

### III. Forces agissant sur un point matériel

#### Introduction

L'analyse dynamique d'un système repose sur l'identification des forces qui s'exercent sur un point matériel. Celles-ci traduisent les interactions avec l'environnement et conditionnent la validité des équations du mouvement. On distingue deux types de forces :

- Les *forces d'inertie*, liées au référentiel ;
- Les *forces réelles*, incluant les forces de contact et à distance.

Ce grain se concentre sur les forces réelles et leurs formes les plus courantes.

#### III.1. Forces de contact

Les forces de contact résultent d'un contact direct entre un objet et une surface. Elles s'exercent à l'interface et traduisent la réaction du support face à la présence ou au mouvement de l'objet.

##### III.1.1. Réaction normale $\vec{R}_N$

La réaction normale est la composante perpendiculaire à la surface de contact. Elle s'oppose à la pénétration de l'objet dans le support et n'existe qu'en cas de contact physique.

##### *Caractéristiques vectorielles :*

- **Direction** : perpendiculaire à la surface de contact (selon la *normale* à la surface).
- **Sens** : du *support vers l'objet* (opposée à la direction potentielle de la pénétration).
- **Point d'application** : au niveau de la *zone de contact*.
- **Unité (SI)** : Newton (N).

##### *Cas particuliers et expressions analytiques*

##### ➤ **Surface horizontale sans autres interactions :**

Si un objet de masse  $m$  est posé au repos sur une surface plane et horizontale, la réaction normale compense exactement le poids :

$$R_N = m \cdot g$$

où :

- $g \approx 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  est l'accélération de la pesanteur.

➤ **Surface inclinée d'un angle  $\theta$**  (plan incliné) :

Si l'objet repose sur une pente inclinée d'un angle  $\theta$ , la réaction normale devient la composante verticale du poids perpendiculaire à la surface :

$$R_N = m \cdot g \cdot \cos(\theta)$$

- Plus l'angle  $\theta$  est grand, plus  $\cos(\theta)$  diminue, donc plus la réaction normale est faible.

Comme illustre sur la Figure 1, une boîte posée sur une table horizontale subit une réaction normale verticale, orientée vers le haut (Figure 1 (a)).

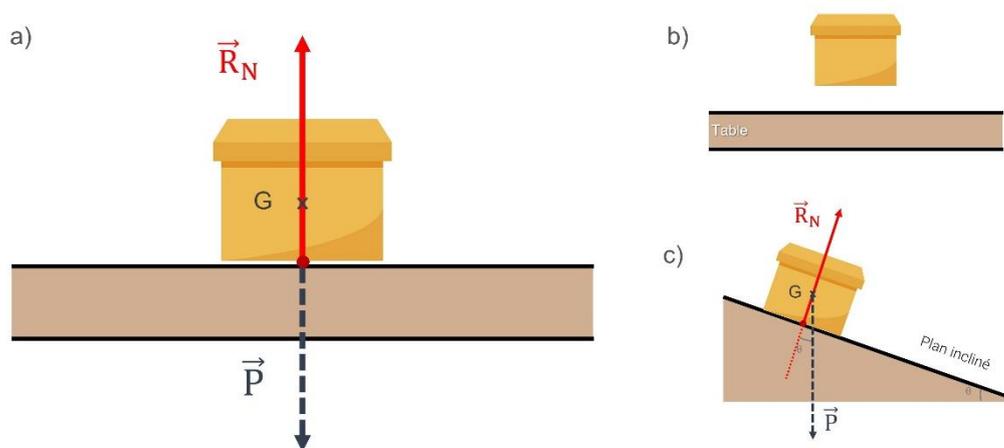


Figure 1 : Schématisation de la réaction normale  $\vec{R}_N$ .

Cette force équilibre exactement le poids, permettant l'état d'équilibre statique. Lorsqu'il n'y a aucun contact (Figure 1 (b)), aucune réaction normale ne s'exerce. Sur un plan incliné, la réaction normale est inférieure à celle observée sur un plan horizontal (Figure 1 (c)), car elle ne compense qu'une partie du poids (la composante perpendiculaire au plan).

### III.1.2. Frottement solide

Le frottement solide est une force de contact tangente à la surface, qui s'oppose au glissement entre deux objets en contact. Contrairement à la réaction normale, perpendiculaire à la surface, le frottement agit dans le plan de contact.

On distingue deux régimes :

- *Frottement statique* : empêche le début du mouvement ;
- *Frottement cinétique* : s'oppose au mouvement une fois amorcé.

### A. Frottement statique

Le frottement statique intervient lorsque l'objet est *au repos* sur une surface, mais qu'une force extérieure tend à le mettre en mouvement.

- Ce frottement s'ajuste automatiquement pour s'opposer à la force appliquée, *jusqu'à une valeur maximale* au-delà de laquelle le mouvement débute.
- Sa valeur maximale admissible est donnée par la relation :

$$f_{\text{statique}}^{\text{max}} = \mu_s R_N$$

où :

- $f_{\text{statique}}^{\text{max}}$  est la valeur limite du frottement statique (en newtons, N),
- $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique (sans unité,  $\mu_s > 0$ ),
- $R_N$  est la réaction normale (en N),
- Tant que la force appliquée  $F$  reste inférieure à  $f_{\text{statique}}^{\text{max}}$ , l'objet reste immobile.

### B. Frottement cinétique (ou dynamique)

Une fois le mouvement amorcé ( $F > f_{\text{statique}}^{\text{max}}$ ), le frottement passe au régime cinétique, également appelé frottement de glissement. Ce dernier :

- A une valeur constante pour une paire donnée de matériaux,
- Est inférieur ou égal à la valeur maximale du frottement statique :

$$\vec{f}_{\text{cinétique}} = -\mu_c \cdot \vec{R}_N$$

où :

- $\mu_c$  est le coefficient de frottement cinétique.

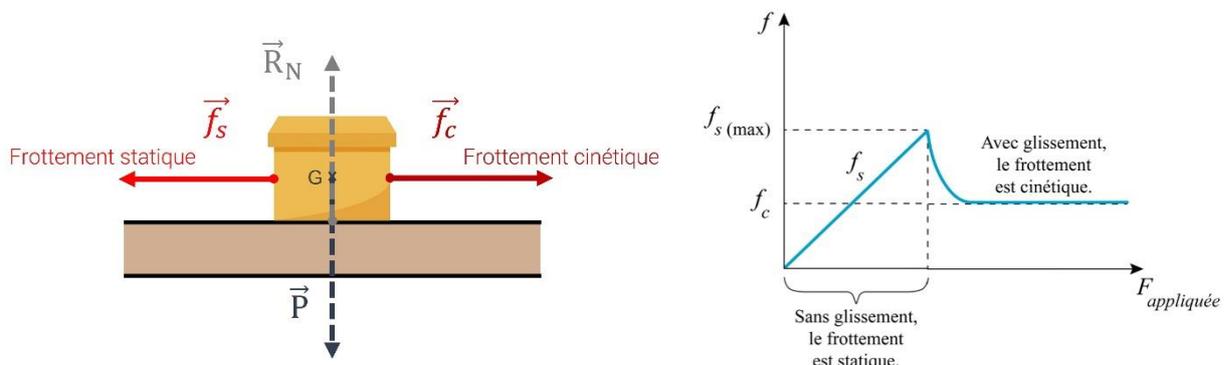


Figure 2 : Schématisation du frottement solide.

**Remarque**

En général,  $\mu_c < \mu_s$ , ce qui signifie qu'il est plus difficile de mettre un objet en mouvement que de le faire glisser une fois qu'il est lancé.

**Caractéristiques physiques**

- **Direction** : parallèle à la surface de contact,
- **Sens** : *opposé* à celui du mouvement,
- **Point d'application** : à la *zone de contact* entre l'objet et le support,
- **Unité (SI)** : Newton (N).

**III.1.3. Tension**

La tension est une force de contact transmise par un fil, une corde ou un câble reliant deux objets. On suppose le fil *inextensible* et *sans masse*, ce qui permet de négliger ses effets propres. Dans ces conditions, la tension est *uniforme* le long du fil et s'exerce à chaque extrémité en tirant dans la direction du fil.

**Caractéristiques de la force de tension**

- **Direction** : *selon l'axe du fil, c'est-à-dire colinéaire au lien.*
- **Sens** : dirigée *vers l'intérieur du fil* à chaque extrémité.
- **Point d'application** : au *point de fixation* de l'objet au fil.
- **Unité (SI)** : Newton (N)

**Exemple simple : objet suspendu au repos**

Considérons une boîte de masse  $m$  suspendue verticalement par une corde attachée à un point fixe (plafond). Si la boîte est *immobile*, deux forces s'appliquent sur elle :

1. Son **poide**  $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ , orienté vers le bas ;
2. La **tension**  $\vec{T}$ , exercée par la corde, orientée vers le haut.

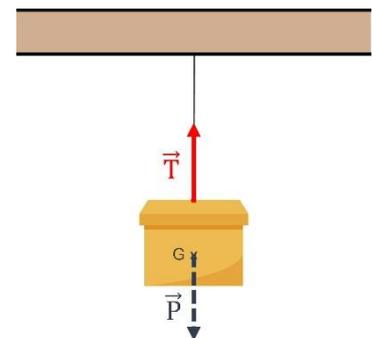


Figure 3 : Schématisation de la tension

Dans le cas d'un équilibre statique (accélération nulle), le principe fondamental de la dynamique donne :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{T} + \vec{P} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad T = m \cdot g$$

Ainsi, la tension dans la corde équilibre exactement le poids de la boîte.

### III.1.4. Force élastique (cas d'un ressort)

La force élastique est une force de rappel exercée par un objet déformé, comme un ressort. Elle tend à ramener le système à son état d'équilibre, que la déformation soit une extension ou une compression. Elle obéit à la *loi de Hooke*, qui établit une relation linéaire entre la force exercée et l'allongement, tant que la déformation reste dans le domaine élastique.

#### *Expression mathématique (loi de Hooke)*

La force élastique exercée par un ressort idéal est donnée par :

$$\vec{F}_{\text{élastique}} = -k \cdot x \cdot \vec{i}$$

ou, de façon plus générale :

$$\vec{F}_{\text{élastique}} = -k(\ell - \ell_0) \cdot \vec{u}$$

où :

- $k$  : constante de raideur du ressort (en newton par mètre,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ),
- $x = \ell - \ell_0$  : allongement du ressort, différence entre la longueur actuelle  $\ell$  et la longueur à vide (ou d'équilibre)  $\ell_0$ , en mètres (m),
- $\vec{u}$  : vecteur unitaire dirigé le long de l'axe du ressort (direction de la force),
- Le signe négatif indique que la force est opposée à la déformation : c'est une force de rappel.

#### *Interprétation physique*

- Si le ressort est à sa *longueur d'équilibre* ( $x = 0$ ), alors la force élastique est *nulle* (Figure 4 (a)).
- Si le ressort est *étiré* ( $x > 0$ ), la force élastique agit vers l'intérieur du ressort (tend à le *raccourcir*) (Figure 4 (b)).
- Si le ressort est *comprimé* ( $x < 0$ ), la force agit vers l'extérieur (tend à le *réallonger*) (Figure 4 (c)).

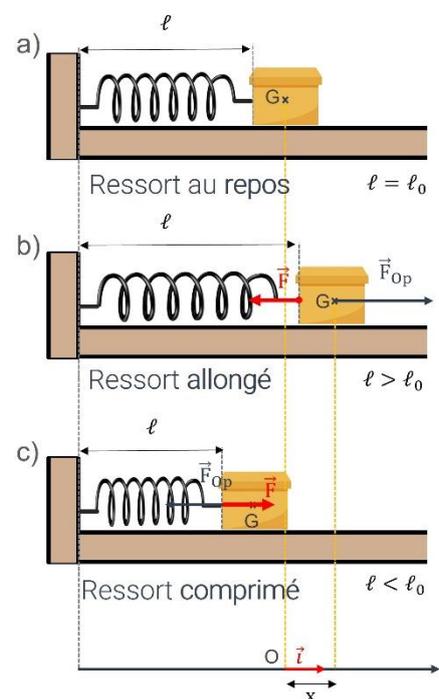


Figure 4 : Schématisation de la force élastique.

#### *Caractéristiques vectorielles de la force élastique*

- **Direction** : selon l'axe du ressort.
- **Sens** : opposé à la direction de la déformation.
- **Point d'application** : au point d'attache entre le ressort et l'objet qu'il influence.
- **Unité (SI)** : Newton (N).

### III.2. Forces à distance

Agissant sans contact, les forces à distance résultent de l'action d'un champ (gravitationnel, électrique ou magnétique) à travers l'espace.

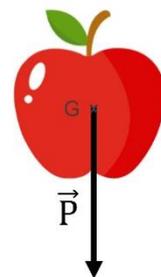
#### III.2.1. Poids

Le poids est la force gravitationnelle exercée par la Terre sur un corps, dirigée vers son centre. Il s'agit d'une force à distance, liée au champ de pesanteur terrestre, indépendante du contact avec le sol.

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

où :

- $\vec{P}$  : vecteur poids (en newtons, N),
- $m$  : masse du corps (en kilogrammes, kg),
- $\vec{g}$  : champ de pesanteur terrestre, vecteur dirigé vers le centre de la Terre, de norme  $g \approx 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

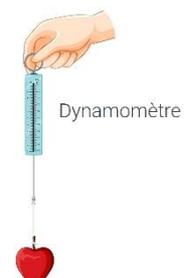


#### *Caractéristiques vectorielles du poids*

- **Direction** : verticale, orientée vers le bas (vers le centre de la Terre),
- **Sens** : vers le bas,
- **Point d'application** : au centre de gravité de l'objet considéré (souvent confondu avec son centre de masse dans les cas simples),
- **Unité (SI)** : newton (N).

#### *Mesure du poids*

Le poids se mesure à l'aide d'un *dynamomètre*, qui évalue l'intensité de la force par l'allongement d'un ressort, selon la *loi de Hooke*.



#### III.2.2. Force électrostatique

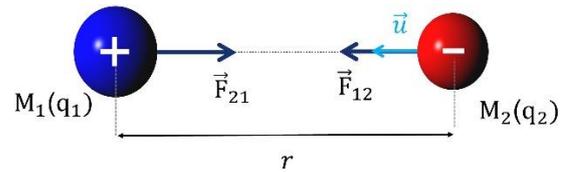
La force électrostatique est une interaction à distance entre deux charges électriques. Elle intervient dans de nombreux phénomènes, du niveau microscopique à macroscopique.

#### *Expression de la force électrostatique : loi de Coulomb*

Deux charges ponctuelles  $q_1$  et  $q_2$ , séparées par une distance  $r$ , exercent l'une sur l'autre une force proportionnelle à  $q_1 q_2$  et inversement proportionnelle à  $r^2$ .

La force est dirigée selon la droite reliant les deux charges, et son **sens** dépend du **signe** des charges. La force exercée par la charge  $q_2$  sur la charge  $q_1$  est donnée par :

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$$



où :

- $\vec{F}_{12}$  est la force exercée par  $q_2$  sur  $q_1$ ,
- $\vec{u}$  est le vecteur unitaire dirigé de  $q_2$  vers  $q_1$ ,
- $r$  est la distance séparant les deux charges,
- $\epsilon_0$  est la permittivité du vide, dont la valeur dans le Système International est :

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m (farads par mètre)}$$

### **Symétrie de l'interaction : troisième loi de Newton**

Selon le principe d'action-réaction (troisième loi de Newton), si la charge  $q_2$  exerce une force  $\vec{F}_{12}$  sur la charge  $q_1$ , alors  $q_1$  exerce simultanément sur  $q_2$  une force :

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Les deux forces sont donc de même intensité, de même direction, mais de sens opposé, ce qui traduit une symétrie fondamentale des interactions électrostatiques.

### **III.2.3. Force gravitationnelle**

La force gravitationnelle est une interaction fondamentale qui s'exerce à distance entre deux masses, sans contact direct. Elle explique la cohésion des systèmes planétaires, des galaxies, ainsi que la chute des corps sur Terre.

Selon la loi de la gravitation universelle énoncée par *Isaac Newton*, deux corps ponctuels de masses respectives  $m_1$  et  $m_2$ , séparés par une distance  $r$ , s'attirent mutuellement avec une force dont l'intensité est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

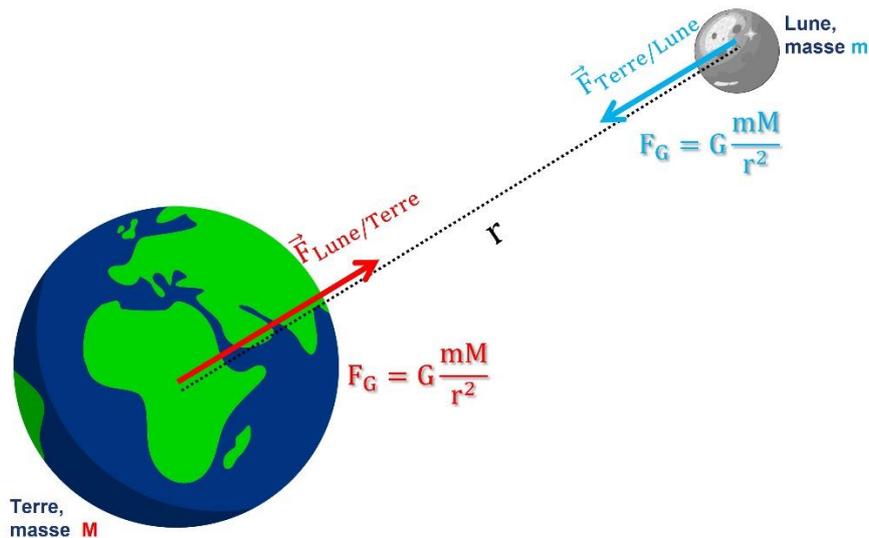


Figure 5 : Représentation schématique de la force gravitationnelle entre la Terre et la Lune.

La force gravitationnelle exercée par le corps de masse  $M$  (par exemple la Terre) sur un corps de masse  $m$  (par exemple la Lune) s'écrit :

$$\vec{F}_{\text{Lune/Terre}} = -G \frac{mM}{r^2} \vec{u}$$

où :

- $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2}$  est la constante gravitationnelle universelle,
- $r$  est la distance entre les centres de masse des deux corps,
- $\vec{u}$  est le vecteur unitaire dirigé de la Terre vers la Lune,
- le signe négatif indique que la force est attractive.

### *Caractéristiques de la force gravitationnelle*

La force gravitationnelle est :

- **attractive** : elle tend à rapprocher les deux corps ;
- **réciroque** : chaque corps exerce sur l'autre une force de même intensité, de direction identique mais de sens opposé, conformément à la *troisième loi de Newton* :

$$\vec{F}_{\text{Lune/Terre}} = -\vec{F}_{\text{Terre/Lune}}$$

### **Conclusion**

Les forces agissant sur un point matériel sont soit *de contact*, en cas d'interaction directe, soit à *distance*, sans contact physique. Cette distinction est essentielle pour modéliser correctement le système et appliquer les lois de la dynamique.