

Loi de la quantité de mouvement

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

vendredi 9 mars 2018

Loi de la quantité de mouvement

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

vendredi 9 mars 2018

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,
- ▶ sa dimension est notée M , l'unité légale de masse inertielle est le kilogramme, de symbole kg , défini par un étalon de platine-iridium.
- ▶ elle est mesurée par comparaison avec des masses de référence au moyen d'une balance.



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 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 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 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 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 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

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

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

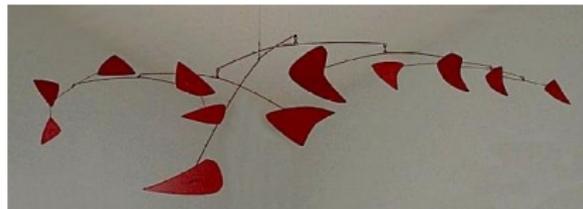
Quantité de mouvement

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} .

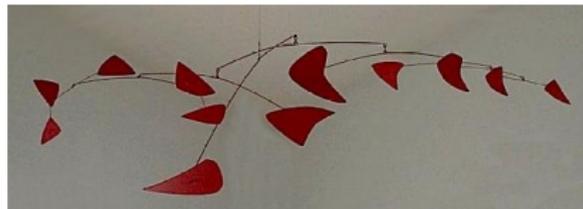
$$\vec{p}_{\mathcal{R}}(\mathcal{S}) = m_{\text{tot}} \vec{v}_{\mathcal{R}}(G)$$

Système fermé quelconque



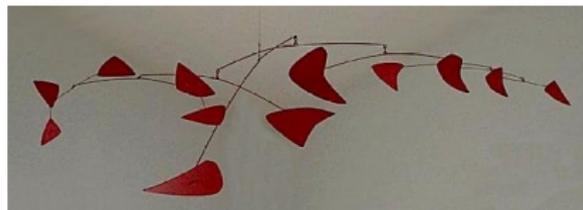
Système fermé quelconque

- ▶ 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^{re} loi : Principe d'inertie

2.2 2^e loi : Forces

2.3 3^e loi : Principe des actions réciproques

2.4 Illustrations

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° et 90°
- ▶  pas rigoureusement galiléen : si l'observation est assez longue, le mouvement d'un point isolé s'infléchira toujours

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)

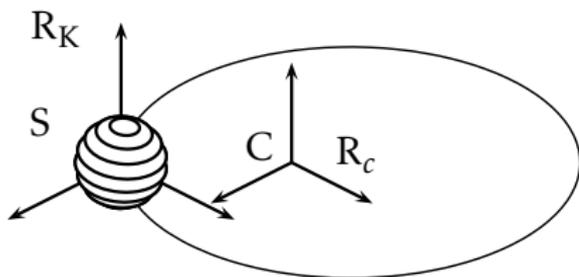
Le référentiel de **Copernic** (\mathcal{R}_C) est le référentiel :

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

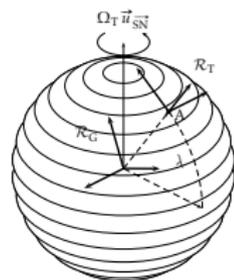
Le référentiel de **Kepler** (\mathcal{R}_K), dit **héliocentrique**, est le référentiel en translation par rapport au référentiel de Copernic mais dont l'origine est confondue avec le centre d'inertie du Soleil.

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

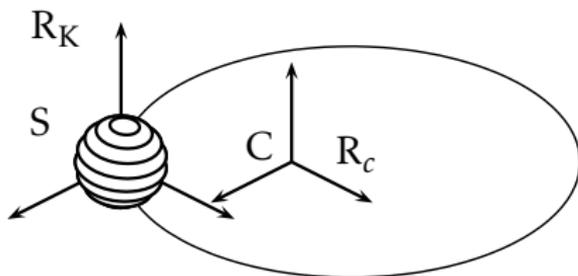


Référentiels de Copernic R_C , Kepler R_K

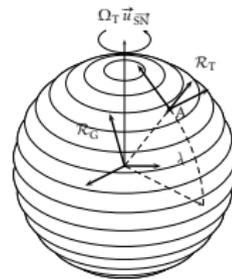


Référentiels
géocentrique R_G , et terrestre
 R_T

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^{re} loi : Principe d'inertie

2.2 2^e loi : Forces

2.3 3^e loi : Principe des actions réciproques

2.4 Illustrations

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}_t , 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 .

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.

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.

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^{re} loi : Principe d'inertie

2.2 2^e loi : Forces

2.3 3^e loi : Principe des actions réciproques

2.4 Illustrations

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}_{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} :

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

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} :

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

- ▶ 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} :

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

- ▶ 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

2.1 1^{re} loi : Principe d'inertie

2.2 2^e loi : Forces

2.3 3^e loi : Principe des actions réciproques

2.4 Illustrations

3. Exemples fondamentaux de forces

Mouvement unidimensionnel

- ▶ un capteur de force mesure la force F_z exercée sur l'extrémité immobile d'un ressort

Mouvement unidimensionnel

- ▶ un capteur de force mesure la force F_z exercée sur l'extrémité immobile d'un ressort
- ▶ un capteur de position permet de mesurer le mouvement et de **calculer** l'accélération \ddot{z}

Mouvement unidimensionnel

- ▶ un capteur de force mesure la force F_z exercée sur l'extrémité immobile d'un ressort
- ▶ un capteur de position permet de mesurer le mouvement et de **calculer** l'accélération \ddot{z}
- ▶ on observe :

Mouvement unidimensionnel

- ▶ un capteur de force mesure la force F_z exercée sur l'extrémité immobile d'un ressort
- ▶ un capteur de position permet de mesurer le mouvement et de **calculer** l'accélération \ddot{z}
- ▶ on observe :
 - ▶ mouvement **libre** : \ddot{z} et F_z sont sinusoïdales synchrones **on a**
 $F_z = ma_z - mg$

Mouvement unidimensionnel

- ▶ un capteur de force mesure la force F_z exercée sur l'extrémité immobile d'un ressort
- ▶ un capteur de position permet de mesurer le mouvement et de **calculer** l'accélération \ddot{z}
- ▶ on observe :
 - ▶ mouvement **libre** : \ddot{z} et F_z sont sinusoïdales synchrones **on a**
 $F_z = ma_z - mg$
 - ▶ mouvement **forcé** : on peut observer un mouvement rectiligne uniforme avec F_z croissante **la force de l'opérateur intervient ; elle peut varier arbitrairement : ici elle compense $F_z - mg$ à chaque instant)**

Mouvement unidimensionnel

- ▶ un capteur de force mesure la force F_z exercée sur l'extrémité immobile d'un ressort
- ▶ un capteur de position permet de mesurer le mouvement et de **calculer** l'accélération \ddot{z}
- ▶ on observe :
 - ▶ mouvement **libre** : \ddot{z} et F_z sont sinusoïdales synchrones **on a**
 $F_z = ma_z - mg$
 - ▶ mouvement **forcé** : on peut observer un mouvement rectiligne uniforme avec F_z croissante **la force de l'opérateur intervient ; elle peut varier arbitrairement : ici elle compense $F_z - mg$ à chaque instant)**
- ▶ comment vérifier la loi de Hooke ?

Mouvement circulaire dans un plan vertical

- ▶ un capteur de force mesure la force F_r exercée sur l'extrémité immobile d'un fil tendu
- ▶ un objet suffisamment petit pour être considéré ponctuel, de masse m , est fixée à l'autre extrémité
- ▶ un capteur de position permet de mesurer la vitesse angulaire $\dot{\theta}$ et de **calculer** l'accélération angulaire $\ddot{\theta}$

Mouvement circulaire dans un plan vertical

On considère la norme F_0 de la force radiale exercée sur la masse m quand le fil est vertical. Quelles sont les affirmations exactes ?

- a) $F_0 = mg$
- b) $F_0 \geq mg$
- c) F_0 représente le maximum de la force exercée par le fil sur la masse m
- d) F_0 est indépendante des conditions initiales du mouvement

Mouvement circulaire dans un plan vertical

On considère la norme F_0 de la force radiale exercée sur la masse m quand le fil est vertical. Quelles sont les affirmations exactes ?

- b) $F_0 \geq mg$
- c) F_0 représente le maximum de la force exercée par le fil sur la masse m

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** :

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

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

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 β^- ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$), 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 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 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 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^e 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.