

Cours d'électricité

E. Partie 1 : Électrostatique

I. La charge électrique (Q ou q)

1. Aspect historique

a. *1^{ère} approche*

- Nous connaissons en joaillerie l'utilisation de l'ambre, une résine naturelle et fossile issue des conifères. Les anciens grecs avaient déjà remarqué que quand ils frottaient un morceau d'ambre avec de la fourrure ou un tissu de laine, l'échantillon en question attirait ensuite de petits morceaux de papier, des cheveux... Bref, des objets assez légers.
- En ancien grec, ambre = elektron.
- Si bien qu'au 17^{ème} siècle, lorsque l'on s'intéressa de plus près à ce type de phénomène, on exprima que l'ambre porte l'électricité. **La quantité d'électricité apparaissant sur un objet frotté fut appelé charge électrique**.
- La charge électrique est en réalité connue pour ses effets sur les autres charges → il s'agit bien d'une interaction à distance (comme l'est aussi l'interaction gravitationnelle).

b. *Du Fay*

- Ce fut un botaniste français, Charles Du Fay qui le 1^{er} expérimenta sur les interactions entre charges.
- Pour l'essentiel, il détermina que **2 objets du même matériau, électrisés par frottement selon la même procédure se repoussent**.

Ex :

- 2 tiges de verre frottées avec un même tissu de soie se repoussent.
- De même pour 2 morceaux d'ambre frottés par une fourrure.
- Par contre, la soie et l'ambre chargés par frottement sont attirés par la tige de verre chargée comme indiqué préalablement.
- Donc, Du Fay conclut **qu'il existe 2 types d'électricité et donc deux types de charges électriques**.
- Comparaison intéressante :
 - Charge électrique => attraction ou répulsion
 - Masse => juste attraction (gravitation)

c. *Franklin*

- Par après, Benjamin Franklin (Ben) dénomma arbitrairement les 2 types de charges :
 - Charge +
 - Charge -

2. Origine de l'électricité

a. *Structure de l'atome*

- Le comportement électrique de la matière dépend directement de la constitution des atomes.
- Chaque atome est constitué d'un noyau central + d'un cortège électronique → Atome = noyau (protons + neutrons) et cortège électronique.
- Le cours de mécanique nous rappelle que :

- Autre caractéristique de la matière : existence de charges différentes. Contrairement à la masse, la matière présente 2 états possibles :

- État +
- État -

- Selon Benjamin, on dira que **le proton porte une charge +, tandis que l'électron porte une charge -**.

b. *Valeur des charges*

- La valeur de la charge portée par un proton est exactement = au signe près, à celle de la charge portée par un électron.
- Cette valeur est désormais désignée par la lettre **e** et est dénommée **charge élémentaire**.
- Toutefois, la recherche dans le domaine des particules élémentaires a mis en évidence les quarks portants des charges :

- Rappelons que **e** vaut :

- Le coulomb est l'unité SI du système international de la charge électrique.

Un peu de blabla : quelques mots sur la quantification de la charge électrique :

- La charge électrique est dite quantifiée et sans quantum vaut :

- La charge du proton et de l'électron a la même valeur :

- Existe donc aussi des quarks dont les charges seraient :
- Mais e est la plus petite charge isolée dans la nature.

c. Sans modification, un atome est neutre

- Si un atome n'a pas subi de modification, il est donc électriquement neutre.
- On dira indifféremment qu'il ne porte pas de charge globale, nette ou encore totale.
- Sous forme d'une relation, on peut écrire :

- Pour rappel, les neutrons ne portent pas de charge électrique.

d. Relation de la quantification de la charge électrique

- Nous savons déjà que e est la plus petite charge libre qui a pu être isolée.
- Or, il sera montré ultérieurement que toute charge q portée par un objet quelconque n'a pu apparaître sur cet objet qu'en ajoutant ou en retirant un certain nombre d'électrons.
- Donc, quelque soient les circonstances de l'expérimentation, on peut écrire :

3. Électrisation par frottement

- 1) Il s'agit de préciser tout d'abord que si un objet initialement neutre capte des électrons, il devient **chargé -**.
 - 2) Dans les mêmes circonstances, s'il **perd des électrons**, il devient **chargé +**.
- Ce processus de perte et de gain d'électron se présente notamment à l'occasion d'un processus de frottement de 2 objets.
- Pour rappel : lors du frottement de la soie sur le verre, le verre se chargeait +
=> **Il avait perdu des électrons**
 - Tandis que la soie se chargeait -
=> **Elle avait capté des électrons**
- **Conclusion** : il y a eu transfert d'électrons du verre sur la soie.
 - Les électrons ainsi « arrachés » quittent le verre pour la soie et chacun d'entre eux abandonne derrière lui 1 proton qui n'est plus compensé électriquement.

4. Loi de conservation de la charge électrique

- Il faut savoir que d'autres processus que le frottement permettent de faire apparaître simultanément les 2 types de signe de charge (circuits électriques, radioactivité, réactions chimiques...).
- Mais quelque soient les conditions d'expérimentation, **la loi de la conservation de la charge électrique est vérifiée**.

Loi de conservation de la charge électrique :

« Suite à tout processus de frottement, la charge électrique nette d'un système isolé reste constante. La charge est donc conservée. »

Ex :

- Verre + soie
- Na^+ et $\text{Cl}^- \rightarrow \text{NaCl}$
- $(+e) + (-e) = 0$

5. Forces électriques entre charges

a. Mobilité des électrons

- Dans la matière à l'état solide, les charges + sont bloquées dans les noyaux. Ceux-ci sont essentiellement immobile, il en est donc de même pour les charges +.
- De plus, la plupart des électrons restent en interaction avec leur noyau au sein des atomes, mais néanmoins certaines électrons périphériques du cortège électronique s'avèrent être libres de se déplacer dans l'objet. Donc, **dans la plupart des situations, seul les électrons sont mobiles** (+ spécifiquement pour les matériaux conducteurs de l'électricité).

b. 2 charges de même signe se repoussent

- Expérimentalement, on constate que 2 charges de même signe se repoussent.

c. Cas d'un objet possédant le même nombre de charges, mais de signes contraires

- Supposons qu'un objet déterminé contienne la même quantité, au signe près, de charges + et -. Une charge externe sera attirée ou repoussée selon le cas, donc : **2 forces exactement opposées vont s'exercer sur l'objet**.

- Donc :

- Aucune force globale n'agira sur la charge externe mentionnée.
- Tout se passe comme si l'objet ne possédait aucune charge.

→ Il est dit électriquement neutre.

d. Nécessité d'utiliser des sous-multiples du coulomb

- Question : combien d'électrons seraient nécessaires pour constituer une charge négative valant -1 coulomb ? Note :

- Donc, pour constituer une charge de -1C , il faudrait amasser à peu près 6 milliards de milliards d'électrons → d'où la nécessité de considérer dans la pratique des sous-multiples du Coulomb :

6. Conducteurs et isolants

a. 2 types de matériaux

- Nous avons certes déjà vu que des charges peuvent exister sur un objet. Par exemple, en conséquence d'un processus de frottement. En réalité, **des charges électriques peuvent aussi se mouvoir à travers un objet**. Si ce mouvement est facile, on dira que le matériau traversé est conducteur de l'électricité → **Métaux**.
- Par contre, si le mouvement des porteurs de charges est mal aisé dans un autre matériau, on dira que celui-ci est un **isolant électrique** ou **diélectrique**.

b. Origine de ces comportements

- L'origine de ces comportements est **atomique**.
- **Conducteur** : les électrons périphériques peuvent se mouvoir à l'extérieur de l'atome d'origine. Les électrons libres pourront subir la force électrique et donc participer au courant électrique.
- **Isolant** : chaque électron reste lié à son noyau (ou presque).

c. 2 autres classes de matériaux

- Il existe 2 classes de matériaux du point de vue du comportement électrique.
- **3^{ème} classe = semi-conducteurs** : Si (électronique) et GaAs = arséniure de gallium (détecteur infrarouge). Note : éventuellement parler du gap... Néanmoins, il faut savoir que ces matériaux sont :
 - Sensibles à la T° ambiante (ordi en été...)
 - Sensibles au dopage = introduction volontaire d'impuretés → expliquer
- **4^{ème} classe = les supraconducteurs** : ces matériaux sont parfaitement conducteurs en dessous d'une T° spécifique de chacun d'entre eux dénommée T° critique. Ex : Al présente un T° critique qui vaut environ 1K.

7. Conducteurs chargés et électrisation par contact

a. Charges sur un objet sphérique

- Nous savons que dans le cas des matériaux isolants, les charges déposées sur un objet restent confinées à l'endroit où elles sont déposées. Par contre, dans le cas d'un conducteur, des charges de même signe déposées en surface ou à l'intérieur de ce conducteur vont se repousser mutuellement et chercheront donc à s'éloigner le plus possible l'une de l'autre.

- Dans le cas d'une sphère conductrice, une charge extérieure déposée sur celle-ci va donc se répartir uniformément sur l'entièreté de la surface externe de la sphère :

b. La densité de charge (!)

- Cette notion vaut aussi bien pour les conducteurs que pour les isolants !
- Considérons une surface infinitésimale dS . Supposons qu'elle porte elle-même une charge infinitésimale dq . Par définition, la densité électrique de surface (ou encore **densité surfacique de charge**) s'exprime comme :

- **Remarque** : dans le cas où la répartition des charges sur une surface macroscopique S n'est **pas uniforme**, on pourra calculer la **charge totale q portée par la surface S** par la relation :

- Définissons maintenant la **densité volumique de charge** :

- Définissons la **densité linéique de charge** :

c. Répartition de charge sur et dans un conducteur

- Considérons la répartition des charges sur et dans un conducteur, l'expérience nous montre que :

1) À l'intérieur des conducteurs fermés, la charge électrique net est nulle (= 0). Il en sera de même de .

2) Sur un conducteur isolé (= à l'abri de toute influence électrique), croît avec la courbure de l'élément de la surface considéré diminue lorsque le rayon de courbure augmente.

Ex : est uniforme sur une sphère conductrice, par contre, si la forme de l'objet conducteur est quelconque, sera plus faible sur les parties de la surface plane par rapport aux surfaces proéminentes.

d. Électrisation par contact

1- L'expérimentation est la suivante : soit une **sphère conductrice supportée par un élément isolant.**

2- La sphère est supposée initialement **neutre.**

3- D'autre part, nous disposons d'un **barreau isolant préalablement chargé** par exemple négativement -.

- Si on assure le contact entre le barreau et la sphère, un certain nombre d'électrons vont passer du barreau à la sphère.

- Les électrons supplémentaires sur la sphère vont pouvoir bouger sur celle-ci, puisqu'elle est conductrice.

- Donc : si l'on écarte le barreau, on aura la situation suivante : **répartition uniforme en surface des électrons amenés sur la sphère.**

- Conclusion : ce mode d'électrisation permet d'obtenir des charges de même signe sur la sphère que celle disponibles sur le barreau.

- Rem : on peut aussi amener des charges + en répartition uniforme : ici, ce sont les électrons qui ont en fait quitté la sphère pour passer sur la barreau.

8. Électrisation par influence

1- Soit une **sphère conductrice supportée par un élément isolant.**

2- La sphère est supposée initialement **neutre.**

3- Nous disposant d'un **barreau isolant préalablement chargé** par exemple négativement.

Étape 1- La sphère neutre possède en fait autant de charges + que de charges -.
Les électrons libres de la sphère vont être repoussés par les électrons portés par le barreau → apparition de charges + à l'autre extrémité.

- Rem : si l'on écartait le barreau, la redistribution des charges sur la sphère ferait disparaître les 2 pôles.

Étape 2- Prolongement de l'expérience : relions à l'aide d'une connexion électrique la partie droite de la sphère à la terre :

- Or, le globe terrestre = conducteur de l'électricité : les électrons pourront **migrer** vers la terre, si bien que si l'on enlève la connexion électrique, et que simultanément on écarte le barreau de la sphère, on obtient la situation suivante :

- Une **répartition uniforme des charges + sur la sphère** (en réalité, ce sont d'autres électrons libres qui sont répartis uniformément sur la sphère, mais il s'agit d'un manque d'électrons localement.

- **Conclusion** : ce 3^{ème} mode d'électrisation correspond à charger selon le signe opposé à celui des charges inductrices.
- Mais : que ce passerait-il dans le cas d'une sphère isolante ?

9. Phénomène de polarisation (matériau diélectrique)

- Supposons que la sphère soit **diélectrique**. Nous savons que dans cette situation on ne peut espérer un mouvement important de charges.
- **Donc** : le procédé par influence ne pourra être appliqué car la connexion à la terre n'amènera pas de mouvement de charges.
- Toutefois, **localement, on pourra observer un processus d'électrisation**. En effet, les molécules vont se déformer car le cortège électronique va se déformer de sorte que les électrons vont virer à l'opposé (formation de 2 pôles) :

Ex : Considérons un sèche-linge. Pendant son fonctionnement, les vêtements sont soumis à un brassage important → d'où processus de frottement. **Donc** : les éléments de tissus portent une certaine charge :

10.Électroscope

a. Utilité

- Détermine si un objet est chargé et de quelle charge il s'agit (signe). Une fois calibré, il pourra mesurer de très petites charges.

b. Constitution

- Une cage métallique cylindrique fermée par 2 fenêtres qui évitent d'éventuels mouvements de l'air à l'intérieur de la cage.

- La cage métallique est soutenue par un pied isolant, toute fois, elle peut être reliée à la terre.
- En position supérieure se trouve le passage d'une tige métallique verticale, avec autour d'elle une bague isolante. Donc, la tige verticale est électriquement isolée de la cage métallique. L'autre extrémité de la tige verticale est composée de soit :
 - 2 fines feuilles légères métalliques
 - Soit d'une tige rigide et verticale et d'une feuille légère métallique

c. Exemple d'utilisation

- **Permet de savoir** : si l'objet est chargé + signe de la charge + quantité de la charge.
- Supposons par exemple que la sphère ait été mise en contact préalable avec l'objet chargé -, par exemple l'extrémité du barreau de plexiglas préalablement frotté contre une fourrure synthétique.

- **Conclusion** : si l'on connaît le signe de la charge préalablement déposée sur l'électroscope, nous constatons que celui-ci peut déterminer le signe de la charge portée par un autre corps approché de l'engin.

II. Le champ électrique

1. Nature et intensité

a. Nature

- Considérons un objet quelconque portant une charge électrique. On sait déjà qu'il repoussera ou attirera d'autres objets électrisés. On peut donc dire que cet objet modifie des propriétés de l'espace l'entourant. On parle de **Champ électrique**.
- **C'est par l'intermédiaire du champ électrique, que la charge portée par l'objet exerce son action à distance sur les autres charges.**
- Toute fois, le champs électrique lui-même n'est pas directement perçu par nos sens (= construction de l'esprit pour faciliter les calculs).
- Définition qualitative : le champs électrique E = propriété particulière de l'espace entourant une charge électrique q due à la présence de celle-ci.
- Rem : le concept de champs est très important en physique, voir aussi le champ gravitationnel, le champ magnétique.

b. Intensité

- Considérons une région de l'espace où règne un E du à une distribution de charges électriques (positionnement des Q pas précisé).
- Considérons par ailleurs une Q infinitésimale + notée $+dq$ → elle doit être suffisamment petite pour ne pas perturber le E évoqué. Une charge de ce type est appelée **explorateur** ou **charge test**.
- Mesurons ensuite la force électrique F (ou force électrostatique) subie par l'explorateur situé en un point déterminé de l'espace.
- Définition quantitative : E est défini par la relation suivante :

- En conséquence, et de manière générale, la force électrostatique F subie par q sera donné par la relation :

- De cette relation, on en déduit que l'intensité de E est numériquement = à l'intensité de la force électrique F agissant sur une charge unitaire + :

Ici, on parle bien de nombre, pas d'unités !

2. Caractéristique de E

a. *E est un vecteur*

- On sait que :
- De cette relation vectorielle nous concluons que E est dirigé comme la force F, mais avec une inversion de sens si $q < 0$.

- E est bien un **vecteur** !
- Remarquons qu'à un point déterminé, le champs électrique est un effet global résultant de l'effet de l'ensemble des champs partiels, chacun de ceux-ci étendus à une charge déterminée.
- Il faut appliquer le principe de superposition.

b. *Principe de superposition*

- À l'intérieur d'un conducteur chargé en équilibre (pas de mouvement de charges), $E = 0$.
- Par contre, à l'intérieur d'un conducteur isolé chargé, E s'étend jusqu'à l'infini, tout en diminuant rapidement d'intensité.
- Exception : un E créé par une plaque chargée très grande et uniforme (même valeur à tout point de l'espace).

c. *Démonstration*

- La force électrique F et donc aussi E qui lui est // au vue de la relation sont perpendiculaires à la surface d'un conducteur en équilibre et ceci en tout point de cette surface (Hecht p 667).
- Démo : en effet, si la force était oblique, elle pourrait automatiquement se décomposer en une composant normale à la surface, et une composante tangentielle à celle-ci.

- Considérons la trace du plan tangent local, mais supposons que F soit oblique par rapport à la normale locale.
- On décompose en F// et F perp locale. Mais si F// est d'intensité non-nul, elle va nécessairement mettre en mouvement les charges => ce n'est pas possible, le conducteur est supposé en équilibre !

3. Lignes de force électrique (ou champs électrique)

a. Définition

(i) Une ligne de force dans un E = trajectoire que suit un explorateur subissant **uniquement la force électrique à tout point du champs.**

Rem : l'explorateur doit se mouvoir très lentement afin de pouvoir réagir le plus rapidement possible à toute variation de $F \Rightarrow$ L'explorateur doit être léger !

(ii) En tout point d'une ligne de force, la direction de la tangente est celle du vecteur F et donc également de E .

Soit un élément de LF ou LC :

\rightarrow Q ?: qu'elle est la direction de E au point A : **Toujours TANGENT !**

(iii) La charge test est **repoussée** par le champs d'une charge $+$ et **attirée** par le champs d'une charge $-$. **DONC** : les LC ou LF sont toujours dirigées du $+$ vers le $-$.

b. Quelques situations expérimentales

(i) Considérons 2 plaques planes // très étendues, électriquement isolée et portant respectivement les **charges totales $+Q$ et $-Q$.**

- Soit : les LF vont de $+$ à $-$ et E est uniforme.

- À l'aide d'un explorateur, on recherche le positionnement des LF entre les 2 plaques. On trouve que celles-ci sont **toutes perpendiculaires aux plaques et donc // les unes aux autres.**

Ceci n'est toutefois valable que si l'on se place suffisamment loin du bord des plaques.

- Quant à E , on mesure la même intensité, quelque soit le point considéré entre la plaque \rightarrow **E est uniforme** (Hecht p 667).

(ii) Soit une sphère conductrice isolée portant par exemple une charge $+Q$. Nous savons que la **distribution des charges constituant $+Q$ est régulière** (uniforme) à la surface de cette sphère.

- Expérimentalement, on constate que tout ce passe à l'extérieur de cette sphère, comme si l'entièreté de la charge $+Q$ était concentrée au centre de la sphère (! Pour les distances dans les formules).

- D'autre part, les LF se dirigent vers l'extérieur de la sphère selon les rayons géométrique de celle-ci.

- Donc, les LF sont perpendiculaires à la surface de la sphère en tout point de celle-ci.

- Enfin, l'intensité de E est spatialement variable en dehors de la sphère, et est donc fonction de la distance du point considéré au centre de la sphère.

- Rem : Si Q est $-$ → LC vers l'INTERIEUR de la sphère.

→ $+Q$ = champs fuyant

→ $-Q$ = champs anti-fuyant

- Rem : vu que les LC prolongent en quelque sorte chacun un rayon géométrique de la sphère, on peut dire que dans cette situation de sphère, **le champs est radial**.

(iii) LF entre 2 sphères chargées

- Considérons 2 sphères conductrices portant des **charges égales**, mais de **signe contraire**. Il est demandé de déterminer le tracé d'une LC. Pour ce faire, on va sélectionner 2 points de la ligne et représenter les champs électriques partiels, puis totaux en ces 2 points. Pour faciliter le tracé de la LC, 2 caractéristiques importantes :

- Le **champs total** en un point quelconque de la LC doit nécessairement être **tangent** à celle-ci.

- Une LC arrivant en surface de l'une quelconque des 2 sphères doit **arriver perpendiculairement au plan tangent local** (Hecht p 667 et observer le dessin où 2 sphères conductrices chargées du même signe).
- Soit 2 sphères conductrices.
- Soit 2 points choisis (symétriques pour faciliter le tracé)
- Recherchons les champs partiels en 1 et en 2 et aux sphères chargées +Q et -Q.

- On obtient un tracé approximatif des LC.
- ! → de + vers -

4. Le théorème de Faraday et les écrans électriques

a. *Théorème de Faraday*

- Lorsqu'un objet conducteur initialement neutre entoure complètement une charge inductrice, les charges induites sur les surfaces *internes* et *externes* de l'objet conducteur sont = au signe près à la charge inductrice.

- Ex : Soit +Q, la charge inductrice (cas avec -Q => contraire !)

- Le phénomène d'influence nous permet d'écrire les signes - et les signes + suivants.
- Mais si nous désignons la somme des +, la charge totale disponible sur la surface externe et si nous désignons par somme des - la charge totale de la surface interne (de la croûte enveloppée), on obtient :

b. Les écrans électriques

- Suite au phénomène d'induction (influence), **un corps conducteur formant écran** peut protéger contre l'action d'une charge électrique et même, en toute généralité, contre les effets éventuels d'un champs électrique quelconque.

- 2 situations peuvent être analysées :

(i) Charge perturbatrice à l'intérieur de l'écran

- Considérons un support : le sol ou un objet quelconque lui-même électriquement relié au sol.

- Soit une **charge perturbatrice +** située à l'intérieur du volume créé par l'écran. Le phénomène d'induction nous permet d'affirmer que les charges - vont se répartir sur la surface externe du treillis.

- **MAIS**, le treillis est en contact avec la terre et les électrons peuvent donc passer de la terre vers le treillis et ainsi neutraliser les charges + « externes ».
- **Conséquences** : comme la théorie de Faraday nous apprend que la somme de l'ensemble des charges - internes prise en valeur absolue sera = à la charge perturbatrice centrale, on en déduit qu'aucun effet électrique ne sera ressenti à l'extérieur du treillis de par la présence de charges perturbatrices. On écrit :

(ii) Charge perturbatrice à l'extérieur de l'écran

- une cage conductrice isolée ou au sol protège le volume intérieur à cette cage, puisque nous savons que $E = 0$ à l'intérieur de tout conducteur fermé. Ce type de cage est appelé **cage de Faraday**. Et lorsqu'un objet est entouré d'un treillis métallique, on dit qu'il est **faradisé**.
- **Application** : pensons à la boîte métallique enfermant les circuits électroniques des différents éléments d'une chaîne-hifi. Donc : cette cage permet de protéger les ses circuits des perturbations électromagnétiques externes.

III. Les lois de Coulomb et de Gauss

1. La loi de Coulomb

a. *1^{er} énoncé de Coulomb*

- Considérons 2 charges ponctuelles q et q' distantes de r mètres. Coulomb mesura la force électrostatiques entre 2 charges et détermina les 2 résultats suivants :

1) La force de Coulomb est directement proportionnelle à chacune des charges individuelles q et q' .

2) Elle est inversement proportionnelle au carré de la distance r .

→ Coulomb a pu écrire :

- De plus, il remarqua que la direction de la force mesurée s'appuyait toujours sur la droite qu'il pouvait tracer entre les centres de q et q' .

- Enfin, l'intensité de la force dépend de la nature du milieu situé entre les charges.

- Rem : il vérifia que les charges de même signe se repoussent et les charges de signes contraires s'attirent.

b. *Formule générale*

- Comme de coutume, Coulomb s'autorisa à écrire :

- Donc, ici : relation d'égalité où :

- k est le coefficient de proportionnalité

- la permittivité du vide. Dans le vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$.

- k va de toute façon dépendre du système d'unité choisis :

- Donc, la loi de Coulomb peut s'écrire :

- En résumé :

- La F de Coulomb s'exerce selon la droite qui joint les 2 charges
- La F est fonction du milieu
- La F est proportionnelle à la valeur de chaque charge
- La F est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les 2 charges (de centre à centre)

c. Notion de permittivité

- Dans le cas où le milieu est le vide, on notera ϵ_0 comme ϵ_0 => permittivité du vide.

- En réalité, la loi de l'électromagnétisme fixe la valeur de ϵ_0 à

- Dans un milieu dense, ϵ_r , ce qui amène à définir ϵ_r est appelé permittivité relative du milieu ou encore cte diélectrique.

- Remarquons que ϵ_r est sans unité.

- Quelques valeurs numériques (à T° ambiante) : en effet, ϵ_r et ϵ_0 sont fonction de la température.

- Vide = 1
- Air = 1,0006
- Plexiglas = 3
- Verre = 5
- Eau = 80 (valeur due au caractère polaire des molécules d'eau).

2. Champ électrique autour d'une charge ponctuelle

- Donc, la loi de Coulomb :

- Considérons la charge q' comme charge test. On peut donc écrire que E_q sera donné par :

- Il s'agit manifestement d'un champ de type radial.

- La sens de E est vers l'extérieur si $q > 0$ et vers l'intérieur si $q < 0$

- E est inversement proportionnel au carré de la distance en différence du potentiel qui est inversement proportionnel à la puissance 1 de la distance :

- D'autre part, ϵ est inversement proportionnel à la permittivité du milieu.

3. Le théorème de Gauss

a. *Notion de flux (de champs) électrique*

(i) Considérons un champ électrique E uniforme, donc, présentant même intensité, direction, sens en tout point de l'espace considéré.

- Soit d'autre part un plan d'air S (m^2) perpendiculaire \perp à la direction du champ uniforme évoqué.

→ Les LC ou LF sont donc perpendiculaires à ce plan.

- Dans ces circonstances, on définit la flux électrique Φ comme étant par définition :

(ii) Supposons maintenant que la surface S soit inclinée (oblique) par rapport aux LC. Il faudrait donc obtenir une nouvelle expression du flux qui tienne compte de cette inclinaison.

- Il s'agit maintenant de définir l'inclinaison par rapport à la verticale. Au point P, nous élevons la normale N à la surface inclinée et nous définissons θ comme étant l'angle par rapport à la direction de la ligne de champs locale.

- Projetons l'entièreté de A sur le plan verticale passant par l'arête supérieure de la surface A . Si bien que la regardant sur le côté de ce dispositif, nous observons A' sur le plan vertical disponible.

- Or, le flux à travers la surface A doit être le même que celui à travers la surface A' puisque ce sont les même LC qui traversent les 2 surfaces. On peut donc écrire :

- Définissons un nouveau vecteur S avec les caractéristiques suivantes : L'intensité de S sera donnée par l'aire S exprimée en m^2 , c'est à dire la surface elle-même considérée. La direction de ce vecteur S sera fixée par la normale locale au plan S ou au plan tangent local si S est courbe.
- Le sens peut être choisis conventionnellement. Toute fois, lorsque la surface S est complètement fermée sur elle-même, la convention habituellement admise est de prendre le sens de S vers l'extérieur de cette surface.
- Suit à cette notation vectorielle pour S , on peut écrire :

(iii) Supposons maintenant que la surface S est inclinée mais qu'en plus, E n'est pas uniforme et peut donc varier de point en point quant à ses 3 caractéristiques. À cause de la Non uniformité de E , il faudra donc, par la pensée, découper S en un très grand nombre de surfaces infinitésimales (dS_i) suffisamment petites pour que le champ local E puisse être considéré comme constant sur dS_i . Le flux total de E à travers la surface totale S sera donc obtenu par la sommation algébrique suivante :

b. On établit la loi de Gauss

- Cette loi donne donc la relation entre le champ électrique sur une surface fermée et l'ensemble des charges enfermées par cette surface.
- Toute fois, le calcul de l'intégrale de surface ne sera aisé que dans le cas de problèmes présentant une grande symétrie (sphères, cylindres, cubes...)
- Conclusion :

Énoncé de la loi de Gauss :

- Le flux de champs électrique à travers une surface fermée est = à la somme des charges enfermées par cette surface, divisée par la permittivité électrique du milieu.
- Donc, on peut écrire :

- Rem :

1) Traditionnellement, on ajoute un o qui signifie que l'intégrale de surface doit être calculée sur une surface fermée.

2) Dans la démonstration qui n'a pas été donnée, il est normalement fait mention du fait que la surface d'intégration S peut être FICTIVE ou hypothétique.

4. Application du théorème de Gauss

a. Conducteur plan

Étape 1 :

- Nous constatons une répartition régulière des charges = distribution uniforme → on peut donc définir une unité de densité surfacique de charges notée σ .

- Les 2 dimensions notées sont aussi supposées infinies afin d'éviter les effets de bords.

- Le caractère infini donne un autre avantage: quelque soit le point extérieur choisis, une charge test placée en ce point « ressentira » les effets électriques équivalents de l'ensemble des charges situées dans le même plan, // au conducteur. Conséquence : la direction de E est purement perpendiculaire au plan chargé puisque les éventuels composantes tangentielles à ce plan se compenseront (remarque ci-dessus).

- Le problème posé est de déterminer E en tout point extérieur au plan chargé.
Donc, 3 caractéristiques à trouver (sens, direction et)

→ Direction sera perpendiculaire au plan.

→ Sens → champs fuyant car charges +.

- Faisons choix d'une particule située à l'extérieur du plan : calculer E en ce point.

- Si on veut utiliser Gauss, il faut que la surface hypothétique passe par ce point. De plus, l'intégration ne sera relativement simple que si la surface présente une haute symétrie.

- Faisons choix d'un cylindre, afin d'utiliser la symétrie du système → il y aura intérêt à ce que l'axe du cylindre soit lui-même perpendiculaire au plan chargé.

- Il faut aussi fixer le positionnement des 2 bases du cylindre : nous placerons l'une d'entre-elle passant par le point 1.

- ! **Astuce !** : La 2^{ème} base sera placée dans l'épaisseur du plan chargé, car de la sorte, le flux de E à travers cette base sera NUL (= 0) automatiquement, car E est nul à l'intérieur d'un conducteur.

- Considérons maintenant dans l'espace quelques vecteurs E et dS afin de calculer la loi de Gauss :

- La surface S_{tot} est décomposable en 3 contributions :

- Donc, le flux à travers S_2 sera nul (= 0) !!!

- $dS_1 \Rightarrow$ vecteur infinitésimal

- Considérons un point quelconque de la surface latérale.

Étape 2 :

- Calcule des 2 contributions restant au flux

- On peut donc écrire :

- Remarquons que vu la symétrie du dispositif (plan infini) d'une part et le fait que tous les points de S_1 sont **équidistants** du plan chargé, d'autre part, on peut affirmer, qu'en chaque point de S_1 , E vaut $E_1 \Rightarrow E = \text{constant}$.

- Donc :

→ Il reste à calculer l'entièreté du flux sur la surface latérale.

- Mais sur le dessin, aux deux points sélectionnés sur cette surface latérale, on constate l'**orthogonalité** de E et dS .

→ Donc, dans le produit scalaire,

- La loi de Gauss dit que :

- Or, la distribution avait été supposée homogène à la surface du plan. Donc :

- Or, la point 1 avait été choisis au hasard dans l'espace. Conclusion : E généré par un plan chargé est **UNIFORME** :

b. Plan chargé diélectrique

Étape 1 :

- Au petit a, nous avons bénéficié du fait que E pouvait être considéré comme nul sur l'entièreté de la surface S_2 , soit sur la 2^{ème} base du cylindre fictif de Gauss.
- Le cas présent concerne un matériaux diélectrique et donc cet avantage disparaît. Toute fois, afin de simplifier les calculs, on maintiendra la forme cylindrique de la surface de Gauss et on la prendra symétrique par rapport au plan chargé.
- Supposons que la plan est chargé +.
- Différence avec l'autre cas : les charges + sont aussi disposées à l'intérieur de plan chargé.
- σ = densité surfacique de charge.
- E est fuyant.

- On positionne quelques vecteurs $d\mathbf{S}$ → on choisit un point 1 quelconque à l'extérieur du plan chargé. But : calculer E en ce point. Le point 2 est symétrique au point 1 car cylindre.
- Note : on ne peut connaître l'intensité des vecteurs E.
- Traçons les vecteurs $d\mathbf{S}$: dirigés vers l'extérieur du volume fictif de Gauss.
 - Perpendiculaire au plan tangent local
 - Extérieur du volume !!!
- Pour ce qui est du calcul du flux totale, nous aurons 3 contributions : respectivement à travers :

- Comme dans le cas a, la contribution sera nulle (=0) car en tout point de cette surface latérale il y a orthogonalité entre les directions des vecteurs E et $d\mathbf{S}$, donc :

- Il reste uniquement les contributions S_1 et S_2 .

1^{ère} contribution :

- Rem :

1) $S_1 + S_2 = S_3$ car il s'agit de 3 sections droites d'un même cylindre. Baptisons S la valeur commune aux 3 cylindres.

2) Les 2 surfaces S_1 et S_2 sont en réalité équidistantes du plan chargé. Donc : l'intensité des champs E_1 et E_2 seront =.

→

Étape 2 :

Rappel :

- Pour ce qui concerne la quantité Q , elle correspond à l'ensemble des charges déposées sur la zone hachurée du dessin, c'est à dire dans toute l'épaisseur du plan en dessous de la surface S_3

- Rem : remarquons que la notation Q n'est pas vraiment correcte puisqu'il s'agit en réalité de l'ensemble des charges dans un volume fixé par la position S_3 . Donc :

→ Comme pour le plan conducteur : chargé de manière uniforme sur la surface.

c. 3^{ème} application : le feuillet électrique

Déf : feuillet électrique = ensemble de 2 distributions de charges de signe $><$ réparties uniformément sur les faces d'une lame diélectrique insérée dans un autre milieu diélectrique. Ces 2 milieux sont par ailleurs **homogènes**.

- ϵ est la permittivité électrique du milieu = lame de plexiglas. De part et d'autre, on trouve 2 milieux :

- Représentons en rouge quelques vecteurs E dus aux charges $+$ → vecteurs fuyant par rapport à la couche $+$.

- Même processus pour les charges $-$.

- **Constataion** : les vecteurs E se compensent localement en tout point extérieur de la lame. Par contre, il y a renforcement de E en tout point de cette même lame diélectrique.

- Le but de cette section est de déterminer l'intensité de E dans la lame ainsi que dans les 2 zones externes à celle-ci.

- Supposons que la lame diélectrique soit caractérisée par sa permittivité étant la permittivité du matériau qui se répartit de part et d'autre de la lame.

- Considérons tout d'abord E généré par les charges $+$ et puis faisons de même pour les charges $-$. Dans le matériaux 1, E_+ et E_- se compensent est donc :

- Par contre, le champ intérieur est renforcé :

Remarques :

- Les intensités des vecteurs E dans la région 1 et 2 ne sont **pas identiques** selon que l'on se place à l'intérieur ou à l'extérieur de la lame. En effet, ϵ_1 intervient à l'intérieur, alors que ϵ_2 intervient à l'extérieur et les 2 matériaux avaient été pris différents.
- Ce dispositif du feuillet électrique se retrouvera à nouveau dans l'étude des condensateurs plans. En effet, situation identique si l'on considère 2 plaques conductrices // avec pour l'une des charges + sur la surface interne et pour l'autre des charges - sur sa propre surface interne.

IV. L'énergie potentielle électrique et le potentiel électrique

1. Le travail électrique dans un champ E uniforme

a) Soit une charge q supposée $+$ se déplaçant d'une manière rectiligne d'une distance d et ceci dans un champ supposé uniforme. Le travail W est égal à :

- Du à l'existence de E , il existe sur q la force électrique F .
- Nommons les 2 extrémités du déplacement A et B .
- La relation trouvée implique que si l'on choisit un chemin quelconque entre A et B , on constate que l'expression du travail total de la force électrique échangé entre A et B sera toujours donné par cette relation.
- Conclusion : **le travail échangé par la force électrique entre les deux points ne dépend pas de la position initiale A et de la position finale B . Le travail de la force électrique est donc indépendant du trajet suivi : la force électrique est donc conservative.**
- On peut donc lui associer une énergie potentielle électrique selon la relation :

- Existence du signe $-$: en effet, dans le cas traité, $W > 0$ car F (force électrique) va dans le sens de d . Donc, vu le parallélisme des 2 vecteurs. Par contre, toujours dans le même cas traité, **l'énergie potentielle de la charge $+$ diminue lorsque l'on s'écarte de celle-ci.** Donc : $U_B < U_A$, donc nécessité du signe $-$ afin de retrouver un $W > 0$.

b) On dira aussi qu'il existe une ddp $U_B - U_A$ entre les mêmes points A et B . Par définition :

=> Donc, la ddp est le travail échangé ou encore la variation d'énergie potentielle électrique par unité de charge.

3 définitions :

- **Ddp** = travail échangé ou encore, la variation de l'énergie potentielle par unité de charge.

- L'unité dans le SI pour le potentiel électrique est dénommé le **volt** en l'honneur de Volta (physicien italien inventeur de la 1^{ère} pile électrique). → Une ddp entre 2 points dans l'espace vaut 1 volt lorsqu'il faut fournir un travail de 1 Joule pour déplacer une charge de 1 Coulomb entre ces 2 mêmes points.

- L'unité de l'énergie potentielle est le **Joule (J)** au niveau macroscopique. Mais il existe une autre unité au niveau microscopique : l'**électronvolt (eV)** → cette unité correspond à l'énergie potentielle d'une charge élémentaire e placée en un point de l'espace où règne un potentiel de 1 volt.

c) Par convention, le signe de la ddp correspond au déplacement d'une charge +.

→ On dira qu'une ddp est + lorsque le potentiel d'arrivé sera supérieur au potentiel de départ, c'est à dire lorsque la charge + reçoit une certaine quantité d'énergie. On dira de même que la ddp est - lorsqu'il s'agira d'une perte d'énergie.

d) Rassemblons nos connaissances :

- Attention : la direction de X est la même que celle de E .

2. Cas général d'un E non-uniforme

a) Dans cette nouvelle situation il faudra considérer tous les déplacements de type dx (petits déplacements), car E varie de point en point → ce qui nous amène, comme par hasard, à considérer des éléments infinitésimaux de travail. Nous pouvons écrire :

- Et donc, le travail total échangé le long de la trajectoire suivie par q va donc s'exprimer comme étant :

=> **Relation valable dans un E non-uniforme !**

- Cette relation permet de calculer un ddp entre 2 points quelconques A et B lorsque l'on connaît la distribution spatiale de E

d) Il existe la relation 1 qui généralisée devient (forme microscopique) :

- Cette relation est la plus générale qui existe entre E et V.

- Or, la dérivée 1^{ère} spatiale par rapport à la distance et selon une direction déterminée de l'espace est dénommée le gradient de cette direction.

→ **Donc** : E en un point est au signe près le gradient du potentiel électrique le long de la LC passant par ce point. En effet, en tous les points de l'espace, la direction de E est donnée par la tangente locale à la LC passant par ce point.

3. Surfaces équipotentielles

a. Définition

- Déf : Surface équipotentielle = surface dont tous les points sont au même potentiel.

- Exemple : Dans le cas d'un plan conducteur chargé infini, il a été démontré que E est UNIFORME. Toute surface plane extérieure à ce plan et // au conducteur est une surface équipotentielle.

b. Quelques théorèmes

1) Tout déplacement le long d'une surface équipotentielle se fait sans échange de travail électrique ($W=0$). En effet, dire que la surface est équipotentielle revient à dire qu'il n'y a pas de ddp entre 2 points quelconques de cette surface :

2) La force électrique et donc aussi E qui lui est //, ainsi que les LC et LF sont perpendiculaire à la surface équipotentielle en tout point de celle-ci. En effet :

3) Réciproquement par rapport à 2, si un déplacement s'effectue constamment sans travail, c'est qu'il se produit sur une surface équipotentielle.

4. Potentiel d'un conducteur

a) Le potentiel est le même en tout point de la surface, ainsi qu'à l'intérieur d'un conducteur en équilibre (pas parcouru par un courant électrique).

Démonstration :

- En effet :

1) à la surface de ce conducteur, nous savons que E et F sont perpendiculaires à la surface =>

Donc : le long de n'importe quel déplacement pris sur cette surface, le travail échangé par la force électrique sera = à 0 (\rightarrow produit scalaire en jeux). Si $W = 0$. Il en est de même pour :

2) On sait que E à l'intérieur d'un conducteur est = à 0. Donc, aucune force électrique ne pourra agir sur une charge quelconque à l'intérieur du conducteur. Donc :

b) Remarquons que si un conducteur quelconque présente une surface extérieure de courbure variable, la densité surfacique de charge sera aussi variable \rightarrow voir chapitre 1. **Mais néanmoins, le potentiel sera de même valeur en tout point de la surface du conducteur.**

5. Calculs de potentiels

a. Potentiel dans un E radial illimité (monopôle)

(i) Considérons une charge ponctuelle q ou encore une sphère uniformément chargée portant une charge totale q (dans le cas d'une sphère conductrice, la charge se répartit seulement en surface).

- Supposons $q > 0$.

- Nous savons que le champ E qu'elle va générer sera radial et fuyant. Pour rappel, son intensité est donnée par :

- r , sera la distance par rapport à la charge ponctuelle, ou encore la distance du point de l'espace considéré au centre de la sphère chargée.

- Soit un point quelconque où q .

- Traçons un élément du cercle avec q pour centre.

- Considérons par ailleurs un vecteur tangent :

- Conclusion : toutes les surfaces sphériques centrées par la charge q constituent des surfaces équipotentielles. Note : la surface de la sphère = fictive ! On peut dire que :

(ii) Calculons la ddp entre 2 surfaces équipotentielles sphériques respectivement définies par le rayon r_1 et r_2 avec $r_1 < r_2$.

- Il s'agira donc de calculer le \int_1^2 le long d'une LF, donc le long d'une direction radiale (distance r et dr avec \vec{e}_r).

- Calculons donc la \int_2^1 le long d'une direction radiale en s'appuyant sur à la fois la position de q , mais aussi sur les positions des points 1 et 2. Remarquons qu'il s'agit en réalité d'une direction de ligne de force.

- Nous connaissons cette relation :

- Mais $\frac{1}{r^2}$ est plus petit que $\frac{1}{r}$, donc, $\frac{1}{r}$. Si la charge génératrice du champ est +, le potentiel électrique augmente alors lorsque l'on se rapproche de la charge.

Remarque :

- Cette relation nous donne le potentiel électrique en 1 point situé à une distance r d'une charge q par rapport à un point situé à l'infini. Donc, le potentiel n'est pas absolu car par rapport à un point très éloigné.

(iii) Considérons à nouveau une charge ponctuelle q .

- Supposons à la distance r de celle-ci une 2^{ème} charge q' (ponctuelle). V est le potentiel qui règne où se trouve q' et qui est généré en ce point par la charge q :

- Il s'agit bien de l'énergie potentielle de q' dans le E de q , exprimée par rapport à l'infini, c'est à dire en pratique par rapport en un point de dehors de l'influence de q .

(iii) Si la charge q était < 0 , cette énergie potentielle sera - également (cas des électrons gravitant autour du noyau atomique)

b. Potentiel électrique du à un dipôle

(i) **Définition :**

- **Dipôle** = distribution de charges électrique tel que le centre des charges + ne coïncide pas avec le centre des charges -.

- **EX** : molécule d'eau :

- Par convention, le moment de ce dipôle est un vecteur dont l'origine est au milieu du dipôle ; sa direction est donnée par la droite qui passe par les 2 centres de charge. Par convention, son sens va du - au +. Enfin, l'intensité du moment donné par le produit de la charge, par la distance des centres de charges :

- Repère du point milieu entre 2 centres de charges O.
- Note : la molécule d'eau est polaire.

(ii) Calcul du potentiel :

- Donc, soit $-q$ et $+q$, les 2 charges du dipôle.
- l = distance entre les 2 charges.
- Représentation du moment dipolaire : point O par convention.

- Faisons choix d'un axe oz dont le sens correspondrait à celui de m (juste un choix).
- Soit un point quelconque quand p est à l'extérieur : il s'agit de préciser sa position par rapport au dipôle.
- On a un angle θ .
- Distance $op = r$
- Remarquons que le couple \vec{m} n'est rien d'autre que les coordonnées polaires (m, θ) .
- J'ai besoin de 2 autres distances :
 - Entre p et $+q = r_+$
 - Entre p et $-q = r_-$

A) - p doit être suffisamment éloigné à la fois de $+q$ et de $-q$ de telle sorte que r soit suffisamment grand par rapport à l ($r \gg l$) → Nous verrons par la suite pourquoi.
 - !, vu la symétrie de révolution autour de l'axe oz , le potentiel électrique V (qui est une quantité physique scalaire) se sera pas modifié en vecteur **si l'on fait tourner le point p autour de l'axe oz , pour autant que les valeurs de r et de θ restent fixées.**

- En conséquence, il suffira de déterminer V fonction de r et θ (V, r, θ) dans le plan contenant l'axe oz , de même que le point p considéré.
- Par la pensée, on fait tourner op autour de l'axe : on a toujours une même inclinaison et une même distance par rapport aux charges = simplification des calculs.

B) - D'autre part, le travail nécessaire pour amener une charge unité de l'infini en p . Étant une quantité scalaire, est la somme algébrique du travail qu'il faudrait effectuer pour amener cette charge de l'infini en p , en présence de la seule charge $+q$, et du travail qu'il faudrait effectuer pour amener la même charge de l'infini en p en présence de la seule charge $-q$ → on prend chacune des charges séparément pour calculer les contributions.

- Vu les relations que nous connaissons, liant le travail au potentiel, on peut écrire que :

- Remarquons que à la fois $V(+)$ et $V(-)$ sont des potentiels de type monopolaire car chacune a une seule charge.

Or :

- A ce stade → utilisation de l'approximation annoncée qui ne sera valable que si $r \gg l$

- Or,

- La relation 1 dit :

- Il faut trouver des vecteurs pour calculer le → produit scalaire, vecteur position r .

- Appliquons un tour de passe-passe pour la beauté du geste :

(iii) Conclusion

- Propriété 1 : Le potentiel dipolaire est proportionnelle au moment dipolaire et diminue en $1/r^2$ (voir relation 2) pour une direction fixée dans l'espace. Pour rappel, θ est fixé.

Rappel : le potentiel monopolaire diminue quant à lui en $1/r$ et ne présente aucune dépendance angulaire (expression 2).

- Propriété 2 : le potentiel dipolaire est nul ($=0$) dans le plan équatorial du dipôle. En effet, $V = 0$ dans ce cas.

- De plus, en tout point p appartenant à ce plan équatorial, le vecteur \vec{E} résultant de la présence de $+q$ et $-q$ est perpendiculaire au plan équatorial : preuve =

- Faisons choix d'un point p dans le plan équatorial.

- Soit : on a un champs partiel fuyant concernant $+q$ et un champs partiels anti-fuyant concernant $-q$.

- ! : le module des 2 vecteurs \vec{E}_1 et \vec{E}_2 sont = aux signe près.

- Donc : pour tout déplacement $d\vec{r}$, choisis dans le plan équatorial du dipôle, on aura :

- Donc : le travail nécessaire pour déplacer une charge dans ce plan équatorial = 0.
Donc : équipotentielle.

- Propriété 3 : pour une distance r déterminée,

- Donc : + au dessus du plan équatorial et - en dessous.

(iii) Ligne de forces et équipotentiels

- L'espace entre les 2 charges constitutives du dipôle présente en tout point la propriété suivante : **en tout point il y a perpendicularité entre la LC et l'équipotentielle passant toutes 2 par ce point.** En effet, nous savons que, d'une part, E est tangent à la LC et que d'autre part, le même E est perpendiculaire à l'équipotentielle.

- Représentation : plaçons le dipôle selon l'horizontale, afin d'étudier une situation comparable à celle vue antérieurement pour 2 sphères chargées $+Q$ et $-Q$.

- Les LC vont devoir quitter la charge + et rejoindre la charge -.

- Question : où sont les équipotentiels ? → Voir propriété.

=> On prend le centre de la distance séparant les 2 sphères chargées et on trace l'équipotentielle. Cette équipotentielle est rectiligne et correspond à $V=0$ (potentielle, pas ddp). Par la suite, on trace les tangente locales pour trouver les équipotentielle et on remarque que plus on se rapproche des 2 sphères chargées, plus les équipotentiels se courbent.

c. Piézoélectricité

- La piézoélectricité est un phénomène particulier apparaissant pour certains cristaux, comme le quartz, ainsi que pour certaines céramiques.

- Idée : ces dispositifs sont taillés sous la forme de disques, **selon certains axes cristallographiques bien déterminés.**

- Sous ces conditions, il laisse apparaître une ddp variable entre leur face de base lorsqu'une pression est exercée sur celle-ci.
- Inversement, si entre les mêmes faces on applique une ddp variable et si le dispositif est suffisamment mince, on pourra générer des ultrasons (ex : cuve à ultrasons).

V. Capacité électrique-condensateur

1. Capacité d'un conducteur isolé

a. Rappels :

- Isolé = à l'abri de toute influence électrique extérieure.
- En 1 point situé à la distance r d'une charge q :

b. Capacité d'un conducteur

- On pourrait montrer que le potentiel d'une sphère conductrice isolée de rayon R et portant une charge totale Q est donné vu la relation (1) par :

Q = charge portée par la sphère

V = potentiel résultant de la présence de cette charge. Pour rappel, le potentiel est uniforme dans l'entièreté de la sphère.

- Habituellement, cette relation est mise sous la forme suivante :

C = capacité du conducteur isolé.

- Donc, de manière générale, la capacité d'un conducteur isolé est le rapport entre la charge amenée sur le conducteur et le potentiel électrique qui en résulte :

- En réalité, cette dernière relation est valable quelque soit la forme du conducteur. Donc, C = constante et est une caractéristique géométrique du conducteur.

- L'unité de capacité est le Farad.

- Définition : Farad = capacité d'un conducteur qui est porté à un potentiel de 1Volt lorsqu'on lui fournit une charge nette valant 1Coulomb. Cette unité est en réalité énorme, d'où l'emploi de sous multiples du Farad.

2. Capacité d'un condensateur

a. Définition d'un condensateur

- Définition : Condensateur = ensemble de 2 conducteurs s'influençant mutuellement de manière totale, c'est à dire de telle sorte que l'ensemble des LC se terminent sur l'autre conducteur. Les 2 conducteurs seront appelés armatures du condensateur.

- Propriété !!!: puisque aucune LC ne peut quitter le condensateur, on en déduit que le E est nul ($=0$) à l'extérieur du condensateur.
- Appliquons le théorème de Gauss à ce condensateur. Si l'on applique celui-ci sur une surface fictive entourant complètement le condensateur, on apprendra que la charge totale nette portée par le condensateur doit être nulle ($=0$). → Donc : **les 2 armatures du condensateur portent des charges d'égale intensité, mais de signes contraires.**

b. Existence de 2 grands types de condensateurs

1) Le condensateur *englobant*

2) Le condensateur à *armature protégée*

c. Rôle d'un condensateur

- Quel est le rôle d'un condensateur dans un circuit ? = **Accumuler des quantités importantes des charges à bas potentiel.**
- Considérons un condensateur portant une ddp entre les 2 armatures qui respectivement portent les charges $+Q$ et $-Q$
- Par analogie, avec le cas déjà étudié d'un condensateur isolé, nous pouvons écrire :

→ Ceci est la relation fondamentale de l'étude des condensateurs.

3. Capacité d'un condensateur plan sans diélectrique

- Il existe un vide entre les 2 plaques, ou au pire, de l'air sec.

- Soit 2 armatures situées à une distance d l'une de l'autre.
- Existence d'un E et d'une ddp entre ces deux plaques.
- Les 2 plaques sont chargées $+$ et $-$ → $+Q$ et $-Q$ sont les charges totales sur les 2 armatures.

- De part l'étude du feuillet électrique, nous savons qu'effectivement, un **E est nul à l'extérieur du condensateur, tandis qu'il est uniforme à l'intérieur** (entre les deux armatures, du moins, si nous sommes situés suffisamment loin des bords) et si les armatures étaient infinies l'une et l'autre, on aurait :

- **Remarque** : dans la pratique, les armatures ne sont pas infinies, il faudrait donc mener à bien un calcul plus compliqué menant à une formule tenant compte des effets de bords.

4. Groupement de condensateurs

a. Introduction

- Par convention, on représente toujours un condensateur par 2 traits // de même longueur représentant les armatures, même s'il ne s'agit pas d'un condensateur plan.

- Dans la pratique, il existe 2 manières de regrouper les condensateurs :

1) Soit **en //** : dans ce cas on reliera par un même conducteur les armatures portant des charges de mêmes signes.

2) Soit **en série** : dans ce cas on reliera une armature portant une charge + à une autre armature portant une charge -.

- Nous noterons : C_1, C_2, \dots, C_n les capacités des condensateurs faisant partie d'un groupement quelconque.

b. Montage en //

- Ces condensateurs sont montés en // puisque toutes les armatures de même signe sont reliées entre elles.
- On remarque de la ddp est commune (la même) aux bornes de tous les condensateurs. Cela permet d'écrire :

- Donc, la charge totale Q portée par la partie supérieure du dispositif sera donnée par :

- Mais, on peut aussi considérer le groupement global des condensateurs C_i et dénommer $C_{\text{éq//}}$ la capacité globale du dispositif entier, et donc écrire :

c. Montage en série

- représente la ddp disponible entre l'armature gauche du 1^{er} condensateur et l'armature droite du dernier condensateur.
- Remarquons qu'à cause du phénomène d'influence, et comme chacun des condensateurs est supposé neutre, si l'on dépose une charge $+Q$ sur la 1^{ère} armature → séparation des charges à cause du phénomène d'influence.
- = ddp totale → charges connues
→ charges différentes du cas précédent
- De par la relation de base des condensateurs, on peut écrire la relation suivante :

- On augmente donc la ddp à charge cte. En effet, vu la relation (3), la est plus petite que la plus petite des capacités individuelles. Donc, dans la relation de base :

5. Capacité d'un condensateur plan diélectrique

a)

- La plaque du diélectrique, avant son introduction entre les armatures était constitué de molécules neutres qui, de plus, présentaient une coïncidence entre le centre de charge - et le centre de charge +.

- Lorsque ce diélectrique aura été introduit entre les armatures, E va agir sur chacune des molécules du diélectrique.

Ainsi, pour chacune, les 2 centres évoqués vont se séparer dans l'espace, d'où apparition sur chacune d'un **moment dipolaire**.

- Dans la région contrôle du diélectrique, les effets des charges + et - déplacées se compensent globalement vu le très grand nombre de ces molécules.

- Par contre, à proximité immédiate des armatures, on voit apparaître d'un côté une couche de charges - en excès et de même, une autre couche + en excès.

→ Cette double couche va elle-même générer son propre E : il s'agit en quelque sorte d'un contre-champ.

- Nous pouvons donc écrire que le champ global (champ dit effectif) :

- En conséquence, est sûrement et traditionnellement on écrit :

- est caractéristique du matériaux diélectrique utilisé. Nous constatons, qu'elle mesure la réduction de E suite à l'introduction du diélectrique.

b) On pourrait montrer que la capacité du condensateur plan avec diélectrique est donnée par la relation :

6. Énergie électrique stockée dans un condensateur

- Dans un condensateur, nous disposons d'une charge (Q) ainsi qu'une ddp . On connaît d'autre part que

- On pourrait montrer que dans le cas d'un condensateur chargé, l'En potentielle électrique stocké est donnée par :

- Cette énergie peut être libérée en reliant les 2 armatures par un conducteur.
- Cette décharge se produit rapidement et la puissance dissipée est donc très grande (lampe de flash de photo).

- **Exemple** : soit une batterie de condensateur, donc :

→ Calculer que

- Si la décharge s'effectue en une microseconde, la puissance libérée est de 500 mégawatt , ce qui correspond à la puissance délivrée par une centrale électrique, mas uniquement durant une microseconde.

7. Le champ disruptif

- **Définition** : le champ disruptif est la valeur de E pour laquelle commence à se produire une étincelle entre les armatures du condensateur. D'où chemin carboné dans le diélectrique, donc claquage de celui-ci, d'où condensateur inutilisable.

- **Conclusion** : introduire un matériaux diélectrique entre les armatures d'un condensateur permet d'augmenter la ddp maximale de travail du condensateur.

E. Partie 2 : Électrocinétique

I. Force électromotrice et courant électrique

(1) Dans la vie quotidienne nous sommes entourés d'appareils électriques, ce qui implique que les sources d' $E_{\text{électrique}}$ doivent être facilement accessibles (ex : piles, batteries...)

(2) À l'intérieur de ces générateurs, du moins les générateurs continus, une réaction chimique s'exerce. Elle transfère des électrons d'une borne d'un générateur à l'autre. Donc, une borne se charge + et l'autre -, d'où le symbole utilisé dans les schémas simples électriques :

- De plus, les signes des charges étant différents, il existe donc une ddp entre les 2 bornes du générateur : on dit aussi qu'il y a un **voltage** entre les 2 bornes.

- **Définition** : Cette ddp **maximale** pouvant exister entre les 2 bornes du générateur est dénommée la **force électromotrice** de ce générateur (f-é-m) et elle est notée :

Unité : volt

Exemple : pour une batterie d'auto
 Pour une pile

- **Rem** : la force électromotrice n'est pas du tout une force, mais une ddp.

(3) Considérons le circuit électrique simple suivant :

- En fait, le générateur génère un E dans le circuit complet et donc dans chacun de ses éléments conducteurs.

- ! Toutefois, il existe dans cette situation un E interne au conducteur considéré. En effet, le générateur maintient une ddp entre les bornes du conducteur, ce qui empêche les charges de se présenter uniquement à la surface du conducteur (= situation d'équilibre mais en électrostatique). Ceci correspond bien à une situation de déséquilibre permanent.

- L'existence de ce E interne force les électrons libres à bouger constamment dans le **même sens**. Il y a donc apparition d'un courant électrique défini comme étant la quantité de charges passant par unité de temps à travers une section d'un conducteur prise perpendiculairement au mouvement des charges. On pourrait aussi dire à travers une section droite du conducteur.

- Si le flux d'électron est **constant** dans le temps, on obtient donc :

- Par contre, si le flux d'électrons n'est pas constant dans le temps, on pourra définir le courant moyen noté :

- On peut aussi considéré le courant instantané :

(4) Si les porteurs de charges, les électrons, se meuvent toujours dans le même sens le long du circuit, on parlera de **courant continu (DC)**. Ex : pile.

- Par contre, si ce courant existe une fois dans un sens, une fois dans l'autre, on parlera d'un **courant alternatif (AC)**. Ex : prise de secteur.

(5) ! Il faut faire la distinction suivante :

1. Le courant conventionnel correspond à un mouvement de charges + qui va de la borne + à la borne - le long du circuit extérieur au générateur.
2. Le courant électronique qui est bien, lui, réel. En effet, les électrons quittent la borne - pour se diriger vers la borne + le long du circuit extérieur au générateur.

II. Loi de Ohm

(1) Appliquons une ddp à un conducteur, par exemple, un métal. Un courant I va le parcourir et l'on constate expérimentalement que sur une large gamme de tension et de courant, le rapport V sur $I = cte$.

- Cette cte fut appelée la **résistivité du conducteur (R)**

- L'unité SI de la résistance = le ohm

- ! Notons qu'il s'agit d'une ddp mais qui est notée V (pas un potentiel absolu).

(2) Le conducteur lui-même peut s'appeler **résistance**. Notons que R peut être de valeur très faible (ex : connecteur de cuivre dans la TV), mais aussi très élevé (jusqu'à quelques centaine de mégaohms).

(3) Dans les schémas de circuits, une résistance est représentée par :

- Si par contre une résistance est nul ou négligeable, le symbole de cet élément est une ligne droite :

III. Loi de Pouillet

- Considérons une résistance de la longueur l et de section droite S .
L'expérimentation montre que :

- Rem : la valeur de R est fonction du matériaux constitutif de la résistance, tandis que R est fonction non seulement de la nature de ce matériaux, mais aussi des caractéristiques géométriques de la résistance via l et S .

- Quelques valeurs :

- À retenir : R peut varier de 10^{-8} pour les métaux jusqu'à 10^{12} pour le téflon.

- Conclusion : R (résistivité) est donc de valeur très variable selon la substance.

IV. Variation en T° de la résistivité

- Pour les métaux, la résistivité augmente si la T° augmente.

- Par contre, pour les semi-conducteurs, elle diminue si la T° augmente.

- En règle générale, sur des gammes de T° limitées soit de T_0 jusqu'à T , on obtient la relation linéaire suivante :

Note :

- α s'appelle le coefficient en T° .

- Pour le cuivre : $\alpha = +0,004$ (métal)

- Pour le Si : $\alpha = -0,007$ (semi-conducteur)

V. La supraconductivité

1. Définition

- Certains matériaux montrent un comportement tout à fait spécifique pour ce qui concerne l'évolution en T° de leur résistivité. En effet, lorsque la T° devient inférieure à une T° déterminée (T° critique), ces matériaux deviennent brusquement d'excellents conducteurs, d'où leur appellation de supraconducteur.

- T_c est bien fonction du matériau :

2. Exemple numérique

- T_c est habituellement de valeur très faible :

- Toutefois, depuis quelque temps, on a découvert une autre classe de supraconducteur : les céramiques (oxydes mixtes).

- Certaines d'entre elles manifestent une T_c de l'ordre de 125K. La recherche actuelle tente de mettre au point des céramiques dont la T_c arriverait à la T° ambiante.

- But poursuivit : améliorer les performances technologiques et diminuer le coût d'utilisation → on veut en fait limiter les pertes d'énergie dues à l'effet joule.

VI. La puissance électrique

- Considérons un générateur (ex : pile) présentant entre ses bornes une **ddp V** , supposant qu'il soit relié à un circuit extérieur. S'il a fourni une quantité de charge q coulomb à ce circuit extérieur, ce même générateur aura également fourni une énergie électrique qV (J).

- Supposons que cette charge q ait été fournie pendant t seconde. La puissance électrique P fournie par le générateur sera donc donnée par :

- On connaît par ailleurs la loi d'Ohm qui nous permet d'exprimer soit I , soit V :

- Donc : **3** formulations de la puissance.

- Rem :

1) L'expression correspond à un conversion d'énergie électrique en chaleur : effet joule (résistance chauffante).

2) Un kWh n'est pas du tout une puissance, mais une énergie électrique :

$1\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
--

VII. Montages (groupements) de résistances en série et en //

1. Montage en série

- Le même courant parcourt tous les éléments du circuit = idée maîtresse !

- On trouve que :

2. Montage en //

- Les éléments du circuit sont placés relativement l'un à l'autre de sorte que ce soit la même ddp qui soit appliquée à chacun d'entre eux.

- Soit I le courant conventionnel total quittant le générateur. De par la constitution du circuit, ce courant I va se subdiviser en 3 courant partiels :

- Donc :

- On trouve que :

→ Loi de groupement de résistances en //.

- Rem : dans ce montage, nous remarquons que la résistance équivalente est + petite que la + petite des résistances individuelles. R_i .

3. Remarque globale

- La situation pour les résistances est donc à l'opposé de celle des groupements de condensateur.

VIII. La résistance interne des générateurs

- Dans la pratique, les générateurs ne font pas qu'apporter dans les circuits électriques leur force électromotrice (FÉM), mais apportent aussi leur résistance interne. Heureusement, cette R_i (interne) est généralement de valeur faible (le générateur chauffe, donc il existe un effet joule, donc un RI).
- Considérons la situation suivante :

- Q?: dans quel mesure peut-on effectivement mesurer . En mettant un voltmètre entre les bornes **B** et **C**, mais à circuit extérieur ouvert, c'est à dire sans connexion de **R**. Donc : $I=0$, donc **pas de ddp perdue** entre les extrémités de **R**, donc :

- **B** => borne de connexion + du générateur.
- **C** => borne de connexion - du générateur.
- **V** est la ddp effectivement utile fournie par le générateur. En effet :

- Donc :

IX. Appareils de mesure

1. L'ampèremètre

- Appareil destiné à la mesure du courant électrique.
- Rem : il se place **toujours en série** sur l'élément du circuit traversé par le courant dont il faut déterminer la valeur.
- Tout ampèremètre doit être caractérisé par une **résistance interne, la + faible possible** ! En effet, si ce n'était pas le cas, il y aurait modification du courant à mesurer.

2. Le voltmètre

- Le voltmètre est destiné à la mesure de ddp : il se place **toujours en //** sur l'élément à déterminer.
- Ex :

- Rem : remarquons qu'il ne faut pas qu'une partie du courant passant dans le circuit soit déviée dans le voltmètre. Si c'était le cas, le courant I serait donc corrigé de la valeur $I_{(v)}$ et donc, la ddp aux bornes de R_2 serait elle-même modifiée, d'où perturbation de la mesure prévue. Donc : il faut prévoir pour tout voltmètre une résistance interne la plus élevée possible.

X. Le montage potentiométrique

- Il s'agit d'un dispositif qui permet d'obtenir à partir d'une tension V de valeur fixée (continue), une ddp variable entre les valeurs 0 volt et V volt.
- Soit le schéma suivant :

- La résistance R consiste ici en un long fil conducteur qui doit être :
 - Homogène

- De section cte

- Considérons la ddp existant entre les points A et B. De par la loi de Ohm :

- On constate que V_{AD} dépend de I_{AD} . Ce qui prouve que V_{AD} varie continûment puisque :

- Donc, ici on change la position de D.

- Rem : lorsqu'un circuit extérieur est connecté entre A et B, la résistance de ce circuit extérieur devra être grande vis-à-vis de R afin que ce ne soit qu'une position négligeable de I qui soit déviée vers ce circuit extérieur.

XI. Étude de décharge d'un condensateur

- Supposons que le condensateur C soit préalablement chargé, avec, comme caractéristique électrique, une charge $+q_0$ (C), $-q_0$ (C) et une ddp V_0 (V).

- Au temps $t=0$, lorsque l'on déclanche le chronomètre, on ferme aussi l'interrupteur. Un courant i conventionnel va apparaître. Ce courant **i sera variable dans le temps**. i correspondra donc à un courant de type conventionnel et donc à une diminution progressive de la quantité de charge disponible sur l'armature et à une diminution égale de la quantité de charge sur l'autre armature → la ddp est donc variable dans le temps mais si $C=cte$.

- Plusieurs formules pourront ainsi être écrites :

- Rem : le produit **R.C** est appelé **cte de temps du circuit**. Cette quantité s'exprime en secondes car l'argument de l'exponentiel ($-t/RC$) est sans unité.

- Rem : il s'agit bien d'une **exponentielle décroissante** dont le tracé est de ce type :

- Rem : si l'on va atteindre une ddp valant la $\frac{1}{2}$ de la ddp initiale, il faudra considérer un certain lapse de temps qui sera dénommé **temps de $\frac{1}{2}$ vie** : $T_{\frac{1}{2}}$.

- Dernier but : trouver la relation donnant $T_{\frac{1}{2}}$, le lapse de temps nécessaire pour que la tension initiale V_0 tombe à la $\frac{1}{2}$ de sa valeur :

- Voilà donc la relation qui exprime le temps de $\frac{1}{2}$ vie en fonction de la cte de temps pour un même circuit.

XII.L'oscilloscope cathodique

- En anglais : CRT = oscilloscope.
- Représentation d'un processus périodique = principe de l'oscilloscope.

1. Tube cathodique (pièce maîtresse de l'oscilloscope)

a. *Les différents éléments*

- **1^èrement** : la partie émission accélération → il s'agit d'un canon permettant de produire et d'accélérer des électrons.
- **2^èrement** : partie déviation comprenant 2 condensateurs respectivement désignés par plaque « X » et plaque « Y ».
- Remarque valable pour l'ensemble du dispositif : il règne un vide poussé afin d'éviter le choc des électrons contre d'éventuelle molécules constituant le gaz intérieur (boffffff).
- **3^èrement** : la partie visualisation comprenant l'écran terminal : il s'agit de visualiser l'impact du faisceau électronique sur l'écran.

b. *Schéma*

- Voir feuille.

c. *Le canon à électrons : partie émission accélération*

- Nous repérons la cathode C mise en contact avec la masse.
- Cette cathode C est chauffée par un filament F → effet joule : la T) augmente dans le filament et il y a chauffage de la cathode à proximité, ce qui amène une émission thermoélectronique de la part de celle-ci.
- Une autre électrode de forme cylindrique entoure la cathode est appelée W = **wehnelt**.
- Le W est porté à une tension <0 pas trop élevée puisqu'en valeur absolue elle vaut environ 100V
- Cette électrode W sert à :
 - 1) Focaliser les électrons émis par la cathode en un point appelé cross-over.
 - 2) Freiner plus ou moins ces électrons, donc régler le débit électronique. En pratique, la tension variable appliquée en volt permet de régler : l'intensité ou la luminosité du faisceau.
- Vient ensuite une paire d'électrode appelées A1 et A2 (anodes) portées toutes deux un potentiel élevé (quelques milliers de volts).
- D'autre part, $V_{A1} > V_{A2}$.
- Double rôle pour ces anodes :
 - Elles accélèrent les électrons car sont +
 - Elles peuvent être assimilées à une lentille électrostatique. En effet, elle donne, d'un point objet (cross-over) un point image sur l'écran => Spot (point)
- On agit sur ces électrodes A1 et A2 à l'aide d'un bouton dénommé concentration ou encore focalisation. Si non, il est appelé focus.

d. *Partie déviation*

i) Pour rappel : nous savons qu'il existe un champ uniforme entre les armatures d'un condensateur plan → on pourrait montrer que ce E agit sur le faisceau électronique traversant le tube cathodique et le fait dévier de sa trajectoire rectiligne => la direction ainsi provoquée est directement proportionnelle à l'intensité de la ddp appliquée entre les 2 armatures.

- Exemple : considérons une vue du dessus du condensateur dénommé plaque « X ».

- On peut donc écrire que la déviation par les plaques « X » s'écrit :

- Il en est de même pour les plaques « Y » :

- Donc, à l'aide de ces deux paires de plaques, on peut à volonté modifier la positionnement du faisceau électronique dans l'espace.

ii) Le cadrage du spot sur l'écran, c'est à dire son positionnement est réalisé par l'intermédiaire de 2 potentiomètres commandés sur la face avant et agissant respectivement sur l'une et l'autre des 2 tensions appliquées aux plaques « X » et « Y » (montage potentiométrique).

a. Partie visualisation

- Une couche mince de substance fluorescente a été déposée sur la face interne de l'écran du tube cathodique (un écran de couleur verte a été muni d'une couche de silicate de zinc = SiZn).

- Suite à l'impacte du faisceau électronique sur l'écran, la tache lumineuse ponctuelle (spot) est de réminiscence variable (persistance variable).

2. La base de temps : représentation d'une tension périodique $u(t)$

b. La base de temps d'un oscilloscope

- Il s'agit de visualiser une tension périodique en fonction du temps. Pour se faire, on « appliquera » le temps entre les plaques dénommées « X ». On dispose en effet d'un générateur interne à l'oscilloscope dénommé générateur base de temps et fournissant une tension dite « de balayage », en fore de dents de scie. Cette tension appliquée aux plaques « X » est donc :

- Quant à la période T_b elle est ajustable à l'aide du bouton « vitesse de balayage ».

- u_b est la ddp variable dans le temps appliquée entre 2 plaques dénommées « X »
→ cette ddp génère un E évoqué au point 1, et son caractère variable entraîne une déviation elle-même variable. Donc, le spot lumineux sur l'écran va se « promener » de la gauche vers la droite sur l'écran suivant une horizontale. Celle-ci rend donc bien compte de l'évolution du temps selon l'axe des abscisses.

→ Tout ce qui a été dit concerne le balayage.

- Rem : le balayage s'effectue à vitesse cte car est une cte.

- Rem : la décroissance doit, elle, s'effectuer le + rapidement possible afin de ramener le spot lumineux très rapidement à sa position de départ. Un 2^{ème} balayage de la longueur de l'écran sera dès lors réalisable à l'aide de la 2^{ème} dent de scie du dessin.

c. Visualisation du $U(t)$ (= signal variable dans le temps)

- On va appliquer la ddp variable à représenter sur l'écran entre les deux plaques dénommées « Y ». Il a déjà été spécifié que $u(t)$ doit être périodique.

- Afin d'assurer une représentation stable sur l'écran, il faut nécessairement synchroniser les 2 périodes T et T_b . Pour y arriver, il faudra donc imposer la condition :

- Dans ce cas la courbe $u(t)$ sera immobilisée sur l'écran et on observera n période de $u(t)$.
- Le graphe apparaissant ci-dessus n'est jamais visible sur l'écran.
- Exemple : on fixe 4 points et on voit le signal $u(t)$ et $n=3$.
- Rem : dénommons t' le laps de temps utile, mais néanmoins on peut accepter le dessin tel quel car :

C.Partie 3 : magnétisme

I. Historique

- Les caractéristiques magnétiques de certains matériaux furent déjà remarquées durant l'antiquité. Ainsi, les anciens appelaient ce type de matériaux : pierre d'aimant.

Il s'agissait en fait d'un minerai de magnétite, matériaux riche en fer. Plus précisément, il s'agissait d'un oxyde de fer. Encore à l'heure actuelle ce minerai peut être extrait à différents endroits.

- Le terme « magnétisme » vient du terme grec magnés qui lui-même doit venir de la ville de magnésie, ville d'Asie Mineure à l'époque, Turquie actuellement.

- Il se fait que selon la légende (2600 ACN), un empereur chinois Hwang-ti, fut guidé pensant la bataille grâce à une figurine d'axe vertical et dont un des bras pointait continuellement vers le sud, ce qui permit à son armée de traverser le champs de bataille avec du brouillard. Fort probablement une pierre aimantée était dissimulée dans le bras en question.

- Quant à la boussole qui contenait une aiguille aimantée, elle apparut dans nos contrées vers l'an 1100 de notre ère.

- Toute fois, la véritable étude du magnétisme ne débuta qu'au 19^{ème} siècle en Europe et aux USA.

- Ce fut le physicien allemand Orsted qui le 1^{er} découvrit que **les courants électriques sont responsables de l'apparition de forces magnétiques.**

- En réalité, pendant tous les siècles qui avaient précédés, les scientifiques considéraient les propriétés magnétiques et électriques comme des propriétés différentes.

- On ne se rendit compte qu'au 19^{ème} siècle que les 2 types de comportements sont liés.

- Ainsi, **les charges électriques génèrent des champs électriques, mais si elles sont en mouvement, elles génèrent aussi des champs magnétiques.**

II. Aimants permanent : géomagnétisme

1. Notions élémentaires

- La boussole a été depuis longtemps utilisée en aviation maritime. Son élément de base, l'aiguille aimantée qu'elle contient constitue en fait un aimant permanent. Nous savons que placée en position horizontale, l'aiguille s'oriente approximativement selon la **direction nord-sud** géographique. L'extrémité de cette aiguille qui pointe vers le nord géographique est appelée le **pôle nord magnétique** de l'aiguille, l'autre extrémité, le **pôle sud magnétique**.

- De manière générale, on constate l'existence de force entre les aimants. Ainsi, **les pôles de même type se repoussent et les pôles de type contraire s'attirent.**

→ Le comportement des aimants est donc similaire à celui des charges électriques. Toutefois, on constate expérimentalement qu'il est **impossible de séparer le pôle nord et sud d'un aimant**, contrairement au cas des charges + et - qui peuvent, elles, être séparées.

2. Lignes de champs magnétiques et champ magnétique

- Tout comme un champ E entoure une charge électrique, on constate qu'un champ magnétique entoure un aimant. Ainsi, en tout point de l'espace entourant un aimant, la direction du champ magnétique local sera donnée par la direction de l'aiguille d'une boussole placée en ce point. Donc, en matière de magnétisme, la boussole tient le rôle de l'explorateur dans le domaine de l'électricité. Par analogie avec les LC électriques, on définit les **lignes de champs magnétiques** (LCM). De même, le **champ magnétique B** est tangent en tout point d'une LCM.
- Soit une vue du dessus d'un ensemble de petites boussoles autour d'un aimant :

3. Géomagnétisme

- La mesure du champ magnétique B terrestre indique que la terre du point de vue magnétique peut être assimilée à un aimant permanent rectiligne dont l'axe est incliné par rapport à l'axe de rotation terrestre : **pôle nord géographique et pôle nord magnétique ne coïncident pas.**
- Actuellement, le PNM se balade du côté de la Baie d'Hudson à quelques 1300 Km du PNG.
- Représentons ceci. Voici notre bon vieux globe terrestre :

- **Rem** : les aurores boréales sont dues à l'effet du B terrestre sur les particules chargées se trouvant dans la haute atmosphère. À titre d'exemple, la lumière verte est émise lorsque des électrons bombardent des atomes d'oxygène. Si maintenant les électrons bombardent des molécules d'azote (N_2), on obtient de la lumière rose.

III. Force magnétique sur une charge en mouvement

- Donc, nous venons de voir que des charges en mouvement génèrent un champ magnétique B.

1. Rappels

- Pour rappel, la force électrique sur une charge électrique due à l'existence d'un champ E est donné par :

- Et donc, la force électrique est colinéaire au champ électrique.

2. Le champ magnétique

i) Si cette charge q se déplace à la vitesse v dans une région où règne un champ B, la force magnétique qu'elle subit peut s'écrire (selon les résultats de l'expérimentation) selon la forme :

→ C'est la loi de Lorentz et F est la **force de Lorentz**. L'unité du système SI du B est le Tesla (T).

- Notons qu'il existe encore une ancienne unité : le Gauss (G) :

- Pour se fixer les idées, le B terrestre sous nos latitudes est de l'ordre d'un $\frac{1}{2}$ Gauss.

ii) Par définition du produit vectoriel de 2 vecteurs, le module de la force de Lorentz est donné par :

Où θ est le plus petit angle existant entre les directions des vecteurs \vec{v} et B.

- À cause du facteur $\sin \theta$, on remarque que :

1^{er} : la force de Lorentz est max quand la vitesse fait un angle droit avec la direction du B local ($\theta = 90^\circ \rightarrow$ valeur max de la fonction sinus).

2^{ème} : par contre, cette même force est d'intensité nulle quand la particule chargée se meut parallèlement à la direction de B.

- Remarquons enfin que **les B n'exercent que des forces sur les charges en mouvement** → en effet, la vitesse intervient dans la relation.

iii) Quand à la direction et au sens de F , ils sont donnés par la règle mnémotechnique des 3 doigts de la main gauche :

- Attention : il s'agit du courant conventionnel ! → Donc le vecteur vitesse pour des charges +.

Rem : il existe d'autres règles, comme l'exemple à la figure 21.28 p809 du Hecht et qui sont des règles de la main droite. La règle du tir bouchon est encore une autre règle. Dans toutes ces règles, il faut bien sûr tenir compte du signe de la charge.

iiii) Il est aussi très important de savoir pour des considérations ultérieures que **la force magnétique est toujours perpendiculaire à la vitesse de la particule chargée**, car le produit vectoriel de 2 vecteurs quelconques est par définition perpendiculaire à chacune des 2 directions de ces vecteurs.

- En conséquence : la force magnétique modifiera la direction du mouvement de la particule, mais pas la valeur de sa vitesse. En effet, F ne peut modifier l'énergie cinétique de la particule en mouvement car elle est à tout moment perpendiculaire au déplacement et ne peut donc effectuer aucun travail nécessaire :

IV. La force magnétique sur un fil parcouru par un courant (force de Laplace)

- Notons que dans cette situation, la force agira sur un fil et non sur une charge comme ce fut le cas avec l'ami Lorentz.

- Considérons un segment de fil rectiligne de longueur l appartenant à un circuit électrique parcouru par un courant I . Le courant fait intervenir des charges en mouvement, soit leur vitesse.

- Considérons par ailleurs la charge q parcourant l'élément de longueur l pendant un laps de temps.

- Par la partie sur l'électrostatique, on sait que :

V. Le champ magnétique dû à un courant électrique

1. Loi de Biot-Savart

- Considérons un segment de fil conducteur parcouru par un courant I . Ce morceau de circuit fait partie lui-même d'un circuit électrique fermé.
- Soit une portion de ce morceau de circuit de longueur l .
- Pour les besoins futurs de la démonstration, fabriquons un nouveau vecteur nommé \vec{dl} ; son point d'application est pris au milieu de la longueur l . La direction s'appuie sur l'axe du fil, son sens, quant à lui est celui de I et sa longueur vaut (module).

- Recherchons l'expression qui donne en un point P quelconque du champs magnétique B local dû au passage de I dans la longueur l .
- Pour y arriver, repérons le vecteur distance \vec{r} .
- Sur la direction du vecteur \vec{r} , sélectionnons le vecteur unitaire \vec{e}_r .
- Expérimentalement, on constate que :

- Quant au champ magnétique B résultant total au point P , il sera la somme vectorielle de toutes les \vec{dB} obtenu en découpant le circuit fermé complet en un ensemble de dl successifs, chacun des dl parcourus par I génère son \vec{dB} .

- Rem :

- 1) Le sens de \vec{dB} est donné par l'une des règles quelconques du type de la main droite.
- 2) Qu'en au coefficient numérique 10^{-7} , il peut être évoqué comme étant la quantité μ_0 où μ_0 est dénommé la perméabilité magnétique du vide et

2. Calcul du champ magnétique B au centre d'une boucle parcourue par un courant I

- Tentons de trouver une formule nous donnant le module du champ magnétique B au centre d'une boucle parcourue par un courant I.
- Si l'on veut utiliser la loi de Biot-Savart, nous devons découper le circuit disponible en petits éléments de type dl .
- Pour ce faire, imaginons que nous découpons le périmètre en N segments.
- Mais la loi de Biot-Savart nécessite des dl de nature vectorielle. Nous ne devons donc pas considérer de petits éléments de type que nous avons dessiné. À la place, de petits vecteurs dl sont à considérer, chacun tangent au périmètre de la boucle.
- On va donc calculer le champ magnétique B au centre de la boucle parcourue par un courant I. Le **centre** sera notre point **P**.
- Tout au long, on a des dl ayant le même module, mais de sens et de direction différentes !
- Définissons un rayon R.
- Attention : les vecteurs dl et I doivent « tourner » dans le même sens.
- Pour rappel : le but de la démo est de calculer B au centre de la boucle. Or, **la loi de Biot-Savart nous donne le moyen de trouver le champ magnétique au point P considéré du au passage d'un courant I**. On aura :

- **Conclusion**, le champ magnétique total au centre de la boucle sera donné par :

- Cette formule nous donne le module du champ magnétique B, mais qu'en est-il de sa **direction** et de son **sens** ?

1) La **direction** de la contribution sera donnée par la direction du produit vectoriel . Pour rappel, cette direction est donnée par la perpendiculaire au plan formé sur le vecteur et . Donc, le vecteur sort de la feuille au centre du cercle.

2) Le **sens** du vecteur est celui qui sort vers nous, de la feuille : règle de la main gauche.

- **Conclusion** : tous les vecteurs présentent le même sens et donc le aussi.

- Représentons la boucle dans un plan horizontal :

- **Rem** : si l'on numérise à partir de la relation 2, on pourrait montrer qu'une seule boucle parcourue par un courant donne un champ magnétique d'intensité relativement faible du au 10^{-7} !!!

En conséquence, on aura intérêt à constituer un **solénoïde** avec de multiples spires pour avoir un champ magnétique B assez intense.

- **Solénoïde** = ensemble de spires circulaires enroulées côte à côte et en série.

3. Champ magnétique généré par un long fil rectiligne parcouru par un courant I

- Considérons un long fil rectiligne infini parcouru dans les 2 sens par un **courant I**.
- Recherchons l'expression du champ magnétique à une distance orthogonale de ce fil.
- Donc, typiquement en un point P distant de x mètres, on pourrait démontrer que :

- **Rem** : remarquons que dans la relation (3), le facteur μ_0 n'intervient pas, alors qu'il intervenait dans la relation (2) : conclusion, dans le cas d'une symétrie circulaire : intervention de μ_0 , mais si pas circulaire, n'intervient pas.

4. Force magnétique entre 2 fils // rectilignes parcourus par un courant I

- On constate expérimentalement que 2 fils conducteurs longs et // parcourus par un courant l'un et l'autre :
 1. S'attirent mutuellement lorsque les courants sont dans le même sens.
 2. Se repoussent quand les courants sont en sens $><$.
- La démonstration qui va suivre portera sur le (1^{er}), mais le (2^e) sera aussi à savoir.
- Considérons donc la condition expérimentale suivante :

- Les **2 courants** connus sont dans le **même sens**.

- Considérons le champ magnétique \mathbf{B}' dû à I' et s'exerçant dans la région entourant I , et considérons par la suite la force magnétique de type Laplace s'exerçant sur le fil parcouru par I à cause de l'existence de I' .
 - La répartition spatiale du champ magnétique \mathbf{B}' généré par I' est telle que reproduite sur le dessin :
 - Le courant I se trouve donc plongé dans une région où \mathbf{B}' lui est perpendiculaire et file vers l'arrière.
 - L'intensité de \mathbf{B}' sera donné par la relation connue :
-
- D'autre part, la force de Laplace dit que la force magnétique recherchée :

VI. Le spectromètre de masse et le sélecteur de vitesse

1. Le sélecteur de vitesse

- Soit le champ magnétique B et le champ électrique E qui sont croisés, soit l'un sur l'autre.

- Considérons une particule portant une charge q qui peut être $+$ ou $-$ et qui, en dehors de la région de l'espace où il existe simultanément un champ électrique E et un champ magnétique B , se meut perpendiculairement à chacun de ces 2 champs.

- De plus, ce **champ magnétique B** est supposé **uniforme**.

- D'autre part, supposons que le champ électrique qui doit être perpendiculaire se dispose comme ceci :

- Soit la particule en mouvement caractérisée par la charge qu'elle porte ($+$ ou $-$).

- Le dispositif se termine par un **écran** avec **orifice** à hauteur adéquate.

- Dans la zone de champs croisés, la particule subit la force électrique () et la force magnétique (). Recherchons .

- Constatation : quelque soit le signe de q , on constate que les **forces électriques et magnétiques** sont de sens $><$ (= anti-//).

- Donc, si on fait en sorte que : , la **trajectoire rectiligne horizontale initiale ne sera pas perturbée et la particule continuera à parcourir les champs croisés et donner un spot lumineux sur l'écran s'il est non perforé**. Mais si l'écran est perforé, la particule passe à travers l'écran.

- De la relation (1), on conclut que dans ces circonstances :

Donc, la mesure du champ magnétique B et du champ électrique E permet de déterminer v .

- **Rem** : les champs croisés E et B permettent à des particules chargées de les traverser sans réflexion si la condition 2 est satisfaite, quelque soit la charge et la masse de ces particules.

- De plus, si un faisceau de particules comporte plusieurs sortes de particules chargées, douées, de plus, de vitesses différentes, passent au travers d'une région de champs croisés, les particules qui en sortent présentent toutes la même vitesse.

- **Conclusion** : un ensemble de 2 champs croisés E et B fonctionnent comme un sélecteur de vitesse.

2. Le principe de fonctionnement

- Soit une particule chargée $+$ et de masse m supposées se déplacer perpendiculairement à un B uniforme. La force de Lorentz qu'elle subit s'écrit :

→ On constate que la force F est à tout moment perpendiculaire à v .

- **Conclusion** : F modifie constamment la direction, mais pas l'intensité de v .

- En effet, écrire que F est perpendiculaire à v en tout point de la trajectoire revient à affirmer que le travail W de cette force magnétique est égal à 0 → il n'y a donc pas modification de l'énergie cinétique et donc, v reste effectivement une cte.

- Quant au module de la force magnétique, c'est-à-dire :
on constate qu'il est lui-même constant.

- **En conclusion** : l'accélération résultante obtenue à partir de la force de Lorentz :

=> L'intensité a est ainsi une cte et de plus, a est dirigé comme F , donc le vecteur a est à tout moment perpendiculaire au vecteur vitesse.

- D'après le cours de mécanique, ceci implique que sous l'effet de B , la trajectoire de la particule va s'incurver comme un cercle. Donc : **orbite circulaire à $v = \text{cte}$.**

- Cette accélération est donc assurée par la force magnétique de Lorentz. On peut donc écrire :

- R est bien sûr le rayon de l'orbite circulaire et on constate que :

3. Dispositif expérimental du spectromètre de masse

→ Il existe 3 portions.

1^{ère} portion :

- Une boîte = source d'ions
- Un 1^{er} écran servant à sélectionner les ions
- Les molécules disponibles dans la source d'ions sont ionisées par bombardement électronique

2^{ème} portion :

- Le sélecteur de vitesse (note : seuls les ions ayant une vitesse respectant la condition démontrée auront une trajectoire rectiligne)
- Dans cette portion apparaissent les champs croisés
- Sur la face droite d'un 2^{ème} écran un recouvrement d'un matériau fluorescent sera appliqué

3^{ème} portion :

- Dans la 3^{ème} zone, les ions rentrent avec une vitesse commune dont la norme de la vitesse est donnée par :

- Les ions ayant pénétrés dans le 3^{ème} étage vont se déplacer le long de trajectoires hémicirculaires de rayon R jusqu'à ce qu'ils atteignent l'écran fluorescent sur lequel leur impact sera matérialisé par un spot lumineux. Nous savons par la relation (1) que :

- Supposons que dans la 3^{ème} portion règne un champ magnétique dénommé B . Si les ions sont $+$, la force de Lorentz qu'ils subiront sera donnée par la règle de la main gauche. Le courant correspond au sens de la vitesse des porteurs de charges $+$ → Donc la trajectoire hémicirculaire se dirigera vers la partie supérieure de la portion 3.
- Si on a un autre type d'ions, toujours $+$ mais avec une masse plus élevée que pour le 1^{er} type d'ion, de par la relation : $r = \frac{mv}{qB}$ le rayon sera alors plus élevé que la particule « légère ».

- Conclusion : cette technique permet de séparer des ions de même charge, mais de masse différentes (parler des isotopes), d'où l'appellation de *spectromètre de masse*.

Rem : cette machine est employée dans différents domaines :

- Étude de la composition de l'air au voisinage des plantes lors du processus de photosynthèse.
- Industrie pétrolière pour la séparation et distinction de corps complexes
- Un spectromètre de masse était placé dans les sondes spatiales envoyées sur Mars et Vénus afin d'analyser la composition de l'atmosphère ou du sol

Rem : il existe aussi un autre type de spectromètre de masse dénommé quadripolaire qui fait essentiellement intervenir des champs électriques.

VII. Le cyclotron (= afin d'obtenir des particules hautes en énergie)

1. Quelques formules utiles

- Soit une particule de charge q et de masse m caractérisée par une vitesse v et injectée dans une région de l'espace où règne un champ magnétique B perpendiculaire à v .

- Comme nous l'avons vu précédemment, la particule va parcourir une trajectoire circulaire de rayon R donnée par la relation suivante :

- D'autre part, la période T de parcourt de l'orbite (temps mis pour un tour complet) est donné par la relation suivante :

Note : la période orbitale est indépendante de la vitesse de la particule. Donc, accroître la vitesse de la particule augmente le rayon de l'orbite, mais ne modifie pas la période T ou encore la fréquence orbitale.

2. Dispositif expérimental

- L'intérieur du dispositif est placé **sous vide**. Ce que nous allons décrire sera une vue du dessus du cyclotron.
- Soit une cavité cylindrique creuse en **cuivre**, découpée selon l'un de ses diamètres, les 2 morceaux ainsi obtenus sont ensuite légèrement écartés l'un de l'autre.
- L'entièreté du dispositif est disposée dans un **champ magnétique B uniforme de direction verticale**.
- De plus, entre les 2 morceaux du dispositif (les dees) on applique une **DDP ALTERNATIVE** et donc l'ensemble du dispositif constitue un **oscillateur électrique**.
- Enfin, une source disposée au centre du dispositif fournit par exemple une ensemble d'ions que nous choisissons +.

Dessin du dispositif :

- \mathbf{v} est le vecteur vitesse de l'ion sortant de la source.
- La **force de Lorentz** va agir sur cet ion et sera dirigée comme sur le dessin.
- La trajectoire sera une **trajectoire circulaire** sous l'effet de F .
- L'ion arrive donc à la zone « Inter-dees ». Là, il subit l'effet de la **DDP** dont la polarité a été choisie de telle sorte que l'ion soit accéléré.
- En effet, le **gain d'énergie électrique**, donc le gain d'énergie tout court de l'ion est donné dans la zone intermédiaire par la quantité :

- Ce gain d'énergie apparaît comme un **gain d'énergie cinétique**, donc la vitesse de l'ion a augmenté entre son entrée dans le dee de droite et sa sortie dans le dee de gauche.
- Au vu de la relation (1), le rayon de la trajectoire de ce même ion dans le dee de droite va augmenter.
- L'ion va pénétrer pour la 2^{ème} fois dans le dee de gauche.
- Si la polarité de V avait été inversée par rapport au 1^{er} passage, l'ion va subir une nouvelle accélération.
- Conclusion : v augmente à nouveau et la 3^{ème} portion circulaire de sa trajectoire va donc être plus grande.

- **En conclusion** : on trouve une trajectoire en forme de spirale avec une augmentation d'énergie à chaque passage dans la zone intermédiaire. Donc, le cyclotron permet d'**obtenir des particules chargées à haute énergie**.

- En phase terminale, le faisceau d'ions est extrait grâce à une plaque défectrice vers l'extérieur des dees et ceci à travers un orifice dans la carapace qui est disponible.

- Quelques remarques :

1. Nous savons de par la relation (2) que la **période orbitale est indépendante de la vitesse**. Donc, il faudra donner la valeur de cette période T orbitale à la période d'inversion de la polarité de V pour que le système fonctionne harmonieusement => c'est-à-dire que l'accélération de l'ion puisse s'effectuer à chaque passage de celui-ci dans la zone intermédiaire.
2. En réalité, **m est fonction de la vitesse** (voir la théorie de la relativité restreinte d'Einstein). Pour de hautes énergies des ions, il faudra modifier le dispositif pour obtenir ce que l'on appelle des synchrocyclotrons = synchrotrons.
3. En médecine, le cyclotron est utilisé pour le traitement des tissus cancéreux => destruction locale de ceux-ci grâce aux particules hautement énergétiques fournies par le cyclotron.
4. Revenons en à la réalisation de la carapace des dees en cuivre. Le fait que le cuivre soit un métal permet d'utiliser les deux dees comme **cage de Faraday**, ce qui protège les faisceaux d'ions des perturbations électromagnétiques extérieures. Remarquons enfin que par contre, le champ magnétique B n'est pas encroûté par la carapace.

E..Partie 4 : quelques applications concernant les 3 parties

I. Le potentiel d'action : propagation de l'influx nerveux le long de l'axone

1. Rappels

- Le système nerveux d'un animal est constitué de fibres nerveuses qui s'étendent dans le corps entier.
- Une cellule nerveuse individuelle (= neurone) est constituée d'un corps de cellule pourvu de ramifications : les dendrites, et d'autre part, d'une longue et unique extension = l'axone.
- Des signaux électriques se propagent le long de l'axone afin de transférer des informations sensorielles vers le cerveau, soit de transmettre des instructions motrices du cerveau vers le corps.
- Lors du transfert de ces signaux, un axone peut échanger des stimuli par son extrémité.
- Toute fois, un stimulus peut aussi être appliqué à n'importe quel endroit de l'axone. Cette dernière possibilité va ainsi être évoquée :

2. Transfert d'un stimulus

a. Un neurone au repos

- Soit un neurone au repos. Voilà une section de son axone :

- On le voit : les charges + entour l'axone. Les charges - quant à elle sont à l'intérieur de l'axone (dans toute cellule, le cytoplasme est chargé -). Ces charges sont portées par des ions de type divers.
- Le potentiel électrique au repos à l'intérieur de l'axone correspond à **-70mV**.

b. Un stimulus

- Supposons qu'un stimulus soit appliqué à la surface latérale de l'axone. On constate expérimentalement que l'application de ce stimulus provoque un **accroissement soudain de la perméabilité de la membrane de l'axone vis-à-vis des ions Na⁺** (ce facteur atteint 5000). Les ions sodium vont ainsi s'engouffrer à l'intérieur de l'axone et localement, on observe une **augmentation du potentiel à +40mV** → cette variation transitoire est appelée **potentiel d'action** et ce changement local de polarité se produit en une fraction de millisecondes :

- De plus, l'inversion de la charge membranaire est appelée **dépolarisation**. Ce processus de dépolarisation gagne progressivement l'intérieur de tout l'axone = dépolarisation progressive. On a donc la situation suivante :

c. Après la dépolarisation

- Presque tout de suite après le processus de dépolarisation de l'axone, la **membrane redevient quasi imperméable aux ions Na^+** .
- Par contre, elle devient brusquement **perméable aux ions K^+** qui étaient disponibles à l'intérieur de l'axone.
- Ces ions K^+ quitte donc l'axone et repolarisent progressivement celui-ci.
- Un problème se pose toute fois : c'est que la **migration des K^+ est trop importante** et donc, **pendant un certain temps le potentiel intérieur de l'axone devient inférieur à -70mV** .

d. Un graphe qui résume l'effet

- Pour réatteindre le potentiel de repos, il faut **10 millisecondes (10ms)**. À partir de ce moment, l'axone peut à nouveau être stimulé.
- Rassemblons en un seul schéma l'ensemble des données antérieures :

3. Informations complémentaires

- La vitesse de propagation du potentiel d'action le long d'un axone dépend de plusieurs choses :
 - Du **diamètre** de celui-ci
 - De l'éventuelle présence d'une **gaine de myéline** : celle-ci à la fois réduit la capacité de la membrane de l'axone et augmente sa résistance électrique.
 - Par ailleurs, on peut modéliser l'axone par le schéma électrique suivant :

- Pour les axones fins, non pourvu d'une gaine de **myéline** (= axone myélinisé), la vitesse de propagation du stimulus est de l'ordre de $\frac{1}{2}$ mètre par seconde. Mais pour les axones myélinisés, cette vitesse peut atteindre 130m/s.
- Conclusion : la propagation des stimuli nerveux est due à un processus complexe de nature électrochimique.

II.Électrocardiogramme (ECG) et électroencéphalogramme (EEG)

- Les méthodes de diagnostic sont basées sur le fait que la surface du corps humain ne constitue **pas une surface équipotentielle**.
- De petites DDP typiquement de 30 à 500 mV sont ainsi utilisées en ECG et en EEG.
- Quel est l'origine de ces DDP : on sait déjà que des ions (K^+ , Cl^- et Na^+ ...) sont utilisés pour le fonctionnement électrique des neurones, mais aussi des muscles. **Ces multiples charges génèrent un champ électrique E qui s'exerce aussi à l'extérieur de la peau. Ces DDP sont mesurées entre des paires d'électrodes mises en contact électrique avec la peau, grâce à un gel conducteur.**
- La DDP mesurée dans le cas de l'ECG suit les battements du cœur (circulation des charges).
- La forme de l'évolution dans le temps de cette DDP permet de caractériser l'état physiologique du cœur (circulation de charges).
- Idem pour des paires d'électrodes placées sur la boîte crânienne dans le cas de l'EEG.

-

III. Effet d'un courant électrique sur le corps humain

- Qu'en est-il de l'effet des sources électriques externes sur le corps humain.
- On devra appliquer la loi d'Ohm afin de déterminer le I à partir de la DDP appliquée au corps humain et de la résistance électrique présentée par ce même corps.
- En situation courant continu (DC) et alternatif (AC) (basse fréquence toute fois => 50Hz), c'est la résistance de la peau au point de contact avec les électrodes externes qui est le facteur principale qui limite le courant.
- **Ex** : d'une main à l'autre, si la peau est sèche, la résistance peut s'élever à la valeur de :

- Par contre, si les mains sont mouillées, cette résistance est typiquement de . D'où un facteur 100 avec comme unique cause la modification du contact électrode-peau.
- Ainsi, si la DDP est des 230V à mains sèches, on calcul le courant passant par le corps qui vaut :

- Pour ce qui est des mains mouillées, on calcul :
- Si I est de **2 mA** => début de sensation.
- Entre 2 et 10 mA => douleurs et contractions musculaires.
- Entre 10 et 20 mA => contraction musculaire intense et la personne ne peut plus lâcher le prise à partir de 16 mA.
- De 20 à 200 mA => paralysie respiratoire.
- De 100 mA à 3A => fibrillation ventriculaire (le cœur !). Cela mène à la mort car le pompage cardiaque n'est plus assuré régulièrement.
- Au delà de **3A** => arrêt cardiaque, mais le corps peut néanmoins être relancé si le choc électrique subit fut très bref et si l'intervention des secours est rapide.

IV. Détection électrique chez les poissons

1. Mécanise générale chez beaucoup de poissons

- De nombreux poissons utilisent le champ électrique E pour la détection d'objets proches.
 - a) Une séparation de charges + et - dans leur corps produit en effet des champs électriques de type dipolaire. L'intensité de ces champs est mesurée au niveau d'un récepteur spécifique situé le long du corps du poisson.
 - b) Ce champ dipolaire est déformé par la présence d'un objet conducteur proche du poisson. En effet, la surface de cet objet est une équipotentielle et les LCE avoisinantes viennent intercepter cette surface à 90° . Si bien que la distorsion du champ électrique E local, va se manifester au niveau des récepteurs de la peau du poisson. De cette manière, le poisson « verra » l'objet proche, même si l'eau est quasi opaque.

2. Cas intéressant : les requins

- Les requins sont sensibles entre autre aux champs électriques produits par des charges dans un corps vivant.
- Donc : le requin peut aisément attaquer un poisson caché dans le sable.
- Le requin continue d'ailleurs à attaquer un poisson qui aurait été emprisonné préalablement dans un récipient ne faisant pas office de cage de Faraday (boite en plastique).
- Si le poisson est remplacé par un dipôle + et -, malheureusement pour lui, le requin attaque.
- Ex : ainsi, on a constaté qu'un requin peut repérer une plie dissimulée sous le sable rien qu'à cause d'un courant de 4mA généré par l'activité physiologique de la plie, ce qui représente la plus grande sensibilité électrique d'un être vivant.

3. Autre application chez les requins

- Il est encore question des requins, qui, afin de pouvoir mesurer des variations de T° de l'eau les environnant, disposent sous leur peau d'un gel se comportant comme un matériaux ½ conducteur.
- Lorsqu'en nageant ce requin passe d'une zone froide à une zone chaude, le gel génère une DDP, donc un signal électrique renseignant le cerveau sur l'existence d'une zone de front thermique (zone sur laquelle la T° varie) et ce type de zone correspond d'habitude à la **présence de nourriture**.
- De manière plus précise, on a mesuré qu'une variation de T° de 0,1°C provoque l'apparition d'une DDP de 30µV.
- Une version synthétique de ce gel pourrait bien sûr intéresser l'industrie électronique (capteurs des T°).

4. Pourquoi les requins attaquent les cannettes

- Au point n°2 précédent, il avait été noté que les requins sont sensibles à l'existence de faibles DDP et donc aussi à de faibles courant locaux qui peuvent en résulter.
- Cette particularité permet d'expliquer pourquoi les requins « **attaquent** » les **boîtes de Coca vides**, abandonnées dans l'eau de mer.
- Sous l'effet du sel marin, ces boîtes métalliques génèrent en réalité de faibles courants électriques (voir électrochimie).
- Les organes sensoriels spécifiques de ce comportement, donc, sensibles à de faibles DDP, consiste en de petites ampoules remplies d'une gelée conductrice et dont la surface intérieure est tapissée de cellules sensibles (différent de l'autre gelée). Il s'agit des ampoules de Lorenzim disposée en rangées autour du museau et des yeux du requin.

5. Comment le mouvement ondulatoire du poisson ne perturbe pas le E émis par celui-ci

- Revenons au dipôles des poissons déjà évoqués au point n°1.

- Un bon fonctionnement de celle-ci nécessite une distorsion minimale du champ électrique dipolaire généré par l'animal et il faut donc que la distorsion provoquée par les mouvements du poisson ne soit pas trop forte.

- En effet, le poisson se déplace et par conséquent les 2 pôles (+ et -) aussi. Ce balancement signifie donc un déplacement du dipôle, ce qui amène des **perturbations** → pour la plupart des poissons, le mouvement relatif des centres de charges perturbe la détection d'éventuels obstacles par détection avec des **cellules sensibles**.

- Par contre, pour quelques poissons (poisson éléphant, couteau, brochet du Nil...), le problème est quasi résolu par l'existence d'une technique de propulsion par l'ondulation seule d'une longue nageoire ventrale ou dorsale, ce qui permet de maintenir leur épine dorsale rigide : **perturbation** du champ électrique E **minimal** qui leur sert à sonder le milieu.

V. Nature et magnétisme

- La sensibilité du champ magnétique B semble répandue dans le monde du vivant, depuis les formes les plus simples, jusqu'aux formes les plus évoluées.

- Cette sensibilité est associée à la présence de petits grains de **magnétite**.

1. Chez les bactéries

- Les **bactéries** du genre aquaspirillum placées dans une goutte d'eau se rassemblent progressivement dans la partie nord de cette goutte.

- Si de plus, on approche un aimant permanent de cette goutte (+ précisément le pôle nord de l'aimant), on remarque que ces mêmes bactéries finissent par se rassembler à proximité du pôle nord l'aimant.

- En fait, à l'intérieur du cytoplasme, on trouve une vingtaine de **grains de magnétite** disposés en une chaîne orientée selon l'axe de la bactérie (chaque bactérie = un aimant remarquable).

2. Et les autres êtres vivants ?

- De telles structures magnétiques se retrouvent chez bons nombres d'êtres vivants : le saumon royal, la truite arc-en-ciel, le pigeon, l'abeille, la langouste... Il existe aussi un **papillon « magnétique »** : le monarque. C'est un papillon migrateur du nord des USA et qui utilise pour sa migration de la direction du champ magnétique terrestre.

3. Les courants marins

- On sait depuis peu que l'océan influence la répartition spatiale du champ magnétique B terrestre telle que mesurée par les satellites.
- En fait, l'eau de mer, à cause de la présence d'ions conduit l'électricité : les courants marins correspondant à des courants électriques qui, forcément, génèrent des champs électriques qui viennent perturber la répartition du champ magnétique B terrestre → c'est donc une nouvelle méthode offerte aux océanologues : **les courants marins peuvent être suivis par satellite suite à des observations magnétiques.**

VI. Applications techniques

1. Filtre à air électrostatique

- Ce type de filtre est d'une grande aide pour les gens souffrant de problèmes respiratoires : le filtre à air électrostatique parvient à éliminer 95% de poussières et de pollens de l'air aspiré.
- Le filtre à air électrostatique **consiste en un montage de 4 grilles // :**

- Partie 1 : la 1^{ère} grille sert de filtre mécanique qui retient alors les + grosses particules.
- Partie 2 : les plaques 2 et 3 sont reliées à un générateur électrique :
 - ◆ La **grille 3** avec la borne -
 - ◆ La **grille 2** avec la borne +
- Partie 3 : la 4^{ème} grille consiste en un filtre à charbon de bois. On élimine ainsi les mauvaises odeurs et donc, l'air purifié est aspiré vers le haut par le ventilateur (ôte) supérieur.

2. Décontamination des sols profonds

- Supposons qu'une contamination, par exemple par du pétrole s'échappant d'un puits se manifeste en sous sol d'une région bien déterminée.

1) On fait descendre une 1^{ère} **électrode métallique pleine** qui arrivera au pétrole.

2) On fait également descendre une autre **électrode creuse et percée de trous** à son extrémité.

- Le barreau gauche est raccordé à la **borne +** d'un générateur. L'autre barreau est relié est la **borne -** d'un générateur.

- De plus, on raccorde un **générateur sonore** avec un micro descendant à la zone contaminée.

- Il faut aussi savoir que les **particules de terres non contaminées sont -** et les **particules contaminées sont +** → donc : les particules contaminées sont repoussées par l'électrode + et attirée par l'électrode -.

- Or, l'électrode - est percée de trous : les particules contaminées peuvent entrer dans l'électrode - et elle peut ainsi servir de puit d'extraction grâce à un **système d'extraction** jusqu'au sol.

- Utilité du générateur sonore : les ondes sonores émises dans la zone contaminée permettent d'**agiter ces particules contaminées** et donc permet de les désolidariser + facilement.

3. Le clavier d'ordinateur

- Le clavier d'ordinateur : une **pression sur une touche modifie la distance entre les armatures d'un condensateur**, ce qui modifie la valeur de sa capacité, d'où un signal électrique utilisable qui correspondra à l'instruction sélectionnée.

4. La photocopieuse

- Question pour faire du zèle : Hecht page 649 figure 17.6._

E. Partie 5 : Induction électro-magnétique

I. Phénomènes d'induction électromagnétique

1. Force électromotrice induite et courant électrique induit

a. *1^{ère} approche : expérimentation*

- Dans la partie précédente du cours, nous avons vu qu'un courant électrique génère un champ magnétique. Nous allons maintenant voir que dans certaines circonstances, un champ magnétique B peut produire une fém qui dorénavant sera nommée induite.

- Cette fém induite pourra à son tour générer un courant électrique induit dans un circuit fermé.

Expérience :

- **Un champ magnétique d'intensité variable génère un courant induit.**

- Mais le courant induit ne peut lui-même exister que si une fém a été produite par un champ magnétique. En d'autres termes : **champ magnétique variable => fém induite => courant induit dans le circuit alimenté par cette fém.**

b. *Le compteur de vitesse d'un vélo*

- Un petit aimant permanent est fixé à un rayon de la roue arrière du vélo.

- Une boucle métallique (spire conductrice sensible) servant d'élément sensible est fixée au cadre de ce même vélo.

- **À chaque tour de roue arrière, l'aimant permanent passe près de la spire et induit donc dans celle-ci une fém : le courant qui en résulte passe dans un circuit qui remonte jusqu'au calculateur situé sur le guidon.**

- Si par ailleurs, l'info « diamètre de la roue arrière » a été fournie au calculateur, celui-ci sera à même de calculer la vitesse linéaire du vélo.

- En effet, le calculateur pour présenter la vitesse du vélo divisera le périmètre de la roue par le laps de temps qui s'écoule entre 2 signaux consécutifs envoyés par la spire au calculateur.

c. *Retour à l'expérimentation*

- Une dernière expérimentation consisterait à faire tourner la boucle selon un axe de rotation correspondant à un diamètre de la boucle et ceci dans un champ magnétique B uniforme.

- On constaterait à nouveau l'apparition d'un courant I induit pendant la rotation de la boucle.

d. *Résumé*

- 1) Modifier l'intensité du champ magnétique B
 - 2) Ou modifier la surface de la boucle
 - 3) Ou modifier l'orientation relative entre la direction du champ magnétique B et le plan de la boucle
- Ces 3 situations donne lieu à une fém induite et donc à un courant électrique induit.
- Donc : l'intervention d'une quantité physique de type : _____ est à envisager.
 - En effet :

(Faire le lien avec Gauss)

2. Fém induite dans un conducteur en mouvement

- Considérons un **barreau conducteur** en un mouvement de MRU dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme.

- Le barreau ayant été supposé conducteur, comporte des **électrons libres qui se meuvent à la vitesse v** et que subissent la **force de Lorentz**.
- Pour trouver la force de Lorentz, du moins son orientation, il faut utiliser la règle des 3 doigts de la mains gauche => la force est dirigée vers le bas car il faut tenir compte de la **charge** - des électrons.
- Ces électrons vont avoir tendance à se diriger vers l'extérieur du barreau, ce qui va en extrémité supérieure de celui mettre en évidence un ensemble des charges + qui ne sont plus compensées électriquement.
- Cette répartition de charges amène l'apparition d'un champ électrique entre les 2 extrémités du barreau.
- Ce champ est :

- La force électrique correspondante va s'écrire :

- Donc, au total : chaque électron libre concerné subi une force magnétique vers le bas et une force électrique vers le haut.
- Il arrivera un moment où les 2 forces vont se compenser, ce qui amènera un état stationnaire pour ces électrons.
- Dans ces conditions, on pourra écrire :

- Cette fém pourra être utilisée dans un circuit électrique extérieur au barreau.
- Intérêt : on va pouvoir, à partir d'un champ magnétique et d'un mouvement, provoquer un champ électrique.

3. Loi de Faraday (ou de l'induction électromagnétique à travers une boucle conductrice)

- Au vu des différentes constatations expérimentales décrites ci-dessus, on peut rassembler l'ensemble de ces informations en une seule loi qui est la suivante :

- L'unité de Φ est le weber.
- 1 weber = 1 Tesla.m²
- Énoncé de la loi de Faraday (n°2) : la fém induite est l'opposé du taux de variation du flux magnétique total à travers le circuit.

4. Loi de Lenz

- Bien sûr, le courant I induit évoqué ci-dessus va nécessairement générer un champ magnétique B induit, d'où l'énoncé suivant :
« La polarité de la fém induite est telle que le courant induit génère un champ magnétique induit qui s'oppose à la variation du flux magnétique qui lui même avait donné la fém. »
- Autre énoncé venant du Hecht : « la fém produit un courant s'opposant à la cause qui l'a produite. »

Ex :

- Supposons une boucle dans l'espace :

- Dans le plan du tableau, ou de la feuille, nous avons un aimant permanent rectiligne. Approchons cet aimant de la boucle.
- Observation : la champ magnétique dû à l'aimant permanent augmente sans cesse : il y a donc variation du champ magnétique dans la boucle.
- La loi de Lenz nous apprend qu'un champ magnétique va être induit par la boucle de telle sorte que la nouvelle variation soit dans l'autre sens. Le champ magnétique induit a donc un sens vers la gauche.

II. Courants de Foucault

1. Origine

- Jusqu'à présent, les courants induits étaient obligés de se mouvoir le long d'éléments de circuits bien définis (ex : câbles électriques).
- Une nouvelle question se pose : que se passerait-il si nous considérons des masses métalliques, soit mises en mouvement dans un champ magnétique B uniforme, soit dans un champ magnétique B variable au cours du temps.
- La loi de Lenz nous apprend qu'il va apparaître des courants induits circulants dans les masses métalliques considérées.

2. Exemple

- Définissons une région de l'espace où règne un champ magnétique B constant, uniforme.
- Supposons l'existence d'un support au dessus de cette région avec un point d'attache d'une barre rigide à l'extrémité de laquelle est fixée la masse métallique ci-dessus évoquée.

Position 1 :

- La masse métallique subit une augmentation régulière du flux de champ magnétique B dirigé vers l'arrière du plan.
 - La loi de Lenz nous dit que **pour contrecarrer cette augmentation vers l'arrière, des courants induits vont apparaître dans la masse métallique.**
 - Les courants I induits vont générer un champ magnétique induit qui doit contrecarrer le champ magnétique B initial, uniforme.
- Donc, les courants induits devront être **circulaires** :

Position 2 :

- La masse métallique est complètement dans la zone de champ uniforme : cela implique que même s'il y a un mouvement, il n'y a plus de courant I, donc : absence de courant induit.

Position 3 :

- La masse métallique sort partiellement de la zone de champ magnétique uniforme, ce qui implique une **nouvelle variation du flux de champ magnétique** et donc une nouvelle **application de la loi de Lenz**.

- **Mais** : il s'agit d'une diminution du flux vers l'arrière de la feuille → d'où nouveaux courants induits générant des champs magnétiques induits : cette fois-ci, les champs magnétiques seront dirigés vers l'arrière de la feuille pour **contrecarrer la diminution du flux de champ magnétique à la position 2** :

- Enfin : au-delà de la zone de champ magnétique uniforme : il n'y a plus de variation du flux du champ magnétique à travers la masse, donc : disparition des courants induits. Ces courants induits sont appelés **courants de Foucault**.

- **Conclusion** : l'apparition de ces courants de Foucault dans la masse métallique correspond inévitablement à un **effet joule** dans cette même masse. Donc : il y a perte d'énergie par la masse en mouvement, donc, freinage progressif de celle-ci.

- **Rem** : afin d'éviter les pertes d'énergies à cause des courants de Foucault, on utilise des pièces métalliques se présentant de la sorte pour que les courants de Foucault ne puissent se développer :

- 2 autres remarques :

1. L'énergie mécanique initiale de balancement est progressivement convertie en chaleur (énergie thermique) via un processus électromagnétique
2. Pour éviter ces courants de Foucault, des champs magnétiques induits et leur développement, la **masse métallique est feuilletée** : ainsi les courants ne peuvent se développer.

3. Quelques applications

1. Arrêt rapide d'une scille circulaire
2. Certaines balances électriques très sensibles utilisent aussi ce processus pour amoindrir fortement l'effet des vibrations mécaniques

3. La cuisinière à induction :

4. Les freins électromagnétiques
5. Les détecteurs de métaux
6. Les détecteurs d'armes dans les aéroports

- **Rem** : dans tout objet conducteur suffisamment massif, en mouvement, il existe des courants de Foucault à cause du champ magnétique terrestre (qui par ailleurs est inhomogène). Mais les effets sont très faibles, car le champ magnétique terrestre est très faible.

-