

INTERACTIONS FONDAMENTALES - NOTION DE CHAMP

Après quelques rappels sur les interactions fondamentales, cette fiche présentera la notion de champ qui est une notion centrale pour décrire les interactions dans la physique moderne.

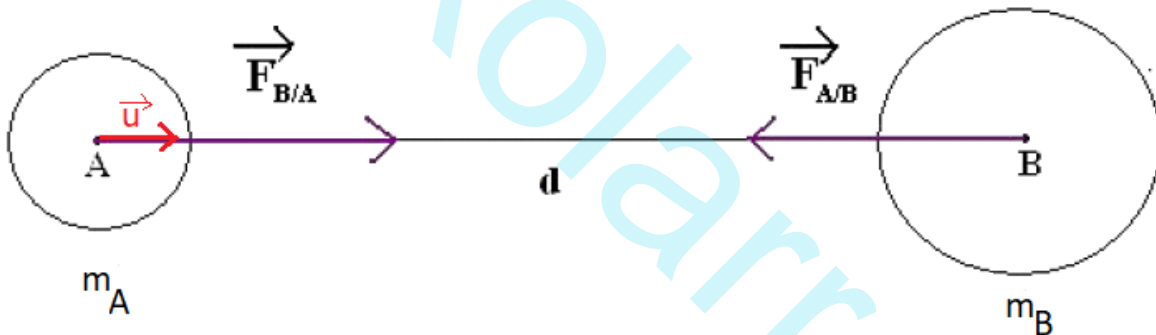
I. Les interactions fondamentales

Les interactions fondamentales sont au nombre de 4 :

Interaction	Portée	Intensité	Effet	Champ d'action
Forte	$10^{-15}m$	1	Attire	Noyau des atomes
Electromagnétique	infinie	10^{-2}	Attire ou repousse	De l'atome à l'étoile
Faible	$10^{-17}m$	10^{-6}	Transmute	Noyau des atomes
Gravitationnelle	infinie	10^{-40}	Attire	Univers, galaxies et étoiles

Ne seront traitées dans cette fiche que la force **de gravitation** et la force **électrostatique**.

1. Force de gravitation



⚠ Loi de la gravitation universelle (loi de Newton)

Deux points matériels A et B , de masses respectives m_A et m_B et séparés d'une distance d , s'attirent avec des forces $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ définies à l'aide des relations vectérielles suivantes :

$$\vec{F}_{B/A} = \mathcal{G} \times \frac{m_A \times m_B}{d^2} \vec{u} = -\vec{F}_{A/B}$$

[/tex]avec :

- [tex] \vec{u} : vecteur directeur unitaire de (AB) orienté de A vers B;
- $\mathcal{G} = 6,67 \cdot 10^{-11} SI$, constante de la gravitation universelle;
- m_A et m_B en kg;
- d en m;
- $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ en N.

ATTENTION !

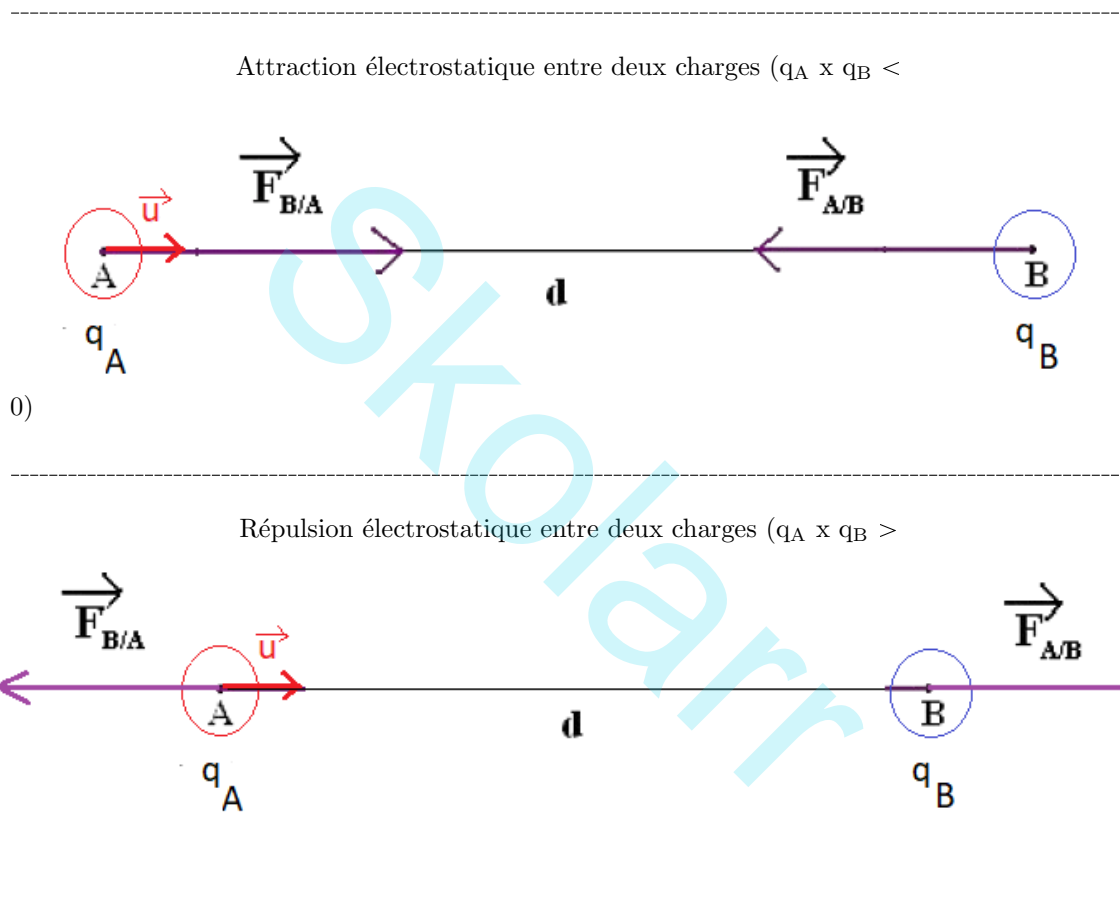
- l'orientation du vecteur directeur \vec{u} est **arbitraire** : si on choisissait \vec{u} orienté de B vers A, il faudrait

Remarques :

- Les forces gravitationnelles sont toujours **attractives** ;
- La loi s'applique aussi aux corps non ponctuels à symétrie sphérique. Dans ce cas les points A et B sont les centres d'inertie des corps. Ceci s'applique en particulier aux corps célestes (planètes, étoiles), en première approximation.

2. Force électrostatique

- * Les corps électriquement chargés interagissent.
- * Si les charges sont au repos (dans le référentiel d'étude), on parle d'**interaction électrostatique**.
- * Deux corps chargés s'**attirent** si leurs charges sont **de signes opposés**, et se **repoussent** si leurs charges sont **de même signe**, comme le montrent les figures suivantes :



⚠ Loi de Coulomb

Deux corps chargés, de charges respectives q_A et q_B et séparés par une distance d , sont soumis à des forces électriques $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$, définies à l'aide des relations **vectérielles** suivantes :

$$\vec{F}_{A/B} = k \times \frac{q_A \times q_B}{d^2} \vec{u} = -\vec{F}_{B/A}$$

avec :

- \vec{u} : vecteur directeur unitaire de (AB) orienté **de A vers B** ;
- $k \approx 9.10^9 \text{N.m}^2.\text{C}^{-2}$, constante de Coulomb ;
- q_A et q_B en Coulomb (C) ;
- d en m ;
- $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ en N.

ATTENTION !

- l'orientation du vecteur directeur \vec{u} est **arbitraire** : si on choisissait \vec{u} orienté de **B vers A**, il faudrait alors ajouter un signe "-" devant k dans l'expression vectorielle des forces ci-dessus.

Remarques :

- La loi s'applique aux charges ponctuelles, ainsi qu'à de petits corps non ponctuels, en première approximation. Dans ce cas les points A et B sont les centres d'inertie des corps.
- La relation vectorielle ci-dessus permet de traiter **toutes les combinaisons de charges** : "+ +", "+ -", "- +" et "- -".

II. Notion de champ en physique

1. Introduction

- * Considérons une carte météorologique. A chaque point de la carte est associée une valeur particulière de température : on parle alors de "champ de température".
- * On peut procéder de la même façon avec d'autres grandeurs comme la pression ou l'altitude en chaque point.

Plus généralement, un champ permet de caractériser un phénomène par une grandeur définie **en chaque point** de l'espace (ou d'une région de l'espace).

La notion de champ est particulièrement adaptée :

- à l'étude des milieux continus (champ des vitesses d'un fluide, par exemple) ;
- et à la description des interactions en physique (champ gravitationnel, par exemple).

⚠ Champ physique

- Un champ est la donnée, **en tout point** de l'espace et à tout instant, de la valeur d'une certaine grandeur physique.
- A un instant donné, cette valeur peut varier d'un point à un autre.
- En un point donné, cette valeur peut varier au cours du temps.

Les physiciens distinguent **plusieurs types de champs** selon la nature de la grandeur associée :

- les champs scalaires ;
- les champs vectoriels ;
- et d'autres types de champs associés à des objets mathématiques plus complexes.

⚠ Champ scalaire

Un champ est scalaire si la grandeur associée a une valeur numérique en chaque point (cette valeur étant exprimée dans une certaine unité).

Exemples de champs scalaires :

- champ de température (en chaque point, la température est exprimée par un nombre, en °C par exemple) ;

- champ de pression.

⚠ Champ vectoriel

Un champ est vectoriel s'il est associé à une grandeur physique modélisée par un vecteur.
Pour rappel, un vecteur se caractérise par sa norme, sa direction et son sens.

Exemples de champs vectoriels :

- carte des vents (en chaque point, la vitesse du vent est représentée par un **vecteur** vitesse);
- champ de pesanteur.

D'autre part certains champs ont des propriétés particulières :

⚠ Champ uniforme

Un champ est uniforme si la grandeur associée prend la même valeur en chaque point.

⚠ Champ statique

Un champ est statique si la grandeur associée prend, en chaque point, une valeur qui est indépendante du temps.

Remarques :

- un champ statique n'est pas forcément uniforme : ainsi le champ gravitationnel terrestre est statique mais non uniforme (l'intensité du champ décroît avec l'altitude).
- dans les situations rencontrées au lycée, les champs sont statiques.

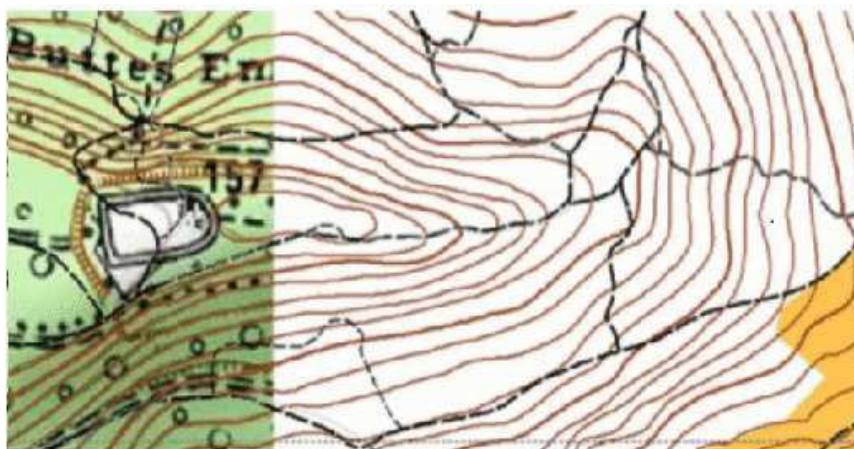
3. Courbes de niveau

* Pour représenter un **champ scalaire** il est souvent judicieux de tracer des lignes reliant des points où la valeur du champ est **constante**. Ces lignes sont appelées **courbes de niveau**.

* Exemples les plus connus :

- celles tracées sur les cartes géographiques et reliant les points situés à une même altitude ;
- pour représenter un champ de température, on peut tracer des isothermes, c'est-à-dire des courbes qui relient des points ayant même température
- sur une carte météo on peut tracer des isobares, qui sont des courbes reliant des points soumis à la même pression.

Courbes de niveau d'une carte géographique



4. Lignes de champ

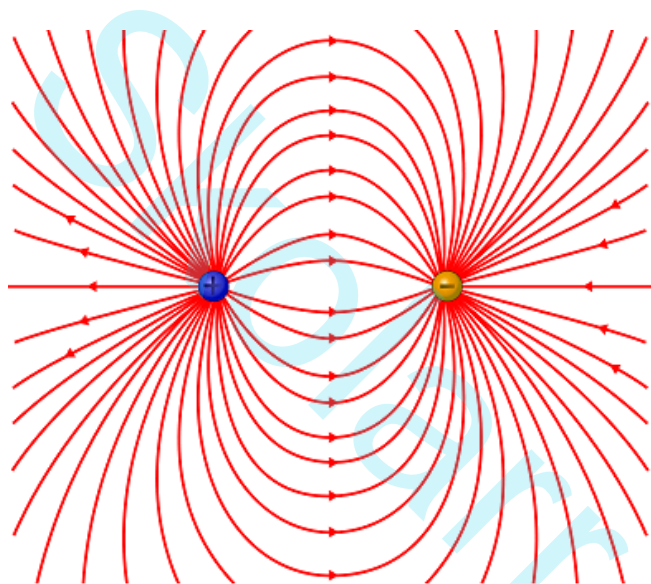
- * Pour visualiser une ligne de champ, il faut imaginer la trajectoire d'une particule qui partant d'un point donné, **suivrait le vecteur champ de point en point**.
- * Sur une carte des vents par exemple, une ligne de champ représente la trajectoire d'une poussière emportée par le vent.



Propriétés des lignes de champ

- Une ligne de champ est une courbe en tout point tangente au vecteur champ et orientée dans le sens du champ.
- Plus les lignes de champ sont serrées plus l'intensité du champ (la norme du vecteur) est grande.
- Les lignes de champ ne se croisent pas.
- Les lignes de champ indiquent la direction et le sens du champ en chacun de leur point, mais n'indiquent pas l'intensité du champ (= la norme du vecteur champ).
- Les lignes de champ d'un champ uniforme sont des droites parallèles entre elles.

La figure suivante montre les lignes de champ autour d'un dipôle électrostatique.



Source :  [Source image](#)

5. Champ associé à une interaction

* Les lois de Newton et de Coulomb permettent de modéliser simplement des interactions à distance à l'aide de la notion de force. Mais au XIX^{ème} siècle, l'étude du magnétisme a débouché sur des lois plus compliquées, amenant Michael Faraday à concevoir les interactions d'une autre manière.

* L'approche consiste à distinguer le corps qui agit (la source), du système qui subit l'action à distance (le corps d'épreuve) puis à décomposer l'interaction en 2 étapes :

- la source **crée un champ** qui décrit l'influence de la source sur son voisinage ;
- un système situé en un point donné, va alors subir une action (une force), due à la source, mais déterminée par la valeur du champ à **l'endroit où se trouve le système**.

* Cette approche a d'énormes avantages :

- elle permet de "cartographier" une interaction en mesurant et en représentant le champ en chaque point, **sans connaître précisément la source** ;
- la connaissance seule du champ suffit à déterminer l'action subie par les corps environnants en tout point ;

une action **locale** du champ créé par la source.

* Pour être plus concret, considérons l'influence de la Terre sur les boussoles ou encore sur les charges en mouvement. Cette interaction est modélisée par le **champ magnétique terrestre**. Ce champ peut être mesuré en tout point et représenté sur une carte, même en ignorant les mécanismes à l'origine de ce champ. Il est alors possible de calculer le mouvement d'un rayon cosmique chargé qui s'approche de la Terre, sans connaître exactement la source du champ !

* On procède de façon analogue avec d'autres interactions, en définissant le champ électrostatique, le champ gravitationnel et bien d'autres encore.

* **Remarque** : les théories physiques permettent de calculer le champ magnétique créé par une source. Dans le cas de la Terre, ce calcul est toutefois difficile car les mécanismes à l'origine du champ sont très complexes.

III. Le champ gravitationnel

1. Expression du champ gravitationnel

* Appliquons la loi de la gravitation, rappelée plus haut :

- à un corps massif B de masse M (par exemple la Terre), immobile dans le référentiel d'étude
- et à un système A, de masse m, et situé à une distance d de B.

* A et B sont assimilés à des points matériels (leur centre de masse), approximation valable si le corps massif B est à symétrie sphérique.

* La force gravitationnelle exercée par B sur A vaut :

$$\vec{F}_{B/A} = \mathcal{G} \times \frac{M \times m}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

où \vec{u}_{AB} désigne le vecteur directeur unitaire de (AB) dirigé de A vers B.

* Dans cette formule on remarque que **seul m dépend du système A**. Réécrivons-la en isolant m :

$$\vec{F}_{B/A} = m \times \mathcal{G} \times \frac{M}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

* L'expression à droite de m ne dépend que de la source de gravitation (le corps B) et de la position de A, ce qui permet de définir le **champ gravitationnel du corps B au point A**, noté \vec{g}_N :

$$\vec{g}_N(A) = \mathcal{G} \times \frac{M}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

(le champ est noté \vec{g}_N , N pour Newton, afin d'éviter toute confusion avec le champ de pesanteur \vec{g})

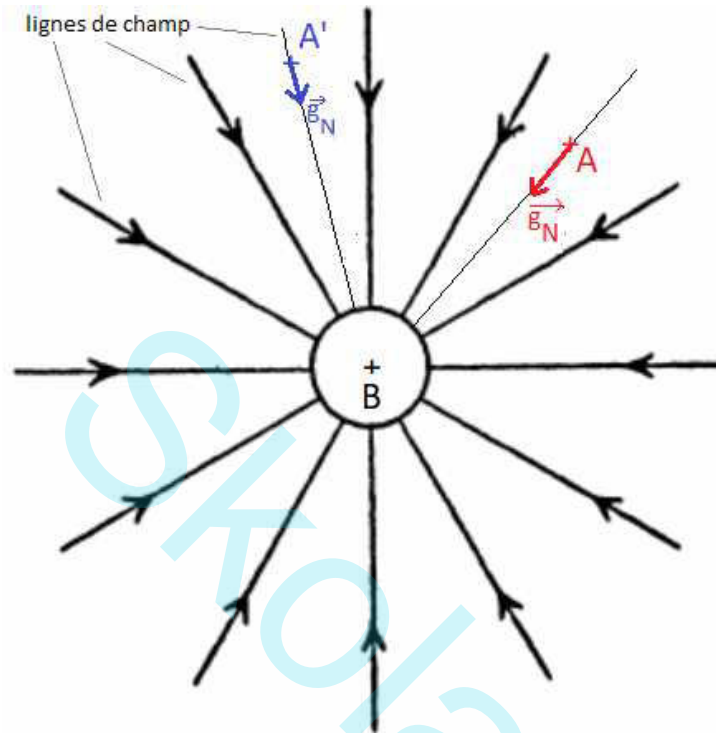
* Le raisonnement étant valable en tout point A, on en déduit immédiatement la relation entre :

- le champ gravitationnel créé en tout point A par un corps B
- et la force de gravitation subie par un système de masse m **en ce point A**

$$\vec{F}_{B/A} = m \vec{g}_N(A)$$

2. Propriétés du champ gravitationnel

* La figure suivante représente le champ gravitationnel produit par un corps massif B (un astre) dans son voisinage :



* L'allure du champ est indiquée par les lignes de champ qui sont des droites toutes **issues du centre attracteur** (B) et **orientées vers lui** : on parle de champ **radial** car les lignes de champ ressemblent à des **rayons** qui partiraient tous d'un même point.

* Pour déterminer l'influence gravitationnelle du corps B en un point A, il suffit alors de tracer la ligne de champ, qui est ici la droite (AB), puis de tracer le vecteur "champ gravitationnel en A" , noté \vec{g}_N sur la figure : ce vecteur est dirigé de A vers B.

* La connaissance du champ gravitationnel en un point A permet de déduire la force subie par tout point matériel de masse m situé en A, grâce à la formule :

$$\vec{F}_{B/A} = m \vec{g}_N(A)$$

Dans le cas de la gravitation, cette force est toujours colinéaire et **de même sens** que le vecteur champ en A (car $m > 0$). On retrouve que la force gravitationnelle est toujours **attractive**.

* **Remarques** :

- le vecteur champ dépend du point A : il faudrait le noter $\vec{g}_N(A)$ pour être plus rigoureux.
- les lignes de champ n'indiquent pas la norme du champ en un point : la norme est obtenue par le calcul et

- dans le cas d'un astre (à symétrie sphérique) il faut distinguer le champ gravitationnel extérieur (représenté sur la figure) du champ gravitationnel intérieur qui est différent : c'est pourquoi les lignes de champs s'arrêtent ici à la surface.
- **seuls les astres** ont un champ gravitationnel suffisant pour influencer les corps matériels dans leur voisinage. Les objets à notre échelle (même de très grandes constructions) ont un champ gravitationnel totalement négligeable car leur masse est bien trop faible.

IV. Le champ électrostatique

La force de Coulomb ayant une expression mathématique très proche de celle de Newton, nous allons procéder de la même manière pour déterminer le champ électrostatique créé par une charge dans l'espace environnant.

1. Expression du champ électrostatique

- * Appliquons la loi de Coulomb, rappelée plus haut :
 - à une charge ponctuelle Q , immobile en B dans le référentiel d'étude ;
 - et à une charge ponctuelle q située en A, à une distance d de B.
- * La force électrostatique exercée par B sur A vaut :

$$\vec{F}_{B/A} = k \times \frac{Q \times q}{d^2} \vec{u}_{BA}$$

où \vec{u}_{BA} désigne le vecteur directeur unitaire de (AB) dirigé de B vers A.

- * Dans cette formule on remarque que **seul le terme q dépend de la charge en A**. Réécrivons-la en isolant q :

$$\vec{F}_{B/A} = q \times k \times \frac{Q}{d^2} \vec{u}_{BA}$$

- * L'expression à droite de q ne dépend que de la source (la charge Q) et de la position de A, ce qui permet de définir le **champ électrostatique de la charge Q au point A**, noté $\vec{E}(A)$:

$$\vec{E}(A) = k \times \frac{Q}{d^2} \vec{u}_{BA}$$

- * Le raisonnement étant valable en tout point A, on en déduit immédiatement la relation entre :
 - le champ électrostatique créé en tout point A par une charge Q (en B)
 - et la force de Coulomb subie par une charge q en ce point A

$$\vec{F}_{B/A} = q \vec{E}(A)$$

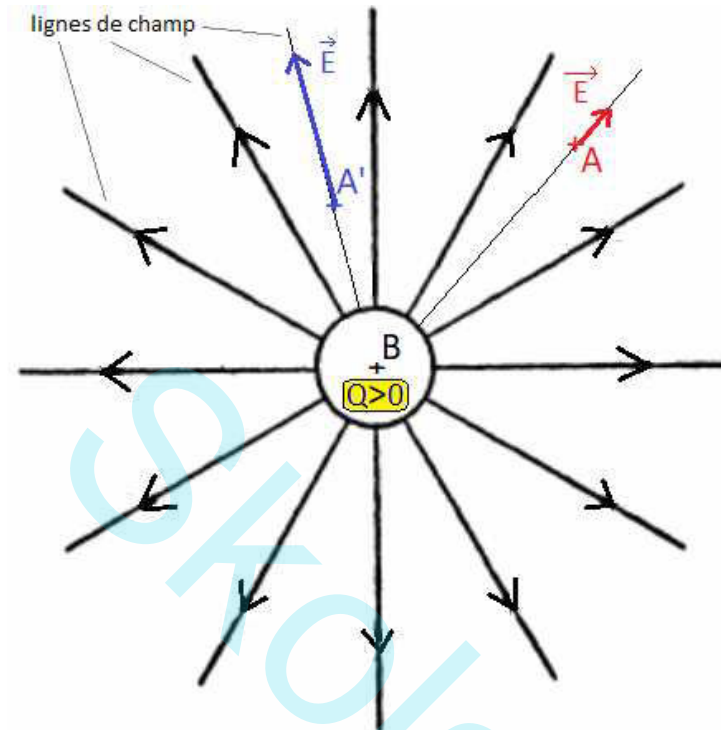
2. Propriétés du champ électrostatique

- * Le champ électrostatique ressemble au champ gravitationnel car il est aussi radial.

* Il dépend toutefois du signe de la charge Q portée par la source.

Cas d'une source de charge positive ($Q > 0$)

[/b] La figure suivante représente le champ électrostatique créé par une charge ponctuelle Q **positive** dans son voisinage.

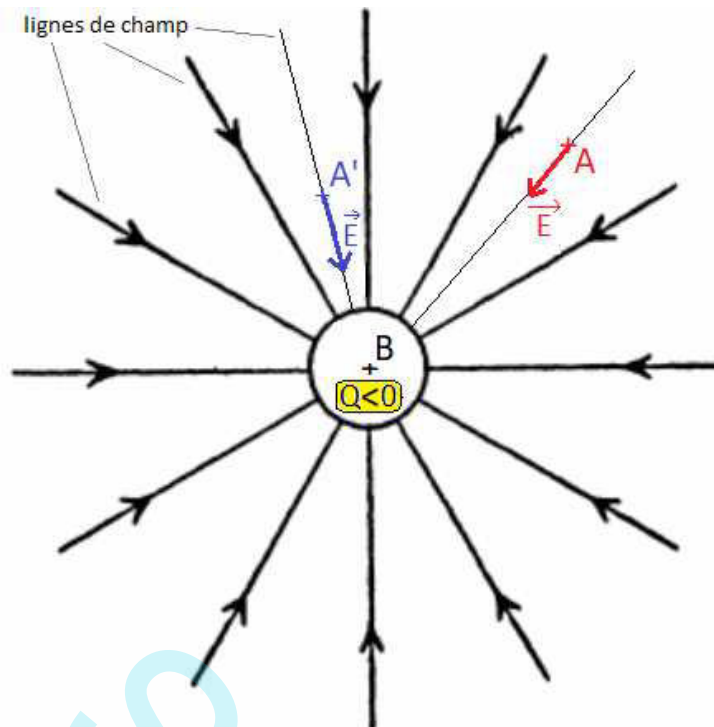


* Les lignes de champ sont des droites toutes **issues de la source** (en B) et **orientées vers l'extérieur**.

* Pour déterminer l'influence de la source en un point A, il suffit alors de tracer la ligne de champ, qui est ici la droite (AB), puis de tracer le vecteur "champ électrostatique en A", noté \vec{E} : ce vecteur est dirigé **de B vers A**.

Cas d'une source de charge négative ($Q < 0$)

* La figure suivante représente le champ électrostatique créé par une charge ponctuelle Q **négative** dans son voisinage.



* Les lignes de champ sont des droites toutes **issues de la source** (en B) et **orientées vers elle**.

* Pour déterminer l'influence de la source en un point A, il suffit alors de tracer la ligne de champ, qui est ici la droite (AB), puis de tracer le vecteur "champ électrostatique en A", noté \vec{E} : ce vecteur est dirigé **de A vers B**.

Remarques : les lignes de champ n'indiquent pas la norme du champ électrostatique en un point : la norme est obtenue par le calcul et s'exprime en N/C ou encore en V/m[^{sup}]. Elle décroît très vite avec la distance.

3. Détermination de la force électrostatique

* La connaissance du champ électrostatique \vec{E} d'une charge immobile Q située en B permet de déduire la force subie par une charge q située en un point A, grâce à la formule :

$$\vec{F}_{B/A} = q \vec{E}(A)$$

* Cette force est colinéaire au vecteur champ en A mais son sens **va dépendre du signe de la charge q** en A :

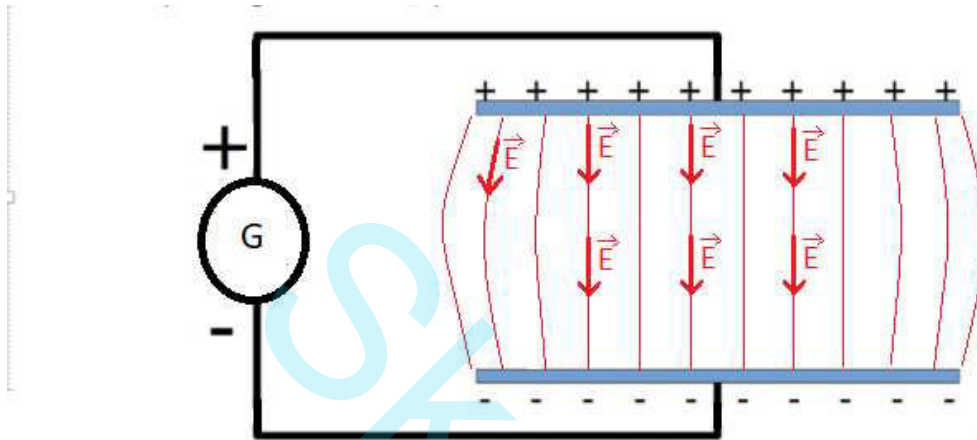
- une charge q positive subit une force dans le sens du champ ;
- une charge q négative subit une force dans le sens opposé à celui du champ.

4. Cas du condensateur plan

⚠ Définition

- Un condensateur plan est un dispositif formé de deux plaques métalliques parallèles appelées armatures.
- Chacune est reliée à une borne d'un générateur délivrant une tension électrique constante.
- La plaque reliée à la borne + perd alors des électrons et se retrouve ainsi chargée positivement sur toute sa surface.
- L'autre plaque, au contraire, a un excès d'électrons et se charge donc négativement.

* Le condensateur plan est un dispositif très utile car il produit **un champ électrostatique uniforme entre ses armatures**, comme indiqué sur la figure suivante :



* La norme E du champ électrostatique entre les armature d'un condensateur plan vaut :

$$E = \frac{U}{d}$$

où U est la tension du générateur et d la distance entre les plaques

Remarques :

- en réalité, le champ électrostatique n'est uniforme que si on se place "suffisamment loin des bords" des armatures.
- un TP de cartographie de ce champ électrostatique permettra d'illustrer ce cas : [Vidéo cuve rhéographique](#).

V. Un peu d'histoire : découverte des deux sortes d'électricité par Charles Dufay

* On frotte un tube de verre pour le rendre électrique et le tenant horizontalement, on laisse tomber dessus une parcelle de feuille d'or qui immédiatement après avoir touché le tube, est repoussée.

* Il en vint donc à la conclusion que le corps rendu électrique est repoussé par celui qui l'a rendu électrique.

* Cependant, une autre expérience le déconcerta. Il éleva une feuille d'or grâce au tube et approcha un morceau de gomme de copal frotté. La feuille d'or s'y attacha directement.

* Ces expériences lui firent penser qu'il y avait peut être deux genres d'électricités. Il les appela donc l'électricité résineuse et l'électricité vitrée.

* C'était en 1733 ...

Skolarr