

Interactions et champs

Cours de sciences physiques - niveau 1re

Une pomme tombe, un peigne frotté attire des petits morceaux de papier, une boussole se tourne vers le nord : aucun contact n'est nécessaire pour que ces objets agissent les uns sur les autres. Ce chapitre décrit les **interactions** à distance et introduit l'outil qui permet de les prévoir en tout point de l'espace : la notion de **champ**.

Ce cours est à **télécharger en PDF et à imprimer gratuitement** : le bouton se trouve en bas de la page, sans inscription.

Interactions à distance et champs

Une **interaction** est une action réciproque entre deux systèmes : si A agit sur B, alors B agit sur A. À notre échelle, deux interactions fondamentales suffisent presque à tout expliquer : l'**interaction gravitationnelle**, toujours attractive, entre objets possédant une masse, et l'**interaction électromagnétique**, qui agit sur les objets possédant une charge électrique (elle se manifeste par des effets électriques et magnétiques). Deux autres interactions, dites forte et faible, n'agissent qu'à l'échelle du noyau atomique : la première assure la cohésion des noyaux, la seconde intervient dans certaines désintégrations.

Pour décrire une action à distance, on utilise la notion de **champ** : un système crée, en chaque point de l'espace, une grandeur (un champ) qui permet de prévoir la force exercée sur un autre système placé en ce point. Nous allons voir successivement les forces, puis les champs gravitationnel, électrique et magnétique.

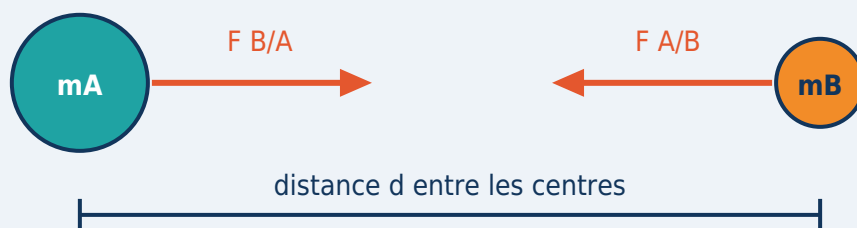
L'interaction gravitationnelle

LOI

Deux corps A et B, de masses m_A et m_B , dont les centres sont séparés par la distance d , exercent l'un sur l'autre des forces attractives, **de même valeur, de même direction (la droite AB) et de sens opposés** :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \times m_A \times m_B \div d^2$$

F en newtons (N), m en kilogrammes (kg), d en mètres (m), $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ (constante gravitationnelle). Cette expression s'applique aux corps ponctuels ou à répartition sphérique de masse.



$$F = G \times m_A \times m_B \div d^2$$

Les deux forces gravitationnelles ont la même valeur et des sens opposés, quelles que soient les masses.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Terre : $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$; Lune : $M_L = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$; distance $d = 3,84 \times 10^8 \text{ m}$. $F = 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24} \times 7,35 \times 10^{22} \div (3,84 \times 10^8)^2 \approx \mathbf{1,98 \times 10^{20} \text{ N}}$. Cette force retient la Lune sur son orbite.

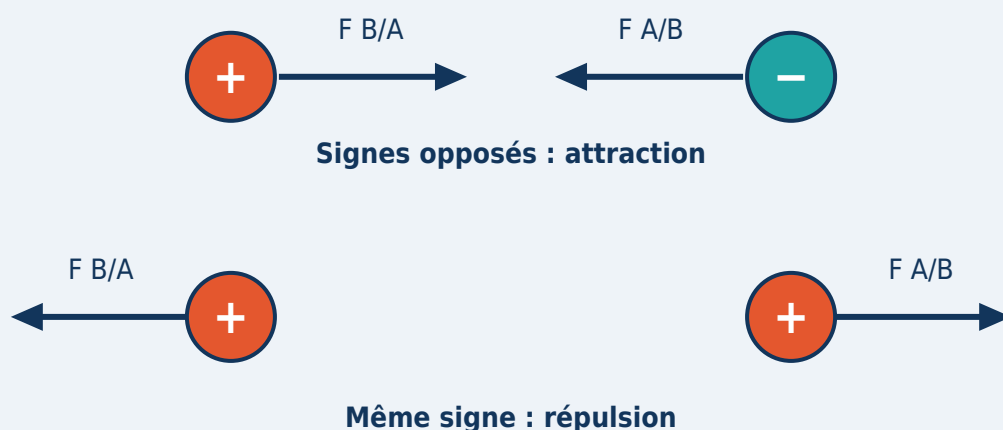
L'interaction électrostatique : la loi de Coulomb

Deux corps chargés, immobiles, exercent l'un sur l'autre des forces dont le sens dépend du signe des charges : **charges de même signe, répulsion** ; **charges de signes opposés, attraction**.

LOI

$$F_{A/B} = F_{B/A} = k \times |q_A \times q_B| \div d^2$$

F en newtons (N), q en coulombs (C), d en mètres (m), $k = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$. La charge élémentaire vaut $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$: un électron porte $-e$, un proton $+e$.



Forces électrostatiques entre deux charges : elles sont égales en valeur et de sens opposés.

EXEMPLE

Deux petites sphères portent $q_A = +2,0 \mu\text{C}$ et $q_B = -3,0 \mu\text{C}$ ($1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{C}$), à $d = 10 \text{ cm} = 0,10 \text{ m}$. $F = 9,0 \times 10^9 \times 2,0 \times 10^{-6} \times 3,0 \times 10^{-6} \div (0,10)^2 = \mathbf{5,4 \text{ N}}$. Les charges sont opposées : la force est **attractive**.

Comparer les deux interactions

Les deux lois ont la même forme, en $1/d^2$: si la distance double, la force est divisée par 4. Mais l'ordre de grandeur est très différent. Dans l'atome d'hydrogène, électron et proton sont à $r \approx 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$. La force électrique vaut $F_e = k e^2 \div r^2 = 9,0 \times 10^9 \times (1,60 \times 10^{-19})^2 \div (5,3 \times 10^{-11})^2 \approx \mathbf{8,2 \times 10^{-8} \text{ N}}$. La force gravitationnelle entre les mêmes particules ($m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) vaut $F_g = G m_e m_p \div r^2 \approx \mathbf{3,6 \times 10^{-47} \text{ N}}$. Le rapport $F_e \div F_g$ est de l'ordre de 10^{39} : à l'échelle atomique, la gravitation est totalement négligeable. Elle ne domine qu'à l'échelle des astres, car les corps célestes sont globalement neutres.

La notion de champ et les lignes de champ

DÉFINITION

Un **champ** associe à chaque point de l'espace une grandeur physique. Un champ est dit **vectoriel** lorsque cette grandeur est un vecteur (valeur, direction et sens). Une **ligne de champ** est une courbe tangente en chaque point au vecteur champ, orientée dans le sens du champ ; les lignes se resserrent là où le champ est plus intense. Un champ est **uniforme** quand son vecteur est le même en tout point : ses lignes sont parallèles et régulièrement espacées.

Le **champ de gravitation** créé par un astre de masse M à la distance r de son centre est dirigé vers le centre et a pour valeur $g(r) = G M \div r^2$ (en N/kg ou m/s^2). À la surface de la Terre ($M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$, $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$), on trouve $g = 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24} \div (6,37 \times 10^6)^2 \approx \mathbf{9,81 \text{ N/kg}}$: c'est le champ de pesanteur, qui donne le poids $P = m g$. Sur la Lune, on obtient $1,62 \text{ N/kg}$.

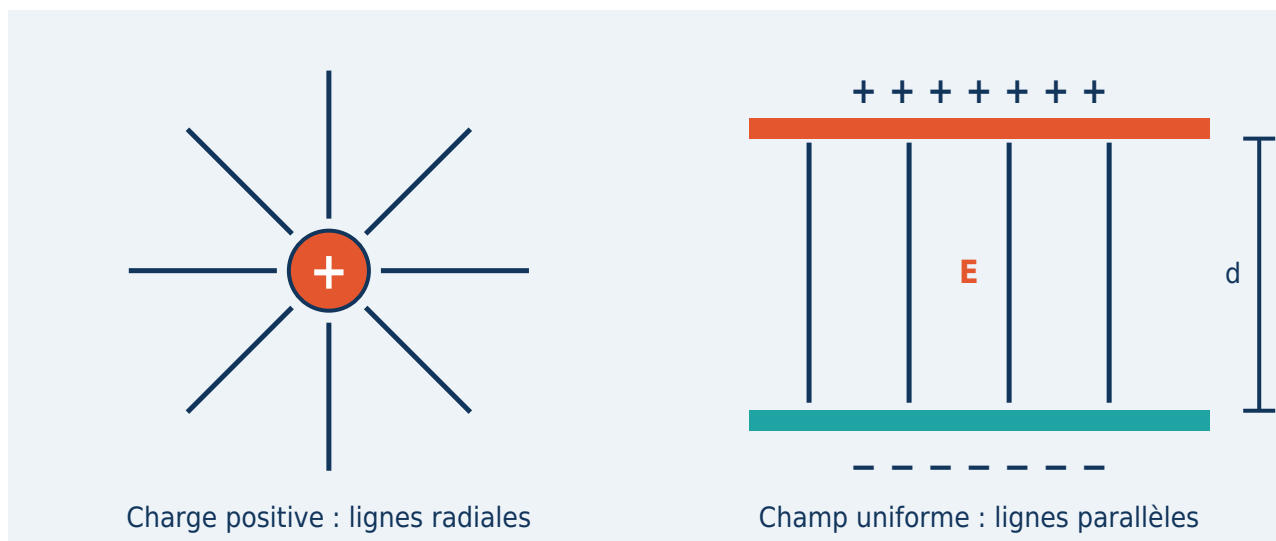
Le champ électrostatique

FORMULE À RETENIR

$$\mathbf{F} = q \times \mathbf{E} \quad \text{soit} \quad \mathbf{E} = \mathbf{F} \div q$$

F en newtons, q en coulombs, E en volts par mètre (V/m). La force sur une charge **positive** est de même sens que E ; sur une charge **négative**, elle est de sens opposé.

Une charge ponctuelle Q crée à la distance r un champ de valeur $E = k |Q| \div r^2$, dirigé **vers l'extérieur** si $Q > 0$ et **vers la charge** si $Q < 0$. Entre deux plaques parallèles chargées, séparées de d et soumises à une tension U , le champ est **uniforme**, dirigé de la plaque positive vers la plaque négative, de valeur $E = U \div d$.



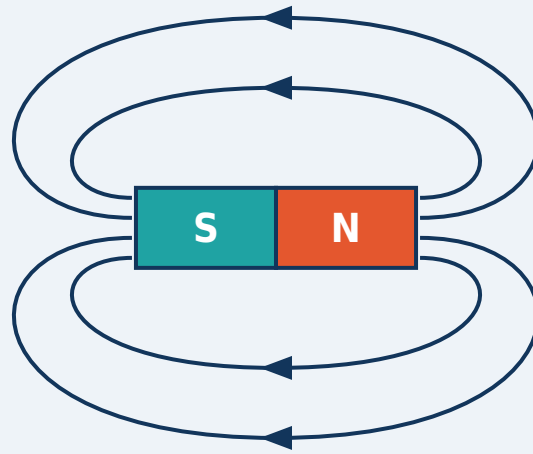
Gauche : champ créé par une charge ponctuelle positive. Droite : champ uniforme $E = U \div d$ entre deux plaques.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Entre deux plaques distantes de 2,0 cm soumises à $U = 300 \text{ V}$: $E = 300 \div 0,020 = \mathbf{1,5 \times 10^4 \text{ V/m}}$. Un électron ($q = -e$) y subit une force $F = e E = 1,60 \times 10^{-19} \times 1,5 \times 10^4 = \mathbf{2,4 \times 10^{-15} \text{ N}}$, dirigée vers la plaque positive.

Le champ magnétique

Un aimant, un fil parcouru par un courant ou la Terre créent un **champ magnétique** noté **B**, grandeur vectorielle exprimée en **teslas (T)**. Il agit sur une aiguille aimantée, qui s'oriente dans le sens du champ : l'extrémité qui pointe vers le nord de la boussole désigne le sens de B . À l'extérieur d'un aimant, les lignes de champ sortent par le pôle nord et rentrent par le pôle sud ; à l'intérieur, elles vont du sud vers le nord, ce qui en fait des courbes fermées. Un solénoïde (bobine longue) parcouru par un courant crée à l'intérieur un champ pratiquement uniforme, dont le sens est donné par la règle de la main droite.



aimant droit : lignes de champ de N vers S à l'extérieur

Spectre magnétique d'un aimant droit : les lignes se resserrent près des pôles, là où le champ est le plus intense.

ORDRES DE GRANDEUR

Champ magnétique terrestre : environ $5 \times 10^{-5} \text{ T}$ ($50 \mu\text{T}$). Petit aimant : de l'ordre de 10^{-2} T près d'un pôle. Électroaimant d'un laboratoire : 1 T et plus. Dans un solénoïde long de N spires, de longueur L , parcouru par I : $B = \mu_0 N I \div L$, avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ (formule donnée).

ERREUR FRÉQUENTE

On confond souvent **champ** et **force** : le champ existe en un point même si aucun objet n'y est placé ; la force n'apparaît que lorsqu'on y met un objet sensible (masse, charge, aiguille). Autre piège : la charge d'un électron est négative, donc la force électrique sur lui est opposée à E .

L'essentiel à retenir

- Toute interaction est réciproque : les deux forces sont opposées, de même valeur.
- Gravitation : $F = G m_A m_B \div d^2$, toujours attractive ; $g = G M \div r^2 \approx 9,81 \text{ N/kg}$ à la surface de la Terre.
- Coulomb : $F = k |q_A q_B| \div d^2$, attraction (signes opposés) ou répulsion (même signe).
- À l'échelle atomique, la force électrique l'emporte de très loin (rapport d'environ 10^{39}).
- Champ électrostatique : $F = q E$; $E = k |Q| \div r^2$; entre deux plaques $E = U \div d$ (uniforme).
- Champ magnétique B , en tesla : lignes de N vers S à l'extérieur d'un aimant ; la boussole s'aligne sur B .