

## 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  $\text{kg}$

## 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.

## 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  $\vec{v}_{\mathcal{R}}$  :

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

## 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**

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

## 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  $\mathcal{S}$ .

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

## 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  $\mathcal{R}_g$ .

## 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.

**Classe des référentiels 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.

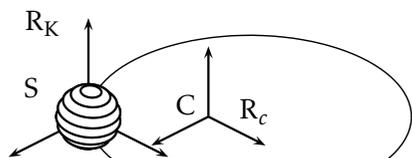
**Autres référentiels usuels****Définition : Référentiels usuels**

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

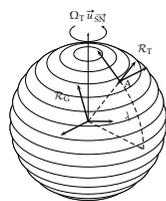
- dans lequel le centre d'inertie du système solaire est fixe ;
- dont les axes cartésiens pointent vers trois étoiles fixes.

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.



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



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

**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*.

**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.

**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.

**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 :

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

**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.

**Pas d'intersection**

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

**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 :  $\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ .

**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  $\vec{F}_{\text{ext}}$  :

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

**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.

**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.

**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  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \cdot 10^9 \text{ m} \cdot \text{F}^{-1}$ .

**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

**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.

**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 nm) d'une interaction fortement répulsive due à l'impenétrabilité mutuelle des atomes,

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

**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*.

**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.

**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.

**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.

**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  $\vec{R}_\parallel$ .

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.

**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  $\vec{v}$ .

**Indispensable****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.