B. Lois de la quantité de mouvement

Introduction : vers une description causale du mouvement :

La cinématique a pour objet de décrire les mouvements, sans se préoccuper des raisons pour lesquelles le mobile évolue. La dynamique vise à relier le mouvement à ses causes.

Les grandeurs construites pour la description cinématique du mouvement : position, vitesse, accélération, vont s'avérer insuffisantes pour en expliciter les causes.

Notre expérience sensible nous conduit à constater la nécessité d'actions mécaniques pour modifier la vitesse d'un mobile : c'est en exerçant un effort que l'on lance un ballon, c'est aussi par un effort que l'on le stoppe.
Nous constatons aussi qu'il est plus difficile de communiquer une certaine vitesse à une boule de pétanque qu'à une balle de ping-pong (et de même pour l'intercepter !).

Il faut donc, en plus des grandeurs cinématiques, introduire :
- des grandeurs traduisant les actions exercées : ce seront les **vecteurs-forces**,
- une grandeur traduisant le répugnance du mobile à toute modification de son mouvement, c'est à dire une grandeur caractéristique de son inertie : ce sera la **masse d'inertie*** du mobile.

La grandeur traduisant le mouvement d'un mobile du point de vue dynamique doit mettre en jeu à la fois :
- le vecteur-vitesse $\vec{v}$ du mobile dans le référentiel d'étude,
- sa masse d'inertie m.

On définit alors sa **quantité de mouvement**, ou **impulsion**, dans le référentiel d'étude par le vecteur :

$$\vec{p} = m.\vec{v}$$

Les variations de cette quantité de mouvement seront liées à l'existence de forces agissant sur le mobile (voir deuxième loi de Newton).

** La masse gravitationnelle est la quantité intervenant dans l'expression des interactions gravitationnelles (poids :* $\vec{P} = m\,\vec{g}$*, interactions entre deux masses* $\vec{F} = \frac{-GMm}{r^2}\vec{e_r}$*; où G est la constante universelle de gravitation G = 6,67.10*$^{-11}$*usi).*

Pour un objet donné, sa masse gravitationnelle et sa masse d'inertie ont même valeur, mais recouvrent des concepts différents. Nous reviendrons ultérieurement sur ces notions.

1. Quantité de mouvement pour un système de points, modèle du point matériel.

Un système de deux points matériels est un ensemble de deux objets physiques, dont chacun est assimilable à un point matériel.

On note A_i la position de chacun des points, m_i leur masse respectives (i = 1 ou 2). Un système de n points sera noté $\{(A_i, m_i)\}$.

Un solide peut se décomposer en une infinité d'éléments de volume $d\tau$ centrés en des points A, chacun portant une masse $dm = \rho(A)d\tau$. On pourra donc généraliser les résultats qui vont être présentés sur le cas de systèmes de points affectés d'une masse au cas des solides.

La masse totale M_{tot} s'exprimera donc par : $M_{tot} = m_1 + m_2$ ou : $M_{tot} = \sum_i m_i$

<u>1.1 Centre d'inertie d'un système :</u>

C'est le barycentre G du système $\{(A_1, m_1) ; (A_2, m_2)\}$. Le point G est positionné par rapport à un point O quelconque par la relation :

$$\boxed{\overrightarrow{OG} = \frac{m_1\overrightarrow{OA_1} + m_2\overrightarrow{OA_2}}{M_{tot}}}$$

D'où en faisant O = G : $m_1\overrightarrow{GA_1} + m_2\overrightarrow{GA_2} = \vec{0}$

Soit en généralisant : $\overrightarrow{OG} = \frac{\sum_i m_i\overrightarrow{OA_i}}{M_{tot}}$ donc $\sum_i m_i\overrightarrow{GA_i} = \vec{0}$

On pourra projeter ces relations vectorielles pour calculer la position de G.

Des considérations de symétrie permettent de notablement simplifier la détermination du centre d'inertie : G appartient aux éléments de symétrie du système (plan, axe ou centre de symétrie).
Cette propriété, très intuitive, sera particulièrement utile pour déterminer sans calculs la position du centre d'inertie d'un objet pour lequel la masse est uniformément répartie en volume.

exemple : le centre d'inertie d'une sphère homogène est évidemment situé au centre de cette sphère, celui d'un objet cylindrique homogène se trouvera sur son axe, au milieu etc.

Un système de solides sera décomposable en différentes parties, de masses totales m_i, dont on pourra déterminer les barycentres G_i .

Le barycentre G de l'ensemble est alors celui du système $\{(G_i, m_i)\}$.

Exemples : système Terre-Lune ; massue de jonglage ...

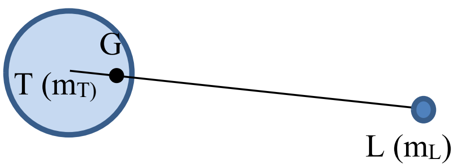
Evaluons par exemple la position de centre d'inertie du système Terre Lune.

Données : Terre T, de masse $5{,}97.10^{24}$ kg ; Lune L, de masse $7{,}35.10^{22}$ kg.

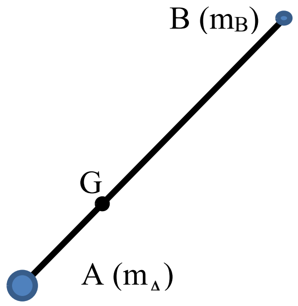
Distance Terre-Lune : TL = 384.000 km = $3{,}84.10^{8}$ m.

En faisant O = T dans la première définition de G, on tire : $TG = m_L.TL/(m_T + m_L)$
soit numériquement : TG = $4{,}67.10^{6}$ m = 4670 km.

Pour comparaison, le rayon terrestre est de 6370 km.



Une massue de jonglage est un objet dont la forme est asymétrique.
Un calcul exact de la position G de son centre de gravité ne serait pas simple, mais la présence d'un axe de révolution de cet objet impose que le centre de gravité soit situé sur cet axe.



On peut modéliser l'objet par une distribution de deux points matériels A (m_A) et B (m_B), relié par une barre non massique de longueur d.

A partir de la relation de définition du barycentre G, on obtient :

$$AG = \frac{m_B . AB}{m_B + m_A}$$

1.2 Résultante cinétique ou quantité de mouvement totale :

Pour le système {(A_1, m_1) ; (A_2, m_2)}, dont les points ont pour vitesses respectives $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ dans R_o, de centre O_o, avec m_1 et m_2 invariantes :

$$\overrightarrow{P_{tot}} = m_1\overrightarrow{v_1} + m_2\overrightarrow{v_2} = m_1\frac{d}{dt}\overrightarrow{O_oA_1} + m_2\frac{d}{dt}\overrightarrow{O_oA_2} = \frac{d}{dt}\left(m_1\overrightarrow{O_oA_1} + m_2\overrightarrow{O_oA_2}\right)$$

Soit, en introduisant le barycentre G du système par la relation de Chasles :
$\overrightarrow{P_{tot}} = \frac{d}{dt}\left((m_1 + m_2)\overrightarrow{O_oG} + m_1\overrightarrow{GA_1} + m_2\overrightarrow{GA_2}\right)$ avec $m_1\overrightarrow{GA_1} + m_2\overrightarrow{GA_2} = \vec{0}$ par définition de G

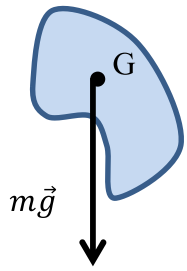
Il vient : $\overrightarrow{P_{tot}} = (m_1 + m_2)\frac{d}{dt}\left(\overrightarrow{O_oG}\right) = M_{tot}\overrightarrow{v_G}$

On peut montrer sans difficultés que l'on peut généraliser ce résultat à tout système de masses fermé, y compris pour des masses continument réparties en volume.

La quantité de mouvement d'un système est égale à la quantité de mouvement qu'aurait le centre d'inertie G du système, affecté de la masse totale du système.

1.3 Modèle du point matériel :

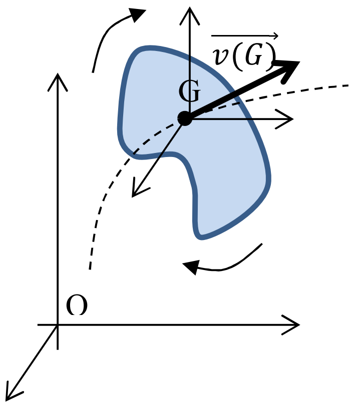
En s'appuyant sur ces résultats, on conçoit que l'on pourra remplacer un objet matériel par un point matériel, constitué de son centre d'inertie G affecté de sa masse totale M_{tot} pourvu que l'étude ne s'intéresse qu'au mouvement de translation de cet objet.
Les interactions de cet objet avec l'extérieur du système seront alors ramenées à des forces agissant sur le seul point matériel (G, M_{tot}).



Ainsi, le **poids d'un système**, qui est fondamentalement réparti sur l'ensemble des mases qui le constituent, sera considéré comme une force unique, correspondant au poids $M_{tot}\vec{g}$, poids de la masse M_{tot} supposé s'exercer en le centre d'inertie G.

Le terme de **centre de gravité** renvoie précisément à cette idée : la résultante des actions de gravitation sur l'objet, dont la masse est distribuée en volume, s'exerce en ce point.

Evidemment, ce modèle ne peut pas rendre compte du mouvement propre de l'objet, celui qu'il réalise par rapport au référentiel barycentrique, c'est à dire à un référentiel qui a pour origine son centre d'inertie, et dont les axes restent colinéaires par rapport à ceux du référentiel du laboratoire.



C'est la limite du modèle du point matériel, qui ne peut rendre compte que du mouvement de translation du centre d'inertie de l'objet dans le référentiel d'étude

2. Les trois lois de Newton (1642-1727) :

Newton a établi une théorie cohérente permettant d'expliquer les mouvements. Cette théorie est construite sur trois lois fondamentales.

Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica
(aujourd'hui connue sous le nom de *Principia* ou *Principia Mathematica*) publiée le 5 juillet 1687.

2.1 Première loi : Principe d'inertie.

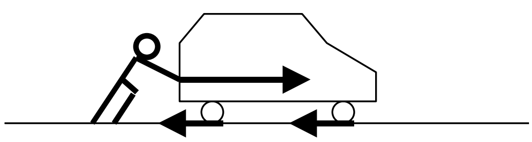
Cette première loi a été posée initialement par Galilée (1564-1642), vers 1602.

Il existe une classe de référentiels, les **référentiels galiléens**, (nous les définirons plus loin), tels que dans un tel référentiel, un mobile isolé, qui n'est soumis à aucune action mécanique, ou pseudo isolé, c'est à dire soumis à des forces qui se compensent, conserve un vecteur vitesse $\vec{v}$ invariant : $\vec{v} = \overrightarrow{Cste}$ si $\sum \vec{F} = \vec{0}$.
Ces référentiels sont en translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres.

Cette définition concerne le modèle du point matériel. L'étude du mouvement du mobile se ramène à celui d'un point qui le représente. Ce sera usuellement son centre d'inertie, affecté de la masse totale du système.
$\sum \vec{F}$ est la résultante des forces appliquées au système (somme vectorielle).

La genèse de cet énoncé est intéressante. Il va en effet à l'encontre de l'approche intuitive que l'on a de la relation entre force appliquée à une système et vitesse acquise.

Prenons l'exemple de la voiture en panne. Plus fort le conducteur va pousser son véhicule, plus grande sera sa vitesse. D'où la relation intuitive, mais fausse, selon



laquelle la vitesse d'un mobile est proportionnelle à la force qu'on lui applique.

La résolution de ce paradoxe apparent entre les fondements de la mécanique et notre expérience sensible passe par la prise en compte des frottements : la présence de frottements fait qu'une vitesse limite est atteinte lorsque les frottements vont compenser exactement la force propulsive appliquée au mobile. Une force propulsive plus grande permettra de compenser des frottements plus importants, donc d'atteindre une vitesse plus forte. Mais à vitesse constante la résultante des forces sera bel et bien nulle.

Galilée a conçu ce Principe d'Inertie par une **expérience de pensée** (méthode, plus tard, chère à Einstein, pour concevoir la relativité en 1905).
Imaginons un chariot lancé à une vitesse $\vec{v}$; en l'absence de force motrice, le mouvement va s'amortir du fait des frottements : la vitesse va décroître pour finalement s'annuler. Mais en supprimant les frottements, il n'y a plus de raison que la vitesse décroisse, d'où le Principe d'Inertie.

Un système isolé (ou pseudo isolé), observé dans un référentiel galiléen, conserve une quantité de mouvement invariante : $\sum \vec{F} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{p} = m\,\vec{v} = \overrightarrow{Cste}$

2.2 Deuxième loi : Relation Fondamentale de la Dynamique.

Toute modification du mouvement d'un point matériel met en jeu une variation de sa quantité de mouvement $\vec{p} = m\,\vec{v}$, et elle est due à des actions mécaniques, soit pour un point matériel, à une force résultante $\sum \vec{F}$. La R.F.D. se traduit par l'équation :

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

$\sum \vec{F}$ représente la cause du mouvement, la variation $\frac{d\vec{p}}{dt}$ étant sa conséquence. $\sum \vec{F}$ s'exprime en Newton (N), $\vec{p} = m\,\vec{v}$ en kg.m.s^{-1}. (1 N = 1 kg.m.s^{-2}).

Cette relation s'écrit pour une masse m constante :

$$\sum \vec{F} = m\,\vec{a} = m\frac{d\,\vec{v}}{dt}$$

où $\vec{a}$ est l'accélération du mobile et m sa masse inertielle (γ en m.s^{-2}).
(On note usuellement l'accélération $\vec{\gamma}$ ou $\vec{a}$).

Cette dernière expression est cependant moins générale que la précédente car elle suppose que la masse du système est constante.

Dans le cadre de la mécanique classique, la masse inertielle est indépendante du mouvement du point matériel, indépendante du référentiel d'étude, et c'est une quantité conservative (elle est invariante pour un système n'échangeant pas de matière avec l'extérieur).

Notons que la deuxième loi converge vers la première loi : $\sum \vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$ conduit, pour un système isolé ou pseudo isolé ($\sum \vec{F} = \vec{0}$) à : $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$ donc $\vec{v} = \overrightarrow{Cste}$

Remarques :

1- *La définition de certains systèmes conduit cependant à une masse variable : une fusée expulse des gaz brûlés pour se propulser par réaction, une goutte de pluie traversant des couches atmosphériques saturées d'humidité va grossir durant sa chute…*
   Les situations de ce type sont exclues du programme de Sup PCSI. Elles ne seront abordées qu'en seconde année.

2- *En mécanique relativiste, la masse peut se transformer en énergie (et inversement), par exemple lors de collisions de particules, ce qui est décrit par la célèbre relation : $\Delta E = \Delta m c^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide ($c \approx 3.10^8$m/s).*

3- *En mécanique relativiste, la quantité de mouvement doit être remplacée par l'expression : $\vec{p} = \gamma(v).m.\vec{v}$ où le coefficient relativiste $\gamma(v)$ vaut :$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.*
   Remarquons que ce coefficient γ n'a rien à voir avec l'accélération du mobile. On notera $\vec{a}$ l'accélération, pour éviter toute confusion.

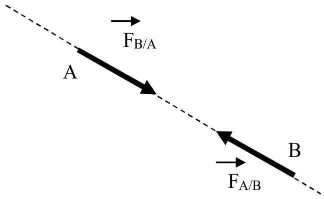
On doit alors revenir à l'expression générale : $\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\gamma(v).m.\vec{v}\right) = \sum \vec{F}$ pour l'étude des mouvements. (Ceci complique singulièrement les problèmes…).

On considère cette démarche inutile quand **$v < 0{,}1.c = 3.10^7$m/s** car alors $\gamma(v)=1$ à 0,5 % près : les expressions relativistes convergent alors vers les expressions classiques. **L'approximation classique est donc valide.**

La seule exigence du programme de sup PCSI est de connaître cette limite d'application de la mécanique classique.

2.3 Troisième loi :

Le principe des actions réciproques ou Principe de l'action et de la réaction.



Les forces qu'exercent l'un sur l'autre deux points matériels A et B sont portées par la même droite, passant par A et B, que l'on nomme **droite d'action**.

Ces forces sont des vecteurs opposés. Elles ont même norme, même direction, mais un sens opposé.

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

Remarque : le principe des actions réciproques n'est donc valide que pour des objets réductibles à des points matériels.

Nous verrons le cas d'objet physiques qui ne le sont pas. On peut citer l'exemple de l'interaction entre aimants. Les aimants ne peuvent être décrits par le modèle du point matériel, modèle qui ne pourrait renseigner sur la disposition de leurs pôles (sud, nord) : un aimant ne peut être modélisé que par un modèle rendant compte de sa position dans l'espace, mais aussi de son orientation et de son sens. On aura donc recours à un vecteur pour cela.

Justification de la troisième loi :

Considérons le système de deux points {A,B}, supposé isolé.
Admettons que les quantités de mouvement sont additives ; ainsi pour le système : $\vec{p} = \vec{p_A} + \vec{p_B}$.
La R.F.D. écrite pour A donne : $\frac{d\vec{p_A}}{dt} = \overrightarrow{F_{B/A}}$ (1) ; et sur B : $\frac{d\vec{p_B}}{dt} = \overrightarrow{F_{A/B}}$ (2).

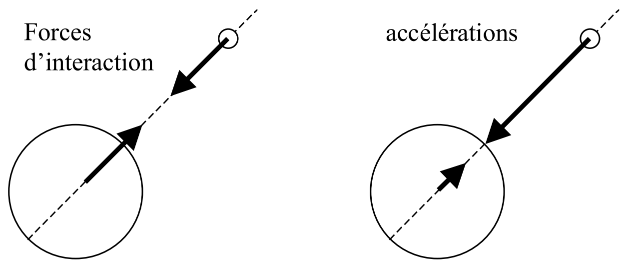
En additionnant (1) et (2), il vient : $\frac{d\vec{p_A}}{dt} + \frac{d\vec{p_B}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \overrightarrow{F_{B/A}} + \overrightarrow{F_{A/B}}$

Mais le système étant isolé : $\frac{d\vec{p}}{dt} = \overrightarrow{F_{B/A}} + \overrightarrow{F_{A/B}} = \vec{0}$ donc $\overrightarrow{F_{B/A}} = -\overrightarrow{F_{A/B}}$.

Il reste à admettre **l'indépendance des effets**, c'est à dire que cette relation n'est pas modifiée si on applique d'autres forces d'interaction sur A ou B, ayant lieu avec des éléments extérieurs au système.

Application :

Quand une pomme tombe sur la Terre, elle est attirée par l'attraction gravitationnelle de la Terre. Mais réciproquement, la Terre tombe sur la pomme ! (le mouvement de la Terre n'est pas décelable).



La force d'interaction a pour norme F = m_pg, où g et l'accélération de la pesanteur.
L'écriture de la R.F.D. pour la pomme et pour la Terre, mettant en jeu des forces de même norme, conduit à : $F = m_p.g = m_p.\gamma_p = M_T.\gamma_T$
L'accélération γ_p de la pomme apparaît égale à g = 9,8 m.s^{-2},
tandis que celle de la Terre vaudra : $\gamma_T = m_p.g/M_T$ soit $\gamma_T = 1{,}6\ ;10^{-25}$ m.s^{-2}.

3. <u>Référentiels galiléens :</u>

Les référentiels galiléens sont les référentiels dans lesquels les trois lois de Newton s'appliquent.
En seconde année, le cas des référentiels non galiléens sera abordé, et l'on verra qu'il faut alors adapter l'énoncé de la seconde loi de Newton, en faisant intervenir des pseudo-forces d'inertie.

3-1 Définition théorique, propriétés :

Le principe d'inertie ***postule*** l'existence de référentiels privilégiés, dans lequel le mouvement d'un point matériel isolé (c'est à dire non soumis à des forces) est rectiligne et uniforme. Dans ces référentiels, dits galiléens, le mouvement d'un tel point a donc un vecteur-vitesse invariant.

Considérons un point matériel de position M, supposé isolé. On envisage son mouvement dans deux référentiels $R_1(O_1,x,y,z)$ et $R_2(O_2,x,y,z)$.

Selon que le mouvement d'entraînement de R par rapport à R est en translation ou en rotation, les axes de R_1 et R_2 restent pointés ou non dans la même direction.

Les vitesses de M dans R_1 et R_2 sont respectivement :

$\vec{V}(M/R_1) = \frac{d\overrightarrow{O_1M}}{dt}$ et $\vec{V}(M/R_2) = \frac{d\overrightarrow{O_2M}}{dt}$.

Le principe de relativité affirme l'additivité des vitesses :

$$\vec{V}(M/R_1) = \vec{V}(M/R_2) + \vec{V}(M)R_2/R_1$$

où le terme : $\vec{V}(M)R_2/R_1$ est un terme dit de vitesse d'entraînement : il traduit le mouvement relatif de R_2 par rapport à R_1 tel qu'il est perçu en la position M.

M étant isolé, en supposant R_1 galiléen : $\vec{V}(M/R_1) = \overrightarrow{Cste1}$

et de même en supposant R_2 galiléen : $\vec{V}(M/R_2) = \overrightarrow{Cste2}$

Par conséquent, la vitesse d'entraînement : $\vec{V}(M)R_2/R_1 = \overrightarrow{Cste1} - \overrightarrow{Cste2} = \overrightarrow{Cste}$

Remarquons que $\boldsymbol{\vec{V}(M)R_2/R_1}$ ne dépend ni du temps ni du point M considéré.

Le mouvement d'entraînement apparaît donc identique en tout point : R_1 et R_2 sont alors nécessairement en **translation** l'un par rapport à l'autre.

Il est de plus invariant dans le temps : le mouvement d'entraînement doit donc être en translation **rectiligne** et **uniforme**.

Ainsi, connaissant un référentiel galiléen, on peut affirmer que tous les référentiels galiléens sont en translation rectiligne et uniforme par rapport à ce référentiel.

3.2 Définition pratique des référentiels galiléens :

En pratique, le fait de considérer un référentiel comme galiléen correspondra à une ***approximation***. Un référentiel sera considéré comme galiléen lorsque les écarts à ce modèle ne sont pas détectables dans l'expérience considérée. En conduisant une étude théorique du mouvement dans l'hypothèse galiléenne, les résultats obtenus devront être en accord avec les observations expérimentales.

En seconde année, on verra que lorsque cette hypothèse est infirmée, l'étude d'un mouvement dans un référentiel non galiléen fera intervenir des ***pseudo-forces d'inertie***.

Introduisons ce sujet sur un exemple simple :

Un passager est assis dans une voiture roulant sur une route. Il observe une bille posée sur le tableau de bord. Le système étudié est donc la bille, et le référentiel (R) est lié à la voiture. Les interactions s'exerçant su la bille sont son poids et la réaction du tableau de bord.

- Si la voiture roule en ligne droite, à vitesse constante, la bille reste immobile, la réaction du tableau de bord compense son poids ;

la R.F.D. écrite dans (R), supposé galiléen : $m\,\vec{g} + \vec{R} = \vec{0}$ est en accord avec le fait que la bille soit en équilibre.

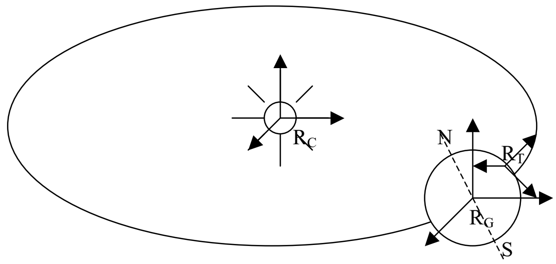
- Si la voiture freine ou accélère, l'étude menée dans (R) considéré comme galiléen mènerait aux mêmes conclusions.

Or l'expérience montre que cette fois-ci la bille ne sera pas en équilibre dans le référentiel de la voiture. Le référentiel n'est donc pas galiléen. Une étude correcte dans le référentiel (R) devra faire intervenir une pseudo-force d'inertie.

- Si la voiture tourne, les conclusions sont analogues : le référentiel (R) ne peut pas être considéré comme galiléen.

On interprète le mouvement de la bille observé par le passager en faisant intervenir une pseudo-force d'inertie (force centrifuge).

3.3 Quelques référentiels usuels ; discussion de leur caractère galiléen.



Le **référentiel de Copernic (R_C)** :
Centré sur le centre d'inertie du système solaire ; ses axes sont dirigés en direction de trois étoiles considérées comme fixes.
Usuellement affirmé comme galiléen, cette propriété disparaît si l'on étudie par exemple le mouvement du système solaire dans la galaxie.

Le **référentiel de Kepler(R_K)** :
Centré sur le centre d'inertie du Soleil ; ses axes sont dirigés en direction de trois étoiles considérées comme fixes. *La différence (subtile) entre ce référentiel et celui de Copernic ne sera pleinement expliquée qu'à la fin du cours de mécanique*.

Le **référentiel Géocentrique (R_G)** :
Centré sur le centre d'inertie de la Terre ; en translation circulaire dans le référentiel de Copernic (ses axes restent de direction invariante par rapport à ceux du référentiel de Copernic), du fait de la ***révolution*** de la ***Terre autour du Soleil.***

Le référentiel Terrestre (R_T) :
Lié à un point de la surface terrestre situé à proximité de l'expérience. Il est en rotation par rapport au référentiel géocentrique, du fait de la ***rotation*** de la Terre autour de son axe.

Dans toutes les situations étudiées l'an dernier et sur cette première partie du cours de mécanique, le référentiel terrestre a été et sera considéré comme galiléen.
Est-ce à dire que ce référentiel terrestre est intrinsèquement galiléen ? Non, car le fait de considérer un référentiel comme galiléen est toujours une approximation.

Si on lance une bille sur un plan horizontal, sans frottement, le poids de la bille sera compensé par la réaction du plan. Une étude dans l'hypothèse galiléenne prévoit un mouvement rectiligne à vitesse constante (système pseudo-isolé). C'est ce que l'on observe sur une distance suffisamment faible (et donc pour une durée d'expérience suffisamment courte).

En observant le mouvement sur une durée plus grande, la rotation de la Terre se manifeste ; La trajectoire dans le référentiel terrestre va s'incurver. Le référentiel terrestre ne peut plus être considéré comme galiléen.
Des considérations analogues peuvent être faites en envisageant une chute libre dans le champ de pesanteur. Sur une hauteur pas trop élevée, la trajectoire d'une bille lâchée sans vitesse initiale sera rectiligne, strictement verticale. Sur une grande hauteur, la trajectoire va dévier de la verticale, du fait de la rotation terrestre.

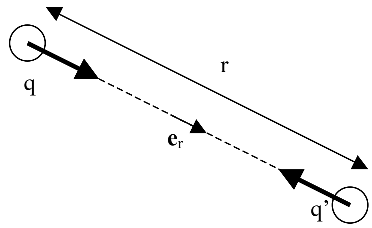
4. Les forces d'interaction :

4-1 Divers types d'interactions.

Les diverses théories physiques envisagent des interactions à distance, dites interactions fondamentales, parmi lesquelles on distingue :

● les **interactions électromagnétiques**, existant entre particules chargées.
Nous les préciserons ultérieurement, mais on peut rappeler la **loi d'interaction électrique**, ou loi de force de Coulomb, donnant l'interaction entre deux particules chargées ponctuelles :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q.q'}{r^2}\vec{e_r}$$



où ε_o est une constante physique nommée permittivité diélectrique du vide
(ε_o = 8,84.10^{-12} F .m^{-1} ; soit $\frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \approx 9.10^9 u.s.i.$).
Cette force électrique sera à compléter par une force magnétique. La force magnétique concerne une particule chargée, de charge q, et animée d'une vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel d'étude.
Le champ magnétique est représenté par un vecteur noté $\vec{B}$ qui rend compte de l'ensemble des caractéristiques de ce champ magnétique au point considéré (norme, direction et sens).

La force magnétique aura pour expression : $\boxed{\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}}$

Nous reviendrons plus tard sur cette notion, mais remarquons, d'après les propriétés du produit vectoriel, que cette force s'annule quand la vitesse est colinéaire au champ.

Ces forces sont rassemblées en une force de Lorentz, d'expression :

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})}$$

On pourra remarquer que l'expression de cette force fait intervenir la vitesse de la particule, ce qui implique que la distribution du champ électromagnétique en un terme électrique et en un terme magnétique dépend du référentiel considéré.

● les **interactions nucléaires** ; très intenses mais de très courte portée, c'est à dire décroissant très rapidement avec la distance.

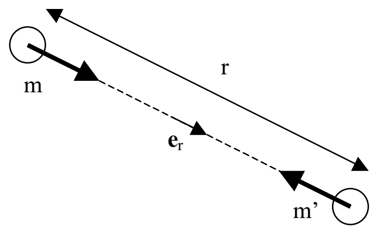
Elles assurent notamment la cohésion du noyau des atomes (protons et neutrons) (interaction nucléaire forte). En leur absence, les interactions électrostatiques entre les protons, répulsives, feraient exploser le noyau.

Elles interviennent aussi dans les phénomènes de radioactivité (interaction nucléaire faible).

Ces interactions sont environ 100 fois plus intenses que les interactions électromagnétiques à l'échelle du noyau atomique, mais leur portée est de l'ordre du femtomètre (10^{-15} m), qui correspond à l'ordre de grandeur de la taille du noyau des atomes.

Au-delà de cette échelle, elles n'interviendront donc pas directement dans les problèmes, et nous n'aurons pas l'occasion d'utiliser ces forces nucléaires.

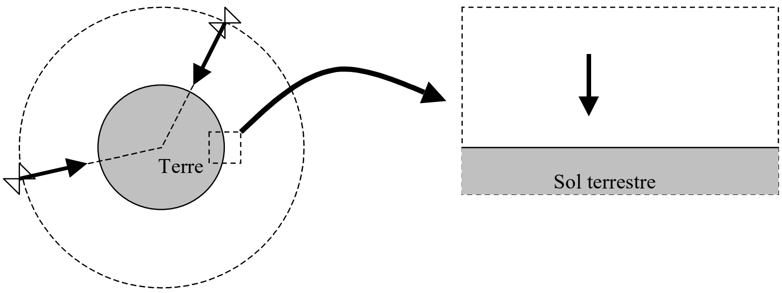
● les **interactions de gravitation**, répondant à la loi d'attraction gravitationnelle universelle.
Entre deux masses ponctuelles, la force de gravitation est attractive et s'écrit :



$$\boxed{\vec{F} = -G\frac{m.m'}{r^2}\vec{e_r}}$$

où G = $6{,}67.10^{-11}$ u.s.i. est la constante universelle de gravitation.

- La force de pesanteur (poids) est un effet essentiellement gravitationnel, décrit dans le cadre du modèle "champ de pesanteur uniforme", applicable localement à la surface d'une planète. Le poids sera noté $\boxed{m\vec{g}}$ et non $\vec{P}$ qui pourrait amener des confusions.



Remarque : Attention à ne pas faire de confusion entre le champ de gravitation $\overrightarrow{G(r)}$ et le champ de pesanteur $\vec{g}$. Dans le modèle usuel de pesanteur uniforme, le poids d'une masse m aura donc pour valeur : $\boxed{\vec{P} = m\vec{g}}$ où $\vec{g}$aura une valeur vectorielle identique en tout point :

$\vec{g} = -g\vec{e_z}$ en notant $\vec{e_z}$ l'unitaire vertical ascendant. Ceci est valide tant que les variations d'altitude restent modestes.

- Si le problème fait intervenir un déplacement important à l'échelle de la Terre (mouvement d'un satellite par exemple), le modèle local précédent n'est plus valide.

On doit prendre en compte l'expression du champ de gravitation, qui dépend de la position dans l'espace. En notant R le rayon terrestre, M la masse de la Terre, h l'altitude, G = $6{,}67.10^{-11}$ u.s.i. et en introduisant r = R + h, la distance au centre de la Terre, on aura pour **force gravitationnelle**

$$\vec{F} = -G\frac{m.m'}{r^2}\vec{e_r}$$

où $\vec{e_r}$ est l'unitaire radial.

(les coordonnées sphériques auront bien sûr pour origine le centre de la Terre).

La **force de gravitation** s'exerçant sur une masse m, d'altitude h est proportionnelle au champ de gravitation $\overrightarrow{G(r)}$ et vaudra donc :

$$\boxed{\vec{F} = m\overrightarrow{G(r)} = -m\frac{GM}{r^2}\overrightarrow{e_r} = -m\frac{GM}{(R+h)^2}\overrightarrow{e_r}}$$

On note usuellement g_o l'intensité du champ de gravitation à la surface de la Terre (h = 0), c'est-à-dire pour r = R :

$$g_o = \frac{GM}{R^2} = 9{,}8\, m.s^{-2}$$

Soit la relation : $GM = g_o.R^2$ avec $g_o = 9{,}8$ m.s^{-2} et R = 6370 km.

On aura donc pour le champ de gravitation :

$$\boxed{\overrightarrow{\mathrm{G(r)}} = \frac{-GM}{r^2}\overrightarrow{e_r} = \frac{-g_o R^2}{r^2}\overrightarrow{e_r} = \frac{-g_o R^2}{(R+h)^2}\overrightarrow{e_r}}$$

Remarque : attention à la notation G pour la valeur de la constante universelle de gravitation G = 6,67.10^{-11}usi et $\overrightarrow{G(r)}$ pour le vecteur champ de gravitation (avec une flèche !).

● De façon plus phénoménologique, on peut envisager **les interactions de contact**.

Elles sont fondamentalement dues à des interactions électromagnétiques qui ont lieu entre les particules constituant la matière. Ces forces fondamentales sont la cause de l'impossibilité de l'interpénétration entre deux objets matériels, et de la cohésion de la matière, de l'interaction d'un fluide et d'un solide, ou de deux fluides entre eux.

Les conséquences macroscopiques de ces phénomènes sont à la base d'une grande partie des actions perçues à notre échelle, dans des situations très concrètes.

Un certain nombre de lois de force ont été construite, de façon plus ou moins empirique, pour rendre compte de ces effets. On rencontrera cette année, sur l'ensemble du cours :

- la force de réaction d'un support, vis à vis d'un solide ;
- la force de pression (ou force pressante) exercée par un fluide sur un solide ;
- la force de frottement visqueux d'un fluide sur un solide, de frottement d'un solide sur un solide… ;
- les forces de cohésion de la matière (tension d'un fil, d'une barre…) ;
- la force de rappel élastique d'un ressort…