Appliquer la deuxième loi de Newton

Introduction :

Dans le cours « Modélisation d'un mouvement », nous avons décrit un mouvement rectiligne et circulaire à l'aide des vecteurs position, vitesse et accélération. Nous allons maintenant relier les **forces** appliquées à un **système** mécanique à son **mouvement** en décrivant, par exemple, la force de frottement qui s'applique à une voiture en plein freinage ou à la force de propulsion s'appliquant à un avion qui décolle d'un porte-aéronefs.

Après avoir défini ce qu'est le centre de masse d'un système mécanique, nous rappellerons la notion de référentiel galiléen introduite en classe de seconde dans le cours « Le principe d'inertie ». Puis, nous utiliserons la deuxième loi de Newton pour déterminer l'accélération d'un système, et sa trajectoire, tout en connaissant les forces extérieures.

1 Le centre de masse d'un système mécanique

Rappel

Un **système** est l'objet ou l'ensemble des objets étudiés. Il est défini en fonction des besoins de l'expérience ou de la théorie appliquée.

L'étude du mouvement d'un système mécanique inclut sa modélisation par un **point matériel** : la trajectoire déterminée est celle de ce point auquel nous associons toute la masse du système. Celui-ci est en général confondu avec le centre de masse du système.

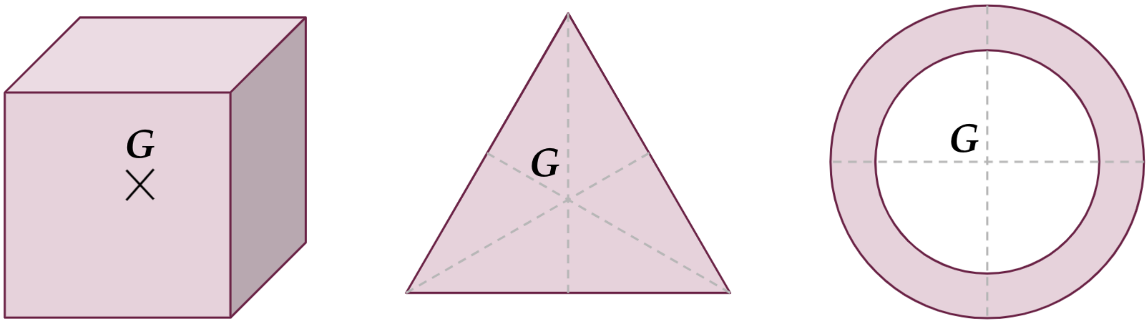
Définition

Centre de masse :

Le centre de masse d'un système mécanique est le barycentre (centre de gravité) des masses qui le composent. Il s'agit aussi du point d'application du poids du système.

Exemple

Ci-dessous nous pouvons observer le centre de masse de quelques systèmes :



Le centre de masse d'un système peut se situer à l'extérieur de celui-ci.

2 Première loi de Newton

a. Référentiel galiléen

Un **référentiel** est un objet par rapport auquel nous étudions le mouvement dans l'espace et dans le temps.

Définition

Référentiel galiléen :

Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel un système isolé ou pseudo-isolé est au repos ou en mouvement rectiligne uniforme (MRU).

Dans un tel référentiel, la 1re loi de Newton (principe d'inertie) est vérifiée.

Rappel

Système isolé : le système n'est soumis à aucune force.
Système pseudo-isolé : le système est soumis à des forces extérieures qui se compensent (la somme vectorielle de ces forces est égale au vecteur nul $\vec{0}$).

Cette définition permet, en pratique de déterminer si un référentiel est galiléen ou non. En première, dans le cours « Mouvements et cinématique », nous avons vu que le référentiel héliocentrique et le référentiel géocentrique peuvent être considérés comme galiléens, ainsi que le référentiel terrestre, lié au sol, à condition de respecter certaines limites sur les intervalles de temps considérés.

Exemple

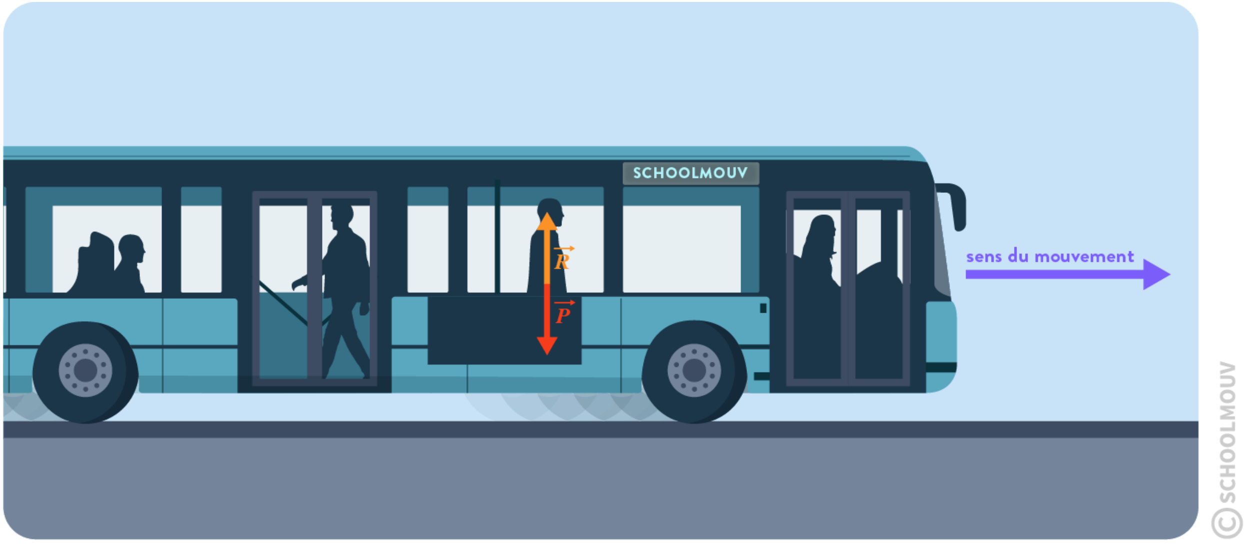
Dans un bus roulant en ligne droite à vitesse constante, un passager est assis. Les forces qui s'exercent sur le passager sont :

- son poids $\vec{P}$;
- la réaction du siège $\vec{R}$.

D'après le principe d'inertie, ces deux forces se compensent, soit :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$

De plus dans le référentiel du bus, le passager est immobile. Ceci est conforme au principe d'inertie, nous pouvons donc dire que ce référentiel est galiléen.



b. Première loi de Newton : principe d'inertie

Dans un référentiel galiléen, un système mécanique est à **l'équilibre mécanique** (aussi appelé équilibre statique) si la résultante des forces qui s'y appliquent est nulle.

→ Un système à l'équilibre n'est donc pas forcément immobile. D'après le principe d'inertie, il peut aussi être en mouvement rectiligne uniforme.

À retenir

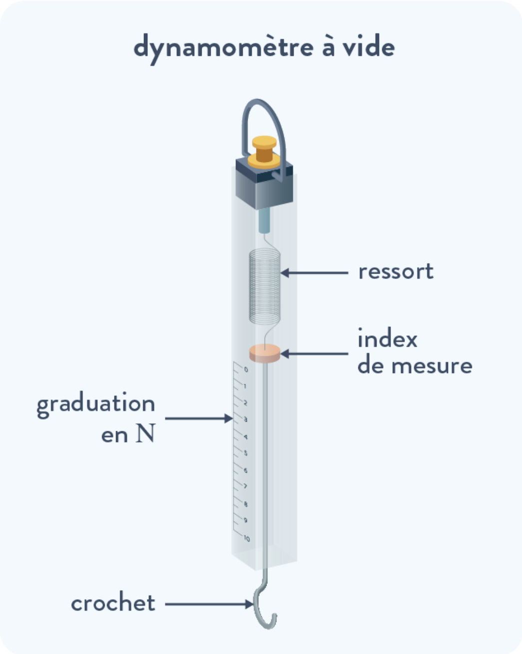
Première loi de Newton :
Dans un référentiel galiléen, si la somme vectorielle des forces qui s'exercent sur le centre de masse d'un système est égale au vecteur nul $\vec{0}$, alors ce système est soit repos soit en mouvement rectiligne uniforme.
Pour un système se déplaçant à la vitesse $\vec{v}$, nous pouvons écrire :

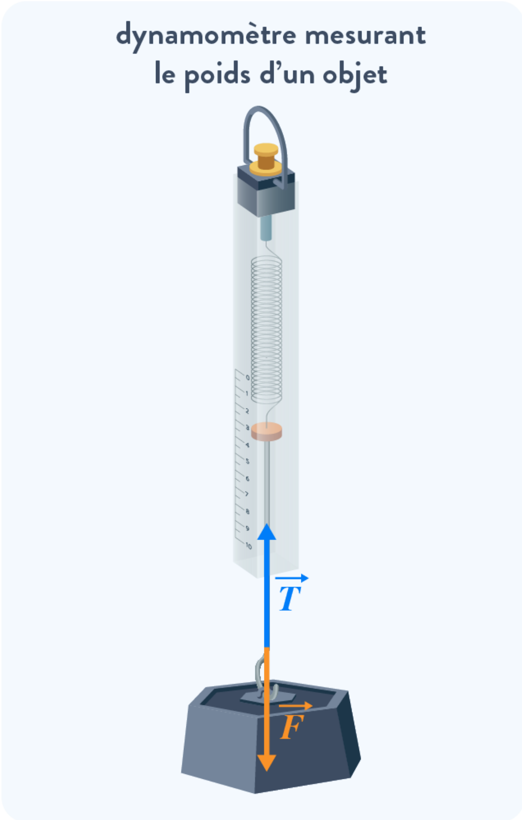
$$\Sigma\vec{F} = \vec{0} \Longleftrightarrow \vec{v} = \text{cste}$$

→ Le principe d'inertie ne peut s'appliquer que dans un référentiel galiléen.

Exemple

Considérons un dynamomètre à ressort. Celui-ci indique la force exercée par l'objet en suspension, qui met en extension le ressort contenu dans le dynamomètre. Pour cet exemple, le système est le crochet à l'extrémité du ressort.





Les forces exercées sont la force à mesurer $\vec{F}$, qui tend à étirer le ressort, et la force de rappel $\vec{T}$ de celui-ci, qui s'oppose à son étirement. Au cours de la mesure, ce crochet est immobile, donc à l'équilibre.

→ La force de rappel compense donc exactement la force à mesurer.

Or la force de rappel $\vec{T}$ est proportionnelle à l'allongement du ressort (l'augmentation de sa longueur), c'est pourquoi nous lisons, sur des graduations placées régulièrement le long du ressort, la valeur de la force exercée.

3 Deuxième loi de Newton

b. Deuxième loi de Newton : le principe fondamental de la dynamique

À retenir

Deuxième loi de Newton :
Dans un référentiel galiléen, la résultante des forces extérieures $\Sigma\vec{F}_{\text{ext}}$ s'exerçant sur le système est égale au produit de sa masse m (constante) par le vecteur accélération $\vec{a}$ de son centre de masse :

$$\Sigma\vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}$$

Avec :

- $\vec{F}$ la force en newton (N) ;
- m la masse en kilogramme (kg) ;
- $\vec{a}$ l'accélération en mètre par seconde carré $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$.

b. Applications de la deuxième loi de Newton

Par son énoncé cette loi relie explicitement l'accélération du système, aux forces extérieures exercées sur le système. Sans compter les cas particuliers vus dans ce chapitre, le lien entre la trajectoire exacte et les composantes de l'accélération sera fait à l'aide de méthodes vues dans le chapitre suivant : « Mouvement dans un champ uniforme ».

À retenir

Nous pouvons donc appliquer la 2$^{\text{e}}$ loi de Newton pour déterminer :

- l'accélération du système, et sa trajectoire, connaissant les forces extérieures ;
- la résultante des forces extérieures (ou l'une d'elles si les autres sont connues) appliquées au système, connaissant le mouvement de son centre de masse.

Méthode pour déterminer la norme du vecteur accélération $\vec{a}$

Faire atterrir un avion convenablement sur la terre ferme demande de l'entraînement. L'atterrissage sur un porte-aéronefs est rendu périlleux par les dimensions et les mouvements de la « piste » qui se trouve sur le pont du navire. Déjà bien plus étroite et courte qu'une piste terrestre, elle monte et descend avec la houle.

Le décollage présente aussi une difficulté : un avion doit atteindre une vitesse minimale pour décoller, sans quoi la portance n'est pas suffisante et il retombe au sol. Or le pont d'envol est trop court pour permettre à un avion d'atteindre la vitesse de décollage grâce à la seule poussée de ses réacteurs. En pratique, une catapulte, consistant en un très gros piston à vapeur, exerce la poussée nécessaire pour faire décoller l'avion.

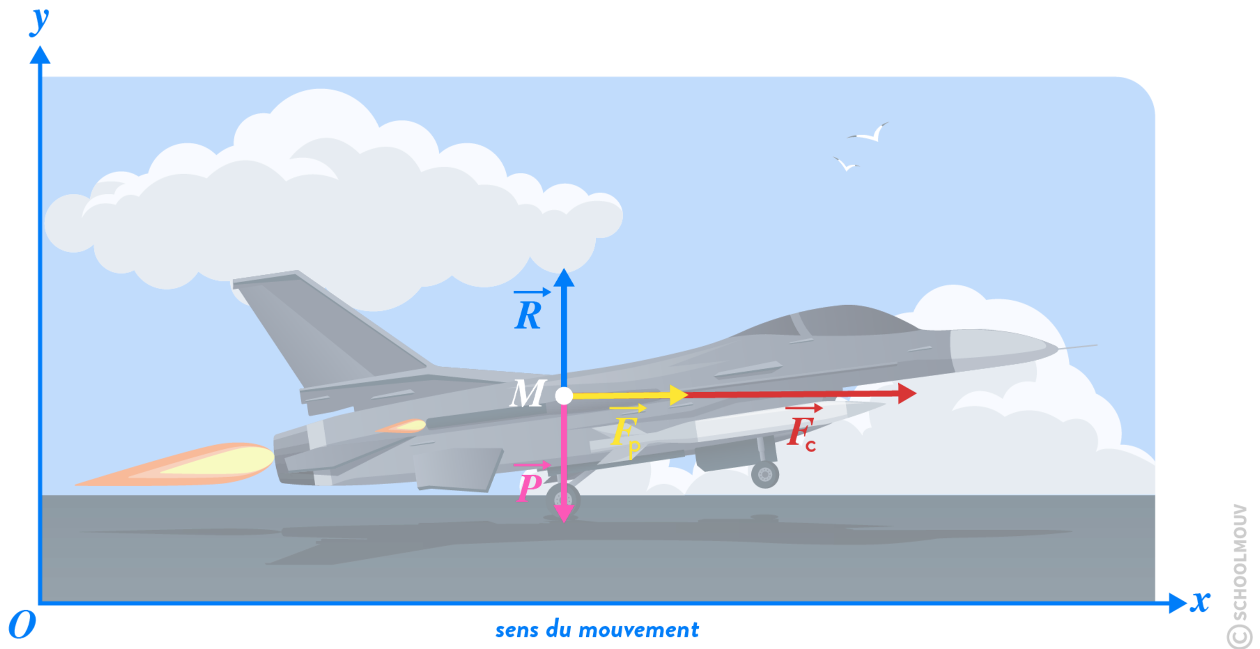
Immobile au départ, l'avion doit atteindre une vitesse $v = 90\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ après une durée $\Delta = 3,0\,\text{s}$. Avec une masse de $m = 20\,\text{t}$, une poussée de ses réacteurs de $\vec{F}_p = 150\,\text{kN}$ et une force exercée par la catapulte $\vec{F}_c = 450\,\text{kN}$.

Quelle est la valeur de la norme du vecteur accélération ?

1. **Système étudié :** avion, modélisé par son centre de masse M.
2. **Référentiel d'étude :** le référentiel terrestre, supposé galiléen.
3. **Bilan des forces**

   L'avion est soumis à :

   - son poids $\vec{P}$ verticale et dirigée vers le bas ;
   - la réaction normale du pont $\vec{R}$ verticale et dirigée vers le haut ;
   - la poussée de ses réacteurs $\vec{F}_p$ horizontale et dirigée vers le sens du mouvement ;
   - la force de poussée supplémentaire exercée par la catapulte $\vec{F}_c$ horizontale et dirigée vers le sens du mouvement.
4. **Schéma**



5 Expression de la 2^e loi de Newton

$$\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{R} + \vec{P} + \vec{F}_p + \vec{F}_c = m\vec{a}$$

6 Projection de la relation vectorielle

L'avion roule sur la piste en prenant de la vitesse, nous pouvons donc négliger ici les forces de frottements. Sur l'axe (Oy), le poids et la réaction du pont se compensent, soit :

$$\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$$

Sur l'axe (Ox), la résultante des deux forces restantes $\vec{F}_p$ et $\vec{F}_c$ est une force constante, horizontale et **orientée vers le sens du mouvement** : l'avion est en mouvement rectiligne uniformément accéléré jusqu'à son décollage. Alors :

$$\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{R} + \vec{P} + \vec{F}_p + \vec{F}_c = m\vec{a} \Longleftrightarrow \vec{F}_p + \vec{F}_c = m\vec{a}$$

Ainsi,

$$\begin{aligned} \|\vec{a}\| &= \frac{\|\vec{F}_p + \vec{F}_c\|}{m} \\ &= \frac{150 \times 10^3 + 450 \times 10^3}{20 \times 10^3} \\ &= 30\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} \end{aligned}$$

Méthode pour déterminer la résultante des forces appliquées à un système $\vec{F}_{\text{ext}}$

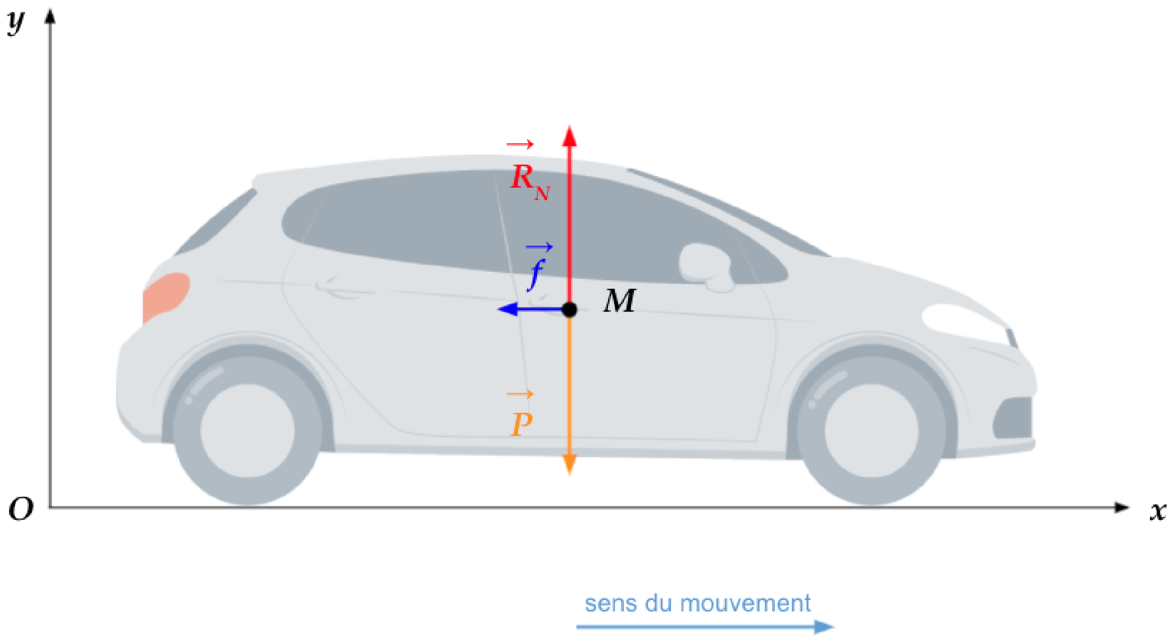
Une voiture de masse $m = 1,2 \times 10^3\,\mathrm{kg}$ roule à une vitesse v_0 en ligne droite sur une route horizontale. Le conducteur de la voiture freine et perd de la vitesse sous l'action de la force de frottement du sol. La voiture passe de $80\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ à $0\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$ en $\Delta t = 1,8\,\mathrm{s}$. Pendant cette phase, le mouvement de la voiture est supposé rectiligne. On négligera l'action de l'air.

Quelle est la valeur de la norme de la force de frottement $\vec{f}$ lors du freinage de la voiture ?

1. **Système étudié :** voiture, modélisé par son centre de masse M.
2. **Référentiel d'étude :** le référentiel terrestre, supposé galiléen.
3. **Bilan des forces**

   La voiture est soumise à :

   - son poids $\vec{P}$ verticale et dirigée vers le bas ;
   - la réaction normale du sol $\vec{R}_N$ verticale et dirigée vers le haut ;
   - la force de frottement $\vec{f}$ horizontale et dirigée dans le sens opposé du mouvement.
4. **Schéma**



5 Expression de la 2e loi de Newton

$$\Sigma\vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{R}_N + \vec{f} = m\vec{a}$$

6 Projection de l'équation vectorielle

Sur l'axe (Oy), le poids et la réaction normale du sol se compensent. Nous avons alors :

$$\vec{P} + \vec{R}_N = \vec{0}$$

De plus, sur l'axe (Ox), la force de frottement $\vec{f}$ est une force constante, horizontale et **orientée dans le sens opposé du mouvement** : la voiture est en mouvement rectiligne uniformément décéléré jusqu'à l'arrêt. Alors :

$$-\vec{f} = m\vec{a}$$

D'où,

$$\vec{f} = -m\vec{a}$$

La vitesse initiale v_0 vaut : $\dfrac{80}{3,6} = 22,2\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Ainsi :

$$\begin{aligned}\|\vec{a}\| &= \|\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}\| \\ &= \|\frac{0-22,2}{1,8-0}\| \\ &= \|-12,3\| \\ &= 12,3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}\end{aligned}$$

Nous en déduisons :

$$\begin{aligned}\|\vec{f}\| &= m\|\vec{a}\| \\ &= 1,2\times 10^3\times 12,3 \\ &= 1,5\times 10^4\,\mathrm{N}\end{aligned}$$