

# Chapitre 2 : Mouvement et interactions

Dans ce chapitre on va étudier comment décrire un mouvement, expliquer les causes du mouvements et introduire le principe d'inertie.

## I – Décrire un mouvement

► L'étude descriptive d'un mouvement s'appelle la **cinématique**, qui vient du mot grec pour mouvement « kinema » (c'est aussi l'origine du mot cinéma).

► Ici descriptive veut dire que l'on va décrire un mouvement, sans chercher à connaître les causes qui produisent ce mouvement.

## 1 – Système et référentiel

### A – Système

**Système** : objet dont on étudie le mouvement.

On ne va s'intéresser qu'au mouvement global du système. C'est pourquoi on va modéliser le système par un point de même masse, localisé en son centre de masse. C'est le **modèle du point matériel**.

► Le modèle du point matériel revient à oublier toute information sur la géométrie du système étudié. Les éventuelles rotations et déformations ne sont donc pas prises en compte.

### B – Référentiel et relativité

Pour décrire le mouvement, il faut pouvoir le repérer dans l'espace et dans le temps, pour ça on utilise un **référentiel**.

**Référentiel** : objet de référence, muni d'un repère d'espace et de temps, par rapport auquel on étudie le mouvement du système.

► Le repère d'espace est composé de trois axes pour un mouvement à trois dimensions et de deux axes pour un mouvement à deux dimensions.

► Pour un repère à deux dimensions d'axes  $x$  et  $y$ , le système assimilé à un point  $P$  a pour coordonnées  $P(x, y)$ .

► Un repère de temps est une horloge commune à tous les observateurs.

La description du mouvement dépend du **référentiel** choisi. On appelle ça la **relativité** du mouvement.

→ *Exemple* : Vous êtes assis dans un métro en train d'arriver sur un quai. Dans le

référentiel lié au métro, vous êtes immobile, mais dans le référentiel lié au quai vous êtes en mouvement.

## 2 – Trajectoire et vecteur vitesse

Pour décrire un mouvement il faut deux informations : la **trajectoire** suivie par le système et la variation du **vecteur vitesse**.

### A – Trajectoire

**Trajectoire** : ensemble des positions successives occupées par le système dans un référentiel donné.

Ces positions forment une courbe, dont la forme permet de définir la trajectoire :

- si la courbe est une droite, la trajectoire est **rectiligne** ;
- si la courbe est un cercle, la trajectoire est **circulaire** ;
- si la courbe n'est pas une droite ou un cercle, la trajectoire est **curviligne**.

### B – Vecteur vitesse

Pour décrire la vitesse en physique on utilise des **vecteurs**.

**Vecteur** : objet mathématique représenté par un segment fléché  $\longrightarrow$  et noté avec une lettre surmontée d'une flèche  $\vec{v}$ .

Un vecteur contient quatre informations :

- un **point d'application** (ou origine),
- une **direction**,
- un **sens**,
- une **norme** (aussi appelée valeur).

Un vecteur est **constant** si sa direction, son sens et sa norme ne varie pas le long du mouvement.

⚠ Dans le langage courant on ne fait pas la différence entre sens et direction, mais ce sont deux notions différentes. Par exemple, si on prend un ascenseur on se déplace verticalement (direction verticale), mais on peut le prendre pour descendre ou pour monter (sens vers le bas ou vers le haut).

⚠ En mathématique on ne se préoccupe pas du point d'application, mais en physique c'est une information très importante !

Le **vecteur vitesse** d'un point  $P$  décrit la direction, le sens et la norme de la vitesse en ce point, à un instant  $t$ .

Il est en tout point tangent à la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement.

Soient  $P_1$  la position d'un point à l'instant  $t_1$  et  $P_3$  la position de ce même point à l'instant  $t_3$ . Le déplacement du point matériel entre les dates  $t_1$  et  $t_3$  est défini par le vecteur déplacement  $\overrightarrow{P_1P_3}$ . La norme de ce vecteur est la distance en mètre entre les points  $P_1$  et  $P_3$ .

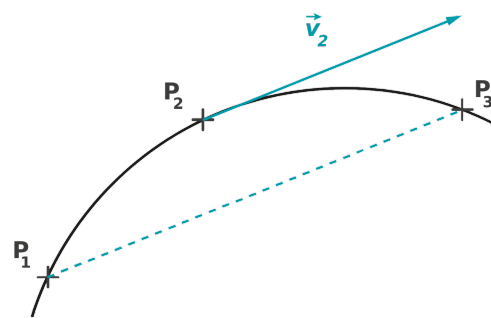
Le vecteur vitesse  $\vec{v}_2$  d'un système au point  $P_2$  entre les instants  $t_1$  et  $t_3$  a pour expression

$$\vec{v}_2 = \frac{\overrightarrow{P_1P_3}}{t_3 - t_1} \quad (1)$$

La norme de ce vecteur est donc égale à la distance parcourue, en mètre (m), sur la durée du parcours, en seconde (s). La vitesse se mesure en mètre par seconde (m/s).

Le vecteur  $\vec{v}_2$  est caractérisé par :

- une direction : parallèle au segment  $P_1P_3$  et tangent à la trajectoire.
- Un sens : le sens du mouvement.
- Une norme :  $v_2 = \|\vec{v}_2\| = \left\| \frac{\overrightarrow{P_1P_3}}{t_3 - t_1} \right\| = \frac{P_1P_3}{t_3 - t_1}$ .
- Une origine :  $P_2$ .



Vecteur vitesse  $\vec{v}_2$  d'un système au point  $P_2$ .

$P_1P_3$  est la distance entre les points  $P_1$  et  $P_3$  en mètre (m).  $t_3 - t_1$  est la durée séparant les instants  $t_1$  et  $t_3$  en seconde (s).  $v_2$  est la norme de la vitesse en mètre par seconde (m/s).

**⚠** Il faut faire bien attention à distinguer un vecteur  $\vec{v}_2$  et sa norme  $v_2$  ! De manière générale, un vecteur ne sera **jamais** égal à un nombre, un vecteur contient plus d'informations.

► Plus la durée  $\Delta t = t_3 - t_1$  est petite, plus on est précis dans la description de la vitesse du point  $P_2$ . Le nombre de points mesurés influence donc grandement la qualité de la description du mouvement du système étudié.

► Si la durée  $\Delta t = t_3 - t_1$  tends vers zéro ( $t_3$  est très proche de  $t_1$ ), on parlera de **vitesse instantanée**.

### 3 – Variation du vecteur vitesse

Pour décrire l'évolution du vecteur vitesse d'un système le long du mouvement, il faut décrire la variation de sa direction et de sa norme.

#### A – Variation de la norme

Si la norme du vecteur vitesse :

- est constante : le mouvement est **uniforme** ;
- augmente : le mouvement est **accélééré** ;
- diminue : le mouvement est **décélééré**.

Si la norme du vecteur vitesse est nulle, on dit que le système est **immobile**.

#### B – Variation de la direction

Si la direction du vecteur vitesse est constante, alors la trajectoire est **rectiligne**.

Si la direction varie au cours du mouvement, alors la trajectoire est circulaire ou curviligne.

⚠ En pratique cette année on va tracer la vitesse à partir de la trajectoire, mais c'est bien la vitesse qui est responsable de la forme d'une trajectoire et non l'inverse.

► Dans le cas d'une trajectoire rectiligne, la direction du vecteur vitesse se confond avec la droite de la trajectoire.

#### C – Mouvement

Le mouvement d'un système est donné par la description de sa trajectoire + l'évolution de sa vitesse.

Un mouvement est **rectiligne uniforme** si le vecteur vitesse est constant tout au long du mouvement.

Un mouvement est **rectiligne non uniforme** si la direction du vecteur vitesse est constante tout au long du mouvement, mais que la norme du vecteur vitesse varie.

## II – Modéliser une action

Dans la première partie de ce chapitre, on a vu comment décrire le mouvement d'un système dans un référentiel donné : il faut donner des informations sur la trajectoire et la variation du vecteur vitesse du système.

Dans cette partie, on va s'intéresser aux causes du mouvement : les **actions mécaniques**.

### 1 – Actions mécaniques

➤ Un corps exerce une **action mécanique** sur le système étudié s'il est capable d'en modifier le mouvement.

→ *Exemple* : si vous lancez un ballon, vous exercez une action mécanique sur le ballon qui entraîne sa mise en mouvement.

#### A – Modélisation par une force

Pour modéliser une action mécanique, on utilise le concept de **force**.

La force exercée par un corps  $A$  sur un corps  $B$  est représentée par un vecteur  $\vec{F}_{A/B}$ . Ce vecteur possède les trois caractéristiques suivantes :

- Une **norme** notée  $F_{A/B}$ , qui s'exprime en newton (N).
- Une **direction**.
- Un **sens**.

Dans le modèle du point matériel, le système étudié (ici le corps  $B$ ) est modélisé par un point : ce sera le point d'application de  $\vec{F}_{A/B}$ .

#### B – Actions de contact et actions à distance

Les actions mécaniques peuvent être séparées en deux catégories : les **actions de contact** et les **actions à distance**.

► Si l'action a lieu quand les corps sont en contact, alors il s'agit d'une action de contact.

→ *Exemple* : Quand une footballeuse shoot dans un ballon, elle exerce une action de contact.

⚠ Dans le modèle du point matériel, il faut bien distinguer le point de contact (ici le bord du ballon) et le point d'application de la force (ici le centre du ballon).

► Si une action a lieu même lorsque les corps ne sont pas en contact, alors il s'agit d'une action à distance.

→ *Exemples* : La Terre exerce une action à distance sur la Lune : la force d'interaction gravitationnelle. Le noyau externe de la Terre est un aimant qui exerce une action à distance sur les aiguilles d'une boussole : la force d'interaction électromagnétique.

► D'un point de vue microscopique, les actions de contact n'existent pas. Toutes les actions de contact macroscopiques sont en fait des actions à distance électromagnétiques entre entités chimiques, dont la portée est très courte ( $\sim 10$  à  $100$  nm).

## 2 – Principe des actions réciproques

Lorsqu'un corps  $A$  exerce sur un corps  $B$  une force  $\vec{F}_{A/B}$ , alors  $B$  exerce sur  $A$  une force opposée  $\vec{F}_{B/A}$  telle que

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

Par rapport à  $\vec{F}_{A/B}$ , la force  $\vec{F}_{B/A}$  a donc

- la **même norme**  $F_{B/A} = F_{A/B}$  ;
- la **même direction** ;
- un **sens opposé** à  $\vec{F}_{A/B}$ .

► Pour des raisons historiques, ce principe est parfois appelé la **troisième loi de Newton**.

## 3 – Exemples de forces

### A – Force d'interaction gravitationnelle

► Tous les corps qui possèdent une masse s'attirent entre eux : c'est l'attraction gravitationnelle.

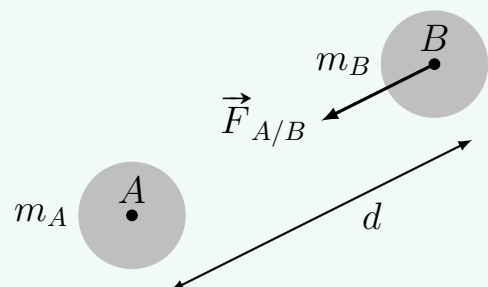
Soit un corps  $A$  de masse  $m_A$  et un corps  $B$  de masse  $m_B$ , séparés par une distance  $d$ .

On modélise l'attraction gravitationnelle exercée par le corps  $A$  sur le corps  $B$  par une force représentée par un vecteur  $\vec{F}_{A/B}$  :

- **Norme** :  $F_{A/B} = G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$ , en newton.
- **Direction** : la droite  $AB$ .
- **Sens** : de  $B$  vers  $A$  (force attractive).

Dans la formule de la norme de la force, les masses s'expriment en kilogramme (kg), la distance en mètre (m) et la **constante universelle de gravitation**  $G$  en newton mètre carré par kilogramme carré ( $\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ ). Sa valeur (à connaître) est

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$



## B – Poids

➤ Près de la surface d'un astre comme la Terre, les corps qui possèdent une masse  $m$  sont soumis à une **force de pesanteur**, aussi appelée **poids**.

Le **poids** est modélisé par un vecteur  $\vec{P}$ , caractérisé par :

- Une **norme** :  $P = m \cdot g$ , exprimée en newton (N).
- Une **direction** : verticale (la droite passant par le centre de l'astre et le point modélisant le corps).
- Un **sens** : du haut vers le bas (vers le centre de l'astre).

Dans la formule de la norme de la force, la masse  $m$  s'exprime en kilogramme (kg) et **l'accélération de la pesanteur**  $g$  en newton par kilogramme (N/kg) ou en mètre par seconde carrée ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ). Sa valeur sur Terre (à connaître) est :

$$g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$$

⚠ Il ne faut pas confondre l'accélération de la pesanteur  $g$  et la constante universelle de gravitation  $G$ . Ces deux grandeurs ne représentent pas la même chose et n'ont pas la même valeur et les mêmes unités.

▶ En première approximation, le poids est simplement la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur le corps de masse  $m$  :  $\vec{P} \simeq \vec{F}_{\text{Terre/corps}}$ . Et donc en notant la masse de la Terre  $M_T$  et le rayon de la Terre  $R_T$  :

$$\begin{aligned} m \cdot g &= G \cdot \frac{m \cdot M_T}{R_T^2} \\ \Rightarrow m \cdot g \cdot \frac{1}{m} &= G \cdot \frac{m \cdot M_T}{R_T^2} \cdot \frac{1}{m} \\ \Rightarrow g &= G \cdot \frac{M_T}{R_T^2} \end{aligned}$$

## C – Force exercée par un support

➤ Un système de masse  $m$  reposant sur un support, exerce des forces « de contact » électromagnétiques sur ce support. Le principe des actions réciproques implique que le support exerce alors une force opposée, qu'on appelle **réaction du support**.

La **réaction du support** est modélisée par un vecteur  $\vec{R}$  caractérisé par :

- Une **norme** égale à celle du poids du système  $R = P$ .
- Une **direction** : perpendiculaire au support.
- Un **sens** : vers le haut.

## D – Forces de frottements

➤ Un système en mouvement subit une force liée à l'action du milieu sur ou dans lequel il se déplace (gaz, liquide, support solide). Ce sont les forces de frottements  $\vec{f}$ .

Les **forces de frottements** sont modélisées par un vecteur  $\vec{f}$  caractérisé par :

- Une **norme** qui dépend de la vitesse du système et du milieu.
- Une **direction** : celle du déplacement.
- Un **sens** : opposée au mouvement.

Dis autrement  $\vec{f}$  est opposée au vecteur vitesse du système  $\vec{v}$ ,  $\vec{f} = -\alpha \vec{v}$  (où la valeur de  $\alpha > 0$  dépend du mouvement).

Ces forces sont liées aux multiples interactions microscopiques entre les entités du milieu et le système macroscopique. Elles sont donc complexes à modéliser à notre échelle macroscopique.

On pourra retenir que

- pour un système qui se déplace dans un gaz comme l'air, la norme  $f$  est proportionnelle au carré de la vitesse  $v^2$ .
- pour un système qui se déplace dans un liquide comme l'eau,  $f$  est proportionnelle à la vitesse  $v$ .

## E – Force d'interaction électrostatique

➤ Tous les corps qui possèdent une charge exercent une action entre eux : c'est **l'interaction électrostatique**. Cette interaction n'est pas à connaître.

Soit un corps  $A$  de charge  $q_A$  et un corps  $B$  de charge  $q_B$ , séparés par une distance  $d$ . On modélise l'interaction électrostatique exercée par le corps  $A$  sur le corps  $B$  par une force représentée par un vecteur  $\vec{F}_{A/B}$ , caractérisé par :

- Une **norme** :  $F_{A/B} = K \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{d^2}$ , exprimée en newton (N).
- Une **direction** : la droite passant par les centres des corps  $A$  et  $B$ .
- Un **sens** : dépend du signe du produit  $q_A \cdot q_B$  ! La force est **attractive** si  $q_A \cdot q_B > 0$  et **répulsive** si  $q_A \cdot q_B < 0$ .

Dans la formule de la norme, la **constante universelle électromagnétique**  $K$  joue un rôle similaire à la constante universelle gravitationnelle  $G$ , mais sa valeur est bien plus élevée  $K/G \sim 10^{42}$  !

C'est l'interaction électrostatique qui est à l'origine de la stabilité des atomes et des molécules.



## III – Principe d'inertie

### 1 – Le principe d'inertie

#### A – Système et référentiel d'étude

➤ Comme déjà vu, avant toute étude d'un mouvement il est nécessaire de préciser :

1. le système étudié, modélisé par un point matériel ;
2. le référentiel de l'étude, constitué d'un objet de référence et d'un repère de temps et d'espace.

Sur Terre on va généralement utiliser le **référentiel terrestre**. Ce référentiel est lié à la surface de la Terre.

#### B – Masse et inertie

L' **inertie** est la tendance qu'ont les corps à rester dans le même état (repos ou mouvement), en l'absence de forces appliquées.

▶ C'est la masse qui mesure cette tendance : plus un objet a une masse élevée et plus il a de l'inertie.

▶ Dis autrement : plus un objet est lourd, plus il faut exercer une force importante pour le mettre en mouvement.

→ *Exemple* : Il faut exercer une force plus faible pour faire rouler une boule de billard qu'une boule de bowling.

#### C – Le principe et sa contraposée

➤ Le **principe d'inertie** a été formulé pour la première fois par Newton en 1687. Newton s'appuyait sur les travaux de Descartes et de Galilée, et parfois on appelle ce principe la **première loi de Newton**. Sa formulation moderne est la suivante :

Si les forces qui s'exercent sur un système se compensent, alors ce système est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme.

Réciproquement : si un système est immobile ou en mouvement rectiligne uniforme, alors les forces qui s'exercent sur lui se compensent.

→ *Exemple* : Quand vous êtes assis sur une chaise, la réaction de la chaise compense le poids qui s'exerce sur vous, ce qui assure votre immobilité.

➤ La **contraposée du principe d'inertie** s'exprime ainsi :

Si un système n'est pas immobile ou en mouvement rectiligne uniforme, alors les forces qui s'exercent sur lui ne se compensent pas.

La réciproque est également vraie : Si les forces qui s'exercent sur un système ne se compensent pas, alors il n'est pas immobile ou en mouvement rectiligne uniforme.

→ *Exemple* : Dans le référentiel associé au Soleil, le référentiel héliocentrique, la Terre n'a pas un mouvement rectiligne uniforme. C'est parce qu'elle est soumise à la force gravitationnelle exercée par le Soleil.

## 2 – Variation du vecteur vitesse

### A – Cas général

Le principe d'inertie nous dit que si le vecteur vitesse ne varie pas au cours de la trajectoire, alors les forces exercées sur le système se compensent.

Quand on dit que les forces qui s'exercent sur un système se compensent, cela veut dire que leur somme vectorielle est nulle :  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \vec{0}$ .

On note  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_i$  la variation du vecteur vitesse entre deux instants de la trajectoire  $t_{i+1}$  et  $t_i$ . Si  $\Delta\vec{v} = \vec{0}$  pour tout  $i$ , cela veut dire qu'il n'y a pas de variation du vecteur vitesse : le système a un mouvement rectiligne uniforme ou est immobile.

Mathématiquement le principe s'exprime donc :

Si  $\Delta\vec{v} = \vec{0}$  au cours de la trajectoire, alors  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \vec{0}$ .

### B – Cas de la chute libre

Lorsqu'un système est soumis uniquement à son poids, on dit que le système est en **chute libre**.

Le mouvement n'est donc pas rectiligne uniforme ou immobile et le vecteur vitesse du système varie : sa variation a même sens et direction que le poids (vertical vers le bas).

► Pour la chute libre d'un système de masse  $m$ , en notant  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  la durée entre deux points de la trajectoire :

$$m\Delta\vec{v} = \vec{P}\Delta t$$