

3. Postulats de la Dynamique

En vertu du principe de causalité, du passé et des lois de la physique, l'on peut déterminer l'état mécanique d'un système matériel à tout instant (\Leftrightarrow Déterminisme.)

Comment étudier le
mouvement d'un système
matériel en interaction avec
son environnement?

Sommaire

LOIS DE NEWTON

INTERACTIONS FONDAMENTALES

- COMPLEMENTS SUR LES CHAMPS DE FORCE
- Poids
- Force électrique

MARCHE A SUIVRE POUR LES EQUATIONS HORAIRES

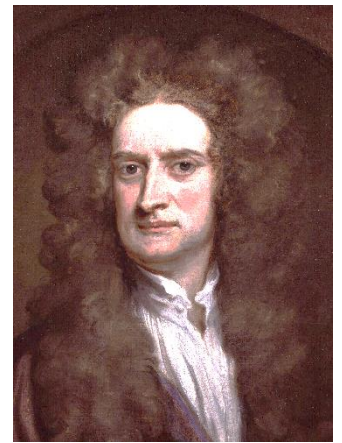
INTERACTIONS PHÉNOMÉNOLOGIQUES

- Fils et poulies
- Force de contact solide-solide
- Force de contact avec un fluide
- Force de rappel - ressort

Remarques sur les lois de Newton

I. Lois de Newton

Wikipedia



Isaac Newton
(1642-1727)

1. Isaac Newton (1642-1727)

- *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1686)*
- *Unification de la mécanique terrestre et céleste...*

Il est impératif de lire un résumé de sa biographie

2. *Qu'est-ce qu'un point matériel?*

Première étape conceptuelle:

Un système mécanique sera assimilé à un **point matériel** si son état (position, mouvement) **est complètement décrit à l'aide de trois coordonnées spatiales** au maximum.

Un point matériel **se caractérise** par une propriété dynamique : la **masse inerte** notée **m** mesurant l'inertie du mouvement. (Scalaire positif, dimension M, unité S.I. kg.)



Emilie du Châtelet
Physicienne française
Traductrice de Newton
1706 - 1749

Remarques

L'approche qui consiste à confondre un solide en un système de points matériels et une approche « réductionniste » qui simplifie les systèmes et les interactions:

- {système} → Σ points matériels
- Interactions → Forces

Il existe une échelle d'étude à partir de laquelle, la connaissance des lois de description du mouvements des points permet la description du système.

(Mécanique céleste, des solides, des fluides, électromagnétisme... pas Thermodynamique macroscopique, ni en physique quantique...)

3. Qu'est-ce qu'une Force? Cas de votre chaise...

On dit qu'un système est en interaction avec un autre s'il subit des actions mécaniques (forces et ou ~~moments~~) de la part de l'autre système.

Si la résultante des forces est non nulle, le système peut:

- Être déformé,
- Subir une modification de sa vitesse et ou de sa trajectoire (Être accéléré).

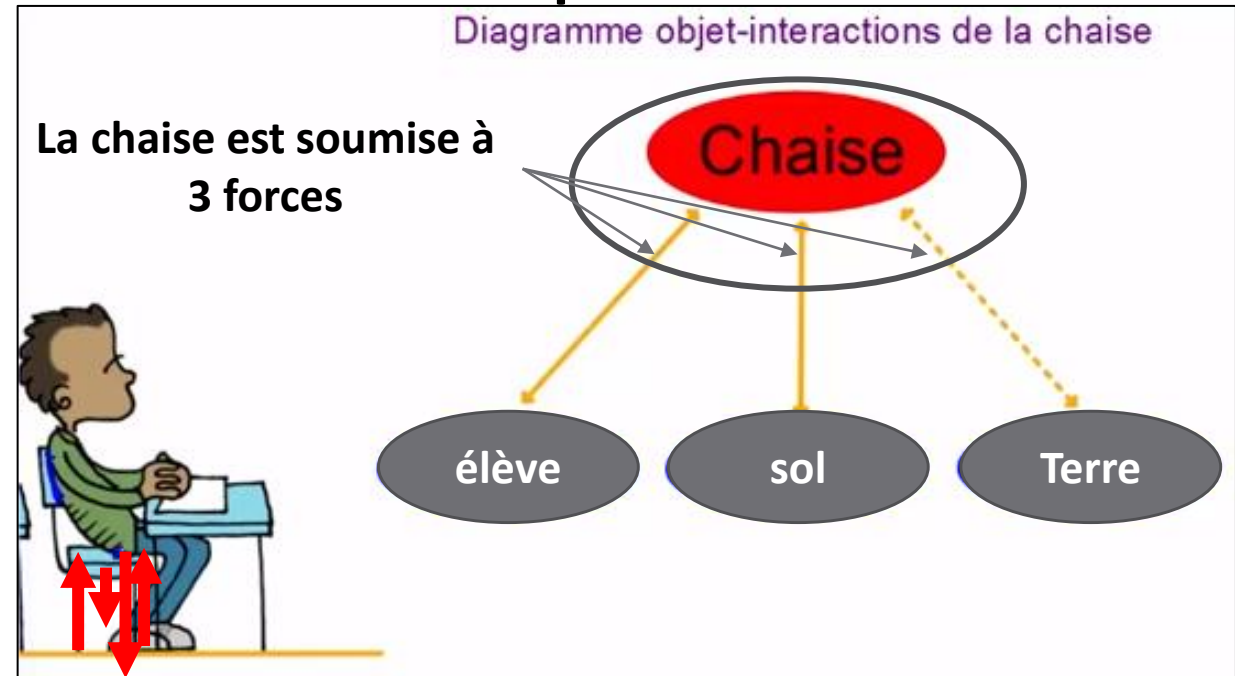


Une force est modélisée par un vecteur et se caractérise par:

- Le **point d'application** de la force ou de la résultante,
- La **direction** appelée **droite d'action**,
- Le **sens** de poussée,
- Une **norme**, mesurée en newton N, $[F] = \text{MLT}^{-2}$.

Une force peut être:

- De contact ou à distance,
- Ponctuelle ou répartie.

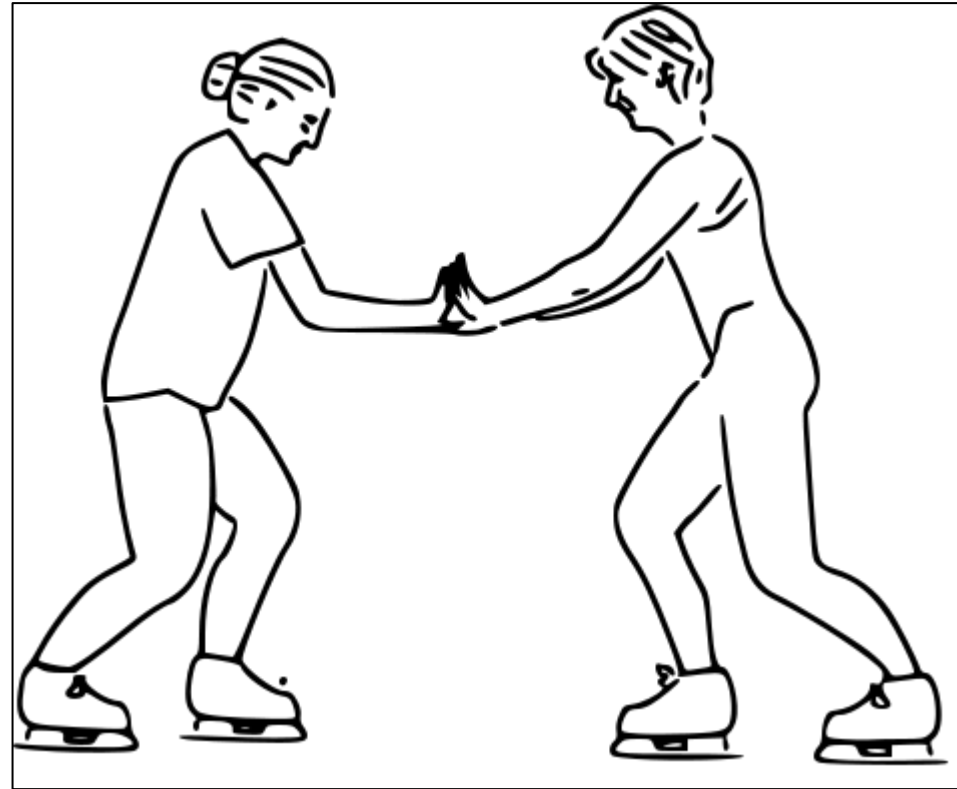


4.3^{ième} LOI : PRINCIPE DES ACTIONS RECIPROQUES

A
Savoir

Si un système A exerce une force sur un système B alors ce dernier exerce sur A une **force de même direction, de sens opposé et de même valeur.**

$$\overrightarrow{F_{A/B}} = -\overrightarrow{F_{B/A}}$$



Aimants

5. Quantité de mouvement d'un système (FACULTATIF)

- Pour un point matériel M de masse m: $\vec{p} = m\vec{v}_M$

- Pour un système de points matériels M:

$$\vec{p} = \sum_i m_i \vec{v}_i = \sum_i \vec{p}_i = \mathbf{M} \vec{v}_G$$

- Où $\mathbf{M} = \sum_i m_i$ est la masse totale du système,

- \vec{v}_G est la vitesse du centre de gravité.

- Dimension : $[p] = \text{MLT}^{-1}$

- Très utile pour l'étude des collisions

- En anglais, quantité de mouvement = momentum



6.1ère Loi : PRINCIPE D'INERTIE



Dans un **référentiel galiléen**, un point matériel **M** **isolé** (libre de toute influence extérieure) ou pseudo-isolé **conserve sa quantité de mouvement (c'est l'inertie)**. En conséquence, soit sa trajectoire est rectiligne uniforme (**m.r.u.** : $\vec{v}_M = \vec{Cste}$), soit il est et reste au repos.



Boite d'allumette

Remarques:

- En fait, cette loi définit ce qu'est un référentiel Galiléen,
- Pour un système : la quantité de mouvement totale se conserve : $\sum_i \vec{p}_i = \vec{Cste}$,
(→ utile pour étudier les chocs)
- Les systèmes isolé ou pseudo-isolé sont équivalents.

7. 2^{ième} LOI : PFD & TCI



• PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE – PFD

Dans un référentiel galiléen, un point matériel M soumis à une force \vec{f} voit sa quantité de mouvement varier d'autant plus vite que la force est importante.

L'équation du mouvement est donnée par : $\frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}_M = \vec{f}$ ou encore $\vec{a}_M = \frac{\vec{f}}{m}$

• Extension du PFD aux systèmes de plusieurs points matériels : THEOREME DU CENTRE D'INERTIE – TCI

Dans un référentiel galiléen, le centre d'inertie d'un système matériel S de masse m vérifie l'équation:

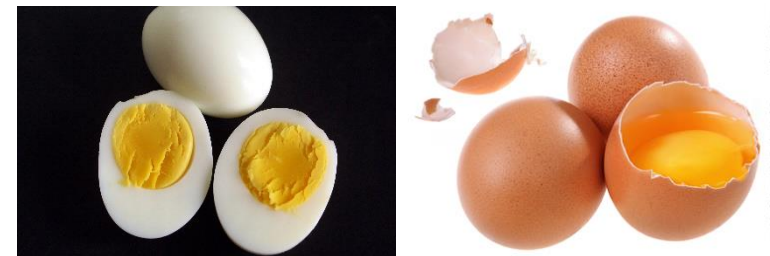
$$\frac{d\vec{p}_S}{dt} = m\vec{a}_G = \vec{F}_{ext}$$

où \vec{F}_{ext} désigne la résultante des forces extérieures.

Ainsi, le centre d'inertie d'un système a le même mouvement qu'un point matériel de masse m soumis à la force \vec{F}_{ext} .

Remarques sur la 2^{ème} loi

- ❑ **Du point de vue physique, les référentiels ne se valent pas tous.** Dans les référentiels galiléens, le PFD est vrai alors que dans les référentiels accélérés, il faut ajouter des forces en plus.
- ❑ Le TCI **implique** que le mouvement du centre d'inertie est lié aux Actions Extérieures,
- ❑ **MAIS** TCI n'implique pas que Système **se comporte comme** centre d'inertie G. L'évolution du système peut dépendre de sa structure interne.



Œuf cuit ou cru?

4. Quelques interactions entre les systèmes physiques

Etudes de systèmes simples dans un référentiel galiléen

II. LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

1. Généralités

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'étude de la matière depuis l'échelle subatomique jusqu'à l'échelle cosmique permet de postuler l'existence de **seulement 4 interactions fondamentales permettant d'expliquer tous les phénomènes de la Nature.**

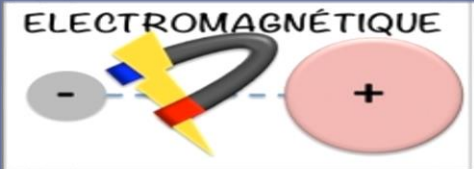
Ces interactions se caractérisent par des intensités et des échelles d'action très différentes.

Soit **F** la force exercée par un proton sur un autre distants de 5×10^{-15} m



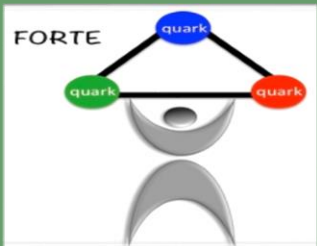
Si elle est GRAVITATIONNELLE

- **Attractive**, de **portée infinie**. Objet ayant une **masse grave**. $F \sim 10^{-37}$ N
- Mécanique classique (1687) ; Relativité générale (1917).



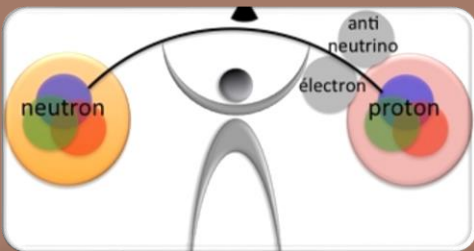
Si elle est ELECTROMAGNETIQUE

- **Attractive ou répulsive**, de **portée infinie**. Objet ayant une **charge électrique**. $F \sim 10$ N
- Électromagnétisme classique (1865) ; Électrodynamique quantique (1949).



S'il s'agit de l'INTERACTION FORTE

- Interaction attractive de **très courte portée entre quarks**. Notion de « **couleur** ». $F \sim 10^3$ N
- Chromodynamique quantique (1970).



S'il s'agit de l'INTERACTION FAIBLE ou TRANSMUTATION (radioactivité)

- De très courte portée **entre quarks et leptons**, .Notion de « **saveur** » $F \sim 10^{-2}$ N.
- Théorie électrofaible (1961-1967).

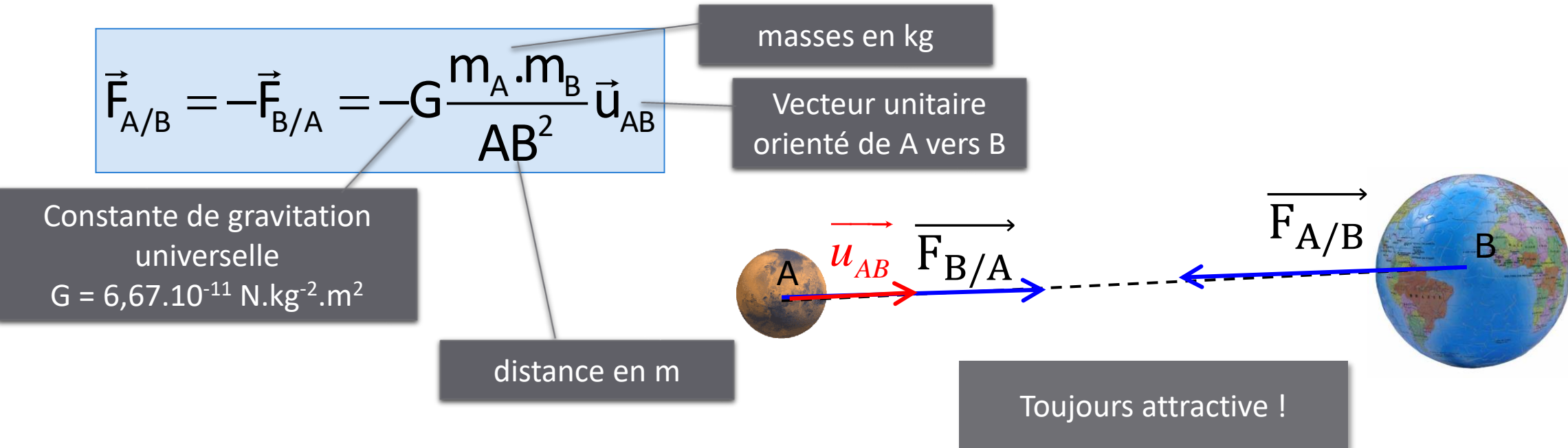


2. Forces dites « Newtoniennes »

□ Forme générale

Forces centrales de la forme : $\vec{F} = \frac{k}{r^2} \vec{u}_r$

□ Entre les masses : force gravitationnelle : $k = -Gm_A m_B$





- Entre les charges : force de Coulomb : $k = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0}$

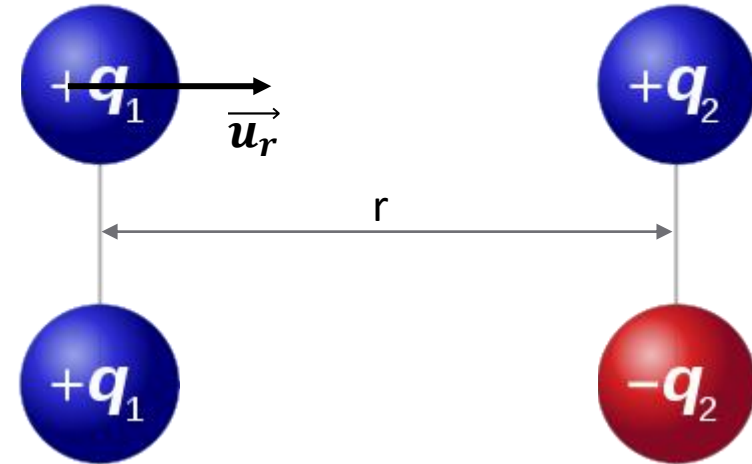
$$\vec{F}_{1/2} = -\vec{F}_{2/1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$

Avec la permittivité diélectrique du vide,

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$$

$$\text{Et } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sim 9 \cdot 10^9 \text{ .S.I.}$$

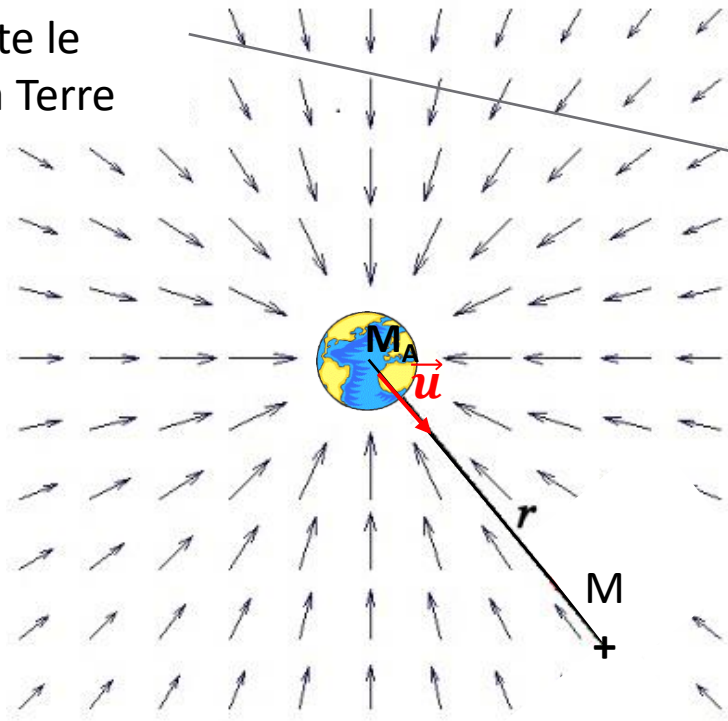
Charges de même signe → interaction répulsive



Charges des signes opposés → interaction attractive

COMPLEMENTS : CHAMP GRAVITATIONNEL ET CHAMP DE PESANTEUR

En enlevant la masse m soumise à \vec{F} il reste le champ créé par la Terre



Nous savons que la force gravitationnelle exercée par la masse M_A (placée en O) sur la masse m placée en M à une distance r vaut :

$$-G \frac{M_A}{r^2} \vec{u}$$

Masse de l'attracteur (kg)

A chaque point de l'espace, le corps de masse M affecte un **champ gravitationnel** \vec{g} tel que :

$$\vec{g} = -G \frac{M_A}{r^2} \vec{u}$$

Vecteur champ gravitationnel (N.kg⁻¹)

Vecteur unitaire radial

Distance OM (m)

La force gravitationnelle agissante sur m s'écrit alors:

$$\vec{F} = m \times \vec{g}$$

Cela ne vous rappelle rien ?...

On peut avoir exactement la même approche avec les charges et les champs

Champs

Champs & Forces

Passage du champ de gravitation au champ de pesanteur

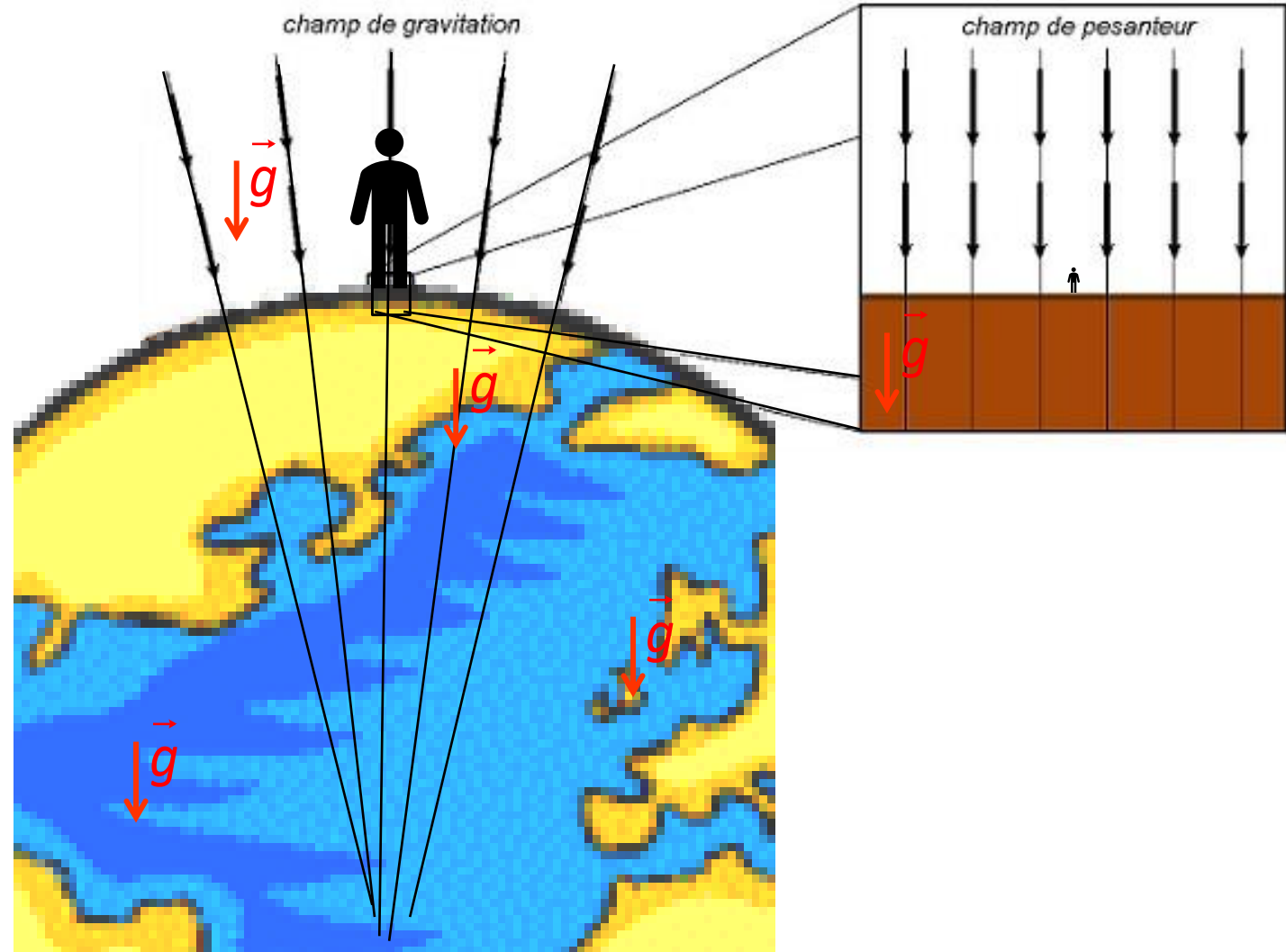
Faites le calcul du champ de gravitation à la surface de la Terre

- $g = G \frac{M}{r^2}$
- $G = 6,67 \times 10^{-11}$ S.I.
- $M_T = 6,0 \times 10^{24}$ kg
- $R_T = 6\,340$ km

Vous devez trouver : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.

Par ailleurs, à notre échelle humaine, deux lignes verticales passant dans le centre de la Terre et distantes de quelques km à la surface sont quasiment parallèles. (Angle de 1° à 111 km de distance).

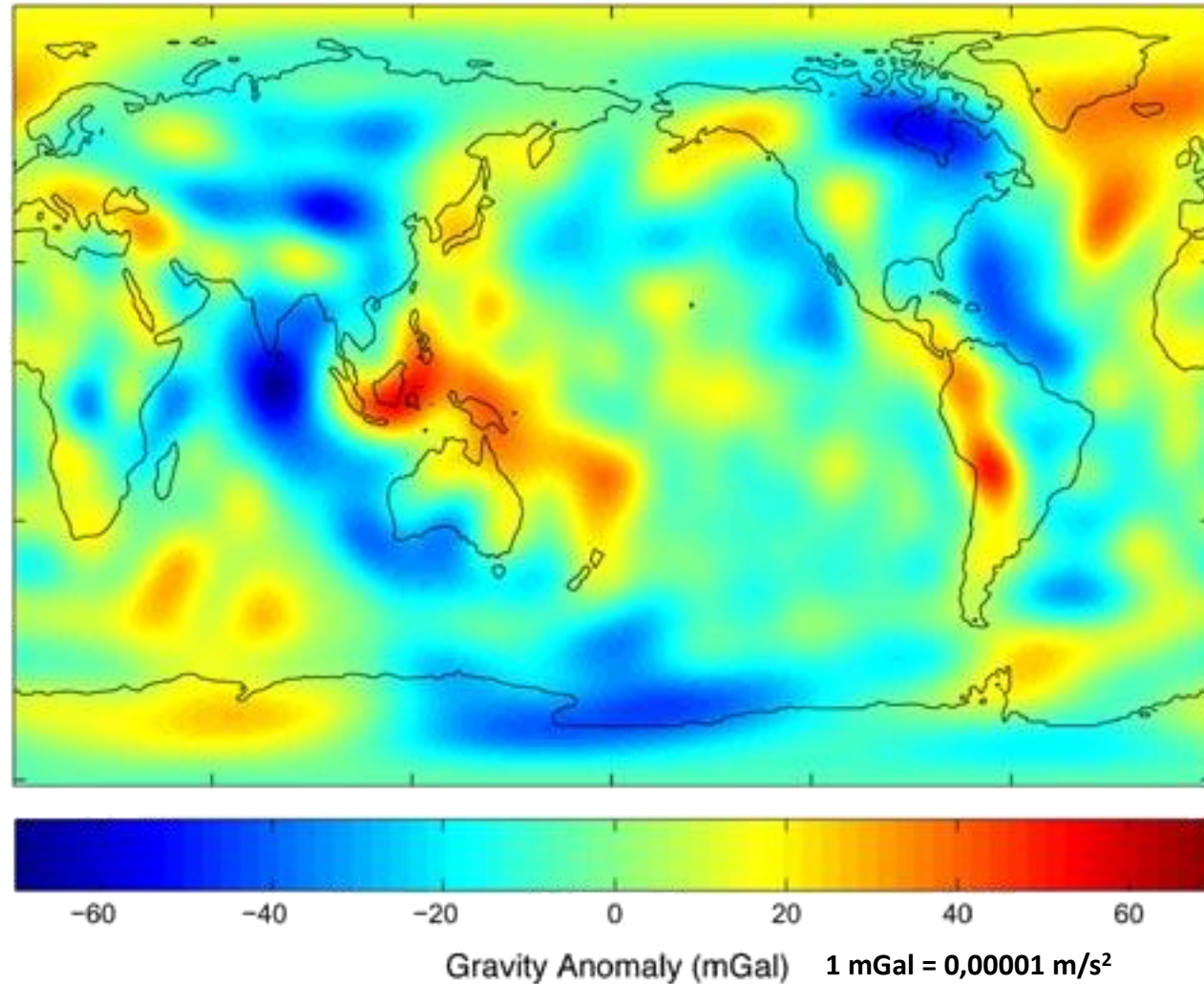
Enfin, l'intensité de la pesanteur est constante tant que la différence d'altitude ne dépasse pas quelques kilomètres (diminution de 1% à 30 km d'altitude).



La Terre crée localement à sa surface un champ de pesanteur uniforme \vec{g} , vertical vers le bas et de norme $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.



Remarque : l'uniformité du champ de pesanteur à la surface de la Terre est une approximation. g varie avec –entre autres- l'altitude et la latitude et la nature des couches géologiques. On peut le mesurer avec un gravimètre (*à regarder ce que c'est comme appareil et comment il fonctionne.*)

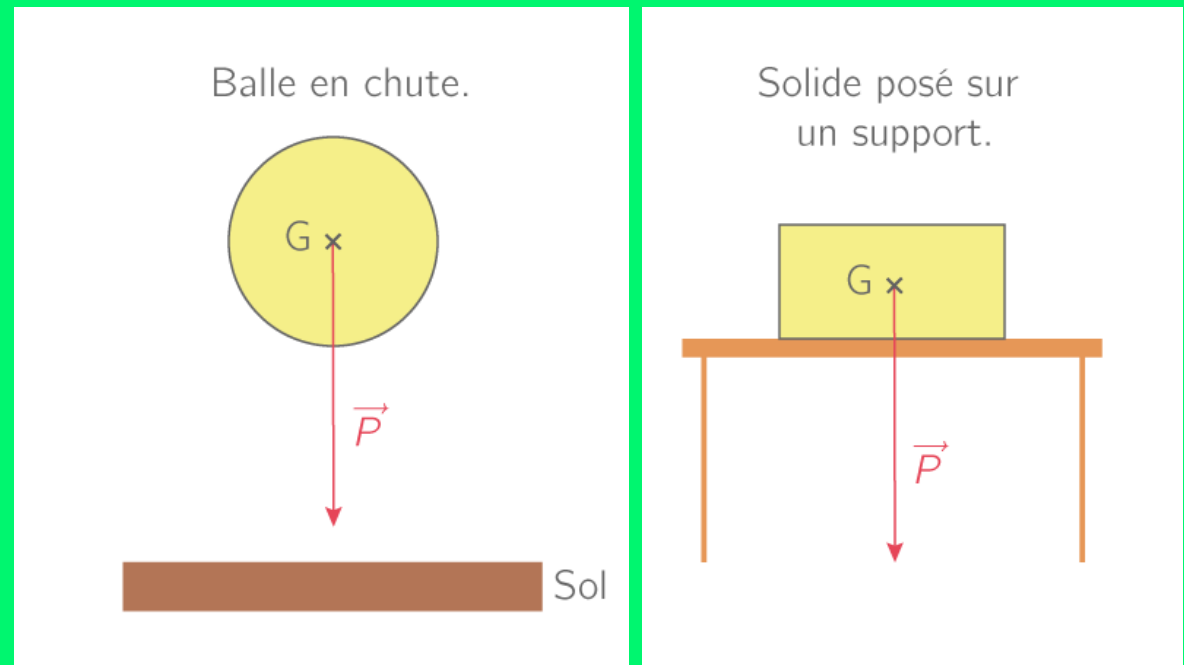


3. Masse dans le champ de pesanteur



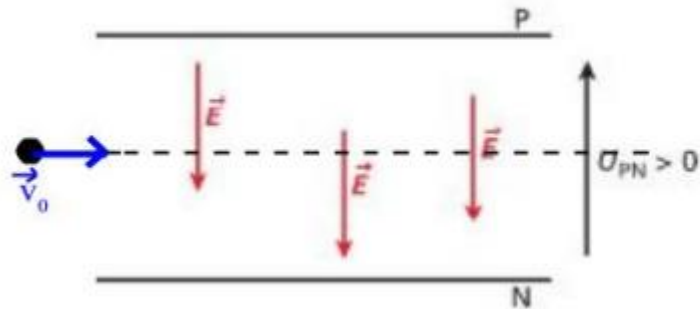
Dans le champ de pesanteur, l'action gravitationnelle d'une planète sur une masse à sa surface se modélise par une force appelée le poids \vec{P} :

- S'appliquant au centre de gravité G
- Vertical vers le bas
- De norme : $P = m \times g$ (en N dans S.I.)
où m est la masse du corps (en kg)
et g est la norme du champ de pesanteur de la planète à sa surface
($g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ sur Terre)

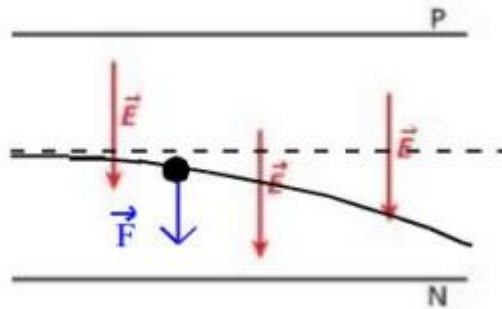


4. Particule chargée dans un champ uniforme

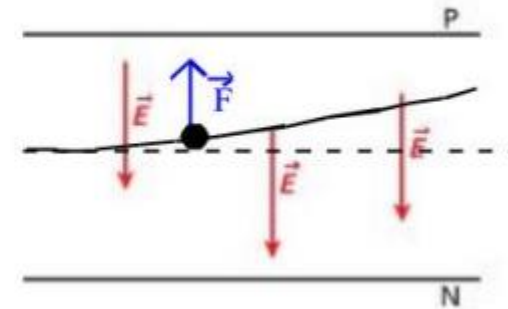
Particule à l'entrée



particule chargée positivement



particule chargée négativement



A
Savoir

Une particule de charge q placée dans un champ électrique subit une force électrique $\vec{F} = q \times \vec{E}$

- S'appliquant en son centre d'inertie
- Dirigée par le champ \vec{E}
- Orientée dans le sens de $q \times \vec{E}$ (dépend du signe de q)
- De norme $F = |q|E$ avec q en Coulomb (C) et E en $V.m^{-1}$

Quelle démarche pour obtenir les équation horaires du mvt ?



1. Identifier le système
2. Choisir un référentiel puis un système de repérage adapté (identifier les Cond° Initiales)
3. Identifier les forces qui s'appliquent au système (connaitre leurs particularités)
4. Décomposer les forces sur les axes du repère
5. Appliquer le PFD
6. Etablir les équations pour chaque composante de l'accélération
7. Chercher les composantes de la vitesse par intégration
8. Déterminer les constantes d'intégration à l'aide des conditions initiales
9. Chercher les composantes de la position par intégration
10. Déterminer les constantes d'intégration à l'aide des conditions initiales
11. Etablir l'équation de la trajectoire

III. INTERACTIONS PHENOMENOLOGIQUES

Ces interactions apparaissent lors du contact entre deux systèmes matériels et ne sont pas décrites à partir des lois fondamentales mais par des paramètres expérimentaux et ou des contraintes expérimentales ce sont des lois de comportement.

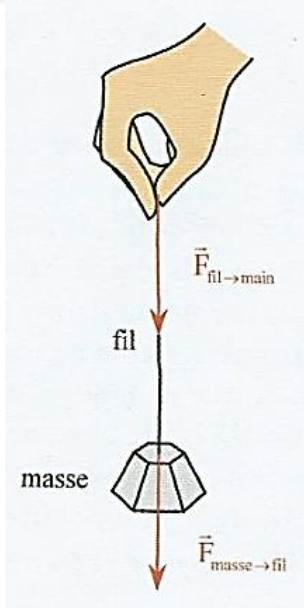
- Fils tendus et poulie
 - Tension d'un fil inextensible
 - Présence d'une poulie
- Contact solide-solide
 - Réaction normale
 - Frottements solide-solide
- Contact solide-Fluide
 - Poussée d'Archimède
 - Forces de frottement fluides
- Forces de rappel

1. Fils et poulies

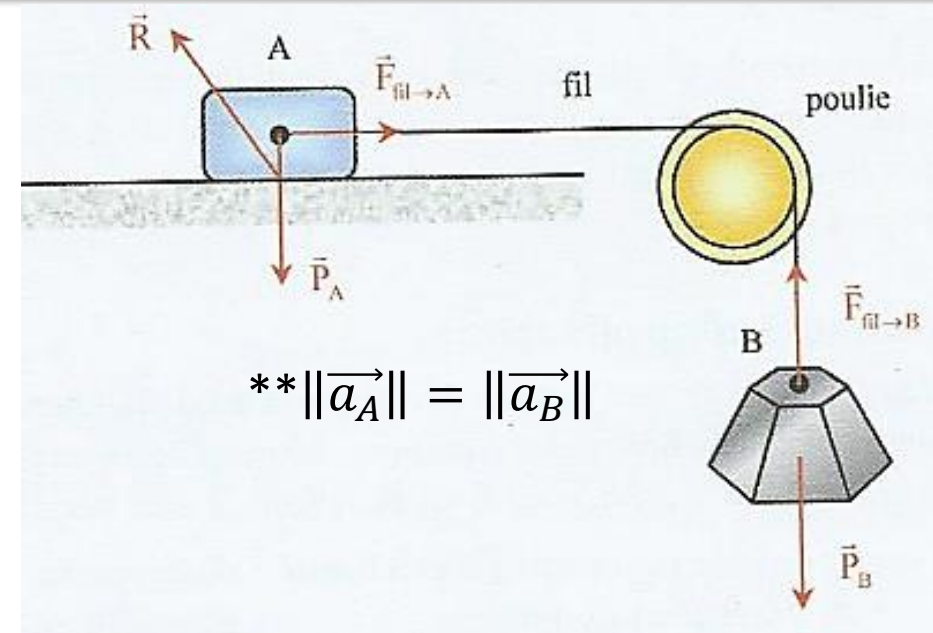
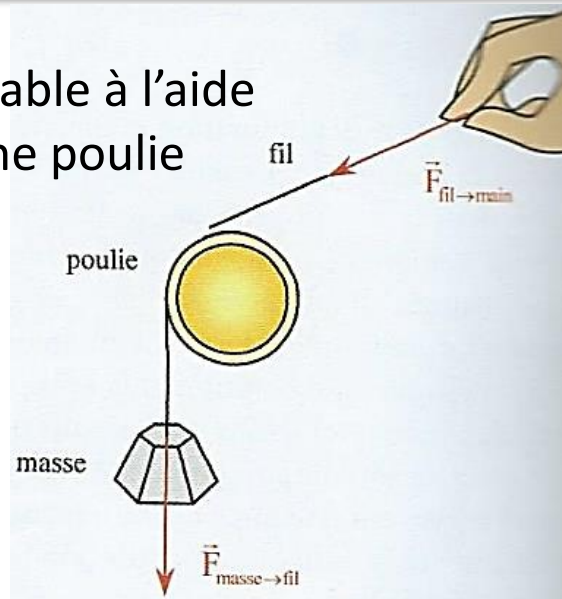


La tension exercée par un fil n'a pas d'expression propre! On considérera les fils de masse négligeable et inextensibles. Un fil se détend lorsque sa tension s'annule.

- **UN FIL TENDU :**
 - **transmet le module** de la tension ($\|\vec{F}_{\text{masse} \rightarrow \text{fil}}\| = \|\vec{F}_{\text{fil} \rightarrow \text{main}}\|$)
 - la direction de la tension est donnée par **la direction du fil***
 - la tension est **orientée vers le fil**.
- **Chaque point du fil se déplace avec le même module de vitesse et d'accélération**.**



*modifiable à l'aide
d'une poulie



2. COMMENT MODÉLISER LES Contacts solide-solide?

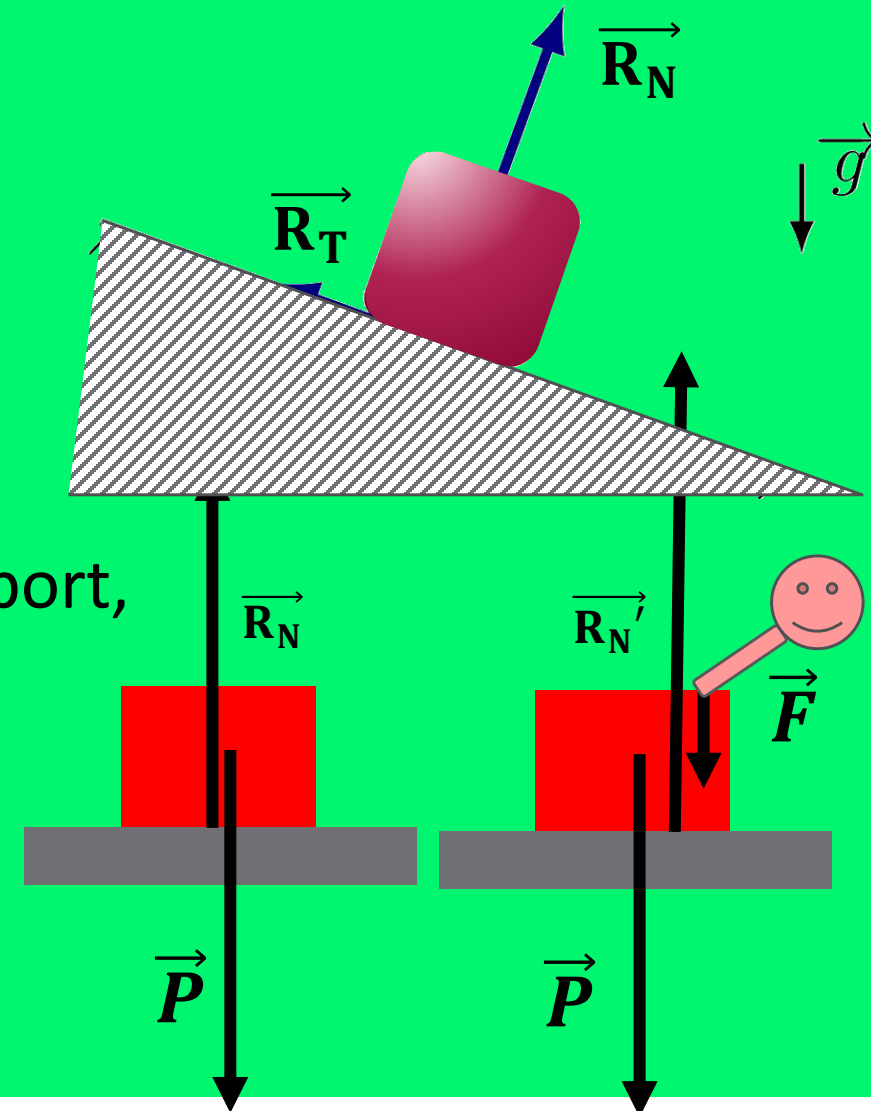


Le contact entre deux solides s'interprète avec deux forces :

- une **force normale** au support \vec{R}_N ,
- une **force tangentielle** au support \vec{R}_T , dite ***force de frottement solide*** qui s'oppose au glissement.

Concernant la **force normale** \vec{R}_N :

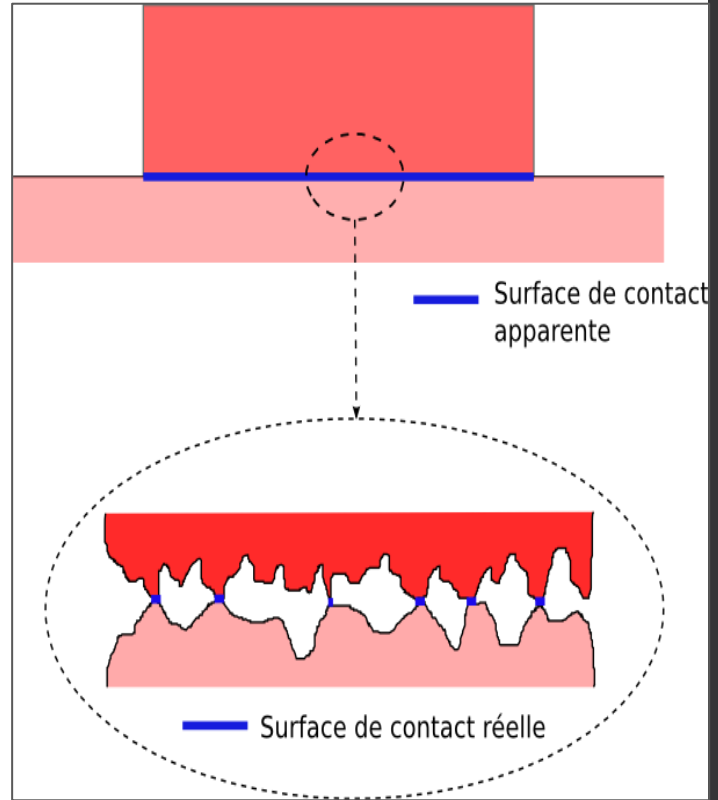
- Elle dépend du type de liaisons avec le support,
- Elle n'a pas d'expression propre!
- Elle ajoute une inconnue dans l'étude physique, mais entraîne une contrainte cinématique (pas de mouvement dans certaines directions).





- Concernant la **force tangentielle** \vec{R}_T , elle vérifie les **lois empiriques de Coulomb***:
 - Si le **solide ne glisse pas** : $R_T \leq \mu_s R_N$,
où μ_s est coefficient de frottement **statique**,
 - Si le **solide glisse** : $R_T = \mu_D R_N$,
où μ_D est coefficient de frottement **dynamique**.
- Les **coefficients de frottements** sont des **grandeurs expérimentales** qui **dépendent des matériaux et de leurs surfaces**

Vidéo



Représentation de l'interface entre les deux solides au niveau mésoscopique
Lors du glissement les contacts sont moins nombreux et $\mu_D < \mu_s$.

Interfaces	acier/acier	acier/téflon	pneu/route	bois/bois
μ_s	0,18	0,04	~0,8	0,65

* Et de Guillaume Amontons (1663-1705)

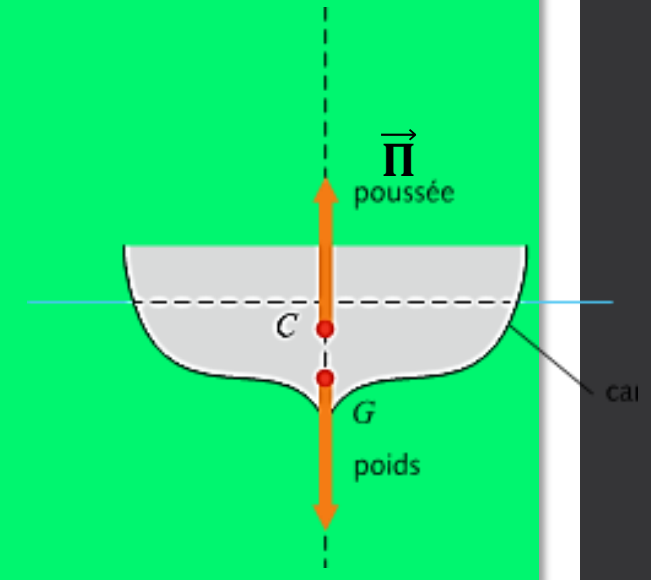
3. Forces avec un fluide

❑ Au repos, la pression du fluide engendre la **Poussée d'Archimède**

Tout corps immergé dans un fluide subit une **poussée verticale, vers le haut, égale au poids du volume de fluide déplacé.**

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

- ρ_{fluide} est la masse volumique du fluide,
- V_{corps} est le volume immergé,
- \vec{g} est le champ de pesanteur.



Le point d'application de cette force est le **centre de poussée C** ; il est différent, en général, du centre de gravité.

A comparer au poids pour savoir si elle est négligeable, comparable ou prépondérante (dans l'air, dans l'eau ou pour une montgolfière).



❑ En mouvement dans un fluide

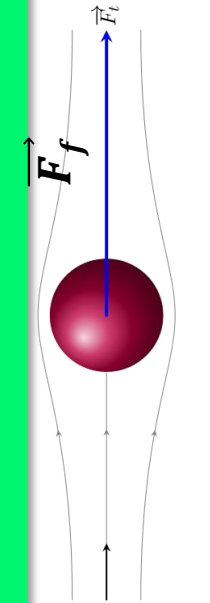
1. Un solide en mouvement dans un fluide subit une **Force de frottement opposée à la vitesse**,

- **Régime lent**, la force est du type : $\vec{F}_f = -k\vec{v}$
- **Régime rapide**, la force est du type : $\vec{F}_f = -kv^2\vec{u}_v$ (\vec{u}_v vecteur unitaire selon la vitesse \vec{v})

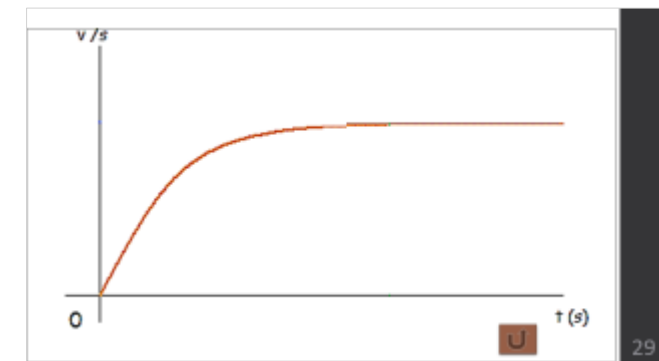
Le coefficient **k** dépend de la façon dont le fluide s'écoule sur le solide, de la géométrie (profil aérodynamique), de la **viscosité** ...

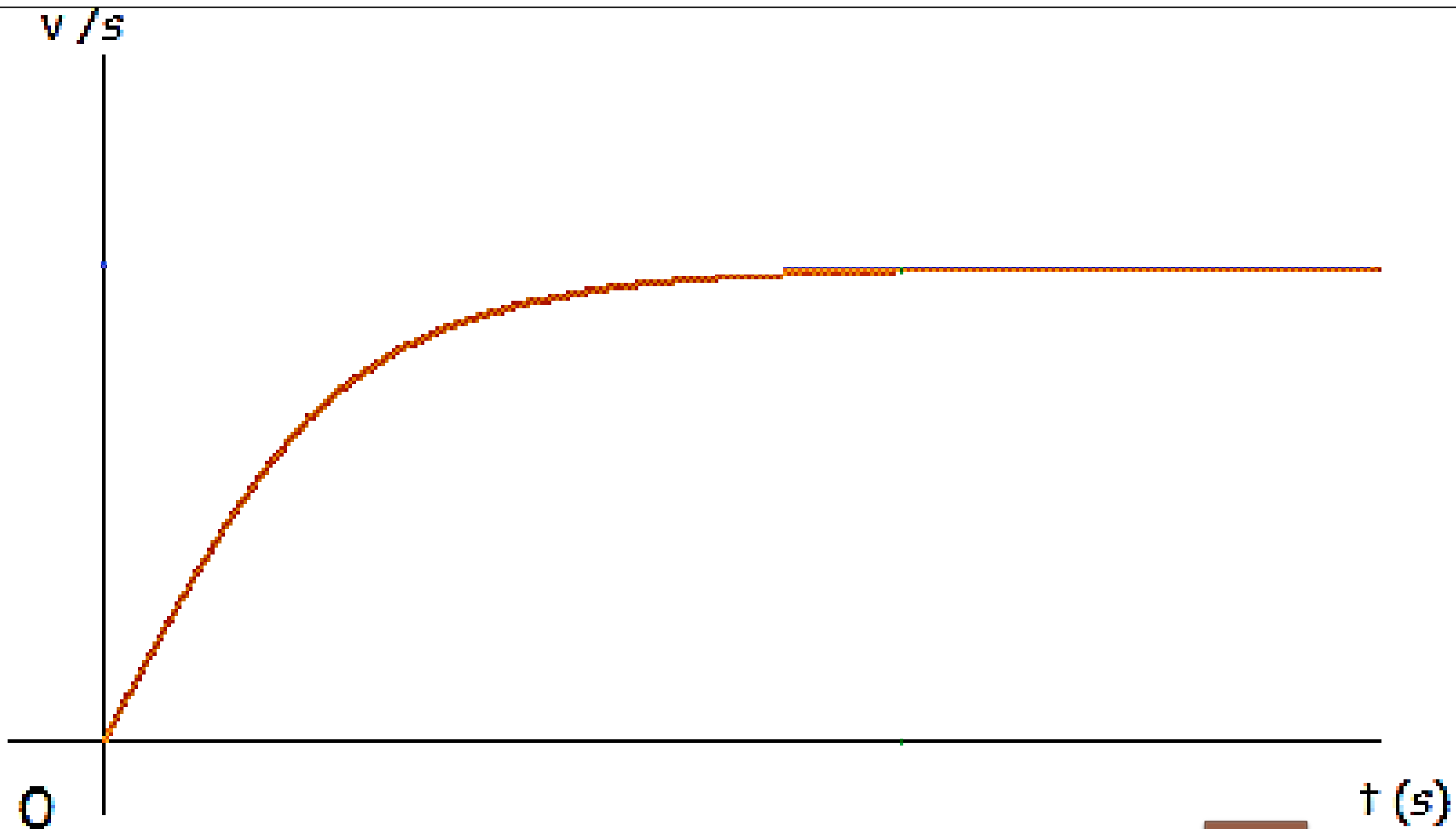
2. **L'équation différentielle 1D** (selon z) à laquelle le PFD conduit **pour la vitesse est de la forme**:

- En régime lent : $\frac{dv_z}{dt} + Av_z = B$
- En régime rapide : $\frac{dv_z}{dt} + Av_z^2 = B$ où $[A] = T^{-1}$ et $[B] = L.T^{-2}$



La présence d'une force qui augmente avec la vitesse (ou son carré) conduit à un **régime permanent** d'accélération nulle à vitesse constante après un **régime transitoire**.







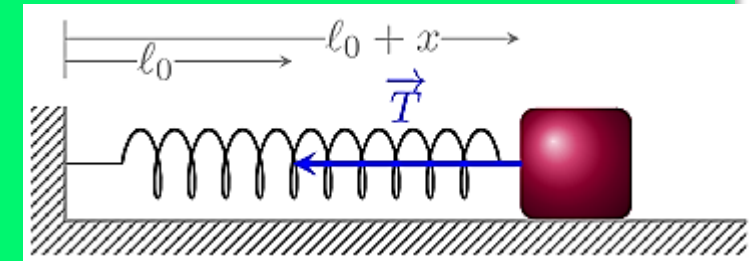
4. Force de rappel ou Tension d'un ressort

1. Dans le cas où l'on étire ou comprime un système élastique, celui-ci exerce une **force de rappel** ou tension \vec{T} sur la masse m , **proportionnelle** et **opposée** à l'allongement :

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

Où k est la **constante de raideur**, en N.m^{-1} .

l_0 est la longueur au repos du ressort, l la longueur étiré ou comprimé.



2. L'équation 1D à laquelle le PFD conduit est de la forme :

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad \text{ou encore} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (pulsation propre en rad.s}^{-1}\text{)}$$

Loi de Hooke

Oscillateur
Horizontal

L'équation horaire est de la forme : $x(t) = A.\cos(\omega_0 t + \varphi)$ où A et φ sont déterminées par les conditions sur x et v_x .

Ce système physique est modélisé par le **modèle de l'oscillateur harmonique**. Il est l'un des plus riches de la mécanique.

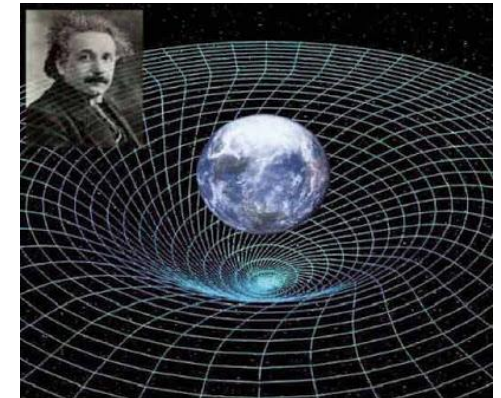
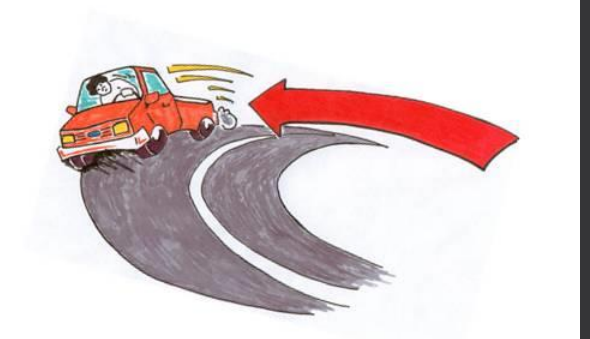
Remarques sur le Principe d'Inertie

Les **référentiels accélérés** (voiture qui démarre ou freine, manège, ...) NE sont **PAS galiléens**.

Ils nécessitent de faire appel à **des forces en plus** pour permettre la description du mouvement d'un point (force centrifuge, de Coriolis, etc.)

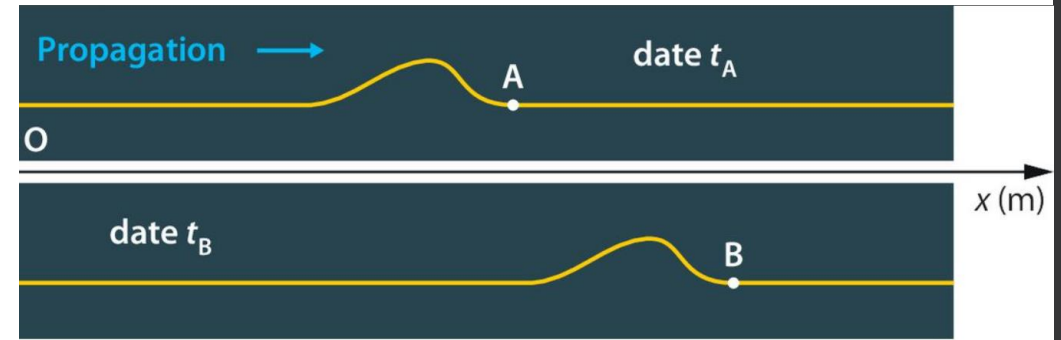
On parle de **mécanique en référentiel non galiléen**...

Einstein remarquera que les référentiels en chute libre sont particuliers du point de vue de l'inertie et cela le conduira à changer le rôle de la gravitation dans la description de notre monde physique...



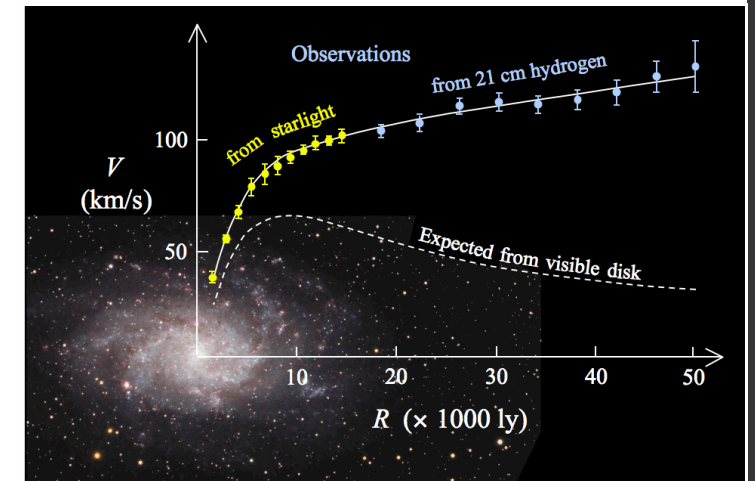
Remarques sur la loi des actions réciproques

Ce principe considère les interactions comme instantanées, ce qui est faux pour les interactions à distance notamment dans le cas où les vitesses sont élevées.



Remarque sur la loi de gravitation universelle

Cette loi de Newton ne permet pas de rendre compte de certaines caractéristiques des galaxies composées de matière « classique ». Cela a donné lieu à l'idée qu'il existerait de la matière noire ou encore certains pensent que pour les faibles accélérations, la force de gravitation est légèrement différente ... (voir théorie MOND).



Sur ce schéma, est représentée en pointillés la courbe des vitesses de rotation des étoiles dans une galaxie déduite de la répartition de ces étoiles dans le disque. Les observations ne valident pas cette déduction