Le dipôle électrostatique : définition

- **<u>Un dipôle est un système de charge globalement neutre, mais dont le « barycentre » des charges négatives (point N) est séparé du barycentre des charges positives (point P).</u>**

- On définit le moment dipolaire p d'un système de charge q_k placées aux points A_k comme

$$\vec{p} = \sum_k q_k \overrightarrow{OA_k}.$$

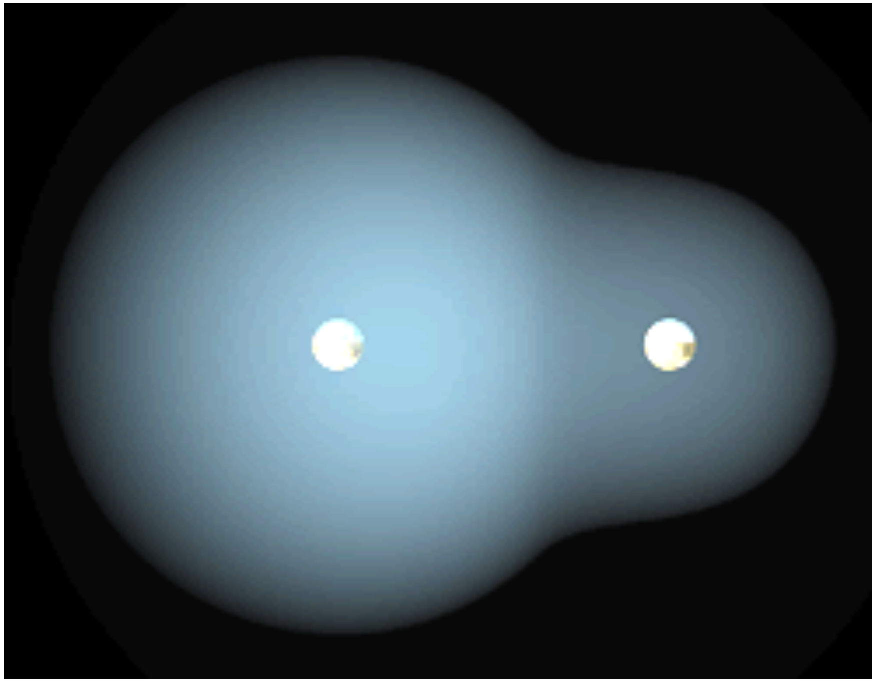
- En nommant Q la somme des charges positives du système, on montre facilement que

$$\vec{p} = Q\overrightarrow{NP},$$

- L'unité SI du moment dipolaire est le C.m, mais on utilise souvent le Debye (D), qui est plus adapté aux grandeurs généralement retrouvées dans la pratique

$$1\ \mathrm{D} = 3,3 \times 10^{-30}\ \mathrm{C.m.}$$

Nuage électronique dans une molécule diatomique hétéronucléaire



$$\vec{p} = \int \rho(P)\vec{OP}d\tau$$

Le vecteur moment dipolaire de cette molécule est dirigé :

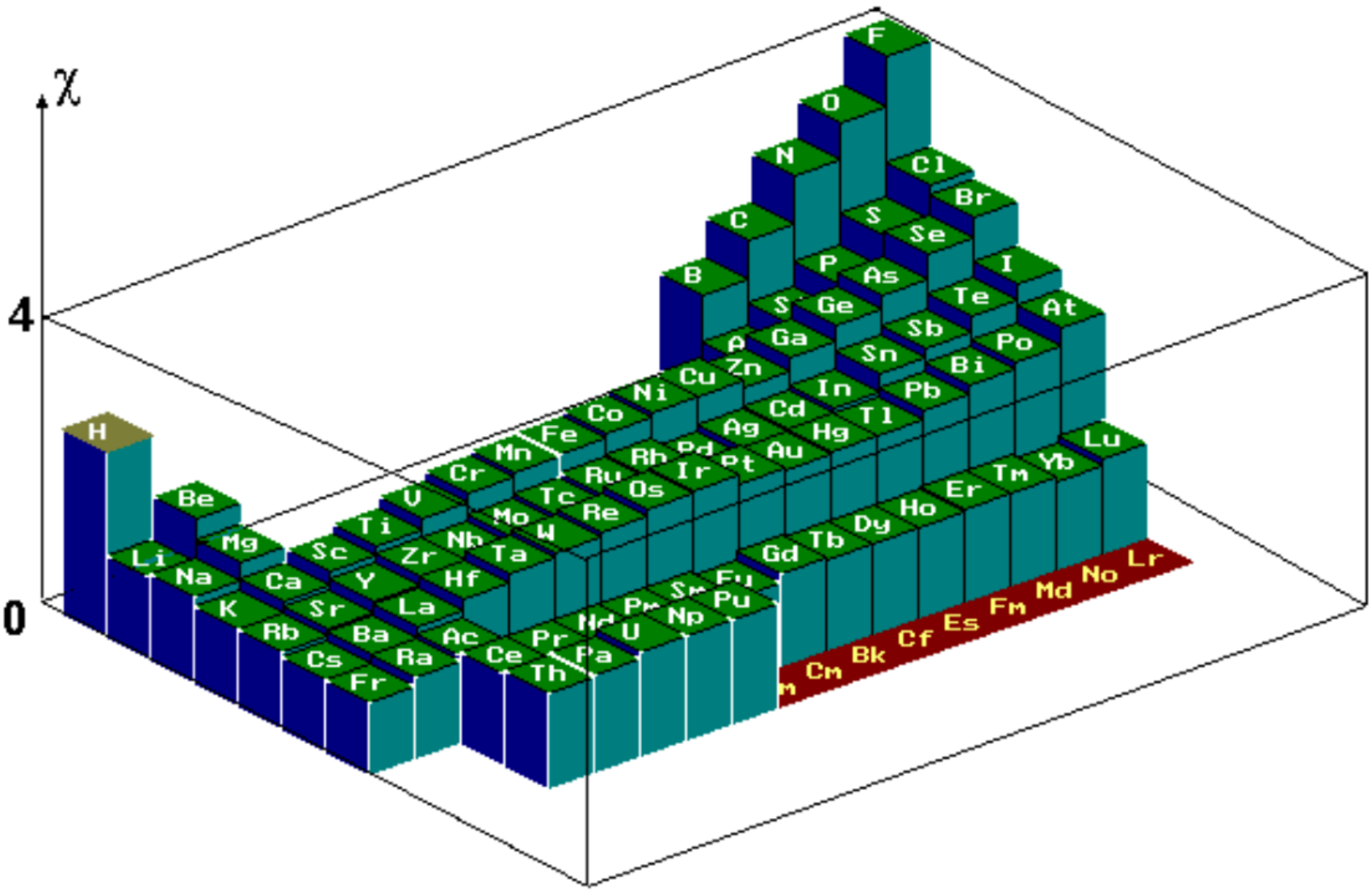
A : De la gauche vers la droite

B : De la droite vers la gauche

C : Il est nul

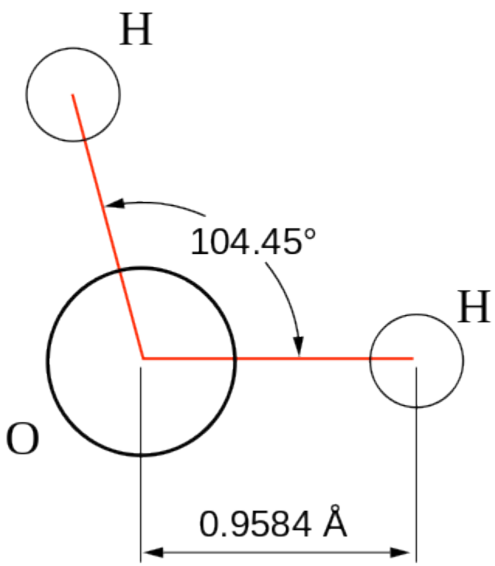
D : Il manque des informations pour conclure

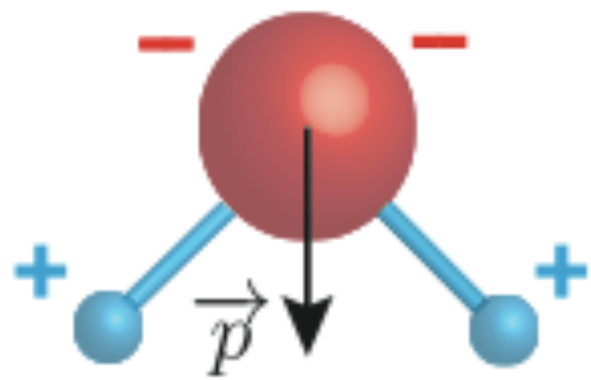
Electronégativité dans le tableau de Mendeleïev



La molécule d'eau

- **<u>La molécule d'eau est un exemple de molécule portant un dipôle électrique permanent (et particulièrement fort)</u>**

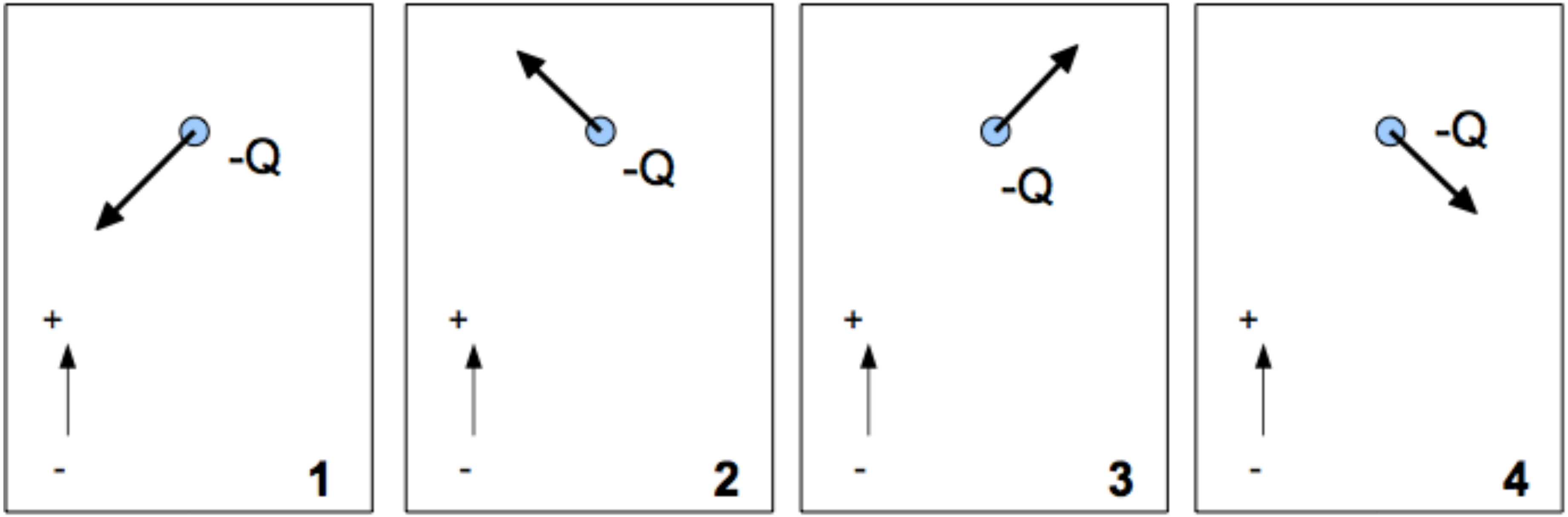




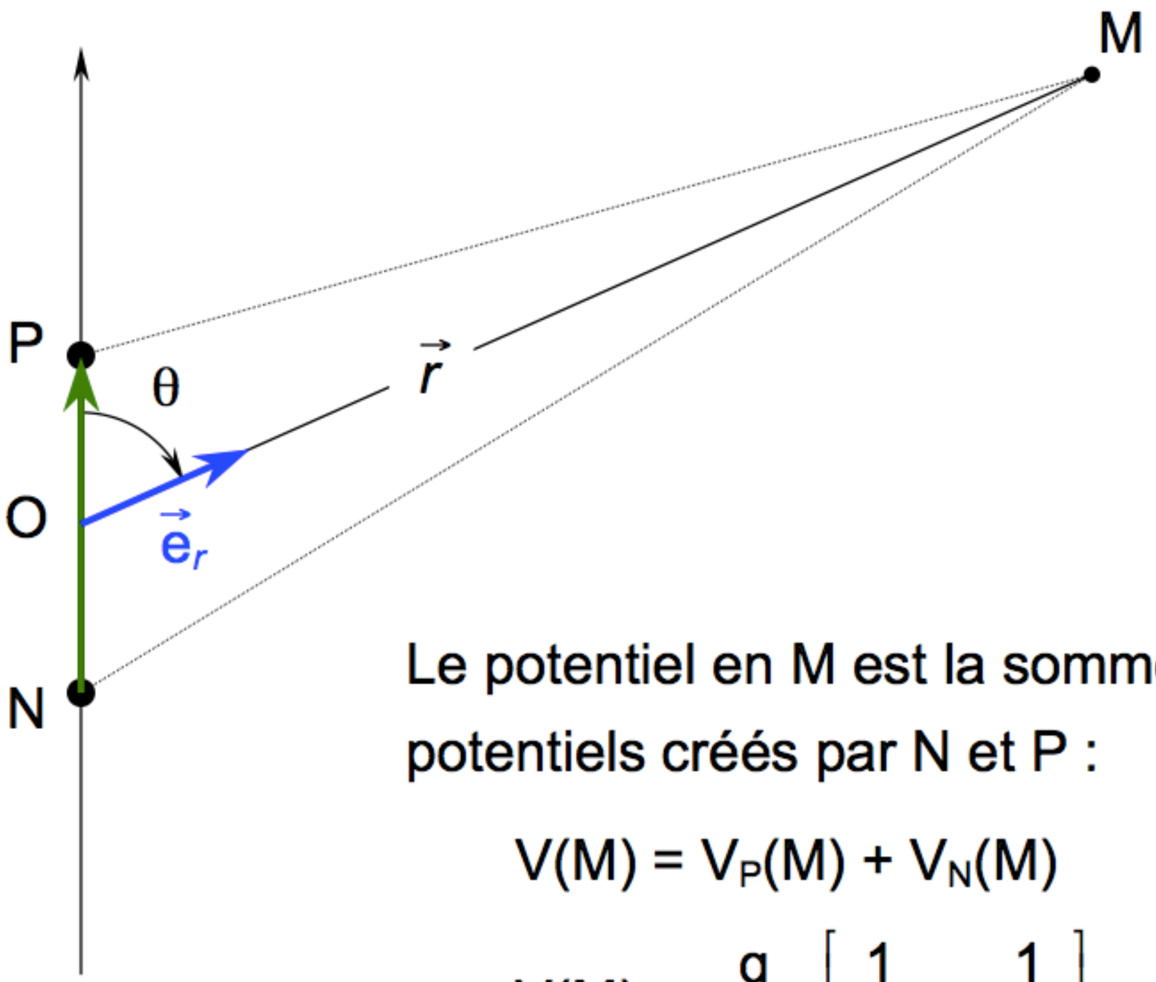
Molécule	H_2O	NH_3	$HC\ell$	CO
p (D)	1,86	1,5	1,03	0,12

Le champ du dipôle électrostatique

Un dipôle est fixe dans l'espace. Une charge négative -Q est placée comme indiquée sur la figure. Quelle est la bonne représentation de la force subie par la charge -Q ?



Le dipôle électrostatique : champ lointain



Le potentiel en M est la somme des potentiels créés par N et P :

$$V(M) = V_P(M) + V_N(M)$$

$$V(M) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{PM} - \frac{1}{NM}\right]$$

Le dipôle électrostatique : champ lointain

- **On s'intéresse au champ « loin » du dipôle, c'est à dire à des distances grandes devant NP = a.**

$$PM = \sqrt{r^2 - ar\cos\theta + a^2/4} \simeq r\sqrt{1 - \frac{a}{r}\cos\theta}$$

- **On obtient :** $\frac{1}{PM} \simeq \frac{1}{r}(1 + \frac{a\cos\theta}{2r})$

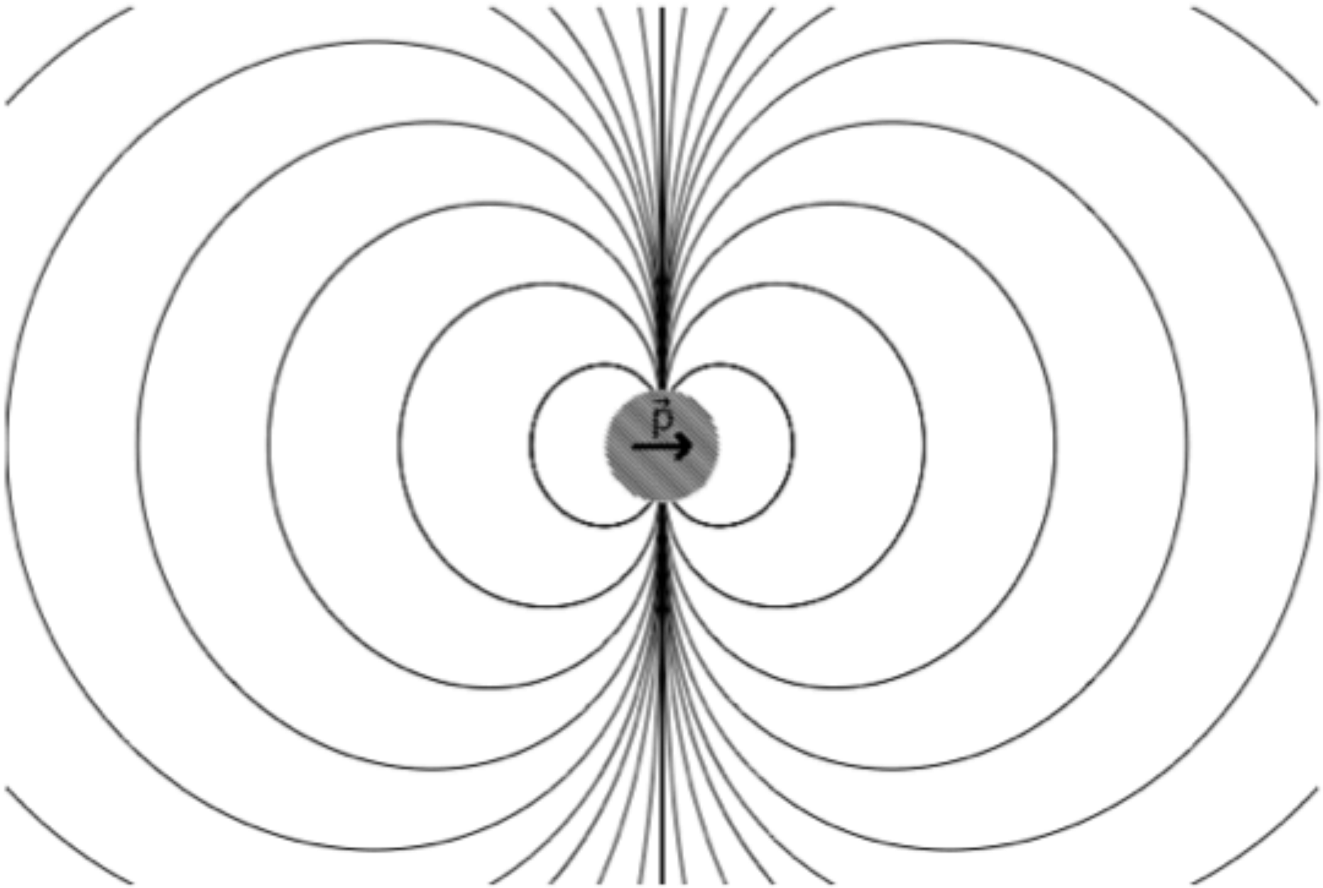
- **De même :** $\frac{1}{NM} \simeq \frac{1}{r}(1 - \frac{a\cos\theta}{2r})$

- **On en déduit le champ du dipôle dans l'approximation de champ lointain :**

$$V(M) = \frac{qa\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

- **Ou encore :** $V(M) = \frac{\vec{p}\cdot\vec{e_r}}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{\vec{p}\cdot\vec{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$

Le dipôle électrostatique : équipotentielles



$$r^2 = C \cos\theta$$

Le dipôle électrostatique : champ électrique

- **<u>Le champ électrique dérive du potentiel, on n'a qu'à calculer le gradient. En coordonnées cylindriques, il s'exprime</u>**

$$E_r(r,\theta) = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{q\,a\cos\theta}{2\pi\varepsilon_0\, r^3}$$

$$E_\theta(r,\theta) = -\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{q\,a\sin\theta}{4\pi\varepsilon_0\, r^3}$$

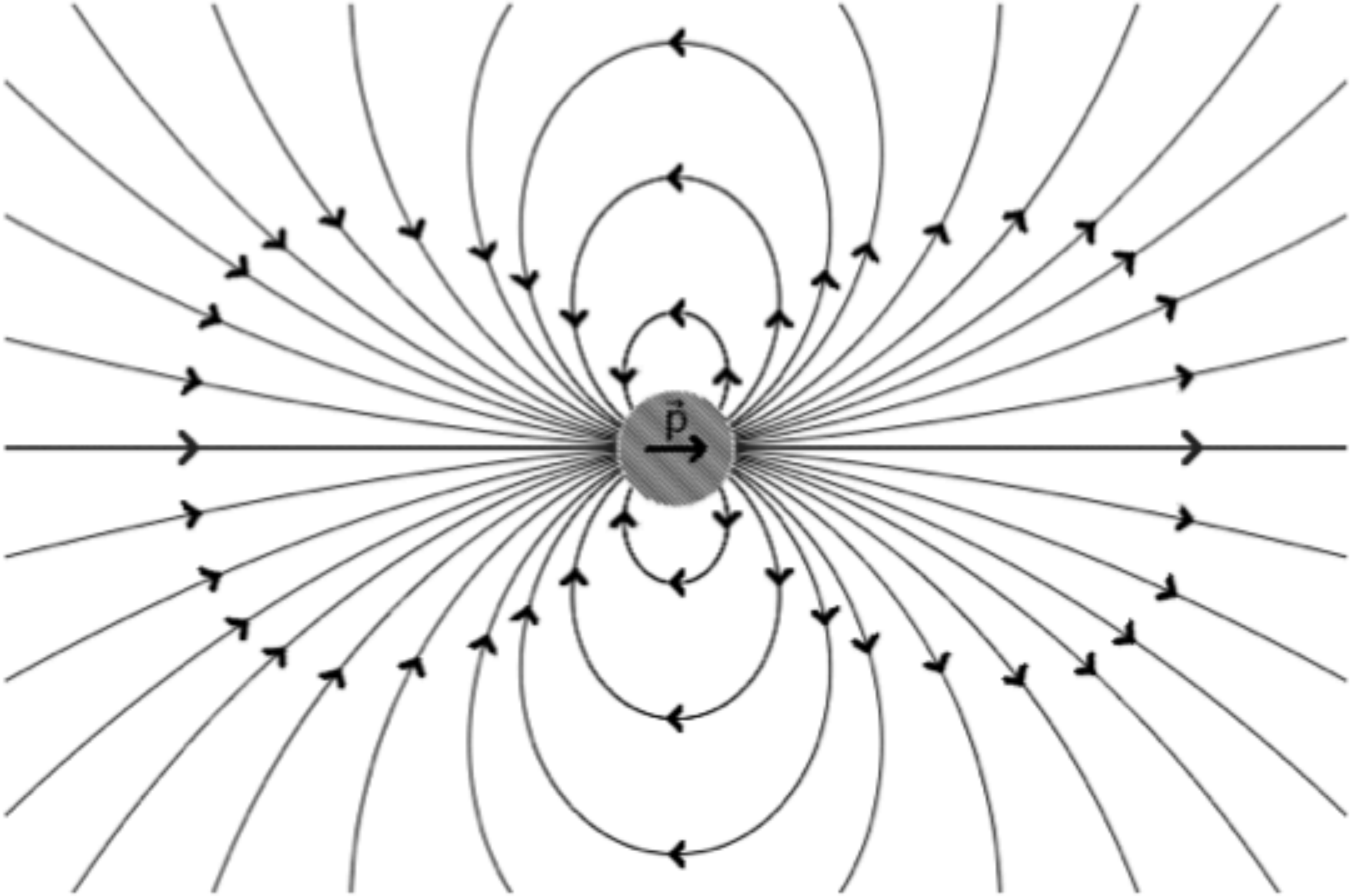
- **<u>Ou encore</u>**

$$\vec{E}(r,\theta) = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0\, r^3}\left[\,2\cos\theta\,\vec{e}_r + \sin\theta\,\vec{e}_\theta\,\right]$$

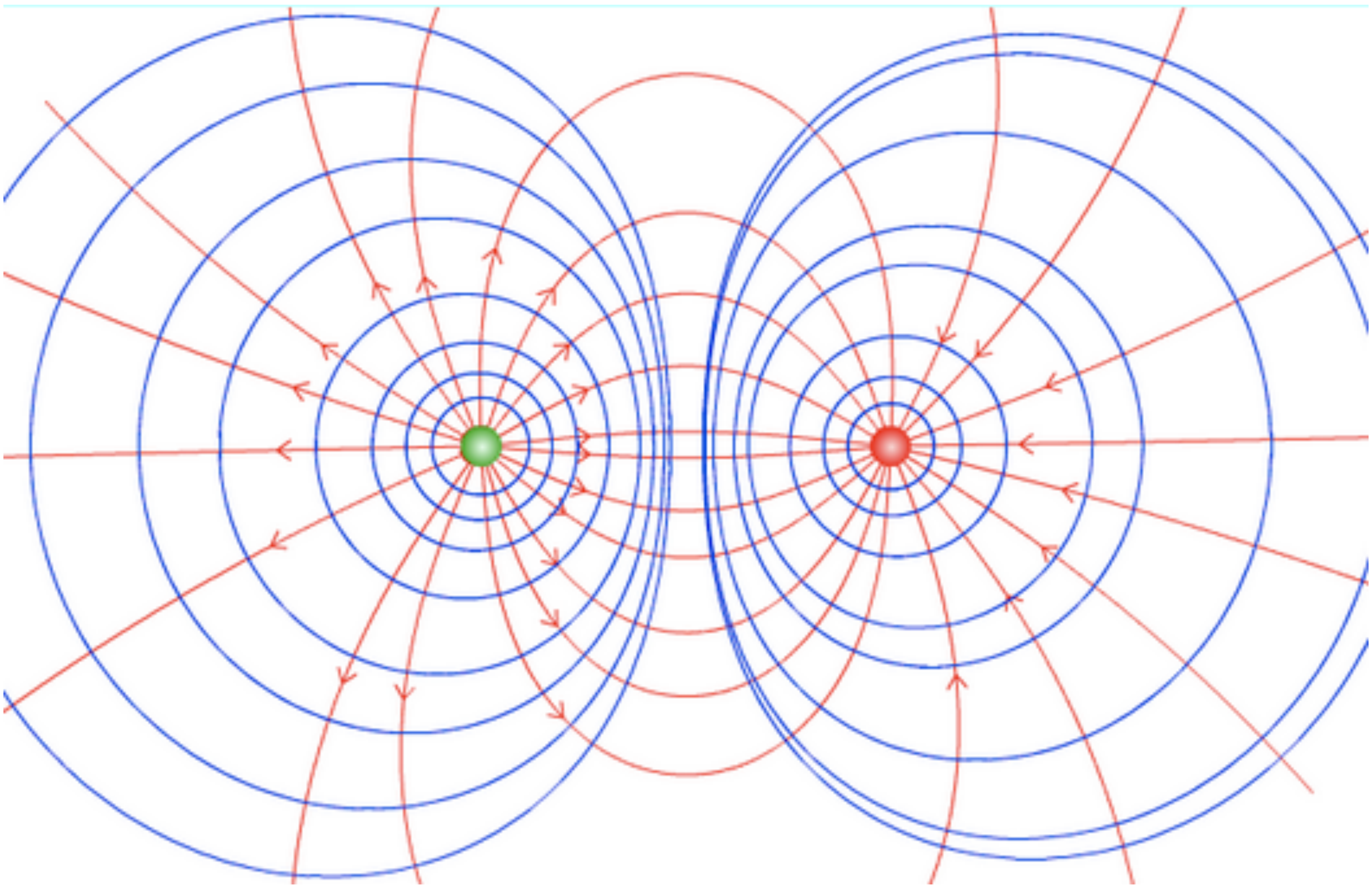
- **<u>Ou encore</u>**

$$\vec{E}(r,\theta) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\, r^3}\left[\,3\,(\vec{p}\cdot\vec{e}_r)\,\vec{e}_r - \vec{p}\,\right]$$

Le dipôle électrostatique : lignes de champ

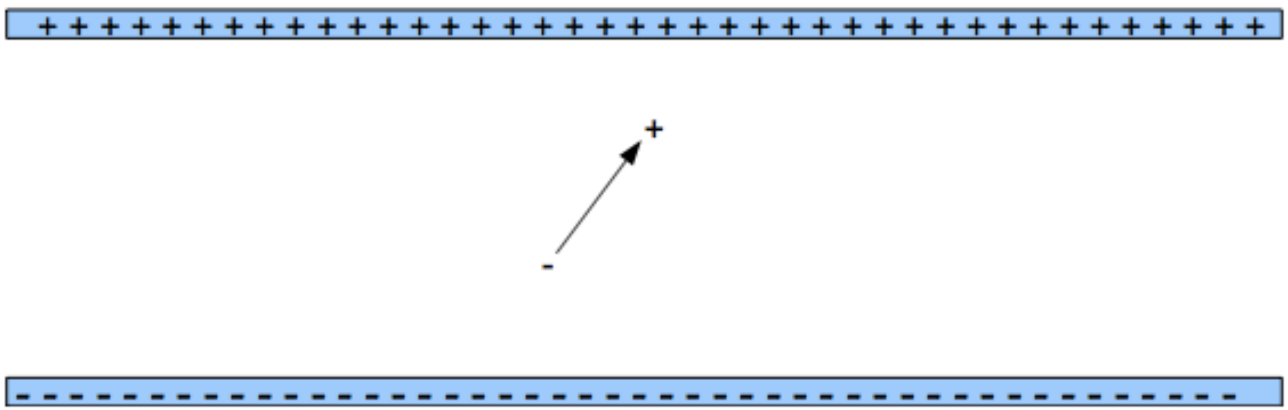


Equipotentielles + lignes de champ



Action sur un dipôle électrostatique

Un dipôle, libre de se déplacer dans l'espace, est placé entre les armature d'un condensateur, comme indiqué sur la figure. Que se passe-t-il ?



A. Rien
B. Le dipôle pivote mais ne se translate pas
C. Le dipôle pivote et se rapproche des charges (+)
D. Le dipôle pivote et s'éloigne des charges (+)
E. Il manque des informations pour répondre à cette question

Energie potentielle d'un dipôle rigide

- On veut calculer l'énergie potentiel d'un dipôle « rigide » (c'est à dire que la distance PN *est constante, elle ne varie pas avec l'application d'un champ extérieur*) plongé dans un champ électrique extérieur.

$$\mathrm{E}_p = q(\mathrm{V(P)} - \mathrm{V(N)})$$

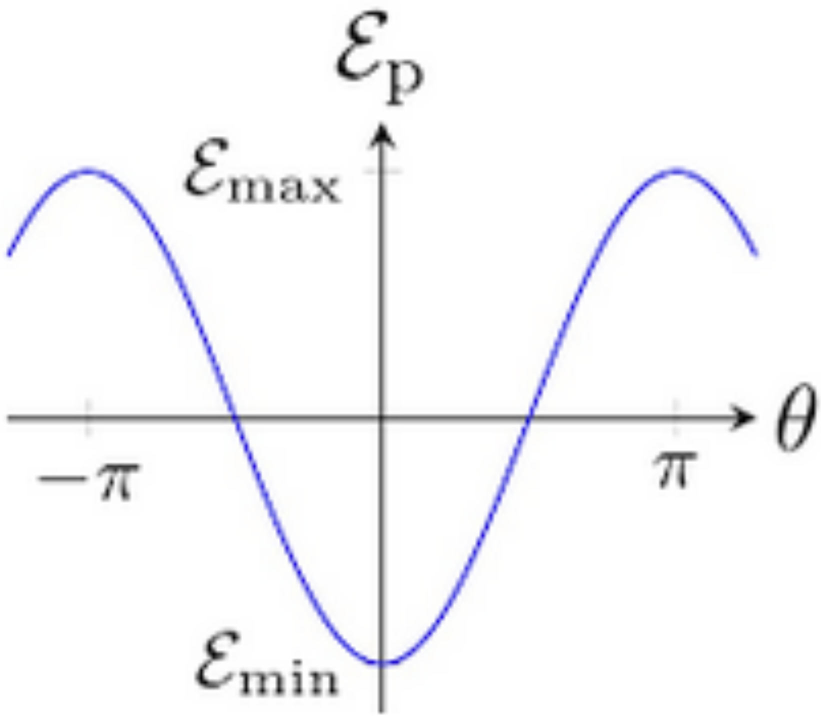
- Dans l'approximation du dipôle « infinitésimal », c'est-à-dire en considérant que la distance PN est très petite devant l'échelle de variation du potentiel extérieur V, on a

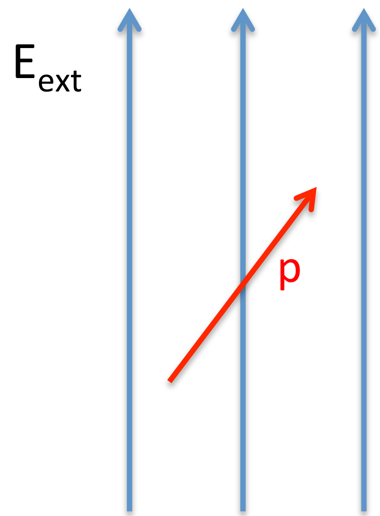
$$\mathrm{V(P)} - \mathrm{V(N)} \simeq \mathrm{dV} \simeq \overrightarrow{\mathrm{grad}}\ \mathrm{V} \cdot \overrightarrow{\mathrm{NP}} = -\overrightarrow{\mathrm{E}} \cdot \overrightarrow{\mathrm{NP}}$$

- Et donc l'expression de l'**<u>énergie potentielle du dipôle</u>**

$$\boxed{\mathrm{E}_p = -\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{\mathrm{E}}}$$

Energie potentielle d'un dipôle rigide



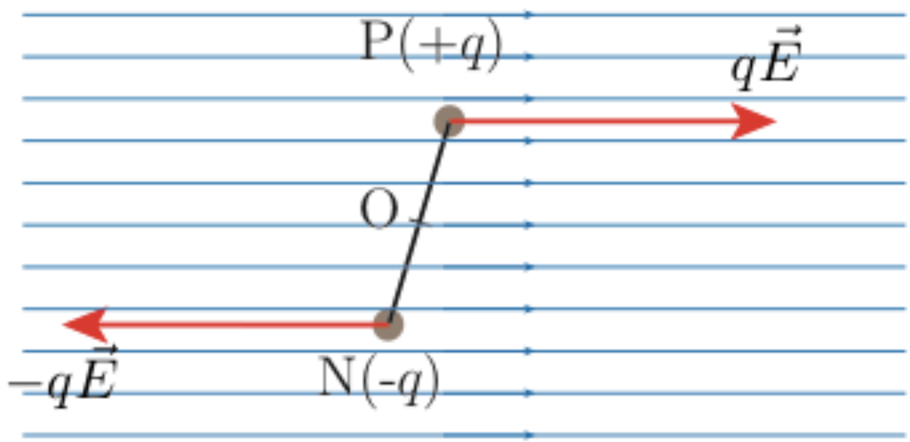


$$\boxed{E_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}}$$

Position(s) d'équilibre du dipôle dans le champ électrique extérieur ?

Mouvement du dipôle dans un champ uniforme

- En présence d'un champ E, le dipôle va tendre à minimiser son énergie potentielle, donc à s'aligner avec le champ. Cependant, dans un champ uniforme, la somme des forces appliquées au dipôle vaut zéro…



- Un **couple** apparaît, qui vaut

$$\boxed{\vec{\Gamma}_0 = \vec{p} \wedge \vec{E}}$$

Dipôle dans un champ non-uniforme

- En présence d'un **champ statique non-uniforme**, une force nette apparaît sur le dipôle rigide. En effet le gradient de Ep n'est dans ce cas pas nul :

$$\vec{F} = -\vec{\mathrm{grad}}\ E_p = \vec{\mathrm{grad}}(\vec{p} \cdot \vec{E})$$

- Le gradient d'un produit scalaire est donné par

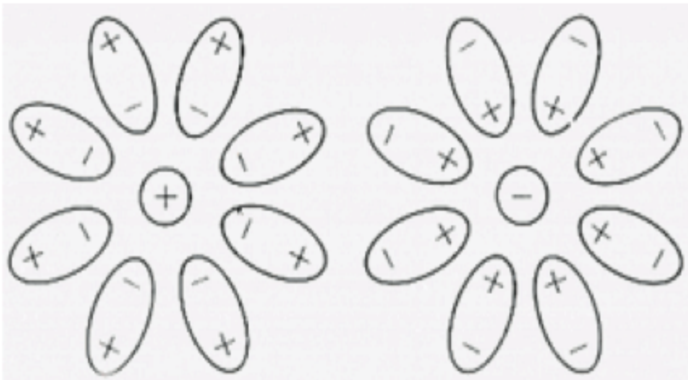
$$\overrightarrow{\mathrm{grad}}(\overrightarrow{A} \cdot \overrightarrow{B}) = (\overrightarrow{A} \cdot \overrightarrow{\mathrm{grad}})\overrightarrow{B} + \overrightarrow{A} \wedge \overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \overrightarrow{B} + (\overrightarrow{B} \cdot \overrightarrow{\mathrm{grad}})\overrightarrow{A} + \overrightarrow{B} \wedge \overrightarrow{\mathrm{rot}}\ \overrightarrow{A}$$

- Puisque le rotationnel de E est nul, et que p est constant, on obtient directement

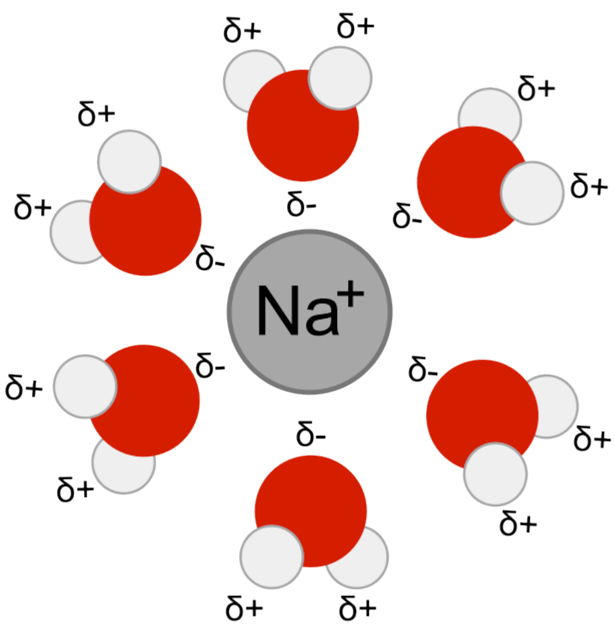
$$\overrightarrow{\mathrm{F}} = (\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{\mathrm{grad}})\overrightarrow{\mathrm{E}}$$

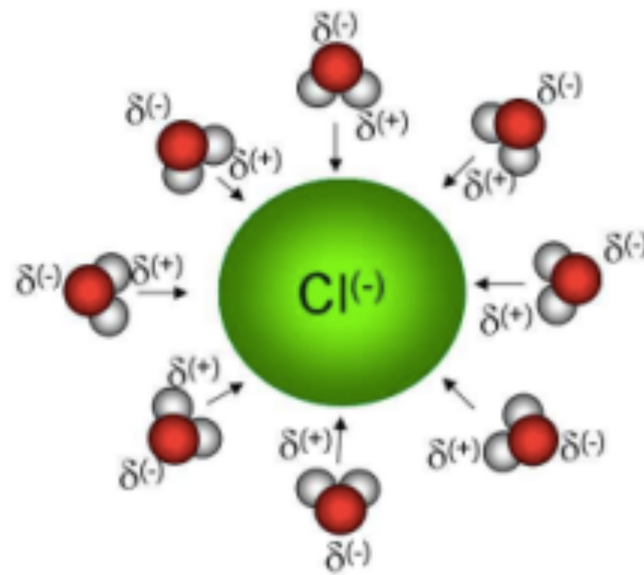
- Un dipôle subit donc une **force dirigée vers les champs forts** s'il est aligné avec E (ce qui est probable), ou dirigée vers les champs faibles s'il est anti-aligné avec E (ce qui est peu probable).

Hydratation d’un ion en solution



- Les molécules d’eau (polaires) sont alignées sur l’ion. Ils forment un « bouclier » autour de l’ion solvaté.





Dipole électrostatique

Un dipôle est disposé dans un champ électrique extérieur tel que représenté ci-dessous par ses lignes de champ. Dans quelle(s) situation(s) le couple agissant sur le dipôle est-il non nul ?

1 (1) seulement.

2 (2) seulement.

3 (3) seulement.

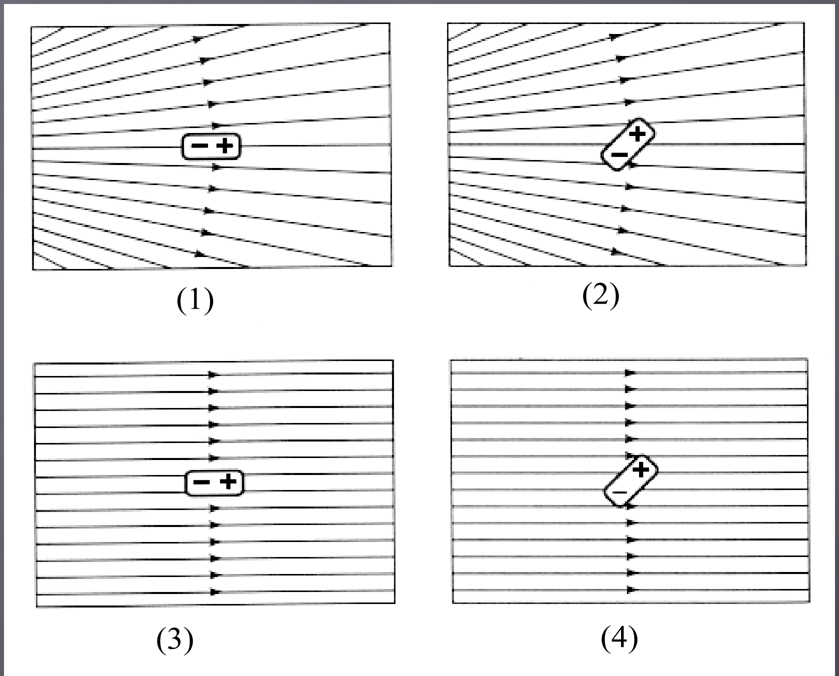
4 (4) seulement.

5 (1) et (2).

6 (1) et (3).

7 (3) et (4).

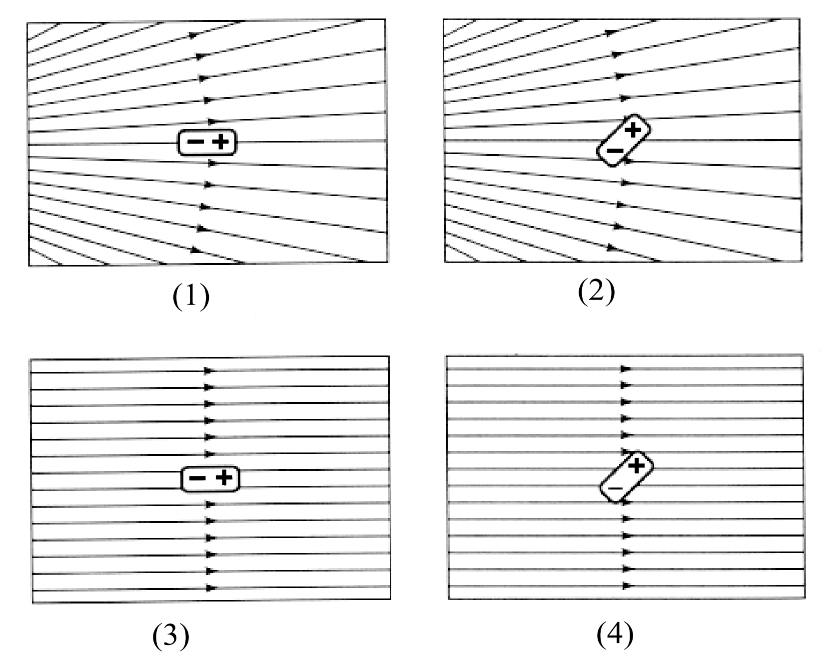
8 (2) et (4).



Dipole électrostatique

Un dipôle est disposé dans un champ électrique extérieur tel que représenté ci-dessous par ses lignes de champ. Dans quelle(s) situation(s) la résultante des forces sur le dipôle est-elle non nulle ?

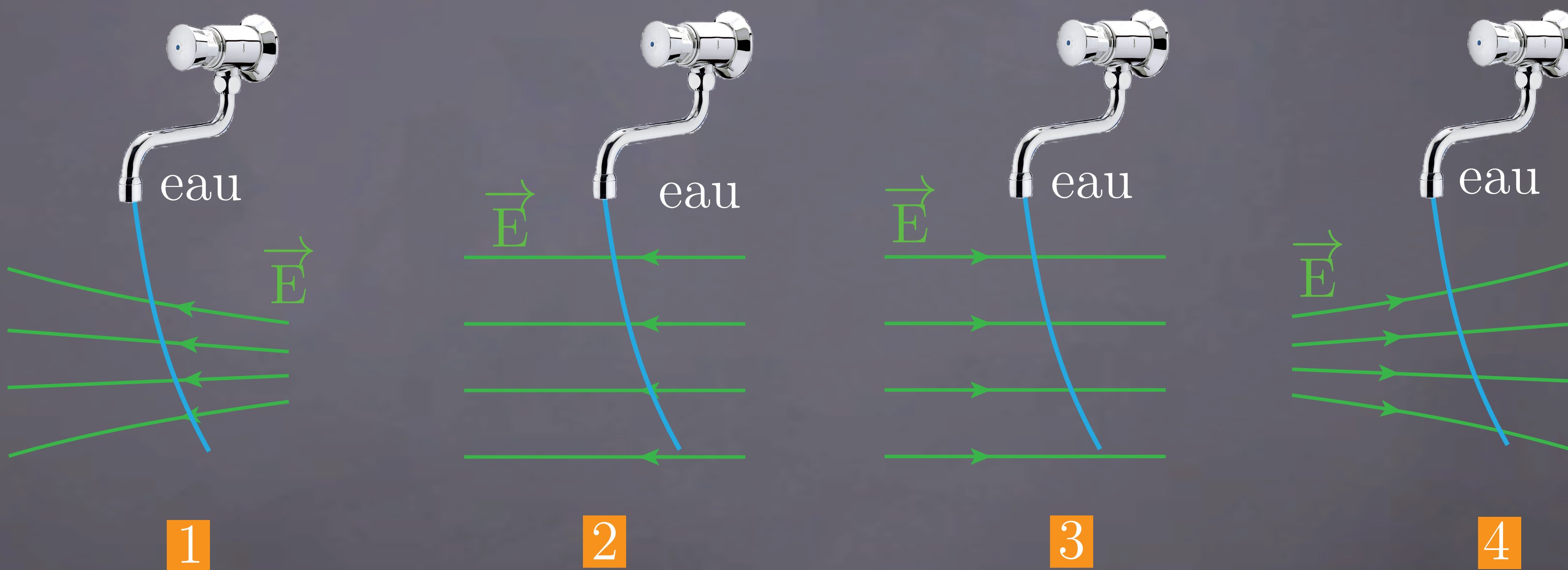
1. (1) seulement.
2. (2) seulement.
3. (3) seulement.
4. (4) seulement.
5. (1) et (2).
6. (1) et (3).
7. (3) et (4).
8. (2) et (4).



UPMC SORBONNE UNIVERSITÉS

Dipole électrostatique

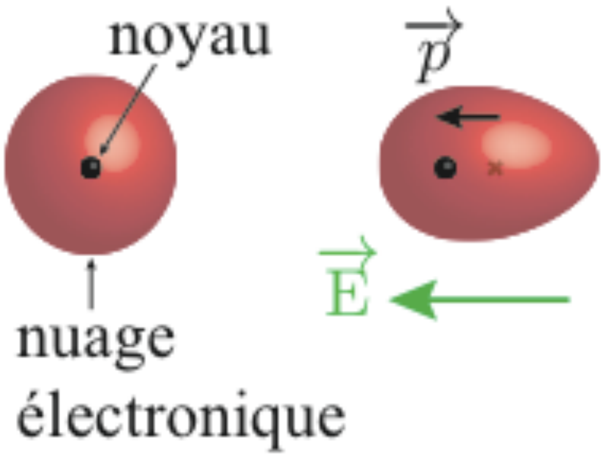
Dans l'expérience du filet d'eau, choisir la bonne représentation.



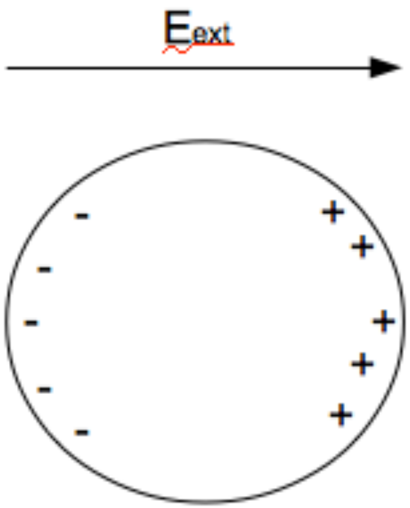
UPMC SORBONNE UNIVERSITÉS

Dipôle Induit

<u>Atome</u>



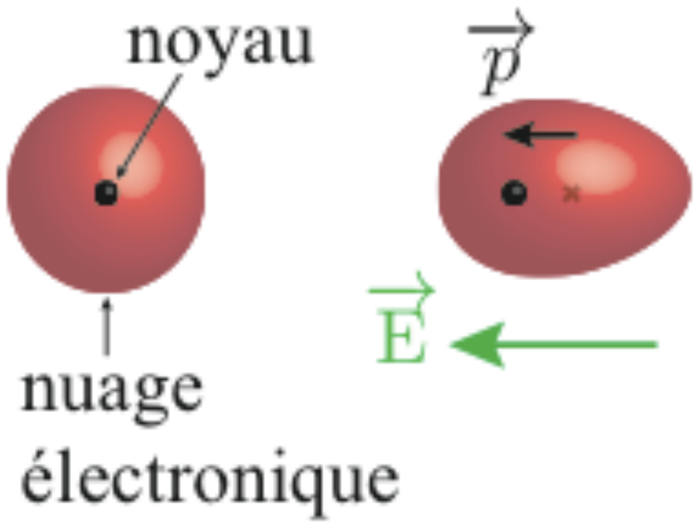
<u>Sphère conductrice</u>



- On définit **la polarisabilité α** comme $\vec{p} = \alpha \vec{E}$

- (il y a là une *<u>approximation linéaire)</u>*

Polarisabilité typique d'un atome



- Modèle d'atome = noyau chargé +Ze et nuage sphérique uniformément chargé en volume de charge -Ze

- On place l'origine du repère au centre du nuage, x est la position du noyau.

- Force de rappel du nuage : $\vec{F}_{int} = -\dfrac{Z^2e^2x}{4\pi\varepsilon_0 R^3}\vec{e}_x$

- Etat d'équilibre dans le champ extérieur : $\vec{F}_{int} = -Ze\vec{E}_{ext}$

- On en déduit $\vec{p} = Zex\vec{e}_x = 4\pi\varepsilon_0 R^3 \vec{E}_{ext}$ et donc $\alpha = 4\pi\varepsilon_0 R^3$

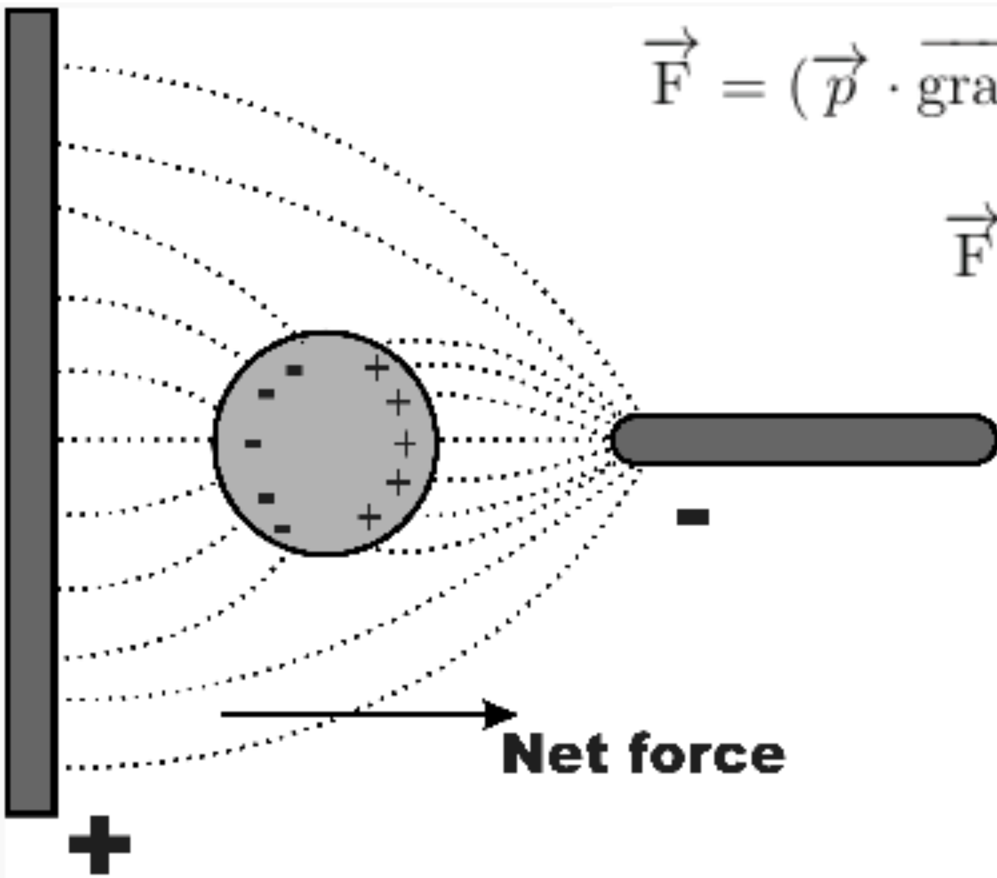
- **Plus un atome est « grand » plus il est polarisable** (cf. *atomes de Rydberg*)

Force diélectrophorétique

- Si l'on place un objet polarisable dans un champ électrique non-homogène (i.e. variable dans l'espace), cet objet va subir une force

$$\overrightarrow{\mathrm{F}} = (\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{\mathrm{grad}}\,)\,\overrightarrow{\mathrm{E}} \qquad \text{où} \qquad \overrightarrow{p} = \varepsilon_0 \alpha \overrightarrow{\mathrm{E}}$$

$$\overrightarrow{\mathrm{F}} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \alpha\, \overrightarrow{\mathrm{grad}}\; \mathrm{E}^2$$



La force est dirigée dans la direction des champ forts. C'est la force à l'origine de l'attirance de la feuille de papier par le baton d'ébonite chargé

Cette force est aussi exploitée en chimie pour séparer les molécules selon leur polarisabilité

Interaction dipôle-dipôle : Forces de Van der Waals

- Force attractive entre dipôles, permanents ou induits, due à $\overrightarrow{\mathrm{F}} = (\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{\mathrm{grad}})\overrightarrow{\mathrm{E}}$

Les forces de Van der Waals se consistent en 3 composantes, dont les énergies potentielles s'écrivent

- Interaction entre dipôles permanents : ***<u>Forces de Keesom</u>***

$$E_p \simeq -\frac{p_1^2 p_2^2}{3\,(4\pi\varepsilon_0)^2\, k_B T r^6} \quad \text{et donc} \quad F_{\mathrm{Keesom}} = \frac{\lambda(T) \cdot \mu_1^2 \cdot \mu_2^2}{r^7}$$

- Interaction entre un dipôle permanent et un dipôle induit : ***<u>Forces de Debye</u>***

$$E_p \simeq -\frac{\alpha_2 p_1^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2\, r^6} \quad \text{(convention p = αE)} \quad \text{et donc} \quad F \sim 1/r^7$$

- Interaction entre deux dipôles induits : ***<u>Forces de London</u>***

$$E_{London} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{h \cdot \nu \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{(4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)^2 \cdot r^6} \quad \text{et donc} \quad F_{London} = \Lambda \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{r^7}$$

Interaction dipôle-dipôle : Forces de Van der Waals

- Les forces de Van der Waals sont donc des interactions à courte portée. Ce sont des interactions attractives, jouant un rôle important dans la cohésion de la matière (liaison intermoléculaires)

Interaction dipôle-dipôle : Forces de Van der Waals

- Force de Van der Waals responsable des phénomène de tension de surface (liaisons intermoléculaires)