Chapitre 1 : Charge électrique-champ électrostatique dans le vide

A) Propriétés de la charge :

1) Quantification de la charge

L'unité de la charge est le Coulomb (C). L'expérience montre que la charge électrostatique, notée q, est quantifiée. q est toujours un multiple de la charge élémentaire $e = 1{,}6.10^{-19}C$, on a alors $q = \pm ne$ avec n entier.

2) Distribution volumique de charges

Toute distribution physique D chargée, l'est en volume. Pour l'étudier, on « la découpe » en éléments de volumes mésoscopiques dV centrés autour de points P et portant chacun une charge élémentaire $dq(P)$. On peut alors définir une densité volumique de charges $\rho(P)$ ($[\rho] = [\mathrm{C.m^{-3}}]$) autour du point du P : $\rho(P) = \frac{dq(P)}{dV}$.

La charge totale q portée par la distribution D de volume total V est alors donnée par : $q = \iiint_V dq\,(P) = \iiint_V \rho(P)dV$.

3) Conservation de la charge

Il s'agit de l'un des postulats de l'électromagnétisme : la charge totale d'un système isolé électriquement (absence d'échange de charge par contact) reste constante au cours du temps.

B) Force électrostatique et champ électrostatique

1) Définitions

Nous postulerons que toute distribution D de charges statiques exerce sur une charge ponctuelle q_M située en M, une force donnée par $\vec{f} = q_M\vec{E}(M)$ où $\vec{E}(M)$ est appelé champ électrostatique (grandeur intrinsèque à D et indépendante de q_M).

2) Propriétés de $\vec{E}$

$\vec{E}(M)$ est un champ vectoriel dont l'intensité, la direction et le sens sont fonctions de la position du point M considéré.

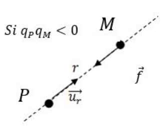
Il sera utile d'apprécier la topographie du champ électrostatique en représentant les lignes de champ électrostatique c'est-à-dire les courbes tangentes au vecteur champ électrostatique.

Nous avons donc $[E] = [N.C^{-1}]$ mais nous montrerons que $[E] = [V.m^{-1}]$

C) Cas où la distribution D est une charge ponctuelle

1) Loi de Coulomb

Une charge ponctuelle q_P située en P exerce une force électrostatique $\vec{f}$ sur une charge d'essai q_M placée en M.

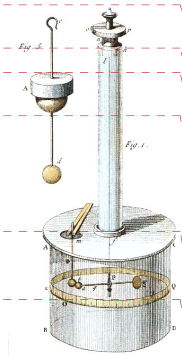


Quelques éléments historiques

On pourra regarder les vidéos suivantes :

http://uel.unisciel.fr/physique/elecstat/elecstat_ch02/co/observer_ch02_04.html

http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/video/coulomb/video/coulomb.php

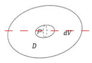


Coulomb a proposé une loi d'interaction électrique, validé par sa balance en 1785, en cherchant une analogie avec les travaux de Newton sur la gravitation.

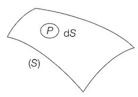
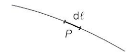
Densité volumique

Nous avons déjà rencontré la notion de densité volumique. Par exemple avec la masse volumique : $m = \rho V$. Si la masse n'est pas répartie de manière uniforme, il faut sommer intelligemment :

$m = \iiint_V \rho(P)dV$

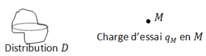


Distributions « idéales » : distributions surfaciques et linéiques de charges

Soit $dq(P)$ la charge contenue dans un élément de surface dS entourant un point P d'une distribution D. On définit la densité surfacique de charges au point P par $\sigma(P) = \frac{dq(P)}{dS}$ ($[\sigma] = [\mathrm{C/m^2}]$)	Soit $dq(P)$ la charge contenue dans un élément de longueur $dl(P)$ centré sur un point P d'une distribution D. On définit la densité linéique de charges au point P par $\lambda(P) = \frac{dq(P)}{dl}$ ($[\lambda] = \mathrm{C/m}$)
	
La charge totale q portée par la distribution de surface totale S est alors donnée par :	La charge totale q portée par la distribution de longueur totale L est alors donnée par :
$q = \iint_S dq = \iint_S \sigma(P)dS$	$q = \int_L dq = \int_L \lambda(P)d\boldsymbol{l}$

Distribution rayonnante et charge d'essai

On visualise la perturbation électrostatique rayonnée par une distribution de charges D en appréciant la force électrostatique $\vec{f}$ exercée par D sur une charge ponctuelle d'essai q_M placée en un point.



Une analogie forte peut être faite avec la théorie gravitationnelle de Newton : il faut une masse d'essai pour « concrétiser » le champ gravitationnel de la Terre : $\vec{f} = m\vec{g}$

Commenté [A1]: Problématique : Pourquoi « entendons-nous » l'électricité aux pieds des lignes THT? Expérience du tourniquet électrique

Commenté [AM2]: Nous allons étudier l'interaction électrique entre une distribution de charges fixes et une autre distribution baignant dans son champ d'interaction électrique : c'est l'électrostatique.

Commenté [A3]: Dans toute la suite, sauf mention contraire, les charges fixes seront dans l'air assimilé à du vide.

Commenté [A4]: On pourrait également citer l'invariance de la charge dans tout référentiel

Commenté [A5]: De nos jours, le terme de charge élémentaire peut sembler maladroit puisque les constituants ultimes connus sont les quarks de charges multiples de e/3. Cependant, ils n'existent pas isolément, et toute association conduit bien à $q = \pm ne$

Commenté [A6]: Expérience de Millikan a permis de montrer la quantification de cette charge. L'expérience d'électrolyse de Faraday également.

Commenté [A7]: Le modèle de charge ponctuelle reste encore pertinent lorsque ses dimensions sont macroscopiquement faibles comparées aux distances d'action.

Commenté [A8]: L'échelle mésoscopique permet :
- de contenir un nombre suffisant de charges pour que la notion même de densité ait un sens (échelle supérieur à l'échelle microscopique)
- de considérer des fonctions densité locale de charges uniformes sur $d\tau$.

L'ordre de grandeur d'un tel volume est fonction du problème mais on peut affirmer qu'il ne peut être difficilement plus petit qu'1 nm^3 (volume englobant quelques noyaux d'un solide).

Commenté [A9]: Nous établirons, de manière analogue à l'équation de conservation de la masse, une équation de conservation de charge

Commenté [AM12]: Des charges peuvent se répartir sur de faibles épaisseurs, voire sur des structures tubulaires de sections faibles. On considère alors respectivement ces distributions comme surfaciques et linéiques.

Commenté [A10]: Topographie, spectre électrostatique, carte du champ électrostatique sont des termes équivalents.

Commenté [A11]: La charge ponctuelle est le motif de base permettant l'étude de toutes les autres distributions de charges. Son étude est donc le point de départ de l'électrostatique.

La force $\vec{f}$ s'exprime par :

$$\vec{f} = q_M \frac{q_P}{4\pi\varepsilon_0 PM^3}\overrightarrow{PM} = q_M \frac{q_P}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\overrightarrow{u_r} \text{ avec } \overrightarrow{u_r} = \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}$$

Où ε_0 est une constante appelée permittivité diélectrique du vide donnée par $\varepsilon_0 \approx 8 \times 10^{-12} F.m^{-1}$.

2) Champ électrostatique d'une charge ponctuelle

Le champ électrostatique $\vec{E}(M)$ créé en un point M par une charge ponctuelle q_P située en P est donné par :

$$\vec{E}(M) = \frac{q_P}{4\pi\varepsilon_0 PM^3}\overrightarrow{PM} = \frac{q_P}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\overrightarrow{u_r} \text{ Avec : } \overrightarrow{PM} = r\overrightarrow{u_r}$$

D) Généralisation de la loi de Coulomb

1) Champ électrostatique créé par une distribution discrète de charges

Soit une distribution de N charges ponctuelles fixes situées aux points P_i $(P_1(q_1), P_2(q_2), \ldots, P_N(q_N))$.

L'expérience montre que la force résultante, notée $\vec{F}$, qui s'exerce sur une charge d'essai q_M située en M, est la somme vectorielle des N forces exercées par chaque charge q_{Pi} supposée seule, alors :

$$\vec{F}(M) = \sum_{i=1}^{N} \vec{f_i} = \sum_{i=1}^{N} \frac{q_M q_{Pi}}{4\pi\varepsilon_0 P_iM^3}\overrightarrow{P_iM} = q_M \sum_{i=1}^{N} \frac{q_{Pi}}{4\pi\varepsilon_0 P_iM^3}\overrightarrow{P_iM}$$

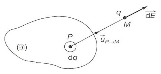
L'additivité des forces se traduit alors par l'additivité des champs électrostatiques car $\vec{F}(M) = q_M \sum_{i=1}^{N} \vec{E_i}(M)$

Principe de superposition : Le champ au point M résultant d'une distribution discrète de N charges est alors donné par : $\vec{E}(M) = \sum_{i=1}^{N} \vec{E_i}(M)$

2) Champ électrostatique d'une distribution continue

Soit $dq(P)$ la charge élémentaire autour d'un point P d'une distribution continue de charges D, alors le champ $d\vec{E}(M)$ créé par cette charge élémentaire au point M est donné par :

$$d\vec{E}(M) = \frac{dq(P)}{4\pi\varepsilon_0 PM^3}\overrightarrow{PM}$$



Le champ électrostatique rayonné par D est obtenu en appliquant le principe de superposition, c'est-à-dire en sommant la contribution de toutes les charges élémentaires constituant D, soit: $\vec{E}(M) = \int_D d\vec{E}(M) = \int_D \frac{dq(P)}{4\pi\varepsilon_0 PM^3}\overrightarrow{PM}$

E) Propriétés de symétrie

1) Principe de Curie :

Enoncé : Dans une expérience physique, les effets présentent au moins les symétries de leurs causes.

Ainsi, « l'effet » force électrostatique $\vec{f}$ (et donc le champ électrostatique) possède les mêmes propriétés de symétrie (et d'antisymétrie) que la « cause » distribution de charges qui le crée.

Lignes de champ d'une charge ponctuelle :

Représentons par des flèches le vecteur champ électrostatique créé par une charge positive et négative dans un plan contenant la charge et traçons les lignes de champ (orientées) associées :

Champs électrostatiques d'une charge ponctuelle positive (à gauche) et négative (à droite).

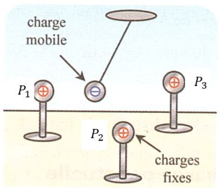
Lignes de champ d'une charge ponctuelle positive (à gauche) et négative (à droite).

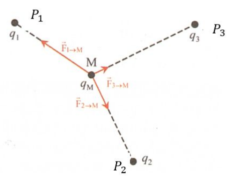
Les lignes de champ associées à une charge ponctuelle placée en P sont représentées par des demi-droites. On peut remarquer que les lignes de champ électrostatique :

- divergent à partir d'une charge ponctuelle positive
- convergent vers une charge ponctuelle négative
- et dans les deux cas, ces lignes de champ ne sont pas fermées

D'après le principe de superposition, ces résultats s'étendent à des distributions de charges D quelconques globalement chargées.

Principe de superposition





Commenté [A14]: Le cas de distribution globalement neutre sera évoqué dans la suite.

Commenté [A13]: Ce principe s'applique à tous les domaines de la physique. Il permet une mise en équation des phénomènes physiques plus simple et souvent observable
La nature a cependant imposé quelques dissymétries (matière plus importante que l'antimatière, chute sur une table d'un crayon initialement verticale…). La brisure spontanée de symétrie est le levier permettant de reprendre les équations physiques « idéales » pour décrire les phénomènes réels.
Par exemple, le modèle standard fait une description des interactions entre les particules élémentaires (en affectant à ces interactions des particules médiatrices). Le boson de Higgs, dont l'existence résulte d'une brisure de symétrie et expliquant la masse des corps, a été mis en évidence au LHC.
http://www.dailymotion.com/video/x70e9i_etienne-klein-la-brisure-de-symetri_tech

2) <u>Plan de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de charges</u>

On dit qu'un plan (P_S) est un plan de symétrie pour une distribution de charges si pour tout couple de points P et P' symétriques par rapport à (P_S), on a :

$$P^{'} = [Sym\ (P)]_{/P_S} \text{ alors } \rho(P) = \rho(P')$$

On dit qu'un plan (P_a) est un plan d'antisymétrie pour une distribution de charges si pour tout couple de points P et P', symétriques par rapport à (P_a), on a :

$$P^{'} = [Sym\ (P)]_{/P_a} \text{ alors } \rho(P) = -\rho(P').$$

3) <u>Détermination de la direction du champ électrostatique à l'aide d'arguments de symétrie</u>

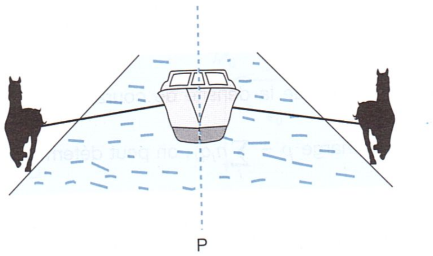
Commenté [AM15]: Le principe de superposition permet la généralisation des résultats suivants, obtenus pour un système constitué de deux charges, à toute distribution.

D'après le principe de Curie :

Si : $M^{'} = [Sym\ (M)]_{/P_S}$ Alors : $\vec{E}(M^{'}) = [Sym\ \vec{E}(M)]_{/P_S}$ Donc si $M \in P_s$ alors $\vec{E}(M) \in$ à P_s	Si : $M^{'} = [Sym\ (M)]_{/P_a}$ Alors : $\vec{E}(M^{'}) = -[Sym\ \vec{E}(M)]_{/P_a}$ Donc si $M \in P_a$ alors $\vec{E}(M) \perp$ à P_s

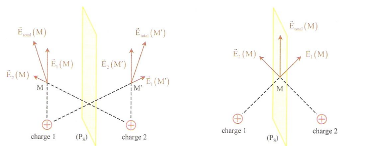
<u>Principe de Curie</u>

Voici un exemple :



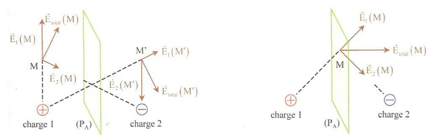
Cause	Effet
La traction des chevaux (symétrique par rapport à la droite P)	Le mouvement du bateau est également symétrique par rapport à ce plan

<u>Exemples de plan de symétrie et d'antisymétrie :</u>



Pour un point M appartenant au plan de symétrie (P_S) de la distribution de charges, alors $M \equiv M'$ et $\vec{E}(M^{'}) = [Sym\ \vec{E}(M)]_{/P_S} = \vec{E}(M)$: le champ électrostatique doit être son propre symétrique, ce qui n'est possible que s'il appartient à (P_S).

Commenté [A16]: On pourra s'en persuader en faisant la construction du champ sur (Ps) pour le doublet



Pour un point M appartenant au plan d'antisymétrie (P_a) de la distribution de charges, alors $M \equiv M'$ et $\vec{E}(M^{'}) = -[Sym\ \vec{E}(M)]_{/P_a} = \vec{E}(M)$: le champ électrostatique doit être son propre symétrique, ce qui n'est possible que s'il est perpendiculaire à (P_S).

Commenté [A17]: On pourra s'en persuader en faisant la construction du champ sur (Ps) pour le doublet