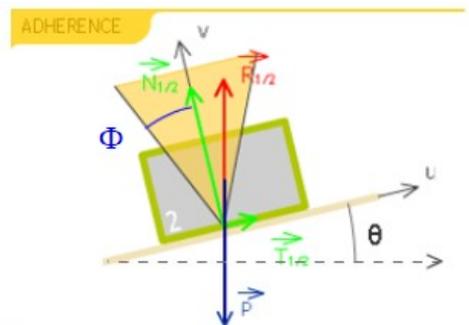
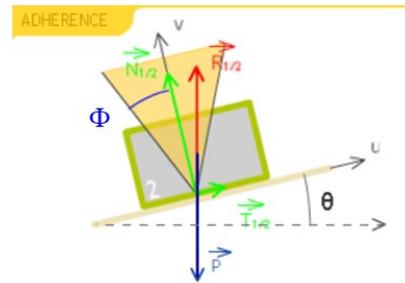


Commentaires sur l'illustration ci-contre :

**A l'adhérence** : la réaction du support  $\vec{R}_{1/2}$  est dans le cône donc il y a adhérence car l'effort tangentiel  $\vec{T}_{1/2}$  peut aisément compenser la composante du poids selon  $\vec{u}$

**Équilibre strict** : la réaction du support  $\vec{R}_{1/2}$  est sur la limite du cône, il y a équilibre strict car l'effort tangentiel  $\vec{T}_{1/2}$  peut compenser la composante du poids selon  $\vec{u}$  mais atteint sa limite définie par  $T = \mu_s \cdot N$

**Glissement** : la réaction du support  $\vec{R}_{1/2}$  est sur la limite du cône car elle ne peut pas en sortir, l'effort tangentiel  $\vec{T}_{1/2}$  ne peut pas compenser la composante du poids selon  $\vec{u}$  ! l'objet est soumis à une accélération, donc glisse.



## Méthode pour obtenir le coefficient de frottement statique ( $\mu_s$ )

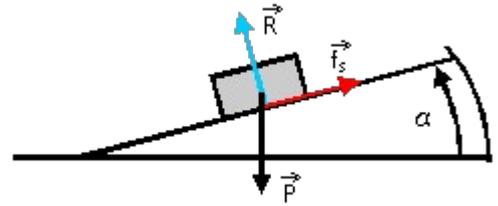
Il est important de rappeler que ce coefficient caractérise une paire de matériaux en contact et ce, pendant la phase d'adhérence.

**La première méthode** consiste à placer l'objet fait d'un matériau 1 (ici le parallélépipède en gris) sur un plan incliné fait d'un matériau 2 (plan incliné noir) et d'augmenter progressivement l'angle  $\alpha$ .

Dès que l'objet se met à glisser, on relève l'angle  $\alpha$  juste avant que l'objet ne se mette à glisser.

La tangente de cet angle ainsi relevée donne le coefficient  $\mu_s$ .

Des systèmes automatisés tels que celui montré dans la vidéo suivante permettent de le faire avec précision mais il est très simple de le faire à la main à l'aide d'un rapporteur par exemple.



La **deuxième méthode** requière un dynamomètre tel que présenté dans la vidéo suivante.

Je ne fournis pas la méthode, je vous laisse le soin de déterminer le protocole par vous-même.

Travail demandé :

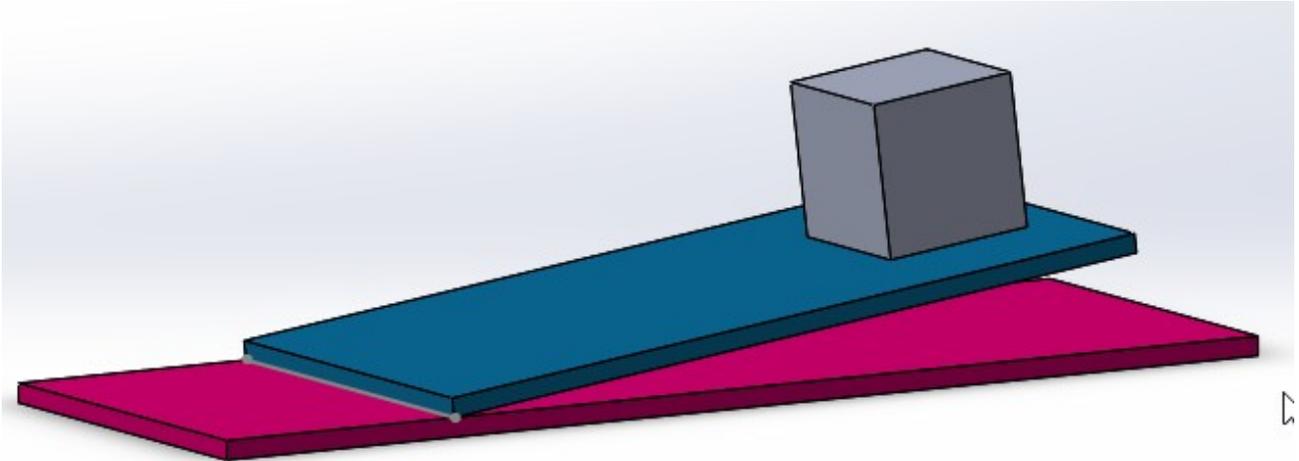
- Citer les matériaux en contact ?
- Indiquer la masse de l'objet ?
- Indiquer la valeur du coefficient  $\mu_s$  ?
- Citer les formules utilisées.



## La simulation

### SolidWorks :

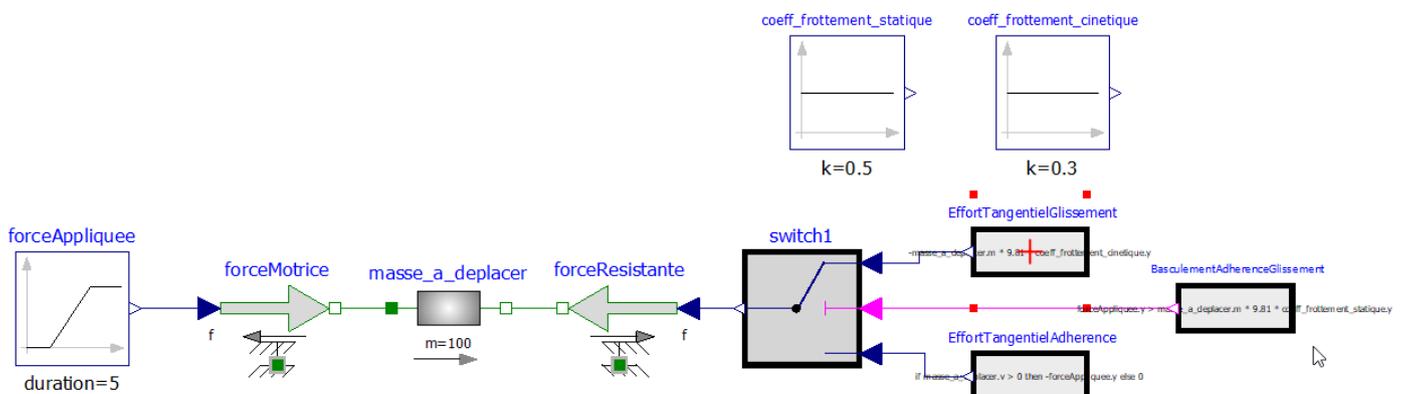
Le modèle suivant permet de mettre en œuvre les effets de la loi de Coulomb à partir d'une étude de mouvement.



[Télécharger le fichier SolidWorks](#)

### OpenModelica :

Le modèle suivant propose une simulation de frottement selon un plan horizontal (typiquement l'expérience de la vidéo ci-avant de l'EPFL). Il n'est donc pas valable pour un plan incliné !



[Télécharger le fichier OpenModelica](#)

### **Détails du contenu des rectangles :**

EffortTangentielGlissement :  $-masse\_a\_deplacer.m * 9.81 * coeff\_frottement\_cinetique.y$

BasculementAdherenceGlissement :  
 $forceAppliquee.y > masse\_a\_deplacer.m * 9.81 * coeff\_frottement\_statique.y$

EffortTangentielAdherence :  $if\ masse\_a\_deplacer.v > 0\ then\ -forceAppliquee.y\ else\ 0$

## La démarche analytique

Dans de nombreux exercices, la « difficulté » est de déterminer l'effort tangentiel à l'adhérence et/ou au glissement.

La démarche de réflexion est la suivante :

1. On cherche  $T$  (à l'adhérence et/ou au frottement)
  - les deux formules de départ sont les suivantes :  $T = \mu_s \cdot N$      $T = \mu_c \cdot N$
2. On doit donc déterminer la réaction normale  $N$  du support sur la pièce isolée. Cette composante normale est fonction du poids et s'obtient à partir de Théorème de la résultante statique :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

### Exercice 1 :

**Déterminer** la force  $F_1$  à appliquer pour vaincre l'adhérence (on est sur terre donc  $g=9,81\text{m/s}^2$ )

*Données de l'exercice :*

- pièce 1 ( $m_1=10\text{kg}$  en fonte) ;
- pièce 2 (acier) ;
- surface de contact des deux pièces non lubrifiée.

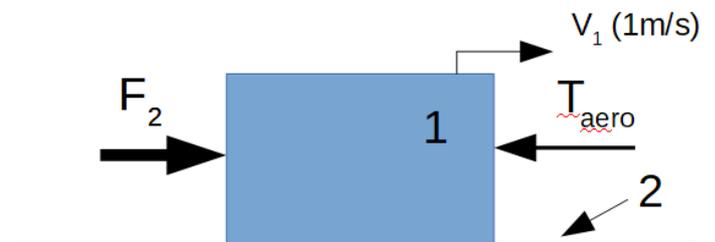


### Exercice 2 :

**Déterminer** la force  $F_2$  pour maintenir l'objet 2 à une vitesse de 1 m/s.

*Données de l'exercice :*

- identique à l'exercice 1 sauf  $m_1=50\text{ kg}$  ;
- traînée aérodynamique  $T_{aero}= 8\text{ N}$  à 1 m/s.

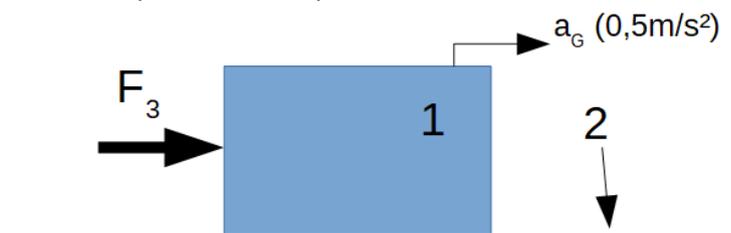


### Exercice 3 :

En appliquant le théorème de la résultante dynamique, **déterminer** la force  $F_3$  à appliquer pour assurer une fois l'adhérence rompue, une accélération de 0,5 m/s ainsi que la distance parcourue en 5 secondes.

*Données de l'exercice :*

- identique à l'exercice 1 sauf  $m_1 = 40\text{kg}$  .

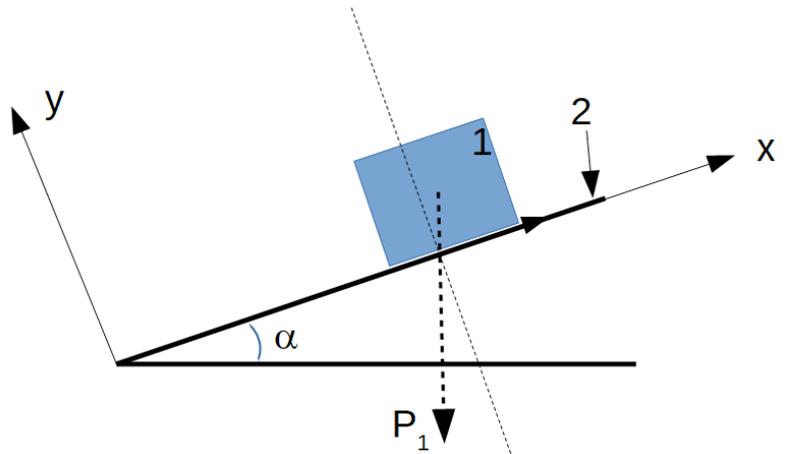


### Exercice 4 :

**Déterminer** la masse maximale à ne pas dépasser pour conserver l'adhérence.

Données de l'exercice :

- pièce 1 ( $m_1=10\text{kg}$  en fonte) ;
- pièce 2 (caoutchouc) ;
- surface de contact des deux pièces non lubrifiée.



### Exercice 5 :

1. **Déterminer** l'angle  $\alpha$  à ne pas dépasser pour être certain de conserver l'adhérence.
2. **Déterminer** la valeur de l'effort tangentiel pour un angle  $\alpha$  de  $40^\circ$ .
3. Pour le même angle de  $40^\circ$ , **déterminer** l'accélération à laquelle est soumis l'objet 1, la vitesse atteinte au bout de 10 secondes ainsi que la distance parcourue.

Données de l'exercice :

- identiques exercice 4 ;

