

FRANCAIS DES SCIENCES - PHYSIQUE 4

Dynamique du point matériel

École Centrale Pékin

Année 1

Table des matières

1	Vocabulaire	2
2	Les lois de Newton	2
2.1	Le point matériel	2
2.2	Première loi de Newton : principe d'inertie (惯性定律)	3
2.3	Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique (PFD)	3
2.4	Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques (相反的)	4
2.5	Limites de la mécanique classique	4
3	Les forces	5
3.1	Les interactions fondamentales	5
3.2	Les forces à distance	6
3.3	Forces de contact	7

1 Vocabulaire

Un point matériel 质点	Attraction électrostatique 静电吸引力
Posséder 具有	Attractif 吸引力的
Mécanique du point 质点力学	Répulsif 斥力
Mécanique des solides 刚体力学	Charge 电荷
Masse 质量	Electrique 电的
Quantité de mouvement 动量	Magnétique 磁的
Scalaire 标量	Tendu (pour un fil) 拉紧的
Moment cinétique 动量矩	Tension 张力
Energie cinétique 动能	Force de rappel élastique 弹性恢复力
Principe d'inertie 惯性定律	Frottement 摩擦力
Force 力	Immobile 不动的
Interaction 作用	Glissement 滑动
Réciproque 相反的	Glisser 滑动
Hypothèses 假设	Viscosité 粘度
Macroscopique 宏观的	Bilan des forces 受力分析
Subatomique 亚原子的	Projeter (pour les vecteurs) 投影
Invariantes 不变量	Lâché 松开
Changement de référentiel 变换坐标系	Lancé 发射的
Force de contact 接触力	Equation du mouvement 运动方程
Force à distance 远程力	Equation homogène 齐次方程
Fluide 流体	Solution particulière 特解
Attraction gravitationnelle 引力	Altitude 海拔高度
Poids 重量	Equation différentielle 微分方程
Pesanteur 重力	

2 Les lois de Newton

2.1 Le point matériel

Définition : Un **point matériel** (质点) est un point de l'espace qui possède (具有) une masse (质量) : il représente un objet ponctuel de masse m .

Le point matériel est l'objet d'étude de la **mécanique du point** (质点力学) : on ne prend pas en compte les mouvements de l'objet sur lui-même. Dès que l'on ne considère plus un point matériel, c'est la **mécanique des solides** (刚体力学) qui permet de résoudre les problèmes.

A un point matériel on peut associer des grandeurs mécaniques qui permettent d'étudier son mouvement :

- **Masse :** La masse m est une caractéristique intrinsèque de l'objet que l'on étudie. Elle représente la capacité d'un objet à s'opposer à une modification de sa vitesse.

La masse est une grandeur scalaire (标量) positive qui s'exprime en kg dans le système S.I.

- **Quantité de mouvement (动量) :** le mouvement du point matériel M de masse m est caractérisé par sa vitesse $\vec{v}(M)$. On définit alors la quantité de mouvement de M .

Définition : La **quantité de mouvement** ou **impulsion** $\vec{p}(M)$ du point matériel M dans le référentiel \mathcal{R} s'écrit :

$$\vec{p}(M) = m \vec{v}(M) \quad \text{unité : kg.m.s}^{-1}$$

La quantité de mouvement dépend de la vitesse donc du référentiel d'étude \mathcal{R} : elle change si on change de référentiel.

• **Autres :** On peut associer à un point matériel d'autres grandeurs tel que le **moment cinétique** (动量矩) ou l'**énergie cinétique** (动能). Nous verrons ces grandeurs dans les prochains chapitres.

2.2 Première loi de Newton : principe d'inertie (惯性定律)

Définition : Une **force** (力) est une grandeur vectorielle décrivant l'interaction (作用) capable de produire et/ou de modifier un mouvement du système.

Première loi de NEWTON ou principe d'inertie :

Lorsqu'un corps est soumis à des forces qui se compensent (pseudo-isolé) ou à aucune force (isolé), alors il est soit au repos (immobile) soit animé d'un mouvement rectiligne uniforme. Réciproquement, si un corps est au repos ou en mouvement rectiligne uniforme alors il n'est soumis à aucune force ou à des forces qui se compensent.

Les référentiels où le principe d'inertie est vérifié sont les **référentiels galiléens**.

Remarque : En pratique aucun référentiel n'est parfaitement galiléen, mais on considère un référentiel comme galiléen lorsque les déviations au principe d'inertie sont négligeables.

2.3 Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique (PFD)

Si $\vec{v} = c\vec{t}$ alors $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$ et $\sum_i \vec{F}_i = \vec{0}$
Deuxième loi de NEWTON ou principe fondamental de la dynamique (PFD) :

Dans un référentiel galiléen, la somme des N forces extérieures \vec{F}_i exercées sur un point matériel M de masse m s'écrit :

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}(t)}{dt} \quad \text{avec } \vec{p}(t) = m \vec{v}(t)$$

un système pseudo-isolé ou isolé est en mouvement rectiligne uniforme

Si le système a une masse constante (système fermé) alors on peut écrire :

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = m \vec{a}$$

avec \vec{a} l'accélération du point matériel M .

Remarques :

1. Ce principe est cohérent avec le principe d'inertie

$$\text{Si } \vec{v} = c\vec{t} \text{ alors } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0} \text{ et } \sum_i \vec{F}_i = \vec{0}$$

un système pseudo-isolé ou isolé est en mouvement rectiligne uniforme

2. Homogénéité de l'équation :

$$[F] = \text{N} \cdot \text{L} \cdot \text{T}^{-2}$$

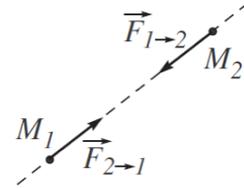
$$\left[m \frac{d\vec{v}}{dt} \right] = \text{N} \frac{\text{L} \cdot \text{T}^{-1}}{\text{T}} = \text{N} \cdot \text{L} \cdot \text{T}^{-2}$$

2.4 Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques (相反的)

Troisième loi de NEWTON ou principe des actions réciproques :

Les forces d'interaction réciproques qui s'exercent entre deux points matériels M_1 et M_2 sont opposées et ont pour support la droite passant par ces points :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{M_1 M_2} \wedge \vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \vec{0}$$



2.5 Limites de la mécanique classique

Le cadre de la mécanique classique est valable sous certaines hypothèses (假设) seulement. Ces hypothèses étant vérifiées dans un très grand nombre de cas, le modèle de la mécanique classique est adapté à l'étude d'un très grand nombre des situations. Lorsque ces hypothèses ne sont plus vérifiées on utilise des modèles plus compliqués.

Hypothèses :

- Temps absolu (indépendant du référentiel), sinon **relativité restreinte**.
- Comportement déterministe, sinon **mécanique quantique**.
- Espace et temps indépendants, sinon **relativité générale**.

3 Les forces

3.1 Les interactions fondamentales

Lorsqu'un système n'est pas isolé, il est soumis à des forces. Ces forces traduisent les actions des corps les uns sur les autres, c'est-à-dire des interactions. Ces interactions macroscopiques (宏观的) ont toutes comme origine les interactions entre les particules subatomiques (亚原子的) (électrons + particules subnucléaires) qui constituent la matière. Bien que ces particules soient en grand nombre, il n'existe que 4 interactions fondamentales regroupées dans le tableau suivant :

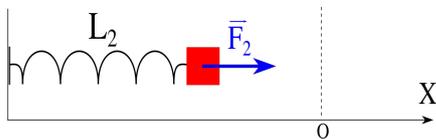
interaction	particules concernées	portée	exemples de conséquences
Gravitationnelle	Toutes	Infini	Chute des corps Formation des galaxies
Electromagnétique	Particules chargées	Infini	Electricité, chimie Aimants
Forte	Hadrons (particules contenant des quarks)	$\sim 10^{-15}$ m	Cohésion du noyau
Faible	Toutes	$\sim 10^{-18}$ m	Désintégrations nucléaires

Les forces associées à ces 4 interactions ne dépendent pas du référentiel d'étude : elles sont invariantes (不变量) par changement de référentiel (变换坐标系). On regroupe ces différentes forces en deux catégories :

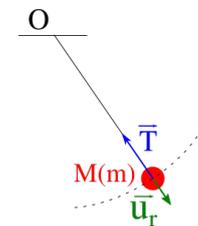
- les **forces de contact** (接触力) : le système étudié subit une force d'un objet ou fluide en contact avec lui au niveau de la zone de contact.

exemple :

Force de rappel d'un ressort



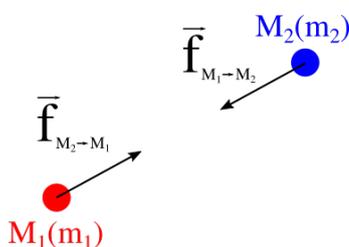
Tension d'un fil



- les **forces à distance** (远程力) : le système subit une force d'un autre système sans qu'il y ai contact.

exemple :

Attraction gravitationnelle



3.2 Les forces à distance

3.2.1 Attraction gravitationnelle (引力) - Poids (重量)

Entre deux masses ponctuelles m_1 et m_2 placées en M_1 et M_2 s'établit une force d'attraction réciproque, c'est la **force d'attraction gravitationnelle** :

$$\vec{f}_{m_1 \rightarrow m_2} = -G \frac{m_1 m_2}{(M_1 M_2)^3} \overrightarrow{M_1 M_2} \quad \text{ou} \quad \vec{f}_{m_1 \rightarrow m_2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_r$$



G est la constante de gravitation, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$

Le **poids** est une expression simplifiée de l'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur une masse m à sa surface :

$$\vec{P} = -G \frac{m M_T}{R_T^2} \vec{u}_r = m \vec{g} \quad \text{d'où} \quad \vec{g} = -G \frac{M_T}{R_T^2} \vec{u}_r$$

\vec{g} est appelé champ de pesanteur (重力), il est dirigé vers le centre de la Terre et $\|\vec{g}\| \simeq 9,81 \text{ m.s}^{-2}$

3.2.2 Force électrostatique - Force de Lorentz

Fluide 流体

Entre de charges (电荷) ponctuelles q_1 et q_2 placées en M_1 et M_2 s'établit une force d'interaction réciproque, c'est la **force d'attraction électrostatique** (静电吸引力) :

$$\vec{f}_{q_1 \rightarrow q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(M_1 M_2)^3} \overrightarrow{M_1 M_2} \quad \text{ou} \quad \vec{f}_{q_1 \rightarrow q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$

ϵ_0 est la permittivité absolue du vide.

Cette force est attractive (吸引力的) si $q_1 q_2 < 0$ (charges de signe opposés) et répulsive (斥力) si $q_1 q_2 > 0$ (charges de même signe)

Une charge q placée dans un champ électrique(电的) \vec{E} et/ou magnétique(磁的) \vec{B} et se déplaçant à la vitesse v est soumise à la **force de Lorentz** :

$$\vec{f}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

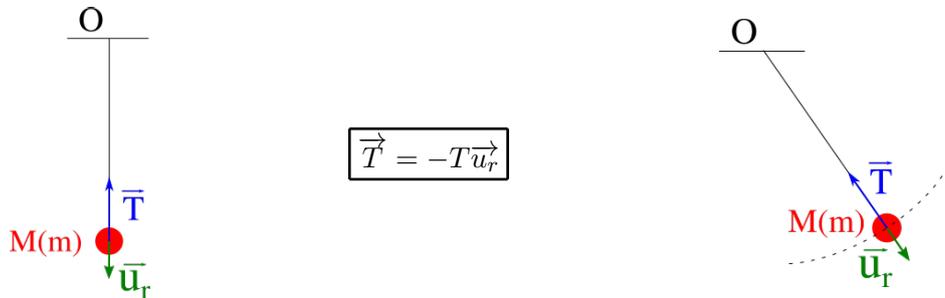
Remarque : Pour une charge immobile, la force de Lorentz se réduit à sa composante électrique $\vec{f} = q\vec{E}$. Cette force n'est autre que la force électrostatique, on en déduit que le champ électrique créé par une charge ponctuelle q' est :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'}{r^2} \vec{u}_r$$

3.3 Forces de contact

3.3.1 Tension d'un fil - Tension d'un ressort

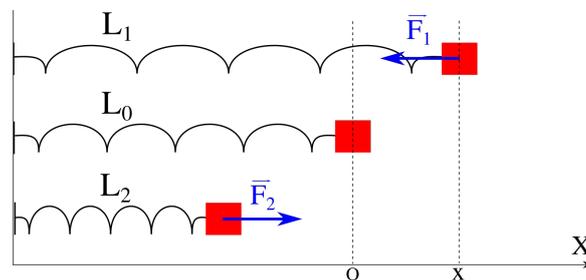
Un fil tendu (拉紧的) exerce sur une masse accrochée à son extrémité une force qui assure le contact fil/masse appelée **tension** (张力). Cette force a pour direction celle du fil tendu, pour sens celui dirigé vers le point d'attache du fil et pour norme une valeur qui s'adapte au autres forces et au mouvement.



La **force de rappel élastique** (弹性恢复力) d'un ressort est proportionnelle à son allongement

$$\vec{F} = -k(l - l_0)\vec{u}_x = -kx\vec{u}_x$$

x est l'allongement du ressort, c'est une grandeur algébrique.



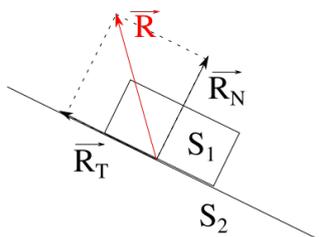
$l_1 > l_0$ soit $x > 0$ donc \vec{F}_1 est selon $-\vec{u}_x$

$l_2 < l_0$ soit $x < 0$ donc \vec{F}_2 est selon \vec{u}_x

3.3.2 Contact entre deux solides

Un solide S_1 posé sur un autre solide S_2 subit toujours une **force de réaction** de S_2 . Cette force de réaction peut se décomposer en deux parties :

$$\vec{R} = \vec{R}_N + \vec{R}_T \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \vec{R}_N & \text{la composante normale,} \\ & \text{elle représente l'impénétrabilité de } S_2 \\ \vec{R}_T & \text{La composante tangentielle,} \\ & \text{elle représente les frottements (摩擦力) de contact} \end{cases}$$



Deux cas de figures sont possibles :

- Les deux solides sont **immobiles** (不动的). Il n'y a pas de glissement, on a alors :

$$\vec{v}_{S_1/S_2} = \vec{0} \quad \text{et} \quad R_T < f_s R_N \quad (f_s \in [0, 1])$$

- S_1 **glisse** (滑动) sur S_2 . On a alors :

$$\|\vec{v}_{S_1/S_2}\| > 0 \quad \text{et} \quad R_T = f_d R_N \quad (f_d \in [0, 1])$$

On a de plus \vec{R}_T qui est dans le sens opposé à celui de \vec{v}_{S_1/S_2} .

Dans la plupart des cas on prend $f_d \simeq f_s \simeq f$

Remarque : La rupture du contact entre les deux solides se traduit par $R_N = 0$.

3.3.3 Action d'un fluide (流体) sur un solide

Poussée d'Archimède : tout corps plongé dans un fluide au repos subit une force verticale opposée au poids du fluide déplacé.

$$\vec{\Pi} = -\rho_{\text{fluide}} V_{\text{deplace}} \vec{g}$$

Cette force est la résultante des forces de pression exercées par le fluide sur la surface du solide

La force de traînée, aussi appelée force de frottement fluide est la force de frottement qui s'oppose à la vitesse relative du mouvement du solide par rapport au fluide.

A faible vitesse : $\vec{F}_t = -\lambda \vec{v}$

A grande vitesse : $\vec{F}_t = -\lambda' \|\vec{v}\| \vec{v}$

En réalité ce n'est pas seulement la vitesse relative qui intervient mais aussi la viscosité (粘度) du fluide ou les dimensions de l'objet. Pour choisir entre l'une ou l'autre des deux expressions on utilise le nombre adimensionné de Reynolds (cf cours de 3ème année).

En pratique on utilisera presque tout le temps la force à faible vitesse.