Mécanique

TunisieEtudes

PDF générés en utilisant l’atelier en source ouvert « mwlib ». Voir http://code.pediapress.com/ pour plus d’informations.
PDF generated at: Sun, 28 Nov 2010 12:13:24 UTC

Contenus

Articles

Références

Licence des articles

Mécanique newtonienne

La **mécanique newtonienne** est une branche de la physique. Depuis les travaux d'Albert Einstein, elle est souvent qualifiée de **mécanique classique**.

Théorie	Grands domaines	Concepts
Mécanique newtonienne	Cinématique - Lois du mouvement de Newton - Mécanique analytique - Mécanique des fluides - Mécanique du point - Mécanique du solide - Transformations de Galilée - Mécanique des milieux continus	Dimension - Espace - Temps - Longueur - Vitesse - Vitesse relative - Masse - Force - Énergie - Moment angulaire - couple - Loi de conservation - Oscillateur harmonique - Onde - Travail - Puissance

Historique

Avant de devenir une science à part entière, la mécanique a longtemps été une section des mathématiques.

De nombreux mathématiciens y ont apporté une contribution souvent décisive, parmi eux des grands noms tels que Euler, Cauchy, Lagrange, ... Jusqu'à la fin du XVIII^{e} siècle, la mécanique a été le domaine applicatif naturel des mathématiques, le domaine dans lequel on pouvait tenter de faire entrer les faits expérimentaux dans le cadre rigoureux des mathématiques. Inversement, certains problèmes de mécanique ont donné naissance ou orienté l'intérêt des mathématiciens vers des théories telles que la géométrie ou les équations différentielles.

Historiquement, la mécanique statique a été le premier domaine étudié par les savants. De l'antiquité jusqu'au Moyen Âge des notions fondamentales telles que « l'équilibre », le célèbre « bras de levier » d'Archimède ou encore la notion beaucoup plus abstraite de « force » ont été étudiées. Plus tard, l'intérêt s'est porté vers la « dynamique », c'est-à-dire les phénomènes qui régissent le mouvement des solides, domaine dans lequel Galilée, pour la chute des corps, et Newton dans ses célèbres *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ont apporté des contributions décisives.

Toutefois, jusqu'à la fin du XVIII^{e} siècle, la mécanique se séparait en deux branches : la mécanique du point d'un côté et la mécanique des fluides de l'autre. Dans le cas de la mécanique du point, les objets étudiés sont supposés implicitement indéformables et le mouvement du solide complet peut alors être décrit par le mouvement d'un de ces points remarquables : le « centre de gravité ». Il a fallu attendre le courant du XIX^{e} siècle pour voir apparaître les premières théories des solides *déformables* qui allaient permettre de réunir la mécanique des solides et la mécanique des fluides dans un même cadre, celui de la mécanique des milieux continus.

Parallèlement, un autre formalisme prenait naissance pour expliciter le mouvement des solides : Lagrange, dans un premier temps, puis Hamilton ont développé une approche dite analytique qui prenait comme axiome non plus l'équilibre des forces et de l'accélération mais l'existence d'un potentiel d'énergie minimal auquel obéit tout mouvement de solide. On peut démontrer que cette approche est rigoureusement équivalente à l'approche newtonienne ; elle permet toutefois de développer un formalisme radicalement différent. Les principaux domaines de la physique ayant recours à la « mécanique analytique » sont la physique du solide et le mouvement de mécanismes complexes tels que les bras de robot.

Au début du XX^{e} siècle, Einstein a développé sa célèbre théorie de la relativité et a mis en évidence les insuffisances de la mécanique telle qu'elle a été décrite par Newton. Toutefois, il s'avère que cette dernière constitue un cas particulier de la théorie de la relativité dès lors que l'on considère des vitesses relativement faibles. On a alors défini la *mécanique newtonienne*, ou *mécanique classique*, comme le domaine de la physique qui décrit les mouvements des corps à des vitesses faibles devant celle de la lumière (soit très inférieures à 300 000 km/s environ). Dans ce domaine, tout en étant plus simple, elle fournit des résultats très voisins de ceux de la relativité restreinte, adaptée quant à elle à tous les domaines de vitesse.

Conceptuellement, la mécanique a connu trois révolutions :

1. la prise de conscience que c'est l'accélération qui est proportionnelle à la force (on pensait initialement que c'était la vitesse) ;
2. la prise de conscience que le mouvement des planètes est régi par le même phénomène que la chute des corps, la fameuse attraction *universelle* de Newton ;
3. la modélisation de la gravitation non plus par une force, mais par une déformation de l'espace avec la théorie de la relativité générale d'Einstein.

Classification

La mécanique newtonienne est classiquement découpée en domaines selon le point de vue adopté :

- découpage selon les propriétés étudiées :
  - cinématique : étude du mouvement indépendamment de sa cause (notions mouvement, de trajectoire, de vitesse, d'accélération),
  - statique : étude des corps à l'équilibre (immobiles ou en mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen, notions de forces, de moments),
  - dynamique : étude des causes du mouvement (relations entre la cinématique et les forces et moments, notion d'énergies cinétique, mécanique),
    - mécanique ondulatoire : étude des ondes mécaniques ;
- découpage selon l'objet étudié :
  - mécanique du point,
  - mécanique du solide indéformable,et deformable
  - mécanique des milieux continus,
    - résistance des matériaux, mécanique du solide déformable,
    - mécanique des fluides.

On distingue ainsi la cinématique du point de la cinématique du solide, …

Voir aussi

Articles connexes

- Cinématique
- Lois du mouvement de Newton
- Mécanique analytique
- Mécanique des fluides
- Mécanique du point
- Mécanique du solide
- Relativité galiléenne et transformations de Galilée
- Mouvement rectiligne uniformément accéléré

Liens externes

- Ressources francophones en mécanique [1], infotheque.info
- Portail de la physique

Références

[1] http://www.infotheque.info/specialite/14.html

Cinématique

Cet article ne cite pas suffisamment ses sources (mars 2008).

Si vous connaissez le thème traité, merci d'indiquer les passages à sourcer avec {{Référence souhaitée}} ou, mieux, incluez les références utiles en les liant aux **notes de bas de page**. (Modifier l'article [1])

Pour l'emploi du terme dans le domaine du jeu vidéo, voir Scène cinématique.

En physique, la **cinématique** est la discipline de la mécanique qui étudie le mouvement des corps, en faisant abstraction des causes du mouvement (celles-ci sont généralement modélisées par des forces et des moments). Elle utilise la géométrie analytique.

On peut dater la naissance de la cinématique moderne à l'allocution de Pierre Varignon le 20 janvier 1700 devant l'académie royale des sciences de Paris[2] . À cette occasion il définit la notion d'accélération et montre comment il est possible de la déduire de la vitesse instantanée à l'aide d'une simple procédure de calcul différentiel.

Définitions de base

Il faut d'abord définir un référentiel, c'est-à-dire un repère de l'espace et une référence pour le temps, une horloge[3] ; on utilise en général le référentiel lié au laboratoire, par exemple dont les axes suivent les arêtes des murs de la pièce, ou bien celle de la table, ou encore les directions géographiques Nord-Sud, Est-Ouest et haut-bas (si le laboratoire est immobile par rapport au sol). L'objet de base est le **point**, de dimensions nulles. Un point M est défini par ses coordonnées (x, y, z, t) et noté $M(x, y, z, t)$.

Concrètement, cet objet physique défini par quatre paramètres représente soit un objet de petite taille (particule, petite bille), soit un objet de grande taille dont on néglige les effets de rotation sur lui-même ; nous appellerons cet objet le **mobile**. On ne s'intéresse alors qu'au mouvement dans l'espace du centre d'inertie de ce mobile. Le centre d'inertie d'un objet est encore appelé centre de masse ou centre de gravité.

Les coordonnées définissent le **vecteur-position**, qui dépend ainsi de la position et du temps[4] .

Le vecteur obtenu en dérivant les coordonnées par rapport au temps définit le **vecteur-vitesse**. Le vecteur vitesse est indépendant du choix du point origine[4] .

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial t} \\ \frac{\partial y}{\partial t} \\ \frac{\partial z}{\partial t} \end{pmatrix}$$

Le vecteur obtenu en dérivant les composantes du vecteur vitesse par rapport au temps définit le **vecteur-accélération**

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \end{pmatrix}$$

La mécanique du point permet de prévoir la position en fonction du temps, à partir de la vitesse initiale et des forces.

L'équation horaire du mouvement

$$\begin{cases} x = f_1(t) \\ y = f_2(t) \\ z = f_3(t) \end{cases}$$

correspond à l'équation paramétrique d'une courbe ; on peut souvent réduire ceci à un système d'équations cartésiennes

$$g_i(x, y, z) = 0$$

qui, dans le cas le plus simple, sont du type linéaire

$$ax + by + cz + d = 0$$

Cette courbe est l'ensemble des points par où passe le centre d'inertie du mobile. On définit alors l'**abscisse curviligne**, notée [redacted], la distance parcourue sur la courbe par rapport à un point de référence (la position du centre d'inertie du mobile à [redacted]). Pour un petit déplacement de *M(x, y, z)* à *M'(x + dx, y + dy, z + dz)*, l'abscisse curviligne est assimilable à un segment, d'où :

$$\mathrm{d}s = \sqrt{\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}\mathrm{d}t$$

On a donc $s = \int_A^B \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}\mathrm{d}t$.

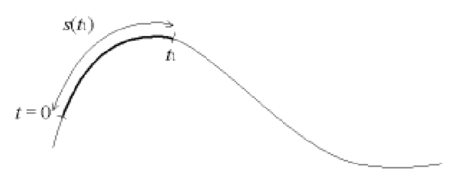
La notion commune de vitesse est en fait la dérivée de l'abscisse curviligne. On parle souvent de *vitesse scalaire*[5] :

$$v = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$$

On a en fait

$$\|\vec{v}\| = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$$

On ne considère en général, pour simplifier l'étude, que des mouvements plans (que le plan soit horizontal, vertical ou incliné). On définit donc un repère (O, x, y) dans ce plan, ce qui permet de ne travailler qu'avec deux coordonnées.

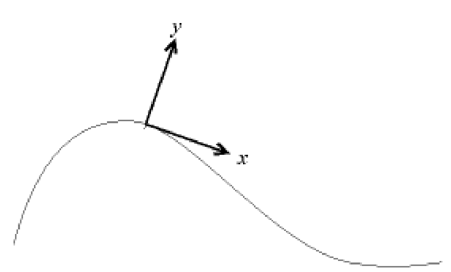


Définition de l'abscisse curviligne

Pour simplifier les calculs, on définit souvent un repère local dit « de Frenet » pour chaque instant ; en un point de la courbe, l'axe des [redacted] est la tangente à la courbe et orienté dans le sens du mouvement, et l'axe des [redacted] est la normale à la courbe orienté de sorte que le repère soit direct[6] . Ce n'est pas un référentiel mobile par rapport au référentiel de l'étude, c'est un repère « jetable », défini juste à un instant [redacted] pour simplifier l'écriture des grandeurs à cet instant donné. Le référentiel reste celui du laboratoire, seule change la manière dont on exprime les composantes des vecteurs.

Mouvement simple

Le problème est donc ramené à trouver la fonction donnant la position sur la courbe en fonction du temps, soit [redacted]. On appelle diagramme horaire le graphe de $[t, s(t)]$: de tels diagrammes sont très utilisés pour les trains (par exemple en France, le CHAIX donne pour l'ensemble du réseau les diagrammes horaires, ce qui permet de calculer les tableaux de correspondance de transport de gare en gare).



Définition du repère de Frenet

Mouvement rectiligne

Le cas le plus simple est celui du mouvement rectiligne : la trajectoire décrite est une droite.

Mouvement rectiligne uniforme (MRU)

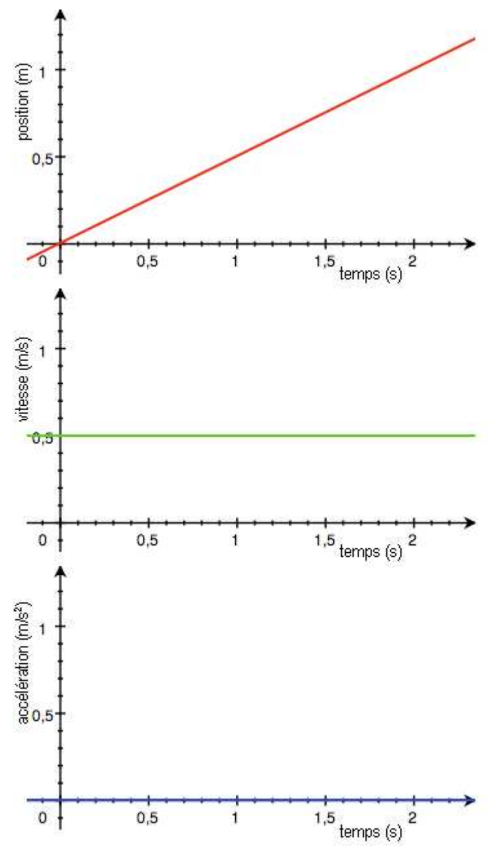
Le mouvement est dit **rectiligne uniforme** si la vitesse [redacted] est constante ; cela correspond au mouvement d'un objet lancé dans l'espace hors de toute interaction, ou encore au mouvement d'un objet glissant sans frottement. On a : $s = v \cdot t$

L'abscisse curviligne est alors une fonction linéaire du temps.

Mouvement dans lequel tout segment reliant 2 points du solide reste parallèle à lui-même au cours du temps est aussi une définition classique du mouvement rectiligne uniforme.

En étude des vitesses, ce type de mouvement a une propriété fondamentale. *Tous les points d'un solide en translation rectiligne uniforme ont le même vecteur vitesse.*

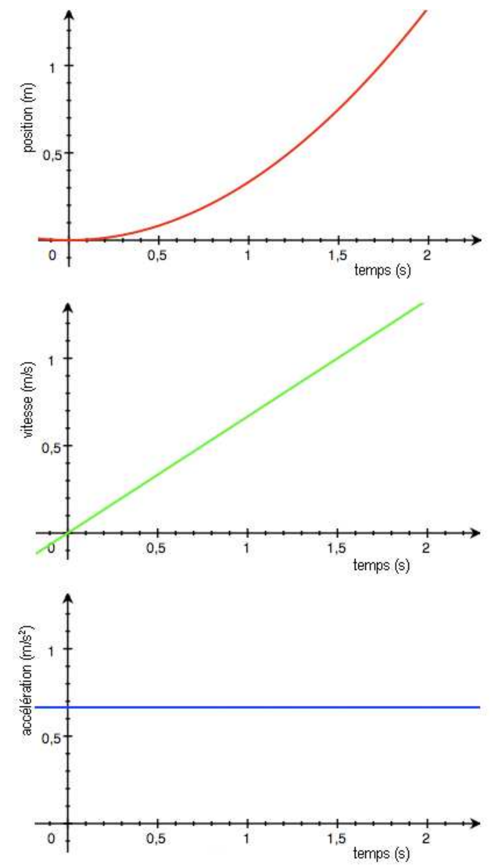
On considère de plus qu'un solide immobile est en translation rectiligne uniforme : **L'immobilité est un cas particulier du mouvement rectiligne uniforme.**



Evolution de la position, de la vitesse et de l'accélération d'un corps dans un mouvement rectiligne uniforme.

Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)

Le mouvement peut être **rectiligne uniformément accéléré — MRUA —** (on dit aussi *rectiligne uniformément varié*) ; le vecteur accélération [redacted] est constant. Ceci correspond à la chute libre (sans frottement) d'un objet lâché avec une vitesse initiale nulle ou dirigée verticalement ; ou bien un mouvement sans frottement sur un plan incliné d'un mobile lâché avec une vitesse initiale nulle ou dirigée par la pente du plan incliné. On a l'accélération



Evolution de la position, de la vitesse et de l'accélération d'un corps dans un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

$$a = \|\vec{a}\| = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

qui est constante, soit :

$$v = \|\vec{v}\| = a \cdot t + v_0$$

où [redacted] est la vitesse à [redacted] (elle est nulle si l'objet est lâché sans vitesse initiale), et

$$x(t) = \frac{1}{2}a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + x_0$$

(on prend $x_0 = 0$ à [redacted]). La vitesse est une fonction linéaire du temps, et l'abscisse curviligne est une fonction parabolique du temps.

Dans le cas de la chute d'un corps, $a = -g$, où [redacted] est l'accélération de la pesanteur au lieu considéré.

Le temps nécessaire au solide pour atteindre une position, se calcule en fonction de l'accélération et en fonction des conditions initiales.

Exemple

Prenons une fusée dont la position x varie à chaque instant t ; elle suit une trajectoire rectiligne $A-B$. Elle subit une accélération a de 6 $m \cdot s^{-2}$, et on prend $x = 0$ et $v = 0$ à $t = 0$.

Si sa vitesse était constante, on aurait

$$x = v \cdot t.$$

Mais comme la fusée a une accélération continue, il faut utiliser

$$x = 1/2 \cdot a \cdot t^2.$$

Donc, après 5 secondes de vol depuis A, la fusée est à $(6/2) \cdot (5^2) = 75$ mètres de A. Maintenant pour connaître sa vitesse, on calcule

$$v = a \cdot t.$$

Donc si la fusée est en vol depuis 5 secondes, sa vitesse est de 30 $m \cdot s^{-1}$.

Mouvement circulaire

Le centre d'inertie du mobile décrit un cercle. Cela peut être un mobile contraint à suivre cette trajectoire comme par exemple une bille dans une gouttière circulaire, un pendule à fil dont le fil reste tendu, ou un train sur un rail circulaire.

Le mouvement est dit **circulaire uniforme** si la norme v de la vitesse est constante. L'équation horaire est alors du type

$$\begin{cases} x = x_C + r \cdot \cos(\omega t) \\ y = y_C + r \cdot \sin(\omega t) \end{cases}$$

où (x_C, y_C) sont les coordonnées du centre du cercle, r est le rayon du cercle et ω est la **vitesse angulaire** du centre d'inertie du mobile, exprimée en radian par seconde. On a :

$$v = r\omega$$

Le vecteur vitesse est tangent au cercle ; on a :

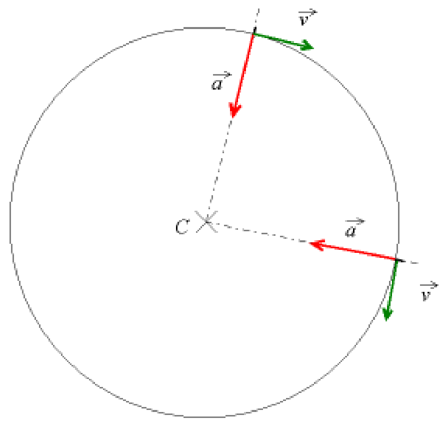
$$s = vt = r\omega t$$

On voit aussi que l'accélération est toujours dirigée vers le centre du cercle (on parle d'*accélération centrale centripète*), et sa norme vaut

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Ceci explique que lorsque l'on tourne en voiture, plus le virage est serré (r est faible), plus l'accélération est importante.

Dans le repère de Frenet, on a :



mouvement circulaire uniforme : la vitesse est tangentielle et l'accélération est centripète — l'accélération et la vitesse n'étant pas homogènes, on utilise une échelle différente pour ces deux types de vecteur

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ v^2/r \end{pmatrix}$$

Le mouvement du pendule à fil ou d'une bille dans une gouttière est **circulaire** mais pas uniforme.

Mouvement elliptique

Le centre d'inertie du mobile décrit une ellipse (le mouvement circulaire est un cas particulier du mouvement elliptique). Cela peut être le mouvement d'une voiture sur une courbe suivant un arc d'ellipse, ou bien celui d'un satellite autour d'une planète dans un référentiel galiléen dans lequel la planète est fixe, ou encore le mouvement d'une planète ou d'une comète autour d'une étoile ; l'objet le plus massif est alors à un des foyers de l'ellipse.

On définit la vitesse aréolaire comme étant l'aire balayée par un rayon joignant le foyer au centre d'inertie du mobile.

Dans le cas des mouvement orbitaux, le moment cinétique $\vec{L_f}$ par rapport à un foyer f est constant (ceci peut se déduire du principe de conservation du moment cinétique d'un système isolé) :

$$\vec{L_f} = \vec{r} \wedge \vec{p}$$

où

- $\vec{r}$ est le vecteur reliant le foyer au mobile ;
- $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ est la quantité de mouvement du mobile (*m* est la masse, $\vec{v}$ le vecteur vitesse)
- $\wedge$ désigne le produit vectoriel.

Articles détaillés : Orbite, Mécanique céleste, Problème à deux corps, Mouvement à force centrale et Lois de Kepler.

Mouvement quelconque

Pour considérer les mouvement quelconques, on peut travailler de deux manières :

- considérer localement la tangente au mouvement, et utiliser les notions développées avec les trajectoires rectilignes uniformes
- considérer localement que l'on a un mouvement circulaire uniforme.

Ces deux approximations sont valables si l'on considère des temps courts.

Approximation tangentielle

En général, le mouvement du centre d'inertie d'un mobile est enregistré de manière échantillonnée, c'est-à-dire que l'on a des points discrets correspondant à des position à des instants séparés d'une durée [redacted]. Si l'on considère trois points consécutifs [redacted], [redacted]et [redacted], correspondant à des instants $t_1 - \delta t, t_1$et $t_1 + \delta t$.

La première approximation consiste à dire que la tangente en [redacted]est parallèle à la corde $[M_1 M_3]$. Ceci est légitimé par un théorème mathématique disant que pour une fonction continue et dérivable sur un intervalle, il existe un point de cet intervalle dont la dérivée vaut la pente entre les points extrêmes de la courbe sur cet intervalle (voir *Théorème des accroissements finis*). On peut aussi rapprocher cela du fait que sur un cercle, la médiatrice d'une corde passe par le milieu de la corde et est perpendiculaire à la tangente au milieu de la corde (puisque c'est un rayon).

La deuxième approximation consiste à estimer la norme de la vitesse constante entre [redacted]et [redacted], ce qui est acceptable si la durée est petite par rapport à l'accélération tangentielle. On estime donc que l'on a

$$v(t_1) = \frac{s_3 - s_1}{2\delta t}$$

La variation de ce vecteur vitesse donne le vecteur accélération. La composante tangentielle vaut :

$$a_x = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

ou par approximation

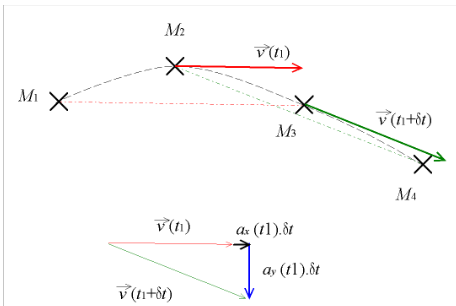
$$a_x = \frac{v_x(t_1 + \delta t) - v_x(t)}{\delta t} = \frac{v(t_1 + \delta t) - v(t)}{\delta t}$$

en effet, dans le repère de Frenet, on a $v_x(t) = v(t)$, et on fait l'approximation $v_x(t + \delta t) = v(t + \delta t)$ (approximation d'ordre 0). La composante normale est donnée par la variation de direction du vecteur vitesse ; on a $v_y(t_1) = 0$par définition du repère de Frenet, soit

$$a_y = \frac{v_y(t_1 + \delta t)}{\delta t}$$

(approximation d'ordre 1, puisque l'ordre 0 est nul).

Dans le cas où le mouvement est lent par rapport à la précision de la mesure, la position enregistrée va avoir des variations dues aux incertitudes de mesure ; ainsi, au lieu d'avoir une courbe lisse, on va avoir une courbe présentant des oscillations (du bruit). Si l'on prend les points tels quels, on va calculer des vitesses instantanées incohérentes qui vont se répercuter sur les calculs des accélérations. Si les données sont traitées de manière informatique, on effectue donc un lissage des données.



détermination de la vitesse et de l'accélération à partir d'un relevé des positions à des instants séparés de [redacted]

Rayon de courbure

choisissons sur une courbe (C) un point M_0 comme origine, et désignons par $M(t)$ la position du mobile à l'instant t et par $s = M_0M$ l'abscisse curviligne du point M.

$$\vec{v} = v.\vec{t}$$

On définit en tout point le **rayon de courbure** ρ de la trajectoire, par :

$$\rho = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}\theta}$$

où dθ est l'angle formé entre les deux vecteurs vitesse aux points $M(t)$ et $M'(t+\mathrm{d}t)$.

Exemple

Dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$, considérons le mouvement d'équation horaire :

$x = 1 + \cos 2t$ et $y = \sin 2t$

le vecteur position s'écrit

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} = (1 + \cos 2t) \cdot \vec{i} + (\sin 2t) \cdot \vec{j}$$

le vecteur vitesse s'écrit

$$\vec{v} = \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t} = -2 \sin 2t \cdot \vec{i} + 2\ cos2t \cdot \vec{j}$$

le module du vecteur vitesse est

$\|v\| = 2$, c'est une constante.

L'accélération tangentielle est

$$a_t = \frac{\mathrm{d}\|v\|}{\mathrm{d}t} = 0\cdot$$

Le vecteur accélération totale est :

$$a = (-4 \cos 2t) \cdot \vec{i} + (-4 \sin 2t) \cdot \vec{j}$$

son module est

$\|a\| = 4$, c'est une constante.

Les accélérations totale, tangentielle et normale forment un triangle rectangle ayant l'accélération totale pour hypoténuse ; alors d'après le théorème de Pythagore on a : $a^2 = a_t^2 + a_n^2$ ce qui donne que

$a_n = 4$

Or on a :

$$\rho = \frac{v^2}{a_n}$$

donc

ρ = 1, c'est une constante

donc cette courbe n'est autre qu'un cercle.

Enregistrement du mouvement

L'enregistrement du mouvement, c'est-à-dire le relevé de la position et de la vitesse, est le fondement de l'étude cinématique.

Enseignement et travaux pratiques

Le pré-requis pour faire une étude cinématique consiste à enregistrer le mouvement. Dans le cadre de l'enseignement, on étudie en général le mouvement de palets autoporteurs. Ce sont des appareils cylindriques sur coussin d'air (un jet d'air les maintient quelques millimètres au-dessus de la table), ce qui leur permet de glisser sans frottement (on néglige les frottements de l'air). On utilise une table conductrice d'électricité avec un papier spécial ; reliés à une base de temps (une horloge qui délivre des impulsions électriques à des instants espacés de δt), les palets autoporteurs provoquent des étincelles qui marquent le papier spécial. Ainsi, chaque point sur le papier correspond à la position du centre d'inertie à un instant donné. Ceci permet d'étudier le mouvement sur un plan horizontal et incliné, éventuellement avec deux palets (indépendants, reliés par un élastique ou s'entrechoquant).

Pour étudier la chute libre verticale, on utilise un objet lourd et profilé, une sorte d'obus métallique, que l'on fait tomber verticalement dans une cage (afin qu'il ne bascule pas après l'impact sur la zone de réception). On colle une feuille de papier dessus, et la cage est munie d'une « lance rotative », projetant un fin jet d'encre. La lance tournant selon une fréquence constante, chaque trait sur le papier marque le point présent au niveau de la lance à un moment donné.

Grâce à la réduction du coût du matériel informatique, on peut maintenant disposer d'un caméscope numérique. On peut donc filmer le mouvement (le caméscope étant fixe, posé sur un pied), puis en affichant les images une par une, relever la position de l'objet pour chaque image (en France, la vidéo enregistre 25 images par seconde).

Sur la route

Les forces de police s'intéressent en général uniquement à la vitesse et disposent de cinémomètres à effet Doppler-Fizeau, improprement appelés « radars ». Ceux-ci permettent de mesurer directement la vitesse instantanée. Lorsque s'est produit un accident, les traces de freinage, et les éventuelles traces d'impact sur le mobilier urbain ou les rails de sécurité, permettent de recomposer la trajectoire des véhicules. Notamment, la longueur des traces de freinage permet d'estimer la vitesse avant le début du freinage (la force de freinage étant constante).

Le conducteur, quant à lui, dispose d'un tachymètre (indicateur de vitesse) sur son tableau de bord, qui lui permet de connaître également sa vitesse instantanée. Il se base en général sur la fréquence de rotation des roues ; par exemple, une pastille réfléchissante est collée sur l'arbre de transmission, et une cellule photo-détectrice permet de connaître le temps qui s'écoule entre deux passage de la pastille, donc la fréquence de rotation, donc la vitesse.

Les cyclistes mettent un aimant sur un rayon de la roue avant et un détecteur magnétique sur la fourche, ce qui leur permet, de la même manière, de mesurer la vitesse et le chemin parcouru. D'anciens systèmes étaient basés sur une petite roue tournant, entraînée par la roue du vélo.

Les marcheurs disposent de podomètres qui détectent les vibrations caractéristiques du pas. Le marcheur ayant rentré la longueur moyenne de son pas, l'appareil peut déterminer la distance parcourue ainsi que la vitesse (produit de la longueur du pas par la fréquence de pas).

La vidéo couplée à l'analyse informatisée des images permet également de déterminer la position et la vitesse des véhicules. Ceci est utilisé pour estimer le trafic et détecter les embouteillages, et pourrait faire son apparition dans les véhicules dans un avenir proche, afin de fournir une aide à la conduite (par exemple évaluation des distances de sécurité en fonction de la vitesse, détection de trajectoires anormales et de freinage d'urgence).

Navigation maritime et aérienne

Aux débuts de la navigation maritime côtière, les marins se repéraient grâce aux reliefs de la côte. Les éléments caractéristiques (villes, phares, églises...), appelés amers, sont toujours utilisés et permettent une localisation rapide et simple, facilement exploitable en cas de demande de secours (voir *Navigation par relèvements*).

La navigation au long cours fut rendue possible grâce au développement des horloges ; en effet, elle utilisait la position des astres, or celle-ci varie avec l'heure. Connaissant la date et l'heure, et muni d'un éphéméride (relevé des positions des étoiles selon la date et l'heure), les astres jouaient alors le même rôle que les repères côtiers (voir *Navigation astronomique*).

La boussole permet de déterminer le cap que l'on suit, et pour un navire, la vitesse peut être estimée par la vitesse du vent et les courants. Ceci permet d'anticiper la trajectoire.

Pour se repérer, les aviateurs et marins naviguant aux instruments disposent des signaux émis par des satellites (système GPS et futur système Galileo) ou des balises radio au sol. Des satellites émettent des signaux synchronisés, et le décalage entre la réception des signaux permet de déterminer la position sur le globe terrestre (voir *Système de positionnement*) ; ces systèmes sont également accessibles aux véhicules terrestres et aux piétons. Pour le décollage et l'atterrissage, les avions disposent de balises radio posées au sol leur donnant un repérage précis par rapport à la piste, permettant des manœuvres sans visibilité (de nuit ou par mauvais temps).

Les systèmes de surveillance aérienne (tour de contrôle, aviation civile, armée) ou nautique (CROSS, centre régional opérationnel de surveillance et de sauvetage), ainsi que certains avions et navires, sont munis de radars. Ces dispositifs émettent une impulsion radio dans toutes les directions (en général avec une antenne tournante). Une impulsion revient si elle rencontre un obstacle ; le temps qu'elle met à revenir permet de déterminer la distance de l'obstacle, et le décalage en fréquence permet de déterminer la vitesse de l'obstacle (effet Doppler-Fizeau).

Article connexe : Triangulation.

Références

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Cin%C3%A9matique

[2] Pierre Varignon, *Du mouvement en général par toutes sortes de courbes, & des forces centrales, tant centrifuges que centripètes, nécessaires aux corps qui les décrivent*, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences (MARS), 1700, Pag 83-101, Consulter l'article (http://www.academie-sciences.fr/archives/doc_anciens/hmvol3502_pdf/p83_101_vol3502m.pdf)

[3] **(fr)** Université en ligne (http://www.uel-pcsm.education.fr/consultation/reference/physique/meca/apprendre/chapitrea/a1.htm), *Mécanique*

[4] **(fr)** Vecteur position, Vitesse, Accélération (http://jgarrigues.perso.ec-marseille.fr/gdhtml/coursgdnode8.html)

[5] **(fr)** Mécanique du point matériel (http://cristallo.epfl.ch/exercices/exercices_schiltz/2007-2008/Cours6.pdf), *PDF sur les bases*

[6] **(fr)** Repère de Frenet (http://ielnx1.epfl.ch/e-lin/Ryhming/documents/sessions/documents_published/doc25.html)

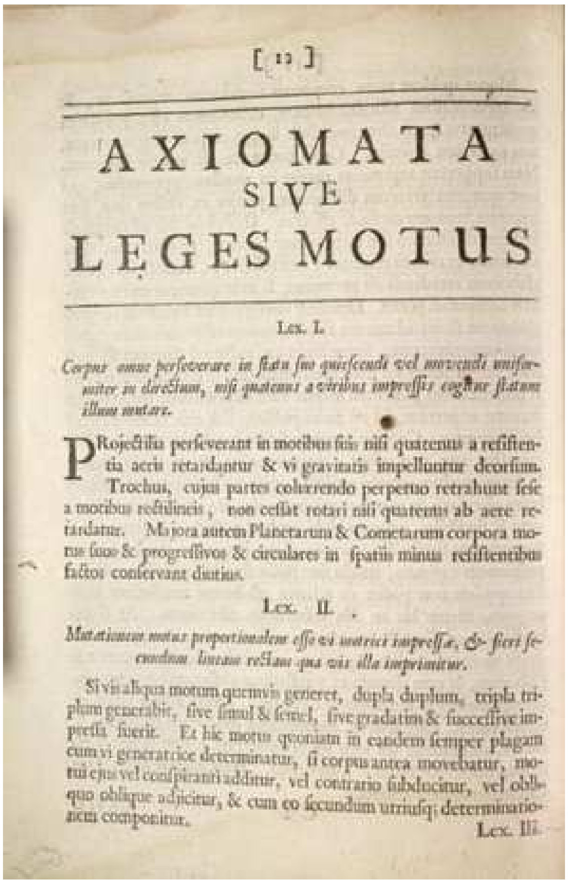
Voir aussi

- SAM (http://www.artas.nl) Conception, Analyse de Mouvement/Force et Optimisation de mécanisme 2-D
- Repère de Frenet

- Portail de la physique
- Portail du génie mécanique

Lois du mouvement de Newton

Les **lois du mouvement de Newton** sont en fait des *principes* à la base de la grande théorie de Newton concernant le mouvement des corps, théorie que l'on nomme aujourd'hui Mécanique newtonienne ou encore Mécanique classique. À ces lois générales du mouvement fondées en particulier sur le principe de relativité des mouvements, Newton a ajouté la loi de la gravitation universelle permettant d'interpréter aussi bien la chute des corps que le mouvement de la Lune autour de la Terre.


[12]

AXIOMATA
SIVE
LEGES MOTUS

Lex. I.

Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.

Projectilia perseverant in motibus suis nisi quatenus a resistentia aeris retardantur & vi gravitatis impelluntur deorsum. Trochus, cujus partes cohærendo perpetuo retrahunt sese a motibus rectilineis, non cessat rotari nisi quatenus ab aere retardatur. Majora autem Planetarum & Cometarum corpora motus suos & progressivos & circulares in spatiis minus resistentibus factos conservant diutius.

Lex. II.

Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

Si vis aliqua motum quemvis generet, dupla duplum, tripla triplum generabit, sive simul & semel, sive gradatim & successive impressa fuerit. Et hic motus quoniam in eandem semper plagam cum vi generatrice determinatur, si corpus antea movebatur, motui ejus vel conspiranti additur, vel contrario subducitur, vel obliquo oblique adjicitur, & cum eo secundum utriusq; determinationem componitur.

Lex. III.

Les deux premières lois de Newton en latin dans l'édition originale du Principia Mathematica de 1687.

Première loi de Newton ou principe de l'inertie

Énoncé

L'énoncé original de la première loi du mouvement[1] est le suivant :

> « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. »

Dans la formulation moderne de la loi, on parle de mouvement rectiligne uniforme, et on remplace la notion de force (unique) par celle, plus générale, de résultante des forces appliquées sur le corps. Autrement dit, s'il n'y a pas de force qui s'exerce sur un corps (corps isolé), ou si la somme des forces (ou force résultante) s'exerçant sur lui est égale au vecteur nul (corps pseudo-isolé), la direction et la norme de sa vitesse ne changent pas ou, ce qui revient au même, son accélération est nulle. Cette première loi infirme la conception héritée d'Aristote, selon laquelle pour maintenir la vitesse d'un mobile constante, il était nécessaire de lui appliquer une force.

Article détaillé : Principe fondamental de la statique.

Bien que Newton ne l'ait pas précisé dans son ouvrage, cette loi n'est valable que dans un référentiel galiléen. La première loi de Newton peut donc être reformulée dans un langage plus moderne :

> « Dans un référentiel galiléen, le vecteur vitesse du centre d'inertie d'un système est constant si et seulement si la somme des vecteurs forces qui s'exercent sur le système est un vecteur nul. »

Problème du référentiel galiléen

Article détaillé : Recherche d'un référentiel inertiel.

La définition d'un référentiel galiléen apparaît fondamentale et est souvent formulée ainsi :

> « Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel la première loi de Newton est vérifiée. »

Ainsi la première loi de Newton ne s'applique que dans un référentiel galiléen et un référentiel galiléen est un référentiel où la première loi de Newton s'applique… ce qui semble être une définition circulaire. Pour éviter ce problème, on peut réécrire le principe d'inertie comme suit :

> « Il existe une famille de référentiels, appelés galiléens ou inertiels, tels que, par rapport à l'un de ces référentiels, tout point matériel isolé (qui n'est soumis à aucune action extérieure) est soit au repos, soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme. »

La détermination d'un *bon* référentiel galiléen est en réalité expérimentale et comme souvent en Physique, seule la cohérence entre la théorie (ici la première loi de Newton) et la mesure (mouvement rectiligne uniforme) valide le choix *a posteriori*.

Deuxième loi de Newton ou principe fondamental de la dynamique de translation

Énoncé

La deuxième loi de Newton (ou principe fondamental de la dynamique en translation (PFDT) - parfois appelée *relation fondamentale de la dynamique* ou (RFD) s'énonce ainsi : Soit un corps de masse *m* (constante) : l'accélération subie par ce corps dans un référentiel galiléen est proportionnelle à la résultante des forces qu'il subit, et inversement proportionnelle à sa masse *m*.

Ceci est souvent récapitulé dans l'équation :

$$\vec{a} = \frac{1}{m} \sum \vec{\mathrm{F}}_i$$

— ou —

$$\sum \vec{\mathrm{F}}_i = m\vec{a}$$

où

- $\vec{\mathrm{F}}_i$ désigne les forces extérieures exercées sur l'objet,
- *m* est sa masse, et
- $\vec{a}$ correspond à l'accélération de son centre d'inertie G.

Article détaillé : Principe fondamental de la dynamique.

Enseignement de la deuxième loi de Newton

Les étudiants éprouvent de grandes difficultés pour utiliser les lois de Newton telles qu’elles sont traditionnellement énoncées et ce n’est pas sans raison. En effet les forces semblent s’exercer comme si elles existaient en elles-mêmes, *ex abrupto*. Proposons donc une nouvelle formulation de la loi en l’accompagnant de son mode opératoire afin que chacun puisse l’appliquer rationnellement, c’est-à-dire en argumentant.

Dans un repère galiléen la somme des forces $\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{Oext/B}}(t)$ que les objets extérieurs à l’objet B exercent sur B est égale au produit de la masse m_{B} de B par l'accélération $\vec{a}_{\mathrm{B}}(t)$ de B :

$$\sum \vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{Oext/B}}(t) = m_{\mathrm{B}}\vec{a}_{\mathrm{B}}(t).$$

L’écriture fait apparaître que les forces et l’accélération varient au cours du temps, alors que la masse de l’objet est considérée comme constante dans le domaine de validité considéré et que les vitesses des objets macroscopiques sont faibles par rapport à la vitesse de la lumière.

Dans les problèmes qui visent à décrire le mouvement d'un objet B lorsqu'il est immuable et représentable par un point (ce qu'on appelle le modèle du « point matériel »), les procédures d'utilisation sont les suivantes :

- Sélectionner par la pensée l'objet B dont on veut décrire le mouvement.
- Répertorier tous les objets qui lui sont extérieurs et qui exercent une force « notable » sur B. Pour y parvenir il est indispensable de connaître les ordres de grandeur des différentes interactions entre les objets matériels en présence afin de les hiérarchiser ; seules les plus intenses interviennent dans la modélisation de la situation où se pose le problème à résoudre.

Retour sur le principe d'inertie

Pour un corps soumis à une résultante des forces nulle on retrouve bien la première loi de Newton, c'est-à-dire un mouvement rectiligne uniforme. En première analyse, on peut se demander quelle est l'utilité de la première loi puisqu'elle semble être une conséquence de la deuxième. En réalité, dans l'énoncé de Newton, il n'en est rien car la première loi n'est pas présentée comme un cas particulier de la deuxième mais comme une **condition suffisante** à l'application de cette dernière. En effet, énoncer la première loi, c'est affirmer l'*existence* des référentiels galiléens. Cela constitue un postulat extrêmement fort qui permet, dans les exposés modernes de la mécanique classique, de définir les repères galiléens qui sont les seuls repères dans lesquels la seconde loi est valide. En l'absence de la première loi, la seconde loi est inapplicable puisqu'on ne peut pas définir son domaine de validité. Par conséquent, l'ordre logique dans lequel les lois sont énoncées n'est pas le fruit du hasard mais bien celui d'une construction intellectuelle cohérente.

Troisième loi de Newton ou principe des actions réciproques

> « Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B ».

A et B étant deux corps en interaction, la force $\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{A/B}}$(exercée par A sur B) et la force $\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{B/A}}$(exercée par B sur A) qui décrivent l'interaction sont directement opposées :

$$\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{A/B}} = -\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{B/A}}$$

Dans le cas de la mécanique du point, la troisième loi précise également :

$\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{A/B}} + \vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{B/A}} = \vec{0}$: la force d'interaction est portée par la droite reliant les positions des particules.

Ces forces ont la même droite d'action, des sens opposés et la même norme. Ces deux forces sont toujours directement opposées, qu'A et B soient immobiles ou en mouvement.

Cette loi est parfois appelée *loi d'action - réaction*, une formulation au mieux imprécise, au pire entraînant de nombreuses confusions. En particulier, cette ancienne formulation véhicule l'idée qu'il y a toujours une force qui est la « cause » (l'action), l'autre n'étant qu'une sorte de conséquence (la réaction).

Une autre difficulté rencontrée par les étudiants est l'oubli que ces deux forces $\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{A/B}}$et $\vec{\mathrm{F}}_{\mathrm{B/A}}$s'exercent sur deux corps différents. Elles ne peuvent donc pas « s'annuler mutuellement ». L'effet d'annulation n'intervient que lorsqu'on considère un système constitué de différents corps et que l'on s'intéresse à la résultante des forces : dans ce cas, les forces intérieures s'annulent en effet et seule la somme des forces extérieures est à prendre en compte (ce qui est heureux pour étudier le mouvement d'un solide constitué de plus de 10^{23} éléments[2]).
La loi des actions réciproques a l'inconvénient de supposer l'application des forces comme instantanée (ce qui est abandonné en relativité restreinte). Dans le cas des forces à distance, il convient dans certains cas d'effectuer des transformations pour tenir compte du retard de propagation.

Cette correction ne relève pas de la relativité. Comme les forces électromagnétiques s'appliquent à distance, on avait mis en évidence que ces forces se propagent à la vitesse de la lumière et non à vitesse infinie et inclus cette nuance dans les équations avant la révolution de la relativité restreinte[3] .

Autres lois de Newton

Loi d'interaction gravitationnelle

Article détaillé : Loi universelle de la gravitation.

Certains auteurs (minoritaires) appellent *quatrième loi de Newton* sa Loi universelle de la gravitation. Cette dénomination est très contestable, mais elle est mentionnée ici à cause de la parenté historique des lois : si cette loi ne fait pas partie des principes de la mécanique au même titre que les trois autres et le principe de relativité, la première réussite de Newton fut d'utiliser ses lois mécaniques plus sa loi d'interaction gravitationnelle pour démontrer les lois empiriques de Kepler. Ce sont ces premiers succès qui établirent pour longtemps la domination des lois de Newton sur la science.

Notons qu'en combinant cette loi et le principe fondamental de la dynamique, on démontre la prédiction de Galilée selon laquelle dans le vide, tous les objets volent à la même vitesse (en admettant implicitement qu'inertie et masse gravitationnelle sont égales).

« Quatrieme corollaire » de Newton : principe de relativité

Newton dans ses Principia a mis en évidence la notion de relativité du mouvement dans les définitions précédant le livre premier. Toutefois, en introduisant dans les scholies II et IV la notion d'espace absolu, il ne dégage pas encore la notion de référentiel galiléen telle qu'elle est définie aujourd'hui. D'autre part, Newton ne fait aucune référence au cas où un référentiel n'est pas en mouvement rectiligne uniforme par rapport à ce qu'il appelle *l'espace absolu*. Ses résultats sont donc implicitement valables dans des référentiels en mouvement rectiligne uniforme mais aucune infirmation de la validité de ses lois dans les référentiels accélérés n'est donnée dans les *Principia*. Il faudra attendre les travaux de Coriolis et de Foucault au XIX^{e} siècle pour que la notion de référentiel galiléen telle qu'elle est connue aujourd'hui se dégage et pour que les formules de changement de repère vers (ou depuis) un référentiel non galiléen soient établies.

Le principe de relativité s'énonce comme suit :

> « Deux référentiels d'espace en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre sont équivalents pour les lois de la mécanique. »

(au sens de Newton, il faudrait se restreindre aux référentiels en mouvement rectiligne uniforme par rapport à l'espace absolu, en se souvenant que si un référentiel est en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un deuxième lui-même en mouvement rectiligne uniforme par rapport à l'espace absolu, alors le premier référentiel est en mouvement rectiligne uniforme par rapport à l'espace absolu)

On pourra le vérifier en admettant les trois premières lois, l'invariance du temps, de la masse et des forces (implicite en physique pré-einsteinienne). C'est pourquoi ce principe est appelé ici corollaire.

Ce principe est dit principe de relativité galiléenne car on en trouve la trace dans le célèbre Dialogue de Galilée, quoique Galilée avait supposé qu'il en était de même pour une rotation uniforme.

Une formulation plus moderne affirme que toutes les lois de la physique sont les mêmes pour deux référentiels d'espace en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre. C'est cette formulation forte qui est à la base de la relativité restreinte.

Remarque

> Le référentiel héliocentrique est (généralement considéré comme) galiléen et c'est dans ce référentiel que sont étudiés les mouvements des planètes et des sondes spatiales. Considérer le référentiel géocentrique comme galiléen, alors que le centre de la Terre est en accélération autour du Soleil, revient à négliger les forces de marée. Considérer le référentiel terrestre comme galiléen revient à négliger la composante centrifuge dans la «

pesanteur », et la force de Coriolis si le point matériel est en mouvement. D'une façon pragmatique, savoir trouver à quel degré d'approximation un référentiel peut être (considéré comme) galiléen est une quête sans cesse repoussée.

Histoire et épistémologie

Contexte historique

Isaac Newton a énoncé ses lois dans le premier volume de son *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* en 1687 et, à l'aide des nouveaux outils mathématiques qu'il a développé, il a prouvé beaucoup de résultats au sujet du mouvement des particules idéalisées.

Certains détracteurs de Newton disent qu'il s'est inspiré des travaux de Galilée pour écrire son premier principe (en reprenant presque l'énoncé de Galilée : « Tout corps continuera dans son mouvement de ligne droite *ad eternam* s'il n'est soumis à aucune force », en rajoutant toutefois la notion d'uniformité du mouvement).

Il convient de nuancer : si Newton avait connaissance des travaux de Galilée, son rôle a été de formaliser les idées de Galilée et d'en tirer les conséquences qui ont permis de construire la mécanique. Quand Newton affirme « Si j'ai vu plus loin que les autres, c'est parce que j'ai été porté par des épaules de géants. », le lecteur averti est censé comprendre que le travail s'inscrit dans la continuité de celui de Galilée. En fait, on pourrait même dire que Newton n'a pas précisé que le principe d'inertie et le principe de relativité, sur lesquels il s'est basé pour construire toute la mécanique, ont été édictés par Galilée, tout simplement parce qu'il estime que le lecteur est censé le savoir !

Les deux premiers volumes sont mathématiques. Dans le troisième volume, la philosophie naturelle (ancienne dénomination de la physique des phénomènes naturels) est expliquée : il a montré comment ses lois du mouvement combinées à sa loi universelle de la gravitation expliquent le mouvement des planètes et permettent de dériver les lois de Kepler.

Épistémologie

Les lois sus-citées ont été **mises en forme** et édictées par Newton. Mais les fondements proviennent de travaux antérieurs : Galilée, Torricelli, Descartes, Huygens, Hooke, « J'ai été porté par des épaules de géants. » reconnaissait lui-même Newton.

D'autre part, comme l'a fait remarquer Ernst Mach [4] :

> « On reconnaît sans peine que les lois I et II sont contenues dans les définitions de la force précédemment données. D'après celles-ci, il ne peut en effet exister, en l'absence de toute force, que le repos ou le mouvement rectiligne uniforme. C'est une tautologie tout à fait inutile de répéter que la variation du mouvement est proportionnelle à la force après avoir posé que l'accélération est la mesure de celle-ci. Il eut suffit de dire que les définitions données n'étaient pas des définitions arbitraires et mathématiques, mais répondaient à des propriétés expérimentales des corps. »

Dans cette critique, Mach fait référence à la définition IV des *Principia*, laquelle introduit la notion de force, fondamentale en physique :

> « La force imprimée (vis impressa) est l'action par laquelle l'état du corps est changé, soit que cet état soit le repos, ou le mouvement uniforme en ligne droite.[1] »

Mais on peut aller encore plus loin : la conservation de la quantité de mouvement de systèmes peut être érigée en principe premier de la mécanique. Cette démarche présente l'avantage de reposer sur un concept, la quantité de mouvement, permet de traiter des problèmes de mouvements relativistes.

De plus la troisième loi permet d'introduire le concept d'*interaction* absolument non trivial mais elle aussi fondamentale en physique. À l'époque, cette loi est une absurdité, si l'on se réfère par exemple au point de vue d'Aristote chez qui la magie et autres actions à distance n'existent pas dans le cadre de la physique. Rappelons que le magnétisme est interprété depuis le *de Magnete* de Gilbert par des « lignes spectrales », ou tourbillons. De même, la cause de la gravitation est interprétée par Descartes *via* une théorie (fausse) de tourbillons, si contradictoire que même Huygens n'y croit plus. Par contre, Newton déclarera dans une phrase restée célèbre : *hypotheses non fingo*, je ne chercherai pas la cause ultime de la gravitation. La gravitation « s'exprime » au travers de la loi centripète qu'il énonce, il ne fait aucune supposition sur la nature de cette force.

Newton sortait donc hardiment hors du cadre imposé par la physique de l'époque, d'où une critique véhémente, l'action instantanée à distance étant récusée (elle gênait d'ailleurs Newton lui-même), comme insensée (Rømer venait de montrer la finitude de la célérité de la lumière). En 1906, Poincaré[5] proposera une hypothèse moins choquante : la gravitation se propage à la vitesse limite c.

Approche de Laplace et de Noether

Les lois de Newton peuvent être construites à partir de thèses plus abstraites.

Les lois de Newton ont subi l'analyse critique de Laplace, puis Ernst Mach, puis Poincaré, puis de Kolmogorov.

Selon leur analyse le principe fondamental de la dynamique peut être ramené à une conséquence du déterminisme énoncée par Laplace dans son traité sur les probabilités :

> si on connaît la position initiale x_0 et la vitesse initiale v_0, alors l'équation du principe fondamental de la dynamique (PFD) dit que, la force étant F(x, v, t), il suffit de résoudre cette équation différentielle, pour déterminer le futur et le passé de la particule, $x(t)$ et $v(t)$.

Ainsi l'orbite hamiltonienne de l'électron dans le plan des phases [$x(t)$, $p(t)$] est déterminée par le PFD. C'est tout ce qu'affirme ce principe, puisque, par ailleurs, il faut trouver expérimentalement la loi F(x, v, t).

Même si le déterminisme tel que le définit Laplace souffre de limites, il est tout de même possible de montrer que le théorème de la quantité de mouvement repose sur les principes mêmes de la physique: c'est en effet une conséquence du Théorème de Noether.

Problèmes et limites

Univers absolu

Article détaillé : Temps newtonien.

Newton avait postulé : il existe un espace et un temps absolu.

En fait, on pouvait étendre à toute une classe de référentiels dits « inertiels » la notion d'espace absolu : quête sans fin, mais de plus en plus précise. Si aucun référentiel usuel n'est parfaitement inertiel, on peut du moins prouver qu'ils existent. Mais Newton a eu tort de ne pas croire entièrement Galilée qui défendait l'équivalence entre un référentiel et un autre évoluant à vitesse constante par rapport au premier.

Par contre, Newton se méfiait du temps absolu : il savait qu'en changeant l'échelle de temps, l'expression de son PFD changeait. Il l'a même savamment utilisé. Mais évidemment, il fallait prendre une décision : quelle échelle de temps choisir ? Ce qui paraissait le plus simple était la fameuse loi de Kepler. Et tout était cohérent.

Les notions de temps relatif, de finitude des vitesses, de synchronisation et de transport du temps allaient nécessiter encore beaucoup de découvertes avant d'être entrevues. Il a donc opté pour le temps dynamique absolu et édicté : le temps absolu s'écoule uniformément. C'est cette variable *t* qui intervient quand on écrit

$$v = \frac{dx}{dt},$$

puis

$$a = \frac{dv}{dt},$$

et donc :

$$a = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Ce temps absolu est généralement admis tant qu'on n'emploie pas la relativité restreinte. Mais il constitue néanmoins une hypothèse philosophique forte qui a été régulièrement discutée par Leibniz notamment qui disait :

> « J'ai marqué plus d'une fois que je tenais l'espace pour quelque chose de purement relatif, comme le temps ; pour un ordre de coexistences comme le temps est un ordre de successions… »

Limites relativistes

Article détaillé : Relativité restreinte.

Une des grandes difficultés des théories de Newton, mise à jour dès le XVII^{e} siècle est la notion d'action *instantanée* à distance. Newton lui-même était gêné par cette supposition présente tout aussi bien dans sa théorie de la gravitation que dans sa troisième loi.
Plus tard au cours du XVII^{e} siècle un certain nombre de difficultés, concernant l'électromagnétisme notamment, indiquèrent également que les principes de Newton ne pouvaient pas rendre compte en l'état de tous les problèmes mécaniques ou cinématiques.

La relativité restreinte démontre aujourd'hui qu'aucune interaction ne se propage plus vite que la vitesse de la lumière et remet donc définitivement en cause les interactions instantanées. De plus elle montre que pour des objets dont la vitesse est proche de celle de la lumière, les lois de Newton ne sont plus une bonne approximation. En fait, les formules de la relativité restreinte permettent de considérer la physique newtonienne comme une approximation en supposant c infinie.

Ainsi les lois de Newton ne sont pas réfutées par Einstein ; au contraire, la relativité permet de justifier les équations de Newton dans les cas de faibles vitesses en la rendant démontrable à partir d'une théorie plus générale qui l'englobe.

D'autre part même en relativité restreinte, les forces respectent toujours un théorème de la quantité de mouvement mais adapté, faisant apparaître le facteur de Lorentz. Le théorème de la quantité de mouvement est donc un théorème très puissant, puisqu'il permet de déduire les lois de Newton dans le cas où les faibles vitesses le permettent. Dans le cas contraire il s'inscrit dans les résultats de la relativité restreinte.

Il est donc absurde de dire que les lois de Newton sont fausses. La chute d'un corps sur Terre est un cas où les corrections apportées par la relativité sont définitives, comme pour la plupart des applications quotidiennes de la mécanique classique.

En revanche, une situation où les résultats sont radicalement modifiés est celle, par exemple, des accélérateurs de particules du CERN. L'énergie cinétique apportée à une particule de charge q par une tension V vaut q V. Avec le TeraVolt (1000 milliards de volts) du CERN, on trouve classiquement pour un électron une vitesse 2000000 fois supérieure à la vitesse de la lumière. La vitesse réelle, calculée dans le cadre relativiste est celle de la lumière diminuée de quelques microns/seconde. Il est donc essentiel de bien distinguer les situations où les lois de Newton sont valables de celles où elles ne sont plus utilisables.

Limites quantiques

Articles détaillés : Quantique et Principe d'incertitude.

La mécanique Newtonienne étudie surtout les systèmes macro-physiques. Dans ce contexte, l'espace et l'énergie sont implicitement considérés comme étant continus. Or, le monde de la mécanique quantique est celui des systèmes micro-physiques, pour lesquels ces concepts sont quantifiés. La mécanique Newtonienne s'appuie notamment sur le concept de force, sachant que la force dérive d'un potentiel (pour un système mécanique isolé). Toutefois, pour les systèmes micro-physiques (relevant de la mécanique quantique), la notion de force ne peut pas être définie puisque l'énergie potentielle comme les coordonnées d'espace sont quantifiées. En effet, en mathématique, la dérivée d'une fonction discontinue n'est pas définie. La mécanique de Newton trouve donc ses limites pour l'étude des systèmes micro-physiques, puisque l'hypothèse implicite basée sur un espace et une énergie continus est mise à mal pour ces systèmes.

Notes et références

[1] Principes mathématiques de la philosophie naturelle D'après la traduction du latin en français (http://www.scribd.com/doc/8538529/Newton-Principes-mathematiques-de-la-philosophie-naturelle) par Émilie du Chatelet (1756).
[2] Ce nombre représente à peu près le nombre d'Avogadro qui donne l'ordre de grandeur du nombre de particules contenues dans un corps macroscopique.
[3] Néanmoins, l'existence d'une vitesse de la lumière *absolue* (indépendante du référentiel d'étude) est incompatible avec la loi d'additivité des vitesses de la mécanique newtonienne et constitue la raison fondamentale pour laquelle cette dernière a été abandonnée au profit de la relativité.
[4] La mécanique. Exposé historique et critique de son développement Chapitre II *Développement des principes de la dynamique*, section VII *Critique synoptique des énoncés de Newton*, paragraphe 4. Traduction par Emile Bertrand (1904)
[5] H. Poincaré, Sur La Dynamique de l'électron, Rendiconti del Circolo matematico di Palermo, t. 21, p. 129-176 (1906), paragraphe 9.

- Portail de la physique
- Portail de l'astronomie

Mécanique analytique

La **mécanique classique** peut être écrite (formalisée) de différentes manières. La plus courante est la formulation de Newton, qui utilise la notion de force : elle est de loin la plus simple lorsqu'il s'agit de considérer un problème concret et c'est pourquoi c'est celle qui est enseignée. Mais pour pouvoir traiter des problèmes plus complexes ou plus finement, et pour pouvoir faire des démonstrations rigoureuses, cette formulation n'est pas la plus pratique.

La **mécanique analytique**, initiée dès le XVIIIe siècle, regroupe ainsi différentes formulations très mathématisées de la mécanique classique, notamment les mécaniques de Hamilton et de Lagrange. Elles ont toutes en commun l'application initiale d'un principe variationnel, et avec lui l'utilisation du calcul variationnel. Encore une fois, toutes ces formulations sont équivalentes.

- Point matériel
- Contrainte holonome | Principe de d'Alembert
- Mécanique de Lagrange | Point de Lagrange
- Mécanique de Hamilton | Équations de Hamilton-Jacobi
- Variété symplectique | Géométrie symplectique
- Symétries et lois de conservation

Les outils permettant de traiter ces problèmes sont, entre autres :

- les intégrales curvilignes
- les champs vectoriels hamiltoniens

Voir aussi : Physique | Mécanique quantique | Mécanique des fluides

- Portail de la physique

Mécanique des fluides

Cet article est une ébauche concernant la mécanique des fluides.

Vous pouvez partager vos connaissances en l’améliorant (**comment ?**) selon les recommandations des projets correspondants.

La **mécanique des fluides** est l’étude du comportement des fluides (liquides et gaz) et des forces internes associées. C’est une branche de la mécanique des milieux continus qui modélise la matière à l’aide de particules assez petites pour relever de l’analyse mathématique mais assez grandes par rapport aux molécules pour être décrites par des fonctions continues.

Elle se divise en statique des fluides, l’étude des fluides au repos, qui se réduit pour l’essentiel à l’hydrostatique et dynamique des fluides, et l’étude des fluides en mouvement.

L’étude de la mécanique des fluides remonte au moins à l’époque de la Grèce antique avec Archimède qui fut à l’origine de la statique des fluides.

Aujourd’hui, la dynamique des fluides est un domaine actif de la recherche avec de nombreux problèmes non résolus ou partiellement résolus. Elle utilise systématiquement des méthodes numériques qu’on regroupe en anglais sous le nom de Computational fluid dynamics.

Dans certains problèmes particuliers, faute de modélisation numérique correcte des phénomènes, des modèles réduits sont utilisés. Pour cette raison, et aussi pour présenter des lois empiriques, la mécanique des fluides utilise systématiquement des nombres sans dimensions.

Position des fluides dans la mécanique des milieux continus

Les différents domaines de la mécanique des milieux continus peuvent être situés sommairement à l'aide du tableau suivant.

<table>
<tr><td rowspan="4">Mécanique des milieux continus</td><td rowspan="2">Déformation élastique ou Résistance des matériaux</td><td colspan="2">Élasticité</td></tr>
<tr><td>Plasticité</td><td rowspan="2">Rhéologie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mécanique des fluides</td><td>Fluides non-newtoniens</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fluides newtoniens</td></tr>
</table>

Les fluides non-newtoniens (comme le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions, les émulsions,…) peuvent avoir des comportements très variés. Ils sont généralement inclus dans la rhéologie avec les solides plastiques et des corps aux comportements plus complexes.

En général on parle donc de mécanique des fluides à propos des seuls fluides newtoniens. Ils sont caractérisés par un coefficient de viscosité qui dépend de la température et de la pression. Cette mécanique des fluides réduite concerne essentiellement l’eau (hydraulique dans les conduites ou les canaux, hydrodynamique autour d’obstacles) et l’air (aéraulique dans les conduites, aérodynamique autour des obstacles).

Problèmes classiques de la mécanique des fluides

Tous les fluides sont visqueux, c'est-à-dire que le mouvement d'une couche fluide par rapport à une autre est freiné par un phénomène de frottement qui entraîne une perte d'énergie mécanique transformée en chaleur. Dans un fluide newtonien, la force tangentielle est proportionnelle au taux de variation de la vitesse, ce qui conduit aux équations de Navier-Stokes. L'importance relative de la viscosité est mesurée par le nombre de Reynolds.

Si l'écoulement est uniforme, la viscosité n'a aucun effet puisque toutes les particules se déplacent à la même vitesse. Ce sont les parois, sur lesquelles la vitesse d'un fluide visqueux s'annule, qui créent une variation de vitesse entre 0 et la vitesse de l'écoulement non perturbé.

Lorsque la viscosité est très importante (nombre de Reynolds inférieur à 1), l'écoulement est laminaire, c'est l'écoulement de Stokes.

En toutes circonstances, il suffit de s'éloigner suffisamment des parois pour trouver des vitesses quasi-constantes qui permettent de négliger la viscosité. Plus la valeur du nombre de Reynolds est élevée, plus cette zone, dans laquelle on peut considérer que l'on a affaire à un fluide parfait, est importante. Elle est alors soumise aux équations d'Euler, beaucoup plus simples que celles de Navier-Stokes. Les effets de la viscosité se concentrent alors dans la couche limite assez mince pour permettre de simplifier les équations visqueuses.

Dans une première gamme de Reynolds, l'écoulement reste généralement irrotationnel, dépourvu de tourbillons. Pour de plus fortes valeurs, la couche limite engendre un sillage tourbillonnaire à l'aval de l'obstacle (voir par exemple Allée de tourbillons de Karman).

Lorsque le nombre de Reynolds atteint des valeurs encore plus élevées, la couche limite, laminaire à l'amont, devient turbulente à l'aval, cette turbulence se transmettant au sillage, ce qui complique considérablement le problème.

D'autre part, tous les fluides sont plus ou moins compressibles, l'effet de la compressibilité étant mesuré par le nombre de Mach. Là encore, il est souvent possible de simplifier les équations en négligeant la compressibilité pour les faibles nombres de Mach. C'est le cas général en hydrodynamique et, en aérodynamique, pour les vitesses relativement faibles.

Domaines d’application

La mécanique des fluides au sens strict a de nombreuses applications dans divers domaines comme l'ingénierie navale, l'aéronautique, l'étude de l'écoulement du sang (hémodynamique), la météorologie, la climatologie ou encore l'océanographie.

Il existe également un grand nombre de domaines plus spécialisés qui peuvent s’écarter de la définition restrictive comme l’électro-fluidodynamique, la biodynamique, la microfluidique ou l’étude des écoulements polyphasiques. Elle est actuellement étendue à des écoulements tels que ceux des glaciers ou du manteau terrestre.

Voir aussi

Bibliographie

- *La mécanique des fluides. Dynamique de vie*, Pierre Henri Communay, Groupe de Recherche et d'Édition, Toulouse, 2000, 16x24 cm, (ISBN 2-84139-033-0).
- *Ce que disent les fluides*, E. Guyon, J-P. Hulin, L. Petit (Belin, 2005) (ISBN 2701135575)
- *Les bases de la mécanique des fluides et des transferts de chaleur et de masse pour l'ingénieur*, Esteban Saatdjian, Sapientia Editions 2009, (ISBN 978-2-911761-85-0).

Articles connexes

- Formules de mécanique des fluides
    - Application à un fluide en rotation : Équations primitives atmosphériques
- Hydrostatique
- Dynamique des fluides
- Théorème de Kutta-Jukowski
- Oléohydraulique
- Réseaux hydrauliques
- Thermohydraulique

Centres d'études en mécanique des fluides

- Office national d'études et de recherches aérospatiales

Liens externes

- **(fr) [pdf]** PDF reprenant les notions générales de la mécanique des fluides sur www.educnet.education.fr [1]
- **(fr) [pdf]** Article téléchargeable sur les vagues [2]
- **(fr)** Exemple d'écoulement du vent le long d'un vehicule en mouvement [3]
- Portail de la physique

Références

[1] http://www.educnet.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/mecafluide.pdf
[2] http://storage.canalblog.com/96/82/292736/22736294.pdf
[3] http://www.euro-se.fr/exemple%20cfd.html

Mécanique du point

La **mécanique du point** est l'étude du **mouvement des points matériels**. Alors que la cinématique permet d'étudier les relations entre les paramètres du mouvement (position, vitesse, accélération, etc.), la mécanique du point permet de prédire l'évolution de ces paramètres en connaissant les causes du mouvement. Celles-ci peuvent être les interactions de contact comme le frottement et la poussée, ou à distance comme l'attraction gravitationnelle et les interactions électromagnétiques. Toutes ces interactions sont modélisées par un objet physique unique : la force. Ainsi, en connaissant la force subie par le point matériel à tout moment, il est possible de prédire le mouvement.

Pour cela il est nécessaire de définir un référentiel, c'est-à-dire un repère de l'espace et une référence pour le temps (une horloge). Un *point matériel* est alors la donnée de quatre nombres : trois coordonnées (x,y,z) permettant de le repérer dans l'espace, et une masse m. En pratique, cet objet représente soit un objet de petite taille (particule, petite bille, etc.), soit un objet de grande taille pour lequel on néglige les effets dus à cette taille, comme la rotation sur lui-même. Dans tous les cas, on appelle cet objet le *mobile*. On s'intéresse alors uniquement au mouvement du *centre d'inertie* ou *barycentre* de ce mobile.

Il est intéressant d'étudier un tel mouvement dans les cas *statique* et *dynamique*[1] . D'une part, un point matériel est immobile dans un référentiel R si sa vitesse est nulle dans R. Ceci est étudié plus précisément dans l'article statique du point. D'autre part, si la somme des forces qui s'exercent sur le mobile est nulle, celui-ci a un mouvement rectiligne uniforme. Si ce n'est pas le cas, il existe une accélération qui entraîne une modification de la vitesse. Ceci est étudié en détails dans l'article dynamique du point. Dans ces deux cas, on peut résumer les principales caractéristiques du comportement de tels mobiles par les lois du mouvement de Newton. Celles-ci montrent par exemple que dans le vide, tous les objets en chute libre présentent le même mouvement (ceci devient faux lorsqu'intervient le frottement de l'air).

La mécanique du point, malgré son apparente simplicité, permet d'établir des comportements généraux importants comme le mouvement à force centrale, qui seront ensuite détaillés par des théories plus complexes comme la mécanique du solide, la mécanique des fluides et la mécanique des milieux continus.

- Portail de la physique
- Portail du génie mécanique

[1] Principes de base de la mécanique du point (http://static.brouchier.com/livre/node12.html)

Mécanique du solide

La **mécanique du solide** est la partie de la mécanique qui s'intéresse aux objets que l'on ne peut réduire en un point matériel. Cela permet notamment de décrire et modéliser les rotations de l'objet sur lui-même.

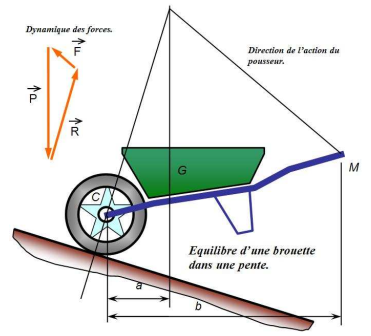


Illustration de la complexité du solide par rapport au point matériel

L'objet est lui-même composé de points matériels, que ce soit des points discrets — par exemple un assemblage de boules reliées par des baguettes de masse négligeable, chaque boule pouvant être modélisée par un point matériel — ou un ensemble continu de points. En général, on suppose le solide indéformable ; la déformation du solide relève de la mécanique des milieux continus.

La mécanique du solide est donc une branche de la mécanique traitant du comportement des mécanismes constitués de pièces rigides en général, et parfois déformables. L'objectif principal étant la détermination des performances d'un système en vue d'établir un dimensionnement adapté à l'usage envisagé, ou la validation de ces grandeurs.

Centres de gravité, d'inertie et de poussée

Dans les conditions habituelles, un solide est soumis à son poids. Chaque élément du solide (élément discret ou élément de matière isolé par l'esprit) a un poids propre, le poids de l'objet étant la résultante de tous ces poids. Pour simplifier l'étude, on considère que le solide est soumis à un poids unique, résultante des poids de ses composantes, et le centre de gravité, noté habituellement G, est le point d'application de cette force.

Article détaillé : Centre de gravité.

L'analyse qui est faite pour le centre de gravité est en fait valable pour toutes les forces volumiques, et en particulier pour les forces d'inertie. On peut donc définir un centre d'inertie, qui est en fait confondu avec le centre de gravité lorsque le champ de gravité est homogène.

Article détaillé : Centre d'inertie.

Contrairement à un point matériel, un solide peut être soumis à une pression, c'est-à-dire à une force qui s'exerce sur une surface. Chaque élément de surface subit une poussée propre. Pour simplifier l'étude, on considère que le solide est soumis à une force unique, résultante des poussées de ses composantes, et le centre de poussée est le point d'application de cette force.

De manière générale, le centre de poussée est distinct du centre de gravité. Lorsque la droite reliant le centre de poussée au centre de gravité n'est pas confondue avec la droite portant la résultante de la poussée, il en résulte un couple donc un basculement de l'objet.

Définition formelle

On appellera **solide indéformable** un ensemble de points tels que pris deux à deux, leur distance ne varie pas au cours du temps. Si les points sont discrets, on peut les noter M_i, et donc

$$\forall(i,j), \|\overrightarrow{M_iM_j}\| = \text{constante}\cdot$$

Des points au solide

La mécanique du point peut s'appliquer en chaque point du solide, ou bien, dans le cas d'un solide continu, pour chaque élément infinitésimal de volume dV autour d'un point (x, y, z).

Considèrons le barycentre G des points du solide. Dans le cas d'un ensemble de points matériels discrets M_i et masse m_i, on a :

$$\left(\sum_i m_i\right) \overrightarrow{OG} = \sum_i m_i \overrightarrow{OM_i}\,,$$

O étant l'origine du référentiel. Dans le cas d'un solide compact de masse [redacted] occupant un volume [redacted], on peut définir en chaque point une densité ρ, et les coordonnées du barycentre s'écrivent :

$$x_G = \frac{1}{m}\int_V \rho(x,y,z)\,x\,\mathrm{d}V,$$
$$y_G = \frac{1}{m}\int_V \rho(x,y,z)\,y\,\mathrm{d}V,$$
$$z_G = \frac{1}{m}\int_V \rho(x,y,z)\,z\,\mathrm{d}V.$$

En intégrant les lois de Newton sur le solide, on en déduit que le mouvement du barycentre lui-même peut être décrit par la mécanique du point ; on considére que les résultantes des forces du solide s'exercent sur le barycentre. Par exemple, si chaque élément de volume [redacted] est soumis à un poids $\rho(x,y,z)\mathrm{d}V\vec{g}$, alors on peut considérer que le barycentre est soumis au poids [redacted] avec

$$m = \int_V \rho(x,y,z)\,\mathrm{d}V.$$

On peut de même écrire le moment en chaque point du solide par rapport à une référence. En intégrant cette notion, on arrive à la notion de moment d'inertie et de moment cinétique.

On a donc deux types d'actions à décrire, qui font intervenir deux modèles : les translations, avec le centre d'inertie et les lois de Newton, et les rotations, avec les moments. Pour synthétiser cela, on peut utiliser un objet mathématique appelé torseur.

Modélisation par les torseurs

Article détaillé : Torseur.

Relation de Varignon, notion de torseur

Soient [redacted] un champ de vecteurs appelés **moment**, [redacted] un vecteur appelé **résultante** et [redacted] deux points **du solide**, on dit que ces éléments sont liés par la **relation de Varignon** si :

$$\vec{m}(A) = \vec{m}(B) + \overrightarrow{AB} \wedge \vec{R}$$

Les vecteurs [redacted] et [redacted] sont donc liés, on appelle **torseur** le couple de ces deux vecteurs et on le note :

$$\{T\} = \{\vec{m}(A), \vec{R}\}$$

Torseur cinématique

Soient $\vec{V}$ le champ des vecteurs vitesse du solide S dans un référentiel R et O l'origine de l'espace. On a :

$$\vec{V}(A \in S, R) = \frac{d\overrightarrow{OA}}{dt}$$

une relation de Chasles nous donne alors

$$\vec{V}(A \in S, R) = \frac{d\overrightarrow{OB}}{dt} + \frac{d\overrightarrow{BA}}{dt}$$

or, on montre qu'il existe $\vec{\omega}$ tel que $\frac{d\overrightarrow{BA}}{dt} = \overrightarrow{AB} \wedge \vec{\omega}$

alors

$$\vec{V}(A \in S, R) = \vec{V}(B \in S, R) + \overrightarrow{AB} \wedge \vec{\omega}$$

on a alors une relation de Varignon, on peut donc définir un torseur appelé **torseur cinématique** :

$$\{V\} = \{\vec{V}(A \in S, R), \vec{\omega}\}$$

où le champ des moments est le champ des vecteurs vitesse et où la résultante est le vecteur $\vec{\omega}$ appelé **vecteur vitesse de rotation** sa norme est la vitesse de rotation instantanée du solide.

Lien externe

- Conférence physique et mécanique du solide [1] de Stéphane Roux à l'Université de tous les savoirs

- Portail de la physique
- Portail du génie mécanique

Références

[1] http://www.lemonde.fr/savoirs-et-connaissances/article/2005/06/30/stephane-roux-physique-et-mecanique_667229_3328.html

Transformations de Galilée

Les **transformations de Galilée** désignent le groupe de transformations qui permet de lier deux systèmes de coordonnées de deux référentiels galiléens, c'est-à-dire en mouvement relatif uniforme en mécanique newtonienne.

Soient (x, y, z, t) les coordonnées d'un point dans un référentiel A, et (x', y', z', t') les coordonnées de ce point dans le référentiel A'. Si A' est en mouvement uniforme de vitesse v dans la direction x, relativement à A, alors on a :

$$\begin{cases} t' & = & t \\ x' & = & x - vt \\ y' & = & y \\ z' & = & z \end{cases}$$

Ces équations de la transformation sont le cas particulier (et beaucoup plus simple) des transformations de Lorentz où le paramètre c, la vitesse de la lumière, serait infinie. On sait que ce n'est pas le cas, mais elles restent suffisamment bonnes (et, par conséquent, la mécanique newtonienne reste valable) tant que la vitesse relative des référentiels est assez petite par rapport à la vitesse de la lumière. Sinon, il faut revenir au groupe des transformations de Lorentz et adopter la relativité restreinte.

Voir aussi

- Référentiel galiléen
- Portail de la physique

Mécanique des milieux continus

La **mécanique des milieux continus** est le domaine de la mécanique qui s'intéresse à la déformation des solides et à l'écoulement des fluides — ce dernier point fait l'objet de l'article mécanique des fluides, nous nous intéresserons donc ici essentiellement à la déformation des solides.

<table>
<tr><td rowspan="4">Mécanique des milieux continus</td><td rowspan="2">Déformation élastique ou Résistance des matériaux</td><td colspan="2">Élasticité</td></tr>
<tr><td>Plasticité</td><td rowspan="2">Rhéologie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mécanique des fluides</td><td>Fluides non-newtoniens</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fluides newtoniens</td></tr>
</table>

Le milieu continu

Si l'on regarde la matière de « très près » (échelle nanoscopique), la matière est granulaire, faite de molecule. Mais à l'œil nu (donc en se plaçant à notre échelle), un objet solide semble continu, c'est-à-dire que ses propriétés semblent varier progressivement, sans à-coups.

L'hypothèse des milieux continus consiste à considérer des milieux dont les propriétés caractéristiques, c'est-à-dire celles qui nous intéressent — densité, élasticité, etc. — sont continues. Une telle hypothèse permet d'avoir recours aux outils mathématiques reposant sur les fonctions continues et/ou dérivables.

Des hypothèses supplémentaires peuvent éventuellement être faites ; ainsi un milieu continu peut être :

- homogène : ses propriétés sont les mêmes en tout point ;
- isotrope : ses propriétés ne dépendent pas du repère dans lequel elles sont observées ou mesurées.

De nombreux matériaux utilisés dans l'industrie sont à la fois homogènes et isotropes (métaux usinés ou bruts de fonderie). Cependant, de nombreux matériaux ne sont pas isotropes (tôles laminées, pièces forgées, pièces tréfilées…) ; par ailleurs, l'utilisation de plus en plus fréquentes des matériaux composites a amené à étudier les milieux qui ne sont ni homogènes (sandwiches), ni isotropes (fibres de verre, de carbone ou de kevlar maintenues dans une résine) mais pour lesquels l'hypothèse de continuité (tout au moins par morceaux) reste valable.

Approche simplifiée : contrainte, déformation et coefficients élastiques

La base de la mécanique des milieux continus est l'étude des déformations et des phénomènes associés à une transformation d'un milieu. La notion de déformation sert à quantifier de quelle manière les longueurs ont été dilatées et les angles ont changé dans le milieu.

Une manière simple pour chercher à quantifier la déformation, est de regarder l'allongement relatif d'un segment dans le solide, ou la variation d'angle entre deux directions.

Pour l'*allongement relatif* ε, encore appelé *déformation*

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

l_0 étant la longueur initiale et Δl l'allongement ; ε est sans unité.

On pourra remarquer que lors d'une sollicitation en traction, ε est positif, et que lors d'une compression, il est négatif.

Cette notion introduite ici est « globale » en cela que l'on regarde l'allongement relatif pour un segment de longueur l_0.

Pour introduire une notion locale, il faut considérer la limite de l'allongement relatif lorsque la longueur du segment tend vers 0 :

$$\varepsilon = \lim_{\ell \to 0} \frac{\delta \ell}{\ell}$$

On se rend alors compte que la notion d'allongement relatif est assez pauvre, car au cœur du volume d'un solide, on peut considérer une infinité de direction pour les segments. Cette notion est cependant suffisante pour appréhender l'étude des poutres.

Les sollicitations sont quantifiées par la notion de *contrainte* σ, qui est l'effort surfacique exercé sur une partie de la pièce en un point par le reste de la pièce.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

σ est homogène à une pression et est exprimé en mégapascal (MPa) ou en Newton par millimètre carré (N/mm²).

Le fait d'utiliser σ et ε permet d'écrire des lois locales et non globales, on peut alors écrire l'équilibre de chaque point du milieu et décrire son comportement (loi liant la contrainte et la déformation).

Le matériau est caractérisé par des *coefficients élastiques*, qui représentent la difficulté à déformer ; le principal est le module d'Young E, relié à la contrainte et la déformation par la **loi de Hooke** :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

E est homogène à une pression et est exprimé en gigapascal (GPa) ou en Newton par millimètre carré (N/mm²).

Article détaillé : Déformation élastique.

Descriptions des milieux continus

Pour décrire le milieu on se donne les outils suivants :

Représentation lagrangienne

Article détaillé : description lagrangienne.

En représentation lagrangienne, les fonctions décrivant les grandeurs dépendent des variables suivantes :

- La particule considérée (ou sa position M_0 à un temps de référence t_0)
- Le temps

Si X est un champ lagrangien, alors on a :

$$X = X(M_0, t) = X(x_0, y_0, z_0, t)$$

La représentation lagrangienne suit chaque particule. Le champ lagrangien donne la valeur de la grandeur considérée portée par la particule qui au temps t_0 occupait le point M_0.

Représentation eulérienne

Article détaillé : description eulérienne.

En représentation eulérienne, les fonctions décrivant les grandeurs dépendent des variables suivantes :

- Le point géométrique considéré
- Le temps

Si X est un champ eulérien, alors on a :

$$X = X(M, t) = X(x, y, z, t)$$

Le champ eulérien donne la valeur de la grandeur considérée portée par la particule qui au temps t occupe le point M.

Utilisation des deux représentations

La représentation lagrangienne est souvent plus intuitive au départ, mais elle présente de nombreux défauts :

- Un champ lagrangien est difficilement stationnaire
- Il est parfois difficile de *suivre* une particule

La représentation eulérienne est peut-être moins intuitive, mais elle a un avantage majeur :

- Simplicité de la description (par exemple d'un écoulement autour d'un solide)

En description eulérienne il y a cependant un inconvénient : pour appliquer les théorèmes de la mécanique, il faut considérer un système fermé, or le champ eulérien donne les grandeurs en un point géométrique (donc les particules en ce point changent au cours du temps) ce qui est un système ouvert. Il faut donc être capable d'exprimer les dérivées des grandeurs pour chaque particule en fonction du champ eulérien. Pour cela on peut utiliser la dérivée particulaire, ou la formulation sous forme conservative des différents théorèmes ce qui concerne les équations de Navier-Stokes.

Expression de la dérivée particulaire

Dans ce qui suit, [redacted] représente la dérivée en description eulérienne et [redacted] la dérivée particulaire (en description lagrangienne).

Si $X(\underline{M}, t)$ est un champ scalaire :

$$\frac{\mathrm{D}X}{\mathrm{D}t} = \frac{\partial X}{\partial t}.\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}t} + \frac{\partial X}{\partial \underline{M}}.\frac{\mathrm{d}\underline{M}}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial X}{\partial t} + \underline{v} \cdot \underline{\mathrm{grad}}(X)$$

De même, si [redacted] est un champ vectoriel, en développant :

$$\frac{\mathrm{D}\underline{X}}{\mathrm{D}t} = \frac{\partial \underline{X}}{\partial t} + \underline{\underline{\mathrm{grad}}}(\underline{X}) \cdot \underline{v}$$

On obtiendra le même type de formule pour la dérivée particulaire d'un champ représenté par un tenseur d'ordre quelconque.

La représentation lagrangienne est adaptée à la description des solides, tandis que la représentation eulérienne est adaptée à la description des fluides.

Cinématique des milieux continus (description lagrangienne)

On décrit la transformation de chaque point du milieu par une fonction (suffisamment régulière) $\underline{\Phi}(M, t)$ telle que $\underline{OM} = \underline{\Phi}(M_0, t)$.

On introduit alors le concept de déformation, pour mesurer la variation de distance entre deux points du solide suite à la transformation [redacted]

On cherche à avoir une mesure de $\|MN\|^2 - \|M_0N_0\|^2$.

Or on a $\underline{OM} = \underline{\Phi}(M_0, t)$. On peut donc écrire :

$$\underline{ON} = \underline{OM} + \underline{\underline{F}} \cdot \underline{M_0N_0} + o(\|\underline{M_0N_0}\|)$$

Où

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{\mathrm{grad}}}(\underline{\Phi}) = \frac{\partial \underline{\Phi}}{\partial M_0}$$

est le gradient de la transformation.

On obtient donc :

$$\|MN\|^2 - \|M_0N_0\|^2 = \underline{M_0N_0} \left(\underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{F}} - \underline{\underline{Id}} \right) \underline{M_0N_0}$$

On pose :

$$\underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} \left(\underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{F}} - \underline{\underline{Id}} \right)$$

où [redacted] est l'opérateur des déformations de Green-Lagrange.

Si on introduit le vecteur déplacement $\underline{u}(M_0, t) = \underline{M_0M}$ on obtient :

$$\underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \underline{u}}{\partial M_0}^T \cdot \frac{\partial \underline{u}}{\partial M_0} + \frac{\partial \underline{u}}{\partial M_0} + \frac{\partial \underline{u}}{\partial M_0}^T \right)$$

Si l'on fait l'hypothèse des petites déformations, on obtient l'opérateur des déformations linéarisé :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \underline{u}}{\partial M_0} + \frac{\partial \underline{u}}{\partial M_0}^T \right)$$

Loi de comportement

Article détaillé : Déformation élastique.

Lois empiriques de comportement

Article détaillé : Lois de déformation.

Les lois empiriques de comportement sont des lois dérivées des observations et de l'expérience, qui décrivent les déformations ou les contraintes en fonction des sollicitations (vitesse de déformation, température...).

Essais mécaniques simples

Article détaillé : Essais mécaniques.

Ces essais permettent de mesurer, pour un objet, les principales grandeurs caractéristiques liées à la matière dont il est constitué.

Tenseur des déformations

Article détaillé : Tenseur des déformations.

Si l'on dessine un petit cube au sein de la matière, ce cube sera transformé en parallélépipède après déformation de la pièce (on suppose des petites déformations). On va donc avoir d'une part une élongation (ou contraction) différente selon les trois arêtes ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$), mais aussi une variation de l'angle droit pour chacun des trois angles, qui deviendront ($\pi/2 - 2\gamma_1, \pi/2 - 2\gamma_2, \pi/2 - 2\gamma_3$).

Ces grandeurs permettent de définir le tenseur des déformations qu'on peut représenter sous la forme d'une matrice 3x3 dont les coefficient sont ces grandeurs.

Tenseur des contraintes

Article détaillé : Tenseur des contraintes.

Dans le cas général, un élément de matière situé au cœur d'une pièce est soumis à des contraintes dans diverses directions. Dans le cadre de la théorie du premier gradient, on représente cet *état de contrainte* par un tenseur d'ordre deux (que l'on peut lui même représenter par une matrice 3×3) appelé *tenseur des contraintes*.

Voir aussi

- **(fr)** Mécanique des milieux continus [1]
- **[pdf]** Mémento de mécanique des milieux continus et de thermoélasticité [2]
- Propriétés mécaniques : Généralités [3] (notamment la section Propriétés-définitions bien conçue... et pas que sur l'aluminium)
- Portail de la physique

Références

[1] http://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00530377/fr/
[2] http://www.imprimerie.polytechnique.fr/Cours/Files/memento_elasto_plasticite.pdf
[3] http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=60&pageid=2144416148

Oscillateur harmonique

Cet article est une ébauche concernant la physique.

Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant (**comment ?**) selon les recommandations des projets correspondants.

Un **oscillateur harmonique** est un oscillateur dont l'évolution au cours du temps est décrite par une fonction sinusoïdale et dont la fréquence ne dépend que des caractéristiques du système. L'intérêt d'un tel modèle est qu'il décrit l'évolution de n'importe quel système physique au voisinage d'une position d'équilibre stable, ce qui en fait un outil transversal utilisé dans de nombreux domaines : mécanique, électricité et électronique, optique.

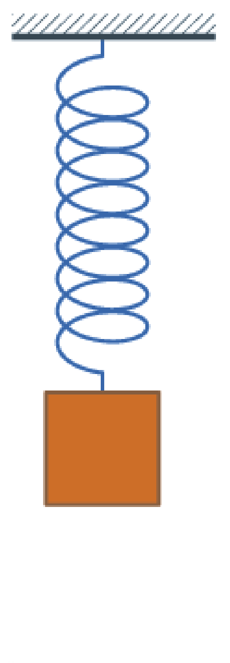
Dans la pratique, de tels oscillateurs ne sont que des cas idéaux pour lesquelles les forces dissipatives (frottement par exemple) sont négligées. Pour que leur amplitude reste constante, il est nécessaire d'entretenir les oscillations en fournissant de l'énergie.

Oscillateurs mécaniques

Oscillations de translation

Article détaillé : système masse-ressort.

On peut mettre en oscillation une masse soumise à l'action d'un ressort. On peut suivant les cas, réaliser des oscillations verticales ou des oscillations horizontales (en utilisant un dispositif permettant de minimiser les frottements sur le support).



Oscillation verticale

Dans les deux cas, les oscillations sont harmoniques : la fonction du temps [redacted] de la position de la masse de part et d'autre de la position d'équilibre (statique) est une fonction sinus. La période est indépendante de l'amplitude (isochronisme des oscillations) : elle ne dépend que de l'inertie du système (masse *m*) et de la caractéristique de la force de rappel (constante de raideur *k* du ressort) : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

La constante de raideur *k* est exprimée en N/m. Pour *k* = 1 N/m, il faudrait un Newton pour allonger le ressort d'un mètre.

Si les oscillations sont amorties par une force de frottement fluide (type visqueux à faible vitesse, force en $-\alpha v$), l'équation différentielle du mouvement peut s'écrire :

$$m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + kx = 0.$$

Oscillations de rotation

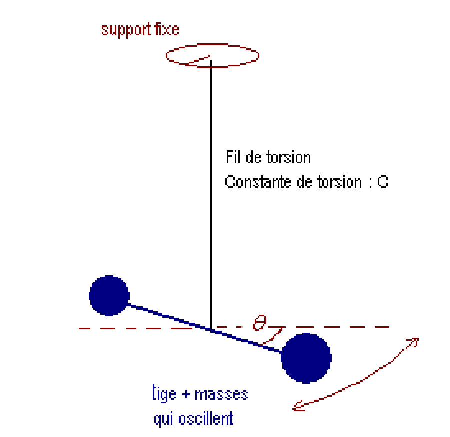


Schéma d'un pendule de torsion

Article détaillé : pendule de torsion.

Le dispositif est constitué d'une barre horizontale fixée à un support par l'intermédiaire d'un fil de torsion : ce fil d'acier exerce un couple de rappel proportionnel à l'angle de torsion qu'on lui impose : $-C\theta$. Sur la barre on peut positionner deux masselottes de façon symétrique de façon à modifier le moment d'inertie.

La période est indépendante de l'amplitude (isochronisme des oscillations). Elle est donnée par la relation ci-dessous où *J* désigne le moment d'inertie de la barre munie des masselottes.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{C}}.$$

Équation différentielle : $J\ddot{\theta} + \alpha\dot{\theta} + C\theta = 0.$

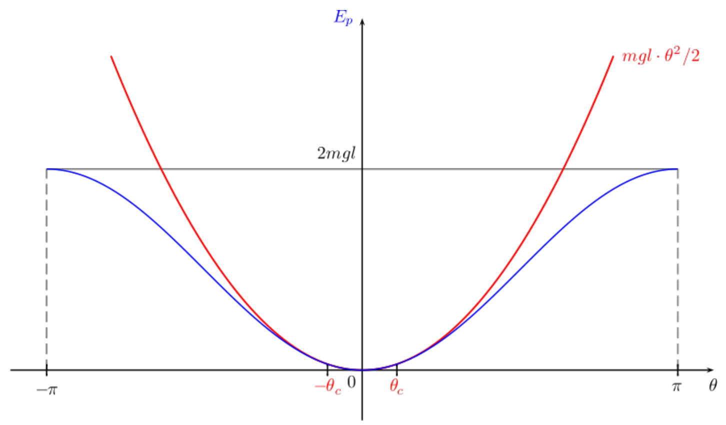
L'oscillateur harmonique comme modèle

Les oscillateurs ne sont généralement pas harmoniques. Mais, dès que l'énergie potentielle d'un système à une dimension possède un minimum en un point, on peut l'approximer par l'énergie potentielle d'un oscillateur harmonique au voisinage de ce point. Il faut simplement s'assurer que les oscillations autour de ce point sont suffisamment petites pour que l'approximation du puits de potentiel par une parabole soit valide.

Pendule simple

Lorsque les oscillations sont de faible amplitude (lorsque sin(θ) peut être approximé à θ), l'erreur commise en approximant le puits de potentiel par une parabole est faible. À titre d'exemple, pour des oscillations telles que l'angle θ entre la position du pendule et la verticale est de l'ordre de 20°, l'erreur est de 1 %.

L'équation du mouvement peut être alors simplifiée et mise sous la forme :



potentiel d'un pendule simple et son approximation parabolique

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0 \text{avec } \omega_0^2 = \frac{g}{l},$$

d'où une période propre $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Oscillateurs électriques

Circuit LC

Un **circuit LC** en électrocinétique est un circuit théorique comportant une bobine idéale : parfaitement inductive (inductance L et résistance nulle) et un condensateur (capacité C). Les deux dipôles sont en outre totalement linéaires, ce qui est le cas avec des bobines à noyau d'air mais qui ne l'est pas pour de bobines avec un noyau ferromagnétique.

Un tel circuit se comporte alors comme un oscillateur dont la période propre est : $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

De la loi des mailles : $u_L + u_C = 0$, et des équations caractéristiques des deux dipôles : $u_L = L\frac{di}{dt}$ et $i = C\frac{du_C}{dt}$, on déduit :

$$LC\frac{d^2u_C}{dt^2} + u_C = 0, \text{avec } u_C = \frac{q}{C}.$$

L'équation différentielle peut donc s'écrire :

$$L\ddot{q} + q/C = 0.$$

Circuit RLC

Dans un circuit LC réel, on ne peut s'affranchir de la résistance. Celle-ci dissipe de l'énergie par effet joule. Dans ce cas, l'équation différentielle qui régit les oscillations (amorties) peut s'écrire : $L\ddot{q} + R\dot{q} + q/C = 0$.

Remarque : on peut entretenir les oscillations grâce à un montage dit à résistance négative.

Analogie électro-mécanique

Les oscillations mécaniques avec amortissement fluide, et les oscillations électriques d'un circuit RLC conduisent à deux équations différentielles du second ordre formellement identiques.

$$\ddot{z} + 2\lambda\dot{z} + \omega_0^2 z = 0.$$

Oscillateur générique	RLC	Masse soumise à un ressort
	V= tension	F= Force
$\ddot{z} + 2\lambda\dot{z} + \omega_0^2 z = 0$	$V_L + V_R + V_C = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + Ri + \frac{q}{C} = 0$	$ma + F_{fr} + F_R = m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + kx = 0$
z	q= charge électrique	x= déplacement
$\dot{z}$	$\dot{q} = i$ = intensité	$\dot{x}$= vitesse
$\ddot{z}$	$\ddot{q} = \frac{di}{dt}$	$\ddot{x}$= accélération
β	L= inductance propre	m = masse du mobile
ρ	R = résistance	α= coef de frottement
γ	$\frac{1}{C}$= inverse de la capacité	k = constante de raideur
$T = 2\pi\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}$ = période propre	$T = 2\pi\sqrt{LC}$ = période propre	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ = période propre
f	$P = RI^2$: effet Joule	$f = \alpha\dot{x}$: force de frottement
Q= facteur de qualité	$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$	$Q = \frac{1}{\alpha}\sqrt{mk}$

Oscillateurs électriques entretenus

On obtient des oscillations électriques entretenues en associant un élément amplificateur, à un circuit LC. L'énergie est prélevée sur le circuit LC, amplifiée puis réinjectée sur le même circuit, tout cela par des couplages adéquats. L'oscillation a lieu lorsque les pertes du circuit LC sont compensées par l'énergie réinjectée par l'amplificateur. L'étude théorique peut être réalisée en considérant deux quadripoles bouclés l'un sur l'autre: Le quadripôle amplificateur et le circuit LC considéré comme un quadripôle filtre.

Différents montages pratiques d'oscillateurs ont été proposés : oscillateur Colpitts, oscillateur Clapp, oscillateur Hartley, oscillateur de Pierce.

Ces oscillateurs entretenus peuvent inclure un quartz, qui permet d'obtenir une meilleure stabilité de fréquence. Les oscillateurs entretenus sont très utilisés en électronique par exemple, pour les horloges des circuits numériques, ou pour les pilotes des appareils de télécommunications.

Articles connexes

- Systèmes oscillants à un degré de liberté
- Oscillateur harmonique quantique

Bibliographie

- Vladimir Damgov, *Nonlinear and parametric phenomena. Applications in radiometric and mechanical systems,* World Scientific, Series on Nonlinear Sciences, 2004.

- Portail de la physique

Relativité galiléenne

Pour les articles homonymes, voir relativité.

C'est à Galilée qu'on doit la première expression de relativité :

Galilée, initiateur de la relativité galiléenne.

> « Enfermez-vous avec un ami dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons, et d'autres petits animaux volants. Prenez une grande cuve d'eau avec un poisson dedans, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de le lancer plus fort dans une direction que dans une autre, les distances étant égales, et si vous sautez à pieds joints, vous franchissez des distances égales dans toutes les directions. Lorsque vous aurez observé toutes ces choses soigneusement (bien qu'il n'y ait aucun doute que lorsque le bateau est à l'arrêt, les choses doivent se passer ainsi), faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pour autant que la vitesse soit uniforme [c'est-à-dire constante] et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt ... »

— Galilée, *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde*, 1632

Galilée observe que, dans un navire, aucune expérience de mécanique ne permet de distinguer lorsque le navire est immobile au port de lorsque il est en mouvement uniforme : une expérience mécanique (chute d'un corps, mouvement d'un pendule, etc.) donnera des résultats identiques du simple fait que l'accélération est identique.

Autrement dit, et c'est le principe de **relativité galiléenne**, les lois physiques de la mécanique sont identiques pour tous les repères inertiels (ceux qui, quelle que soit leur vitesse, ne sont pas soumis à une force).

Jusqu'alors, on ne distinguait pas bien les notions d'accélération, de puissance et de travail, d'énergie et de vitesse. Sur le plan mathématique, le calcul différentiel n'existait pas. La théorie en était restée aux approximations intuitives d'Aristote, en partie modifiées au Moyen Âge, et selon lesquelles le mouvement était dû à une force, l'impetus, et devait être constamment soutenu pour durer.

Il ne s'agit pas là de démonstrations, mais plutôt d'une application du principe de simplicité combinée à des observations « de bon sens ». Galilée ne démontre rien, il énonce un principe, confirmé par l'expérience.

Ce principe de relativité sera généralisé près de 4 siècles plus tard seulement à d'autres types de phénomènes, non mécaniques, et conduira à l'idée que les lois de la physique en général (toutes les lois physiques, non seulement celles de la mécanique) sont les mêmes dans les référentiels inertiels.

Pour en revenir au navire, il n'y a aucun moyen de savoir si le navire se déplace ou non, à moins de faire référence à un objet extérieur. Cela implique qu'aucune expérience de mécanique à l'intérieur du navire ne peut permettre de déterminer la vitesse du navire : il faut faire référence à un objet extérieur. Le concept même de vitesse n'a de sens que relativement à un repère, un point choisi arbitrairement comme fixe.

Par exemple, on peut mesurer la vitesse d'un véhicule par rapport à la Terre, ou celle de la Terre par rapport au Soleil, ou celle du Soleil par rapport à la Voie lactée, mais ultimement il n'existe pas de vitesse absolue et indiscutable.

Voir aussi

Liens internes

- Principe de Copernic
- Principe de relativité, Relativité restreinte, Relativité générale
- Référentiel galiléen
- Transformations de Galilée
- Vitesse relative

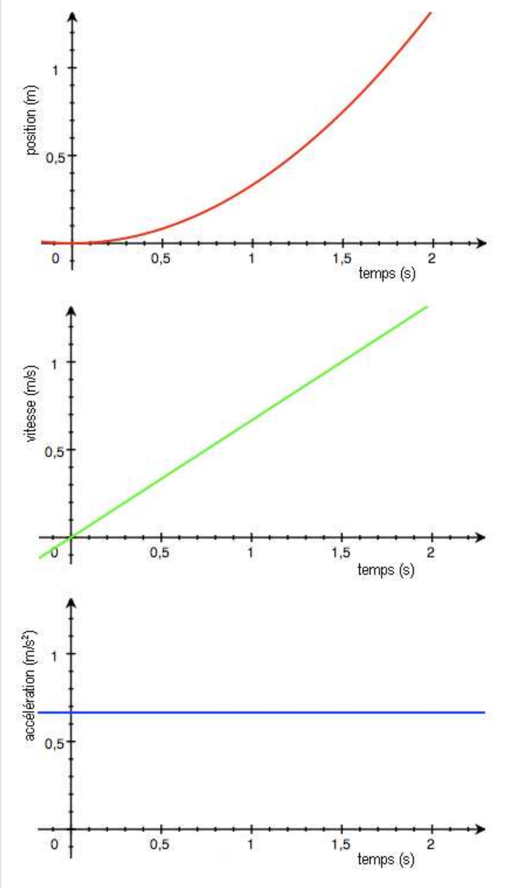
Liens externes

- Plusieurs citations intégrales de Galilée dans le wikimanuel relativité

- Portail de la physique

Mouvement rectiligne uniformément accéléré

En cinématique, un **mouvement rectiligne uniformément accéléré** est un mouvement dont l'accélération $\vec{a}$ est constante. On utilise parfois les abréviations MRUA (pour mouvement rectiligne uniformément accéléré), MRUD (pour mouvement rectiligne uniformément décéléré) et MRUV (mouvement rectiligne uniformément varié).



Evolution de la position, de la vitesse et de l'accélération d'un corps dans un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

Équations de mouvement

Supposons que le mouvement se fasse selon l'axe des x. On a :

$$\begin{cases} a(t) = \ddot{x} = \text{constante} \\ v(t) = \dot{x} = v_0 + at \\ x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \end{cases}$$

De ceci, on peut déduire une relation entre l'accélération, la variation de vitesse et le chemin parcouru x'_0 - x

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0).$$

De manière générale, si le mouvement se fait selon un axe différent de l'axe des *x*, on peut remplacer l'abscisse *x* par l'abscisse curviligne *s*.

- Portail de la physique

Mécanique quantique

Cet article ou cette section doit être recyclé.

Une réorganisation et une clarification du contenu sont nécessaires. Discutez des points à améliorer en page de discussion.

La **mécanique quantique** est la branche de la physique qui a pour but d'étudier et de décrire les phénomènes fondamentaux à l'œuvre dans les systèmes physiques, plus particulièrement à l'échelle atomique et subatomique. C'est aussi la partie de la physique où apparaît la constante de Planck.

Elle fut développée au début du vingtième siècle par une dizaine de physiciens américains et européens, afin de résoudre différents problèmes que la physique classique échouait à expliquer, comme le rayonnement du corps noir, l'effet photo-électrique, ou l'existence des raies spectrales.

Au cours de ce développement la mécanique quantique se révéla être très féconde en résultats et en applications diverses. Elle permit notamment d'élucider le mystère de la structure de l'atome, et plus globalement elle s'avéra être le cadre général de description du comportement des particules élémentaires, jusqu'à constituer le socle de la physique moderne. Elle fut complétée plus tard par la théorie quantique des champs, plus apte à décrire le comportement de la matière animée d'une vitesse proche de celle de la lumière.

La mécanique quantique comporte de profondes difficultés conceptuelles, et son interprétation physique ne fait pas encore l'unanimité dans la communauté scientifique. Parmi ces concepts, on peut citer la dualité onde corpuscule, l'amplitude de probabilité, l'intrication quantique ou encore la non-localité.

Panorama général

Globalement la mécanique quantique se démarque de la physique classique par deux aspects : des règles différentes quant à l'additivité des probabilités, et l'existence de grandeurs physiques ne pouvant se manifester que par multiples de quantités fixes, appelés quantas, qui donnent leur nom à la théorie.

Lois de probabilités

Dans la conception classique des lois de probabilités, lorsqu'un évènement peut se produire de deux façons différentes incompatibles l'une de l'autre, les probabilités s'additionnent. Tel n'est pas le cas en mécanique quantique, où la probabilité d'un évènement est liée à une amplitude de probabilité susceptible d'interférer, y compris de façon destructive.

Cette propriété est illustrée par l'expérience des fentes de Young, considérée notamment par Richard Feynman comme la plus emblématique du comportement quantique de la matière. Dans son cours de mécanique quantique, Feynman consacre un long chapitre à son analyse détaillée. Cette expérience illustre aussi le concept de dualité onde corpuscule, à la base de l'interprétation moderne de la théorie.

On considère actuellement qu'aux échelles macroscopiques, la non observation du comportement quantique de la matière s'explique par un phénomène appelé décohérence.

Existence des quantas

La mécanique quantique tire son nom de l'existence de grandeurs ne pouvant se manifester que par multiples de quantités fixes, souvent liées à la constante découverte par Max Planck. Ces grandeurs sont par exemple l'énergie ou le moment cinétique des particules.

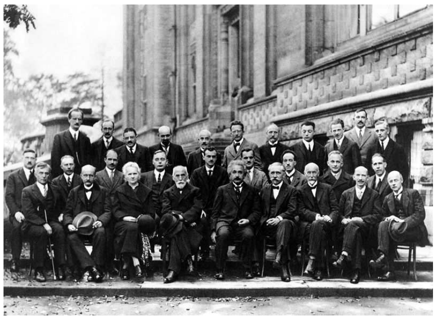
L'illustration la plus manifeste et la plus riche en conséquences de ce phénomène, se trouve probablement dans la structure de l'atome, et plus précisément dans l'organisation des électrons autour du noyau. En effet les électrons se répartissent en occupant les places laissées libres par les valeurs possibles des nombres quantiques liés à leur énergie et leur moment cinétique. Cette organisation permet d'expliquer le comportement chimique et spectroscopique des éléments naturels.

Bref historique

C'est incontestablement la résolution du problème du rayonnement du corps noir qui a marqué le début de la mécanique quantique. Au début du vingtième siècle, Max Planck résout en effet ce problème en faisant l'hypothèse que l'énergie des atomes ne peut s'échanger que par multiples de quantités proportionnelles à la fréquence du rayonnement, selon la formule désormais célèbre :

$$E = h\nu$$

La constante h, dont il obtient alors facilement une valeur numérique précise en confrontant son modèle aux données expérimentales, est alors et est toujours une grandeur fondamentale en mécanique quantique, un peu au même titre que la vitesse de la lumière en relativité.



Le congrès Solvay de 1927 a réuni les meilleurs physiciens de l'époque, au nombre desquels figurent la plupart des fondateurs de la mécanique quantique.

Cette idée de grandeurs énergétiques ne pouvant s'échanger que de façon discrète inspirera alors de nombreux physiciens, comme Niels Bohr, qui s'en serviront notamment pour développer un modèle de la structure de l'atome. Plus généralement, ce fut le début de ce qu'on appela la théorie des quanta.

Peu de temps après la découverte de Planck. Albert Einstein en propose une interprétation physique : il suggère que la quantité $h\nu$ soit l'énergie d'une particule électromagnétique qu'il appelle *photon*. Cette réintroduction d'une conception corpusculaire de la lumière va inciter Louis de Broglie à proposer une relation analogue à celle de Planck, mais pour la quantité de mouvement :

$$\vec{P} = h\vec{k}$$

où $\vec{k}$ est un vecteur d'onde.

Ce faisant, il est l'instigateur de la dualité onde corpuscule qui incitera certains physiciens à rechercher une description ondulatoire de la matière. Parmi ceux-ci, Erwin Schrödinger y parvient et obtient une équation différentielle, portant désormais son nom, qui permet de décrire précisément l'évolution quantique d'une particule. Cette équation prouva rapidement sa pertinence dans sa description du modèle de l'atome d'hydrogène.

Parallèlement, Werner Heisenberg avait développé une approche radicalement différente, qui s'appuyait sur des calculs matriciels directement inspirés de la mécanique analytique classique.

Ces deux approches, ainsi que la confusion concernant le concept de dualité onde corpuscule, donnait à la mécanique quantique naissante un besoin de clarification. Cette clarification intervint grâce aux travaux d'un physicien britannique, Paul Adrien Dirac.

Dans un ouvrage publié en 1930, *principes de la mécanique quantique*, Dirac montre que les deux approches, celle de Schrödinger et Heisenberg, ne sont en fait que deux représentations d'une même algèbre linéaire. Dans cet ouvrage fondateur, Dirac extrait les lois proprement quantiques, en faisant abstraction des lois déjà imposées par la physique classique.

Formulation de Dirac

Article détaillé : Notation bra-ket.

Paul Dirac dégage les propriétés essentiellement quantiques des phénomènes physiques et les exprime à travers quelques postulats, un peu à la manière des postulats d'Euclide.

Parmi ces postulats, le plus important[1] est probablement le principe de superposition. Selon ce principe, si un système physique peut se trouver dans ce qu'il appelle un *état* ϕ que Dirac note $|\phi\rangle$, et si de même il peut se trouver dans un état $|\psi\rangle$, alors il peut aussi se trouver dans un état linéairement composé :

$$\alpha|\phi\rangle + \beta|\psi\rangle$$

Où α et β sont deux nombres complexes quelconques.

Autrement dit, l'ensemble des états possibles d'un système physique est un espace vectoriel.

Le point important est qu'un *état superposé* n'est pas un état traduisant une ignorance vis-à-vis de l'état *réel* du système, mais bien une indétermination intrinsèque au système, qui n'est ni dans l'état ϕ, ni dans l'état ψ. Ce point souleva de nombreux questionnements dans la communauté scientifique. En particulier, Schrödinger poussa l'idée jusqu'à son comble en l'appliquant à un chat qui ne serait, selon le désormais fameux *paradoxe de Schrödinger*, ni *mort*, ni *vivant*.
Le principe de superposition fut aussi analysé et critiqué par Einstein qui, avec Podolski et Rosen, imagina une experience, dite expérience EPR, afin de le mettre en défaut. Une expérience comparable fut menée à la fin du vingtième siècle par Alain Aspect, qui confirma le principe de superposition.

Équation de Schrödinger

Article détaillé : Équation de Schrödinger.

La formulation purement algébrique de Dirac peut paraître abstraite, mais elle eu le mérite de donner un cadre précis à la formulation alors en vogue à l'époque, en l'occurence la mécanique ondulatoire de Schrödinger.

La formulation de Schrödinger s'intéresse au mouvement d'une particule dans l'espace. La base de l'espace vectoriel des états y est donc naturellement l'ensemble $|x\rangle$ des états de position parfaitement déterminée. Ainsi, dans cette base, l'état $|\phi\rangle$ d'une particule s'écrit :

$$|\phi\rangle = \int \phi(x,t)|x\rangle dx$$

Où $\phi(x,t)$ est une fonction scalaire, que Schrödinger appelle *fonction d'onde*. Schrödinger fait du temps un simple paramètre, et non une grandeur physique, ce qui fait de sa théorie une théorie essentiellement non-relativiste.
En s'inspirant de l'équation de propagation électromagnétique, et à l'aide des relations de Planck et de de Broglie, Schrödinger parvient alors à exprimer l'évolution temporelle de $\phi(x,t)$:

$$-i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\phi(x,t) = H\phi(x,t)$$

où H est un opérateur linéaire : l'hamiltonien du système considéré.

Interprétation physique de la fonction d'onde

L'interprétation physique de la fonction d'onde Ψ sera donnée par Born en 1926, et Dirac en fera plus tard son deuxième postulat, connu sous le nom de règle de Born : le module au carré de la fonction d'onde $|\Psi|^2 = \overline{\Psi}\Psi$ représente la *densité de probabilité de présence* de la particule considérée, c'est-à-dire que :

$$dP(\vec{r},t) \ = \ |\Psi(\vec{r},t)|^2 \ dV$$

s'interprète comme étant la probabilité de trouver la particule dans un petit volume dV situé au voisinage du point $\vec{r}$ de l'espace à l'instant t. En particulier, la particule étant nécessairement située quelque part dans l'espace entier, on a la condition de normalisation :

$$\iiint dP(\vec{r},t) \ = \ \iiint |\Psi(\vec{r},t)|^2 \ dV \ = \ 1$$

Cette interprétation statistique pose un problème lorsque le système quantique étudié est l'Univers entier, comme en cosmologie quantique. Dans ce cas, les physiciens théoriciens utilisent préférentiellement l'interprétation dite des « mondes multiples » d'Everett.

Méthodes de résolution

En dehors de quelques cas particuliers où on sait l'intégrer exactement, l'équation de Schrödinger ne se prête en général pas à une résolution analytique exacte. Il faut alors :

- soit développer des techniques d'approximations comme la théorie des perturbations.
- soit la résoudre numériquement. Cette résolution numérique permet notamment de visualiser la disposition curieuse des orbitales électroniques.

Formulation de la mécanique quantique par intégrale de chemin

Richard Feynman dans sa thèse en 1942 introduit la notion d'intégrale de chemin afin de présenter une nouvelle formulation de la mécanique quantique [2] . Ces résultats ne seront publiés qu'en 1948 [3] en raison de la seconde guerre mondiale. A terme, le but de cette approche serait de formuler une théorie de l'électrodynamique quantique en développant la quantification par intégrale de chemin. Si de nos jours on retient le formalisme Hamiltonien de la mécanique quantique pour traiter des problèmes classiques (au sens non relativiste), il s'avère que la formulation de Feynman est largement prédominante pour traiter les problèmes relativistes notamment en théorie quantique des champs, l'avantage c'est que cette approche est non perturbative.

Par ailleurs en 1953 Feynman appliqua son approche pour formuler la mécanique statistique quantique par intégrale de chemin (intégrale de Wiener, formule de Feynman-Kac) et tenta d'expliquer la transition lambda dans l'hélium superfluide.

Mécanique quantique et relativité

Article détaillé : Théorie quantique des champs.

La mécanique quantique est une théorie *non relativiste* : elle n'incorpore pas les principes de la relativité restreinte. En appliquant les règles de la quantification canonique à la relation de dispersion relativiste, on obtient l'équation de Klein-Gordon (1926). Les solutions de cette équation présentent toutefois de sérieuses difficultés d'interprétation dans le cadre d'une théorie censée décrire **une** seule particule : on ne peut notamment pas construire une *densité de probabilité de présence* partout positive, car l'équation contient une dérivée temporelle seconde. Dirac cherchera alors une autre équation relativiste du *premier ordre en temps*, et obtiendra l'équation de Dirac, qui décrit très bien les fermions de spin un-demi comme l'électron.

La théorie quantique des champs permet d'interpréter toutes les équations quantiques relativistes sans difficulté.

L'équation de Dirac incorpore naturellement l'invariance de Lorentz avec la mécanique quantique, ainsi que l'interaction avec le champ électromagnétique mais qui est traité encore de façon classique (on parle d'approximation semi-classique). Elle constitue la mécanique quantique relativiste. Mais du fait précisément de cette interaction entre les particules et le champ, il est alors nécessaire, afin d'obtenir une description cohérente de l'ensemble, d'appliquer la procédure de quantification également au champ électromagnétique. Le résultat de cette procédure est l'électrodynamique quantique dans laquelle l'unité entre champ et particule est encore plus transparente puisque désormais la matière elle aussi est décrite par un champ. L'électrodynamique quantique est un exemple particulier de théorie quantique des champs.

D'autres théories quantique des champs ont été développées par la suite au fur et à mesure que les autres interactions fondamentales ont été découvertes (théorie électrofaible, puis chromodynamique quantique).

Les inégalités de Heisenberg

Article détaillé : Principe d'incertitude.

Les relations d'incertitude de Heisenberg traduisent l'impossibilité de préparer un état quantique correspondant à des valeurs précises de certains couples de grandeurs conjuguées. Ceci est lié au fait que les opérateurs quantiques associés à ces grandeurs classiques *ne commutent pas*.

Inégalité position-impulsion

Considérons par exemple la position x et l'impulsion p_x d'une particule. En utilisant les règles de la quantification canonique, il est facile de vérifier que les opérateurs de position et d'impulsion vérifient :

$$\left[\hat{x}^i, \hat{p}_j\right] f(\vec{r}) \ = \ \left(\hat{x}^i \hat{p}_j - \hat{p}_j \hat{x}^i\right) f(\vec{r}) \ = \ i\hbar \ \delta^i_j \ f(\vec{r})$$

La relation d'incertitude est définie à partir des écarts quadratiques moyens de grandeurs conjuguées. Dans le cas de la position x et de l'impulsion p_x d'une particule, elle s'écrit par exemple :

$$\Delta x \ \cdot \ \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Plus l'état possède une distribution resserrée sur la position, plus sa distribution sur les valeurs de l'impulsion qui lui est associée est large. Cette propriété rappelle le cas des ondes, via un résultat de la transformée de Fourier, et exprime ici la dualité onde-corpuscule. Il est clair que ceci mène à une remise en cause de la notion classique de trajectoire comme chemin continu différentiable[4] .

Inégalité temps-énergie

Il existe également une relation d'incertitude portant sur l'énergie d'une particule et la variable temps. Ainsi, la durée Δt nécessaire à la détection d'une particule d'énergie E à ΔE près[5] vérifie la relation :

$$\Delta E \ \cdot \ \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Cependant, la dérivation de cette inégalité énergie-temps est assez différente de celle des inégalités position-impulsion[6] .

En effet, si le hamiltonien est bien le générateur des translations dans le temps en mécanique hamiltonienne, indiquant que temps et énergie sont conjuguées[7] , **il n'existe pas d'opérateur temps** en mécanique quantique (« théorème » de Pauli), c'est-à-dire qu'on ne peut pas construire d'opérateur $\hat{T}$ qui obéirait à une relation de commutation canonique avec l'opérateur hamiltonien $\hat{H}$:

$$\left[\hat{H}, \hat{T}\right] \ = \ i\hbar \ \hat{1}$$

ceci pour une raison très fondamentale : la mécanique quantique a en effet été inventée pour que chaque système physique stable possède un *état fondamental d'énergie mininum*. L'argument de Pauli est le suivant : si l'opérateur temps existait, il posséderait un spectre continu. Or, l'opérateur temps, obéissant à la relation de commutation canonique, serait aussi le générateur des *translations en énergie*. Ceci entraîne alors que l'opérateur hamiltonien posséderait lui aussi un *spectre continu*, en contradiction avec le fait que l'énergie de tout système physique stable se doit d'être *bornée inférieurement*[8] .

L'intrication

Article détaillé : intrication quantique.

L'intrication est un état quantique (voir aussi fonction d'onde) décrivant deux systèmes classiques (ou plus) non factorisables en un produit d'états correspondant à chaque système classique.

Deux systèmes ou deux particules peuvent être intriqués dès qu'il existe une interaction entre eux. En conséquence, les états intriqués sont la règle plutôt que l'exception. Une mesure effectuée sur l'une des particules changera son état quantique selon le postulat quantique de la mesure. Du fait de l'intrication, cette mesure aura un effet instantané sur l'état de l'autre particule, même si la ligne d'univers qui relie les deux évènements "*mesure 1*" et "*mesure 2*" de l'espace-temps est une courbe de genre espace ! Par suite, le fait que la mécanique quantique tolère l'existence d'états intriqués, états ayant effectivement été observés en laboratoire et dont le comportement est en accord avec celui prévu par la mécanique quantique (voir l'expérience d'Aspect), implique que la mécanique quantique est une théorie physique non-locale. Néanmoins, il est incorrect d'assimiler ce changement d'état à une transmission d'information plus rapide que la vitesse de la lumière (et donc une violation de la théorie de la relativité). La raison est que le résultat de la mesure relatif à la première particule est toujours aléatoire, dans le cas des états intriqués comme dans le cas des états non-intriqués. Il est donc impossible de « transmettre » quelque information que ce soit, puisque la modification de l'état de l'autre particule, pour immédiate qu'elle soit, conduit à un résultat de la mesure relatif à la seconde particule qui est toujours aussi aléatoire que celui relatif à la première particule. Les corrélations entre les mesures des deux particules, bien que très réelles et mises en évidence dans de nombreux laboratoires de par le monde, resteront indétectables tant que les résultats des mesures ne seront pas comparés, ce qui implique nécessairement un échange d'information classique, respectueux de la Relativité (voir aussi le Paradoxe EPR).

La téléportation quantique fait usage de l'intrication pour assurer le transfert de l'état quantique d'un système physique vers un autre système physique. Ce processus est le seul moyen connu de transférer parfaitement l'information quantique. Il ne peut dépasser la vitesse de la lumière et est également « désincarné », en ce sens qu'il n'y a pas de transfert de matière (contrairement à la téléportation fictive de Star Trek).

Cet état ne doit pas être confondu avec l'état de *superposition*. Un même objet quantique peut avoir deux (ou plus) états *superposés*. Par exemple un même photon peut être dans l'état "polarité longitudinale" et "polarité transversale" simultanément. Le chat de Schrödinger est simultanément dans l'état "mort" et "vivant". Un photon qui passe une lame semi-réfléchissante est dans l'état superposé "photon transmis" et "photon réfléchi". C'est uniquement lors de l'acte de mesure que l'objet quantique possédera un état déterminé.

Dans le formalisme de la physique quantique, un état d'intrication de *plusieurs objets quantique* est représenté par un produit tensoriel des vecteurs d'état de chaque objet quantique. Un état de superposition ne concerne qu**un seul objet quantique** (qui peut être une intrication), et est représentée par une combinaison linéaire des différentes possibilités d'états de celui-ci.

Téléportation quantique

Article détaillé : Téléportation quantique.

On ne peut déterminer l'état d'un système quantique qu'en l'observant, ce qui a pour effet de détruire l'état en question. Celui-ci peut en revanche, une fois connu, être en principe recréé ailleurs. En d'autres termes, la *duplication* n'est pas possible dans le monde quantique, seule l'est une *reconstruction en un autre endroit*, voisine du concept de téléportation dans la science-fiction.

Élaborée théoriquement en 1993 par C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, et W. Wootters dans l'article *Teleporting an unknown quantum state by dual classical and EPR channels*, de la *Physical Review Letter*, cette reconstruction a été réalisée expérimentalement en 1997, sur des photons, par l'équipe d'Anton Zeilinger à Innsbruck, et plus récemment sur des atomes d'hydrogène.

Quelques paradoxes

Ces « paradoxes » nous questionnent sur l'interprétation de la mécanique quantique, et révèlent dans certains cas à quel point notre intuition peut se révéler trompeuse dans ce domaine qui ne relève pas directement de l'expérience quotidienne de nos sens.

Chat de Schrödinger

Ce paradoxe (1935) met en évidence les problèmes d'interprétation du postulat de réduction du paquet d'onde.

Article détaillé : Chat de Schrödinger.

Paradoxe EPR et expérience d'Alain Aspect

Ce paradoxe (1935) met en évidence la non-localité de la physique quantique, impliquée par les états intriqués.

Articles détaillés : Paradoxe EPR et Expérience d'Aspect.

Expérience de Marlan Scully

Cette expérience peut être interprétée comme une démonstration que les résultats d'une expérience enregistrée à un instant T dépendent objectivement d'une action effectuée à un temps ultérieur T+t. Selon cette interprétation, la non-localité des états intriqués ne serait pas seulement spatiale, mais également temporelle.

Toutefois, la causalité n'est pas strictement violée car il n'est pas possible - pour des raisons fondamentales - de mettre en évidence, avant l'instant T+t, que l'état enregistré à l'instant T dépend d'un évènement ultérieur. Ce phénomène ne peut donc donner aucune information sur l'avenir.

Article détaillé : Expérience de Marlan Scully.

Contrafactualité

Selon la mécanique quantique, des évènements qui *auraient pu se produire, mais qui ne se sont pas produits*, influent sur les résultats de l'expérience.

Article détaillé : contrafactualité (physique).

La décohérence : du monde quantique au monde classique

Article détaillé : Décohérence.

Alors que les principes de la mécanique quantique s'appliquent a priori à tous les objets contenus dans l'univers (nous y compris), pourquoi continuons-nous à percevoir classiquement l'essentiel du monde macroscopique ? En particulier, pourquoi les superpositions quantiques ne sont-elles pas observables dans le monde macroscopique? La théorie de la décohérence explique leurs disparitions très rapides en raison du couplage inévitable entre le système quantique considéré et son environnement.

Cette théorie a reçu une confirmation expérimentale avec les études portant sur des systèmes mésoscopiques pour lesquels le temps de décohérence n'est pas trop court pour rester mesurable, comme par exemple un système de quelques photons dans une cavité (Haroche *et al.*, 1996)

Articles connexes

Concepts fondamentaux

- Quantum
- Théorie des quanta
  - Diagramme d'énergie
- Postulats de la mécanique quantique
- Les trois axiomes de la mécanique quantique
- Dualité onde-corpuscule
- État quantique
  - Principe de superposition quantique
  - Intrication quantique
    - Téléportation quantique
- Fonction d'onde
- Principe d'incertitude
- Principe de complémentarité

Interprétation

Il existe de nombreuses interprétations des effets de la mécanique quantique, certaines étant en contradiction totale avec d'autres. Faute de conséquences observables de ces interprétations, il n'est pas possible de trancher en faveur de l'une ou de l'autre de ces interprétations. Seule exception, l'école de Copenhague dont le principe est justement de refuser toute interprétation des phénomènes.

Diagramme des principales interprétations

Arbre des solutions du problème de la mesure

		Théorie quantique			
N'est pas censé représenter la réalité		Ne représente pas totalement la réalité		Représente totalement la réalité	
Positivisme	Lois quantiques modifiées	Influence de la conscience	Refonte totale	Décohérence quantique	Univers multiples
Stephen Hawking Niels Bohr	Roger Penrose	Eugene Wigner	Théorie de De Broglie-Bohm	Roland Omnès Murray Gell-Mann James Hartle	Hugh Everett
	Giancarlo Ghirardi Alberto Rimini Wilhelm Eduard Weber	John von Neumann Fritz London & Edmond Bauer	Théorie des cordes	Hans-Dieter Zeh Wojciech Zurek	

Bernard d'Espagnat
Olivier Costa de Beauregard

- 1924 : Hypothèse de De Broglie
- 1927 : École de Copenhague
- 1927 : Théorie de l'onde pilote
- 1952 : Théorie de De Broglie-Bohm
- 1957 : Théorie d'Everett (univers multiples)
- 1970 : Décohérence quantique
- 1986 : Interprétation transactionnelle

Problèmes, paradoxes et expériences

- Problème de la mesure quantique
- Gravité quantique
- Contrafactualité
- Paradoxes de la mécanique quantique
- Chat de Schrödinger
- Paradoxe EPR
- Expérience d'Aspect
- Expérience de la gomme quantique à choix retardé
- Fentes de Young
- Expérience d’Afshar
- Gomme quantique

Mathématique

- Constante de Planck
- Constante de Planck réduite
- Équation de Schrödinger
- Amplitude de probabilité
- Notation bra-ket
- Espace de Hilbert
- Oscillateur harmonique quantique
- Phase géométrique
- Intégrale de chemin
- Spin

Mécanique quantique relativiste

Article détaillé : Mécanique quantique relativiste.

- Modèle standard
- Physique quantique
- Théorie quantique des champs
- Principe d'exclusion de Pauli
- Équation de Dirac
- Physique des particules
- Diagramme de Feynman

Informatique quantique

Article détaillé : Informatique quantique.

- Information quantique
- Ordinateur quantique
- Qubit
- Cryptographie quantique

Vide quantique

Article détaillé : Vide quantique.

- Énergie du vide
- Effet Casimir
  - Décalage de Lamb
- Évaporation des trous noirs

Divers

- Chronologie de la physique microscopique
- Atome d'hydrogène

Bibliographie

Ouvrages de vulgarisation

- Banesh Hoffman et Michel Paty ; *L'étrange histoire des quanta*, Collection Points-Sciences 26, Le Seuil (1981). (ISBN 2-02-005417-5)
- Emilio Segré ; *Les physiciens modernes et leurs découvertes - Des rayons X aux quarks*, Fayard (1984) (ISBN 2-213-01383-7). Une histoire vulgarisée qui couvre la période 1895-1983. L'auteur a reçu le *prix Nobel 1959* [9] pour la découverte expérimentale de l'antiproton.
- Georges Gamow ; *Trente années qui ébranlèrent la physique (Histoire de la théorie quantique)*, 1968. Réédité par Jacques Gabay (2000) (ISBN 2-87647-135-3).
- Stéphane Deligeorges (ed) ; *Le monde quantique*, Collection Points-Sciences 46, Le Seuil (1984). (ISBN 2-02-008908-4)
- Emile Noël (ed) ; *La matière aujourd'hui*, Collection Points-Sciences 24, Le Seuil (1981). (ISBN 2-02-005739-5)
- Serge Haroche ; *Physique quantique*, Leçon inaugurale au Collège de France, coédition Collège de France/Fayard (2004).
- Étienne Klein ; *Petit voyage dans le monde des quanta*, Collection Champs 557, Flammarion (2004). (ISBN 2-08-080063-9)
- Roland Omnès ; *Les indispensables de la mécanique quantique*, Collection Sciences, Odile Jacob (2006). (ISBN 978-2-7381-1820-2)
- Helge S. Kragh ; *Quantum generations - A history of physics in the twentieth century*, Princeton University Press (1999) (ISBN 0-691-01206-7)
- Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod; Le Cantique des quantiques: le monde existe-t-il ? éd. La Découverte, 2007. (ISBN 978-2-7071-5348-7).

Ouvrages de philosophie

- Bernard d'Espagnat ; "Le réel voilé, Analyse des concepts quantiques", Fayard, 1994
- Michel Bitbol, Mécanique quantique, une introduction philosophique, 1re éd. 1996 [détail des éditions]
- Bryce DeWitt and Neil Graham ; "The many-worlds interpretation of quantum mechanics" Princeton University Press, 1973
- David Bohm and Basil Hiley ; "The undivided Universe, An ontological interpretation of quantum mechanics", Routledge, 1993
- **(en)** Bas van Fraassen, Quantum mechanics : an empiricist view, Oxford University Press, New York, 26 septembre 1991, 560 p. (ISBN 978-0-19-823980-2)
- R. I. G. Hughes ; "The structure and interpretation of quantum mechanics", Harvard University Press, 1992
- Roland Omnès ; "The interpretation of quantum mechanics", Princeton University Press, 1994
- Robert B. Griffiths *Consistent Quantum Theory*, Cambridge University Press, 2003. (ISBN 0-521-53929-3)
- John S. Bell *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, second Edition, Collected papers on quantum philosophy*, Cambridge University Press, 2004. (ISBN 0-521-52338-9)

Ouvrages d'initiation

Accessibles au niveau d'un premier cycle universitaire.

- Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar ; *Quantique : rudiments*, InterEditions/Éditions du CNRS (1984). Réédité par Masson (1997) (ISBN 2-225-85521-8), aujourd'hui racheté par Dunod : (ISBN 2-225-85521-8) Initiation à la physique quantique, accessible dès le premier cycle universitaire. Le bagage mathématique est restreint au minimum, l'accent étant porté sur la compréhension des phénomènes.
- Richard Feynman ; *Mécanique quantique*, volume 3 du *Cours de physique de Feynman*, issu d'un enseignement donné à CalTech (Californian Institute of Technology, Pasadena), première parution aux États-Unis en 1963, édidions Dunod, (ISBN 2-10-004934-8). Cours de niveau premier cycle universitaire, par le théoricien américain Richard Feynman, prix Nobel de physique 1965. C'est une vision personnelle de la physique orientée vers la pédagogie : Feynman prend pour point de départ les amplitudes de transitions plutôt que la fonction d'onde Ψ (l'équation de Schrödinger ne faisant son apparition qu'au chapitre 16 à la page 320). Ces amplitudes constituent l'objet central de sa propre formulation en intégrale de chemins. Cette approche peut dérouter l'étudiant ayant déjà suivi un cours d'initiation standard, l'aspect formel étant réduit.
- Max Born ; *Structure atomique de la matière - Introduction à la physique quantique*, Collection U, Armand-Colin (8e édition-1971). Un livre de référence par un professeur de physique théorique de l'université de Göttingen, prix Nobel de physique 1954 pour son interprétation statistique de la fonction d'onde de Schrödinger. Ce livre vaut pour certains détails historiques de première main.
- Bernard Cagnac & Jean-Claude Pebay-Peyroula ; *Physique atomique - Tome 1 : expériences et principes fondamentaux*, Dunod (1975). (ISBN 2-04-002555-3). Ce livre décrit précisément et en détails les aspects expérimentaux suivants : l'effet photoélectrique, les spectres optiques, l'expérience de Franck et Hertz, l'effet Compton, l'émission et l'absorption de photons, le laser, la dualité onde-corpuscule, les modèles atomique planétaires, ainsi que de nombreux aspects du magnétisme orbital et du magnétisme de spin, dont l'expérience de Stern et Gerlach.
- Edouard Chpolski ; *Physique atomique* (2 vol.), Editions Mir (1977) ISBN . Un exposé des principes de la physique atomique, qui fournit de nombreux détails historiques.
- Abraham Pais ; *Inward Bound - Of Matter & Forces in the Physical World*, Oxford University Press (1986) (ISBN 0-19-851997-4) Écrite par un ancien assistant d'Einstein à Princeton, cette histoire des développements de la physique moderne démarre en 1895 avec la découverte expérimentale des rayons X, et se termine en 1983 lors de

la découverte expérimentale au C.E.R.N. des bosons-vecteurs W et Z. L'auteur décrit avec beaucoup de détails l'évolution des idées, indiquant systématiquement les références des publications originales. Livre non traduit pour l'instant en français.

Ouvrages destinés à l'apprentissage de la discipline

Accessibles à partir du second cycle universitaire.

- Constantin Piron ; "Mécanique Quantique: Bases et Applications", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (1998) (ISBN 2-88074-399-0). Ce cours expose les bases de la théorie quantique et ses applications élémentaires sous une forme moderne, totalement renouvelée grâce aux travaux et aux découvertes faites ces trente dernières années, tant dans le domaine expérimental que dans le domaine théorique. Les concepts mathématiques sont introduits au fur et à mesure des besoins d'une manière élémentaire mais rigoureuse. Le tout est illustré par de nombreux exercices, avec corrigé.
- Michel Le Bellac ; *Physique quantique*, Collection *Savoirs actuels*, EDP Sciences/CNRS Editions (2003) (ISBN 2-86883-665-0 et 2-271-06147-4). Cet ouvrage aborde les aspects les plus récents de la théorie.
- J. L. Basdevant, J. Dalibard, *Mécanique quantique* [détail des éditions]
- Jean-Louis Basdevant & Jean Dalibard ; *Problèmes quantiques*, Editions de l'école Polytechnique (2004), (ISBN 2730211179). Complément du volume de cours précédent, ce livre contient 19 problèmes, avec corrigés, sur une grande diversité d'exemples expérimentaux contemporains.
- C. Cohen-Tannoudji, B. Diu et F. Laloë, *Mécanique quantique* [détail des éditions]. Traité en français, généralement donné comme référence aux étudiants du premier et second cycles universitaires.
- Albert Messiah, *Mécanique quantique* [détail des éditions]
- Lev Landau et Evguéni Lifchitz, *Physique théorique*, tome 3 : *Mécanique quantique*, éd. MIR, Moscou [détail des éditions]. Écrit par un théoricien soviétique (en collaboration avec un de ses élèves) connu pour ses travaux en physique de l'état condensé, prix Nobel de physique 1962. Ouvrage complet.
- Jun John Sakurai ; Modern Quantum Mechanics, Revised Edition, Addison-Wesley Publishing Company (1994) (ISBN 0-201-53929-2). Cet ouvrage d'un niveau avancé présente en particulier des sujets tels que les intégrales de chemin de Feynman, les mesures de corrélations, les inégalités de Bell, etc.
- Peter Atkins ; *Molecular quantum mechanics*, Oxford University Press (2e édition-1983) ISBN . Cours très pédagogique, par le célèbre professeur de chimie-physique de l'Université d'Oxford.
- Alain Aspect ; *Quelques tests expérimentaux des fondements de la mécanique quantique (en optique)*, dans : *Qu'est-ce que l'Univers ?*, Vol. 4 de l'Université de Tous les Savoirs (sous la direction d'Yves Michaux), Odile Jacob (2001) 589. Dualité onde-corpuscule, intrication quantique & paradoxe E.P.R., par un professeur d'optique à l'Université de Paris-Sud (Orsay), auteur en 1982 d'une remarquable expérience testant les inégalités de Bell des corrélations E.P.R. (expérience en faveur des prédictions de la mécanique quantique. Cette expérience fut améliorée en 1998 par Anton Zeilinger et ses collaborateurs de l'Université d'Innsbrück, Autriche).
- Anton Zeilinger ; *La téléportation*, Pour La Science 272 (Juin 2000) 36-44

Aspects historiques

- José Leite-Lopes & Bruno Escoubès ; *Sources et évolution de la physique quantique - Textes fondateurs*, Masson (1995) (ISBN 2-225-84607-3). Réédité par E.D.P. Sciences. Donne une vue générale de l'évolution des idées, du XIXe siècle à 1993, ainsi que la traduction française de quelques articles fondateurs.
- John Archibald Wheeler & Wojciech Zurek ; "Quantum theory and measurement", Princeton University Press, 1983. Un recueil classique d'articles sur le "problème de la mesure"
- B.L. van der Waerden (ed.) ; *Sources of quantum mechanics*, Dover Publications, Inc. (1967) (ISBN 0-486-61881-1). Ce volume regroupe quelques-uns des articles pionniers de 1916 à 1926 (en traduction anglaise).

- Paul A. Dirac; *The principles of quantum mechanics*, Oxford Science Publication, Oxford University Press (4e édition-1958). Le traité historique de base sur les principes de la mécanique quantique, par l'un de ses plus brillants inventeur, professeur de physique théorique à l'université de Cambridge, prix Nobel de physique en 1933 (avec Erwin Schrödinger).
- Paul A.M. Dirac ; *Lectures on Quantum Mechanics*, Dover Publications, Inc (2001). Quatre conférences faites à l'Université Yeshiva de New York en 1964.
- Erwin Schrödinger ; *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, réédition des articles historiques par Jacques Gabay (1988) ISBN .
- Werner Heisenberg ; *Les principes physiques de la théorie des quanta*, réédition du livre historique par Jacques Gabay (1989) ISBN .
- Enrico Fermi ; *Notes on quantum mechanics*, the University of Chicago Press (1961) ISBN .
- John Von Neumann ; *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, Librairie Alcan (1946), réédité par Jacques Gabay (1988) ISBN . Un ouvrage fondamental sur la structure mathématique de la théorie et les espaces de Hilbert.
- Jagdish Mehra & Helmut Rechenberg ; *The historical development of quantum theory*, Vols. 1-6, Springer-Verlag (New York-1978 à 2001) ISBN. Ouvrage de plus de 4500 pages (6 volumes en 9 livres) sur le développement la mécanique quantique, principalement de 1900 à 1941 (un court texte est consacré aux avancées depuis 1941 jusqu'en 1999).
- Max Jammer ; *The conceptual development of quantum mechanics*, McGraw-Hill (New York-1966) ISBN .
- Max Jammer ; *The philosophy of quantum mechanics*, John Wiley & Sons (New York-1974) ISBN .

Sur la décohérence

- Serge Haroche, Jean-Michel Raimond & Michel Brune ; *Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience - Voir en direct le passage du monde quantique au monde classique*, La Recherche 301 (Septembre 1997) 50.
- Serge Haroche ; *Une exploration au cœur du monde quantique*, dans : *Qu'est-ce que l'Univers* ?, Vol. 4 de l'Université de Tous les Savoirs (sous la direction d'Yves Michaux), Odile Jacob (2001) 571.
- Roland Omnès ; *Comprendre la mécanique quantique*, EDP Sciences (2000) (ISBN 2-86883-470-1). Par un professeur de physique théorique émérite de l'Université de Paris-Sud (Orsay), une discussion de l' interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, du problème de la mesure et de la théorie des histoires consistantes de Griffiths et de la décohérence, par l'un de ses pionniers.
- E. Joos,, H.D. Zeh, C. Kiefer, D. Giulini, K. Kupsch, I.O. Stamatescu ; *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer-Verlag (1996). Deuxième édition (2003) (ISBN 3-540-00390-8)
- Gennaro Auletta ; *Foundation & Interpretation of Quantum Mechanics (in the light of a critical - historical analysis of the problems and of a synthesis of the results)*, Wolrd Scientific (2001) ISBN . Par un professeur de l'Université de Rome, un ouvrage monumental (environ 1000 pages) sur les fondements conceptuels de la mécanique quantique des origines à nos jours - y compris les questions de décohérence -, mis en relation avec les avancées expérimentales les plus récentes.
- Fred Alan Wolf ; *Parallel Universes: The Search for Other Worlds*, 1988

Bibliothèque virtuelle

Cours

- Franck Laloë ; *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* [10] (pdf) : cours de Franck Laloë (Laboratoire Kastler-Brossel, ENS Ulm, Paris).
- Franck Laloë ; *Do we really understand quantum mechanics ?* [11] (pdf) : version anglaise augmentée du cours précédent sur le "paradoxe" E.P.R., le théorème de Bell, les intrications quantiques et la décohérence.
- Claude Cohen-Tannoudji ; *Compléments de mécanique quantique* [12] (pdf) : cours de Claude Cohen-Tannoudji (prix Nobel 1997) sur la formulation Lagrangienne de la mécanique quantique (Feynman-Dirac), et sur l'utilisation des fonctions de Green. Notes rédigées en 1966 par Serge Haroche.
- Jean Dalibard ; *Mécanique quantique avancée* [13] (pdf) : cours sur les systèmes de bosons et de fermions, la seconde quantification et l'espace de Fock, et la théorie des collisions.
- *Claude Cohen-Tannoudji au Collège de France* [14] (pdf) : cours donnés depuis 1976 par Claude Cohen-Tannoudji (prix Nobel 1997 - chaire de physique atomique).
- *Serge Haroche au Collège de France* [15] (pdf) : cours donnés par Serge Haroche (chaire de physique quantique).
- Michel Le Bellac ; à l'information quantique [16] (pdf). Cours de Michel Le Bellac (Institut Non Linéaire de Nice).
- Philippe Jacquier ; [17] *Physique Quantique et Applications & Atomes et Molécules*. Cours de Master M1 donné à l'UPMC (Paris VI).
- Doron Cohen ; *Lecture Notes in Quantum Mechanics*, (2006). Excellente introduction, qui couvre de multiples aspects qu'on trouve rarement abordés à ce niveau. ArXiv : quant-ph/0605180 [18].

Lectures complémentaires

- Roger Balian ; *La physique quantique à notre échelle* [19] : texte d'une conférence donnée par l'auteur (Service de Physique Théorique du CEA, Saclay) le 15 décembre 2000 à l'Académie des Sciences de Paris lors du colloque : *Les quanta : un siècle après Planck*. Publié par Michel Crozon & Yves Saquin (éditeurs), Physique et Interrogations Fondamentales - *Un siècle de quanta*, EDP Sciences (2003) pp. 59-89
- Max Born ; *Quelques problèmes de mécanique quantique* [20] (pdf), Annales de l'Institut Henri Poincaré 1 (3) (1930) pp. 205-263. Après une introduction à la mécanique quantique, Max Born (prix Nobel 1954) discute notamment le phénomène d'effet tunnel appliqué à la radioactivité alpha, poursuit par quelques applications à la cinétique des réactions chimiques, et aborde enfin le problème de la largeur des raies spectrales.
- P.A.M. Dirac ; *Quelques problèmes de mécanique quantique* [21] (pdf), Annales de l'Institut Henri Poincaré 1 (4) (1930) pp. 357-400. Paul Dirac (prix Nobel 1933) y expose le formalisme de la physique statistique quantique d'une part, ainsi que l'équation quantique et relativiste de l'électron d'autre part (aujourd'hui appelée « équation de Dirac » en son honneur). À noter que, dans cet article, Dirac identifie de façon erronée un « trou » de la mer de Dirac des états d'énergie négatives (issues des solutions de son équation) avec le proton. On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'un positron, antiparticule de l'électron.
- Edmond Bauer ; *Introduction à la théorie des groupes et à ses applications en physique quantique* [22] (pdf), Annales de l'Institut Henri Poincaré 3 (4) (1933) pp. 1-170.

Liens externes

- Scio : Introduction à la mécanique quantique, sans jargon technique [23]
- Introduction à la physique quantique [24]
- Quantum Physics Online : introduction interactive à la mécanique quantique (applets Java) [25]
- Cours de mécanique quantique (1ère année) à l'Ecole polytechnique (vidéo) [26]
- Cours de mécanique quantique (2ème année) à l'Ecole polytechnique (vidéo) [27]

Sur la téléportation quantique

- Téléportation quantique sur le site de M.Crépeau [28]
- La téléportation sur le site *Luxorion* [29]
- **(en)** Téléportation quantique sur le site d'IBM [30]

Notes et références

[1] Dans *principes de la mécanique quantique*, Dirac écrit (chapitre 1, §2) : « Quoique l'idée fondamentale, suivant laquelle une réalité physique peut être décrite par l'emploi simultané d'ondes et de particules reliées entre elles d'une façon bien curieuse, soit une idée d'une importance considérable et susceptible d'applications étendues, elle n'en est pas moins, cependant, qu'un simple cas particulier d'un principe beaucoup plus général, le *principe de superposition*. Celui-ci constitue l'idée fondamentale nouvelle de la mécanique quantique et forme le point initial à partir duquel celle-ci commence à s'écarter de la théorie classique »

[2] Richard P. Feynman ; *The principle of least action in quantum mechanics*, thèse de l'université de Princeton. Cette thèse vient d'être publiée dans Laurie M. Brown (Editor) ; *Feynman's thesis: a new approach to quantum theory*, World Scientific (2005),(ISBN 9812563806).

[3] Richard P. Feynman ; *Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics*, Review of Modern Physics 20 (1948) 267. Cet article est reproduit dans : Julian Schwinger (ed) ; *Selected papers on quantum electrodynamics*, Dover Publications, Inc. (1958) (ISBN 0-486-60444-6), ainsi que dans : Laurie M. Brown (Editor) ; *Feynman's thesis: a new approach to quantum theory*, World Scientific (2005),(ISBN 9812563806).

[4] La notion de chemin a fait un retour spectaculaire en mécanique quantique en 1948 avec la formulation lagrangienne introduite par Feynman, basée sur le concept d'intégrale de chemin.

[5] Ce concept est primordial en théorie quantique des champs, théorie qui fait appel à la notion de particule virtuelle.

[6] Pour une dérivation rigoureuse de l'inégalité énergie-temps, consulter par exemple Albert Messiah, *Mécanique quantique - volume 1*, Dunod (1959) pp. 114-117, pp. 269-270, et pour l'oscillateur harmonique, p. 280. Ouvrage réédité par Dunod en 1995, (ISBN 2-10-007361-3).

[7] De même que la composante p_i de l'impulsion est le générateur des translations d'espace dans la direction x^i.

[8] Concernant la validité de ce « théorème », lire les travaux d'Eric Galapon : *quant-ph/9908033* (http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908033) et *quant-ph/0303106* (http://arxiv.org/abs/quant-ph/0303106).

[9] http://nobelprize.org/physics/laureates/1959/segre-bio.html

[10] http://www.phys.ens.fr/cours/notes-de-cours/fl-mq/mq.PDF

[11] http://www.phys.ens.fr/cours/notes-de-cours/fl-mq/mq-anglais.pdf

[12] http://www.phys.ens.fr/cours/notes-de-cours/cct-dea/index.html

[13] http://www.phys.ens.fr/cours/notes-de-cours/jd-dea/index.html

[14] http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/index.html

[15] http://www.lkb.ens.fr/recherche/qedcav/college/college.html

[16] http://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00092955/fr/"Introduction

[17] http://www.phys.ens.fr/~jacquier/cours/M1

[18] http://arxiv.org/abs/quant-ph/0605180

[19] http://www-spht.cea.fr/articles/t02/046/

[20] http://archive.numdam.org/article/AIHP_1930__1_3_205_0.pdf

[21] http://archive.numdam.org/article/AIHP_1930__1_4_357_0.pdf

[22] http://archive.numdam.org/article/AIHP_1933__4_1_1_0.pdf

[23] http://www.e-scio.net/mecaq/index.php3

[24] http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier188-1.php

[25] http://www.quantum-physics.polytechnique.fr

[26] http://catalogue.polytechnique.fr/site.php?id=87

[27] http://catalogue.polytechnique.fr/site.php?id=118

[28] http://www.cs.mcgill.ca/~crepeau/tele.html

[29] http://www.astrosurf.com/luxorion/quantique-teleportation.htm

[30] http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/

- Portail de la physique

Sources et contributeurs de l’article

Mécanique newtonienne *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59165544 *Contributeurs*: Acer11, Agustin.alarcon, Alain r, Bemapilobe, Cdang, Crochet.david, Darwinius, David Berardan, Dhenry, DocteurCosmos, Ediacara, Gem, GillesC, Grum, JohnD, Josce, Laddo, LeYaYa, Looxix, Ludovic89, LyricV, Mikue, Mm, Orthogaffe, Phe, Pixeltoo, Pld, R, Romary, Sam Hocevar, Sbrunner, Sherbrooke, Sloonz, Tvpm, 14 modifications anonymes

Cinématique *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59066987 *Contributeurs*: 16@r, Anarkman, Ancalagon, Archimède, Ascaron, Ataffanel, Bap, Barbetorte, Bcoconni, Bemapilobe, Catschlum, Cdang, David Berardan, EDUCA33E, Elie1024, Eric.dane, Flo, Greatpatton, Grecha, Gromain47, Guerinsylvie, Guérin Nicolas, Helsph, Hercule, Jarfe, Kelam, Kernevez, Lexaar, Looxix, Marc Mongenet, Nikai, No-w-ay, Nono64, O. Morand, ObiWan Kenobi, OliverSchneider, Omnipaedista, Orthogaffe, Phe, Pitagor, Pld, Ryo, Sam Hocevar, Sbrunner, Sherbrooke, Ske, Sloonz, Spooky, Vargenau, Vazkor, W'rkncacnter, Witoki, YolanC, Zetud, ~Pyb, 52 modifications anonymes

Lois du mouvement de Newton *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59304577 *Contributeurs*: -Carton-, Agustin.alarcon, Archibald, Arkanosis, Badmood, Barraki, Bcoconni, Bob08, Brenasin, Caton, Cdang, Charles Dyon, Croquant, Céréales Killer, David Berardan, Dbfls, Deep silence, Dhenry, Didierv, Dirac, Dominique.le.levier, EDUCA33E, Emmanuel legrand, Epsilon0, Eurêka, EyOne, Franckyboy, FrihDBizarre, GaMip, Gede, Ghassen HIGH-TECH, GillesC, Grazou903, Grum, Guerin sylvie, Guerinsylvie, HB, Hcanon, Hemmer, IAlex, Ico, JKHST65RE23, Jaam, Jef-Infojef, JohnD, K!roman, Kelam, Kelson, Kilom691, Korrigan, Kropotkine 113, Laddo, LeYaYa, Leag, Like tears in rain, Loonies, Looxix, Malta, Med, Mingo357, Moez, Moumousse13, Mro, Nells, Neuceu, Niun, Nono64, Npettiaux, NucleoS, Orion Extra-terrestre, Orthogaffe, Papatt, Phe, Piglop, Pld, Poss Jean-Louis, Ptitpoul, R Camus, Rogilbert, Ryo, Sherbrooke, Sixsous, Sl, Spoirier, Stanlekub, Stéphane33, Theon, Trassiorf, Tython, Winnie 007, Woww, Xavier Combelle, Yurik, Yves, Zetud, Zweistein, 157 modifications anonymes

Mécanique analytique *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=58618771 *Contributeurs*: CUSENZA Mario, Cdang, Colombiano54, David Berardan, Didierv, Esprit Fugace, Francis, Grondilu, Jerome66, Looxix, LyricV, Orthogaffe, Pemelet, Peps, Renard, Ryo, curie.noos.net, script de conversion, 2 modifications anonymes

Mécanique des fluides *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=56810579 *Contributeurs*: 16@r, BSchaeffer, BahaFura, Barmyb 99, Bcoconni, Cdang, David Berardan, DocteurCosmos, Domsau2, Edmond Wells, Flyz, Guillom, Gy, Hemmer, Heretique, IP 84.5, Iznogood, Jct, Jerome.Abela, Jerome66, Josce, Julianedm, Jérôme6210, Karl1263, Kelson, Krouchynka, Loloemr, Looxix, Mahat, Maniak, Mathieu.clabaut, Nok, Orthogaffe, Pem, Phe, Pierre cb, Pmetier, Reelax, Renard, Roussel@ict.uni-karlsruhe.de, Sherbrooke, Snap, Snipre, Supervince, Syntex, Tarquin, Thielleux, Ton1, Tvpm, Valéry Beaud, Verdurre, Victor book, Xstephx, Zaleski, Zorglub old, script de conversion, 70 modifications anonymes

Mécanique du point *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59102762 *Contributeurs*: AKtarus, Alibaba, Ascaron, Cdang, David Berardan, David Smyko, Dick, EmmanuelN, Eurêka, Fab97, Fffred, Gerfaut, Jarfe, LeYaYa, Luís Felipe Braga, Mathieuw, OliverSchneider, Orthogaffe, Perditax, Ruizo, Sbrunner, 16 modifications anonymes

Mécanique du solide *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59102803 *Contributeurs*: Ascaron, CUSENZA Mario, Cdang, David Berardan, Flo, Jarfe, LairepoNite, LeYaYa, Lmaltier, MG, Mangatome, MichelJullian, Neuceu, Nok, Perditax, Raph, Ruizo, Surfeurnet, Theon, Trassiorf, 9 modifications anonymes

Transformations de Galilée *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=56322817 *Contributeurs*: E Bernal, El Caro, Eurêka, Flo, Gem, Madiot, Orthogaffe, Pamputt, Peps, Sherbrooke, Stanlekub, Theon, Yves, 4 modifications anonymes

Mécanique des milieux continus *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59021876 *Contributeurs*: Alno, Arnaud.Serander, Bcoconni, Cdang, Cfu, David Berardan, Deep silence, DenisLaxalde, Drébon, Ediacara, Flo, GaMip, Hrvb, Kropotkine 113, LeYaYa, Lilian, Looxix, Med, Orthogaffe, Pamputt, Pascalv, Pixeltoo, Pld, Rigolithe, Sandrine, Sbrunner, Smeet666, Template namespace initialisation script, Wiz, Yelkrokoyade, Youssefsan, Yves, Yves-Laurent, 34 modifications anonymes

Oscillateur harmonique *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59556323 *Contributeurs*: (et)t, BafS, Cantons-de-l'Est, Chtit draco, David Berardan, Dbfls, DocteurCosmos, Esprit Fugace, FR, Fafnir, Greteck, Grimlock, Gérard Samouillan, Jef-Infojef, KoS, Kropotkine 113, LP, LeYaYa, PNLL, Pierre cb, Radost, Raminagrobis, Sixsous, Sophos, Tizeff, Toutoune25, Ventnocturne, Youen, Zulon, 27 modifications anonymes

Relativité galiléenne *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=50452860 *Contributeurs*: Badmood, Bcoconni, E Bernal, Eurêka, Fm790, GLec, Gem, Huard, Jacques D., Kha anor, Kropotkine 113, LeYaYa, LyricV, Medium69, Melusyne, Pamputt, Pld, Sherbrooke, Smily, Spoirier, Stanlekub, Theon, TigH, Trassiorf, Yves, 5 modifications anonymes

Mouvement rectiligne uniformément accéléré *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=57299399 *Contributeurs*: Algébrico, Cdang, DominicC13, Haha, IAlex, Mattd, Maurilbert, Nicolas Wälchli, No-w-ay, Sbrunner, 9 modifications anonymes

Mécanique quantique *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=59372683 *Contributeurs*: Actorstudio, Aladin34, Alain r, Arceno, Archimëa, BSchaeffer, Badmood, Barraki, Bibi Saint-Pol, Bloubéri, Bob08, Bohyother, Boism, Bouba, Bouture, Buisson, Buzz, Carlo denis, Cdang, Cfoellmi, Cham, ChtiTux, Clandsheere, Copyleft, Crochet.david, Curiotip, Cyrildz, Céréales Killer, Daverio David, David Berardan, David Daverio, Dhenry, Dirac, Docnette, DocteurCosmos, Dozlune, Droopy nico, Délirius, Ediacara, Edmond Wells, Elgauchito, Enherdhrin, Fabrice Ferrer, Fafnir, François-Dominique, Frentea, Fv, Gem, Grondilu, Grum, Guillom, Guérin Nicolas, Gzzz, Haltar, Imhotep2, Imperator, Iznogood, JKHST65RE23, JLM, JSDX, Jarfe, Jean-Christophe, Jean-Christophe BENOIST, Jef-Infojef, Josce, Jrl133, Jérome Bru, Karl1263, Kelson, Kemkem french, Kilom691, Kipmaster, Korrigan, Kropotkine 113, Lachaume, Lalibela, Le Père Odin, LeYaYa, Lebens, LeonardoRob0t, Lintawa, Looxix, Ludovic89, Marc douville, MathB, Mathieu Perrin, Med, MisterMatt, Mknux, Mm, NIKO, Noritaka666, Nrl, NucleoS, Numbo3, Olivier, Orthogaffe, Pem, Pi.r, Pickwick, Pixeltoo, Poppy, Pseudomoi, Psicos, R, Rabatakeu, Renard, Rogilbert, Ryo, Savenok, Shaihulud, Sherbrooke, Situation, Slasher-fun, Snap, SoCreate, SpICE, Speedspid, Spoirier, Stanlekub, Sts, Tejgad, Thierry Dugnolle, Thilp, Trassiorf, Trusty, Tuttiandco, Tvpm, User0101010101, Valéry Beaud, Vasco, Ventnocturne, Vev, Vincent Ramos, Wart Dark, Webkid, WikiXP, Wku2m5rr, Woww, Xic667, Xmlizer, Yves, Zakmaf, Zelda, Zewan, Zweistein, script de conversion, ²°¹°°, 209 modifications anonymes

Source des images, licences et contributeurs

Licence