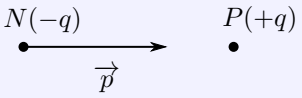
<table>
<tr><th>Notions et contenus</th><th>Capacités exigibles</th><th>Détail</th></tr>
<tr><td>Notion de dipôle électrostatique, moment dipolaire.</td><td>Exprimer le moment dipolaire d'un doublet de charges. Évaluer des ordres de grandeur dans le domaine microscopique.</td><td>Donner les différentes définitions. Estimer le moment dipolaire d'une molécule A−B dans l'hypothèse d'une liaison purement ionique.

On appelle dipôle électrostatique un ensemble de deux charges opposées $+q$ et $-q$ avec $q>0$, assimilées à des charges ponctuelles, dont on étudie les effets à grande distance devant la distance qui les sépare.

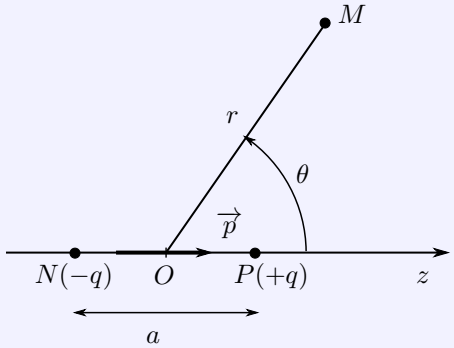
On définit le moment dipolaire $\overrightarrow{p}$ d'un dipôle électrostatique comme


$\boxed{\overrightarrow{p}=q\overrightarrow{NP}}$

avec la charge $-q$ placée en N et la charge $+q$ placée en P.
$\overrightarrow{p}$ s'exprime en C m ou en debye (D) avec $1\,\mathrm{D}=3{,}336\times10^{-30}\,\mathrm{C\,m}$.
Dans le cas d'une molécule A−B, le moment dipolaire associé, dans l'hypothèse d'une liaison purement ionique, est

$p=ed$ avec $d\approx1\times10^{-10}\,\mathrm{m}$ donc $p\approx1\times10^{-29}\,\mathrm{C}\approx3\,\mathrm{D}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Champ et potentiel créés par un dipôle électrostatique.</td><td>Expliciter l'approximation dipolaire.</td><td>On décrit le point M d'observation par ses coordonnées sphériques (r,θ,ϕ) d'origine O, milieu de $[NP]$, et d'axe (Oz) selon $\overrightarrow{p}$. On note $a=||\overrightarrow{NP}||$ la taille du dipôle.
L'approximation dipolaire consiste à se placer à grande distance devant la taille du dipôle :

$\boxed{a\ll r}$


</td></tr>
<tr><td>Établir et exploiter les expressions du champ et du potentiel créés par un doublet de charges dans l'approximation dipolaire.</td><td>Justifier le choix des coordonnées sphériques.

Il y a invariance par rotation autour de l'axe (Oz) passant par les charges. Donc $V(M)$ et $\overrightarrow{E}(M)$ sont indépendant de ϕ, angle lié à la rotation d'axe (Oz).
De plus, tout plan contenant le dipôle est un plan de symétrie de la distribution de charges. C'est aussi un plan de symétrie pour $\overrightarrow{E}(M)$. Donc le champ en M est contenu dans le plan défini par M et l'axe (Oz), soit le plan $(M,\overrightarrow{e}_r,\overrightarrow{e}_\theta)$.
On peut aussi noter que le plan $\Pi^*=(O,\overrightarrow{e}_x,\overrightarrow{e}_y)$ est un plan d'anti-symétrie des charges, donc aussi de $\overrightarrow{E}(M)$.
D'où le choix des coordonnées sphériques, avec une représentation dans le plan $(O,\overrightarrow{e}_r,\overrightarrow{e}_\theta)$.</td></tr>
</table>

Notions et contenus	Capacités exigibles	Détail
Champ et potentiel créés par un dipôle électrostatique.	Établir et exploiter les expressions du champ et du potentiel créés par un doublet de charges dans l'approximation dipolaire.	Établir l'expression du potentiel électrostatique.

Principe de superposition : $V(M) = \dfrac{q}{4\pi\epsilon_0 PM} - \dfrac{q}{4\pi\epsilon_0 NM}$

On exprime les distances

$$PM^2 = ||\overrightarrow{PO} + \overrightarrow{OM}||^2 = PO^2 + OM^2 + 2\overrightarrow{PO}\cdot\overrightarrow{OM} = \left(\frac{a}{2}\right)^2 + r^2 - ra\cos(\theta) \quad \text{et} \quad NM^2 = \left(\frac{a}{2}\right)^2 + r^2 + ra\cos(\theta)$$

On en déduit à l'ordre 1 en a/r :

$$\frac{1}{PM} = r^{-1}\left[1 + \left(\frac{a}{2r}\right)^2 - \frac{a}{r}\cos(\theta)\right]^{-1/2} = r^{-1}\left[1 + \frac{a}{2r}\cos(\theta) + o\left(\frac{a}{r}\right)\right] \quad \text{et} \quad \frac{1}{NM} = r^{-1}\left[1 - \frac{a}{2r}\cos(\theta) + o\left(\frac{a}{r}\right)\right]$$

On injecte dans l'expression du potentiel :

$$V(M) \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}\left[\left(1 + \frac{a}{2r}\cos(\theta)\right) - \left(1 - \frac{a}{2r}\cos(\theta)\right)\right] \quad \text{soit} \quad \boxed{V(M) \approx \frac{qa\cos(\theta)}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\overrightarrow{p}\cdot\overrightarrow{e}_r}{4\pi\epsilon_0 r^2}}$$

On remarque une décroissance en $1/r^2$, et non en $1/r$ comme dans le cas d'une charge ponctuelle.

En déduire l'expression du champ électrique.

En électrostatique, $\overrightarrow{E}(M) = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V(M)$.

$$\overrightarrow{E} = -\frac{\partial V}{\partial r}\overrightarrow{e}_r - \frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}\overrightarrow{e}_\theta \quad \text{avec} \quad \frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{2qa\cos(\theta)}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad \text{et} \quad \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\frac{qa\sin(\theta)}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

On en déduit l'expression du champ électrique

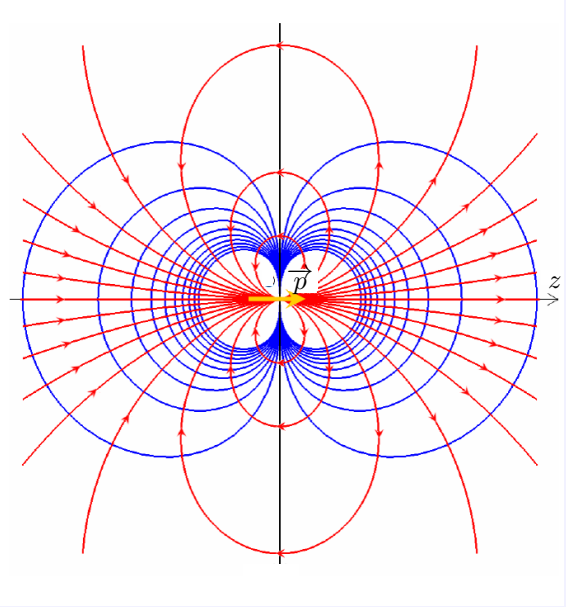
$$\boxed{\overrightarrow{E}(M) = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}\left(2\cos(\theta)\overrightarrow{e}_r + \sin(\theta)\overrightarrow{e}_\theta\right)}$$

Pour exprimer la forme intrinsèque, on définit le moment dipolaire dans le base sphérique :

$$\overrightarrow{p} = qa\cos(\theta)\overrightarrow{e}_r - qa\sin(\theta)\overrightarrow{e}_\theta \quad \text{donc} \quad \boxed{\overrightarrow{E}(M) = \frac{3(\overrightarrow{p}\cdot\overrightarrow{e}_r)\overrightarrow{e}_r - \overrightarrow{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3}}$$

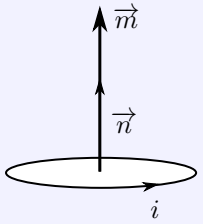
On remarque une décroissance en $1/r^3$, et non en $1/r^2$ comme dans le cas d'une charge ponctuelle.

<table>
<tr><th>Notions et contenus</th><th>Capacités exigibles</th><th>Détail</th></tr>
<tr><td>Champ et potentiel créés par un dipôle électrostatique.</td><td>Représenter l'allure des lignes de champ et des surfaces équipotentielles d'un dipôle électrostatique.</td><td>Donner l'équation des surfaces équipotentielles. Représenter la carte de lignes de champ et de surfaces équipotentielles. Discuter des symétries des lignes de champ.

L'équation des surfaces équipotentielles en coordonnées sphériques est donnée par
$V(r,\theta) = cste$ soit $\boxed{r^2 = A\cos(\theta)}$ avec $A = cste$
Les lignes de champ sont orthogonales aux surfaces équipotentielles. Elles sont tangentes en chaque point au champ électrique en ce point.
Le plan (Oxy) (pour $\theta = \pi/2$) est un plan d'antisymétrie de la distribution de charges. C'est donc aussi un plan d'antisymétrie des lignes de champ.
Le plan (Oxz) ($\theta = 0$) est un plan de symétrie de la distribution de charges. C'est donc aussi un plan de symétrie des lignes de champ.
</td></tr>
<tr><td>Dipôle électrostatique placé dans un champ électrostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.</td><td>Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur.
Établir et exploiter les expressions des actions mécaniques subies par un doublet de charges dans un champ électrostatique extérieur uniforme.</td><td>L'effet le plus important est une orientation du dipôle dans la direction et le sens du champ extérieur (selon les lignes de champ). Une fois que le dipôle est orienté, il est ensuite attiré vers les zones de champ intense.

Donner les actions mécaniques s'exerçant sur un dipôle rigide dans un champ $\vec{E}$ uniforme, puis les démontrer.

Soit un dipôle électrostatique $\vec{p} = q\overrightarrow{NP}$ plongé dans un champ électrostatique uniforme $\vec{E} = \overrightarrow{cste}$.
Les actions mécaniques subies par ce dipôle se résument à un couple : une résultante nulle ($\vec{F} = \vec{0}$) et un moment $\vec{\Gamma} = \vec{p} \wedge \vec{E}$.
Expression de la résultante : $\vec{F} = q\vec{E}(P) - q\vec{E}(N) = \vec{0}$ car $\vec{E}(P) = \vec{E}(N)$
Expression du moment :
$$\vec{\Gamma} = \overrightarrow{OP} \wedge (q\vec{E}) + \overrightarrow{ON} \wedge (-q\vec{E}) = \overrightarrow{NP} \wedge (q\vec{E}) = \vec{p} \wedge \vec{E}$$</td></tr>
</table>

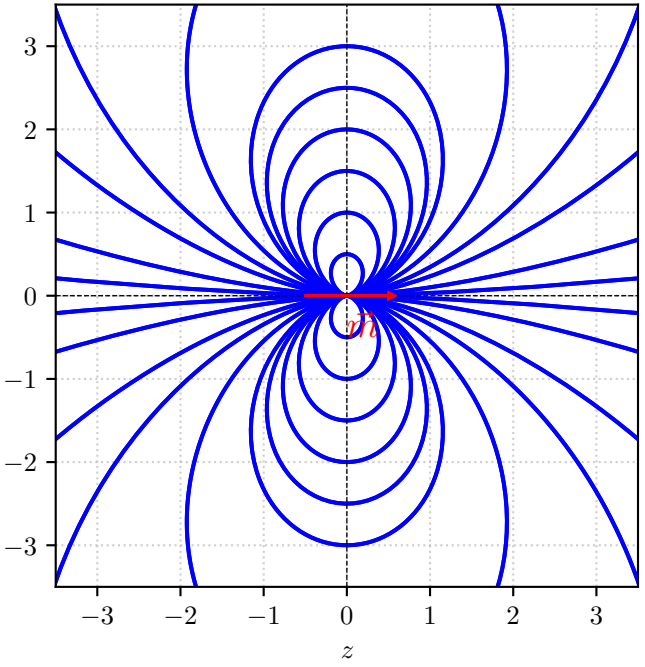
<table>
<tr><th>Notions et contenus</th><th>Capacités exigibles</th><th>Détail</th></tr>
<tr><td>Dipôle électrostatique placé dans un champ électrostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.</td><td>Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur non uniforme.
Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.</td><td>Donner les actions mécaniques subies par un dipôle rigide dans un champ électrique non uniforme.
Les actions mécaniques d'un champ extérieur non uniforme $\overrightarrow{E}$ sur un dipôle électrique rigide de moment $\overrightarrow{p}$ sont :
• la résultante $\overrightarrow{F} = \overrightarrow{\text{grad}}(\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{E})$;
• le moment par rapport à O, milieu de $[NP]$: $\overrightarrow{M}_O = \overrightarrow{p} \wedge \overrightarrow{E}(O)$.
Donner l'expression de l'énergie potentielle d'interaction. La démontrer dans le cas d'un champ électrique extérieur uniforme.
L'énergie potentielle d'un dipôle rigide s'exprime $\boxed{E_p = -\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{E}(O)}$.
Le dipôle étant rigide, l'énergie potentielle d'interaction des actions intérieures est nulle. Donc
$$E_p = qV_{\text{ext}}(P) - qV_{\text{ext}}(N)$$
Or $\overrightarrow{E}_{\text{ext}} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V_{\text{ext}}$ et $\overrightarrow{E}_{\text{ext}} = \overrightarrow{cst\acute{e}}$, donc
$$V_{\text{ext}}(M) = -\overrightarrow{E}_{\text{ext}} \cdot \overrightarrow{OM}$$
en choisissant la constante d'intégration nulle, i.e. en choisissant l'origine de l'énergie potentielle en O.
On a alors
$$E_p = -q\overrightarrow{E}_{\text{ext}} \cdot \overrightarrow{OP} + q\overrightarrow{E}_{\text{ext}} \cdot \overrightarrow{ON} = -q\overrightarrow{E}_{\text{ext}} \cdot \overrightarrow{NP} = -\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{E}_{\text{ext}}$$</td></tr>
<tr><td>Notion de dipôle magnétique. Moment magnétique.</td><td>Exprimer le moment magnétique d'une boucle de courant plane.
Évaluer des ordres de grandeur dans les domaines macroscopique et microscopique.</td><td>Définir le moment magnétique d'une spire. Donner des OG.
Le moment magnétique $\overrightarrow{m}$ a été défini en MPSI à partir d'une boucle de courant plane parcourue par un courant i et de surface orientée $\overrightarrow{S} = S\overrightarrow{n}$, orientée corrélativement avec i. Il s'exprime
$$\boxed{\overrightarrow{m} = iS\overrightarrow{n}}$$


Citons des ordres de grandeur de moment magnétique :
• boussole : $1\,\text{A}\,\text{m}^2$
• Terre : $7{,}5 \times 10^{22}\,\text{A}\,\text{m}^2$
• un atome : $1 \times 10^{-23}\,\text{A}\,\text{m}^2$</td></tr>
</table>

Notions et contenus	Capacités exigibles	Détail
Champ créé par un dipôle magnétique.	Définir un dipôle magnétique et expliciter l'approximation dipolaire.	On appelle dipôle magnétique un circuit filiforme de forme quelconque mais de dimensions petites vis-à-vis des distances d'où on le regarde ou d'où on agit sur lui (approximation dipolaire).
	Exploiter l'expression fournie du champ créé par un dipôle magnétique. Représenter l'allure des lignes de champ d'un dipôle magnétique.	Donner l'expression du champ magnétique $\overrightarrow{B}(M)$ crée par un dipôle magnétique par analogie avec le champ électrique produit par un dipôle électrique. Représenter les lignes de champ.

$$\overrightarrow{B} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3}\left(2\cos(\theta)\overrightarrow{e}_r + \sin(\theta)\overrightarrow{e}_\theta\right) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}\left(3(\overrightarrow{m}\cdot\overrightarrow{e}_r)\overrightarrow{e}_r - \overrightarrow{m}\right)$$

On obtient les lignes de champ suivantes :



Notions et contenus	Capacités exigibles	Détail
Dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.	Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle passif placé dans un champ magnétostatique extérieur.	L'effet le plus important est une orientation du dipôle dans la direction et le sens du champ extérieur (selon les lignes de champ). Une fois que le dipôle est orienté, il est ensuite attiré vers les zones de champ intense.
	Exploiter les expressions fournies des actions mécaniques subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur uniforme. Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur non uniforme. Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.	Donner par analogie avec le dipôle électrique, les actions subies par un dipôle magnétique dans un champ $\overrightarrow{B}$ non uniforme, ainsi que l'énergie potentielle d'interaction. Comment se simplifie ces expressions dans le cas d'un champ magnétique uniforme. Soit un dipôle magnétique de moment $\overrightarrow{m}$ placé en O et plongé dans un champ magnétique extérieur $\overrightarrow{B}_{\text{ext}}$ non uniforme. Ce dipôle magnétique est soumis au moment suivant qui oriente le dipôle dans la même direction et le même sens que $\overrightarrow{B}_{\text{ext}}(O)$: $\boxed{\overrightarrow{\Gamma}_L = \overrightarrow{m} \wedge \overrightarrow{B}_{\text{ext}}(O)}$ L'énergie potentielle d'interaction entre le dipôle et le champ extérieur est admise. Elle est déduite par analogie avec le dipôle électrique : $\boxed{E_p = -\overrightarrow{m} \cdot \overrightarrow{B}_{\text{ext}}(O)}$ La force exercée sur le dipôle est alors $\boxed{\overrightarrow{F} = \overrightarrow{\text{grad}}(\overrightarrow{m} \cdot \overrightarrow{B}_{\text{ext}})}$ Si le champ magnétique est uniforme, alors la résultante est nulle. Donc les actions mécaniques se résument à un couple.