LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

Classes préparatoires aux grandes écoles
MPSI — Physique-chimie
Année 2026-2027

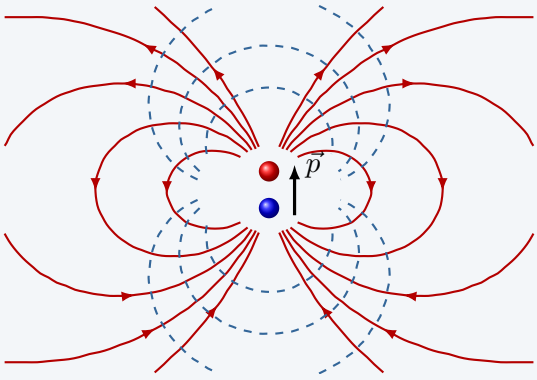
FICHE RÉSUMÉ

EM2

ÉLECTROMAGNÉTISME

Dipôle électrostatique

Moment dipolaire — Approximation dipolaire — Champ et potentiel à grande distance — Actions d'un champ extérieur — Molécules polaires



« *Rien n'est trop merveilleux pour être vrai, si cela est conforme aux lois de la nature.*

— Michael Faraday, journal de laboratoire (1849)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Dipôle électrostatique »

EM2 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Un **dipôle électrostatique** est une distribution globalement neutre dont les barycentres des charges positives et négatives sont distincts ; il est entièrement caractérisé, vu de loin, par son **moment dipolaire** $\vec{p}$. Dans l'**approximation dipolaire** ($r \gg a$), son potentiel décroît en $1/r^2$ et son champ en $1/r^3$, plus vite que pour une charge. Placé dans un champ extérieur, un dipôle rigide a l'énergie $E_p = -\vec{p}\cdot\vec{E}$: il tend à s'aligner sur $\vec{E}$ (couple) et, si le champ n'est pas uniforme, il est attiré vers les zones de champ fort (force).

I Modèle du dipôle et moment dipolaire

Définition — Dipôle, moment dipolaire R

Distribution de charge totale nulle dont les barycentres N (charges $-$) et P (charges $+$) sont distincts. Modèle du **doublet rigide** : $-q$ en N, $+q$ en P ($q>0$), $a = NP$ fixe.

$$\vec{p} = q\,\overrightarrow{NP} \qquad (\mathrm{C\cdot m}),\ \text{orienté de la charge } - \text{ vers la charge } +$$

Distribution quelconque de charge totale nulle R D

$$\vec{p} = \sum_i q_i\,\overrightarrow{OP_i} \qquad \text{ou} \qquad \vec{p} = \iiint_{\mathcal{D}} \rho(P)\,\overrightarrow{OP}\,\mathrm{d}\tau$$

indépendant de l'origine O car $\sum_i q_i = 0$: $\sum_i q_i\overrightarrow{O'P_i} = \left(\sum_i q_i\right)\overrightarrow{O'O} + \vec{p} = \vec{p}$. Pour le doublet, $q\overrightarrow{OP} - q\overrightarrow{ON} = q\overrightarrow{NP}$.

Ordres de grandeur

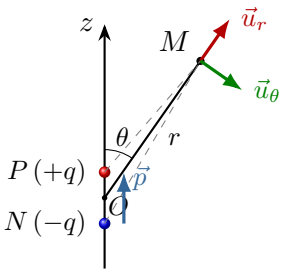
Unité moléculaire : le **debye**, $1\,\mathrm{D} = 3{,}34\times10^{-30}\,\mathrm{C\cdot m}$. Charge e séparée de $0{,}1\,\mathrm{nm}$: $1{,}6\times10^{-29}\,\mathrm{C\cdot m} \approx 5\,\mathrm{D}$ (les charges réelles ne sont que partiellement séparées).

Molécule	H_2O	NH_3	HCl	CO	CO_2	CH_4
p (D)	1,85	1,47	1,08	0,11	0	0

II Potentiel et champ à grande distance

Cadre. O milieu de $[NP]$, Oz selon $\vec{p}$, M repéré en sphériques (r, θ, φ).

- Invariance par rotation autour de Oz : V et les composantes de $\vec{E}$ ne dépendent que de (r, θ).
- Tout plan contenant Oz et M est plan de **symétrie** : $\vec{E}$ est dans le plan méridien, $E_\varphi = 0$.
- Le plan médiateur $z = 0$ est plan d'**antisymétrie** : $V = 0$ sur ce plan, $\vec{E}$ lui est perpendiculaire.



Définition — Approximation dipolaire R

On se place à grande distance : $r \gg a$, et l'on ne garde que le premier terme non nul du développement en a/r.

Potentiel et champ dipolaires R D

$$V(M) = \frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{\vec{p}\cdot\vec{u}_r}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{\vec{p}\cdot\overrightarrow{OM}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

$$E_r = \frac{2p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \qquad E_\theta = \frac{p\sin\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \qquad E_\varphi = 0 \qquad \vec{E}(M) = \frac{3(\vec{p}\cdot\vec{u}_r)\,\vec{u}_r - \vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$

Ces expressions valent pour **toute** distribution neutre de moment $\vec{p}$, à grande distance.

☞ Méthode — Établir le potentiel dipolaire M

$V = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{PM} - \frac{1}{NM}\right)$ avec $PM^2 = r^2 - ar\cos\theta + \frac{a^2}{4}$; au premier ordre en $\frac{a}{r}$: $\frac{1}{PM} \approx \frac{1}{r}\left(1 + \frac{a\cos\theta}{2r}\right)$ et $\frac{1}{NM} \approx \frac{1}{r}\left(1 - \frac{a\cos\theta}{2r}\right)$, d'où $V \approx \frac{qa\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. Les termes en $\frac{1}{r}$ se compensent (neutralité). Puis $E_r = -\frac{\partial V}{\partial r}$, $E_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta}$.

Remarque

Développement multipolaire. Pour une distribution quelconque de taille a, à grande distance :

$$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q}{r} + \frac{\vec{p}\cdot\vec{u}_r}{r^2} + \cdots\right).$$

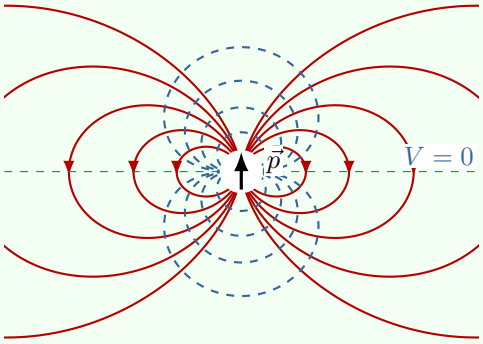
Terme **monopolaire** $(1/r)$ si $Q \neq 0$; sinon **dipolaire** $(1/r^2)$; si $Q = 0$ et $\vec{p} = \vec{0}$ (CO_2, N_2), terme quadripolaire en $1/r^3$.

III Topographie du champ dipolaire

Carte dipolaire R D

Dans un plan méridien (r, θ) :

- **équipotentielles** : $r^2 = k\cos\theta$; le plan médiateur est l'équipotentielle $V = 0$;
- **lignes de champ** : $\dfrac{\mathrm{d}r}{E_r} = \dfrac{r\,\mathrm{d}\theta}{E_\theta} \Rightarrow \dfrac{\mathrm{d}r}{r} = \dfrac{2\cos\theta}{\sin\theta}\mathrm{d}\theta$, soit $r = K\sin^2\theta$;
- les lignes vont du côté $+$ vers le côté $-$ en s'écartant de l'axe, orthogonales aux équipotentielles ;
- sur l'axe, $\vec{E}$ est colinéaire à $\vec{p}$ et de même sens ; dans le plan médiateur, $\vec{E} = -\dfrac{\vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$.



Lignes de champ (rouge) et équipotentielles (bleu, tirets)

IV Dipôle rigide dans un champ extérieur

Énergie potentielle d'interaction R D

$$E_p = qV(P) - qV(N) = -\vec{p}\cdot\vec{E}$$

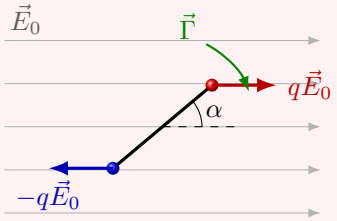
(champ extérieur variant peu à l'échelle de a : $V(P) - V(N) \approx \overrightarrow{\mathrm{grad}}\,V \cdot \overrightarrow{NP}$).

Champ uniforme $\vec{E}_0$: un couple R D

$$\vec{F} = \vec{0} \qquad \vec{\Gamma} = \vec{p}\wedge\vec{E}_0$$

Le moment ne dépend pas du point : c'est un **couple**. Avec $\alpha = (\vec{E}_0, \vec{p})$, $E_p = -pE_0\cos\alpha$ et $\Gamma = -pE_0\sin\alpha = -\dfrac{\mathrm{d}E_p}{\mathrm{d}\alpha}$:

- $\alpha = 0$: E_p minimale, équilibre **stable** ($\vec{p}$ aligné sur $\vec{E}_0$) ;
- $\alpha = \pi$: E_p maximale, équilibre **instable**.



Champ non uniforme : une force R

À orientation fixée de $\vec{p}$ (dipôle rigide) :

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\mathrm{grad}}\,E_p = \overrightarrow{\mathrm{grad}}\left(\vec{p}\cdot\vec{E}\right) \qquad \vec{\Gamma} = \vec{p}\wedge\vec{E} \text{ (au centre du dipôle)}$$

(forme équivalente : $\vec{F} = (\vec{p}\cdot\overrightarrow{\mathrm{grad}})\,\vec{E}$). Un dipôle aligné sur le champ ($E_p = -pE$) est attiré vers les **zones de champ intense** : bâton électrisé attirant des bouts de papier (dipôles induits), filet d'eau dévié par une règle chargée.

V Lien avec la chimie : interactions moléculaires

Définition — Charges partielles, caractère ionique R

Liaison A–B de longueur d, B plus électronégatif : charges $+\delta e$ sur A, $-\delta e$ sur B ($0 \leq \delta \leq 1$), moment de liaison $p = \delta\, e\, d$, **pourcentage d'ionicité** $100\,\delta$. Le moment d'une molécule est la **somme vectorielle** des moments de liaison : la géométrie décide de la polarité (CO_2 linéaire apolaire, H_2O coudée polaire).

★ À retenir

Interaction	Loi en r	Énergie typique	Exemple
ion–ion	$1/r$	100 à $1000\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$	cristal ionique
ion–dipôle	$1/r^2$	10 à $100\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$	solvatation des ions
liaison hydrogène	—	10 à $40\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$	eau, ADN
Van der Waals	$1/r^6$	$0{,}1$ à $10\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$	cohésion des liquides moléculaires

Repère : agitation thermique $RT \approx 2{,}5\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$ à $300\,\mathrm{K}$.

- **Ion–dipôle** : la molécule polaire s'oriente (δ^- vers un cation) puis est attirée vers l'ion ; énergie en $1/r^2$. C'est la **solvatation**, qui permet la dissolution des cristaux ioniques dans l'eau.
- **Dipôle–dipôle** (Keesom) : énergie en $1/r^3$ à orientation fixée, en $1/r^6$ après moyenne sur l'agitation thermique.
- **Dipôles induits** : $\vec{p} = \alpha\,\varepsilon_0 \vec{E}$ (polarisabilité α, homogène à un volume, $\sim 4\pi R^3$) ; interactions de Debye et de London en $1/r^6$. Keesom, Debye et London forment les interactions de **Van der Waals**.

Ordres de grandeur

Molécule d'eau ($p = 6{,}2 \times 10^{-30}\,\mathrm{C\cdot m}$) dans $E_0 = 10^6\,\mathrm{V\cdot m^{-1}}$: $pE_0 \approx 6 \times 10^{-24}\,\mathrm{J}$, très inférieur à $k_B T \approx 4 \times 10^{-21}\,\mathrm{J}$ à $300\,\mathrm{K}$; oscillations libres ($J \approx 1{,}9 \times 10^{-47}\,\mathrm{kg\cdot m^2}$) : $T = 2\pi\sqrt{J/(pE_0)} \approx 11\,\mathrm{ps}$.

VI Méthodes et pièges

☞ Méthode — Étudier un dipôle dans un champ extérieur M

1. Exprimer $E_p = -\vec{p}\cdot\vec{E}$ en fonction de l'angle α (et de la position si $\vec{E}$ n'est pas uniforme).
2. Équilibres : $\dfrac{\partial E_p}{\partial \alpha} = 0$; stabilité par le signe de $\dfrac{\partial^2 E_p}{\partial \alpha^2}$.
3. Mouvement de rotation (axe fixe, moment d'inertie J) : $J\ddot{\alpha} = -pE_0 \sin\alpha$, analogue au pendule pesant ; petites oscillations $\omega_0 = \sqrt{pE_0/J}$.
4. Force : $\vec{F} = \overrightarrow{\mathrm{grad}}(\vec{p}\cdot\vec{E})$, en dérivant le **champ** à $\vec{p}$ fixé (ex. : dipôle aligné près d'un fil, $E_p = -\frac{p\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$, force attractive en $1/r^2$).

✗ Attention, erreurs fréquentes

- $\vec{p}$ est orienté de $-q$ vers $+q$ (et non l'inverse, contrairement à la convention de certains chimistes).
- L'approximation dipolaire n'est valable qu'à grande distance ($r \gg a$) : pas de calcul de champ entre

les charges avec ces formules.

- Dans un champ uniforme, le dipôle **tourne** mais n'est pas entraîné : $\vec{F} = \vec{0}$. C'est la non-uniformité qui crée la force.
- Ne pas oublier le 3 et le signe dans $\vec{E} = \frac{3(\vec{p}\cdot\vec{u}_r)\vec{u}_r - \vec{p}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$; contrôle : sur l'axe $E = \frac{2p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$.

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ Je sais définir et calculer le moment dipolaire d'une distribution neutre, et justifier qu'il ne dépend pas de l'origine.
- ☐ Je sais mener l'analyse des symétries du doublet et établir V par un développement limité.
- ☐ Je sais déduire E_r et E_θ du potentiel et donner la forme intrinsèque de $\vec{E}$.
- ☐ Je sais tracer l'allure des lignes de champ et des équipotentielles d'un dipôle.
- ☐ Je sais établir $E_p = -\vec{p}\cdot\vec{E}$ et $\vec{\Gamma} = \vec{p}\wedge\vec{E}_0$, et discuter la stabilité des équilibres.
- ☐ Je sais prévoir le sens de la force sur un dipôle dans un champ non uniforme.
- ☐ Je sais relier moment dipolaire, géométrie et polarité des molécules, et expliquer la solvatation.