

PHYSIQUE

NOTIONS DE BASE DE LA PHYSIQUE

La Physique – une définition

[**Physique**] vient du mot grec qui signifie "Connaissance de la Nature" (*wkpd*). C'était dans la Grèce antique, une des 3 branches de la PHILOSOPHIE (avec l'[**Ethique**] et la [**Logique**]. Aujourd'hui on pourrait définir la physique comme l'étude de l'univers et de ses constituants, de l'infiniment petit à l'infiniment grand ainsi que les lois de son évolution temporelle et spatiale, en excluant les phénomènes liés au «vivant».

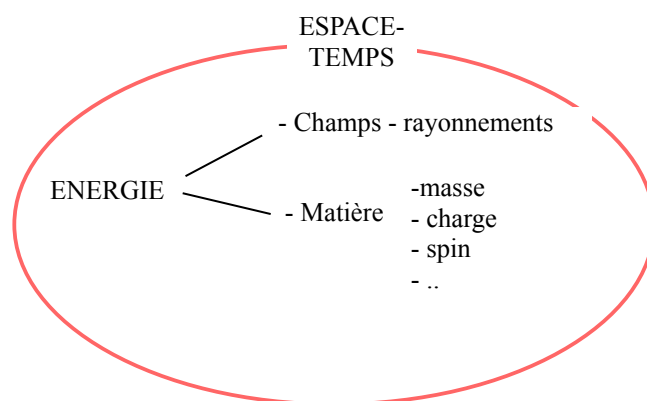
De la Physique à l'ingénierie

Les notions introduites en physique et les phénomènes décrits sont parfois intuitifs et parfois ne le sont pas ; citons par exemple la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil qui a fait l'objet de débats pendant une grande partie de l'histoire de l'humanité. Les concepts les plus fréquents, comme la **masse** ou l'**énergie**, ont été et restent des grandeurs à la fois familières et mystérieuses. La physique était au début (époque grecque et jusqu'à la Renaissance) une partie de la philosophie et reste, pour ses aspects fondamentaux et cosmologiques, très liée à cette discipline de la pensée. Il convient donc en Physique de rester modeste et de ne pas désespérer de ne pas tout 'comprendre' et d'ailleurs une grande partie de la Physique développée au XXème siècle, la physique quantique n'est pas compréhensible au sens premier du terme, c'est-à-dire intuitive ; elle est basée sur un formalisme mathématique pas facilement accessible, mais très performant dans ses prédictions.

Il est quand même possible, en s'aidant des mathématiques en particulier, d'utiliser une partie des acquis de la physique pour progresser en ingénierie et technologie. Les sciences de l'ingénieur sont, pour l'essentiel, de la physique appliquée.

L'étude de la [**Physique**] passe par celle de

- Concepts (espace-temps, matière, force, champ, énergie),
- Principes,
- Lois,
- Théories.



Une vision (un peu) simplifiée de « notre » univers.

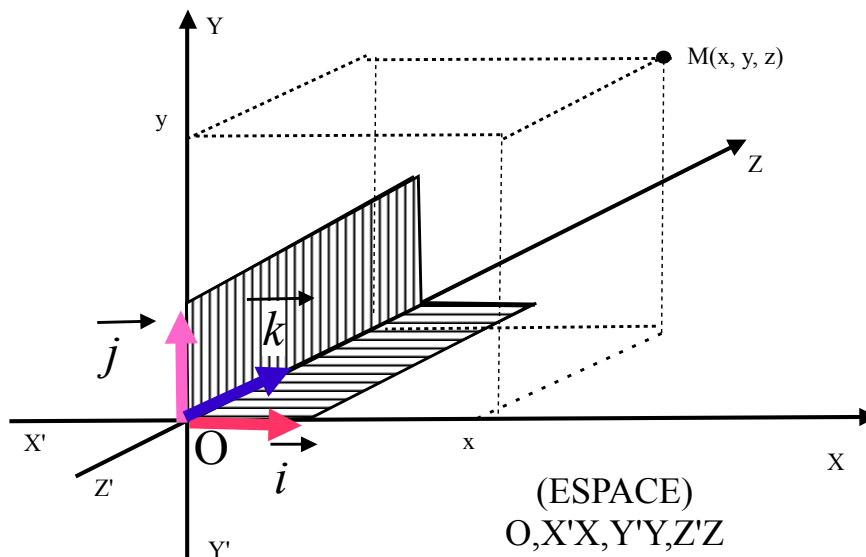
L'espace-temps

Parmi les concepts de base de la physique il y a l'**espace** repéré par des positions et des distances (unité : le mètre [m]) et le **temps** (unité : la seconde [s]), les deux concepts étant

devenus indissociables avec la théorie de la relativité introduite par Einstein au début du 20^{ème} siècle.

L'espace

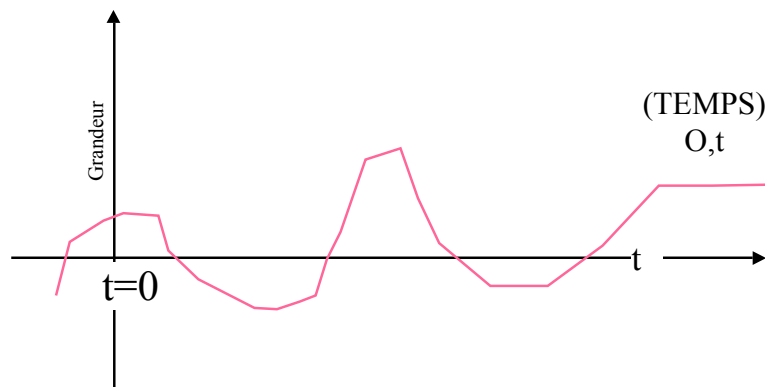
Nous évoluons dans un espace à 3 dimensions. Pour se situer dans cet espace il faut choisir un repère. Le **repère** le plus simple et qui convient dans les situations courantes est constitué de trois axes $X'X$, $Y'Y$ et $Z'Z$ munis de vecteurs unitaires, ayant une intersection commune choisie comme origine ($\{O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}\}$). Le repère est orthonormé si les axes sont perpendiculaires entre eux, et si on prend la même unité pour mesurer les distances suivant les 3 axes. Un objet ponctuel (objet de dimensions négligeables) situé en un point M , est repéré par ses distances à l'origine choisie (*figure ci-après*). Une symétrie particulière peut justifier l'utilisation d'un repère différent, cylindrique ou sphérique.



Ce que nous appelons « espace », ne peut pas être considéré comme indépendant de la « matière » qu'il contient. Lorsque les positions des systèmes étudiés varient dans le temps (supposé universel), la notion de **référentiel** devient nécessaire. Un référentiel est un système de coordonnées spatiales associé à un ensemble de corps physiques ; il permet de décrire l'évolution des systèmes à partir des **lois** connues de la physique. Le référentiel idéal, dit **galiléen**, n'existe pas en pratique. On définit donc le référentiel en fonction du problème à traiter (pour un train ou un satellite de la Terre, le référentiel ne sera pas le même). On s'attachera donc à vérifier le caractère **inertiel** du référentiel, qui fait que le principe d'inertie s'applique : un corps isolé conserve son état de repos ou de mouvement linéaire initial s'il n'est soumis à aucune action extérieure. Un référentiel lié à la Terre ne l'est que si on tient pas compte de l'action de la pesanteur qui introduit une anisotropie ; cependant, en considérant le poids comme une force extérieure agissant sur le corps, le référentiel terrestre est une approximation suffisante pour la plupart des problèmes d'ingénierie.

Le temps

Les objets et les grandeurs qui les caractérisent évoluent dans le temps. On représente cette évolution sur un graphe dont l'allure générale est la suivante.



Evolution d'une grandeur physique dans le temps. $t=0$ correspond à un instant pris comme origine. Dans beaucoup de situations il apparaît un caractère périodique. Le phénomène d'oscillation en est un exemple.

Les notions d'espace et de temps n'ont pas de sens sans le concept d'**énergie**. L'énergie elle-même est à associer aux notions de **matière** et de **champ**. Une description plus proche de la réalité physique nécessite l'utilisation de concepts développés au début du 20^{ème} siècle par des Physiciens et Mathématiciens comme Lorentz, Einstein, Minkovski. Einstein en particulier a formulé une théorie qui lui reste associée, **la relativité restreinte** en 1905, puis la **relativité générale** un peu plus tard. Ces théories ont paru exotiques pendant longtemps, mais sont vérifiées quotidiennement par l'utilisation d'un objet devenu courant, le « *GPS* ».

L'espace-temps

Dans un cadre très général, et pas toujours nécessaire dans les situations courantes, l'espace et le temps ne peuvent pas être considérés séparément. L'une des raisons est que les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse fixe c indépendamment du référentiel d'inertie par rapport auquel on la définit, suivant le point de vue présenté par A. Einstein et devenu un principe. Il en résulte que le temps ne se déroule pas au même rythme dans deux référentiels mobiles l'un par rapport à l'autre et que l'espace se contracte dans un repère mobile.

Dans un modèle simple dit galiléen et valable pour des vitesses faibles par rapport à c , les coordonnées d'un point dans deux référentiels (l'un immobile, l'autre se déplaçant à la vitesse

v), sont reliées par la transformation de Lorentz :
$$\begin{cases} x' = x - vt \\ t' = t \end{cases} .$$

Un mouvement étant relatif à un référentiel donné, il convient, lorsque les vitesses ne sont pas négligeables par rapport à c , d'appliquer la théorie de la relativité, ce qui revient à utiliser les **transformations de Lorentz** pour passer d'un référentiel à un autre. Ces transformations s'écrivent pour un déplacement relatif suivant l'axe $X'OX$:

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} ; y' = y ; z' = z \\ t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} .$$

La matière

Constituants élémentaires de la matière

Les corps physiques (le nôtre, les objets qui nous entourent, les constituants observables de l'univers lointain) sont constitués de matière. Cette notion est intuitive, mais essayons une définition quand même (celle de *wikipedia*) :

*« La matière est la substance qui compose tout corps ayant une réalité tangible. Ses trois états les plus communs sont l'état solide, l'état liquide, l'état gazeux. La matière occupe de l'espace et possède une masse. Ainsi, en physique, tout ce qui a une **masse** est de la matière. »*

Les Physiciens font la différence entre le « monde connu » et le monde encore imaginaire auquel ils doivent faire appel pour tenter d'expliquer les phénomènes observables.

Le monde « connu » est constitué d'un très petit nombre de particules élémentaires : 6 **quarks** et 6 **leptons** (électron, muon, tau, et trois neutrinos) dont les interactions sont décrites dans le cadre du « *modèle standard* »

La « matière ordinaire » (celle qui nous est familière ou accessible grâce à nos instruments scientifiques) est constituée à partir de 3 familles de particules élémentaires, la première (pour l'essentiel, les objets et matériaux courants) comprend l'électron, le quark *down*, le quark *up*, le neutrino électronique. Les deux autres familles apparaissent dans les phénomènes mettant en œuvre de grandes énergies, comme on peut en obtenir dans les grands accélérateurs. La découverte récente du « boson de Higgs » a permis de valider et compléter le « modèle standard », mettant les Physiciens dans la situation inconfortable du flou concernant les prochaines directions de recherche.

Des observations sur les mouvements relatifs au sein de lointaines galaxies, ont amené des Physiciens à émettre l'idée que dans l'univers il y aurait aussi de grandes quantités d'une matière qui nous est inconnue pour l'instant (« *matière noire* »), et d'énergie dont nous n'imaginons pas encore la nature (« *énergie sombre* »).

L'entité de base de la matière ordinaire est l'**atome**.

Un atome est constitué d'un **noyau** central entouré d'**électrons**. Le noyau contient deux types de particules, les **protons** et les **neutrons**. Les protons et neutrons sont obtenus à partir de 3 particules élémentaires appelées **quarks**. Les quarks ne peuvent être observés que lors de collisions de grandes énergies obtenues dans les accélérateurs de particules comme celui du CERN à Genève. Ils n'ont pas d'intérêt pratique pour la « physique ordinaire » et les applications courantes d'ingénierie.

La masse

La matière se caractérise par une masse m (unité : kilogramme [kg]). La masse se manifeste dans les deux situations suivante :

- la masse gravitationnelle qui caractérise l'attraction mutuelle entre les corps et se traduit par la notion de « poids », force d'interaction entre les objets qui nous entourent et la Terre ;
- la masse d'inertie qui caractérise la résistance qu'un corps oppose au changement de position imposé par une force extérieure.

Diverses mesures de grande précision indiquent que « masse d'inertie » et « masse gravitationnelle » sont équivalentes.

Les constituants élémentaires formant les atomes de la matière ordinaire (électron, proton, neutron) ont les masses suivantes ; pour l'électron la « **masse** » m_e est égale à $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg. Les particules du noyau des atomes (proton et neutron) ont une masse beaucoup plus importante : 1840 fois celle de l'électron pour le proton et, pour le neutron, 1,0014 fois celle du proton.

La charge électrique.

La grande stabilité de l'atome est assurée par des interactions liées à l'autre propriété de la matière qu'est la **charge électrique** (unité : le coulomb [C]) caractérisant l'électron et le

proton. Les charges sont de deux types, celle du proton est dite positive, celle de l'électron, négative. Deux charges électriques de même signe se repoussent, deux charges de signes opposées s'attirent. Si dans un système donné, les charges électriques des deux types sont en quantité identique, le système est électriquement neutre, ce qui est le cas pour la plupart des objets qui nous entourent. Quand ce n'est pas le cas, la manifestation peut être violente (l'éclair atmosphérique).

Dans un système donné, les charges électriques sont conservées.

La charge électrique de l'électron est « négative » $q_e = -e = -1,602.10^{-19} \text{ C}$; le proton a la même charge absolue mais de signe opposé.

Les atomes, briques élémentaires d'un corps simple, peuvent être électriquement neutres. Presque tous trouvent cependant une stabilité énergétique en s'associant pour former des **molécules** ou des **cristaux**. Les combinaisons possibles sont quasi infinies et font l'objet de recherches intenses qui débouchent régulièrement sur des matériaux plus performants que ceux déjà connus ou nouveaux et intéressants pour de nouvelles applications.

Forces

Les constituants de la matière interagissent, soit parce qu'ils sont en contact direct, soit par l'intermédiaire des propriétés particulières de l'espace dans lequel ils se trouvent. Le concept de force, formulée de façon rigoureuse pour la 1^{ère} fois par Newton (dont le nom désigne l'unité utilisée), est très utile pour décrire ces interactions. Ce concept nous est assez intuitif dans la vie de tous les jours où nous ressentons directement dans nos muscles les efforts que nous faisons pour faire bouger ou soulever un objet ... ou notre propre corps !. Une force est représentée par un vecteur (et a donc une direction, un sens, une intensité et une position où elle s'applique).

Les champs et les forces associées

Dans la définition précédente de la matière, il a été dit que celle-ci occupe un « espace ». En fait, cette matière n'est pas indépendante de l'espace qui l'entoure. La particule de matière se caractérise par une « masse » qui est à mettre en relation avec un « champ » dit **champ gravitique** remplissant tout l'espace qui l'entoure. Le champ gravitique se manifeste au travers de **forces de gravitation** qui agissent sur la matière présente ; cette force se traduit par ce que nous appelons « **poids** », dans le cas de la force exercée par la Terre sur les objets qui s'y trouvent, notion qui nous est très familière. L'**inertie**, notion un peu moins intuitive, en est une autre manifestation.

Une autre caractéristique de la particule de matière, la **charge électrique**, est responsable d'un autre champ, étendu lui aussi à l'infini, le **champ électrique**. Une particule plongée dans un champ subit l'action d'une force dite **force électrostatique**. Cette force est dite **électromagnétique** lorsque des mouvements de charge sont présents et qu'un autre champ, le **champ magnétique**, apparaît. La charge existe sous deux formes, arbitrairement dénomées « positive » et « négative » ; leurs effets en terme de champ créé sont opposés, ce qui fait que la matière est souvent électriquement neutre, ce sont les inhomogénéités dans les répartitions spatiales et les mouvements associés qui sont à l'origine des phénomènes électromagnétiques.

Il existe deux autres types de champs qui traduisent les interactions entre les particules de matière. L'un est dit « champ faible », et l'autre « champ fort » ; ils n'apparaissent qu'au sein des noyaux atomiques et ne se manifestent que dans des situations particulières sans intérêt pour la quasi totalité des situations rencontrées en ingénierie.

L'énergie.

Le concept d'énergie (unité : le joule [J]) est sans doute le concept le plus fondamental de la physique, en lien étroit avec les concepts de matière, d'espace et de temps. La matière elle-même peut être considérée comme une forme concentrée d'énergie depuis que Einstein a introduit avec la théorie de la relativité, une équivalence qui s'exprime dans la fameuse relation $E = mc^2$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Ce que dit Wikipedia :

« L'énergie (du grec : ενεργεια, *energeia*, force en action) est la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. C'est une **grandeur physique qui caractérise l'état d'un système** et qui est d'une manière globale **conservée** au cours des transformations. »

L'énergie peut être

- potentielle (en relation avec la position dans l'espace des éléments d'un corps matériel)
- cinétique (en relation avec le mouvement des corps).

L'énergie est définie par rapport à un référentiel ; une énergie donnée dans un référentiel, peut être nulle dans un autre.

L'énergie totale d'un système est une grandeur conservative.

L'énergie est présente également dans l'espace en dehors des corps matériels par le biais des **champs** (gravitationnels ou électromagnétiques).

Les champs et potentiels. Forces associées.

Champ de gravitation et force gravitationnelle.

Nous ne pouvons concevoir l'espace qu'en association avec la matière qui l'occupe. La matière occupe une (petite) partie de l'espace que nous percevons. En dehors de la matière, l'espace est rempli d'énergie qui se manifeste au travers d'une propriété appelée **champ**. Ces champs sont l'origine des forces subies par la matière.

La **gravitation** est le phénomène d'interaction physique qui est à l'origine de l'attraction réciproque des corps massifs entre eux, sous l'effet de leur masse. Le champ de gravitation créé par un objet remplit tout l'espace qui entoure celui-ci. Il se manifeste en particulier par l'attraction terrestre qui nous retient au sol (notre poids). La gravité est responsable des phénomènes suivants : les marées, l'orbite des planètes autour du Soleil, la sphéricité de la plupart des corps célestes. La gravitation est utilisée pour expliquer la structure de l'univers à grande échelle et lorsque les observations ne coïncident plus avec cette théorie (comme c'est le cas actuellement), les Physiciens font intervenir de nouveaux concepts comme la « matière noire » ou l'« énergie sombre ».

La théorie utilisée pour décrire la gravitation reste celle développée par Einstein au début du 20^{ème} siècle (la relativité générale). C'est celle qui permet d'expliquer les mouvements des objets célestes et de calculer la trajectoire des engins utilisés pour explorer les planètes du système solaire. Il n'est cependant pas nécessaire de recourir au formalisme de la relativité générale pour les situations où les vitesses des objets considérés restent faibles comparées à la vitesse de la lumière ; dans ces cas les lois de gravitation telles qu'elles ont été décrites par Newton au 17^{ème} siècle conviennent.

A l'échelle des constituants élémentaires de la matière, la gravitation est la plus faible des quatre interactions fondamentales ; elle est prépondérante aux grandes échelles (systèmes planétaire, galaxie). Son action, comme celle du champ électromagnétique, se manifeste au delà de la dimension du noyau de l'atome. La gravitation est toujours attractive alors que les forces électromagnétiques peuvent se compenser, puisqu'elles sont soit attractives, soit répulsives. La gravitation structure le monde de l'infiniment grand (par rapport à notre petit monde terrestre) et reste un sujet de recherche fondamentale. Le lien avec la physique quantique (le monde de l'infiniment petit) n'est toujours pas clair.

Un élément de matière de masse m , (occupant un volume suffisamment petit pour être caractérisé de 'ponctuel') crée dans l'espace environnant un **champ dit gravifique ou**

gravitationnel. En un point situé à la distance r , le champ est donné par : $\vec{G}_{m_1}(r) = -G \frac{m_1}{r^2} \vec{i}$,

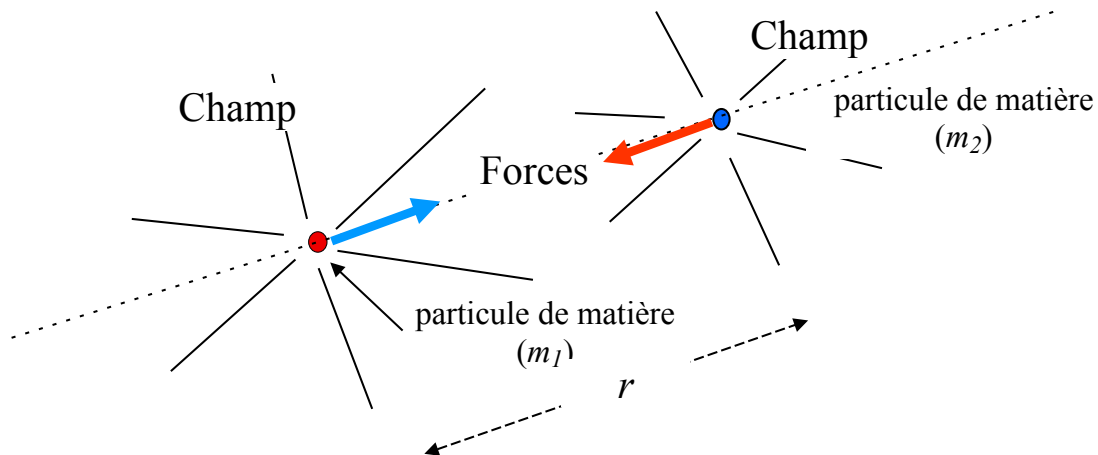
$\vec{i}$ étant le vecteur unitaire orienté de l'objet vers le point d'observation.

$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ S.I. (N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \text{ (ou } \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \text{))}$ est une constante universelle appelée constante de gravitation.

Si on place un autre objet ponctuel, de masse m_2 à la distance r du premier, celui-ci subit une **force** de la part du champ gravitationnel créé par le premier objet, telle que :

$$\vec{F}_{m_1 \leftrightarrow m_2} = m_2 \vec{G}(r) \quad \text{Unité de force : le Newton [N] (kg.m.s}^{-2}\text{)}$$

La présence du deuxième objet est à l'origine d'un champ qui se superpose au premier. L'objet de masse m_1 perçoit une force équivalente.



Chaque particule de matière contribue au champ qui l'entoure. Deux particules quelconques subissent des forces de la part de ces champs. Ces forces sont attractives.

La relation ci-dessus est l'expression de la loi de la gravitation universelle qui s'applique entre deux corps quelconques. On imagine assez bien la difficulté de décrire des situations avec une multitude d'objets et donc la complexité liée à la description d'un système pouvant être considéré comme isolé, comme le système solaire. Heureusement pour la majorité des problèmes courants que nous avons à traiter en étudiant les vibrations et les ondes, la gravitation n'intervient qu'à travers l'action du gros objet sur lequel nous évoluons, la Terre. Le reste de l'univers intervient quand même par l'intermédiaire de ce que nous appelons « **inertie** », cette force qui apparaît lorsqu'un corps est en accélération.

Remarque : La force de gravitation subie par un corps au voisinage de la Terre est sensiblement égale à son '**poids**' puisque la composante principale est due au champ de gravitation de la Terre :

$$\vec{P} = m \vec{g}, \text{ avec } |\vec{g}| = 9,81 \text{ m.s}^{-2} \text{ au niveau de la mer.}$$

Référentiel en mouvement et forces d'inertie

L'évolution des systèmes physiques est le résultat d'interactions dues aux champs dans lesquels ils sont plongés, le champ gravitationnel en particulier. La description se fait en les reliant à un référentiel. Le choix du référentiel doit être précisé. Celui-ci est **galiléen** ou **inertiel** si un objet qui s'y déplace à vitesse constante, garde cette vitesse s'il ne subit pas l'action de nouvelles forces. Pour résoudre la plupart des problèmes de la vie courante, un repère lié à la Terre peut être considéré comme inertiel. Dans un repère inertiel, un objet en accélération linéaire ou en rotation subit des **forces** dites d'**inertie**, dont l'origine n'est pas simple à formuler, et qui s'exprime comme la gravitation :

$\vec{F} = -m\vec{\gamma}$; la force d'inertie, dans un mouvement de translation accélérée s'oppose à cette accélération. La masse qui intervient (masse inertielle) ici est la même que la masse gravitationnelle.

Le phénomène d'inertie est un '*principe*' de la nature : il n'est pas possible de le démontrer, mais l'observation suffit pour se convaincre de la justesse de l'affirmation.

Dans le cas d'un corps en rotation, l'inertie se traduit par une force centrifuge : le corps est poussé vers l'extérieur de sa trajectoire. La force centrifuge est égale à

$$F = m\omega^2 R, \quad \omega \text{ étant la vitesse angulaire de rotation, } R, \text{ le rayon de la trajectoire.}$$

L'autre force liée aux référentiels non galiléens, est la force de Coriolis. Cette force inertielle se manifeste dans le cas d'un corps se déplaçant dans un référentiel en rotation (la Terre par exemple) ; il s'agit en fait d'un effet de perspective qui peut s'interpréter comme une force qui agit dans une direction perpendiculaire à la direction du mouvement.

Champ électrique, potentiel électrique, force associée

Deux des constituants élémentaires de la matière, l'électron et le proton, sont caractérisés par une autre propriété, celle de la **charge électrique**. Les constituants de la matière, atomes et molécules, sont en général électriquement neutres, parce qu'ils contiennent autant de charges positives que de charges négatives. Si une charge électrique est isolée dans un espace vide, elle crée dans cet espace, un **champ électrique** $\vec{E}$. L'expression du champ en un point M à la distance r de la charge se situant en un point O , s'exprime comme suit :

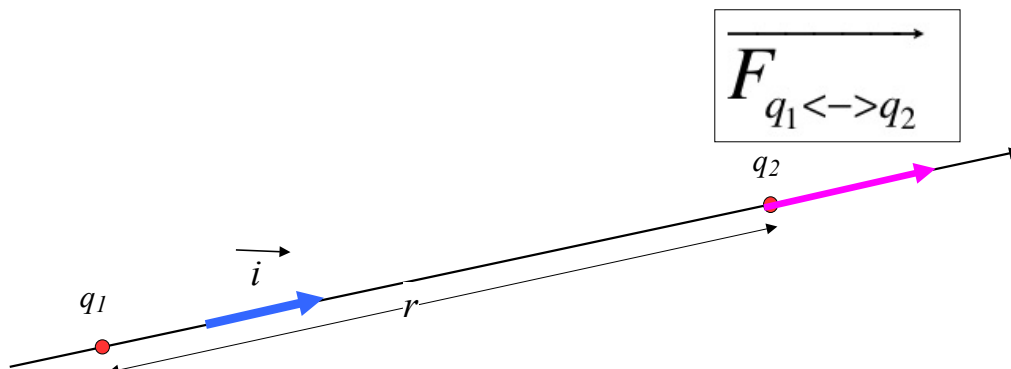
$$\vec{E}_{(O) \rightarrow (M)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{i}; \quad \epsilon_0 \approx 8,85418 \cdot 10^{-12} \text{ S.I. } (kg^{-1} \cdot m^{-3} \cdot A^2 \cdot s^4) \text{ est la permittivité du vide}$$

($\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ S.I.}$) ; $\vec{i}$ est le vecteur unitaire sur la direction OM .

En conséquence deux particules chargées situées à une distance r l'une de l'autre, interagissent par le biais d'une force, dite électrostatique ou de **Coulomb**, donnée par :

$$\vec{F}_{q_1 \leftrightarrow q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{i} = q_2 \cdot \vec{E}_{(O) \rightarrow (M)}.$$

La force électrostatique, a une portée infinie comme la force gravitationnelle, mais est supérieure de 40 ordres de grandeur, à la force de gravitation.



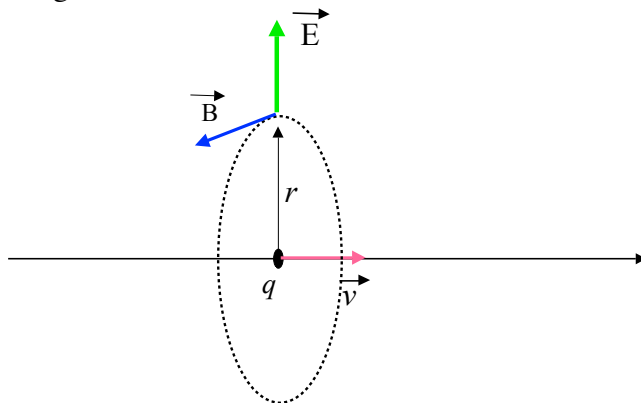
Champ et force électrique : Les particules chargées s'attirent ou se repoussent suivant la nature des charges respectives (désigné par un signe + ou -). Le sens choisi ici pour la flèche correspond à des charges de signes opposés. La charge q_1 subit une force équivalente.

La notion de champ peut être complétée par celle de **potentiel**, une grandeur scalaire attribuée à chaque point de l'espace subissant l'influence d'une ou plusieurs charges.

Champ magnétique, force associée.

Les charges électriques en mouvement sont à l'origine de l'apparition d'un champ dit induction magnétique $\vec{B}$. Le champ magnétique n'est pas différent par sa nature du champ

électrique. Il s'agit d'un effet relativiste qui apparaît donc en présence d'un mouvement de charges.



Dans le cas d'une charge q se déplaçant à la vitesse v , le champ magnétique créé à la distance r est donné par :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^2} \vec{v} \wedge \vec{e}_r \quad (\vec{e}_r \text{ vecteur unitaire dans la direction charge-point d'observation})$$

On peut généraliser la situation représentée sur la figure en considérant un angle θ entre la direction de déplacement et celle de l'observation ; dans ce cas v est remplacé par $v \sin \theta$.

Inversement, une charge électrique q en mouvement de vitesse $\vec{v}$ soumis simultanément à un champ électrique et un champ magnétique, subit une force dite de Lorentz donnée par :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}).$$

Champ électrique et champ magnétique en présence de matière

L'interaction entre champs (électrique et magnétique) et la matière se traduit par ce que Maxwell avait appelé un « déplacement » de la matière. Maxwell désignait par $\vec{E}$ le champ électrique, $\vec{H}$ le champ magnétique, $\vec{D}$ le « déplacement » dû au champ électrique, $\vec{B}$, le déplacement du au champ magnétique. Dans la représentation qui a été construite par la suite et utilisée aujourd'hui, $\vec{B}$ est le champ magnétique, $\vec{H}$ correspond au champ en présence d'un milieu.

Autres interactions entre les particules de matière.

L'interaction gravitationnelle et l'interaction électrique sont les deux phénomènes à prendre en considération dans la plupart des phénomènes physiques courants. La nature fait appel à deux autres types d'interaction qui jouent un rôle en physique nucléaire :

- l'interaction forte, une interaction de courte portée (de la dimension du noyau atomique) qui intervient pour assurer la cohésion des protons et des neutrons au sein des noyaux de l'atome,
- l'interaction faible, responsable de la l'instabilité de certains noyaux, et de portée encore plus courte que l'interaction forte.

Physique : les différents niveaux de description

Le niveau de description de la nature dépend de l'échelle des objets étudiés et des phénomènes à prendre en considération. La '**physique classique**' (celle qui a été élaborée jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle) couvre un grand nombre de phénomènes et de systèmes à l'échelle des objets utilisés ou fabriqués par l'homme. Cette physique décrit également assez bien les mouvements des planètes du système solaire. Un progrès considérable a été réalisé au début du 20^{ème} siècle avec les contributions d'Albert Einstein et d'autres Physiciens et Mathématiciens, aussi bien dans le domaine de l'infiniment grand avec la théorie de la

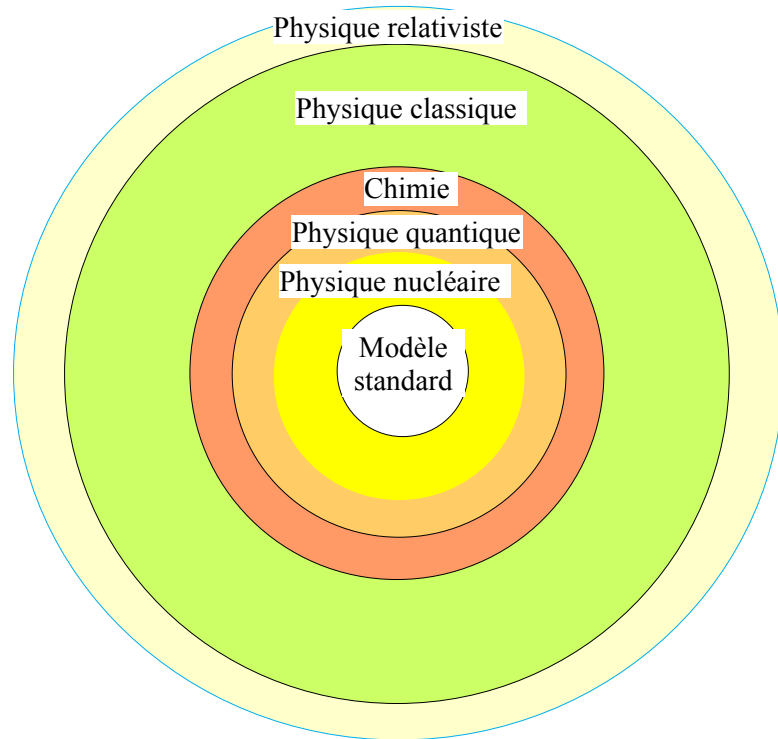
relativité générale que dans le domaine de l'infiniment petit. Une nouvelle **physique** dite **quantique** s'est progressivement imposée en devenant extrêmement performante dans la description des échanges d'énergie entre la matière à l'échelle atomique ou moléculaire et les champs environnants. Le milieu du 20^{ème} siècle a vu, sous l'impulsion des demandes militaires, l'essor de la **physique nucléaire** qui porte sur l'étude des interactions au sein des noyaux des atomes. Une recherche civile a fait suite et a permis la conception et la réalisation de centrales de production d'énergie. Cette physique continue de faire l'objet d'une recherche fondamentale dont l'objectif est d'identifier tous les constituants les plus élémentaires de la matière en réalisant des collisions à grande énergie des particules connues. Ces expériences sont menées au sein d'instruments gigantesques comme les accélérateurs de particules du CERN à Genève ou au Fermilab à Chicago. Le modèle physique en cours actuellement, dit '**modèle standard**' donne une description satisfaisante de l'évolution de l'univers tel que nous le voyons et pouvons l'imaginer avant et après la parenthèse humaine. La découverte récente de la particule appelée « boson de Higgs », particule qui explique en partie ce que nous appelons la « masse », a permis de confirmer la pertinence de ce modèle

Ce cadre très général n'explique cependant pas toutes les observations actuelles ; les Physiciens peuvent donc laisser leur imagination (et la nôtre) se perdre avec les notions de « *matière noire* » et d'« *énergie sombre* ».

Un autre aspect qui dérange réside dans la disparité entre la physique de l'infiniment petit (le quantique) et celle de l'infiniment grand (la relativité générale). L'histoire n'est donc pas terminée et ne le sera sans doute jamais

Où peut-on s'arrêter dans l'étude de la physique lorsque on a comme préoccupation l'étude des sciences de l'ingénieur et pas nécessairement la passion du physicien qui chercherait à « comprendre » la nature dans ses manifestations les plus subtiles ? La physique classique répond certes à la majorité des problèmes et systèmes rencontrés par l'ingénieur. La physique dite « moderne » qui inclut des développements comme la théorie de la relativité n'est cependant pas inutile : la précision du GPS devenue objet d'usage courant, ne serait pas ce qu'elle est si elle n'intégrait pas des corrections apportées par la théorie d'Einstein¹. Et que dire du laser, l'une des inventions majeures du 20^{ème} siècle (avec le transistor), dont le fonctionnement repose sur la nature quantique de la matière et de l'existence de l'émission stimulée prévue par A. Einstein également. En conséquence, il convient également d'introduire des notions de physique quantique et de théorie de la relativité dans les cursus d'ingénieur.

¹ *De la relativité au GPS. Quand Einstein s'invite dans votre voiture. Pierre Spagnou, Ellipses, ISBN 978-2-7298-7281-6, (2012)*



La Physique : les différents niveaux de description en fonction des objectifs poursuivis.

2. MÉCANIQUE GÉNÉRALE

Dans la partie « mécanique » de la Physique on trouve tous les systèmes et phénomènes dans lesquels les charges électriques et leurs actions ne sont pas essentielles ou n'apparaissent pas de façon directe. Les concepts utilisés sont la masse, leur répartition dans l'espace, les inerties liées à leurs mouvements dans des référentiels en mouvement, l'interaction gravitationnelle.

La force gravitationnelle

La gravitation se manifeste pour deux objets de masse m_1 et m_2 , séparés par une distance d , par une force d'attraction suivant la direction de leurs centres de masse, donnée par :

$$\vec{F}_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{d^2} \vec{u}_{12}$$

G , la constante gravitationnelle, vaut $6,6742 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ (ou $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$).

Référentiel

Pour repérer les objets, systèmes et événements dans l'espace et le temps, on définit un système de coordonnées ainsi que les unités associées aux axes. Le repère pourra être cartésien et orthonormé, un point étant repéré par 4 nombres (x, y, z, t) . Si la géométrie du problème le justifie, le repère sera cylindrique ou sphérique.

Les mouvements des objets les uns par rapport aux autres (aspects dynamiques) nécessitent l'introduction de repère galiléen ou inertiel. Un tel repère n'existe en pratique pas ; cependant un repère lié à la Terre suffit pour la majorité des problèmes d'ingénierie.

La théorie de la relativité introduite par A. Einstein a rendu nécessaire l'introduction de repère prenant en compte les accélérations et les grandes vitesses proches de la vitesse de la lumière. La description de l'espace-temps dans ce cadre très général a été introduite en 1905 par Henri Poincaré et formalisé par la suite par Hermann Minkovsky.

Référentiel galiléen

Un référentiel galiléen (RG) ou référentiel inertiel est tel qu'un objet isolé (ne subissant pas l'action de force extérieure) est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme. Le référentiel terrestre pourra être considéré comme tel dans la plupart des situations courantes.

La 1^{ère} loi de Newton s'applique dans un RG.

Forces mécaniques

Trois types de force agissent sur un système de points matériels :

- des forces internes, interactions entre les éléments du système et d'origine électrique
- des forces externes (gravitationnelle, électro-magnétique)
- des forces de réaction au contact avec d'autres systèmes.

Le système est limité dans son évolution spatiale par des contraintes (masse attachée à un ressort). En l'absence de contraintes, le système est dit isolé.

Un système de points matériels est dit **rigide** si les mouvements relatifs des particules le constituant peuvent être négligés. Dans ce cas, ce système peut subir :

- un mouvement de translation ou
- un mouvement de rotation.

Force de pesanteur (ou poids) :

La force exercée par la gravitation de la Terre, ou poids $\vec{P} = m \vec{g}$; la pesanteur correspond à une accélération $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Force d'inertie :

La force d'inertie se manifeste en présence d'une accélération : Force [en *Newton* = kg.m.s^{-2}] = *masse* x *accélération*.

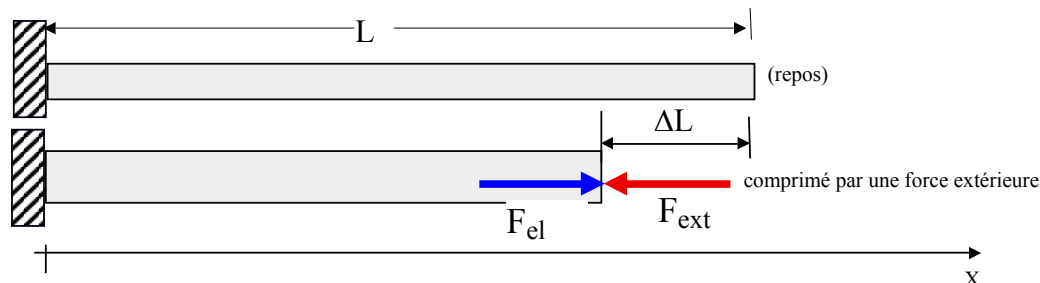
Elle s'exerce sur un objet en accélération dans un référentiel galiléen, et apparaît comme une conséquence de cette accélération. La force d'inertie agit en sens contraire à l'accélération qui en est à l'origine : $\vec{F}_i = -m \vec{\gamma}$.

Il faut donc en tenir compte dans un repère en translation accéléré et dans un repère en rotation (centripète, centrifuge, Coriolis).

Force élastique

Loi de Hooke. Les corps sont plus ou moins déformables ; ils ont une certaine élasticité. Lorsqu'on les étire, ou on les comprime, ils génèrent une force de rappel (ou force d'élasticité). Cette force élastique est la manifestation macroscopique des forces électriques agissant à l'échelle des constituants élémentaires, atomes ou molécules.

Loi de Hooke.



Si on considère un barreau de section S de longueur L , une force extérieure F_{ext} exercée sur une extrémité aura pour résultat de diminuer la longueur de ΔL tel que

$$\frac{F_{ext}}{S} = E \frac{\Delta L}{L} \text{ ou } \sigma = E \varepsilon ; E [\text{en Pascal}], \text{ le module d'Young caractérise l'élasticité du matériau en compression, } \sigma \text{ est la contrainte, } \varepsilon \text{ est la déformation résultante.}$$

$$F_{el} \text{ est la force élastique de réaction du matériau : } F_{el} = -F_{ext} = -E S \frac{\Delta L}{L}$$

Cette loi ne s'applique que pour de petites déformations autour de la longueur de repos. Avec l'augmentation de la déformation, la relation n'est plus linéaire ; une grande déformation cause la rupture.

Cas d'un ressort :

La force élastique de rappel exercée par un ressort étiré ou comprimé de ΔL par une force extérieure est égale à : $F = -K \Delta L$; K est la raideur du ressort, ΔL est la variation de longueur (compression ou étirement). Le signe (-) indique que la force agit dans le sens d'un retour vers la longueur de repos.

Forces de frottement ou de contact

(cinétique, statique, de roulement, ..).

Les actions de contact entre deux corps donnent lieu à des forces qu'on ne peut exprimer que de façon empirique.

Un frottement dit visqueux ou fluide, apparaît lorsqu'une fine couche de matière non solide (poudre, liquide, particules arrachées par le mouvement) sépare deux objets solides. La force de frottement visqueux est proportionnelle à la vitesse $\vec{v}$ de déplacement :

$$\vec{F}_{frott.visqu.} = -h \vec{v} \text{ où } h \text{ est le coefficient de frottement}$$

Statique

Un objet ponctuel $\{M\}$ est en équilibre dans un référentiel donné, si la somme vectorielle des forces qui lui sont appliquées est un vecteur nul :

$$\vec{F}_{ext \rightarrow M} = \vec{0}.$$

Mouvement de translation

Il y a translation quand un mouvement se fait suivant une trajectoire rectiligne. Un corps en translation à vitesse constante, continue son mouvement à la même vitesse en l'absence de force extérieure qui lui serait appliquée (1^{re} loi de Newton).

Quantité de mouvement

Un mouvement se définit par une vitesse $\vec{v}_{\mathcal{R}}$ dans un référentiel $\mathcal{R}$ donné, mais aussi par la quantité de matière ou masse concernée.

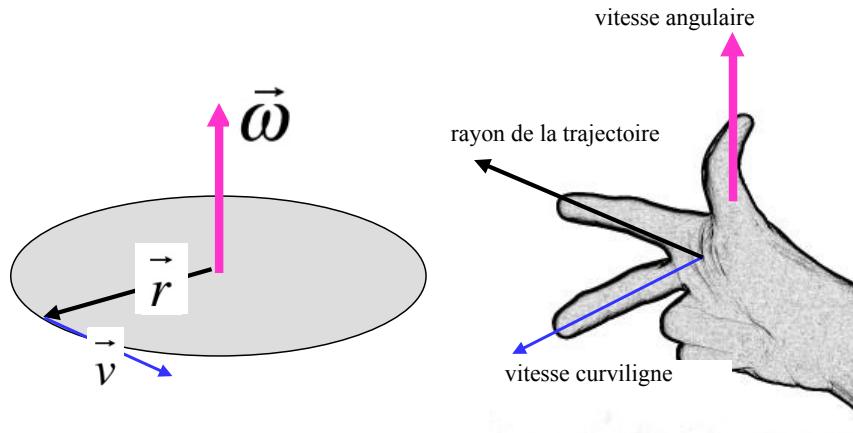
La quantité de mouvement définie comme : $\vec{p}_{\mathcal{R}} = m \vec{v}_{\mathcal{R}}$ est une grandeur caractéristique du mouvement (et dépend du référentiel).

L'application d'une force pendant un intervalle de temps Δt donné entraîne une variation de la quantité de mouvement, $\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t$ appelée aussi **impulsion**.

Mouvement de rotation

Vitesses (orbitale, angulaire)

Le mouvement de rotation d'un objet ponctuel est caractérisé par sa vitesse angulaire $\vec{\omega}$ définie comme montré ci-après.



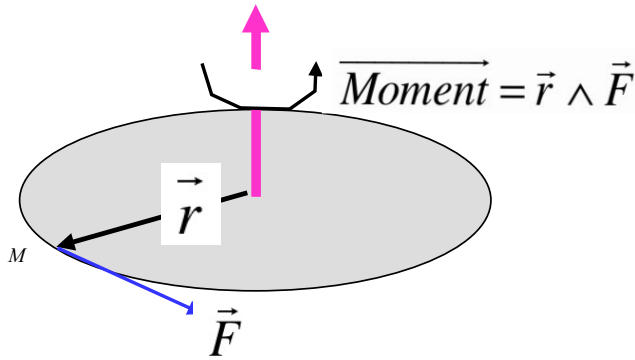
Orientation de la vitesse angulaire : règle de la main droite (ou du tire-bouchon)

$\vec{r}$ est le rayon de la trajectoire, $\vec{v}$ est la vitesse curviligne, ou vitesse orbitale. Si on désigne par $d\varphi$ la variation angulaire du rayon pendant un intervalle de temps dt , le module de la vitesse angulaire est égal à : $|\vec{\omega}| = \frac{d\varphi}{dt}$.

La vitesse orbitale est donnée par : $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \vec{r}$.

Moment de force

Dans un mouvement de rotation, l'action d'une force dépend de la distance de son point d'application à l'axe de rotation. Il convient donc d'introduire la notion de moment de la force pour décrire le mouvement. Le moment d'une force $\vec{F}$, tangente en un point M d'une trajectoire circulaire de rayon r est donné par $\overrightarrow{\text{Moment}} = \vec{r} \wedge \vec{F}$



Le moment de 2 forces opposées situées aux extrémités d'un diamètre de la trajectoire, est appelé **couple**.

Inertie

Les phénomènes d'inertie doivent être pris en considération dans les problèmes dynamiques. Il convient de distinguer l'inertie dans un mouvement de translation et celle liée à une rotation.

En translation, un corps présente une inertie définie par sa masse.

En rotation, l'inertie (ou résistance au mouvement) dépend de la masse mais aussi de sa répartition par rapport à l'axe de rotation. La grandeur correspondante est le moment d'inertie.

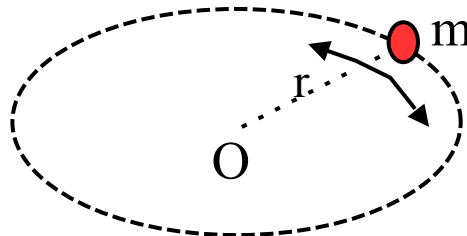
Moment d'inertie

Le moment d'inertie I (kg.m^2) caractérise la résistance d'un corps à la rotation, ou plus exactement à l'accélération angulaire. I dépend de la position de l'axe de rotation choisi. C'est l'équivalent de la masse pour un mouvement de translation.

Cette notion ne doit pas être confondue avec le *moment quadratique* utilisé en résistance des matériaux pour décrire la contrainte dans une poutre soumise à une flexion.

Une masse ponctuelle m tournant à la distance r d'un axe, a un moment d'inertie :

$$I_{\text{point}} = m r^2$$



Le moment d'inertie d'un objet quelconque en rotation est obtenu en faisant la somme des moments d'inertie des éléments ponctuels qui le constituent. En passant aux éléments

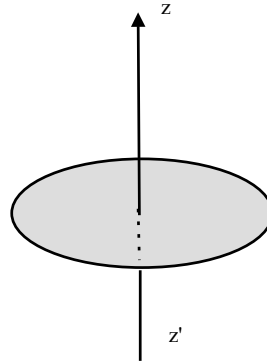
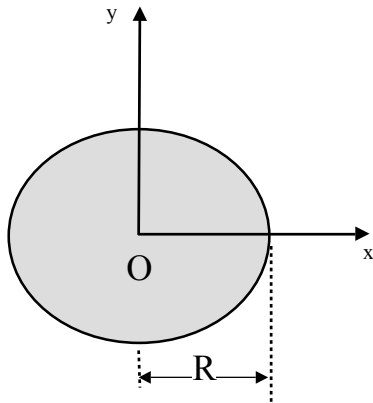
infinitésimaux, le moment d'inertie d'un objet volumineux est obtenu par intégration des moments des constituants élémentaires :

$$I_{total} = \int dI = \int^M r^2 dm .$$

Quelques moments d'inertie :

- un disque de rayon R et de masse M en rotation autour de l'axe Ox ou Oy :

$$I_x = I_y = M \frac{R^2}{4}$$



- le même disque en rotation autour de l'axe Oz , perpendiculaire au plan xOy du

$$\text{disque : } I_z = M \frac{R^2}{2}$$

- une sphère pleine de masse M et de rayon R en rotation autour de son centre :

$$I = \frac{2}{5} MR^2 .$$

Moment cinétique

Un objet ponctuel de masse m en mouvement circulaire sur une trajectoire de rayon r , est caractérisé par une inertie donnée par son **moment cinétique** (ou moment orbital ou encore moment angulaire) $\vec{L}$ défini comme :

$$\text{« le rayon vecteur } \times \text{ quantité de mouvement » : } \vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$$

Pour obtenir le moment cinétique d'un objet étendu, on fait la somme des moments cinétiques de ses éléments.

Dynamique en translation (ou Loi de Newton)

• 1^{ère} loi : Principe d'inertie

Le principe d'inertie s'observe dans des référentiels particuliers dits galiléens : un point matériel isolé (ou pour lequel les actions subies se compensent) dans un tel référentiel est soit au repos (coordonnées fixes), soit en mouvement uniforme continu.

Remarque : dans l'absolu, il n'existe pas de référentiel galiléen. On peut cependant, pour des mouvements de petite amplitude et de durée courte, considérer qu'un référentiel terrestre (et donc lié à la surface de la terre) est galiléen.

• 2^{ème} loi de Newton : PFD

Principe fondamental de la dynamique (PFD) (ou principe d'action)

Soit un point matériel de masse m . Si ce point est en mouvement accéléré ($\vec{\gamma} = \frac{d\vec{v}}{dt}$), celui-ci perçoit de la part du reste de l'univers une force, dite d'inertie qui s'oppose à la variation du mouvement, soit donnée par $\vec{F}_{ext \rightarrow M} = -m\vec{\gamma} = -m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{d\vec{p}}{dt}$.

En conséquence un mouvement de translation peut être décrit par l'application du PFD qu'on peut écrire sous la forme : $\sum \vec{F} = \vec{0}$

en incluant dans les forces présentes la force d'inertie $\vec{F}_{in} = -m\vec{\gamma}$.

• 3^{ème} loi de Newton : Action-réaction

Si deux objets M_1 et M_2 sont en interaction, les forces d'interaction s'équilibrent : $\vec{F}_{M1 \rightarrow M2} + \vec{F}_{M2 \rightarrow M1} = \vec{0}$ (principe de l'action-réaction).

Dynamique en rotation (ou Théorème du moment cinétique)

Le principe d'inertie s'applique en rotation, de façon analogue à la translation.

La 1^{ère} loi stipule que le moment cinétique total se conserve si le moment résultant des forces extérieures est nul.

La deuxième loi (ou PFD) pour la rotation s'exprime sous la forme d'un théorème dit du moment cinétique :

« La variation du moment cinétique est égale à la somme des moments des forces en présence ».

$$\text{ou } \frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \vec{M} = \sum (\vec{r} \wedge \vec{F})$$

Si on désigne par $\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ l'accélération angulaire, la loi s'écrit :

$$\sum \vec{M} = I \vec{\alpha}$$

La 3^{ème} loi s'applique de la même façon que pour les translations en remplaçant force par moment de force.

Mouvement d'oscillation

Les mouvements (translation et/ou rotation) s'effectuent très souvent de façon oscillatoire autour d'une position d'équilibre. Le pendule en est un exemple courant.

Le pendule

(Wikipedia) Le mot pendule (nom masculin) nous vient d'Huyghens et du latin *pendere*. Il s'agit donc à l'origine d'un système oscillant sous l'effet de la pesanteur. Parmi les célèbres pendules, c'est sans doute celui de Foucault qui est le plus connu. Plus généralement, on a désigné par « pendule » *tout dispositif qui, écarté de sa position d'équilibre, y retourne en décrivant des oscillations, sous l'effet d'une force, par exemple la pesanteur*. Par ailleurs, le mot « pendule » est utilisé en référence à l'objet « pendule simple » quand bien même son mouvement n'est plus « pendulaire » (on parle ainsi de pendule conique). Enfin, le mot « pendule » (nom féminin) désigne à l'origine les horloges dont la régulation était assurée par l'oscillation d'un pendule, appelé balancier.

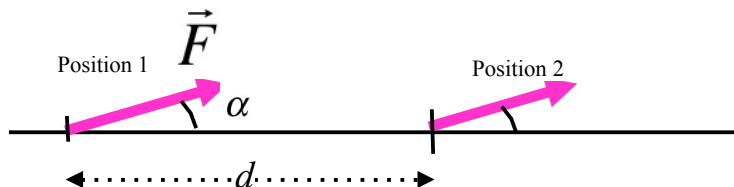
Les mouvements d'oscillations autour d'une position d'équilibre sont observés de façon très fréquentes. Les oscillations, ou **vibrations** sont à l'origine des **ondes**, une forme de transport d'**énergie** ou de **signaux** (qui ne sont rien d'autres que de l'énergie en faible quantité), dans les systèmes ou milieux constitués d'oscillateurs élémentaires couplés entre eux.

Travail

Travail en translation

Une force dont le point d'application se déplace dans un repère donné, effectue dans celui-ci, un travail ; ce travail correspond à une variation de l'énergie de l'objet qui a subi l'action de la force. Le travail est défini comme « la force x le déplacement ». Si la force fait un angle avec la trajectoire, il faut en tenir compte :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = |\vec{F}| |\vec{d}| \cos \alpha$$



L'unité de travail est le Joule [J] . $[J] = [N \cdot m] = \left[\frac{kg \cdot m^2}{s^2} \right]$.

Le travail est une grandeur positive ($W > 0$) si déplacement et force ont le même sens, négative dans le cas contraire ($W < 0$).

On obtient le travail d'une force qui se déplace le long d'une trajectoire quelconque, par intégration : $W = \int_{s1}^{s2} \vec{F} \cdot \vec{s} \, ds$.

Travail en rotation

En rotation, le travail est défini comme le produit « moment x variation angulaire sur la trajectoire » : $dW = \vec{M} \, d\varphi$

Energie

L'énergie est une grandeur essentielle dans la description des processus physiques. Elle prend différentes formes : mécanique, thermique, électrique, électromagnétique, ...

L'énergie est une grandeur caractéristique de l'état d'un système physique :

- en déplacement dans un référentiel (position, vitesse),
- mouvements aléatoires microscopiques (chaleur)
- mouvements périodiques des parties le constituant (oscillations)
- mouvements de charges électriques,
- état de ses liaisons moléculaires,
-

Principe de conservation de l'énergie :

L'énergie totale d'un système isolé se conserve.

L'énergie peut être modifiée par le travail fourni par le système ou celui qu'on lui fournit. Son état (vitesse, température, volume, ...) est alors modifié. La variation d'énergie correspond à la quantité de travail fourni dans un sens ou dans l'autre.

Energie cinétique

Un corps de masse m en mouvement de translation à la vitesse v , dans un repère donné possède une énergie cinétique de translation donnée par : $E_c = \frac{1}{2} m v^2$.

Dans le cas d'un mouvement de rotation, à la vitesse angulaire ω , et de moment d'inertie I , l'énergie cinétique est égale à : $E_c = \frac{1}{2} I \omega^2$

Energie potentielle

L'énergie potentielle est une forme d'énergie qui dépend de la position dans un champ (gravitationnel ou électrique) ou qui apparaît dans les corps élastiques en déformation.

Dans l'un ou l'autre cas, on peut définir une situation, ou position correspondant à une énergie potentielle qu'on prend pour référence (on peut choisir la valeur 0). Une force qui s'applique à un corps sensible au champ considéré, augmente ou diminue l'énergie potentielle de ce corps. L'énergie potentielle E_{pot} est égale au travail qui doit être fait pour déplacer un l'objet de la position de référence où l'énergie potentielle est nulle, jusqu'à la nouvelle position.

Dans le cas d'un mouvement oscillatoire, l'énergie potentielle est définie par rapport à la situation de repos ou d'équilibre.

L'énergie potentielle dans un champ de gravitation est égale à $E_p = m g h$.

L'énergie potentielle de déformation élastique d'un ressort déformé d'une longueur A par rapport à sa longueur de repos est égal au travail fourni par la force de rappel du ressort :

$$E_p = \int_0^A kx \, dx = \frac{1}{2} k A^2.$$

Puissance

La puissance (unité : le watt [W]) est défini comme le rapport Travail / Temps.

Comme le travail d'une force $\vec{F}$ s'appliquant à un objet ponctuel en translation est défini comme $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ la puissance développée par cette force est $P = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$

En rotation on a : $P = M \omega$.

Comparaison Translation – Rotation

	Translation	Rotation
Inertie définie par	la masse m	le moment d'inertie I (M.L ²)
vitesse	V (M.T ⁻¹)	ω
Accélération (linéaire/angularaire)	γ	α
Seconde loi de la dynamique	$F = m \cdot \gamma$	$M = I \cdot \alpha$ (moment)

Quantité de mouvement	$p = m \cdot v$	$L = I \cdot \omega$
Energie cinétique	$E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$	$E_{cin} = \frac{1}{2} I \omega^2$
Puissance	$P = F \cdot v$	$P = M \cdot \omega$

Mouvement : Equation de Lagrange

L'état d'un système peut être défini par un ensemble de paramètres (ou coordonnées générales) $\{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ n étant le nombre de degrés de liberté.

On écrit les expressions des énergies potentielles et cinétiques du système pour en déduire les équations de mouvement.

L'énergie cinétique s'exprime en fonction $\{\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_n\}$, les dérivées par rapport au temps de ces paramètres, qui sont de nouvelles variables du système.

La Fonction de Lagrange $L(q, \dot{q})$ est une fonction des deux ensemble de variables :

$$L = \frac{1}{2} a(q) \dot{q}^2 - U(q)$$

Les équations de Lagrange se présentent sous la forme de relations entre les dérivées partielles de la fonction $L(q, \dot{q})$ par rapport aux deux variables.

Pour un système isolé sans frottements à 1 ddl (et donc un paramètre x) :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial x} \right) = 0.$$

Pour un système à n ddl :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = 0 \quad (i = 1 \dots, n).$$

Cas d'un oscillateur libre sans frottement (système masse-ressort).

Soit x l'écart par rapport à la position d'équilibre.

Energie cinétique : $E_{cin} = \frac{1}{2} m \dot{x}^2$; Energie potentielle : $E_{pot} = \frac{1}{2} K x^2$

Le Lagrangien ou fonction de Lagrange (différence entre énergie cinétique et énergie potentielle) s'écrit : $L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - \frac{1}{2} K x^2$

On en déduit : $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial x} \right) = m \frac{d^2 x}{dt^2} - (-Kx) = 0$ soit $m \frac{d^2 x}{dt^2} + Kx = 0$

équivalent à la loi fondamentale de la dynamique $\sum F = 0$.

Equivalence électrique : $\sum v = 0$ (loi des mailles en comptant dans la somme la tension extérieure imposée avec le signe -).

On utilise aussi le terme de force vive pour désigner la quantité $m\dot{x}^2 = mv^2$ (le double de l'énergie cinétique). Le terme se trouve dans le **théorème des 'forces vives'** : La variation de l'énergie cinétique d'un corps pendant un temps donné est égale au travail transféré à ce corps (ou fourni par lui) pendant le même temps (cas d'un système purement mécanique).

MÉCANIQUE DES SOLIDES

Elasticité des corps solides

Les corps solides sont plus ou moins déformables sous l'action des forces qu'on leur applique. Le rapport de la contrainte qu'on leur applique à la variation relative de dimensions caractérise leur élasticité. La contrainte (force par unité de surface) peut être normale (σ) ou tangentielle à la surface (τ).

Le module d'élasticité ou module d'Young, est le rapport $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ où $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ dans le cas d'une déformation réduite essentiellement à une direction (une tige ou un ressort). On appelle loi de Hooke la relation de proportionnalité entre contrainte et déformation.

Dans le cas d'une striction (ou cisaillement), on a une déformation définie par :

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \varepsilon$$

où $\nu = \frac{\Delta d/d}{\Delta L/L}$ est le coefficient de Poisson . On définit dans ce cas un module de rigidité

G (ou module de Coulomb) tel que $G = \frac{\text{contrainte tangentielle}}{\text{angle de cisaillement}} = \frac{\tau}{\gamma}$.

G et E sont liés par le coefficient de Poisson suivant : $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

MÉCANIQUE DES FLUIDES

Notions de base

Les fluides (liquide et gaz) font l'objet d'une description spécifique. Les notions développées sont la pression, le flux, la densité, la tension superficielle, la capillarité.

On distingue l'hydrostatique (fluides au repos) et l'hydrodynamique (fluides en mouvement).

Les lois fondamentales sont l'équation de conservation de la masse et l'équation d'Euler.

Conservation de la masse

$$\frac{\partial m_v}{\partial t} + \nabla \cdot (m_v \vec{u}) = 0 ; m_v \text{ masse volumique ; } \vec{u} \text{ vitesse moyenne .}$$

Equation d'Euler

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F}_{ext.m} - \frac{\nabla p}{m_v}$$

$\vec{F}_{ext.m}$ résultante de force extérieure par unité de masse du liquide ; p, pression locale.

l'équation de Navier-Stokes

qui permet de décrire l'écoulement de liquides visqueux incompressibles.

Loi de Bernoulli

Lors de l'écoulement d'un liquide visqueux la pression diminue le long du tube à cause du travail des forces de frottements (Loi de Bernoulli) :

$$\left(p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 \right) - \left(p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \right) = \Delta p$$

Fluides en équilibre

Fluide soumis à la seule action de la pesanteur

$$\overrightarrow{\text{grad } P} = \rho \vec{g}$$

Après projection sur l'axe OZ vertical descendant

$$\frac{dP}{dz} = \rho g$$

MÉCANIQUE DES GAZ ET THERMODYNAMIQUE

Gaz parfait

Le gaz parfait est un modèle thermodynamique décrivant le comportement de tous les gaz réels à basse pression p.

Ce modèle a été développé au XIX^e siècle en constatant que tous les gaz tendent vers ce même comportement à pression suffisamment basse, quelle que soit la nature chimique du gaz ce qu'exprime la loi d'Avogadro, découverte en 1811 : la relation entre la pression, le volume et la température est, dans ces conditions, indépendante de la nature du gaz. Ceci paraissait tellement extraordinaire qu'il fallut du temps pour y croire (voir l'article Nombre d'Avogadro). Cette propriété s'explique par le fait que lorsque la pression est faible, les particules de gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour pouvoir négliger les interactions d'ordre électrostatique qui dépendent, elles, de la nature physico-chimique du gaz (molécules plus ou moins polaires). De nombreux gaz réels vérifient avec une excellente approximation le modèle du gaz parfait, dans les conditions normales. C'est le cas des gaz principaux de l'air, le diazote et le dioxygène.

Sur les plans macroscopiques, on appelle gaz parfait tout gaz vérifiant simultanément :

loi de Boyle-Mariotte

à température constante, le produit de la pression p par le volume V: pV est considéré comme constant lorsque la pression est faible.

loi d'Avogadro

tous les gaz ont le même volume molaire dans les mêmes conditions de pression et de température.

Sur le plan microscopique, la théorie cinétique des gaz permet de retrouver ce comportement de gaz parfait : un gaz parfait est un gaz dont les molécules n'interagissent pas entre elles en dehors des chocs et dont la taille est négligeable par rapport à la distance intermoléculaire moyenne. L'énergie du gaz parfait est donc la somme de l'énergie cinétique du centre de masse des molécules et de l'énergie interne de chaque molécule (rotation, oscillation). Lorsque ces deux énergies sont proportionnelles, on a le Gaz parfait de Laplace.

$$pV = n RT = n N_A k_B T = N k_B T$$

Nombre d'Avogadro et mole

Le nombre (ou constante) d'Avogadro (désigné par le symbole N_A) (du Physicien Amedeo Avogadro) correspond au **nombre d'atomes dans 12 grammes de l'isotope 12 du Carbone**. Ce nombre est égal à $6,02214179 \times 10^{23}$ soit approximativement $6,022 \times 10^{23}$.

Le nombre d'Avogadro correspond également au facteur de conversion entre le gramme et l'unité de masse atomique (u) : $1 \text{ gramme} = N_A \text{ u}$. En multipliant le nombre d'Avogadro par la charge électrique élémentaire e, on obtient la **constante de Faraday**.

On appelle **mole** (symbole : [mol]) la **quantité de matière d'un système contenant N_A atomes** ; la mole, très utile en physique-chimie, est, depuis 1971, une unité de base du système international. Le nombre d'Avogadro s'écrit donc $N_A = 6,0221353 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Formulé de manière plus compréhensible, la mole est une unité de comptage au même titre que la "vingtaine" ou la "douzaine". De la même manière, qu'il y a autant d'éléments dans une douzaine de pommes que dans une douzaine d'œufs, il y a le même nombre d'atomes dans une mole de carbone que dans une mole de plomb. Un échantillon de matière, même de petite taille, contient un très grand nombre d'atomes. Par exemple, 1 gramme d'aluminium contient environ $0,22 \times 10^{23}$ atomes (22 333 000 000 000 000 000 000 atomes). C'est pour éviter d'utiliser d'aussi grands nombres, qu'on a créé cette unité de mesure, la mole.

Constante de Boltzmann

La constante de Boltzmann k (ou k_B) a été introduite par Ludwig Boltzmann lors de sa définition de l'entropie en 1873. Un système physique étant à l'équilibre macroscopique, mais libre d'évoluer à l'échelle microscopique parmi Ω micro-états différents, son **entropie** S est donnée par : $S = k_B \ln \Omega$

$k_B \approx 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ peut s'interpréter comme le facteur de proportionnalité reliant la température d'un système à son énergie thermique. En effet, la température d'un objet², est ainsi définie plus précisément : le kelvin noté K permet une mesure quantitative de la température. Au cours du XIX^e siècle, les Physiciens ont pris conscience que la sensation de chaud ou de froid est en fait un transfert d'énergie d'un corps vers un autre, sous forme de chaleur. La perception de la température n'est donc rien d'autre que la manifestation d'un transfert d'énergie, l'énergie thermique via une constante de proportionnalité qui se trouve être k_B : $E_{\text{thermique}} = 1/2 k_B T$.

La **constante des gaz parfaits** est le produit de la constante de Boltzmann k par le nombre d'Avogadro $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

² <https://fr.wikipedia.org/wiki/Température>

ELECTRICITÉ ET ELECTROMAGNÉTISME

Charges et courants

Charges électriques

La matière est constituée de particules dont certaines ont une caractéristique appelée **charge électrique**. Il existe deux types de charges. La charge portée par l'électron est dite par convention « négative ». Les protons, particules constituant avec les neutrons la partie centrale de l'atome, appelée noyau, ont une charge de même valeur absolue, mais de sens opposé. Un atome comportant le même nombre d'électrons et de protons, est électriquement neutre. Les phénomènes électriques apparaissent lorsque charges positives et charges négatives ne se compensent pas localement, à l'échelle de l'atome.

Les charges peuvent être :

- ponctuelles, par exemple celle d'un électron ($q = -e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ,
- localisées dans un petit volume (densité de charges $\rho \text{ [C.m}^{-3}\text{)]}$,
- distribuées uniformément sur une surface (charge par unité de surface $\rho_s \text{ [C.m}^{-2}\text{)]}$).

La charge d'une particule est à l'origine d'une propriété de l'espace qui l'entoure qu'on appelle le champ électrique.

Courant électrique

Dans les situations où les charges électriques sont libres de se déplacer à une vitesse $\vec{v}(r,t)$, par exemple sous l'action d'un champ extérieur $\vec{E}$ (une propriété de l'espace due à la présence d'autres charges électriques et définie plus loin), à une densité de charges $q_v(r,t)$ par unité de volume on pourra faire correspondre un **courant électrique** de densité telle que :

$\vec{j}(r,t) = q_v(r,t) \cdot \vec{v}(r,t)$. L'unité est l'ampère [A], une unité fondamentale, définie à partir de la force qui apparaît entre deux conducteurs parallèles placés dans le vide.

On caractérise les matériaux qui possèdent des charges électriques libres de se déplacer et non pas liées aux atomes (matériaux conducteurs ou semi-conducteur), par un coefficient de conductibilité σ . L'inverse de σ est la résistivité notée ρ . L'application d'un champ

électrique produit un courant
$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} .$$

Dans un circuit parcouru par un courant électrique, le **sens du courant** (indiqué par une flèche) est par convention, le sens de **déplacement des charges positives** (même si dans la réalité, ce sont (presque) toujours des électrons et donc des charges négatives qui circulent).

Conservation des charges électriques

La charge électrique est conservée, ce qui s'exprime par la loi dite de conservation des

charges :
$$\Delta \cdot \vec{j} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 .$$

Champ électrique

Champ électrique dans le vide

Une charge électrique q_i isolée dans un espace vide, crée dans cet espace, un **champ électrique** telle que :
$$\vec{E}_{(O) \rightarrow (M)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r^2} \vec{i} .$$

Le coefficient de proportionnalité $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9 \text{ S.I}$ entre champ et charge s'exprime en fonction de la grandeur $\epsilon_0 \approx 8,85418.10^{-12} \text{ S.I.}(kg^{-1}.m^{-3}.A^2.s^4)$ appelée **permittivité électrique** du vide. La présence de matière modifie ce coefficient.

Par convention le champ est orienté des charges positives vers l'extérieur, et de l'extérieur vers les charges négatives.

Quand un champ électrique est présent dans une région de l'espace, la notion de flux de ce champ est utile. Le **flux électrique** à travers une surface est défini comme

Flux de $\vec{E}$ = (composante moyenne normale de $\vec{E}$ à la surface) x (la surface)

Les relations entre les champs électriques et magnétiques et les charges électriques font apparaître également la notion de « **circulation** » le long d'une boucle dans l'espace.

La « circulation » le long d'une boucle est définie comme suit :

« circulation de $\vec{E}$ le long de la boucle » =

(composante tangentielle moyenne de $\vec{E}$) x (la circonférence de la boucle)

Lorsque le champ en un point est dû à plusieurs charges, le champ résultant est la somme vectorielle des champs créés par les différentes charges.

Deux particules chargées situées à une distance r l'une de l'autre, interagissent par le biais d'une force, dite électrostatique ou de **Coulomb**, donnée par :

$$\vec{F}_{q_1 \leftarrow q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{i} = q_2 \cdot \vec{E}_{(O) \rightarrow (M)}.$$

Potentiel électrostatique et différence de potentiel (ddp)

La notion de champ peut être complétée par celle de **potentiel électrostatique** (ou **potentiel électrique** ou encore **potentiel scalaire**), une grandeur scalaire V attribuée à chaque point de l'espace subissant l'influence d'une ou plusieurs charges. Des charges électriques réparties dans un domaine borné Ω avec une densité $\rho(x,y,z)$ au point $M_i(x_i,y_i,z_i)$ créent, en un point $M_j(x_j,y_j,z_j)$ un potentiel scalaire $V(x_j,y_j,z_j)$ tel que :

$$V(x_2,y_2,z_2) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \frac{\rho(x_1,y_1,z_1)}{r_{12}} dx_1 dy_1 dz_1,$$

avec $r_{12} = \text{distance}[M_1(x_1,y_1,z_1) \rightarrow M_2(x_2,y_2,z_2)]$.

Le champ se déduit donc du potentiel par la relation :

$$\vec{E}(x_2,y_2,z_2) = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{\Omega} \frac{\rho(x_1,y_1,z_1)}{(r_{12})^2} dx_1 dy_1 dz_1 \right] \vec{i}.$$

avec $\vec{i} = \text{vecteur unitaire sur l'axe}[M_1(x_1,y_1,z_1) \rightarrow M_2(x_2,y_2,z_2)]$,

qu'on peut écrire aussi (en utilisant l'opérateur Laplacien) : $\vec{E} = -\text{grad}(V) = -\vec{\nabla} V$.

Une différence de potentiel (**ddp** ou tension électrique) crée un mouvement de charges si celles ci sont libres de se déplacer. L'unité de ddp est le **volt**, défini comme la tension nécessaire pour communiquer à une charge de 1 C, une énergie de 1 joule (

1 volt = $\frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}}$). L'unité de champ électrique est donc le volt par mètre.

Champ électrique et matière : densité de flux électrique

Lorsqu'un matériau diélectrique subit l'action d'un champ électrique $\vec{E}$, la distribution des charges électriques de ce dernier est modifiée. Le milieu devient polarisé électriquement. La polarisation électrique $\vec{P}_e$ en un point M est donnée par :

$$\vec{P}_e(M) = \epsilon_0 \chi_{el} \vec{E}(M)$$

χ_{el} est la susceptibilité diélectrique du milieu. χ_{el} est réel dans un milieu isotrope, matriciel dans un milieu inhomogène et/ou anisotrope.

Il en résulte un champ vectoriel électrique différent de celui existant en l'absence de milieu. Ce champ est appelé **induction électrique** (également **déplacement électrique** ou **densité de flux électrique**) noté $\vec{D}$ [C/m²] et donné par : $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_e = \epsilon \vec{E}$ avec $\epsilon =$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \text{ et } \epsilon_r = 1 + \chi_{el} = n^2$$

ϵ_0 est la permittivité du vide, ϵ est la permittivité du milieu; n est l'indice de réfraction qu'on utilise en optique et défini comme le rapport de la célérité de la lumière dans le vide à sa célérité dans le matériau.

Continuité du champ électrique à l'interface entre 2 milieux.

A l'interface entre 2 milieux diélectriques en présence de charges de surface, on a :

$$\vec{n}_{12} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s$$

$$\text{La composante tangentielle du champ est nulle : } \vec{n}_{12} \cdot (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0$$

Champ magnétique

Champ magnétique (associé à un déplacement de charges électriques)

Le déplacement des charges électriques fait apparaître dans l'espace vide environnant, un autre champ vectoriel, le **champ magnétique** ; on le désigne par $\vec{B}$ (unité le tesla [T] en Vs.m⁻²). $\vec{B}$ est aussi appelé **vecteur induction magnétique**.

Comme pour le champ électrique, il est intéressant d'introduire la notion de **flux magnétique** à travers une surface :

$$\text{Flux de } \vec{B} = (\text{composante moyenne normale de } \vec{B} \text{ à la surface}) \times (\text{la surface}).$$

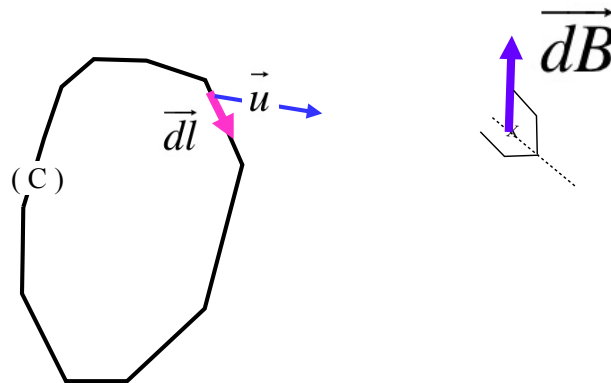
De même il est utile de considérer la grandeur « **circulation** » de $\vec{B}$ qui est telle que :

$$\text{« circulation de } \vec{B} \text{ le long de la boucle »} =$$

$$(\text{composante tangentielle moyenne de } \vec{B}) \times (\text{la circonférence de la boucle})$$

Le champ créé par un courant d'intensité I circulant le long d'un fil est donné par la **loi de Bio et Savart**. Considérons la courbe géométrique (C) représentant un circuit filiforme fermé, et soit r' un point de cette courbe. On suppose que le milieu entourant le circuit est vide de toute matière. On note $\vec{dl}$ le vecteur déplacement élémentaire tangent à la courbe (C) au point r' . On considère un point de coordonnée r en dehors du circuit. Soit $\vec{u}$ le vecteur unitaire de la droite reliant le point r' au point r . L'élément de courant au point r' crée au

$$\text{point } r, \text{ un champ } \vec{dB} \text{ tel que : } \vec{dB}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot \vec{dl} \wedge \vec{u}}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2}.$$



Le champ créé en r par l'ensemble du circuit est obtenu par intégration sur la courbe (C),
soit : $\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{u}}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2}$ (loi de Biot-Savart).

où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ kg.m/A.s² est une constante fondamentale, appelée **perméabilité magnétique** du vide.

Champ magnétique créé par une charge élémentaire en mouvement.

Soit $\vec{v}$ la vitesse de la particule chargée (charge q). Le mouvement de cette charge unique est équivalent à un courant $i \cdot d\vec{l} = q \cdot \vec{v}$. Le champ magnétique en un point à la distance d est égal à : $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \cdot d\vec{l} \wedge \vec{u}}{d^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \vec{v} \wedge \vec{u}}{d^2}$.

On montre³ que le champ magnétique et le champ électrique d'une charge en mouvement sont reliées par : $\vec{B} = (\mu_0 \epsilon_0) \vec{v} \wedge \vec{E}$.

Potentiel vectoriel (ou vecteur)

La modification de l'espace par le mouvement des charges électriques s'exprime également par le biais d'un « potentiel vectoriel » $\vec{A}(M)$ défini par la relation :

$$\vec{A}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{i(M')}{r_{MM'}} dV' \quad (i(M') \text{ est la densité de courant au point } M'),$$

tel que $\text{div}(\vec{A}(M)) = 0$.

Le champ magnétique dérive de ce potentiel vectoriel suivant :

$$\text{div}(\vec{B}(M)) = \text{rot}(\text{div}(\vec{A}(M))).$$

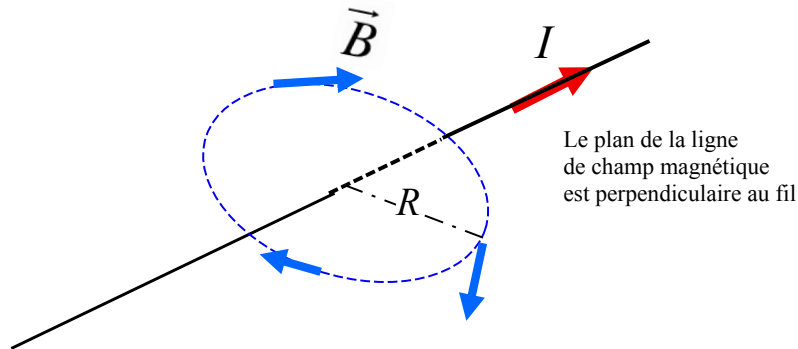
Le champ électrique et les potentiels V et A sont reliés comme suit :

$$\vec{E} = -\text{grad}(V) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}.$$

³ Physique, H. Benson, 4^{me} éd., Tome 2, Electricité et magnétisme, p 331

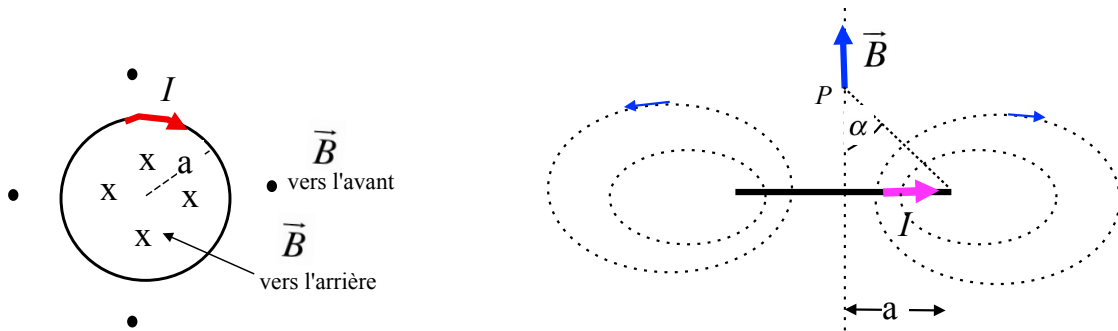
Champ magnétique créé par un fil conducteur de longueur infinie.

Le champ magnétique créé par un conducteur droit de longueur infinie, à la distance R de celui-ci est égal à $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}$.



Champ magnétique produit par une boucle de courant.

Considérons une boucle de courant de rayon a et parcourue par un courant d'intensité I .

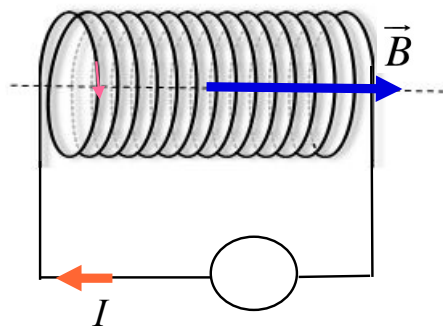


$$\text{Champ magnétique sur l'axe : } B = \mu_0 \frac{I}{2a} \sin^3 \alpha$$

Si la boucle est constituée de N spires de courant superposées, les contributions des spires vont s'ajouter, ce qui donne un champ sur l'axe de : $B = \mu_0 \frac{NI}{2a} \sin^3 \alpha$. Au centre de la

boucle le champ est maximum : $B = \mu_0 \frac{NI}{2a}$.

Dans le cas où les boucles ne sont pas superposées, on a un **solénoïde**. Le champ magnétique obtenu lors du passage d'un courant est intense et quasi uniforme à l'intérieur du solénoïde et presque nul à l'extérieur (les lignes de champ s'étalant à l'infini). A l'intérieur, il est égal à : $B = \mu_0 n I$, avec $n = N/L$ le nombre de spires par unité de longueur.



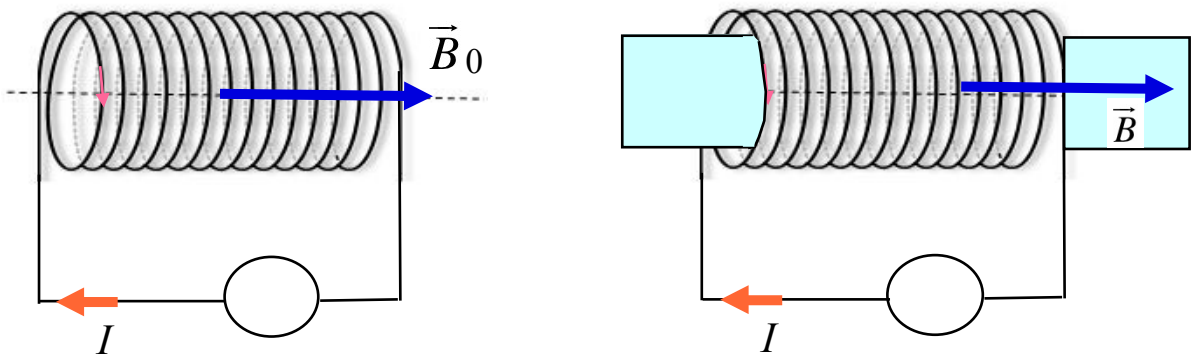
Electroaimant : un solénoïde parcouru par un courant

Une boucle de courant, ou un empilement de boucles comme dans le cas d'un solénoïde, forme un **électroaimant**. On l'utilise pour créer un champ magnétique à l'aide d'un courant électrique.

Le magnétisme a d'abord été connu comme la propriété de certains matériaux qu'on a appelé **aimants**. Le champ magnétique produit par les aimants, a pour origine les courants microscopiques au sein des atomes, ainsi qu'une propriété particulière des électrons à laquelle on donne le nom de **spin**. Cette propriété est étudiée dans le cadre de la physique quantique.

Champ magnétique et matière.

La présence de matière dans un espace dans lequel règne un champ magnétique créé par un aimant ou des courants électriques, modifie le champ. Si on appelle $\vec{B}_0$ le champ généré lorsque la bobine se trouve dans le vide, en présence d'un matériau, on aura un champ $\vec{B}$ différent.



La présence d'un matériau à l'intérieur du solénoïde modifie le champ magnétique.

Pour décrire le champ magnétique en présence de matière 'aimantée' on introduit la grandeur $\vec{H}$ pour désigner le champ extérieur (ou champ d'excitation) (ce qu'on a appelé $\vec{B}_0$ ci-dessus) ; on l'appelle **excitation magnétique** ou simplement **champ magnétique**. $\vec{H}$ ($A.m^{-1}$) et $\vec{B}$ sont reliés par la relation : $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$; μ est appelée **perméabilité magnétique** du matériau.

L'action du champ fait apparaître une **aimantation** du matériau $\vec{M}$ qui correspond au **moment magnétique** des boucles de courant élémentaires dans la matière. Un circuit électrique plan, de normale $\vec{n}$, d'aire S , petite par rapport à la distance d'observation, parcouru par un courant électrique d'intensité I , est caractérisée par un moment magnétique $\vec{M} = I S \vec{n}$.

Dans certains matériaux, dits matériaux magnétiques, on observe qu'un élément de volume dV autour d'un point M se comporte comme une boucle de courant de moment magnétique $d\vec{M}$. L'aimantation (ou polarisation magnétique $\vec{P}_m(M)$) est égale au moment magnétique créé par le volume dV centré sur M : $\vec{P}_m(M) = \frac{d\vec{M}}{dV}$.

La sensibilité du matériau au champ magnétique est appelée **susceptibilité magnétique** et désignée par un coefficient χ_{magn} tel que $\vec{M} = \chi_{\text{magn}} \vec{H}$.

Le champ magnétique total qui règne est la somme de l'excitation et de l'aimantation : $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = (1 + \chi_{\text{magn}}) \vec{B}_0 = \mu_r \vec{B}_0 = \mu_r \mu_0 \vec{H}$.

$\mu_r = 1 + \chi_{\text{magn}}$ est appelée **perméabilité relative** (du milieu par rapport au vide).

Certains matériaux sont **diamagnétiques** (les moments magnétiques induits tendent à diminuer le champ magnétique produit par rapport au vide ; $\chi_{\text{magn}} < 0$ et voisin de 10^{-5}), d'autres sont **paramagnétiques** ($\chi_{\text{magn}} > 0$ mais reste faible, voisin de 10^{-5}), d'autres encore, les plus intéressants d'un point de vue technique, sont **ferromagnétiques** ($\chi_{\text{magn}} \gg 0$, 200 par exemple pour le fer).

Quand le matériau est anisotrope, la relation entre excitation et aimantation peut être plus complexe. En particulier, ces deux quantités peuvent ne pas avoir la même direction. Dans ce cas, si l'on suppose qu'elles sont reliées par une relation linéaire, celle-ci est sous forme matricielle.

Continuité du champ magnétique aux interfaces entre 2 milieux.

A l'interface entre 2 milieux on a les conditions suivantes ($\vec{i}_s$ densité de courant électrique à l'interface) :

$$\vec{n}_{12} \cdot \vec{B}_2 - \vec{n}_{12} \cdot \vec{B}_1 = 0 \Rightarrow \text{conservation de la composante normale de } \vec{B}.$$

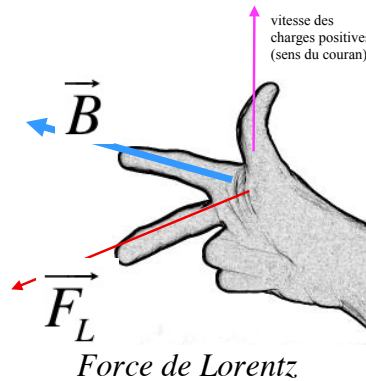
$$\vec{n}_{12} \cdot (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{i}_s \Rightarrow \text{conservation de la composante tangentielle de } \vec{H}.$$

Actions d'un champ magnétique sur les courants.

Les champs magnétiques ont pour origine les déplacements des charges. A l'inverse, un champ magnétique exerce une action (une force) sur des charges en mouvement, et donc les conducteurs parcourus par un courant électrique.

Action d'un champ magnétique sur une charge électrique en mouvement : force de Lorentz, force de Laplace

Un champ magnétique exerce une force sur des charges en déplacement. La force sur une particule de charge q se déplaçant à une vitesse $\vec{v}$ dans un champ magnétique est égale à : $\vec{F}_L = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ (force de Lorentz). Le sens de la force est trouvée avec la règle des 3 doigts.



Force de Laplace : Un conducteur de longueur dl traversé par un courant d'intensité i et placé dans un champ magnétique $\vec{B}$ subit de la part de celui-ci une force dite force de Laplace : $d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$. Le conducteur est en effet électriquement neutre (autant de charges négatives, les électrons, que de charges positives dans les noyaux des atomes), c'est le champ magnétique qui agit sur le conducteur.

Loi de Lenz (ou d'induction)

Les forces dues à un champ magnétique variable, agissant sur des charges électriques dans un conducteur sont à l'origine de force électromotrice (fém) induite qui tendent à s'opposer à la variation du champ. Une manifestation de ce phénomène est la loi de Lenz qui énonce que dans un circuit fermé plongé dans un champ variable, il apparaît un courant induit dont les effets s'opposent aux causes qui le produisent.

Force électromagnétique

La présence d'un champ électromagnétique dans un espace donné (champ électrique + champ magnétique) donne naissance à une force électromagnétique totale qui s'exerce sur une charge q en mouvement à la vitesse v présente dans cet espace :

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

Si on considère le cas d'une onde ém plane, on a $E = cB$

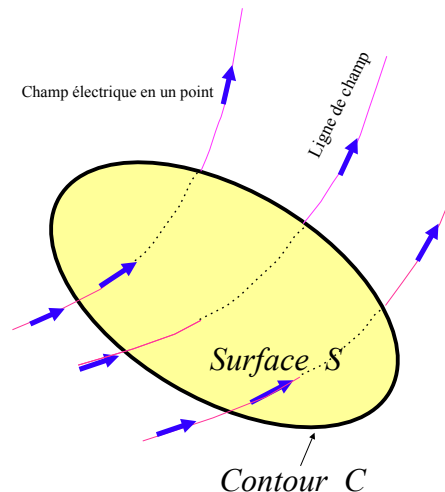
On écrit la force comme ci-après $\|\vec{F}\| \approx q \left(1 + \frac{v}{c}\right) E$ et constater que l'influence du champ magnétique ne devient significatif que pour des vitesses comparables à celles de la lumière.

Flux et circulation de champ (électrique ou champ magnétique)

Lorsque les champs électriques et magnétiques évoluent dans le temps, les variations de l'un entraînent des variations de l'autre. Ces interactions sont décrites par les équations de Maxwell. On introduit la notion de **flux** et de **circulation** pour décrire ces variations et leurs conséquences ;

Le flux

Dans une zone d'espace donnée on peut représenter le champ présent par des **lignes de champ**, obtenues en suivant les tangentes aux vecteurs champs aux différents points. Avec les lignes il est possible de définir un **flux** à travers une surface.



Le flux électrique à travers une surface la surface S est obtenu par la relation :

Flux = (composante moyenne normale de $\vec{E}$ à la surface) . (la surface).

La circulation

Les relations entre les champs font aussi intervenir la « **circulation** » le long d'une boucle. La circulation est définie comme suit :

Circulation de E le long de la boucle

= (composante tangentielle moyenne de $\vec{E}$) . (la circonférence de la boucle)

Lois de l'électromagnétisme dans le vide

Les charges électriques et leurs mouvements sont liées aux champs électriques et magnétiques qui leur sont associées, par des relations qui ont été découvertes au 19^{ème} siècle, en particulier grâce aux contributions majeures apportées par Faraday et Ampère, synthétisées par Maxwell en 1864.

1^{ère} loi (ou Théorème de Gauss) :

La 1^{ère} loi de l'électromagnétisme est obtenue en considérant une surface fermée à l'intérieur de laquelle se trouve une charge électrique :

$$[\text{Flux de } \vec{E} \text{ à travers une surface fermée}] = \frac{1}{\epsilon_0} [\text{la charge à l'intérieur de la surface}]$$

(ici l'espace est considéré comme vide, hormis la « charge » à l'intérieur de la surface S)

$$\text{Autre écriture (forme intégrale)} : \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_V \rho_v dV$$

Ce théorème peut être exprimé sous une forme locale : $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$

qui exprimée à travers le potentiel devient l'équation de Poisson : $\Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0$

2^{ème} loi (loi de l'induction électromagnétique découverte par Faraday) :

La 2^{ème} loi stipule que dans le cas d'une courbe fermée C, limitant une surface S, on a :

[Circulation de $\vec{E}$ le long de la courbe fermée $C = \frac{d}{dt}$ [flux de $\vec{B}$ à travers S]

Autre écriture :
$$\oint \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Deux autres lois font intervenir le champ magnétique.

3^{ème} loi (loi de conservation du flux de champ magnétique):

La 3^{ème} loi porte sur le flux de champ magnétique :

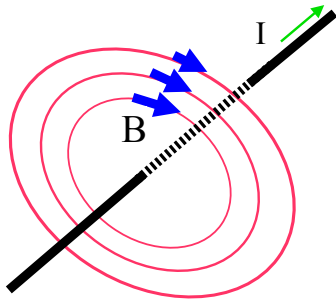
[Flux de $\vec{B}$ à travers une surface fermée] = 0

ce qui équivaut à dire qu'il n'y a pas de charge magnétique

Forme intégrale :
$$\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

4^{ème} loi (loi d'Ampère):

La 4^{ème} loi est obtenue à partir de la loi de Biot et Savart sur une boucle fermée quelconque (qui a priori n'est pas un circuit électrique). Le théorème correspondant, dit théorème d'Ampère, permet de déterminer le champ magnétique créé par un courant électrique dans une situation où il ne peut y avoir d'accumulation de charges électriques, et donc de création d'un champ électrique. Un exemple simple est le cas du champ magnétique créé par le courant circulant dans un conducteur filiforme infini montré ci-après.



Dans ce cas, la relation entre l'intégrale curviligne sur un contour fermé autour d'un fil parcouru par un courant d'intensité I s'écrit
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

L'accumulation de charges électriques comme cela se produit dans un condensateur fait apparaître un champ électrique dont les variations contribuent également au champ magnétique. Cette contribution au champ B , appelé *courant de déplacement* en relation avec les premières explications de son origine, est proportionnelle aux variations du flux de champ électrique à travers la surface limitée par la courbe fermée le long de laquelle le champ magnétique est intégré.

Expression de la 4^{ème} loi à partir de la circulation de champ magnétique :

$$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \cdot [\text{Circulation de } \vec{B} \text{ le long de la courbe fermée } C = \frac{d}{dt} [\text{flux de } \vec{E} \text{ à travers } S] + \frac{\text{flux du cour. élec. à travers } S}{\epsilon_0}]$$

ce qui signifie que le champ magnétique a pour origine le mouvement des charges électriques et les variations du champ électrique.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left[\sum I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right]$$

Autre écriture :

Forme différentielle des lois de l'électromagnétisme (ou équations de Maxwell)

Les lois de l'électromagnétisme s'écrivent sous la forme différentielle (ou locale) comme suit :

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{Maxwell-Gauss}) \quad (\text{ou } \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0})$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{ou } \nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}) \quad (\text{Maxwell-Faraday})$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{ou } \nabla \cdot \vec{B} = 0) \quad (\text{Maxwell-Thomson})$$

$$\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Lois de l'électromagnétisme dans la matière

La présence de matière modifie les champs électrique et magnétique. Diverses grandeurs sont introduites pour tenir compte de ces effets (susceptibilité électrique, susceptibilité magnétique, excitation magnétique, déplacement électrique). Les équations de Maxwell en présence de matière s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{div}(\vec{D}) &= \rho ; \quad \text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div}(\vec{B}) &= 0 ; \quad \text{rot}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned}$$

Electromagnétisme – conditions à une interface chargée (relations de passage)

Voir [4]

Surface considérée : pellicule d'épaisseur δ – densité de charges surfaciques $\sigma(M,t)$ – densité volumique $\rho(M,t)$ tels que $\sigma(M,t) = \delta \rho(M,t)$.

Idem pour le courant $j(M,t)$

Résultat :

- La composante tangentielle de champ électrique est toujours continue.
- En présence de courants surfaciques, la composante tangentielle de champ magnétique est discontinue.

Les relations de passage :

⁴ Physique des ondes – Stéphane Olivier, Lavoisier, TecDoc 1996, p37

Composantes normales

$$E_{2n} - E_{1n} = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma \quad \text{et} \quad B_{2t} - B_{1t} = 0$$

Composantes tangentielles

$$E_{2t} - E_{1t} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{B}_{2t} - \vec{B}_{1t} = \mu_0 \vec{j}_s \wedge \vec{n}_{1 \rightarrow 2}$$

complété par les relations pour les potentiels :

$$V_1 = V_2 \quad \text{et} \quad \vec{A}_1 = \vec{A}_2 .$$

ELECTRICITÉ

La matière est en général électriquement neutre, charges positives et charges négatives, se compensant exactement. Dès qu'il y a accumulation locale de charges, les phénomènes électriques se manifestent. Les particules concernées sont les électrons, de charge négative, les protons de charge positive étant concentrés au centre des atomes. Les matériaux sont conducteurs, semi-conducteurs ou isolants. Pour décrire le mouvement des électrons dans les circuits électriques, il faut respecter des conventions, qui pour certaines sont apparues pour des raisons historiques, les phénomènes électriques étant restés longtemps mystérieux. La première convention porte sur le sens du courant électrique pris dans le sens positif pour des charges positives, alors que les charges qui se déplacent sont les électrons dont les charges sont négatives (une convention également). La 'compréhension' des phénomènes en pâtit ; il faut en conséquence de la rigueur dans l'écriture des relations.

Générateurs et récepteurs – Convention de signes

Les concepts physiques nécessaires pour décrire les phénomènes et systèmes électriques sont peu intuitifs. On associe de façon un peu rapide les phénomènes électriques à un problème de déplacement d'électrons. Les électrons se déplacent en effet mais l'énergie associée se trouve dans les champs créés par les particules « chargées ». Dans beaucoup de situations courantes, on peut se contenter de décrire les systèmes étudiés en considérant les variations de positions des charges (le « courant électrique ») et les différences de potentiels électriques (ou tension électrique) à l'origine de ces déplacements. Il convient cependant d'accorder une grande attention aux conventions utilisées pour les signes de ces courants et tensions.

Les systèmes électriques sont conçus pour produire, stocker, transporter de l' « **énergie électrique** » . Dans certains cas cette énergie est utilisée pour transmettre une information ; dans d'autres cas, l'énergie est produite et transmise, puis transformée en énergie mécanique, acoustique, thermique, photonique,

Les circuits électriques comportent

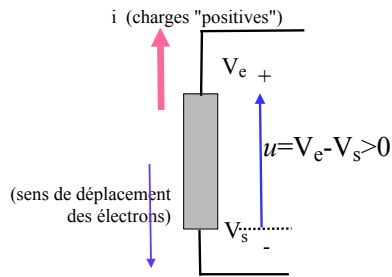
- des générateurs, c'est-à-dire des composants qui fournissent l'énergie électrique (qui y est stockée, ou transformée à partir d'une autre énergie),
- des récepteurs, ou composants qui reçoivent l'énergie électrique pour le stocker, le transformer.

La classification générateur-récepteur est un peu arbitraire car dans beaucoup de situations, un même composant peut jouer les deux rôles. Il faut donc adopter une convention et s'y tenir pour arriver à un résultat correct car les signes pour les tensions et courants dépendent de la convention adoptée.

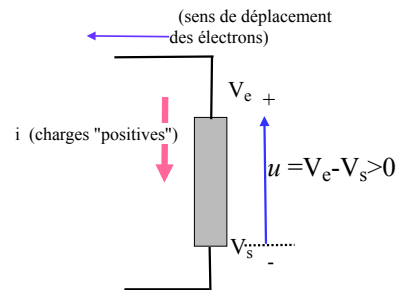
Convention de signes dans les circuits électriques

Pour les composants qui fournissent une puissance électrique on utilise la convention 'générateur'. Dans ce cas, c'est le dipôle qui impose la tension et le courant. Une tension 'positive' appelée f.e.m. (force électromotrice) impose un déplacement de charges positives dans le même sens. Les flèches correspondant à la tension et au courant sont dans le même sens (dessin).

Dans la convention récepteur, les sens des flèches pour le courant (sens de déplacement des charges positives) et la tension sont opposées. Les conventions de signe doivent être respectées lorsqu'on branche générateurs et récepteurs dans un même circuit.



générateur d'énergie électrique
(les flèches pour U et i sont dans le même sens)



récepteur d'énergie électrique
(les flèches de U et i sont en sens opposés)

V_e, V_s : potentiels électriques à l'entrée et à la sortie du dipôle (générateur ou récepteur)
 $U = V_e - V_s$: Différence de potentiel (ddp) aux bornes du dipôle. U est positive.

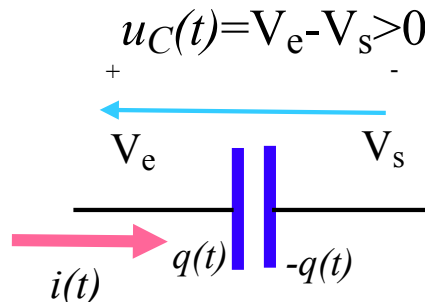
Un récepteur 'passif', la résistance.

Un récepteur d'énergie électrique peut être « passif » ; dans ce cas il transmet l'énergie électrique et en transforme une partie en chaleur. C'est le cas pour une résistance. Le courant électrique circule dans le sens de la diminution du potentiel (un peu comme un objet qui « tombe »). Les particules qui circulent effectivement, les électrons, remontent en réalité le potentiel. Dans un récepteur passif la ddp est proportionnelle à la quantité de charges qui

passent par unité de temps : $u = R \frac{dq}{dt} = Ri$. R est la « résistance » du composant.

Cas du condensateur

Le condensateur est un composant qui accumule des charges électriques s'il est soumis à une tension. Dans la convention récepteur, un condensateur apparaît sur un schéma comme suit. Les charges « positives » s'accumulent sur l'armature d'entrée, les charges « négatives » sur celle de sortie.



La capacité C du condensateur à accumuler et stocker les charges est définie comme le rapport entre la charge qui peut être accumulée pour une tension U_c appliquée : $C = \frac{Q}{U_c}$ (dans cette formule, Q est une charge positive). L'unité est le Farad (F).

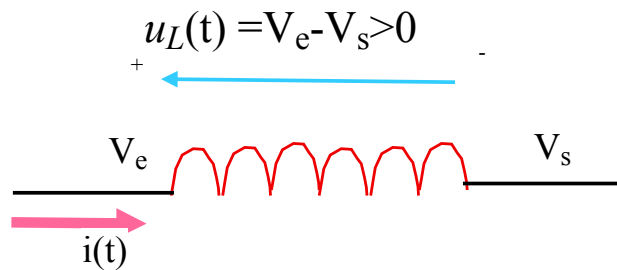
La ddp aux bornes d'un condensateur dépend de la charge $q(t)$ présente à un instant donnée sur l'armature. Le passage du courant fait varier cette charge suivant la relation

$i(t) = \frac{dq}{dt}$. La ddp varie en conséquence proportionnellement à la charge accumulée :

$$u_c(t) = \frac{q(t)}{C}.$$

La bobine d'induction

Le passage d'un courant dans un conducteur enroulé sous forme de bobine fait apparaître une ddp qui s'oppose à celle qui est appliquée.



La ddp résultante dépend donc des charges en mouvement (le courant) conformément à la loi d'induction. La bobine est donc caractérisée par son inductance L (exprimée en Henry), définie comme le rapport entre le flux magnétique $\Phi(t)$ et le courant $L = \frac{\Phi(t)}{i(t)}$. Comme dans le cas du condensateur, la ddp aux bornes de la bobine varie progressivement ; elle est proportionnelle à la variation de flux magnétique et en conséquence, du courant suivant la relation : $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$.

Capacité et inductance linéique d'un câble

Les lois de l'électrostatique nous permettent de déterminer les conductances et inductances par unité de longueur des câbles utilisés pour transporter les signaux électriques. Dans le cas d'un câble constitué de 2 fils cylindriques de rayon R et de conductibilité parfaite, séparés d'une distance d on obtient :

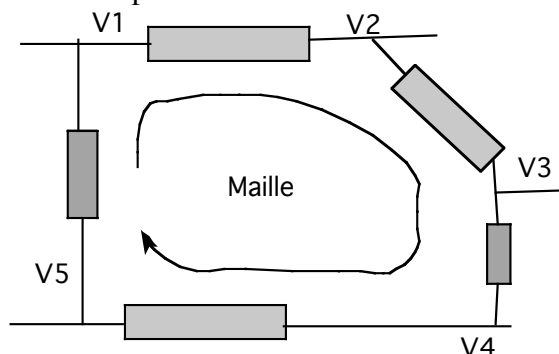
$$C_0 = \pi \epsilon_0 \left[\ln\left(\frac{d}{R}\right) \right]^{-1} \text{ et } L_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{d}{R}\right)$$

Il est intéressant de noter que $L_0 C_0 = \epsilon_0 \mu_0$.

Lois de Kirchhoff

Loi des mailles

Dans un circuit électrique, une maille est un chemin fermé le long du chemin suivi par les charges. La loi des mailles stipule que la somme algébrique des tensions (ou ddpp) le long d'une maille est égale à 0 : on change de potentiel le long du chemin, mais on revient au potentiel de départ.



$V1..5$ sont les potentiels le long de la maille. La loi des mailles s'écrit :

$$(V_2 - V_1) + (V_3 - V_2) + (V_4 - V_3) + (V_5 - V_4) + (V_1 - V_5) = 0.$$

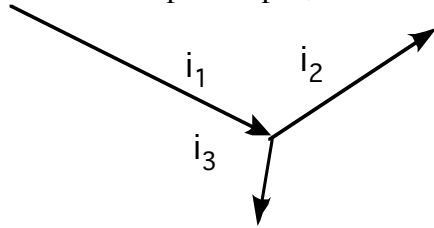
Dans une maille qui comporte des générateurs et des dipôles passifs, la loi des mailles s'écrit : $\sum E = \sum U_n$, et se formule de la façon suivante : « la somme des f.e.m. dans la maille est égale à la somme des chutes de tension dans les dipôles passifs ». C'est équivalent à dire que la somme algébrique des tensions le long de la maille est égale à zéro.

Loi des nœuds

Un nœud est un point de convergence de plusieurs branches dans un circuit. La loi des nœuds stipule que la somme algébrique des courants arrivant au nœud est égale à 0 :

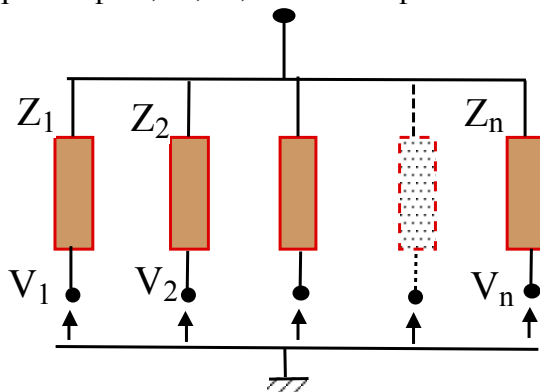
$$\sum_{n=1}^{n=N} i_n = 0. \text{ Le signe + est donné aux courants arrivant au nœud, le signe - aux autres.}$$

Dans l'exemple ci-après, la loi s'écrit : $i_1 - i_2 - i_3 = 0$.



Théorème de Millman

Soit un ensemble de composants d'impédances $Z_1, Z_2, \dots$ disposés en parallèle, comme indiqué ci-après, $V_1, V_2, \dots$ étant les potentiels à l'entrée de ces composants.



Le potentiel de l'extrémité commune est donné par la relation suivante : $V = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \frac{V_k}{Z_k}}{\sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{Z_k}}$

PHYSIQUE DES VIBRATIONS ET DES ONDES

La physique des vibrations et des ondes représente une grande partie de la physique. Tous les domaines des sciences et des techniques sont concernés par des phénomènes vibratoires. Il s'agit en effet ici de traiter de formes particulières de localisation, de stockage et de propagation de la grandeur de base de la physique, l'ÉNERGIE. L'énergie se manifeste, dans les phénomènes étudiés, dans les mouvements périodiques des corps, leurs déformations, les variations des champs de gravitation ou électromagnétique qui remplissent l'espace. A la notion d'énergie, il convient d'ajouter la notion de RÉSONANCE, pour décrire les transferts d'énergie et son accumulation dans certaines circonstances d'un grand intérêt pratique.

En étudiant les vibrations et les ondes, nous étudions :

- les situations dans lesquelles l'énergie reste localisée au voisinage d'un lieu, ou d'un objet, tout en changeant périodiquement de forme (les vibrations) ,
- les situations où l'énergie ne reste pas localisée et se propage, en présence ou en l'absence de matière (les ondes).

L'étude de la physique des vibrations et des ondes requiert une bonne connaissance des notions de base de la physique générale ; des connaissances en mathématiques sont également indispensables pour traiter les problèmes posés.

PHYSIQUE QUANTIQUE

Au début du 20^{ème} siècle une importante (r)évolution se produisit en physique. Une nouvelle approche se fit de plus en plus indispensable pour décrire la « réalité » physique. Des Physiciens comme Max Planck et Albert Einstein y ont apporté une contribution essentielle. Une constante est restée attachée au nom de l'un d'entre eux, la constante de Planck (h). L'hypothèse émise par ce dernier se révéla fructueuse : l'échange d'énergie entre un rayonnement ém et la matière ne peut se faire que par quantités discrètes $E=h\nu$ avec $h = 6,63.10^{-34}$ J.s⁻¹. Einstein utilisera cette propriété de la lumière dans ses développements théoriques sur l'interaction lumière-matière et fera en particulier l'hypothèse d'une forme spéciale d'émission par la matière, l'émission stimulée, à la base du fonctionnement des lasers. Quelques notions de physique quantique sont développées dans le cours « LASER » .

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

Une théorie que chacun d'entre nous utilise de façon quasi quotienne : La théorie de la relativité doit être prise en compte dans les dispositifs de géolocalisation.

Voir à ce sujet : [[*De la relativité au GPS – Quand Einstein s'invite dans votre voiture.*](#) Pierre Spahnou, Ellipses 2012]

Relativité restreinte

Introduite par A. Einstein, la relativité restreinte décrit les phénomènes observés lorsque la vitesse des objets se rapproche de la vitesse des ondes électromagnétiques.

Ce nouveau cadre a été développé au début du 20^{ème} siècle, pour résoudre les anomalies observées sur la périhélie de la planète Mercure. ⁶

[⁶] [[*De la relativité au GPS – Quand Einstein s'invite dans votre voiture.*](#) Pierre Spahnou, Ellipses 2012]

Relativité générale

La relativité générale offre un cadre plus général à la Physique en décrivant les phénomènes observés dans le cas de mouvement accélérés. Cette théorie conclue à une équivalence entre énergie et quantité de mouvement à travers la relation :

$$E = mc^2$$

E , l'énergie totale relativiste est donné par l'expression

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2 + m_0^2 c^2$$

[p] = kg m/s.

GRANDEURS PHYSIQUES ET UNITÉS

Grandeurs physiques

Grandeurs intensives

En physique et en chimie, une variable intensive est une quantité qui **ne dépend pas de la quantité de matière**. C'est le contraire d'une variable extensive.

On compte parmi les grandeurs intensives courantes :

La vitesse
l'accélération
la pression
la température
la densité de particule
la masse volumique
la tension superficielle
l'affinité chimique

En général une grandeur intensive est associée à une grandeur extensive.

Grandeur extensive

En thermodynamique d'équilibre, un paramètre extensif (ou une grandeur extensive) est un paramètre caractérisant un système physique qui est **proportionnel à la taille de ce système**, ce dernier étant supposé à l'équilibre et homogène.

On compte parmi les grandeurs extensives courantes :

la masse ;
le nombre de particules ;
le volume (la surface, la longueur) ;
la charge électrique ;
l'avancement chimique ;
l'entropie ;
l'enthalpie ;
le débit ;
les forces.

Les unités de mesure (Système International)

En 1983, la Conférence Internationale des Poids et Mesures a adopté un système d'unités physiques (le Système International ou SI) basé sur

- la masse (*m*),
- la célérité de la lumière (*c*) prise comme une constante et

- le temps (T).

Le système SI comprend 7 unités fondamentales et des unités dérivées.

Unités fondamentales.

- le **kilogramme** (kg) : c'est la masse du prototype international de platine iridié déposé au pavillon de Breteuil à Sèvres,

- la **seconde** (s) : c'est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux « hyperfins » de l'état fondamental de l'atome de césium 133, non perturbé ; l'incertitude sur la seconde est de 10^{-15} (anciennement la seconde était définie comme la 86 400 ème partie d'un jour solaire).

- le **mètre** (m) : c'est la distance parcourue par la lumière dans le vide en une fraction $1/299\,792\,458$ de seconde. L'incertitude est nulle, la vitesse de la lumière étant prise comme constante fondamentale.

- le **kelvin** (K) : c'est la fraction $1/273,15$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur).

- la **mole** (mol) : c'est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires (atome, molécule, ion) qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12.

- l'**ampère** (A) : c'est l'intensité d'un courant électrique qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à 1 m l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces 2 conducteurs, une force de $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre de longueur.

- la **candela** (cd) : c'est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est égale à $1/683$ W par stéradian.

A ces unités, il faut ajouter les unités d'angle, radian et stéradian.

Le **radian** est l'angle plan limité par deux rayons d'un cercle qui interceptent ce cercle en formant un arc dont la longueur est égale au rayon.

Le **stéradian** est l'angle solide (ou d'espace) qui correspond à un cône qui intercepte une sphère en découpant sur ce cercle une surface de superficie égale au rayon au carré.

Ces unités ne donnent plus entièrement satisfaction, compte tenu des développements récents de la physique. Des réflexions sont en cours pour redéfinir certaines d'entre elles, en particulier l'unité de masse qui repose toujours sur un prototype qui sert de référence.⁷

⁷ <http://www.metrologie-francaise.fr/fr/si/unites-mesure.asp>