

# Loi de la quantité de mouvement

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

Lundi 10 janvier 2022

# Loi de la quantité de mouvement

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

Lundi 10 janvier 2022

# 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

## 3. Exemples fondamentaux de forces

# 1. États de mouvement d'un point matériel

## 1.1 Masse

## 1.2 Quantité de mouvement

## 2. Lois de Newton

## 3. Exemples fondamentaux de forces

# Observations

- ▶ Il faut exercer une « action » sur un objet pour changer sa vitesse (en norme/en direction).

# Observations

- ▶ Il faut exercer une « action » sur un objet pour changer sa vitesse (en norme/en direction).
- ▶ Une même « action » a des effets différents selon l'objet : chacun possède une **inertie** différente. Plus l'inertie est élevée, plus il est difficile de changer la vitesse.

# Définition expérimentale

## Définition (Masse inertielle)

L'inertie d'un point matériel est sa résistance à tout changement de son état de mouvement. Elle est caractérisée par la **masse inertielle**, de symbole  $m$ .

- ▶ c'est une grandeur scalaire positive intrinsèque, indépendante du référentiel,
- ▶ elle est **conservée** pour tout système **fermé**
- ▶ sa dimension est notée  $M$ . l'unité légale de masse inertielle est le kilogramme ; il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck,  $h$ , égale à  $6,62607015 \cdot 10^{-34}$  lorsqu'elle est exprimée en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  de symbole  $\text{kg}$

# Définition expérimentale

- ▶ un système est dit **fermé** s'il n'échange pas de matière avec l'extérieur
- ▶ jusqu'en 2019, la masse était définie par un étalon de platine-iridium, conservé au Bureau International des Poids et Mesures
- ▶ Avec la nouvelle définition, on peut « matérialiser » un 1 kg grâce à une balance de Kibble dans laquelle on compense le poids de l'objet étudié par une force magnétique dont la mesure de l'intensité met en jeu entre autres la constante de Planck.





# 1. États de mouvement d'un point matériel

## 1.1 Masse

## 1.2 Quantité de mouvement

## 2. Lois de Newton

## 3. Exemples fondamentaux de forces

# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

- ▶ on peut considérer  $\mathcal{S}$  comme une réunion d'objets très petits (devant l'échelle d'observation), assimilés à des points matériels

# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

- ▶ on peut considérer  $\mathcal{S}$  comme une réunion d'objets très petits (devant l'échelle d'observation), assimilés à des points matériels
- ▶ un solide en translation est aussi un point matériel car un seul vecteur vitesse suffit pour décrire son mouvement


# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

- ▶ on peut considérer  $\mathcal{S}$  comme une réunion d'objets très petits (devant l'échelle d'observation), assimilés à des points matériels
- ▶ un solide en translation est aussi un point matériel car un seul vecteur vitesse suffit pour décrire son mouvement
- ▶ ☠ un objet très petit n'est pas nécessairement un point matériel :


# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

- ▶ on peut considérer  $\mathcal{S}$  comme une réunion d'objets très petits (devant l'échelle d'observation), assimilés à des points matériels
- ▶ un solide en translation est aussi un point matériel car un seul vecteur vitesse suffit pour décrire son mouvement
- ▶  un objet très petit n'est pas nécessairement un point matériel :
  - ▶ le mouvement d'une très petite bille en rotation est différent du cas en translation

# Du point géométrique à l'objet physique


on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

- ▶ on peut considérer  $\mathcal{S}$  comme une réunion d'objets très petits (devant l'échelle d'observation), assimilés à des points matériels
- ▶ un solide en translation est aussi un point matériel car un seul vecteur vitesse suffit pour décrire son mouvement
- ▶  un objet très petit n'est pas nécessairement un point matériel :
  - ▶ le mouvement d'une très petite bille en rotation est différent du cas en translation
  - ▶ le mouvement d'un très petit aimant dépend de son orientation



# Du point géométrique à l'objet physique

on sait faire la cinématique du point (un vecteur vitesse) ; comment décrire un objet macroscopique  $\mathcal{S}$  à l'aide de points ?

- ▶ on peut considérer  $\mathcal{S}$  comme une réunion d'objets très petits (devant l'échelle d'observation), assimilés à des points matériels
- ▶ un solide en translation est aussi un point matériel car un seul vecteur vitesse suffit pour décrire son mouvement
- ▶  un objet très petit n'est pas nécessairement un point matériel :
  - ▶ le mouvement d'une très petite bille en rotation est différent du cas en translation
  - ▶ le mouvement d'un très petit aimant dépend de son orientation
  - ▶ le mouvement d'un proton/électron dépend de son état de spin

# Modèle

## Modèle du point matériel

Un **point matériel** est un modèle idéalisé d'objet physique sans dimension, pourvu d'une masse, et pour lequel on peut établir une équation différentielle régissant le mouvement.

# Modèle

## Modèle du point matériel

Un **point matériel** est un modèle idéalisé d'objet physique sans dimension, pourvu d'une masse, et pour lequel on peut établir une équation différentielle régissant le mouvement.

- ▶ la cinématique du point sera suffisante

# Modèle

## Modèle du point matériel

Un **point matériel** est un modèle idéalisé d'objet physique sans dimension, pourvu d'une masse, et pour lequel on peut établir une équation différentielle régissant le mouvement.

- ▶ la cinématique du point sera suffisante
- ▶ on verra que le centre d'inertie  $G$  de  $\mathcal{S}$ , affecté de la masse totale  $m$  est le meilleur exemple de point matériel

# Modèle

## Modèle du point matériel

Un **point matériel** est un modèle idéalisé d'objet physique sans dimension, pourvu d'une masse, et pour lequel on peut établir une équation différentielle régissant le mouvement.

- ▶ la cinématique du point sera suffisante
- ▶ on verra que le centre d'inertie  $G$  de  $\mathcal{S}$ , affecté de la masse totale  $m$  est le meilleur exemple de point matériel
- ▶ ☠ on ne remplace pas un objet complexe par un point : on découple simplement le mouvement d'ensemble de  $\mathcal{S}$  de son mouvement par rapport à  $G$  (rotation/dilatation...)

# Quantité de mouvement

## Définition (Quantité de mouvement)

On définit la **quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}$** , notée  $\vec{p}_{\mathcal{R}}(M)$ , d'un point matériel comme le produit de sa masse inertielle  $m$  par sa vitesse  $\vec{v}_{\mathcal{R}}$  :

$$\vec{p}_{\mathcal{R}}(M) = m\vec{v}_{\mathcal{R}}(M).$$

# Quantité de mouvement

## Définition (Quantité de mouvement)

On définit la **quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}$** , notée  $\vec{p}_{\mathcal{R}}(M)$ , d'un point matériel comme le produit de sa masse inertielle  $m$  par sa vitesse  $\vec{v}_{\mathcal{R}}$  :

$$\vec{p}_{\mathcal{R}}(M) = m\vec{v}_{\mathcal{R}}(M).$$

- ▶ aussi nommée **impulsion**

# Quantité de mouvement

## Définition (Quantité de mouvement)

On définit la **quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}$** , notée  $\vec{p}_{\mathcal{R}}(M)$ , d'un point matériel comme le produit de sa masse inertielle  $m$  par sa vitesse  $\vec{v}_{\mathcal{R}}$  :

$$\vec{p}_{\mathcal{R}}(M) = m\vec{v}_{\mathcal{R}}(M).$$

- ▶ aussi nommée **impulsion**
- ▶ grandeur vectorielle incorporant  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)$  et l'inertie



# Système de points matériels

cas important : système fermé (composition invariable) de points matériels  $\{M_i\}_{i=1..N}$  de masses  $\{m_i\}_{i=1..N}$

# Système de points matériels

## Définition (Centre d'inertie d'un système fermé)

On nomme **centre d'inertie** d'un système fermé de  $N$  points matériels, noté  $\{M_i\}_{i=1..N}$  de masses  $\{m_i\}_{i=1..N}$ , de masse totale  $m_{\text{tot}} = \sum_i m_i$ , le point noté  $G$  tel que :

$$\forall A : \sum_i m_i \overrightarrow{AM_i} = m_{\text{tot}} \overrightarrow{AG} \quad \text{équivalent à} : \sum_i m_i \overrightarrow{GM_i} = \vec{0}.$$

# Cas $N = 2$

## Centre d'inertie d'un système de 2 points matériels

$$\overrightarrow{GM_2} = \frac{m_1}{m_{\text{tot}}} \overrightarrow{M_1 M_2} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{GM_1} = -\frac{m_2}{m_{\text{tot}}} \overrightarrow{M_1 M_2}$$

# Cas $N = 2$

## Centre d'inertie d'un système de 2 points matériels

$$\overrightarrow{GM_2} = \frac{m_1}{m_{\text{tot}}} \overrightarrow{M_1M_2} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{GM_1} = -\frac{m_2}{m_{\text{tot}}} \overrightarrow{M_1M_2}$$

- ▶  $G$  est situé sur le segment  $[M_1M_2]$ .
- ▶  $G$  est plus proche du point matériel le plus massif ( $G \simeq M_2$  si  $m_2 \gg m_1$ )
- ▶ à 3 corps : [http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Meca/Systemes/Barycentre\\_3\\_F.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Systemes/Barycentre_3_F.php)

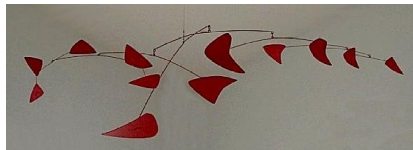
# Quantité de mouvement

## Quantité de mouvement d'un système de points matériels

La **quantité de mouvement** dans un référentiel  $\mathcal{R}$  d'un **système**  $\mathcal{S}$  de  $N$  points matériels, notée  $\vec{p}_{\mathcal{R}}(\mathcal{S})$ , est égale à la quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}$  d'un point matériel de masse  $m_{\text{tot}} = \sum_i m_i$  et situé au centre d'inertie de  $\mathcal{S}$ .

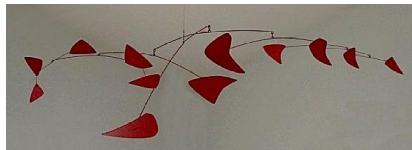
$$\vec{p}_{\mathcal{R}}(\mathcal{S}) = m_{\text{tot}} \vec{v}_{\mathcal{R}}(G)$$

# Système fermé quelconque



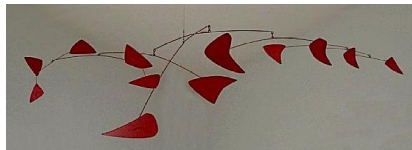
# Système fermé quelconque

- ▶ on peut adopter de la même manière une description **continue** de  $\mathcal{S}$  avec une **infinité** de points matériels, de masses et tailles infinitésimales pour définir le centre d'inertie  $G$  de tout objet



# Système fermé quelconque

- ▶ on peut adopter de la même manière une description **continue** de  $\mathcal{S}$  avec une **infinité** de points matériels, de masses et tailles infinitésimales pour définir le centre d'inertie  $G$  de tout objet
- ▶ le « vecteur vitesse de  $\mathcal{S}$  » désignera en fait celui de  $G$





1. États de mouvement d'un point matériel

2. Lois de Newton

3. Exemples fondamentaux de forces

- ▶ on étudie le mouvement d'un point matériel, ce sera le centre d'inertie du système fermé considéré
- ▶ trois lois sont nécessaires et suffisent pour fonder toute la mécanique du point

## 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

### 2.1 1<sup>re</sup> loi : Principe d'inertie

### 2.2 2<sup>e</sup> loi : Forces

### 2.3 3<sup>e</sup> loi : Principe des actions réciproques

## 3. Exemples fondamentaux de forces

# Énoncé

On cherche à établir la loi des variations de vitesse : il faut pour cela préciser le référentiel dans lequel on l'observe.

# Énoncé

## Principe d'inertie

Il existe une classe de référentiels privilégiés dans lesquels le mouvement de tout point matériel **isolé** est rectiligne uniforme. Ils sont dits **galiléens**, notés  $\mathcal{R}_g$ .

# Énoncé

## Principe d'inertie

Il existe une classe de référentiels privilégiés dans lesquels le mouvement de tout point matériel **isolé** est rectiligne uniforme. Ils sont dits **galiléens**, notés  $\mathcal{R}_g$ .

# Énoncé

## Principe d'inertie

Il existe une classe de référentiels privilégiés dans lesquels le mouvement de tout point matériel **isolé** est rectiligne uniforme. Ils sont dits **galiléens**, notés  $\mathcal{R}_g$ .

- **PM isolé** si aucun autre objet physique n'exerce d'action sur lui, ou s'il est suffisamment loin de tout objet. Exemple : **une comète** tant qu'elle est loin de tout astre du système solaire

# Énoncé

## Principe d'inertie

Il existe une classe de référentiels privilégiés dans lesquels le mouvement de tout point matériel **isolé** est rectiligne uniforme. Ils sont dits **galiléens**, notés  $\mathcal{R}_g$ .

- ▶ **PM isolé** si aucun autre objet physique n'exerce d'action sur lui, ou s'il est suffisamment loin de tout objet. Exemple : **une comète tant qu'elle est loin de tout astre du système solaire**
- ▶ énoncé par Galilée pour une bille sur un plan horizontal en l'absence de frottement.



# Référentiel terrestre


on admet pour l'instant :

# Référentiel terrestre

## Caractère galiléen approché du référentiel terrestre

Le référentiel terrestre  $\mathcal{R}_t$ , lié à la surface de la Terre, sera considéré galiléen pour la durée des expériences envisagées. L'accélération  $\vec{a}_{\mathcal{R}_t}$  de tout point matériel **isolé** y sera donc nulle.

# Référentiel terrestre

- ▶ « Lié à la Terre » : immobile par rapport à la Terre, aux murs de la classe...
- ▶ on peut choisir l'axe des pôles, deux axes pointant vers deux points de l'équateur de longitude  $0^\circ$  et  $90^\circ$
- ▶  pas rigoureusement galiléen : si l'observation est assez longue, le mouvement d'un point isolé s'infléchira toujours (cas du pendule de Foucault à l'échelle de l'heure)
- ▶ on parlera de référentiel galiléen pour la durée de l'expérience

# Classe des référentiels galiléens

plusieurs référentiels peuvent-ils être galiléens ?

# Classe des référentiels galiléens

plusieurs référentiels peuvent-ils être galiléens ?

## Classe des référentiels galiléens

La classe des référentiels galiléens est constituée des référentiels en **translation rectiligne uniforme** par rapport à l'un d'entre eux.

# Autres référentiels usuels

on cherche des référentiels « de plus en plus galiléens »

# Autres référentiels usuels

## Définition (Référentiels usuels)

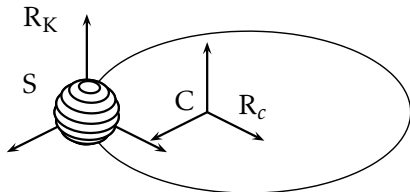
Le référentiel de **Copernic** ( $\mathcal{R}_C$ ) est le référentiel :

- ▶ dans lequel le centre d'inertie du système solaire est fixe ;
- ▶ dont les axes cartésiens pointent vers trois étoiles fixes.

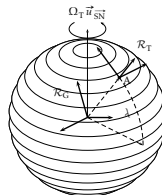
Le référentiel de **Kepler** ( $\mathcal{R}_K$ ), dit **héliocentrique**, est le référentiel en translation par rapport au référentiel de Copernic mais dont l'origine est confondue avec le centre d'inertie du Soleil.

Le référentiel **géocentrique** ( $\mathcal{R}_G$ ), est le référentiel en translation par rapport au référentiel de Copernic mais dont l'origine est confondue avec le centre d'inertie de la Terre.

# Autres référentiels usuels



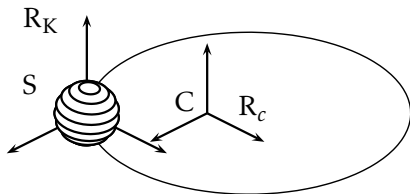
Référentiels de Copernic  $\mathcal{R}_C$ , Kepler  $\mathcal{R}_K$



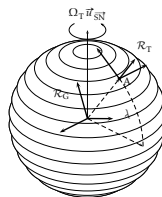
Référentiels géocentrique  $\mathcal{R}_G$ , et terrestre  $\mathcal{R}_T$



# Autres référentiels usuels



Référentiels de Copernic  $\mathcal{R}_C$ , Kepler  $\mathcal{R}_K$



Référentiels géocentrique  $\mathcal{R}_G$ , et terrestre  $\mathcal{R}_T$

- ▶ Copernic > Képler > géocentrique (ils sont en translation non rectiligne uniforme les uns dans les autres) > terrestre (en rotation par rapport au géocentrique)
- ▶ on utilisera le référentiel géocentrique pour des mouvements de satellite (périodes de quelques heures)
- ▶ Képler pour les mouvements des planètes (périodes de quelques années)

## 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

### 2.1 1<sup>re</sup> loi : Principe d'inertie

### 2.2 2<sup>e</sup> loi : Forces

### 2.3 3<sup>e</sup> loi : Principe des actions réciproques

## 3. Exemples fondamentaux de forces

# Loi de la quantité de mouvement

La quantité de mouvement est vectorielle, ce sont donc des objets vectoriels qui la font varier :

# Loi de la quantité de mouvement

## Loi de la quantité de mouvement

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}_g$ , la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle dans  $\mathcal{R}_g$  de sa quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}_g$  :

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g} \text{ Relation fondamentale de la dynamique.}$$

Une telle force, définie **expérimentalement** dans  $\mathcal{R}_g$ , est dite **galiléenne**.

# Loi de la quantité de mouvement

## Loi de la quantité de mouvement

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}_g$ , la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle dans  $\mathcal{R}_g$  de sa quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}_g$  :

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g} \text{ Relation fondamentale de la dynamique.}$$

Une telle force, définie **expérimentalement** dans  $\mathcal{R}_g$ , est dite **galiléenne**.

# Loi de la quantité de mouvement

## Loi de la quantité de mouvement

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}_g$ , la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle dans  $\mathcal{R}_g$  de sa quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}_g$  :

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g} \text{ Relation fondamentale de la dynamique.}$$

Une telle force, définie **expérimentalement** dans  $\mathcal{R}_g$ , est dite **galiléenne**.

- ▶ valable pour le centre d'inertie  $G$  de **tout système**, quelles que soient sa taille et sa nature

# Loi de la quantité de mouvement

## Loi de la quantité de mouvement

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}_g$ , la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle dans  $\mathcal{R}_g$  de sa quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}_g$  :

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g} \text{ Relation fondamentale de la dynamique.}$$

Une telle force, définie **expérimentalement** dans  $\mathcal{R}_g$ , est dite **galiléenne**.

- ▶ valable pour le centre d'inertie  $G$  de **tout système**, quelles que soient sa taille et sa nature
- ▶ exprimée en Newtons  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

# Loi de la quantité de mouvement

## Loi de la quantité de mouvement

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}_g$ , la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle dans  $\mathcal{R}_g$  de sa quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}_g$  :

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g} \text{ Relation fondamentale de la dynamique.}$$

Une telle force, définie **expérimentalement** dans  $\mathcal{R}_g$ , est dite **galiléenne**.

- ▶ valable pour le centre d'inertie  $G$  de **tout système**, quelles que soient sa taille et sa nature
- ▶ exprimée en Newtons  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- ▶ *Principia Mathematica* 1687




# Loi de la quantité de mouvement

## Loi de la quantité de mouvement

Dans un référentiel galiléen  $\mathcal{R}_g$ , la force  $\vec{F}$  qui s'exerce sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle dans  $\mathcal{R}_g$  de sa quantité de mouvement dans  $\mathcal{R}_g$  :

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g} \text{ Relation fondamentale de la dynamique.}$$

Une telle force, définie **expérimentalement** dans  $\mathcal{R}_g$ , est dite **galiléenne**.

- ▶ valable pour le centre d'inertie  $G$  de **tout système**, quelles que soient sa taille et sa nature
- ▶ exprimée en Newtons  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- ▶ *Principia Mathematica* 1687
- ▶  il faut  $m = \text{cste}$  pour écrire  $\vec{F} = m \vec{a}$ .

# 3 utilisations

- ▶  $m$  connue et  $\vec{a}_{\mathcal{R}_g}(M)$  observée  $\rightarrow \vec{F}$ ,
- ▶  $m$  et  $\vec{F} \rightarrow$  détermine  $\vec{a}$ ,
- ▶  $\vec{F}$  et  $\vec{a} \rightarrow m$

# Additivité vectorielle

## Additivité vectorielle

Si des objets  $S_i$  exercent, dans certaines conditions et séparément, la force  $\vec{F}_i$  sur un point matériel, l'ensemble des objets  $S_i$  exerce, dans les mêmes conditions, sur le point matériel la force :

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i,$$

nommée **résultante des forces appliquées** au point matériel.

# Additivité vectorielle

## Additivité vectorielle

Si des objets  $S_i$  exercent, dans certaines conditions et séparément, la force  $\vec{F}_i$  sur un point matériel, l'ensemble des objets  $S_i$  exerce, dans les mêmes conditions, sur le point matériel la force :

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i,$$

nommée **résultante des forces appliquées** au point matériel.

# Additivité vectorielle

## Additivité vectorielle

Si des objets  $S_i$  exercent, dans certaines conditions et séparément, la force  $\vec{F}_i$  sur un point matériel, l'ensemble des objets  $S_i$  exerce, dans les mêmes conditions, sur le point matériel la force :

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i,$$

nommée **résultante des forces appliquées** au point matériel.

- vérifié expérimentalement :  $m\vec{a}_{\mathcal{R}_g} = \sum_i m\vec{a}_{\mathcal{R}_{g_i}} = \sum_i \vec{F}_i$

# Additivité vectorielle

## Additivité vectorielle

Si des objets  $S_i$  exercent, dans certaines conditions et séparément, la force  $\vec{F}_i$  sur un point matériel, l'ensemble des objets  $S_i$  exerce, dans les mêmes conditions, sur le point matériel la force :

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i,$$

nommée **résultante des forces appliquées** au point matériel.

- ▶ vérifié expérimentalement :  $m\vec{a}_{\mathcal{R}_g} = \sum_i m\vec{a}_{\mathcal{R}_{g_i}} = \sum_i \vec{F}_i$
- ▶ les « conditions » sont les positions, orientations, vitesses relatives de  $M_i$  et des  $S_i$ .

# Point matériel pseudo-isolé

Cas particulier où  $\vec{F} = \vec{0}$ .

# Point matériel pseudo-isolé

## Point matériel pseudo-isolé

Un point matériel est dit **pseudo-isolé** si la résultante des forces galiléennes auxquelles il est soumis est nulle.



# Point matériel pseudo-isolé

## Point matériel pseudo-isolé

Un point matériel est dit **pseudo-isolé** si la résultante des forces galiléennes auxquelles il est soumis est nulle.

## Mouvement d'un point matériel pseudo-isolé

Un point matériel **pseudo-isolé** est animé, dans un référentiel galiléen, d'un mouvement rectiligne uniforme.

# Point matériel pseudo-isolé

## Point matériel pseudo-isolé

Un point matériel est dit **pseudo-isolé** si la résultante des forces galiléennes auxquelles il est soumis est nulle.

## Mouvement d'un point matériel pseudo-isolé

Un point matériel **pseudo-isolé** est animé, dans un référentiel galiléen, d'un mouvement rectiligne uniforme.

pour un solide immobile sur un support horizontal, dans  $\mathcal{R}_I$ , on a :

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

# Équilibre d'un point matériel

## Définition (Équilibre)

Un point matériel est dit **en équilibre** dans un référentiel  $\mathcal{R}$  si  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)(t) = \vec{0}$  à chaque instant  $t$ .

# Équilibre d'un point matériel

## Définition (Équilibre)

Un point matériel est dit **en équilibre dans un référentiel  $\mathcal{R}$**  si  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)(t) = \vec{0}$  à chaque instant  $t$ .

## Condition nécessaire d'équilibre

La résultante des forces appliquées à un point matériel en équilibre dans  $\mathcal{R}_g$  galiléen est **nécessairement** nulle :

$$\sum \vec{F}_i = \vec{0}.$$

# Équilibre d'un point matériel

## Définition (Équilibre)

Un point matériel est dit **en équilibre dans un référentiel  $\mathcal{R}$**  si  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)(t) = \vec{0}$  à chaque instant  $t$ .

## Condition nécessaire d'équilibre

La résultante des forces appliquées à un point matériel en équilibre dans  $\mathcal{R}_g$  galiléen est **nécessairement** nulle :

$$\sum \vec{F}_i = \vec{0}.$$

cette condition n'est **pas suffisante** :  $\sum \vec{F}_i = \vec{0}$  assure  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M) = \text{cste}$  pas  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M) = \vec{0}$  : cas d'un palet sur une patinoire tant qu'on néglige les frottements

# Déterminisme mécanique

## Déterminisme mécanique

L'étude du mouvement d'un point matériel de position  $M$  et de vitesse  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)$  dans un référentiel  $\mathcal{R}$ , soumis à une résultante  $\vec{F}$  **ne dépendant que de sa position  $M$ , de sa vitesse  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)$  et du temps  $t$**  est un problème **déterministe** : il est défini de manière unique par la position  $M_0$  et la vitesse  $\vec{v}_{\mathcal{R}}(M)_0$  à un même instant  $t_0$ .

# Évolutions libres et forcées

## Définition (Évolutions libres et forcées)

L'évolution d'un système mécanique est dite :

**libre** si les forces ne dépendent pas explicitement du temps,  
**forcée** dans le cas contraire.

# Évolutions libres et forcées

## Définition (Évolutions libres et forcées)

L'évolution d'un système mécanique est dite :

**libre** si les forces ne dépendent pas explicitement du temps,  
**forcée** dans le cas contraire.

**libre** PM soumis à son poids, à la force exercée par un ressort dont l'autre extrémité est fixe, à une force de frottement fluide/solide

**forcée** PM soumis à la force d'un ressort dont un opérateur déplace l'autre extrémité.



# Évolutions libres et forcées

## Définition (Évolutions libres et forcées)

L'évolution d'un système mécanique est dite :

**libre** si les forces ne dépendent pas explicitement du temps,  
**forcée** dans le cas contraire.

**libre** PM soumis à son poids, à la force exercée par un ressort dont l'autre extrémité est fixe, à une force de frottement fluide/solide

**forcée** PM soumis à la force d'un ressort dont un opérateur déplace l'autre extrémité.

## Pas d'intersection

Deux trajectoires dans l'espace des phases d'un même système mécanique **libre** ne se croisent jamais.

## 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

### 2.1 1<sup>re</sup> loi : Principe d'inertie

### 2.2 2<sup>e</sup> loi : Forces

### 2.3 3<sup>e</sup> loi : Principe des actions réciproques

## 3. Exemples fondamentaux de forces

# Principe des actions réciproques

## Principe des actions réciproques

Soient  $M_1$  et  $M_2$  deux points matériels en interaction. Si  $M_1$  exerce la force  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  sur 2, alors :

- ▶  $M_2$  exerce une force  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$  sur 1,
- ▶ ces deux forces sont opposées :  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ,

# Principe des actions réciproques

## Principe des actions réciproques

Soient  $M_1$  et  $M_2$  deux points matériels en interaction. Si  $M_1$  exerce la force  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  sur 2, alors :

- ▶  $M_2$  exerce une force  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$  sur 1,
- ▶ ces deux forces sont opposées :  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ,

# Principe des actions réciproques

## Principe des actions réciproques

Soient  $M_1$  et  $M_2$  deux points matériels en interaction. Si  $M_1$  exerce la force  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  sur 2, alors :

- ▶  $M_2$  exerce une force  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$  sur 1,
- ▶ ces deux forces sont opposées :  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ,
- ▶ un ballon exerce une force de même intensité que la main qui le lance

# Principe des actions réciproques

## Principe des actions réciproques

Soient  $M_1$  et  $M_2$  deux points matériels en interaction. Si  $M_1$  exerce la force  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  sur 2, alors :

- ▶  $M_2$  exerce une force  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$  sur 1,
- ▶ ces deux forces sont opposées :  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ ,
- ▶ un ballon exerce une force de même intensité que la main qui le lance
- ▶ tout objet attire la Terre avec une force de même intensité que celle avec laquelle elle l'attire

# Dynamique d'un système de points

faut-il connaître les forces intermoléculaires au sein d'un objet pour savoir que seul son poids régit sa chute dans le vide ?

# Dynamique d'un système de points

faut-il connaître les forces intermoléculaires au sein d'un objet pour savoir que seul son poids régit sa chute dans le vide ?

**Théorème (Théorème de la quantité de mouvement pour un système)**

*Le mouvement, dans un référentiel  $\mathcal{R}_g$  galiléen, du centre d'inertie  $G$  d'un système fermé de points matériels de masse totale  $m$  est celui d'un point matériel de masse  $m$  soumis à la résultante des seules forces **extérieures**, notée  $\vec{F}_{\text{ext}}$  :*

$$\left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g}(G) = \vec{F}_{\text{ext}}.$$



# Dynamique d'un système de points

## Théorème (Théorème de la quantité de mouvement pour un système)

*Le mouvement, dans un référentiel  $\mathcal{R}_g$  galiléen, du centre d'inertie  $G$  d'un système fermé de points matériels de masse totale  $m$  est celui d'un point matériel de masse  $m$  soumis à la résultante des seules forces **extérieures**, notée  $\vec{F}_{ext}$  :*

$$\left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m\vec{a}_{\mathcal{R}_g}(G) = \vec{F}_{ext}.$$

# Dynamique d'un système de points

## Théorème (Théorème de la quantité de mouvement pour un système)

*Le mouvement, dans un référentiel  $\mathcal{R}_g$  galiléen, du centre d'inertie  $G$  d'un système fermé de points matériels de masse totale  $m$  est celui d'un point matériel de masse  $m$  soumis à la résultante des seules forces **extérieures**, notée  $\vec{F}_{ext}$  :*

$$\left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g}(G) = \vec{F}_{ext}.$$

- ▶ il n'est donc pas nécessaire d'avoir une description des forces de cohésion d'un solide pour étudier son mouvement d'ensemble

# Dynamique d'un système de points

## Théorème (Théorème de la quantité de mouvement pour un système)

*Le mouvement, dans un référentiel  $\mathcal{R}_g$  galiléen, du centre d'inertie  $G$  d'un système fermé de points matériels de masse totale  $m$  est celui d'un point matériel de masse  $m$  soumis à la résultante des seules forces **extérieures**, notée  $\vec{F}_{ext}$  :*

$$\left( \frac{d\vec{p}_{\mathcal{R}_g}}{dt} \right)_{\mathcal{R}_g} = m \vec{a}_{\mathcal{R}_g}(G) = \vec{F}_{ext}.$$

- ▶ il n'est donc pas nécessaire d'avoir une description des forces de cohésion d'un solide pour étudier son mouvement d'ensemble
- ▶ on peut aussi formuler la loi de la quantité de mouvement **pour un système** avec les **seules forces extérieures** et en déduire le principe des actions réciproques

1. États de mouvement d'un point matériel

2. Lois de Newton

3. Exemples fondamentaux de forces

Quelles types de forces extérieures ?

## 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

## 3. Exemples fondamentaux de forces

### 3.1 Interactions à distance

### 3.2 Forces intermoléculaires

### 3.3 Forces de contact

# Interaction gravitationnelle et masse pesante

## Loi de la gravitation (Newton 1687)

Soient deux points matériels, l'un situé en  $M_1$  et de **masse pesante**  $m_{p1}$  et l'autre situé en  $M_2$  et de **masse pesante**  $m_{p2}$ . Ils exercent l'un sur l'autre la **force de gravitation** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = -\mathcal{G} \frac{m_{pi} m_{pj}}{(M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\mathcal{G} = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . la constante gravitationnelle.

# Interaction gravitationnelle et masse pesante

## Loi de la gravitation (Newton 1687)

Soient deux points matériels, l'un situé en  $M_1$  et de **masse pesante**  $m_{p1}$  et l'autre situé en  $M_2$  et de **masse pesante**  $m_{p2}$ . Ils exercent l'un sur l'autre la **force de gravitation** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = -\mathcal{G} \frac{m_{pi} m_{pj}}{(M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\mathcal{G} = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . la constante gravitationnelle.



# Interaction gravitationnelle et masse pesante

## Loi de la gravitation (Newton 1687)

Soient deux points matériels, l'un situé en  $M_1$  et de **masse pesante**  $m_{p1}$  et l'autre situé en  $M_2$  et de **masse pesante**  $m_{p2}$ . Ils exercent l'un sur l'autre la **force de gravitation** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = -\mathcal{G} \frac{m_{pi} m_{pj}}{(M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\mathcal{G} = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . la constante gravitationnelle.

- toujours attractive

# Interaction gravitationnelle et masse pesante

## Loi de la gravitation (Newton 1687)

Soient deux points matériels, l'un situé en  $M_1$  et de **masse pesante**  $m_{p1}$  et l'autre situé en  $M_2$  et de **masse pesante**  $m_{p2}$ . Ils exercent l'un sur l'autre la **force de gravitation** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = -\mathcal{G} \frac{m_{pi} m_{pj}}{(M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\mathcal{G} = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . la constante gravitationnelle.

- ▶ toujours attractive
- ▶ en accord avec la 3<sup>e</sup> loi

# Interaction gravitationnelle et masse pesante

## Loi de la gravitation (Newton 1687)

Soient deux points matériels, l'un situé en  $M_1$  et de **masse pesante**  $m_{p1}$  et l'autre situé en  $M_2$  et de **masse pesante**  $m_{p2}$ . Ils exercent l'un sur l'autre la **force de gravitation** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = -\mathcal{G} \frac{m_{pi} m_{pj}}{(M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\mathcal{G} = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . la constante gravitationnelle.

- ▶ toujours attractive
- ▶ en accord avec la 3<sup>e</sup> loi
- ▶ valable rigoureusement pour  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  si  $M_1$  est immobile, approximation dans le cas de la relativité générale où on peut voir des ondes gravitationnelles

# Masse inertielle et masse pesante

## Masse inertielle et masse pesante

On admet, en mécanique newtonienne, la coïncidence de la masse pesante et de la masse inertielle.

# Masse inertielle et masse pesante

## Masse inertielle et masse pesante

On admet, en mécanique newtonienne, la coïncidence de la masse pesante et de la masse inertielle.

Coïncidence en mécanique newtonienne, postulat fondamental en relativité générale.

# Interaction électrostatique et charge électrique

## Loi de Coulomb (1785)

Deux points matériels **immobiles**, l'un en  $M_1$  de **charge électrique**  $q_1$  et l'autre en  $M_2$  de **charge électrique**  $q_2$ , exercent l'un sur l'autre la **force de Coulomb** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 (M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  la **permittivité diélectrique du vide**, telle que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

# Interaction électrostatique et charge électrique

## Loi de Coulomb (1785)

Deux points matériels **immobiles**, l'un en  $M_1$  de **charge électrique**  $q_1$  et l'autre en  $M_2$  de **charge électrique**  $q_2$ , exercent l'un sur l'autre la **force de Coulomb** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 (M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  la **permittivité diélectrique du vide**, telle que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

# Interaction électrostatique et charge électrique

## Loi de Coulomb (1785)

Deux points matériels **immobiles**, l'un en  $M_1$  de **charge électrique**  $q_1$  et l'autre en  $M_2$  de **charge électrique**  $q_2$ , exercent l'un sur l'autre la **force de Coulomb** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 (M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  la **permittivité diélectrique du vide**, telle que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

- ▶ **attractive si  $q_1 q_2 < 0$  (signes opposés)/ répulsive si  $q_1 q_2 > 0$  (mêmes signes)**



# Interaction électrostatique et charge électrique

## Loi de Coulomb (1785)

Deux points matériels **immobiles**, l'un en  $M_1$  de **charge électrique**  $q_1$  et l'autre en  $M_2$  de **charge électrique**  $q_2$ , exercent l'un sur l'autre la **force de Coulomb** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 (M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  la **permittivité diélectrique du vide**, telle que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

- ▶ **attractive** si  $q_1 q_2 < 0$  (signes opposés)/ **répulsive** si  $q_1 q_2 > 0$  (mêmes signes)
- ▶ en  $\frac{1}{(M_1 M_2)^2}$  comme la gravitation.

# Interaction électrostatique et charge électrique

## Loi de Coulomb (1785)

Deux points matériels **immobiles**, l'un en  $M_1$  de **charge électrique**  $q_1$  et l'autre en  $M_2$  de **charge électrique**  $q_2$ , exercent l'un sur l'autre la **force de Coulomb** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 (M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  la **permittivité diélectrique du vide**, telle que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

- ▶ attractive si  $q_1 q_2 < 0$  (signes opposés)/ répulsive si  $q_1 q_2 > 0$  (mêmes signes)
- ▶ en  $\frac{1}{(M_1 M_2)^2}$  comme la gravitation.
- ▶ valable pour  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  si 1 fixe et 2 mobile

# Interaction électrostatique et charge électrique

## Loi de Coulomb (1785)

Deux points matériels **immobiles**, l'un en  $M_1$  de **charge électrique**  $q_1$  et l'autre en  $M_2$  de **charge électrique**  $q_2$ , exercent l'un sur l'autre la **force de Coulomb** :

$$\vec{F}_{i \rightarrow j} = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 (M_i M_j)^2} \underbrace{\vec{e}_{i \rightarrow j}}_{\text{unitaire}},$$

avec  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  la **permittivité diélectrique du vide**, telle que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

- ▶ attractive si  $q_1 q_2 < 0$  (signes opposés)/ répulsive si  $q_1 q_2 > 0$  (mêmes signes)
- ▶ en  $\frac{1}{(M_1 M_2)^2}$  comme la gravitation.
- ▶ valable pour  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  si 1 fixe et 2 mobile
- ▶ valable pour 1 et 2 mobiles si les vitesses de 1 et 2 sont  $\ll c$

# Autres cas

## Interactions nucléaires

Il existe également :

**l'interaction nucléaire forte** attractive, dominante devant l'interaction électrostatique à des distances de l'ordre du fm responsable de la cohésion des nucléons et des noyaux,

**l'interaction nucléaire faible** de portée 100 fois plus faible, responsable entre autres de la désintégration radioactive du neutron en proton dans  $\beta^-$  ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ), de la fusion nucléaire

ces interactions sortent du cadre de la mécanique classique

## 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

## 3. Exemples fondamentaux de forces

### 3.1 Interactions à distance

### 3.2 Forces intermoléculaires

### 3.3 Forces de contact

# Forces de Van der Waals

## Définition (Forces de Van der Waals)

On nomme **forces de van der Waals** les forces d'interaction entre des atomes ou molécules neutres, à « longue » distance. Elles sont faiblement attractives et négligeables pour des distances supérieures à quelques dizaines de nanomètres.

# Forces de Van der Waals

## Définition (Forces de Van der Waals)

On nomme **forces de van der Waals** les forces d'interaction entre des atomes ou molécules neutres, à « longue » distance. Elles sont faiblement attractives et négligeables pour des distances supérieures à quelques dizaines de nanomètres.

# Forces de Van der Waals

## Définition (Forces de Van der Waals)

On nomme **forces de van der Waals** les forces d'interaction entre des atomes ou molécules neutres, à « longue » distance. Elles sont faiblement attractives et négligeables pour des distances supérieures à quelques dizaines de nanomètres.

- ▶ résultante des forces électrostatiques (interactions dipolaires) entre tous les électrons/protons d'un atome et ceux de l'autre



# Forces de Van der Waals

## Définition (Forces de Van der Waals)

On nomme **forces de van der Waals** les forces d'interaction entre des atomes ou molécules neutres, à « longue » distance. Elles sont faiblement attractives et négligeables pour des distances supérieures à quelques dizaines de nanomètres.

- ▶ résultante des forces électrostatiques (interactions dipolaires) entre tous les électrons/protons d'un atome et ceux de l'autre
- ▶ responsables des interactions dans un gaz non parfait, de la cohésion dans un liquide et en partie dans certains solides

# Forces de Van der Waals

## Définition (Forces de Van der Waals)

On nomme **forces de van der Waals** les forces d'interaction entre des atomes ou molécules neutres, à « longue » distance. Elles sont faiblement attractives et négligeables pour des distances supérieures à quelques dizaines de nanomètres.

- ▶ résultante des forces électrostatiques (interactions dipolaires) entre tous les électrons/protons d'un atome et ceux de l'autre
- ▶ responsables des interactions dans un gaz non parfait, de la cohésion dans un liquide et en partie dans certains solides
- ▶ responsables de la viscosité des fluides, de la cohésion des films liquides (tension superficielle)

# Interactions entre espèces neutres

## Interactions entre espèces neutres

On peut décrire les interactions entre atomes ou molécules **neutres** comme la somme :

à **courte distance** ( $< 1 \text{ nm}$ ) d'une interaction fortement répulsive due à l'impénétrabilité mutuelle des atomes,

à **longue distance** (quelques nm) des forces de van der Waals, faiblement attractives.

## 1. États de mouvement d'un point matériel

## 2. Lois de Newton

## 3. Exemples fondamentaux de forces

### 3.1 Interactions à distance

### 3.2 Forces intermoléculaires

### 3.3 Forces de contact

Leurs manifestations à l'échelle macroscopique sont très complexes à modéliser à partir des forces fondamentales mais peuvent être mesurées grâce au 2<sup>e</sup> principe.

# Liaison et frottement

## Définition (Forces de contact)

On nomme **forces de contact** les forces qui s'exercent entre des objets macroscopiques séparés par une distance non mesurable à l'échelle macroscopique. On distingue en particulier les **forces de liaison** et les **forces de frottement**.

# Liaison et frottement

## Définition (Forces de contact)

On nomme **forces de contact** les forces qui s'exercent entre des objets macroscopiques séparés par une distance non mesurable à l'échelle macroscopique. On distingue en particulier les **forces de liaison** et les **forces de frottement**.

ne se manifestent que quand la distance entre les objets est négligeable à l'échelle macroscopique.

# Force de liaison

## Définition (Force de liaison)

On nomme **force de liaison** une force exercée par un support matériel et contraignant la trajectoire de tout point matériel en contact avec le support à demeurer sur une surface ou courbe particulière, caractéristique du support.



# Force de liaison

## Définition (Force de liaison)

On nomme **force de liaison** une force exercée par un support matériel et contraignant la trajectoire de tout point matériel en contact avec le support à demeurer sur une surface ou courbe particulière, caractéristique du support.

- unilatérale** PM en translation sur une surface, PM au bout d'un fil ou d'une tige ; un degré de liberté supprimé
- bilatérale** PM enfilé dans un tuyau, dans un toboggan de piscine, deux degrés de liberté supprimés

# Détermination

## Détermination des forces de liaison

Les forces de liaison ne peuvent pas être déterminées par l'étude du support. On déduira leur valeur des **contraintes qu'elles imposent** au mouvement macroscopique.

# Détermination

## Détermination des forces de liaison

Les forces de liaison ne peuvent pas être déterminées par l'étude du support. On déduira leur valeur des **contraintes qu'elles imposent** au mouvement macroscopique.

$\vec{R} = -\vec{P}$  pour le PM sur le plan horizontal.

# Fils

## Modèle du fil idéal

Un fil souple tendu exerce sur un point matériel fixé à une de ses extrémités une force de liaison dite **de tension**  $\vec{T}$  dirigée selon la direction du fil, vers celui-ci.

Le fil se détend dès que la tension  $\vec{T}$  s'annule.

Le fil est **idéal** s'il est **inextensible** et de **masse négligeable**. La tension  $T$  est alors uniforme le long du fil.

# Fils

## Modèle du fil idéal

Un fil souple tendu exerce sur un point matériel fixé à une de ses extrémités une force de liaison dite **de tension**  $\vec{T}$  dirigée selon la direction du fil, vers celui-ci.

Le fil se détend dès que la tension  $\vec{T}$  s'annule.

Le fil est **idéal** s'il est **inextensible** et de **masse négligeable**. La tension  $T$  est alors uniforme le long du fil.

# Fils

## Modèle du fil idéal

Un fil souple tendu exerce sur un point matériel fixé à une de ses extrémités une force de liaison dite **de tension**  $\vec{T}$  dirigée selon la direction du fil, vers celui-ci.

Le fil se détend dès que la tension  $\vec{T}$  s'annule.

Le fil est **idéal** s'il est **inextensible** et de **masse négligeable**. La tension  $T$  est alors uniforme le long du fil.

- ▶ la tension est due aux interactions assurant la cohésion du fil et maintenant le PM

# Fils

## Modèle du fil idéal

Un fil souple tendu exerce sur un point matériel fixé à une de ses extrémités une force de liaison dite **de tension**  $\vec{T}$  dirigée selon la direction du fil, vers celui-ci.

Le fil se détend dès que la tension  $\vec{T}$  s'annule.

Le fil est **idéal** s'il est **inextensible** et de **masse négligeable**. La tension  $T$  est alors uniforme le long du fil.

- ▶ la tension est due aux interactions assurant la cohésion du fil et maintenant le PM
- ▶ mouvement contraint sur une sphère, cette contrainte cesse dès que le fil n'est plus tendu

# Fils

## Modèle du fil idéal

Un fil souple tendu exerce sur un point matériel fixé à une de ses extrémités une force de liaison dite **de tension**  $\vec{T}$  dirigée selon la direction du fil, vers celui-ci.

Le fil se détend dès que la tension  $\vec{T}$  s'annule.

Le fil est **idéal** s'il est **inextensible** et de **masse négligeable**. La tension  $T$  est alors uniforme le long du fil.

- ▶ la tension est due aux interactions assurant la cohésion du fil et maintenant le PM
- ▶ mouvement contraint sur une sphère, cette contrainte cesse dès que le fil n'est plus tendu
- ▶ intensité de la force différente pour un même mouvement animant des objets de masses différentes.



# Poulie idéale

## Modèle de la poulie idéale

Une poulie est dite idéale si sa **masse est négligeable** et si **aucun frottement** n'entrave sa rotation. On admet que la **tension est uniforme** le long d'un fil idéal placé sur une poulie idéale.

# Réaction d'un support

## Définition (Réactions normale et tangentielle)

La force de contact exercée par un support solide sur un point matériel se déplaçant à sa surface est appelée **réaction**, notée  $\vec{R}$ . On la décompose en :

- ▶ une force de liaison, normale à la surface du support au point considéré et répulsive, nommée **réaction normale** et notée  $\vec{R}_{\perp}$ ,
- ▶ une force de frottement, dit **solide**, tangente à la surface du support au point considéré, nommée **réaction tangentielle** et notée  $\vec{R}_{\parallel}$ .

# Réaction d'un support

## Définition (Réactions normale et tangentielle)

La force de contact exercée par un support solide sur un point matériel se déplaçant à sa surface est appelée **réaction**, notée  $\vec{R}$ . On la décompose en :

- ▶ une force de liaison, normale à la surface du support au point considéré et répulsive, nommée **réaction normale** et notée  $\vec{R}_{\perp}$ ,
- ▶ une force de frottement, dit **solide**, tangente à la surface du support au point considéré, nommée **réaction tangentielle** et notée  $\vec{R}_{\parallel}$ .

# Réaction d'un support

## Définition (Réactions normale et tangentielle)

La force de contact exercée par un support solide sur un point matériel se déplaçant à sa surface est appelée **réaction**, notée  $\vec{R}$ . On la décompose en :

- ▶ une force de liaison, normale à la surface du support au point considéré et répulsive, nommée **réaction normale** et notée  $\vec{R}_{\perp}$ ,
- ▶ une force de frottement, dit **solide**, tangente à la surface du support au point considéré, nommée **réaction tangentielle** et notée  $\vec{R}_{\parallel}$ .

La liaison est dite **sans frottements** si la composante tangentielle est nulle.

# Réaction d'un support

## Définition (Réactions normale et tangentielle)

La force de contact exercée par un support solide sur un point matériel se déplaçant à sa surface est appelée **réaction**, notée  $\vec{R}$ . On la décompose en :

- ▶ une force de liaison, normale à la surface du support au point considéré et répulsive, nommée **réaction normale** et notée  $\vec{R}_\perp$ ,
- ▶ une force de frottement, dit **solide**, tangente à la surface du support au point considéré, nommée **réaction tangentielle** et notée  $\vec{R}_\parallel$ .

La liaison est dite **sans frottements** si la composante tangentielle est nulle.

Le contact est rompu dès que la composante normale  $\vec{R}_\perp$  s'annule.

# Origine

- ▶ réaction normale due à l'**impénétrabilité** des atomes : effet quantique

# Origine

- ▶ réaction normale due à l'**impénétrabilité** des atomes : effet quantique
- ▶ frottement solide : modèle microscopique compliqué (accrochage sur des aspérités et excitation de vibrations dans le support)

# Origine

- ▶ réaction normale due à l'**impénétrabilité** des atomes : effet quantique
- ▶ frottement solide : modèle microscopique compliqué (accrochage sur des aspérités et excitation de vibrations dans le support)
- ▶ frottement solide peut exister **même en l'absence de mouvement** relatif du PM par rapport au solide.



# Origine

- ▶ réaction normale due à l'**impénétrabilité** des atomes : effet quantique
- ▶ frottement solide : modèle microscopique compliqué (accrochage sur des aspérités et excitation de vibrations dans le support)
- ▶ frottement solide peut exister **même en l'absence de mouvement** relatif du PM par rapport au solide.
- ▶ <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/meca/looping.html>

# Forces de frottement

## Définition (Force de frottement)

Une force  $\vec{f}$  exercée par un milieu sur un objet ponctuel animé d'une vitesse  $\vec{v}$  **par rapport au milieu** est dite **de frottement** si elle est de même direction que  $\vec{v}$  et de sens opposé à  $\vec{v}$  quelle que soit  $\vec{v}$ .

# Forces de frottement


## Définition (Force de frottement)

Une force  $\vec{f}$  exercée par un milieu sur un objet ponctuel animé d'une vitesse  $\vec{v}$  **par rapport au milieu** est dite **de frottement** si elle est de même direction que  $\vec{v}$  et de sens opposé à  $\vec{v}$  quelle que soit  $\vec{v}$ .

# Forces de frottement

## Définition (Force de frottement)


Une force  $\vec{f}$  exercée par un milieu sur un objet ponctuel animé d'une vitesse  $\vec{v}$  **par rapport au milieu** est dite **de frottement** si elle est de même direction que  $\vec{v}$  et de sens opposé à  $\vec{v}$  quelle que soit  $\vec{v}$ .

- ▶  si l'objet n'est pas ponctuel, c'est la force en chaque point  $P$  de la surface de l'objet qui doit vérifier cette propriété, en faisant intervenir la vitesse  $\vec{v}(P)$  de  $P$  par rapport au milieu

# Forces de frottement

## Définition (Force de frottement)

Une force  $\vec{f}$  exercée par un milieu sur un objet ponctuel animé d'une vitesse  $\vec{v}$  **par rapport au milieu** est dite **de frottement** si elle est de même direction que  $\vec{v}$  et de sens opposé à  $\vec{v}$  quelle que soit  $\vec{v}$ .

- ▶  si l'objet n'est pas ponctuel, c'est la force en chaque point  $P$  de la surface de l'objet qui doit vérifier cette propriété, en faisant intervenir la vitesse  $\vec{v}(P)$  de  $P$  par rapport au milieu
- ▶ dans le cas d'une force de frottement solide  
**sans mouvement relatif**, la direction de la force peut être  
**quelconque**

# Indispensable

- ▶ énoncés des 3 lois de Newton
- ▶ expressions des forces fondamentales (avec schémas),
- ▶ schémas des forces de liaison.
  - ▶ énoncés des 3 lois de Newton

# Indispensable

- ▶ énoncés des 3 lois de Newton
- ▶ expressions des forces fondamentales (avec schémas),
- ▶ schémas des forces de liaison.
  - ▶ énoncés des 3 lois de Newton
  - ▶ expressions des forces fondamentales (avec schémas),

# Indispensable

- ▶ énoncés des 3 lois de Newton
- ▶ expressions des forces fondamentales (avec schémas),
- ▶ schémas des forces de liaison.
  - ▶ énoncés des 3 lois de Newton
  - ▶ expressions des forces fondamentales (avec schémas),
  - ▶ schémas des forces de liaison.