

Physique Générale : Mécanique

04.01:
Lois de Newton

Sections
SC, GC & SIE , BA1

Version du 23.09.2024

Dr. J.-P. Hogge

Swiss Plasma Center

École polytechnique
fédérale de
Lausanne

- Grandeurs intensives et extensives
- Masse
- 1^{ère} loi (principe d'inertie)
- Force
- Référentiel d'inertie
- Quantité de mouvement
- 2^e loi (loi du mouvement) $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$
- 3^e loi (Action – réaction)
- Conservation de la quantité de mouvement

Définition: Grandeur extensive

Grandeur physique qui, pour un ensemble d'objets, est égale à la somme de cette grandeur pour chaque objet.

Exemples:

- Quantité de matière, quantité de mouvement, force, volume

Définition: Grandeur intensive

Grandeur physique qui ne dépend pas du nombre d'objets.

Exemples:

- Vitesse (toutes les roues d'une voiture ont la même vitesse), accélération, température

Définition: Masse

Grandeur physique caractérisant la quantité de matière

- Grandeur extensive
- Grandeur scalaire
- Grandeur conservée
- Masse constante = système fermé
- Masse variable = système ouvert
- Exemples: lingot d'or; fusée au décollage
- L'unité physique de la masse (SI) : $[\text{kg}]$



Il ne faut pas confondre la masse (= quantité de matière) et le poids (= force gravitationnelle)

Aristote: Les seules causes du mouvement sont les poussées et les tractions exercées par des êtres vivants. Tout corps en mouvement va tendre vers le repos si il n'est soumis à aucune action.

Galilée (environ 2000 ans plus tard, en 1638):

'Un corps en mouvement sur une surface horizontale sans frottement reste indéfiniment en mouvement à vitesse constante'

Descartes (1644):

'Un corps qui ne subit pas d'influence extérieure se déplace en ligne droite à vitesse constante'

1ère loi de Newton: principe d'inertie

*‘ Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, à moins que quelque **force** n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état. ’*

Coup de génie de Newton: introduction du concept de **force** comme cause de la variation du mouvement.

Définition: **Force**

Grandeur physique extensive et vectorielle, notée $\vec{F}$, qui modifie l'état de repos ou de mouvement uniforme d'un objet.

Définition: Référentiel d'inertie

Tout référentiel dans lequel le principe d'inertie est vérifié.

Reformulation de la première loi de Newton:

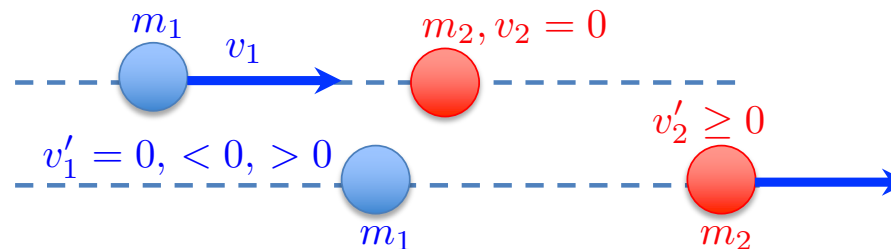
'Dans un référentiel d'inertie, tout point matériel ne subissant aucune interaction (force) a une vitesse constante, éventuellement nulle.'

Remarques:

- Il est difficile d'imaginer des situations où il n'y a pas de force (la gravitation a une portée infinie). Par contre, il est facile de trouver des situations où la somme des forces agissant sur un objet est nulle.
- Un référentiel accéléré n'est pas un référentiel d'inertie (expérience de la pensée: on imagine un train qui accélère, muni d'un plancher glissant. Une personne debout dans le train va glisser et être accélérée, bien que la somme des forces agissant sur elle est nulle).

- **On définit un référentiel d'inertie en fonction de la taille et des échelles de temps du problème que l'on traite:**
 - Le laboratoire est très souvent une bonne approximation d'un référentiel d'inertie, mais...
 - ... comme la terre tourne sur elle-même, chaque objet à sa surface subit une accélération centripète. A ce stade on considèrera que le référentiel géocentrique (Centre de la terre + 3 étoiles 'fixes') est un bon référentiel d'inertie, mais...
 - ... la terre tourne autour du soleil -> ...-> on identifie le référentiel héliocentrique (centre du soleil + 3 étoiles 'fixes') comme un référentiel d'inertie, mais ...
 - ... le soleil tourne autour de la galaxie, etc...

- Observations de Ch. Huygens (1656):
Lors d'une collision entre des objets (en l'occurrence des billes en argile), celui qui porte le mouvement peut en transférer tout ou partie à l'autre.
- En supposant qu'avant le choc la seconde bille est au repos, plus la masse ou la vitesse de la première bille est grande, plus la vitesse de la seconde bille après le choc sera élevée



- Comment définir une grandeur extensive permettant de caractériser le mouvement d'une certaine quantité de matière?

Quantité de mouvement:

Grandeur physique extensive et vectorielle introduite par Newton, caractérisant la dynamique (le mouvement) d'un objet ou d'un point matériel, et notée $\vec{p}$

Par construction, elle doit dépendre de:

- la masse (quantité de matière)
- de la vitesse $\vec{v}$ (mouvement)

Définition: Quantité de mouvement

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Unités $[\vec{p}] = \left[\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

- Grandeur extensive: $\vec{p}_{\text{tot}} = \sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_i \vec{v}_i$



Isaac Newton (1643-1727)

Note: On peut voir en annexe comment déduire par l'expérience (avec des collisions de chariots sur un rail à air comprimé) la forme de la quantité de mouvement à partir de critères d'extensivité, directionnalité et de conservation.

Après avoir défini les concepts de référentiel d'inertie, de force et de quantité de mouvement, on peut énoncer la seconde loi de Newton:

Version originale:

'Les changements de mouvement (dp) sont proportionnels à la force motrice ($F dt$), et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force est imprimée à l'objet'

2^{ème} loi de Newton (version moderne): Loi du mouvement

'La variation de la quantité de mouvement d'un corps au cours du temps (dp/dt) est due à l'action de la force résultante (F) appliquée sur ce corps.'

En langage mathématique:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$[\vec{F}] = \frac{[\vec{p}]}{[\text{temps}]} = \left[\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = [\text{N}]$$

- Manière alternative d'écrire la seconde loi de Newton (si $m = \text{cste}$):

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- La loi de Newton est tirée de l'observation



- Valable dans les référentiels d'inertie.
- Loi invariante sous les changement de référentiels d'inertie.
- Valable en mécanique, relativité restreinte, électrodynamique etc...

3^{ème} loi de Newton: Action-réaction:

*'A toute action, il y a toujours une réaction égale qui lui est opposée.'
Les actions mutuelles de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et opposées.*

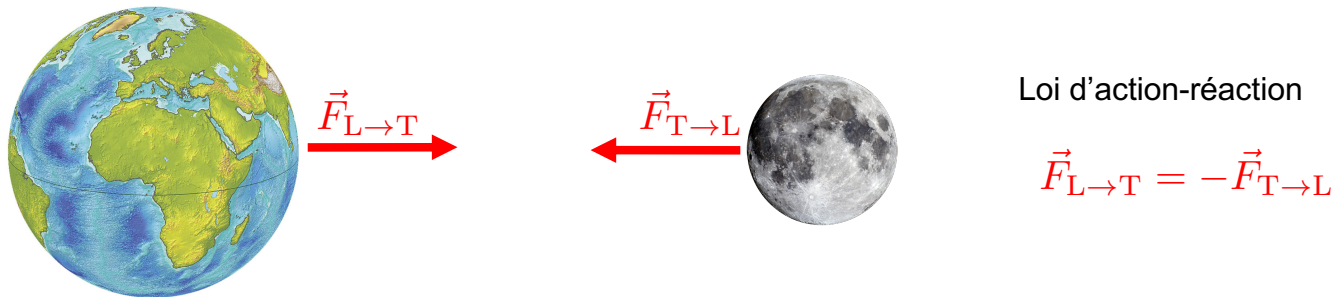
- Comme les deux premières lois de Newton, celle-ci est valable dans un référentiel d'inertie.
- La nature des forces d'action et de réaction doit être la même.

Commentaire:

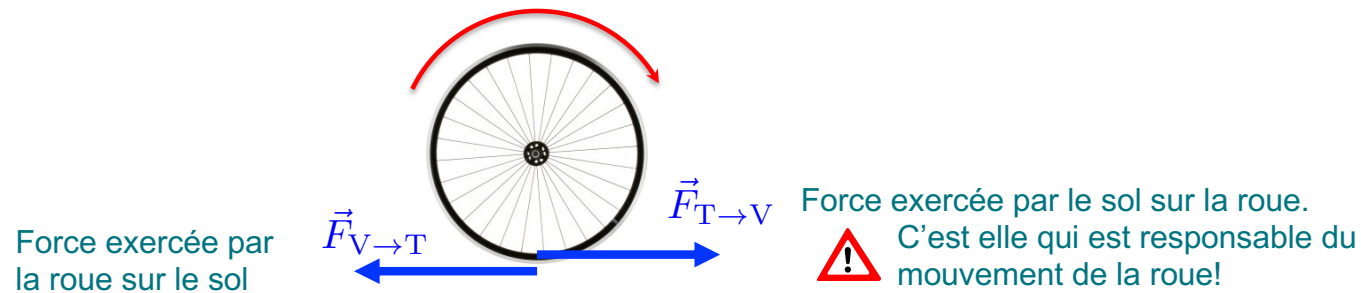
La troisième loi de Newton amène à redéfinir une force comme le fruit d'une **INTERACTION** entre deux objets.

Exemples

- La force que la terre exerce sur la lune est la même que celle que la lune exerce sur la terre.

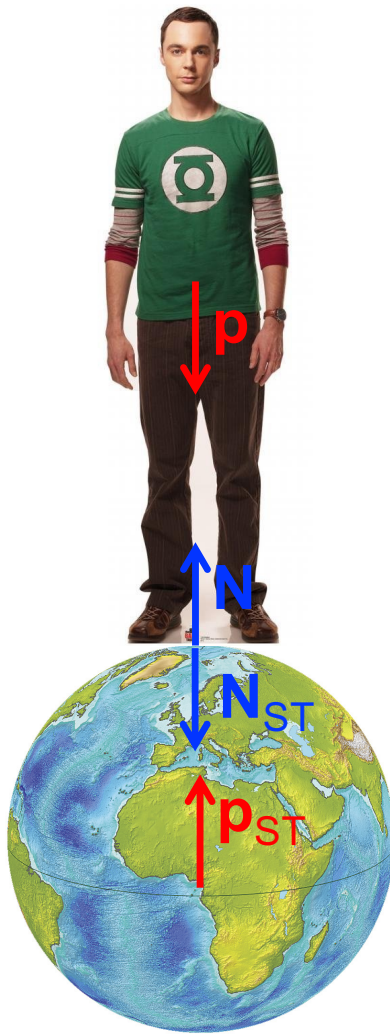


- La force qu'exerce un électron sur un ion est la même que celle que le ion exerce sur l'électron.
- Roue de vélo qui accélère:



Loi d'action-réaction

$$\vec{F}_{T \rightarrow V} = -\vec{F}_{V \rightarrow T}$$



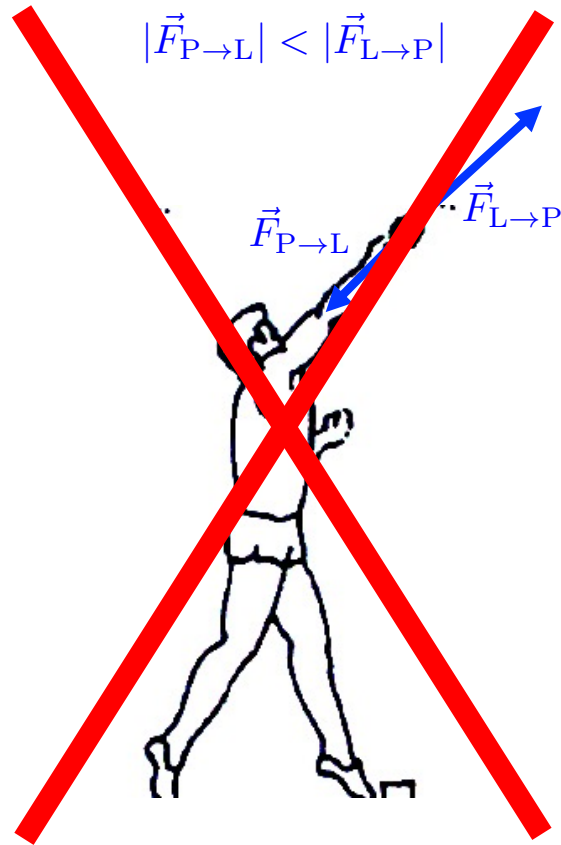
$$\vec{p} + \vec{N} = 0$$

- $\vec{p}$ est une force gravifique
- $\vec{N}$ est d'origine électromagnétique
- $\vec{N}$ et $\vec{p}$ ne forment **pas** une action-réaction
- Pour modéliser correctement le problème, il faut tenir compte de la terre.
- $\vec{p}$ et $\vec{p}_{ST}$ sont de même nature et forment une paire action-réaction
- $\vec{N}$ et $\vec{N}_{ST}$ forment également une paire action-réaction.

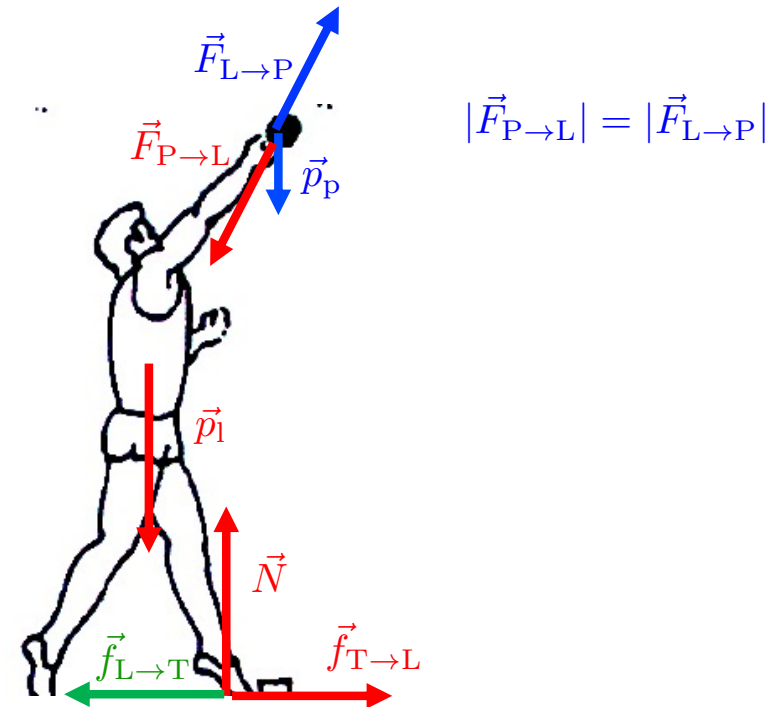


Loi d'action-réaction: erreurs à ne pas commettre

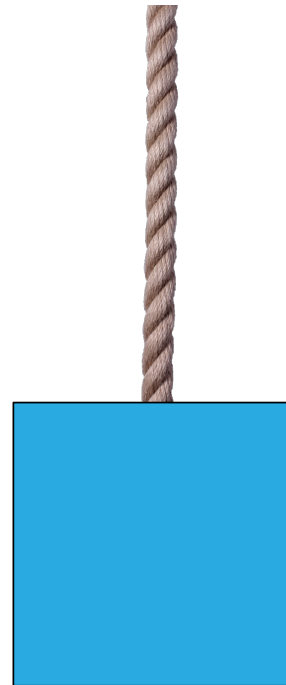
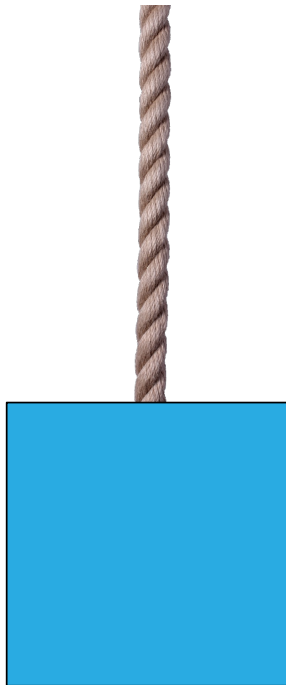
- Le poids est accéléré.



- Il faut tenir compte de toutes les forces agissant sur le système (ici: poids et/ou lanceur)



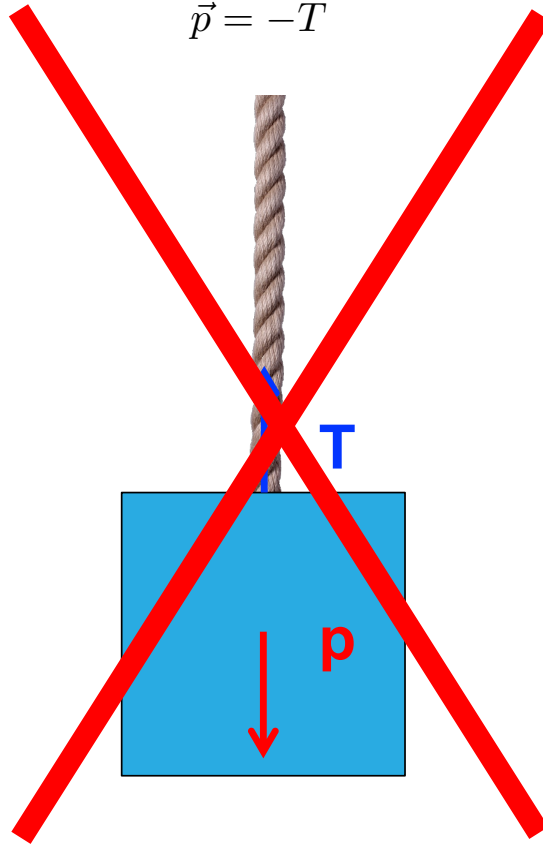
- Action-réaction:



Loi d'action-réaction: erreurs à ne pas commettre

- Action-réaction:

$$\vec{p} = -\vec{T}$$

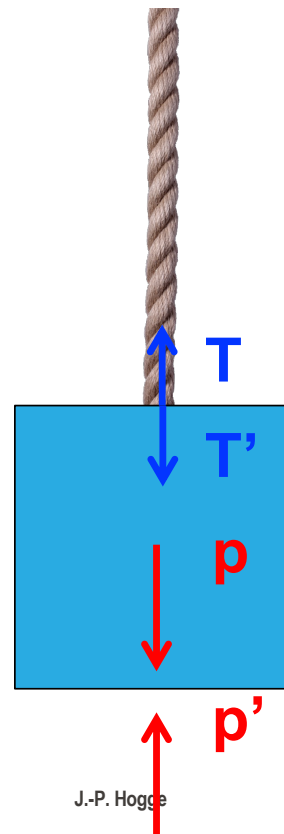


- $\mathbf{p}$ (gravitation) et $\mathbf{T}$ (traction, électromagnétique) ne sont pas de même nature.
- La réaction à $\mathbf{p}$ est la force $\mathbf{p}'$ que la masse exerce sur la terre
- La réaction à $\mathbf{T}$ est la force $\mathbf{T}'$ que la masse exerce sur la corde
- Action-réaction:

$$\vec{p}' = -\vec{p}$$

$$\vec{T}' = -\vec{T}$$

- ...et donc $\vec{p} \neq -\vec{T}$ (*)



(*) si M a une accélération non-nulle

Définition: Système sous considération

C'est l'utilisateur qui décide à quel système il veut appliquer les lois de la dynamique.

Exemples

- Pour lanceur de poids, on peut choisir
 - Le poids seul
 - Le poids et le lanceur
 - Le poids, le lanceur et la terre
- N points matériels en interaction, ou n'importe quel sous-ensemble parmi ceux-ci.

Définition: Forces intérieures et extérieures

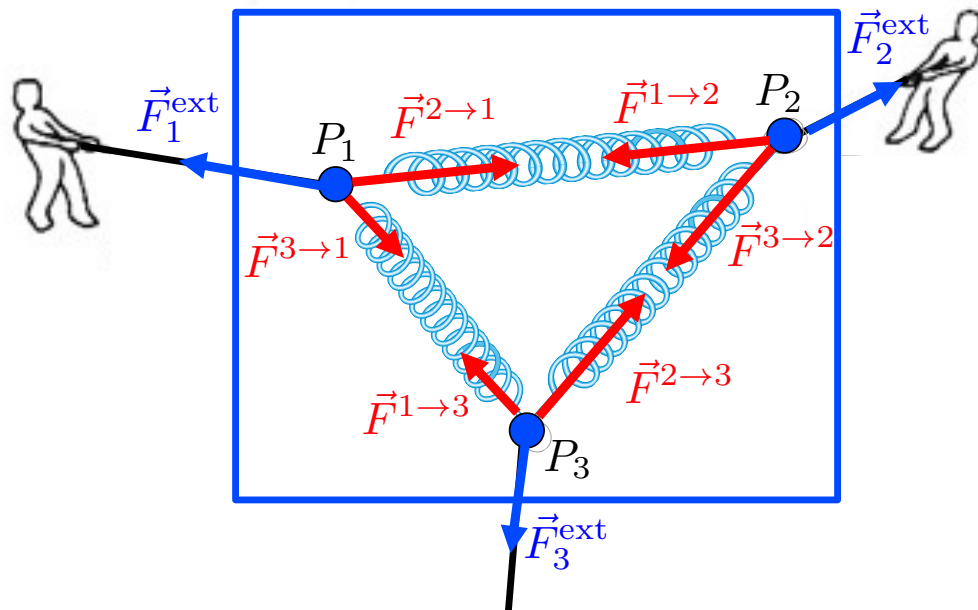
Se définissent par rapport au système sous considération.

Les forces extérieures sont celles qui résultent d'une action extérieure au système.

Les forces intérieures sont celles qui sont liées à une interaction interne au système.

Les forces exercées par le système sur le monde extérieur sont égales et opposées aux forces extérieures, mais ne rentrent pas dans le bilan de la seconde loi de Newton.

On considère un système de n (ici $n=3$) points matériels P_1 , P_2 et P_3 qui interagissent entre eux (**forces intérieures**) et qui sont soumis à des forces **extérieures**.



Quantité de mvt totale:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^3 \vec{p}_i$$

Deuxième loi de Newton:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i,j=1}^3 \vec{F}_i^{\text{ext}} + \vec{F}^{i \rightarrow j} + \vec{F}^{j \rightarrow i}$$

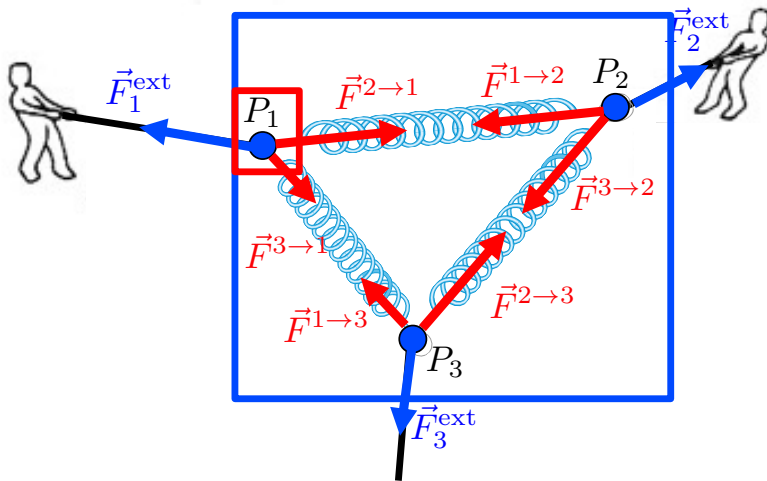
Troisième loi de Newton:

$$\vec{F}^{i \rightarrow j} + \vec{F}^{j \rightarrow i} = 0$$

Finalement:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^3 \vec{F}_i^{\text{ext}}$$

*La variation de la quantité de mouvement totale d'un système est égale à la somme des forces **extérieures**.*



Ex: Système = $P_1 + P_2 + P_3$

Ex: Système = P_1

Vous décidez des limites du système, p.ex ($P_1 + P_2 + P_3$) délimité par le rectangle bleu, ou juste P_1 , délimité par le rectangle rouge.

Il faut ensuite identifier les forces **extérieures** qui agissent directement sur votre système.

$$\vec{F}_1^{\text{ext}}, \vec{F}_2^{\text{ext}}, \vec{F}_3^{\text{ext}}$$

Forces extérieures:

$$\vec{F}^{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}^{1 \rightarrow 2}, \quad \vec{F}^{3 \rightarrow 1} = -\vec{F}^{1 \rightarrow 3}, \quad \vec{F}^{3 \rightarrow 2} = -\vec{F}^{2 \rightarrow 3}$$

Forces intérieures:

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3) = \vec{F}_1^{\text{ext}} + \vec{F}_2^{\text{ext}} + \vec{F}_3^{\text{ext}}$$

Seconde loi de Newton.

$$\vec{F}_1^{\text{ext}}, \vec{F}^{2 \rightarrow 1}, \vec{F}^{3 \rightarrow 1}$$

Forces extérieures.

$$\vec{F}_2^{\text{ext}}, \vec{F}_3^{\text{ext}}, \vec{F}^{1 \rightarrow 2}, \vec{F}^{1 \rightarrow 3}, \vec{F}^{2 \rightarrow 3}, \vec{F}^{3 \rightarrow 2}$$

N'agissent pas sur le système, donc ne rentrent pas dans le bilan,

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_1^{\text{ext}} + \vec{F}^{2 \rightarrow 1} + \vec{F}^{3 \rightarrow 1}$$

Seconde loi de Newton.

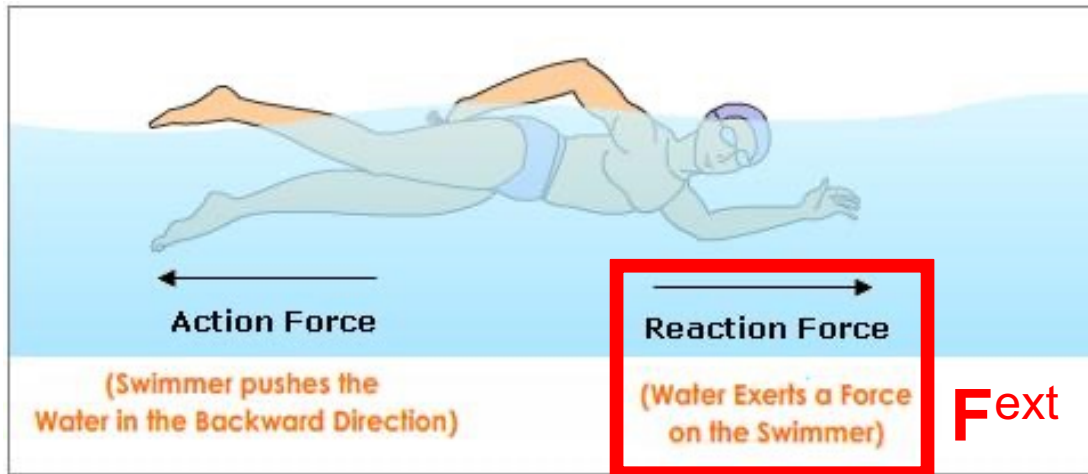


Lorsque vous considérez une force, il est très important d'identifier les éléments suivants:

- **Par quoi la force est-elle exercée?**
- **Sur quoi agit-elle?**
- **Quelle est sa réaction.**

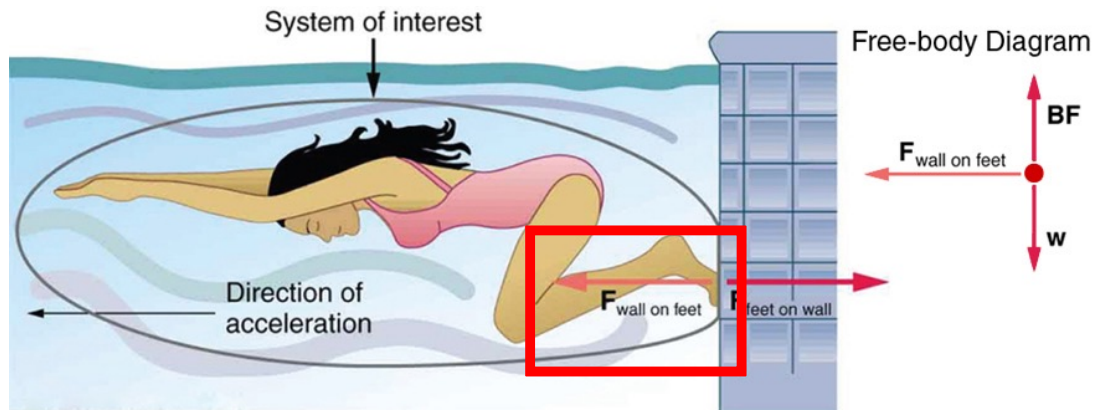
Vous pourrez ainsi isoler les forces qui agissent sur le système que vous considérez (et qui rentrent dans le bilan de Newton), et ignorer celles que le système exerce sur le monde extérieur.

Choix d'un système



Pour le système 'nageur + eau', il n'y a pas de force extérieure.

Pour le système 'nageur seul', la force de réaction exercée par l'eau est extérieure.



Pour le système 'nageuse + piscine', il n'y a pas de force extérieure.

Pour le système 'nageuse seule', la force de réaction exercée par le mur est extérieure.



$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{F}^{\text{ext}}$$

■ **Quelle est la force responsable du mouvement du cycliste et de son vélo ?**

La force exercée par la route sur la roue arrière du vélo. C'est une force extérieure, au même titre que le poids du système cycliste + vélo ou que les forces de soutien du sol sur les pneus.

Il s'agit d'une force de frottement statique, car la vitesse du point de la roue qui est en contact avec le sol est nulle.

Les autres forces (p.ex. action des pieds sur les pédales, action du pédalier sur la chaîne, action de la chaîne sur le pignon etc...) sont intérieures et ne rentrent pas dans le bilan)

Parenthèse: Vitesse du point de la roue en contact avec le sol

- Le fait que le point de contact de la roue qui est en contact avec le sol a une vitesse nulle (en cas de roulement sans glissement) peut sembler contre-intuitif. Imaginez que vous circulez avec l'engin ci-dessous.



La vitesse des chaussures qui touchent le sol est bien nulle!

En vertu de la loi d'action-réaction, la seconde loi de la dynamique ne fait intervenir que les forces extérieures au système qui est considéré.

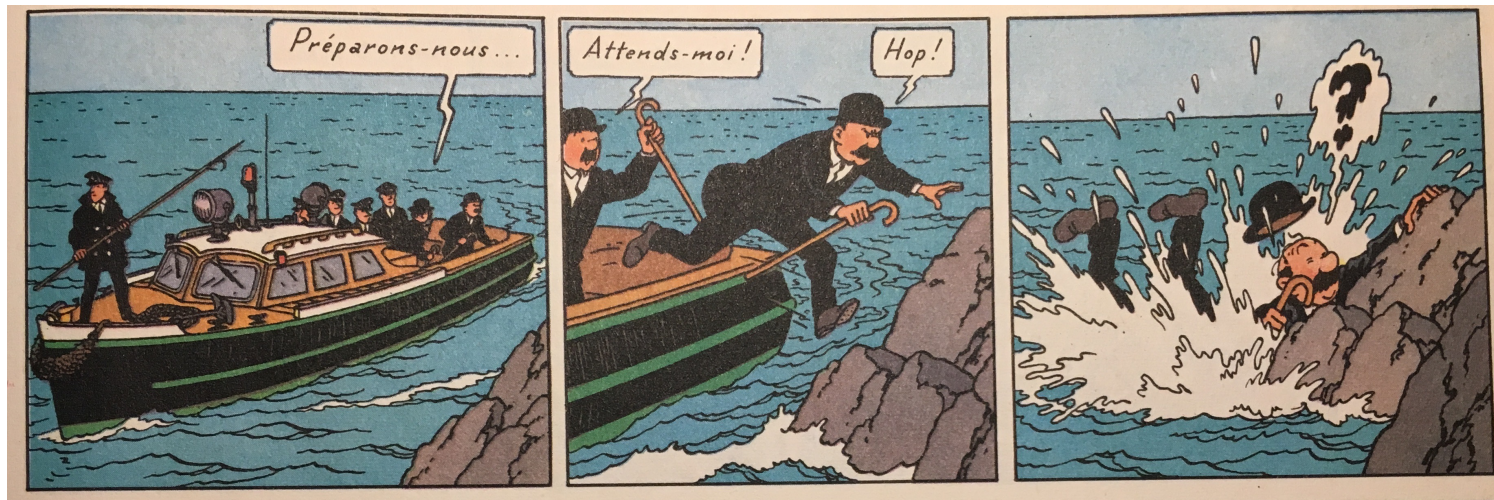
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{ext}}$$

En l'absence de forces extérieures, ou si la résultante des forces extérieures est nulle, alors la quantité de mouvement du système est constante!

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$$

Exemples:

- Choc mou ou élastique entre deux corps sur une table à coussin d'air)
- Quantité de mouvement totale d'une fusée et du gaz éjecté.
- Ensemble de points matériels en interaction, mais sans forces extérieures.



- Question: Pourquoi le policier tombe-t-il à l'eau ?
- Question subsidiaire: Dupond ou Dupont ?

- Une **force** est grandeur physique extensive et vectorielle, qui modifie l'état de repos ou de mouvement uniforme d'un objet.
- Vous déterminez les limites du système (= système sous considération) auquel vous allez appliquer les lois de la dynamique.
- Les **forces intérieures** ou **extérieures** se définissent par rapport au système considéré, selon qu'elles sont liées à une action interne ou externe au dit système. En fonction du système que vous considérez, une force peut être externe ou interne.
- La quantité de mouvement est définie par $\vec{p} = m\vec{v}$

C'est une grandeur extensive, vectorielle, qui peut varier sous l'action d'une force.

- **1^{ère} loi de Newton: Principe d'inertie**

“Dans un référentiel d'inertie, tout point matériel ne subissant aucune interaction (force) a une vitesse constante, éventuellement nulle.”

- **Référentiel d'inertie:** *tout référentiel dans lequel la première loi est satisfaite*

- **2^{ème} loi de Newton: Loi de la dynamique**

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$\vec{F}$: résultante des forces extérieures
 $\vec{p} = m\vec{v}$: quantité de mouvement

- **3^{ème} loi de Newton: Action-Réaction**

‘A toute action, il y a toujours une réaction égale qui lui est opposée.’

Les actions mutuelles de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et opposées.

- ***L'action et la réaction sont des forces de même nature***

■ Conservation de la quantité de mouvement :

Si la résultante des forces extérieures est nulle, alors la quantité de mouvement est une grandeur conservée

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i^{\text{ext}} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \vec{v} = \text{cste}$$

Annexe: Définition de la quantité de mouvement par l'expérience

Relation entre la quantité de mouvement et la masse

1. La quantité de mouvement est – par construction- une grandeur extensive.
2. La masse est aussi une grandeur extensive
3. Le rapport entre deux grandeurs extensives est une grandeur intensive (i.e. qui ne dépend pas de la taille du système)

De 1. on tire que $\vec{p}(k m, \vec{v}) = k \vec{p}(m, \vec{v})$ où k est un réel quelconque.

On dérive par rapport à k : $\frac{\partial \vec{p}(k m, \vec{v})}{\partial k} = \frac{\partial (k \vec{p}(m, \vec{v}))}{\partial k} = \vec{p}(m, \vec{v})$

Et $\frac{\partial \vec{p}(k m, \vec{v})}{\partial k} = \frac{\partial \vec{p}(k m, \vec{v})}{\partial (k m)} \frac{\partial (k m)}{\partial k} = \frac{\partial \vec{p}(m, \vec{v})}{\partial m} m$

Relation entre la quantité de mouvement et la masse (suite)

D'où en combinant:

$$\underbrace{\frac{\partial \vec{p}(m, \vec{v})}{\partial m}}_{\text{Intensive, ne dépend pas de la taille du système, donc pas de } m} = \frac{\vec{p}(m, \vec{v})}{m}$$

← Extensive
← Extensive

Intensive, ne dépend pas
de la taille du système,
donc pas de m

Si on appelle

$$\frac{\partial \vec{p}(m, \vec{v})}{\partial m} = f(\vec{v}) \quad \Rightarrow \quad \vec{p}(m, \vec{v}) = m f(\vec{v})$$

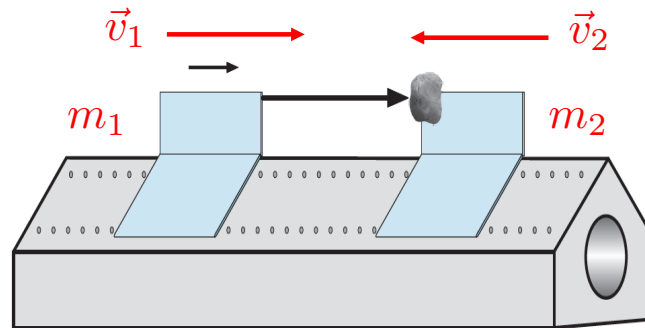
Et donc:

$$\vec{p}(m, \vec{v}) \propto m$$

La quantité de mouvement est
proportionnelle à la masse

Relation entre la quantité de mouvement et la vitesse

Une série **d'expériences** sur des chariots glissant sur un rail à coussin d'air permet de vérifier que la quantité de mouvement est proportionnelle à la vitesse.



On a 2 chariots qui portent des masses m_1 et m_2 et qui glissent avec des vitesses v_1 et v_2 , de sens opposé, sur le rail à coussin d'air. Lors de la collision, la pointe du premier chariot rentre dans la pâte à modeler du second, et les deux chariots restent collés.

Relation entre la quantité de mouvement et la vitesse (suite)

Expérience 1:

Les deux chariot portent la même masse ($m_1 = m_2$), et ont la même vitesse, en sens opposé ($\vec{v}_1 = -\vec{v}_2$). Ils portent donc les mêmes quantités de mouvement en norme, mais opposées en direction. La quantité de mouvement totale est donc nulle.

On constate qu'après le choc, la vitesse des deux chariots est nulle. La quantité de mouvement du système ($m_1 + m_2$) est donc nulle.

Résultat: la quantité de mouvement totale est conservée lors du choc.*

* Nous avons vu que c'est une conséquence directe de la troisième loi de Newton et de l'absence de force extérieure.

Relation entre la quantité de mouvement et la vitesse (suite)Expérience 2:

On choisit $m_2 = m_1/2$ et on détermine la vitesse $\mathbf{v}_2$ telle que les deux chariots sont à l'arrêt après le choc

Résultat: Pour que les deux chariots s'arrêtent, il faut que $\mathbf{v}_2 = -2\mathbf{v}_1$

En résumant:
$$\vec{p}(m_1, \vec{v}_1) = \vec{p}\left(\frac{m_1}{2}, 2\vec{v}_1\right) = \frac{1}{2}\vec{p}(m_1, 2\vec{v}_1)$$

la masse et la quantité de mouvement sont des grandeurs extensives

D'où
$$\vec{p}(m_1, 2\vec{v}_1) = 2\vec{p}(m_1, \vec{v}_1)$$

Et donc:
$$\vec{p}(m, \vec{v}) \propto \vec{v}$$

La quantité de mouvement est proportionnelle à la vitesse

Finalement:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{p}(m, \vec{v}) \propto \vec{v} \\ \vec{p}(m, \vec{v}) \propto m \end{array} \right\} \boxed{\vec{p}(m, \vec{v}) = m\vec{v}}$$