

Prérequis : doc. « Du doublet au dipôle »

Dipôle électrostatique

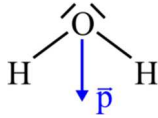
Définitions

On appelle **dipôle électrostatique** une distribution de charges q_i (fixes dans le référentiel d'étude) telle que : $\sum_i q_i = 0$ (i.e. charge totale nulle).

Le **moment dipolaire** électrostatique de la distribution de charges q_i placées aux points P_i autour d'un point O (neutre, arbitraire) est : $\vec{p} = \sum_i q_i \vec{OP}_i$ (en Cm).

Unité adaptée à la chimie : le Debye.

$$1 D = \frac{1}{3} 10^{-29} \text{ Cm} \Rightarrow p_{\text{molécule}} \approx 1 D \text{ en ordre de grandeur.}$$



Le moment dipolaire est indépendant du point origine O.

Remarques :

- Ces définitions généralisent les définitions données pour un doublet de charges $+q/-q$.
- En toute rigueur un dipôle électrostatique est une distribution dont les barycentres des charges positives et négatives ne sont pas confondus (sinon le moment dipolaire est nul et on parle alors de quadrupôle pour lequel il faut pousser le développement limité du potentiel plus loin). Un dipôle est donc une distribution de charge totale nulle et de moment dipolaire non nul.

Comprendre

Le moment dipolaire caractérise la distribution du point de vue électrique (charges q_i) et du point de vue géométrique (extension spatiale).

Exercices

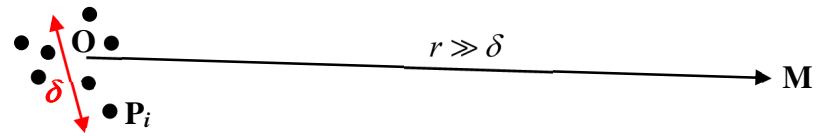
1. Vérifier que, dans le cas de deux charges opposées $+q$ et $-q$, cette définition du moment dipolaire coïncide avec celle du mot dipolaire d'un doublet de charges.
2. Vérifier que la définition du moment dipolaire \vec{p} est indépendante du point O en calculant le moment dipolaire en un autre point quelconque O' (relation de Chasles).

Approximation dipolaire

Le concept de dipôle est utilisé pour décrire des objets microscopiques (molécules, atomes polarisés...) : on considère donc que la **distribution** des charges est **localisée** dans une zone de l'espace et que les effets de ces charges sont étudiés en un point M « éloigné » de cette zone.

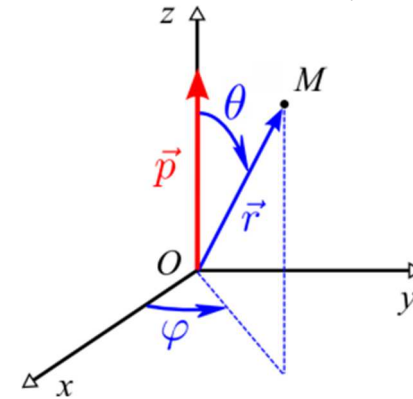
On note δ l'extension spatiale du dipôle (ordre de grandeur) et $r = OM$.
L'approximation dipolaire consiste à supposer que $r \gg \delta$.

Plus rigoureusement, les calculs seront poussés à l'ordre 1 en δ/r .



Potentiel créé par le dipôle

Le potentiel **créé** par le dipôle au point M est $V(M) = \frac{p \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ en coordonnées sphériques.



Ou encore $V(M) = \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$ (expression intrinsèque).

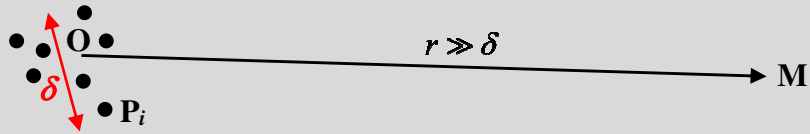
Remarques :

- Noter l'invariance par rotation d'angle φ alors que la distribution ne possède pas nécessairement cette propriété : le terme dipolaire dans le calcul du potentiel est identique à celui trouvé dans le cas d'un doublet de charges. Autrement dit, dans l'approximation dipolaire, les positions des charges interviennent seulement dans la valeur de \vec{p} .
- Noter la décroissance en $1/r^2$ du potentiel (plus rapide que la décroissance en $1/r$ dans le cas d'une charge ponctuelle).

Exercices

3. Question de cours (cf. doc. « Du doublet au dipôle ») : savoir exprimer le potentiel créé au point M par deux charges $+q$ et $-q$ placées respectivement aux points P et N dans l'approximation dipolaire ($r = OM \gg d$), connaître le schéma.

4. Généralisation (*Facultatif*)** Établir l'expression du potentiel créé en M par une distribution de charges q_i placées aux points P_i , d'extension spatiale δ , située au voisinage d'un point O, dans l'approximation dipolaire ($r = OM \ll \delta \Rightarrow \left(\frac{OP_i}{r}\right)^2 \approx \left(\frac{\delta}{r}\right)^2 \ll 1$).



5. Envisager le cas d'un ion de charge totale $Q_{ion} = \sum_i q_i \neq 0$.

Champ créé par le dipôle

Le champ **créé** par le dipôle au point M est \vec{E} en coordonnées sphériques.

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{2p \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \\ \frac{p \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \\ 0 \end{cases}$$

Ou encore $\vec{E} = \frac{(3\vec{p} \cdot \vec{r})\vec{r} - \vec{p}r^2}{4\pi\epsilon_0 r^5}$ (expression intrinsèque).

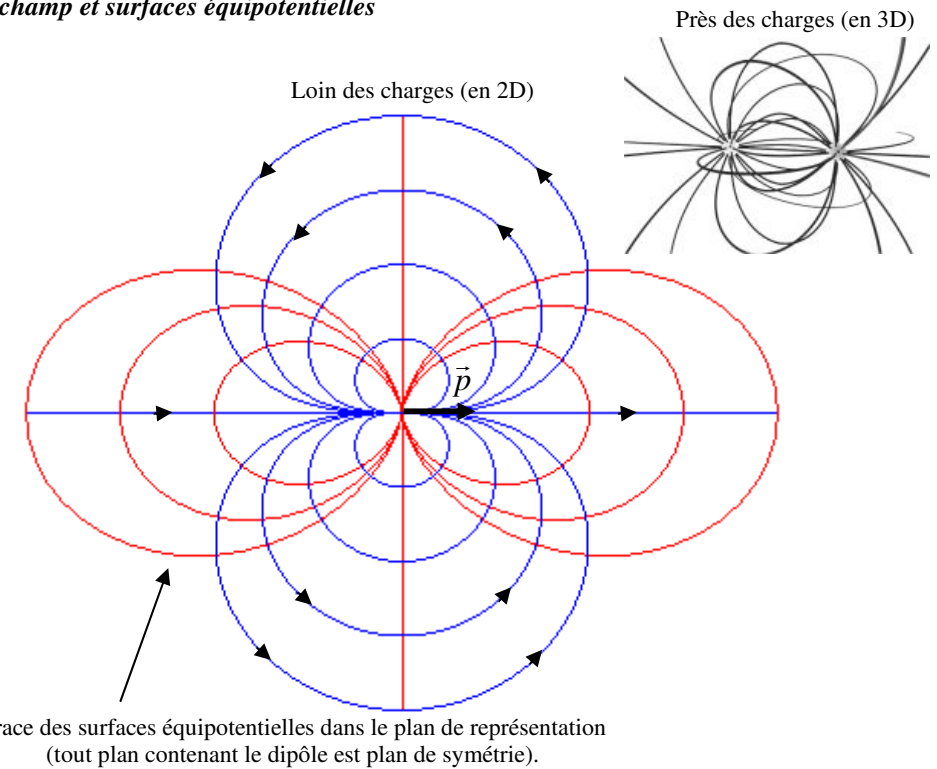
Remarques :

- Invariance par rotation d'angle φ .
- Décroissance en $1/r^3$ du champ (plus rapide que la décroissance en $1/r^2$ dans le cas d'une charge ponctuelle).

Exercices

6. Question de cours (cf. doc. « Du doublet au dipôle ») : savoir calculer le champ à partir du potentiel.
7. (*Facultatif*) Retrouver les coordonnées du champ à partir de l'expression intrinsèque.

Lignes de champ et surfaces équipotentielles



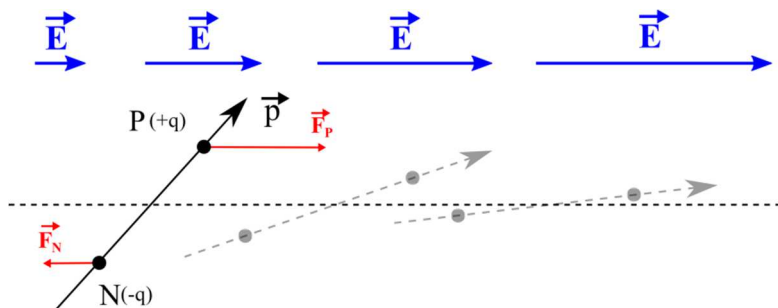
Remarque :

Près de l'origine (au centre de la figure en 2D ci-dessus), les lignes de champ sont incorrectes (elles semblent fermées) car l'approximation dipolaire n'est pas licite dans cette zone (l'allure réelle est visible sur le schéma 3D).

Actions subies par un dipôle quelconque dans un champ extérieur

Les actions **subies** par un dipôle quelconque (rigide ou non) placé dans un champ électrostatique **extérieur** \vec{E} (dont la distance caractéristique d'évolution Δ est telle que $\Delta \gg \delta$) sont caractérisées par :

- la résultante des forces appliquées au dipôle \vec{R}_e telle que :
 - $\vec{R}_e = \vec{0}$ si le champ extérieur \vec{E} est uniforme ;
 - $\vec{R}_e \neq \vec{0}$ entraîne le dipôle vers les régions où le champ est le plus **intense** lorsque le champ \vec{E} n'est pas uniforme. $\vec{R}_e = (\vec{p} \cdot \text{grad}) \vec{E}(O)$ (admis).
- le moment résultant \vec{m}_o tel que : $\vec{m}_o = \vec{p} \wedge \vec{E}(O)$ qui tend à aligner le moment dipolaire \vec{p} avec le champ \vec{E} (uniforme ou non).
Équilibre stable lorsque les vecteurs sont de même sens, instable lorsqu'ils sont de sens contraires (schémas ci-dessous).



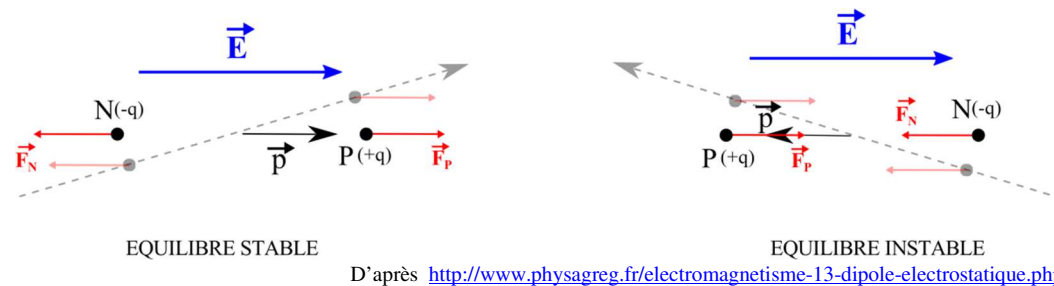
<http://www.physagreg.fr/electromagnetisme-13-dipole-electrostatique.php>

Énergie potentielle d'un dipôle RIGIDE dans un champ extérieur

Un dipôle **rigide** placé dans un champ extérieur quelconque \vec{E} possède une énergie potentielle E_p telle que : $E_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}(O)$. Cette énergie est bien **minimum** (équilibre stable) lorsque le moment dipolaire et le champ sont colinéaires et de même sens (schéma ci-dessous).

Pour un dipôle **rigide**, on dispose donc d'une autre expression de la force subie par le dipôle : $\vec{R}_e = -\text{grad}E_p = \text{grad}(\vec{p} \cdot \vec{E})$.

Remarque : cette énergie est **minimum** lorsque \vec{p} et \vec{E} sont **colinéaires** et de **même sens** (équilibre stable).



D'après <http://www.physagreg.fr/electromagnetisme-13-dipole-electrostatique.php>

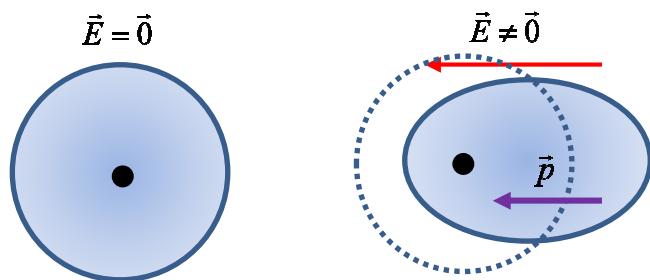
Exercices

- Question de cours (cf. doc. « Du doublet au dipôle ») : savoir retrouver les expressions des efforts (résultante et moment) subis par un doublet placé dans un champ extérieur uniforme.
- Question de cours (cf. doc. « Du doublet au dipôle ») : savoir expliquer qualitativement les effets d'un champ non uniforme sur un doublet.
- Expliquer qualitativement la solvation des ions dans un solvant polaire (eau).

Dipôles induits

Un atome ou une molécule **non polaire** (i.e. de **moment dipolaire permanent nul**), plongé dans un champ extérieur \vec{E} , acquiert un **moment dipolaire induit** \vec{p} proportionnel au champ appliqué (pour des champs pas trop intenses) : $\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}$. La constante α (positive) est la **polarisabilité** de l'atome ou de la molécule (en m^3).

En ordre de grandeur, la polarisabilité d'une molécule est égale à son volume.



Sous l'action d'un champ extérieur, le nuage électronique se déforme. Il apparaît un moment dipolaire induit (barycentre des charges + et - non confondus).

Exercices

- Question de cours - *Dimensions de la polarisabilité*
Montrer que la polarisabilité α est homogène à un volume.
- Question de cours - *Ordre de grandeur de la polarisabilité*
En considérant le champ créé par le noyau d'un atome à la distance a (son « rayon »), justifier qualitativement que l'ordre de grandeur de α est celui du volume de l'atome.

Modèle de Thomson



J.J. Thomson prouve que la matière est constituée de lourdes parties positives et d'électrons, parties négatives plus légères, pour lesquelles il arrive à déterminer la charge et la masse.

J.J. Thomson entrevoit ainsi la notion d'atomes sécables (a-tome = insécable étymologiquement). Pour respecter la vision classique de la matière continue, il propose le modèle du "plum-pudding". Il imagine que les électrons, le "plum" se déplacent dans un milieu chargé positivement : le "pudding".

D'après <http://culturesciences.chimie.ens.fr/node/1230>

L'expérience de Rutherford démentira cette vision et établira la structure lacunaire de la matière (cf. la référence ci-dessus).

Le modèle de Thomson consiste à modéliser l'atome d'hydrogène comme une sphère de rayon a dans laquelle la charge $+e$ du proton est uniformément répartie. L'électron, ponctuel, est situé à l'intérieur de cette boule (y compris lorsque l'atome est polarisé).

On montre alors que $\alpha = 4\pi a^3$ (de l'ordre de grandeur du volume $4/3\pi a^3$ de l'atome).

Exercice - Modèle de Thomson (charge du proton uniformément répartie dans l'atome)

Résumé de la méthode détaillée ci-dessous : déterminer le déplacement de l'électron par rapport à sa position de repos (i.e. en l'absence de champ extérieur) lorsque un champ extérieur E est appliqué afin de pouvoir exprimer son moment dipolaire induit en fonction de E . On en déduit alors la polarisabilité grâce à la définition de α .

- ✓ En utilisant le théorème de Gauss, exprimer le champ $\vec{E}_{\text{int}}(r)$ créé à l'intérieur de l'atome par le noyau (densité uniforme ρ à exprimer en fonction des données).
- ✓ En déduire la force subie par l'électron à la distance r du centre de l'atome.
- ✓ Écrire la condition d'équilibre de l'électron (supposé immobile) en présence d'un champ extérieur \vec{E}_{ext} noté simplement \vec{E} et en déduire sa position \vec{r} .
- ✓ Exprimer le moment dipolaire de l'atome à l'équilibre en fonction de \vec{r} puis de \vec{E} .
- ✓ En déduire α .

Forces intermoléculaires de Van der Waals

Les forces de van der Waals correspondent à une interaction électromagnétique d'intensité faible ayant lieu à courtes distances entre atomes et/ou molécules. Ces forces ont été nommées en l'honneur du physicien néerlandais Johannes Diderik van der Waals (1837-1923), prix Nobel de physique en 1910, qui fut le premier à introduire leurs effets dans les équations d'état des gaz en 1873 permettant d'aller au-delà de la description simpliste du gaz parfait.



Le gecko adhère aux murs par des forces de Van der Waals. Les spatules permettent aux pattes du gecko d'aller « coller » à une surface par des forces de Van der Waals car elles approchent la surface à une échelle nanométrique, condition nécessaire pour les forces de Van der Waals significatives qu'à courtes distances.

<http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/les-forces-de-van-der-waals-et-le-gecko>

Les forces de Van der Waals regroupent tous les types d'interactions et décroissent avec la distance r en $1/r^7$.

Dans les forces de Van der Waals, on distingue les forces de :

- Keesom entre dipôles permanents (molécules polaires) ;
- Debye entre dipôles permanents et dipôles induits ;
- London entre dipôles induits.

Exercice - Forces intermoléculaires de Van der Waals

- ✓ Compte tenu des relations précédentes, établies ou admises, justifier que l'énergie potentielle d'interaction entre deux dipôles (dont l'un est un dipôle induit supposé rigide) est proportionnelle à $1/r^6$. En déduire la dépendance en r de la résultante des forces.
- ✓ Expliquer pourquoi l'utilisation de la formule précédente est incorrecte dans le cas de molécules ou d'atomes.
- ✓ Exprimer la force subie par un dipôle polarisable en fonction de $(\vec{E} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{E}$.
- ✓ Transformer cette expression sachant que $(\vec{E} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{E} = \overrightarrow{\text{grad}} \frac{E^2}{2} + \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} \wedge \vec{E}$ et qu'en régime permanent $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0}$.
- ✓ En déduire l'expression de l'énergie potentielle valable dans ce cas et sa dépendance en r .
- ✓ Conclure quant à la dépendance en r de la résultante des forces.

Dipôle magnétique

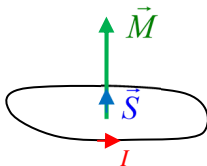
Définitions

On appelle **dipôle magnétique** un circuit fermé, d'extension finie au voisinage d'un point O , parcouru par un courant.

Le **moment dipolaire** magnétique \vec{M} d'une boucle plane filiforme parcourue par un courant d'intensité I et de surface S est :

$$\vec{M} = I\vec{S} \text{ (en Am}^2\text{)}.$$

Où \vec{S} est le vecteur surface associé à la boucle, unique et caractéristique du contour formant la boucle (orientation : règle de la main droite).



Comprendre

Le moment dipolaire caractérise la distribution du point de vue électromagnétique (intensité I) et du point de vue géométrique (extension spatiale, surface S de la boucle).

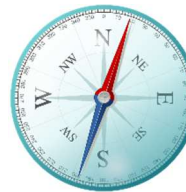
Remarque :

La similitude entre les lignes de champ des dipôles électrostatiques et magnétiques conduit à écrire le champ \vec{B} créé par le dipôle sous une forme analogue à celle du champ \vec{E} en remplaçant le moment dipolaire \vec{p} par le moment magnétique \vec{M} .

Actions subies par un dipôle dans un champ extérieur

On admet que dans l'**approximation dipolaire** les relations pour le dipôle magnétique sont analogues à celles du dipôle électrostatique (analogie formelle $\vec{E} \leftrightarrow \vec{B}$ et $\vec{p} \leftrightarrow \vec{M}$) :

	Électrostatique	Magnétostatique
Résultante des forces		
Moment des forces		
Énergie potentielle (dipôle rigide)		



Une aiguille aimantée constitue un dipôle magnétique dont le moment est colinéaire à l'aiguille.

