

Introduction

Si la matière qui nous entoure peut être caractérisée par une certaine cohérence, c'est grâce à l'existence d'interactions attractives entre les constituants de cette matière :

- interaction forte entre les nucléons d'un noyau ;
- interaction électrique entre les ions d'un cristal de NaCl solide
- Interaction électrique entre dipôles présents dans les molécules (liaisons hydrogène, liaisons de Van der Waals)
- Interaction gravitationnelle entre la Lune et la Terre, ou bien nous maintenant les pieds au sol...

Il s'agira dans ce chapitre de proposer un (ou plusieurs) modèle(s) cohérent(s) permettant de décrire avec plus de rigueur en quoi consiste une action, à quelles conditions elle existe ou pas, ...

Nous détaillerons essentiellement la force de gravitation (déjà présentée en classe de seconde) et la force électrique, dans un premier temps à l'aide d'un modèle classique utilisant la notion de champ. Afin d'ouvrir un peu plus de perspectives et de montrer que le sujet est vaste, d'autres modèles pourront être évoqués en fin de chapitre.

I Champs et forces

Si dans une région de l'espace, on peut définir des propriétés particulières (valeur d'une grandeur physique, existence d'une force, ...), alors on peut modéliser l'ensemble en considérant l'existence d'un champ dans cette région de l'espace.

Exemple 1 champ de pesanteur

Exemple 2 champ de pression (sous l'eau)

Différence entre les deux ?

II Champs scalaires

Le champ est dit scalaire lorsqu'il peut être modélisé par une simple valeur.

Prenons quelques exemples :

Dans un liquide immobile macroscopiquement, par exemple l'eau d'une piscine, nous pouvons considérer :

- Un champ de température, qui est uniforme (la valeur de la température est la même en tout point de l'espace). On parle toutefois de champ car une des propriétés de l'espace occupé par l'eau de la piscine est justement sa température.
- Un champ de pression qui est variable : la pression y est fonction de la profondeur d'eau mais le champ de pression est parfaitement caractérisé par une expression permettant de déterminer la valeur de la pression P : $P = P_0 + \rho gh$. La pression n'a pas de direction privilégiée

III Champs vectoriels

1) Introduction

Exemple : dans un liquide en écoulement dans une canalisation, on peut considérer un champ de vitesse caractérisé par la valeur de la vitesse en fonction de la distance par rapport aux parois de la canalisation. Mais à cette valeur, nous devons aussi associer la direction et le sens d'écoulement ! La grandeur qui permettra une caractérisation complète de l'écoulement sera donc un vecteur, un vecteur vitesse. Nous nous trouvons donc en présence d'un champ vectoriel de vitesses.

Pas plus de détails pour cet exemple, il y a plusieurs types d'écoulements des fluides (parfait, laminaire, turbulent, ...) et il y a plusieurs types de fluides (parfaits, newtoniens, plus ou moins visqueux, thixotropes, ...) *Exposés*

Les deux champs vectoriels qui vont nous occuper sont le champ de pesanteur (qui essentiellement constitué grâce au champ gravitationnel terrestre) et le champ électrostatique (nous dirons « électrique », cela conviendra très bien)

2) Activités expérimentales

a. Champ de pesanteur \vec{g}

Le dispositif expérimental est assez simple : un lot de masses marquées (de valeurs exactement connues) que l'on pourra suspendre à l'extrémité d'un dynamomètre qui est accroché verticalement. Chaque masse marquée utilisée constitue ce que nous appelons le système.

Lorsque le système est abandonné et reste immobile, on peut considérer qu'il vérifie le principe d'inertie (classe de seconde), ce qui signifie que les forces extérieures (il y en a deux) qui s'exercent sur ce système s'annulent.

L'une des forces représente l'action du dynamomètre et on peut lire sa valeur.

L'autre force ? Le poids du système.

i. Indiquer la direction, le sens et la valeur des deux forces qui s'exercent sur le système.

ii. Reproduire l'expérience avec différentes masses.

iii. Reproduire l'expérience en différents endroits.

iv. Modéliser le poids d'un objet matériel en fonction de sa masse m et d'une grandeur que nous appellerons champ de pesanteur \vec{g} (Le champ de pesanteur est une grandeur vectorielle qu'il faudra entièrement caractériser : direction, sens, valeur, unité).

v. Conclure en rédigeant obligatoirement une phrase contenant les portions de phrases suivantes : « l'objet est soumis à son poids », « il règne dans cette zone de l'espace un champ », « champ de pesanteur », ...

vi. Retrouver la valeur du champ de pesanteur dans l'expression de la valeur de la force de gravitation exercée par la Terre de masse M_T sur un objet de masse m situé à la distance R_T (rayon terrestre) de centre de la Terre :

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM_T m}{R_T^2}$$

vii. Le champ de pesanteur et le champ de gravitation terrestre sont-ils rigoureusement identiques ? (recherches et réflexions...)

b. Champ électrique \vec{E}

Le matériel disponible est le suivant :

- boule très légère suspendue à un fil (pendule)
 - o Cette boule peut être chargée électriquement par contact avec un autre objet lui-même chargé.
 - o Suite au contact, la boule et l'objet porteront des charges de même signe.
 - o La boule portant une charge de signe donné, on peut approcher de celle-ci un objet portant une charge de signe opposé.
 - o L'existence d'une force électrique entre la boule chargée et un objet chargé proche sera mise en évidence par le fait que le pendule s'écarte de sa position verticale.

- Objets (tiges, barres, règles) faits de matériaux divers qui peuvent être électrisés par friction avec des tissus ou peaux divers. Le sens de transfert des électrons lors de la friction sera connu grâce à la série triboélectrique fournie plus loin.

- i. Réaliser des expériences de répulsions ou d'attractions électriques.
 - ii. L'observation des résultats de ces expériences (répulsion ou attraction entre objets chargés électriquement) doit permettre de proposer une conclusion quant à l'existence d'un champ électrique à proximité d'un corps chargé électriquement.

 - iii. La direction et le sens de ce champ seront déterminés en observant attentivement le sens et la direction des forces mise en œuvre lorsque deux objets chargés électriquement sont positionnés à proximité l'un de l'autre.

 - iv. On validera une expression de la force électrique \vec{F} s'exerçant sur un objet en fonction de la charge q de cet objet et du champ électrique \vec{E} régnant au niveau de l'objet.

Pour déterminer si un objet est chargé négativement ou positivement, on se référera à la série triboélectrique fournie ci-après.

Les expériences seront décrites à l'aide de schémas sur lesquels apparaîtront clairement des vecteurs force (par exemple force s'exerçant sur la boule du pendule).

*Attention : la boule, initialement neutre, peut être attirée par influence par un objet chargé.
L'explication de ce phénomène ne fait pas partie des objectifs de la séance...*

TABLEAU 17.1 La séquence triboélectrique

Amiante	Lorsque deux substances de la colonne viennent au contact, celle qui est écrite au-dessus se charge positivement, celle, quelle qu'elle soit, qui vient en dessous se charge négativement.
Fourrure (lapin)	
Verre	
Mica	
Laine	
Quartz	
Fourrure (chat)	
Plomb	
Soie	
Peau humaine, aluminium	
Coton	
Bois	
Ambre	
Cuivre, laiton	
Caoutchouc	
Soufre	
Celluloïd	
Caoutchouc des Indes	

3) Conclusions

a. Champ de pesanteur/champ de gravitation

Tout objet caractérisé par une masse M crée autour de lui une propriété appelée champ de gravitation. En un point M situé à la distance d du centre de gravité O de cet objet (son centre si c'est un objet à répartition de masse sphérique), le champ gravitationnel est modélisé par un vecteur dirigé selon l'axe OM , dans le sens MO et de valeur $\frac{GM}{d^2}$.

G est la constante de gravitation universelle et vaut $6,67 \times 10^{-11}$ dans le système international d'unités.

Dans le cadre du champ de gravitation terrestre, on peut considérer que le vecteur champ de gravitation est un vecteur constant si l'on se restreint à une portion d'espace suffisamment petite.

Le champ de gravitation terrestre peut être confondu avec le champ de pesanteur si l'on néglige les effets de rotation de la Terre sur elle-même. Le poids $\vec{P} = m\vec{g}$ est alors confondu avec la force de gravitation terrestre $\vec{F} = -\frac{GmM}{d^2}\vec{u}$ (\vec{u} est le vecteur unitaire dirigé de M vers O).

b. Champ électrique

Un objet (que l'on considèrera comme ponctuel et placé en un point O) portant une charge q génère un champ électrique radial par rapport à O . En un point M situé à la distance d de O , le champ, modélisé par un vecteur noté \vec{E} , est défini par l'expression : $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q}{d^2} \times \vec{u}$ (\vec{u} est le vecteur unitaire dirigé de O vers M). La partie constante $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ peut être notée k et vaut (dans le vide) environ 10^{10} dans le système international d'unités.

Si, au point M, on trouve un objet portant une charge q' , il s'exerce sur cet objet la force électrique :

$$\vec{F} = q' \vec{E}$$

(On saura sans problème déterminer le sens de \vec{F} selon les signes de q et q')

c. Champ, potentiel et énergie potentielle

(bibliographie pour la rédaction de cette partie c. : « La Physique » de Maurice Duquesne, De Boeck 2001)

i. Introduction

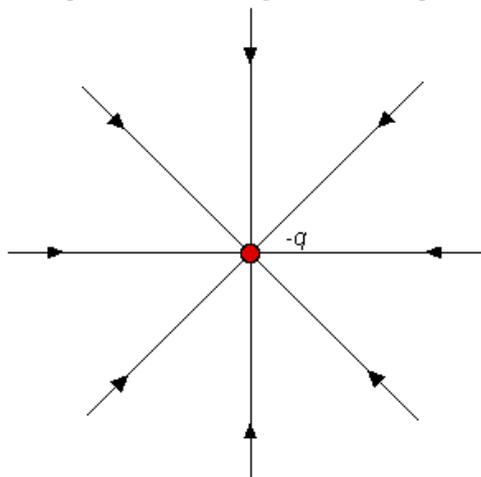
Mathématiquement, nous avons noté la similitude entre les deux expressions des champs, gravitationnel et électrostatique, notamment dans au niveau du terme en $\frac{1}{d^2}$.

On les appelle ainsi champs newtoniens.

Si l'objectif est le calcul de forces correspondantes, les expressions proposées jusque-là suffisent, le lien entre force et champs est simple et direct (il s'agit de la masse du système dans le cas de la force de gravitation et de sa charge dans le cas de la force électrique).

Nous pouvons connaître le champ en tout point de l'espace et, en quelque sorte, le cartographier. Nous pouvons tracer des « lignes de champs », sortes de trajectoires que réaliseraient des objets soumis à la force associée au champ régnant. La direction de la tangente en chacun des points d'une ligne de champ est celle du vecteur champ en ce point.

Exemple : tracé des lignes de champ créées par une charge ponctuelle négative :



ii. Énergie potentielle ou potentiel ?

Dans le cadre de notre étude : il y a énergie potentielle si un objet (notre système) subit le champ d'un autre objet (*exemples*)

Ce que nous appellerons potentiel sera en quelque sorte l'énergie potentielle par unité caractéristique (par unité de masse pour le potentiel gravitationnel, par unité de charge pour le potentiel électrique).

Donc :

- A la force sera associée l'énergie potentielle

Exemple (sans entrer dans les détails) : au poids \vec{P} de valeur mg on associe l'énergie potentielle mgz associant valeur de la force et position z dans le champ de pesanteur.

- Au champ sera, de même, associé le potentiel.
- La relation qui existe entre potentiel et énergie potentielle est la même que celle qui existe entre champ et force.

Prenons l'exemple électrique :

Un objet de charge q est positionné en un point de l'espace où règne un champ \vec{E} et où le potentiel électrique vaut V .

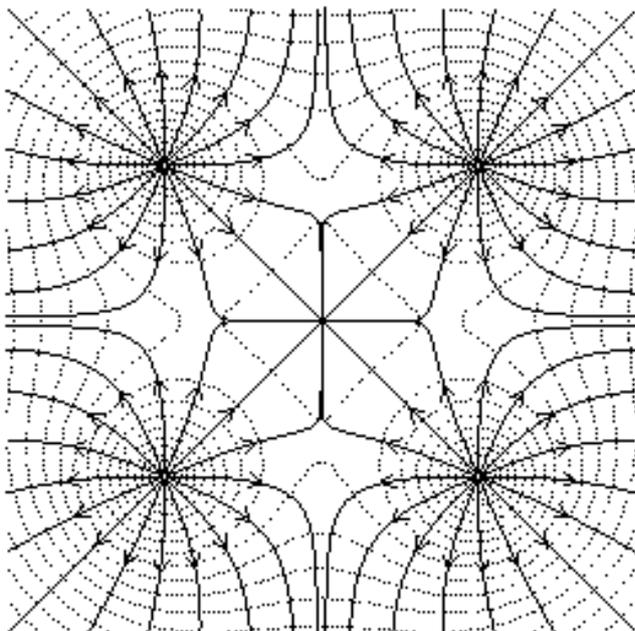
Il s'exerce alors sur cet objet la force $\vec{F} = q\vec{E}$ et son énergie potentielle électrique vaut $E_p = qV$

iii. Prolongements importants

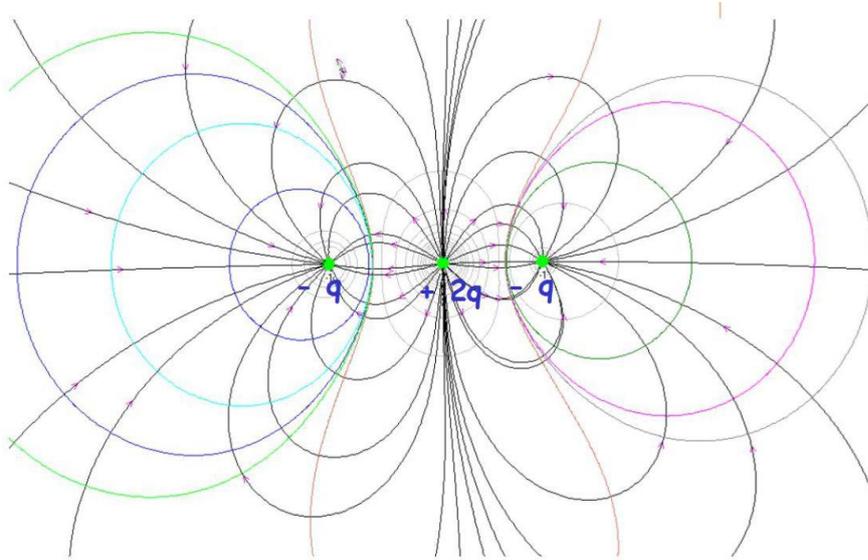
- Surfaces équipotentielle et lignes de champs

Dans un espace où règne un champ, le lien des points où le potentiel a la même valeur est une surface dite équipotentielle. Ce type de surface donne une représentation alternative (complémentaires de la cartographie en lignes de champs) des propriétés de l'espace où se trouvent des sources de champs.

Ci-dessous, les lignes de champs (en traits pleins) et les surfaces équipotentielles (en pointillés) résultant de la présence de quatre charges positives identiques positionnées aux quatre coins d'un carré :



Un peu plus compliqué :



- ***Différence de potentiel et évolution d'un système, différence de potentiel et champ.***

Si un système est constitué initialement d'objets à des potentiels différents, il y aura évolution spontanée (transformation, déplacement, ...) de manière à atteindre un état final pour lequel le potentiel est unique et identique pour toutes les parties du système.

Considérant deux points M_1 et M_2 respectivement à des potentiels électriques différents V_1 et V_2 (avec $V_1 > V_2$), il règne alors un champ électrique \vec{E} dirigé selon la différence de potentiel et dans le sens des potentiels décroissants soit, ici, de M_1 vers M_2 .

Cas particulier :

Disposant deux plaques conductrices parallèles, séparées par la distance d et entre lesquelles il existe une différence de potentiel (ou tension) $U = V_1 - V_2$ ($U > 0$), il règne entre ces plaques un champ électrique uniforme perpendiculaire aux plaques, dans le sens des potentiels décroissants et de valeur :

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

L'unité du champ électrique est le $V.m^{-1}$.

Remarque : La notion de potentiel électrique nous intéresse, nous la retrouverons en électricité, en électrochimie, domaines dans lesquels des électrons se déplacent sous l'action de forces, donc sous l'action de différences de potentiel, afin d'annuler ces différences.

4) Illustrations expérimentales supplémentaires

(Les expériences sont présentées en classe, il faudra en proposer des explications écrites à la suite du compte-rendu correspondant à la partie 2))

a) L'électroscope

Un tige a été frottée et électrisée, c'est-à-dire qu'elle porte un excès de charges électriques d'un signe donné, par exemple négatif (le signe choisi ne changera rien aux interprétations à proposer).

Le plateau extérieur de l'électroscope est constitué d'un métal conducteur électrique (les électrons peuvent y circuler librement sous l'influence d'un champ électrique), ce plateau étant relié à une tige elle-même conductrice se terminant en deux parties pouvant pivoter l'une par rapport à l'autre.

On approche la tige du plateau de l'électroscope (sans le toucher).

- Décrire et expliquer ce qui est observé.

(schéma conseillé)

On touche, on frotte le plateau avec la tige électrisée et on écarte ensuite la tige.

- Décrire et expliquer ce qui est observé.
- Expliquer pourquoi on aurait observé la même chose si la tige avait été initialement électrisée négativement.

b) Faisceau d'électrons

Suivre la description qui suit en observant le dispositif en fonctionnement.

Dans une enceinte vide d'air, on émet des électrons depuis un filament (en le chauffant). Ce filament est par ailleurs relié au pôle négatif d'un générateur délivrant une tension de quelques milliers de volts.

Le pôle positif du générateur est relié à une plaque se trouvant dans le prolongement horizontal du filament (à la droite du filament). On trouve ensuite (encore plus à droite) une surface couverte d'une poudre sensible à tout impact d'électron : si des électrons arrivent sur cette surface, leur énergie va être absorbée puis restituée sous la forme d'une lumière bleue.

Le générateur est mis en marche et délivre environ 2000 V.

- Expliquer pourquoi il règne un champ électrique \vec{E}_1 horizontal et vers la gauche entre le filament et la plaque.
- Justifier que l'on crée alors un faisceau horizontal d'électrons circulant de gauche à droite.

Au niveau de la surface permettant de détecter le passage d'électrons, on a maintenant disposé deux plaques métalliques horizontales se faisant face. On a relié ces 2 plaques aux 2 pôles d'un générateur pouvant imposer une tension de plusieurs milliers de volts (pôle « positif » relié à la plaque du haut, pôle « négatif » relié à la plaque du bas).

- Expliquer qu'il règne entre les deux plaques un champ électrique \vec{E}_2 vertical.
- Quel est le sens de ce champ ?
- Expliquer la trajectoire des électrons.

- La tension imposée entre les deux plaques verticales est augmentée. Expliquer le changement observé de la trajectoire des électrons.
(schéma conseillé pour répondre aux questions)
- Comment obtenir un faisceau d'électrons dont la trajectoire s'incurve vers le bas ?
- Quel est l'intérêt d'avoir créé le vide dans le dispositif ?

IV Un autre modèle pour l'interaction : la particule d'échange.

Exposés ?