

1. Les trois lois de Newton

- 1.1. 1^{ère} loi : Principe d'inertie et référentiels galiléens
- 1.2. 2^{ème} loi : Relation fondamentale de la dynamique
- 1.3. 3^{ème} loi : Principe des actions réciproques
- 1.4. Commentaire n°1 : RFD et masse d'un point matériel
- 1.5. Commentaire n°2 : RFD et quantité de mouvement
- 1.6. Commentaires complémentaires

2. Le concept de force en mécanique

- 2.1. La force : le concept clef de la dynamique
- 2.2. Forces agissant à distance
- 2.3. Tension d'un fil
- 2.4. Force de rappel élastique (ressort)
- 2.5. Réaction du support – Lois de Coulomb du frottement solide
- 2.6. Force de frottement fluide
- 2.7. (Complément) Concept de masse en mécanique
- 2.8. (Complément) Les quatre interactions fondamentales en physique

3. Méthode en dynamique du point matériel

4. Application : mouvement d'un point dans le champ de pesanteur uniforme

- 4.1. Situation où l'on néglige les frottements de l'air
- 4.2. Prise en compte des frottements fluides

5. Application : mouvement d'un point soumis à l'action d'un ressort

- 5.1. Mouvement horizontal
- 5.2. Mouvement vertical

6. Application : pendule simple

Intro :

La cinématique du point permet de décrire le mouvement d'un point matériel, sans s'intéresser aux causes du mouvement. On aborde dans ce chapitre la dynamique du point, qui va permettre de relier le mouvement à ses causes. *Les causes du mouvement sont modélisées en mécanique par des grandeurs vectorielles : les forces.*

On va aussi énoncer les trois principes qui constituent les trois lois fondamentales de la mécanique newtonienne. Toutes les autres lois de la mécanique en découlent. Les principes de Newton sont une synthèse des expériences et des réflexions menées par les physiciens qui ont précédé Newton. Par la suite, elles ont été abondamment confirmées par l'expérience.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle qu'ont été mises en évidence des incohérences théoriques et expérimentales entre la mécanique newtonienne et l'électromagnétisme. C'est pour surmonter ces difficultés que la théorie de la relativité a été formulée par Einstein au début du XX^e siècle. Dans la première moitié du XX^e siècle, la difficulté à expliquer certains phénomènes microscopiques à l'aide de la mécanique classique (« newtonienne » ou « relativiste ») a donné naissance à la mécanique quantique.

1. Les trois lois de Newton

Les lois de Newton sont des *principes*, mot dérivé du latin qui signifie « premier, primitif ». Cela signifie qu'ils ne peuvent être déduits logiquement : ils sont affirmés et tout raisonnement déductif en découle. Il est remarquable qu'un aussi petit nombre de principes permettent d'expliquer un aussi grand nombre de phénomènes naturels, du mouvement des planètes à celui des fluides et des particules microscopiques.

NB : En physique moderne, on postule des principes supérieurs qui permettent de démontrer certains des principes de Newton (comme la RFD par exemple).

1.1. 1^{ère} loi : Principe d'inertie et référentiels galiléens

Le principe d'inertie et la notion de référentiel galiléen sont étroitement liés. On ne peut définir l'un sans l'autre.

Principe d'inertie

*L'expérience montre que, dans certains référentiels (mais pas dans tous), un point matériel **isolé** est **immobile** ou en **translation rectiligne uniforme**.*

Référentiel galiléen

*Les référentiels dans lesquels le principe d'inertie est vérifié sont dits **galiléens**.*

Exemples : Dans la vie de tous les jours, le référentiel terrestre apparaît galiléen (pensons à une bille lancée sur une table bien plane). Un tourniquet en rotation est clairement non galiléen.

On verra dans un chapitre ultérieur que tous les référentiels galiléens sont en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres. On l'admettra dans un premier temps.

1.2. 2^{ème} loi : Relation fondamentale de la dynamique

Le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) ou Relation Fondamentale de la Dynamique (RFD) est l'expression mathématique qui relie les causes (les forces) à leur effet (l'accélération du point M) par l'intermédiaire de la masse du point M .

*La RFD n'est valable que dans un **référentiel galiléen** :*

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

La norme de la force étant fixée, plus la masse du point M est grande, plus la norme de l'accélération est faible. En d'autres termes, plus la masse est grande, plus on a du mal à modifier la vitesse du point M . *La masse caractérise l'inertie du point M .*

Remarque :

- Cette loi permet de déterminer la trajectoire d'un point matériel en connaissant à tout instant les forces qui lui sont appliquées ainsi que les conditions initiales
- Elle permet aussi de déterminer l'expression des forces appliquées au point matériel en connaissant la trajectoire du point matériel. C'est ainsi que la loi de gravitation universelle a été proposée par Newton à partir de la connaissance du mouvement des planètes.

1.3. 3^{ème} loi : Principe des actions réciproques

Soient deux points matériels M_1 et M_2 en interaction.

Principe des actions réciproques

La force $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ exercée par M_1 sur M_2 est **colinéaire**, de **même norme** et de **sens opposé** à la force $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ exercée par M_2 sur M_1 . La **direction** de ces deux forces est portée par la droite $(M_1 M_2)$.

On admettra que l'on peut étendre ce principe à l'interaction d'un point matériel avec un support, un ressort, un fil etc. ... c'est-à-dire dans toutes les situations où le point matériel est soumis à des forces de contact.

1.4. Commentaire n°1 : RFD et masse d'un point matériel

La masse d'un corps caractérise deux propriétés intrinsèques de ce corps, *a priori* différentes :

- elle représente sa capacité à agir sur un autre corps par la gravitation (on parle de *masse gravitationnelle*)
- elle représente son inertie (on parle de *masse inertielle*)

On revient plus loin sur cet aspect, on discute ici de l'aspect inertielle. La masse est une grandeur définie par la RFD : elle est *intrinsèque* au point matériel, et caractérise son **inertie**. *L'inertie d'un corps est sa tendance propre à « résister » à la variation de son vecteur vitesse lorsqu'il est soumis à une force donnée.* Par exemple, il est plus facile d'arrêter une balle de ping-pong roulant à une vitesse donnée sur la table, qu'une voiture lancée à la même vitesse. La masse fait tout simplement référence à cette observation courante, dont on remarquera qu'elle ne fait pas intervenir la pesanteur/la gravitation.

On postule que la masse d'un point matériel est *invariante par changement de référentiel* : c'est une grandeur *absolue*. C'est aussi une grandeur *constante* : elle ne varie pas dans le temps.

Remarque : En relativité restreinte, l'inertie d'un corps n'est plus représentée par sa masse, mais par son énergie. L'inertie d'un corps n'est alors plus une propriété intrinsèque au corps, puisqu'elle dépend de son mouvement. Cette différence avec la mécanique de Newton ne se fait sentir que lorsque la vitesse du corps est non négligeable devant la vitesse de la lumière.

1.5. Commentaire n°2 : RFD et quantité de mouvement

La masse d'un point matériel étant constante, on peut reformuler la RFD sous la forme :

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

avec $\vec{p} \stackrel{\text{def}}{=} m\vec{v}$ la *quantité de mouvement* du point M.

On qualifie de *cinétique* une grandeur définie à partir de la vitesse et de la masse. La quantité de mouvement d'un point matériel est une grandeur cinétique.

Au premier abord, cette reformulation peut paraître inutile. Elle ne l'est pas, même si l'on ne s'en servira pas beaucoup cette année. Adjointe à la 3^e loi de Newton, elle permet de « dire des choses simples » dans des situations où plusieurs corps interagissent les uns sur les autres, sans nécessairement connaître les forces d'interaction entre ces corps. C'est notamment une grandeur particulièrement intéressante dans l'étude des chocs entre deux corps, notion qui n'est pas au programme (mais très utile en physique des particules par exemple !).

L'autre intérêt pour nous en sup : on verra que les 2 théorèmes de mécanique (que l'on établira plus tard) peuvent aussi s'écrire sous la forme :

« *quantité dépendant des forces = variation d'une grandeur cinétique* »

1.6. Commentaires complémentaires

- La deuxième loi de Newton étant connue, on peut interpréter le principe d'inertie en disant que « sans cause il n'y a pas d'effet ». Si la somme des forces est nulle (système isolé ou pseudo-isolé), alors l'accélération est nulle. Le point matériel est immobile ou en translation rectiligne uniforme, selon les conditions initiales.
- En première période, on ne cherchera pas à déterminer si un référentiel est galiléen ou non. On reviendra sur ce point en seconde période lorsque l'on généralisera les lois de la mécanique aux cas des référentiels non-galiléens. On pourra considérer les référentiels suivants comme étant galiléens (au moins en première approximation) : référentiel terrestre, référentiel géocentrique, référentiel héliocentrique, référentiel de Copernic.
- Dans la théorie plus complète du mouvement, la relativité restreinte, le principe de l'action et de la réaction est directement remis en cause. En mécanique newtonienne, les interactions entre différents systèmes sont supposées « agir instantanément », c'est-à-dire qu'une modification de la position du corps causant la force (le Soleil sur la Terre par exemple) se répercute instantanément sur le système (la Terre, même exemple). En relativité, et cela est démontré expérimentalement, les interactions ne peuvent se propager à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide (*peut être à remettre en cause depuis l'annonce de OPERA ?*)
- Déterminisme mécanique : La seconde loi de Newton ainsi que le cours de cinématique du point montrent que : si les forces appliquées au système sont connues à chaque instant, et si les conditions initiales sont connues ; *alors la trajectoire du point matériel est déterminée*, c'est-à-dire qu'elle est **unique** et qu'elle peut être prédite. C'est ce déterminisme mécanique qui permet de prédire le passage d'une comète dans le ciel, ou de connaître des siècles à l'avance quand Vénus passera devant le Soleil (vue depuis la Terre). A l'échelle microscopique, ce déterminisme n'est plus vérifié dans toutes les situations. La mécanique quantique permet de comprendre cette nouvelle propriété du mouvement des corps, qui est directement liée à ce qu'on appelle *les relations d'incertitudes de Heisenberg*.

2. Le concept de force en mécanique

Le concept de force est essentiel en dynamique. En cinématique du point, on ne fait que décrire le mouvement des corps. En dynamique, on cherche à relier le mouvement à ses causes. *Les forces représentent les causes du mouvement*. Pour pouvoir expliquer ou prédire un mouvement, il faut connaître l'expression des forces.

2.1. La force : le concept clef de la dynamique

Considérons une bille immobile sur une table, que l'on met en mouvement en la poussant du doigt. Il est clair que pour modéliser l'action du doigt sur la bille, il faut tenir compte de la direction, du sens et de « l'intensité » avec laquelle on a poussé la bille. C'est pourquoi une force appliquée à un point matériel apparaît en tant que *grandeur vectorielle* dans la RFD. C'est une grandeur externe au point matériel et représente « l'action » de l'extérieur.

- Un corps ne subissant l'influence d'aucune force est dit *isolé*
- Un corps soumis à des forces dont la somme est nulle est dit *pseudo-isolé*

On peut distinguer deux types de forces :

- les forces agissant à distance
- les forces de contact

Les expressions mathématiques des forces n'ont de signification précise que si elles sont associées à un schéma

2.2. Forces agissant à distance

En sup, on étudiera les forces à distance ci-dessous :

- Force de Gravitation : force d'un corps massif sur un autre corps massif
- Force de Pesanteur sur Terre : un corps massif sur Terre est soumis au poids ($\sim$ gravitation)
- Force de Coulomb : force d'un corps chargé électriquement sur un autre corps chargé électriquement
- Force de Lorentz : force d'un champ électromagnétique sur un corps chargé électriquement

En première période, *le poids sera la seule force à distance que l'on étudiera*. On considèrera toujours que le champ de pesanteur est uniforme (i.e. $\vec{g}$ indépendant de la position du point M sur Terre).

(NB : On donnera une définition précise du mot « champ » plus tard dans le cours de sup)

- Etablir l'expression des composantes du poids d'un corps dans un repère cartésien (avec schéma)

2.3. Tension d'un fil

On considère un fil fixé en une de ses extrémités à un point O et au bout duquel est accroché le point matériel M . La force exercée par le fil sur le point M s'appelle la *tension* du fil. Pour simplifier, on supposera toujours le fil « idéal » : c'est-à-dire sans masse, sans raideur et inextensible. Cette modélisation de l'action d'un fil correspond bien à ce que l'on observe expérimentalement.

Dans le cas d'un fil idéal, lorsqu'il est tendu, la force exercée par le fil sur le point matériel M est :

- colinéaire au fil
- dirigée du point M vers le point O
- sa norme est a priori inconnue, elle dépend des autres forces auxquelles est soumis le point matériel

Lorsqu'il n'est pas tendu, le fil n'exerce aucune force.

- Donner l'expression mathématique de la tension du fil appliquée au point M en s'appuyant sur un schéma
- Distinguer la projection de la force / la norme de la force

2.4. Force de rappel élastique (ressort)

On considère un ressort fixé en une de ses extrémités à un point O et au bout duquel est accroché le point matériel M . La force exercée par le ressort sur le point M est une *force de **rappel élastique***. Lorsque l'on déplace le point M de sa position d'équilibre :

- la force exercée par le ressort *tend à rappeler le point M vers sa position d'équilibre*
- La norme de la force est proportionnelle au déplacement du point M (signification du mot « élastique »)

Comme le suggère l'expérience, on supposera toujours le ressort comme étant « idéal » :

- le ressort est sans masse (non déformé à l'équilibre)
- le ressort ne peut se déformer que selon son axe, et la force qu'il exerce est colinéaire à cet axe

Cette modélisation de l'action d'un ressort correspond bien à ce que l'on observe expérimentalement *pour de faibles déplacements du point M* .

- En s'appuyant sur un schéma, définir l'*allongement algébrique* du ressort
- Quelle est la signification physique du signe de l'allongement ?
- Donner l'expression mathématique de la force exercée par un ressort sur le point M (avec schéma)
- Distinguer la projection de la force / la norme de la force

Force qui apparaît souvent en exo, il faut pouvoir la retrouver seul (surtout le sens du vecteur unitaire!)

2.5. Réaction du support – Lois de Coulomb du frottement solide

Lorsque le point matériel M évolue sur un support solide, ce dernier exerce une force sur M . Cette force s'appelle la **réaction du support** $\vec{R}$. Elle peut toujours être décomposée en une composante normale $\vec{R}_N$ et une composante tangentielle $\vec{R}_T$, dont la définition consiste à écrire :

$$\vec{R} \stackrel{\text{def}}{=} \vec{R}_N + \vec{R}_T$$

- La réaction normale est la force qui empêche le point M de traverser le support
- La réaction tangentielle représente la force de frottement exercée par le support sur le point M . Le sens de la réaction tangentielle est toujours *opposé* au mouvement du point M *par rapport au support*. Lorsque l'on néglige les frottements entre M et le support, la réaction tangentielle est *nulle*.
- Les normes des deux composantes sont a priori quelconques : elles dépendent des autres forces appliquées au point M . Mais l'expérience montre qu'il existe une relation entre les normes des deux composantes. Cette relation diffère selon que le point M est en mouvement ou immobile *par rapport au support* : ce sont les *lois de Coulomb*.

Lois de Coulomb du frottement solide

- Si le point M est en mouvement par rapport au support, **alors** $\|\vec{R}_T\| = f\|\vec{R}_N\|$
- Le point M est immobile par rapport au support **si et seulement si** $\|\vec{R}_T\| < f\|\vec{R}_N\|$

f étant le *coefficient de frottement*, adimensionné et dépendant de la nature et de l'état de surface des deux solides en contact. Plus les surfaces sont polies, plus ça frotte !

On retiendra aussi :

$$\text{Le point } M \text{ quitte le support} \Leftrightarrow \|\vec{R}_N\| = 0$$

Remarques :

- On a dit que la réaction tangentielle représente les forces de frottements du support sur le point M . Ces frottements naissent du contact entre deux solides, c'est pourquoi on les qualifie de *frottements solides* (par opposition aux frottements fluides).
- Il existe en réalité deux coefficients de frottement, un « statique » et l'autre « dynamique ». Pour simplifier, on les considère généralement égaux, d'où la présence d'un seul coefficient ci-dessus.
- Comment écrire mathématiquement et représenter sur un schéma une force de frottement qui peut changer de sens durant le mouvement ?

2.6. Force de frottement fluide

Lorsqu'un corps solide se déplace dans un fluide (gaz ou liquide), il est soumis à une force de frottements de la part du fluide. On qualifie cette force de *frottement fluide*.

On retiendra que la force de frottement est à chaque instant *colinéaire et de sens opposé* au mouvement du point M *par rapport au fluide*. L'expérience montre que la force de frottement augmente avec la vitesse du point M à travers le fluide (cf. la main passée à travers la vitre d'une voiture entrain de rouler).

Pour de faibles vitesses du point M , on peut considérer que la norme de la force est proportionnelle à la norme de la vitesse du point M . A plus forte vitesse, la relation est quelconque, la force variant plutôt comme le carré de la vitesse. En exercice, sauf indication contraire, on se placera toujours dans les conditions de faibles vitesses.

- Comment écrire mathématiquement, et représenter sur un schéma, une force de frottement qui peut changer de sens durant le mouvement ?

2.7. (Complément) Concept de masse en mécanique

On a introduit précédemment :

- la masse inertielle, qui caractérise l'inertie d'un corps
- la masse gravitationnelle, qui caractérise l'intensité de la force de gravitation exercée sur le corps

L'inertie et la gravitation sont des concepts bien distincts. Par conséquent, sur le plan conceptuel, les deux types de masse n'ont a priori aucun rapport l'une avec l'autre. C'est l'expérience qui suggère très clairement que ces deux grandeurs scalaires sont proportionnelles, et peuvent être définies comme étant égales.

Il suffit de considérer l'expérience de la chute libre *sans frottements* : le mouvement des corps en chute libre est indépendant du corps considéré. Une plume de $1g$ tombe à la même vitesse que $1kg$ de plomb.

Lorsque l'on résout les équations du mouvement, il apparaît que ce fait expérimental n'est reproductible que si le rapport des deux masses est une constante indépendante du champ de gravitation et du corps considéré. Par un choix arbitraire d'unité, on pose que ce rapport est égal à un.

On nomme cela *le principe d'équivalence des masses*. Ce principe, enrichi en physique relativiste, est à l'origine de la théorie de la gravitation proposée par Einstein, la *relativité générale*.

2.8. (Complément) Les quatre interactions fondamentales en physique

On a mentionné un certain nombre de forces dans cette partie. Toutes ne sont pas des forces fondamentales : la force de rappel élastique, la réaction d'un support, la pesanteur sont en réalité la manifestation macroscopique d'un petit nombre de forces dites *fondamentales*.

On peut se demander combien de forces fondamentales existent dans l'univers. Actuellement, quatre interactions fondamentales sont connues, et suffisent à expliquer la complexité du monde qui nous entoure : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique, et les deux interactions nucléaires (faible et forte). Ces quatre forces fondamentales sont toutes des interactions agissant à distance.

3. Méthode en dynamique du point matériel

- Définir le système étudié
- Définir le référentiel depuis lequel on étudie le mouvement du système
- Choisir un repère et l'orienter convenablement.
Faire un schéma en représentant le point M dans une *position quelconque* (cf. recette de gd-mère)
- Faire un bilan des forces appliquées au système durant le mouvement
Si à un instant t_0 des forces apparaissent ou disparaissent, il faut à nouveau effectuer un bilan des forces et **refaire toute l'étude pour les temps $t > t_0$** (ex : si le point M quitte le support)
- Appliquer une loi de la dynamique pour relier les causes à leurs effets :
 - RFD (sous forme vectorielle)
 - Théorème de l'énergie cinétique (vu plus tard)
 - Théorème de l'énergie mécanique (vu plus tard)
 - Théorème du moment cinétique (vu plus tard)
- Projeter la relation vectorielle obtenue sur la base de projection du repère défini précédemment
- Résoudre les EDiff obtenues :
 - pour connaître la trajectoire (coordonnées du vecteur position $\overrightarrow{OM}(t)$)
 - pour déterminer des forces inconnues (tension d'un fil, réaction normale du support etc.)

4. Application : mouvement d'un point dans le champ de pesanteur uniforme

4.1. Situation où l'on néglige les frottements de l'air

On considère le tir d'un obus depuis le sol. On assimilera l'obus à un point matériel. La vitesse initiale de l'obus $\vec{v}_0$ fait un angle α avec l'horizontal. On négligera les frottements de l'air sur l'obus.

- Déterminer l'équation de la trajectoire. Quelle est la nature de la trajectoire ?
- Déterminer l'altitude maximale atteinte par l'obus au cours de son mouvement (la « flèche » de la trajectoire).
- Déterminer la portée du tir, i.e. la distance à laquelle l'obus retombe au sol.
- Pour quel angle α la portée du tir est-elle maximale ? Calculer pour cet angle la portée et la flèche du tir.

4.2. Prise en compte des frottements fluides

On considère le tir du même obus, mais en tenant compte cette fois-ci des frottements de l'air sur l'obus. On suppose que les frottements sont proportionnels à la vitesse de l'obus.

- Déterminer l'évolution temporelle du vecteur vitesse.
- Déterminer les équations horaires de la trajectoire de l'obus.
- Déterminer la flèche de la trajectoire.
- En l'absence de sol (au bord d'un ravin par exemple), montrer que la trajectoire tend vers une asymptote verticale dont on précisera la position.
- En l'absence de sol, montrer que le vecteur vitesse tend vers une valeur limite finie.
- Faire la synthèse des effets des frottements de l'air sur le mouvement de l'obus.
- Tracer l'allure de la trajectoire.

5. Application : mouvement d'un point soumis à l'action d'un ressort

5.1. Mouvement horizontal

Un solide se déplace sans frottements sur un support horizontal. Il est lié à un ressort disposé horizontalement et fixé au mur. On étudie le mouvement du centre d'inertie du solide, en l'assimilant à un point matériel de masse égale à celle du solide. A l'instant initial, on déplace le solide d'une distance a par rapport à sa position d'équilibre de façon à comprimer le ressort. Sa vitesse initiale est nulle.

- Quel est l'allongement (algébrique) du ressort à l'instant initial ?
- Déterminer l'équation horaire de la trajectoire du solide.

5.2. Mouvement vertical

Idem situation précédente en considérant que le solide se déplace selon la verticale, lié à un ressort disposé verticalement et fixé au plafond. On néglige les frottements de l'air.

- Déterminer l'équation horaire du mouvement *par rapport à la position d'équilibre*.
 - Commencer par déterminer la position d'équilibre (cas statique)
 - Définir l'origine du repère au niveau de la position d'équilibre
 - Déterminer alors l'équation horaire du mouvement

6. Application : pendule simple

On considère une bille tenue par un fil de longueur L fixé au plafond. A l'instant initial, on déplace la bille d'un angle θ_0 par rapport à la verticale, le fil restant tendu. Cet angle est de l'ordre de 10° . On lâche la bille sans vitesse initiale.

- Déterminer l'évolution temporelle de l'angle θ entre le fil et la verticale.

Notions clefs

Savoirs :

- Enoncés des trois lois de Newton (précisément)
- Toutes les propriétés des forces vues dans ce chapitre (Lois de Coulomb notamment)

Savoirs faire :

- Exprimer mathématiquement les forces en s'appuyant sur un schéma
- Méthode d'étude en dynamique du point
- Refaire tous les exemples traités en cours (5 situations)