

## M2. Dynamique

La dynamique est une discipline de la mécanique classique qui étudie les corps en mouvement sous l'influence des forces qui leurs sont appliquées.

### A- **Le modèle du point matériel**

Afin de simplifier l'étude mécanique des systèmes en évolution, nous assimilerons les objets physiques à des points ayant une masse (ce qui n'a pas de réalité physique). Cela suppose des objets rigides et ne peut concerner que l'étude du mouvement translation\* des objets.

Exemple : pour étudier les mouvements de révolution de la Terre autour du Soleil, on peut assimiler celle-ci à un point de masse  $M_{\text{Terre}}$  (mouvement de translation). En revanche, ce n'est pas possible si on veut étudier la rotation propre de la Terre sur elle-même (mouvement de rotation)

Mouvement de translation : se dit du mouvement d'un objet dont l'orientation est conservée. Dans le cas contraire, on parle de mouvement de rotation.

### 1. La masse

La masse est une grandeur fondamentale du système international. Sa dimension se note [M]. Son unité est le kg

#### MASSE VOLUMIQUE

Soit un corps de masse  $m$  et de volume  $V$ . On appelle masse volumique la grandeur :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

#### Remarque 1 :

- la masse volumique peut aussi être notée  $\mu$ .
- L'équation aux dimensions de  $\rho$  est ...
- L'unité S.I. de masse volumique est le ...

#### Remarque 2 :

La masse volumique de l'eau vaut  $1 \text{ kg.L}^{-1}$ , soit  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Exprimer  $\rho_{\text{eau}}$  en  $\text{g.cm}^{-3}$  :

## DENSITE

On définit la densité d'un solide ou d'un liquide comme le rapport de la masse  $m_c$  d'un volume  $V$  de ce corps à la masse  $m_e$  du même volume  $V$  d'eau :

$$d = \frac{m_c}{m_e} = \frac{\frac{m_c}{V}}{\frac{m_e}{V}} \quad \text{soit}$$

$$d = \frac{\rho_c}{\rho_e}$$

La densité est le rapport de la masse volumique du corps sur la masse volumique de l'eau ; c'est un nombre sans dimension.

Pour un gaz, la densité est calculée par rapport à la masse volumique de l'air dans les conditions normales.

## 2. La notion de force

Une force est toute action susceptible de déformer un corps, de le mettre en mouvement ou de modifier son mouvement.

La force est définie par 4 caractéristiques :

- ...
- ...
- ...
- ...

Sur un schéma, elle peut être représentée par un vecteur pointé  $\vec{F}$ . Cela suppose de choisir un échelle de représentation.

## 3. Le système mécanique

En préambule d'une étude dynamique, il est essentiel de bien définir le système étudié, à savoir l'objet (ou l'ensemble d'objets) sur lequel se porte notre étude.

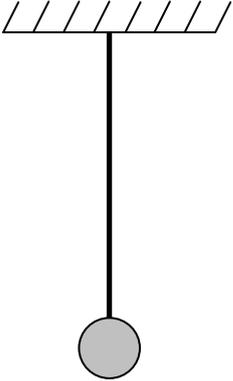
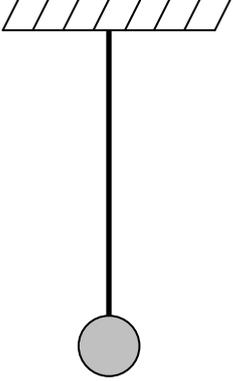
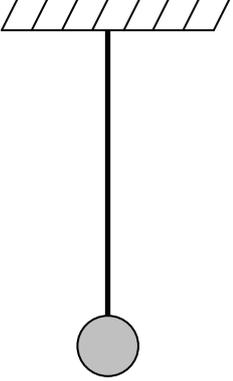
A partir de là, nous pourrons nous intéresser à tout ce qui est hors du système, et notamment aux forces extérieures

Du choix du système dépendra une étude plus ou moins simple de celui-ci.

Exemple :

Soit le dispositif expérimental constitué d'un objet de masse  $m$  suspendu à un fil accroché au plafond.

Déterminer qualitativement les forces extérieures qui s'exercent sur les trois systèmes suivants :

Système : {objet}	Système : {fil}	Système : {fil + objet}
		

## B- Les lois de Newton

### 1. La 1<sup>ère</sup> loi de Newton : principe d'inertie

La première loi de Newton a permis de définir les référentiels galiléens. Nous l'appliquerons pour étudier l'équilibre des corps.

Dans un référentiel galiléen, en l'absence de force (ou si les forces appliquées se compensent), un point matériel est soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme.

**1<sup>ère</sup> loi de Newton** dans un référentiel galiléen :

Mouvement rectiligne uniforme  $\Leftrightarrow$  ...

#### **REFERENTIEL GALILEEN**

En réalité, le référentiel Galiléen absolument parfait n'existe pas. Toutefois, selon les cas étudiés, certains référentiels seront considérés comme galiléens.

Tous les référentiels en mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un référentiel Galiléen sont eux-mêmes Galiléens.

Quelques référentiels remarquables :

- **Le référentiel de Copernic** (ou référentiel héliocentrique) : il est lié à un repère centré sur le Soleil, et orienté vers 3 étoiles éloignées considérées comme fixes.
- **Le référentiel géocentrique** : il est lié à un repère centré sur la Terre, et toujours orienté vers 3 étoiles lointaines. Il peut être considéré galiléen pour des expériences de durée courte par rapport à l'année.
- **Le référentiel terrestre** (ou référentiel du laboratoire) : il est lié à un repère situé à la surface de la Terre. Il peut être considéré galiléen pour des expériences de durée courte par rapport à la journée.

**2. La 2<sup>ème</sup> loi de Newton : principe fondamental de la dynamique**

La deuxième loi de Newton met en relation les forces et leurs effets sur le mouvement.

Soit  $m$  la masse du point matériel d'accélération  $\vec{a}$ , soumis à des forces extérieures :

2<sup>ème</sup> loi de Newton dans un référentiel galiléen :

...

**3. La 3<sup>ème</sup> loi de Newton : principe de l'action et de la réaction**

Lorsqu'un objet A exerce une force sur un corps B, le corps B exerce une force égale et opposée sur l'objet A :

3<sup>ème</sup> loi de Newton dans un référentiel galiléen :

...

## C- Quelques forces usuelles

### BILAN DES FORCES

Lors de l'étude d'un système mécanique, il faut systématiquement recenser toutes les forces extérieures qui s'appliquent sur le système.

Pour cela, il est nécessaire :

- d'identifier clairement le système étudié,
- de déterminer les forces à distance (poids, force magnétique, force électrostatique),
- de déterminer les forces de contact (une force à chaque point de contact entre le système et les objets extérieurs).

### 1. Interaction gravitationnelle et poids

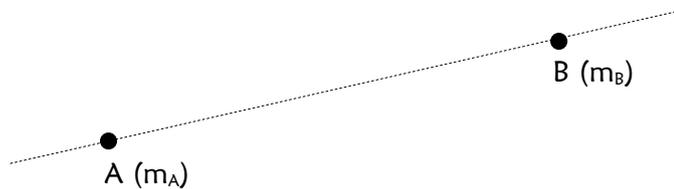
#### INTERACTION GRAVITATIONNELLE

*Isaac Newton :*

« Dans l'Univers tout corps attire n'importe quel autre corps avec une force proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare »

Deux corps A et B de masses  $m_A$  et  $m_B$  exercent l'un sur l'autre une force attractive gravitationnelle :

$$\vec{F}_{gA/B} = -\vec{F}_{gB/A}$$



Force d'interaction gravitationnelle :

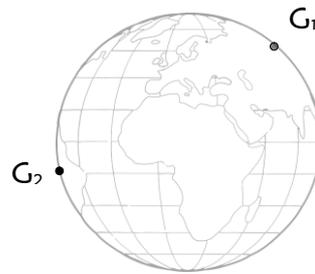
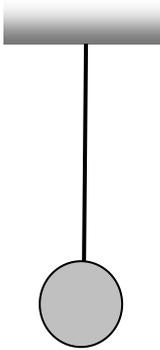
où

- F en Newton (N)
- $m_a$  et  $m_b$  en kilogramme (kg) ;
- d est la distance entre les centres d'inertie des corps, en mètre (m) ;
- G est la constante gravitationnelle :  $G = 6,67 \times 10^{-11} N.kg^{-2}.m^2$

### POIDS D'UN CORPS

Dans le langage courant, on confond souvent poids  $P$  et masse  $m$ . Or il s'agit bien de 2 grandeurs différentes !

Le poids d'un corps de masse  $m$  est la force de tension exercée sur un fil auquel cet objet immobile est accroché. Il correspond approximativement à la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur ce corps. Cette force est verticale, dirigée vers le bas, et appliquée au centre d'inertie du corps.



#### Le poids d'un corps :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}$$

où

- $\vec{g}$  est l'accélération (ou intensité) de la pesanteur en N/kg ou m/s<sup>2</sup> (Vertical vers le bas) (à ne pas confondre avec la constante gravitationnelle  $G$ )
- $m$  : masse du corps en kg

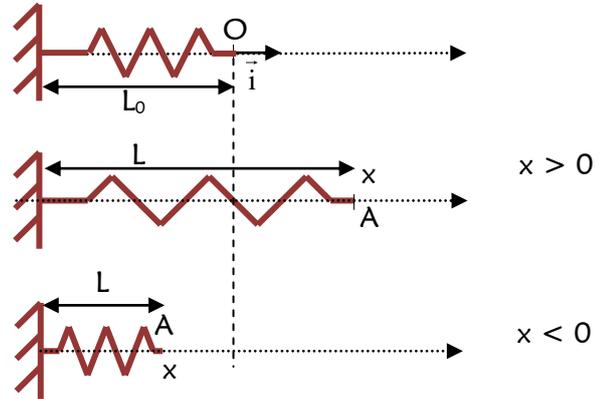
**Application :** calcul de  $g$  à la surface de la Terre. (données :  $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$  kg et  $R_T = 6380$  km).

## 2. Force de rappel élastique

L'élasticité est la propriété qu'ont certains matériaux de reprendre leur forme initiale après déformation. Dans le cas de petites déformations, on constate souvent que celle-ci est proportionnelle à la force qui en est la cause.

Soit  $L_0$  la longueur d'un ressort au repos. Celui-ci, après allongement (ou raccourcissement), a une longueur  $L$ .

Soit  $\Delta L$ , valeur algébrique de l'allongement du ressort :



On représente la force de rappel élastique  $\vec{F}_K$  exercée par le ressort en A.

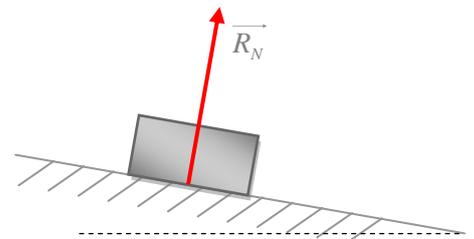
### Force de rappel du ressort :

où

- $k$  est appelé constante de raideur du ressort. Il s'exprime en  $N.m^{-1}$ .
- $x$  correspond à l'allongement algébrique ( $L-L_0$ )

## 3. Réaction normale du support

Si on considère un corps de masse  $m$  posé sur un support, ce dernier exerce une force de contact sur le corps, notée  $\vec{R}_N$ , et appelée réaction normale du support. Celle-ci est perpendiculaire à la surface de contact, vers le haut. Son point d'application est centré sur la surface de contact.



## 4. Force de frottement solide

Le frottement solide intervient entre des surfaces rugueuses en contact. Les forces de frottement s'opposent toujours au déplacement relatif d'une surface par rapport à l'autre. Il y a deux types de frottement solide : statique et cinétique.

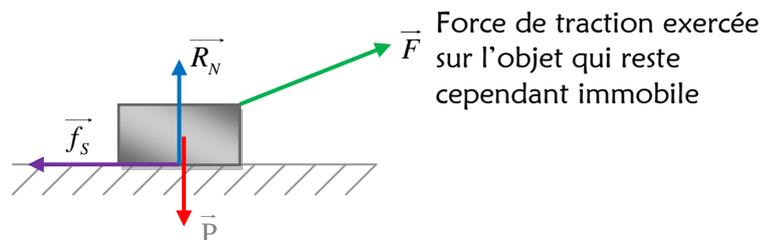
### **FORCE DE FROTTEMENT STATIQUE**

La force de frottement statique,  $\vec{f}_s$ , est celle qui maintient un corps au repos, même en présence de forces extérieures.

#### **Exemple :**

Une armoire que l'on tente vainement de tirer est maintenue au repos à cause des forces de frottement statique.

La force de frottement statique est parallèle à la surface du corps et possède juste la bonne valeur pour empêcher le corps de glisser.



Comme l'objet reste immobile, on a la 1<sup>ère</sup> loi de Newton :

Par conséquent, la valeur de la force  $\vec{f}_s$  augmente lorsque la force appliquée augmente ; elle atteint une valeur maximale  $\vec{f}_{s,Max}$  au-delà de laquelle le solide est mis en mouvement.

#### **Force de frottement statique :**

$$f_s \leq f_{s,Max} \quad \text{avec} \quad f_{s,Max} = \mu_s \cdot R_N$$

où

- $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique (sans dimension)
- $f_s$  est tangente à la surface de contact, opposée à l'action.

## FORCE DE FROTTEMENT CINÉTIQUE

La force de frottement cinétique,  $\vec{f}_C$ , est celle qui s'oppose au mouvement lors du déplacement d'un corps sur une surface rugueuse. Elle est parallèle à la surface du corps et orientée dans le sens opposé au déplacement.

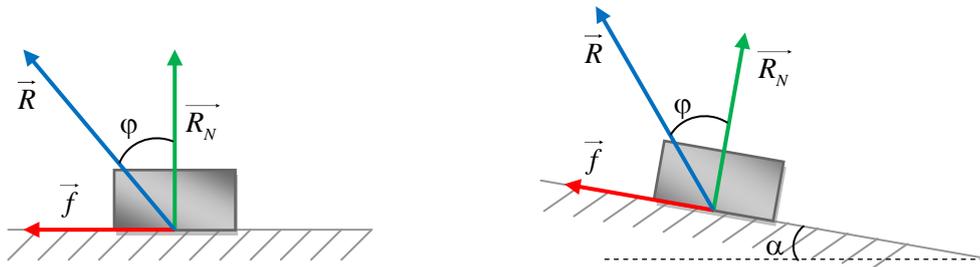
### Force de frottement cinétique :

$$f_C = \mu_C \cdot R_N$$

- $\mu_C$  est le coefficient de frottement cinétique (sans dimension)

### Remarques :

- dans certains exercices, on parle de la réaction globale du support  $\vec{R}$  qui est composée de  $\vec{R}_N$  et de  $\vec{f}$  (parfois notée  $\vec{R}_T$ ) :  $\vec{R} = \vec{R}_N + \vec{f}$ .
- on exprime parfois les coefficients de frottement sous la forme :  $\mu = \frac{f}{R_N} = \tan \varphi$ . Dans cette expression,  $\varphi$  est l'angle entre  $\vec{R}_N$  et  $\vec{R}$ . Cet angle est indépendant de l'inclinaison du support.



## 5. Force de frottement visqueux (ou fluide)

Cette force permet de rendre compte des interactions microscopiques entre un solide et les particules du fluide qui l'entoure. Pour un corps en translation à faible vitesse, on peut utiliser l'approximation suivante :

### Force de frottement fluide :

$$\vec{f} = -h \cdot \vec{v}$$

- $h$  est un coefficient de frottement visqueux en  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- $\vec{v}$  est la vitesse en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

## 6. Tension d'un fil

On appelle fil idéal un fil souple de masse négligeable (devant la masse des autres corps en présence).

Dès lors, la tension  $\vec{T}$  qui s'exerce sur le fil est identique en tout point du fil à chaque instant.

## 7. La poulie

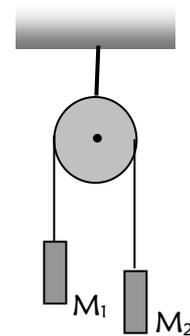
Une poulie est considérée comme idéale s'il n'y a pas de frottement et que sa masse est négligeable (inertie négligeable).

Dès lors, un fil enroulé dessus verra sa tension conservée. Simplement, la poulie aura pour effet de modifier la direction de cette tension.

### Exemple :

- $\vec{T}_1$  représente la force exercée par la masse  $M_1$  sur le fil
- $\vec{T}_1'$  représente la force exercée par le fil sur la masse  $M_2$ .

On a :



## 8. Poussée d'Archimède

Cette force  $\vec{F}_A$  (ou parfois  $\vec{\pi}_A$ ) s'exerce pour des corps immergés dans un fluide.

### Poussée d'Archimède :

- point d'application : centre du volume du corps immergé  $V_{im}$
- direction : verticale
- sens : vers le haut
- valeur : poids qu'aurait un volume  $V_{im}$  de fluide :  $F_A = \rho_{fluide} \times V_{im} \times g$

**Remarque :** cette force existe pour les corps dans l'air, mais elle est en général négligeable.

