ELECTROSTATIQUE

LE DIPOLE ELECTRIQUE ET SES APPLICATIONS

PLAN

Électrostatique = étude des propriétés des charges électriques en équilibre.

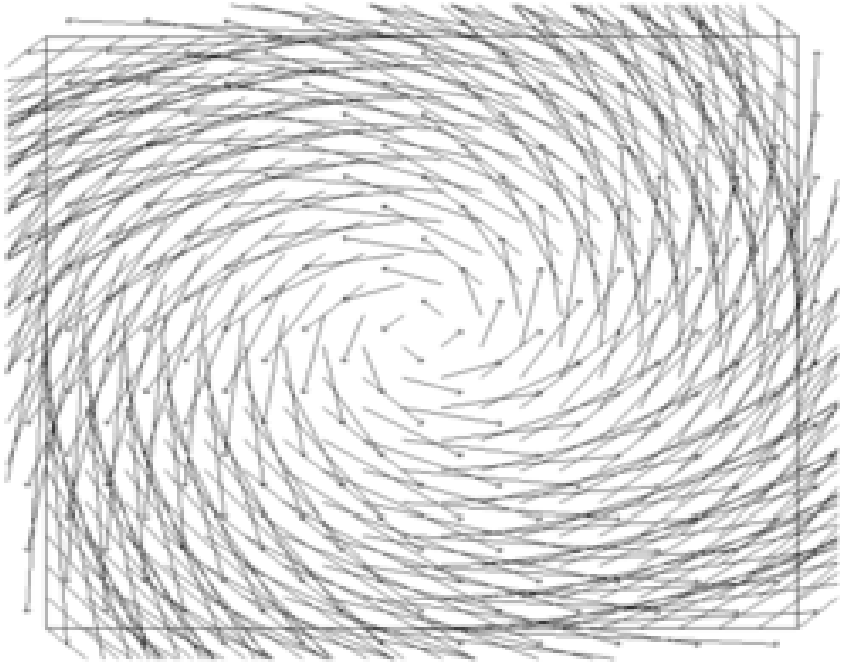
1. Les grandeurs électriques
2. Le dipôle électrique
3. L'ÉlectroCardioGraphie (ECG)
4. Autres applications

1. Les grandeurs électriques

Grandeurs électriques

- Charge électrique
- Champ électrique
- Force électrique
- Potentiel électrique
- Relations entre champ et potentiel électrique
- Énergie potentielle électrique

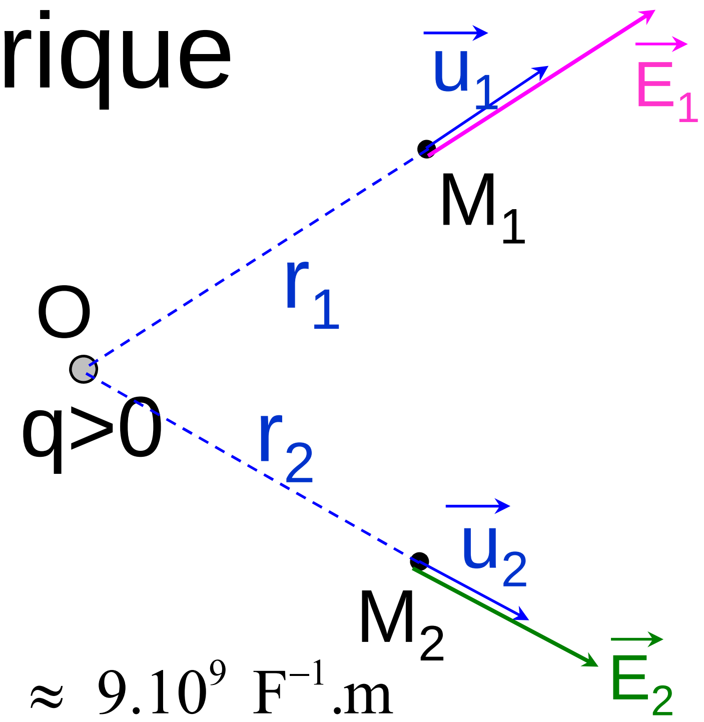
Exemple d'un champ de vecteurs



Charge électrique

- Responsable de la force électrique
- Notée Q ou q
- Unité : coulomb (symbole C)
- Dimension : [Q] = T.I
- Types de charge: + et -
- Quantification de la charge:
  - $e = 1{,}60218.10^{-19}$ C
  - $Q = z.e$ (z entier relatif)
- Propriétés (conservation, répulsion de 2 charges de même signe, attraction de 2 charges de signe opposé)

Champ électrique

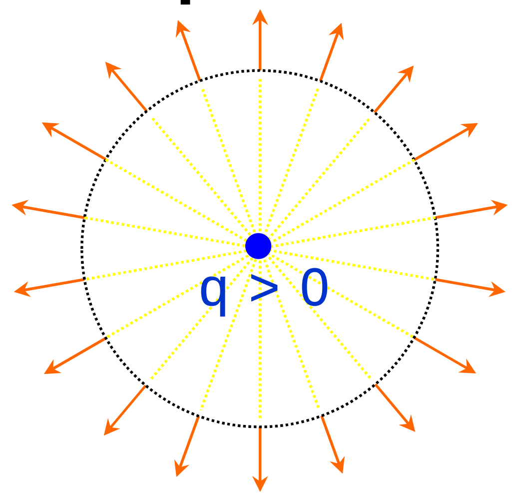


$$\boxed{\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{q}{r^2}\,\vec{u}_{OM}}$$

$$r = \left\|\overrightarrow{OM}\right\| \qquad \vec{u}_{OM} = \frac{\overrightarrow{OM}}{\left\|\overrightarrow{OM}\right\|}$$

- interaction dans le vide : $\dfrac{1}{4\pi\,\varepsilon_0} \approx 9.10^9\ F^{-1}.m$
  - $\varepsilon_0 = 8{,}854188.10^{-12}$ F.m^{-1}
- dans un milieu quelconque : $\varepsilon = \varepsilon_r\varepsilon_0 > \varepsilon_0$
  - ε permittivité absolue u SI : F.m^{-1}
  - $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ permittivité relative (constante diélectrique)
  - air : $\varepsilon_r = 1{,}00058$
- indique direction, sens et norme de la force subie par une charge positive unitaire
- dimension : L.M.T^{-3}.I^{-1} Unité : V.m^{-1}

Propriétés du champ électrique



- Direction : radiale
  (symétrie sphérique)

- Sens : $\vec{E}$ s'éloigne des sources q > 0

  $\vec{E}$ se dirige vers les sources q < 0

- Norme : $$\| \vec{E} \| = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 . r^2}$$

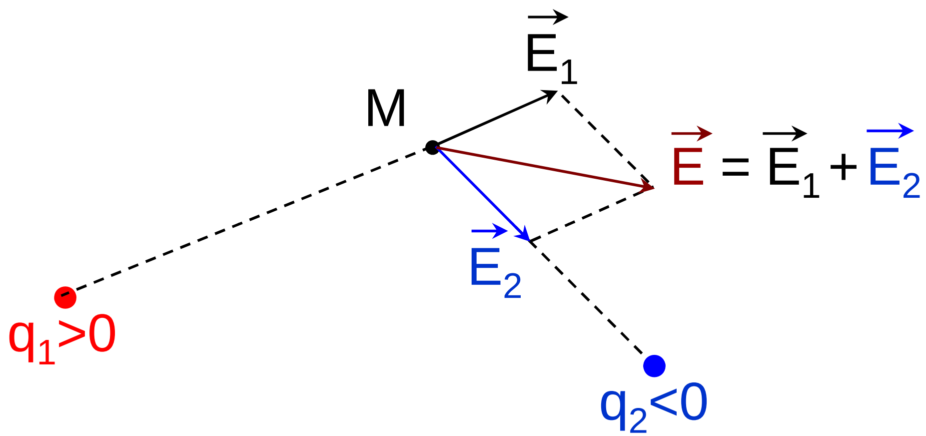
- Non défini au point où se trouve la charge ponctuelle q

Champ électrique créé par une distribution de charges ponctuelles

- Principe de superposition
  $\rightarrow$ n charges q_i créent :

  - $\overrightarrow{E_i} = \dfrac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 . r_i^2}\,\overrightarrow{u_i}$

  - $\overrightarrow{E} = \sum \overrightarrow{E_i}$

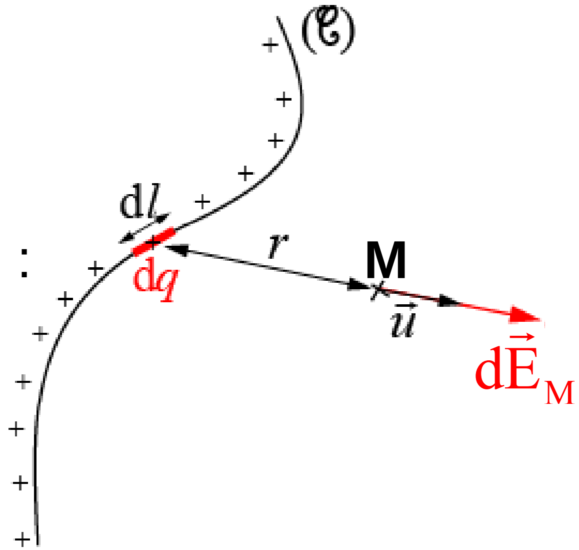


Champ électrostatique créé par une distribution continue de charges (1)

- Distribution linéique de charges
  - densité linéique de charge ($C.m^{-1}$) :

$$\lambda = dq/d\ell$$

  - champ électrostatique élémentaire créé par dq :



$$d\vec{E}_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{u} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda d\ell}{r^2}\vec{u}$$

  - champ électrostatique total obtenu par intégration du champ électrostatique élémentaire le long de la courbe (C) :

$$\boxed{\vec{E}_M = \int_{(C)} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda d\ell}{r^2}\vec{u}}$$

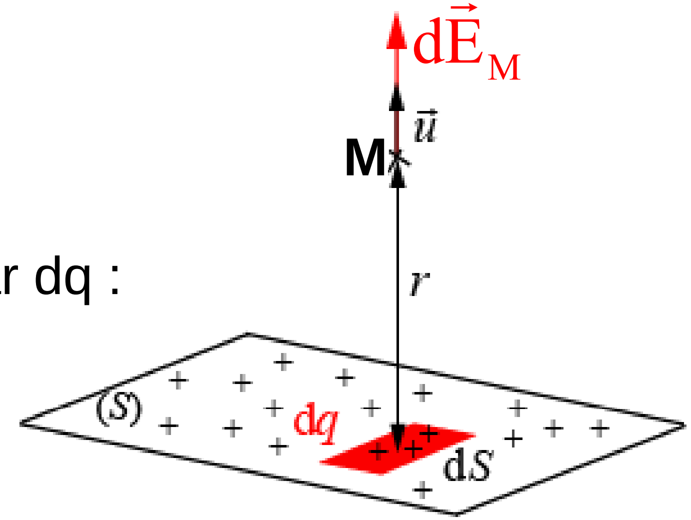
Champ électrostatique créé par une distribution continue de charges (2)

- Distribution surfacique de charges
  - densité surfacique de charge ($C.m^{-2}$) :

$$\sigma = dq/dS$$

  - champ électrostatique élémentaire créé par dq :

$$d\vec{E}_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{u} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma dS}{r^2}\vec{u}$$

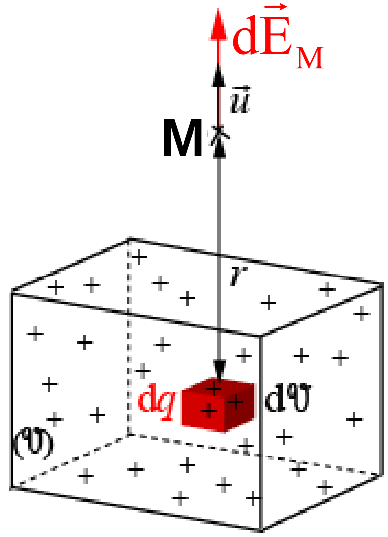


  - champ électrostatique total obtenu par intégration du champ électrostatique élémentaire sur toute la surface (S) :

$$\boxed{\vec{E}_M = \iint_S \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sigma dS}{r^2}\vec{u}}$$

Champ électrostatique créé par une distribution continue de charges (3)

- Distribution volumique de charges
  - densité volumique de charge : $\rho = dq/dV$
  - champ électrostatique élémentaire créé par dq :



$$d\vec{E}_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{u} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho dV}{r^2}\vec{u}$$

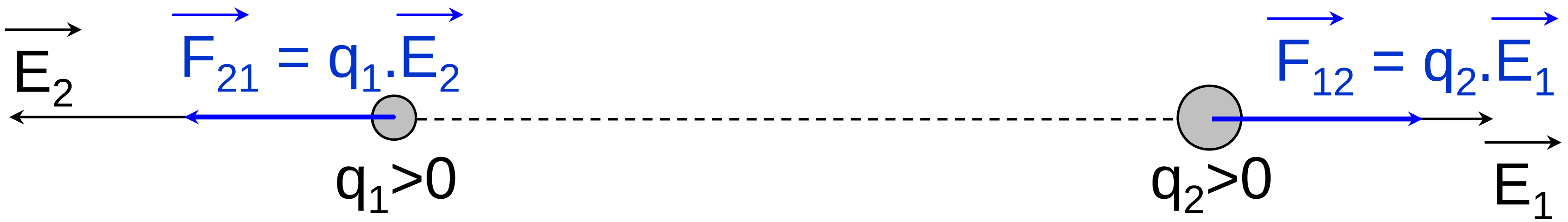
  - champ électrostatique total obtenu par intégration du champ électrostatique élémentaire sur tout le volume (V) :

$$\boxed{\vec{E}_M = \iiint_V \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\rho dV}{r^2}\vec{u}}$$

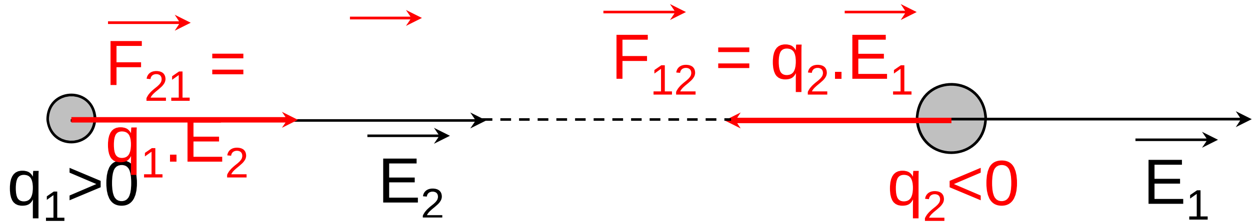
Force électrique

- Charge q' dans champ $\vec{E}$: $$\boxed{\vec{F} = q'.\vec{E}}$$

- Force électrique entre deux charges de même signe :



- Force électrique entre deux charges de signes opposés:



$$\boxed{\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{u}_i}$$

$q_1q_2 < 0 \rightarrow \vec{F}$ attractive

$q_1q_2 > 0 \rightarrow \vec{F}$ répulsive

Additivité des forces électriques

- Soient n charges q_i. En tout point M :
  - $\vec{E} = \sum \vec{E_i}$
- Une charge q' en M subira la force :
  - $\vec{F} = q'.\vec{E}$

    $\vec{F} = q'.\sum \vec{E_i} = \sum q'.\vec{E_i}$

    $\vec{F} = \sum \vec{F_i}$

Potentiel électrostatique (1)

- Expression du potentiel électrostatique V_M créé par une charge ponctuelle q en un point M de l'espace à la distance r :

$$\boxed{V_M = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}}$$

- Défini à une constante près : cste = 0 car $V(\infty) \to 0$
- Grandeur scalaire
- Non défini au point où se trouve la charge ponctuelle q
- Dimension : $\left[V_M\right] = M.L^2.T^{-3}.I^{-1}$
- Unité SI : volt (V)
- Potentiel créé par une distribution de n charges ponctuelles dans le vide :

$$V_M = \sum_{i=1}^{n} V_{M_i} = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i}$$

Potentiel électrostatique (2)

- Potentiel électrique créé par une distribution continue de charges :
  - Distribution linéique de charges $\lambda = dq/d\ell$

$$\boxed{V_M = \int_{(c)} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\lambda d\ell}{r}}$$

  - Distribution surfacique de charges $\sigma = dq/dS$

$$\boxed{V_M = \iint_S \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\sigma dS}{r}}$$

  - Distribution volumique de charges $\rho = dq/dV$

$$\boxed{V_M = \iiint_V \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\rho dV}{r}}$$

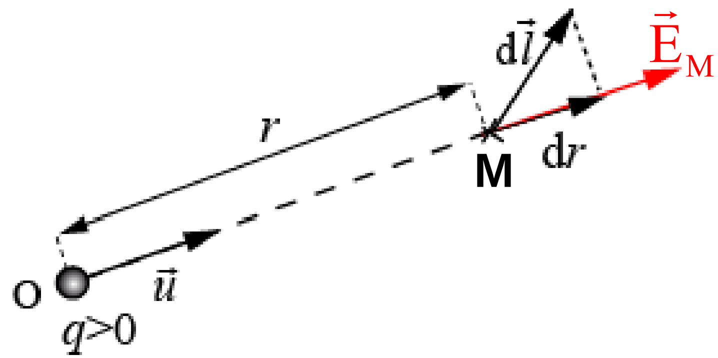
Relation entre potentiel et champ électrostatique

- Calcul du produit scalaire de $\vec{E}_M$ par le déplacement élémentaire $d\vec{\ell}$ du point M :

$$\vec{E}_M.\overrightarrow{d\ell} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{u}.\overrightarrow{d\ell}$$

$$\vec{E}_M.\overrightarrow{d\ell} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\vec{u}.dr.\vec{u}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{E}_M.\overrightarrow{d\ell} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}dr \qquad (1)$$



- Différentielle de V_M par rapport à r (variation du potentiel en fonction de la position) :

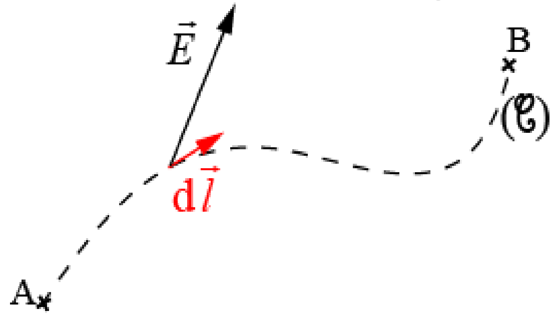
$$dV_M = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\, d\left(\frac{1}{r}\right) \quad \Rightarrow \quad dV_M = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}dr \qquad (2)$$

- En identifiant (1) et (2) :

$$\boxed{dV = -\vec{E}\cdot d\vec{\ell}}$$

Relation entre potentiel et champ électrostatique

- Pour un déplacement du vecteur $\vec{E}$ entre A et B le long d'une courbe (C) :



$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E}.d\vec{\ell}$$

  - Intégrale (= circulation du vecteur le long de la trajectoire) indépendante du chemin suivi pour passer de A à B, mais dépend uniquement de l'état initial A et de l'état final B.

- Le champ électrostatique dérive d'un potentiel scalaire V :

$$\boxed{dV = -\vec{E}.\,d\vec{\ell} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{E} = -\overrightarrow{\mathrm{grad}}V}$$

Relation entre potentiel et champ électrostatique

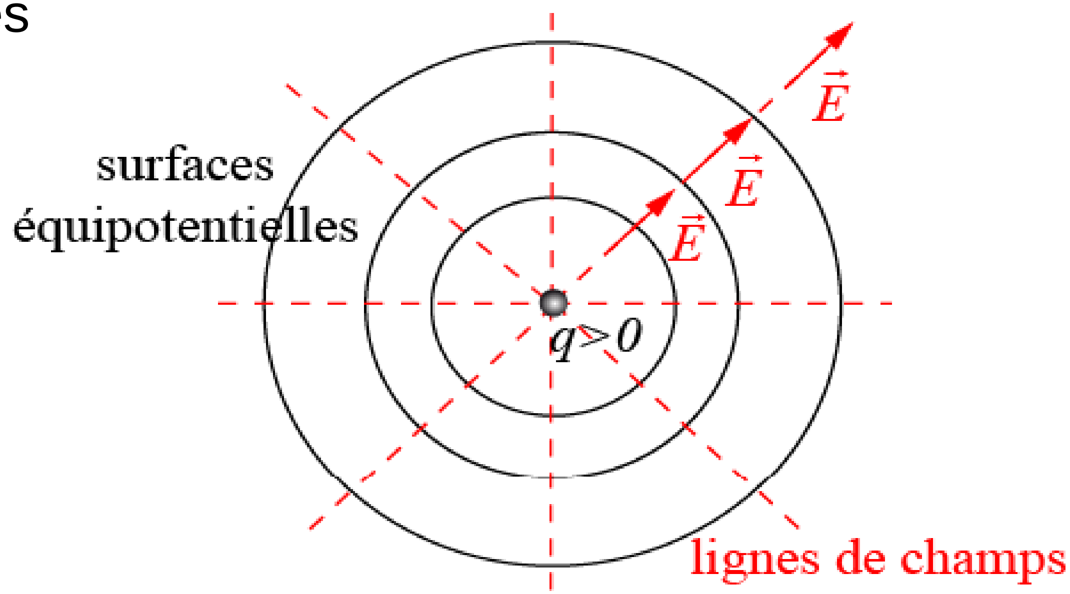
- opérateur vectoriel de dérivation gradient

$$\overrightarrow{\text{grad}} = \left| \begin{array}{l} \dfrac{\partial}{\partial x} \\ \dfrac{\partial}{\partial y} \\ \dfrac{\partial}{\partial z} \end{array} \right. \qquad \Rightarrow \qquad \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\ V = \left| \begin{array}{l} E_x = -\dfrac{\partial V}{\partial x} \\ E_y = -\dfrac{\partial V}{\partial y} \\ E_Z = -\dfrac{\partial V}{\partial z} \end{array} \right.$$

- Gradient = vecteur dirigé dans le sens de l'augmentation de la fonction scalaire
- Vecteur champ électrostatique dans le sens des **sens des potentiels décroissants**

Surfaces équipotentielles et lignes de champ

- Surfaces équipotentielles
  - ensemble des points ayant la même valeur de potentiel
  - vérifient l'équation : $V(x,y,z) = \text{cste} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{E}.\, d\vec{\ell} = 0$
  - champ électrostatique est toujours normal (ou perpendiculaire) aux surfaces équipotentielles
- Lignes de champ
  - courbes auxquelles le champ électrostatique est **tangent** en tout point et orientées dans le **sens du champ**
  - lignes de champ toujours **perpendiculaires** aux surfaces équipotentielles



Énergie potentielle électrostatique E_P

- Énergie électrostatique d'une charge ponctuelle q' placée dans un champ électrostatique uniforme

$$\boxed{E_P = q' \cdot V_M}$$

définie à une constante additive près

- Énergie électrostatique d'interaction entre deux charges ponctuelles q_1 et q_2
  - Énergie de q_1 dans le potentiel créé au point M par q_2 :

$$\boxed{E_P = q_1 \cdot V_{M2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}}$$

r distance entre q_1 et q_2

- Énergie électrostatique d'interaction
  - entre n charges ponctuelles

$$E_P = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_i\, q_j}{r_{ij}}$$

  - pour une distribution continue de charges

$$E_P = \frac{1}{2} \int dq \cdot V_M$$

dq : charge élémentaire autour du point M

Récapitulatif des relations entre $\vec{F}$, E_p, $\vec{E}$, V

$$\vec{F}_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{u}_i \qquad\qquad E_P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r}$$

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\mathrm{grad}}\, E_p$$

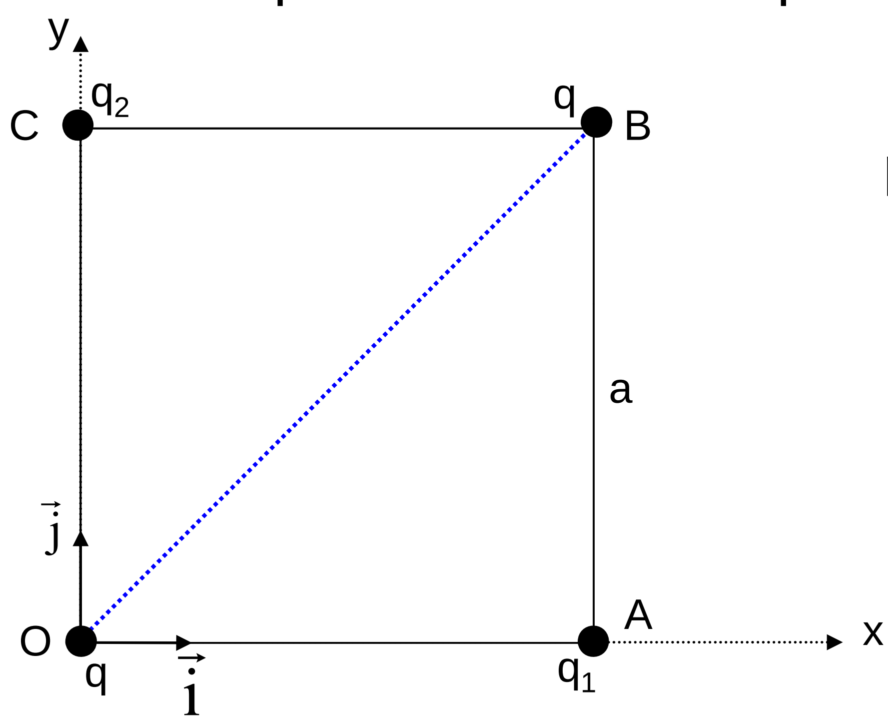
$$\vec{F} = q_2.\vec{E} \qquad\qquad E_p = q_2.V$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\mathrm{grad}}\, V$$

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\frac{q_1}{r^2}\vec{u}_1 \qquad\qquad V_1 = \frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\frac{q_1}{r}$$

Exercice pour une distribution de charges ponctuelles (1)

- On place, dans le vide, deux charges positives identiques q en deux sommets opposés sur la diagonale d'un carré de côté a. Deux autres charges q_1 et q_2 sont placées aux deux autres sommets du carré. Toutes ces charges sont considérées comme ponctuelles.
- On utilise le repère orthonormé représenté sur le schéma :

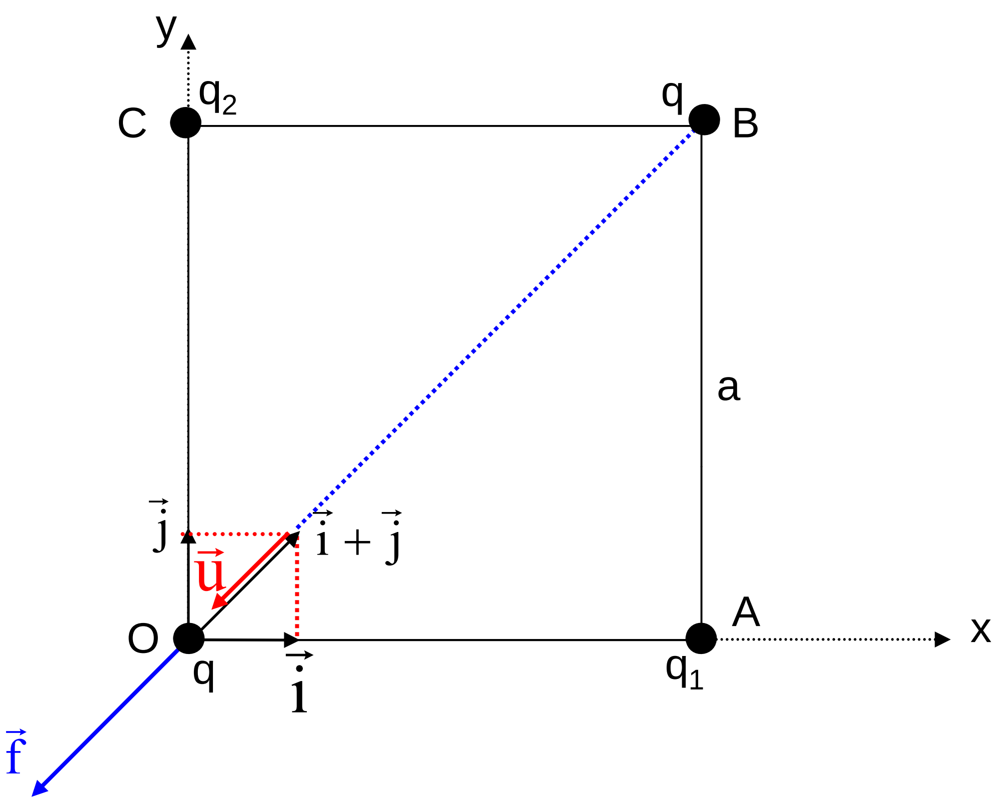


Force exercée par q_1 sur q au point O :

$$\vec{f}_{q_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q}{a^2}(-\vec{i})$$

Exercice pour une distribution de charges ponctuelles (2)

- Donner l'expression vectorielle de la force exercée par la charge q placée en B sur la charge q placée en O, en fonction des vecteurs unitaires $\vec{i}$ et $\vec{j}$.



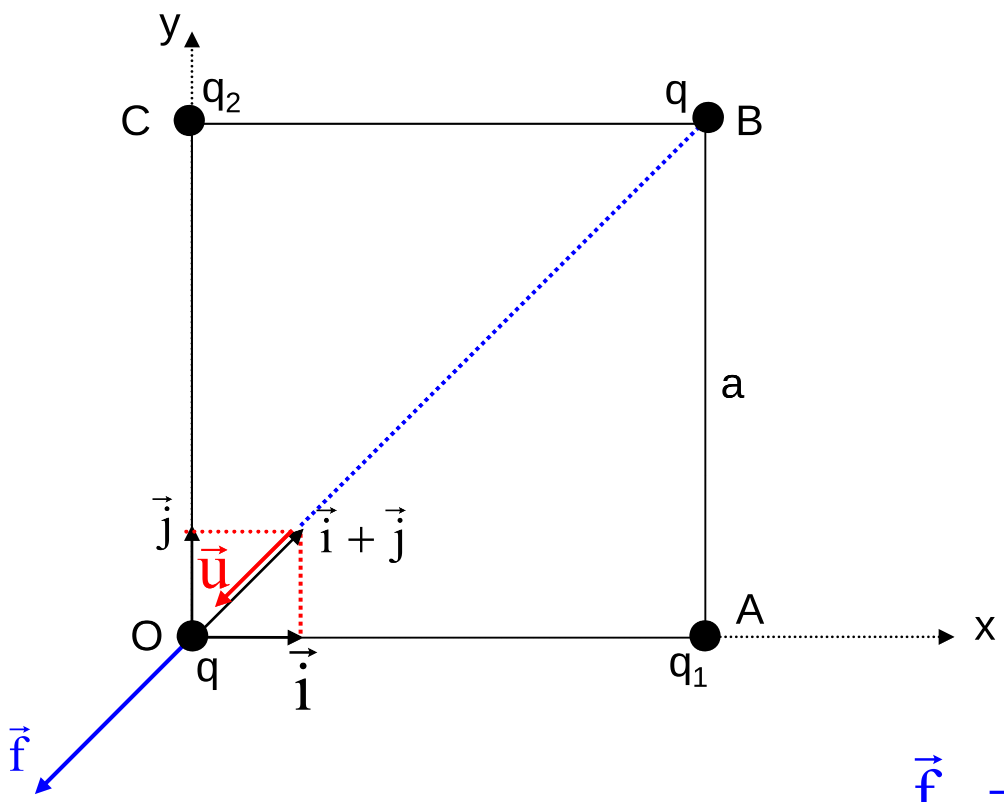
$$\vec{f} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q^2}{BO^2} \cdot \vec{u}$$

avec $\quad \vec{u} = -\frac{\left(\vec{i}+\vec{j}\right)}{\sqrt{2}}$

$$\vec{f} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q^2}{2a^2} \cdot \frac{\left(\vec{i}+\vec{j}\right)}{\sqrt{2}}$$

Exercice pour une distribution de charges ponctuelles (3)

- Quelle est l'expression vectorielle de la résultante des forces exercées par les charges q_1 et q_2 sur la charge q placée en O, en fonction des vecteurs unitaires $\vec{i}$ et $\vec{j}$?



$$\vec{f}_{q_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1 q}{a^2}\cdot(-\vec{i})$$

$$\vec{f}_{q_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_2 q}{a^2}\cdot(-\vec{j})$$

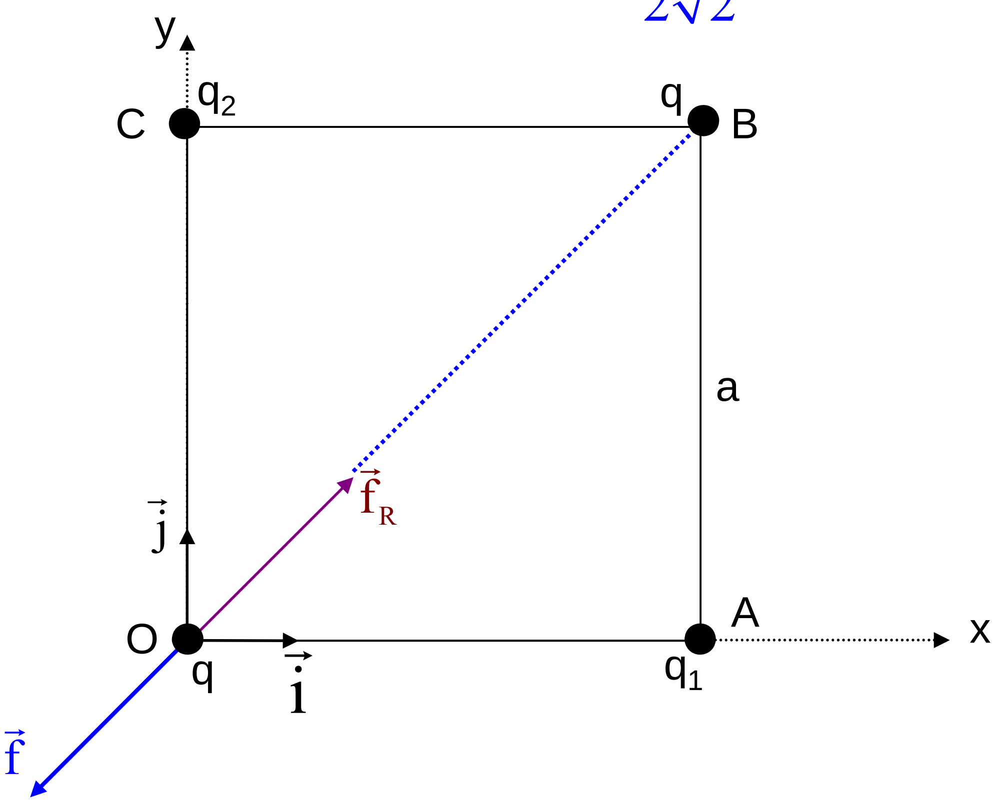
$$\vec{f}_R = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{a^2}\cdot(q_1\vec{i}+q_2\vec{j})$$

Exercice pour une distribution de charges ponctuelles (4)

- Exprimer les valeurs algébriques de q_1 et q_2 en fonction de q pour que la force totale exercée sur la charge q placée en O soit nulle.

$$\vec{f}_T = \vec{f} + \vec{f}_R = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2} \cdot \left[\left(\frac{q}{2\sqrt{2}} + q_1\right)\vec{i} + \left(\frac{q}{2\sqrt{2}} + q_2\right)\vec{j} \right]$$

$$\vec{f}_T = \vec{0} \qquad \Leftrightarrow \qquad q_1 = -\frac{q}{2\sqrt{2}} = q_2$$



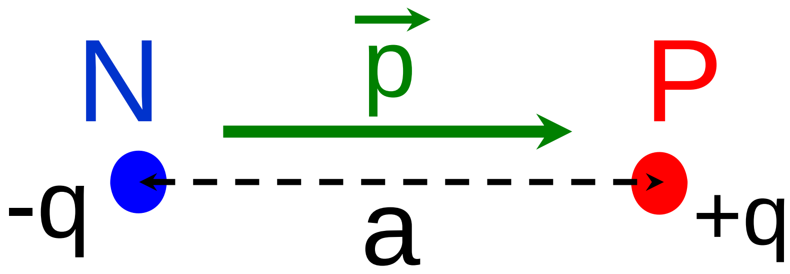
2. Le dipôle électrique

Le dipôle électrique

- Champ et potentiel induits par un dipôle électrique
- Action d'un champ électrique sur un dipôle
- Les dipôles dans la matière

Définition du dipôle électrique

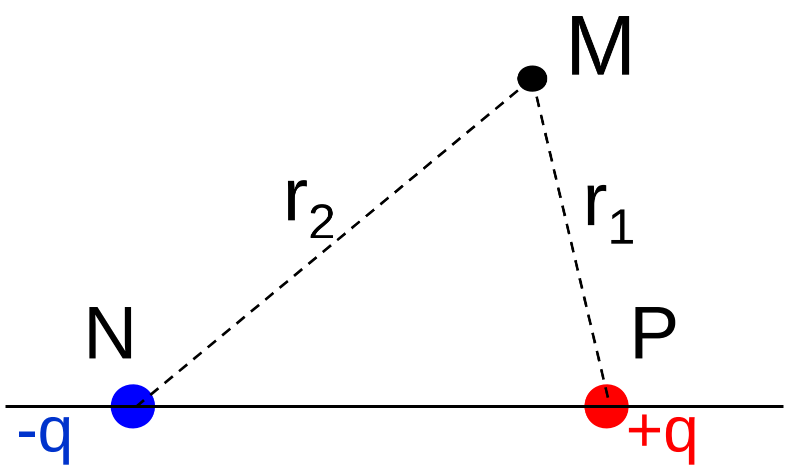
Ensemble de 2 charges électriques ponctuelles, égale en valeur absolue et de signes contraires (+q et –q), séparées par une faible distance.



- Moment dipolaire $\vec{p} = q.\overrightarrow{NP}$
  - $\vec{p}$ orienté de <u>- vers + par convention</u>
  - q <u>valeur absolue</u> de chaque charge
  - Unité SI : coulomb-mètre (C.m)
  - Unité usuelle : debye (D)

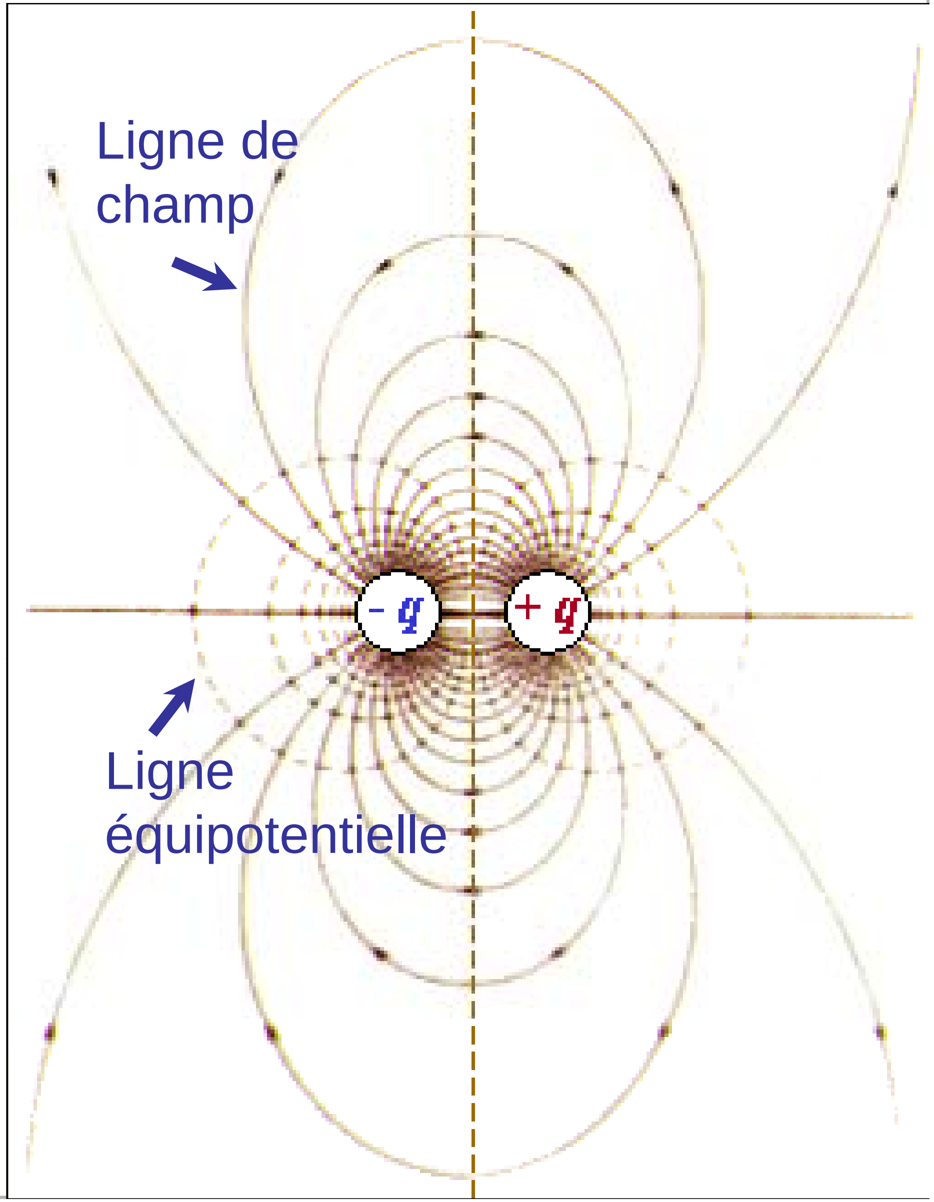
    1 D = $3,336.10^{-30}$ C.m
  - Dimension : [p] = L.T.I

Champ et potentiel induits par un dipôle électrique au voisinage du dipôle



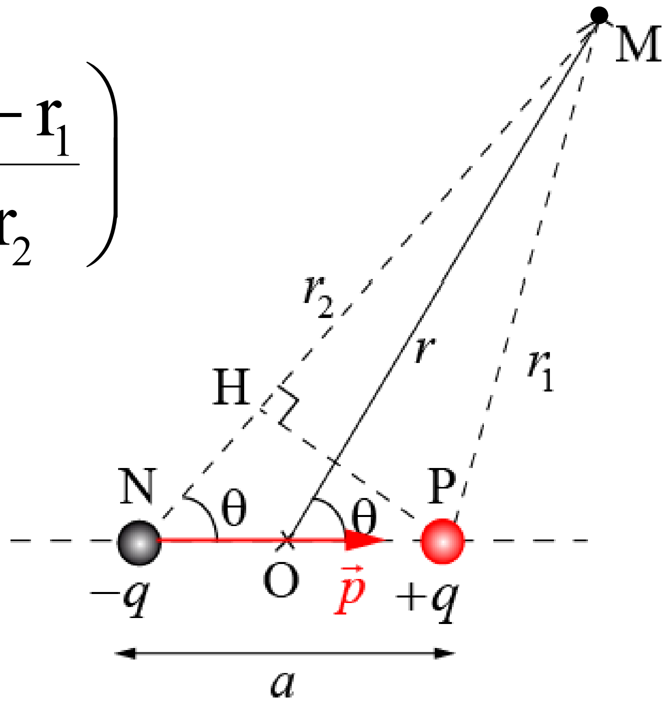
$$V_M = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}\right)$$

$$\vec{E}_M = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\vec{u}_{PM}}{r_1^2} - \frac{\vec{u}_{NM}}{r_2^2}\right)$$



Potentiel à grande distance du dipôle

$$V_M = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}\right)$$



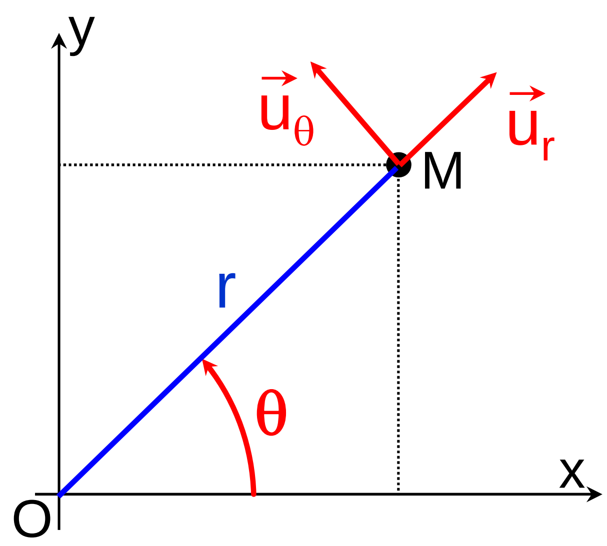
- r >> a
  - $r_2 - r_1 \approx NH \approx a\ \cos\theta$
  - $r_2\, r_1 \approx r^2$

$$V_M = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{a\cos\theta}{r^2} = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\cos\theta}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\vec{p}\cdot\vec{r}}{r^3}$$

$1/r^2$

Champ à grande distance du dipôle (1)

$$\vec{\mathbf{E}} = -\,\overrightarrow{\mathbf{grad}}\,\mathbf{V} \qquad \text{avec} \qquad V_M = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\cos\theta}{r^2}$$



En coordonnées polaires :

$$\vec{E}_M = -\frac{\partial V_M}{\partial r}\vec{u}_r - \frac{1}{r}\frac{\partial V_M}{\partial \theta}\vec{u}_\theta$$

$$\boxed{\vec{E}_M = \frac{2p}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\cos\theta}{r^3}\vec{u}_r + \frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\sin\theta}{r^3}\vec{u}_\theta}$$

Composante radiale de $\vec{E}_M$: $\qquad E_r = \dfrac{2p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\dfrac{1}{r^3}$

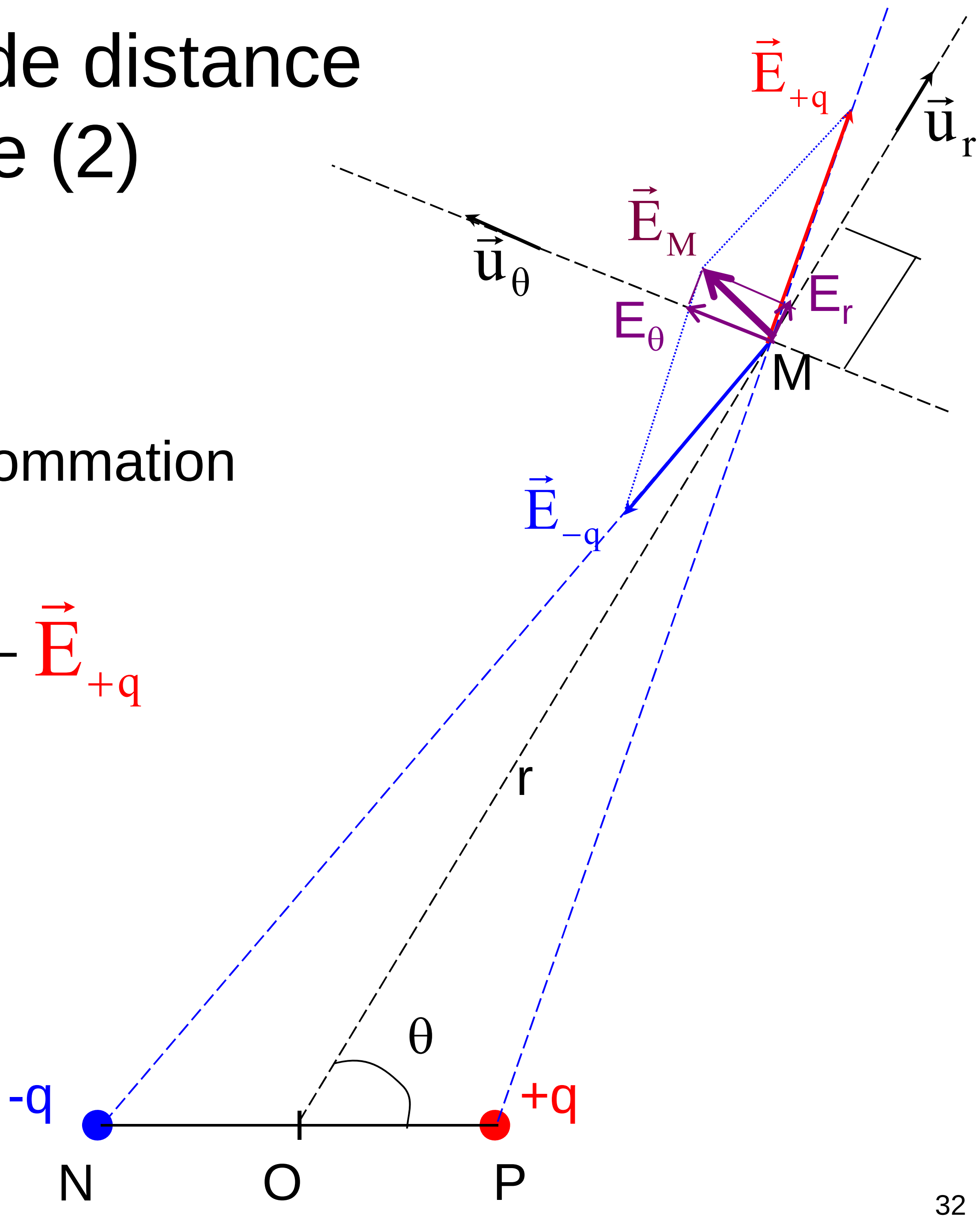
Composante tangentielle de $\vec{E}_M$: $\qquad E_\theta = \dfrac{p\sin\theta}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\dfrac{1}{r^3}$

Norme de $\vec{E}_M$: $\qquad \boxed{\left\|\vec{E}(M)\right\| = \sqrt{E_r^2 + E_\theta^2} = \dfrac{p}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\dfrac{1}{r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}}$

Champ à grande distance du dipôle (2)

- Méthode par sommation vectorielle :

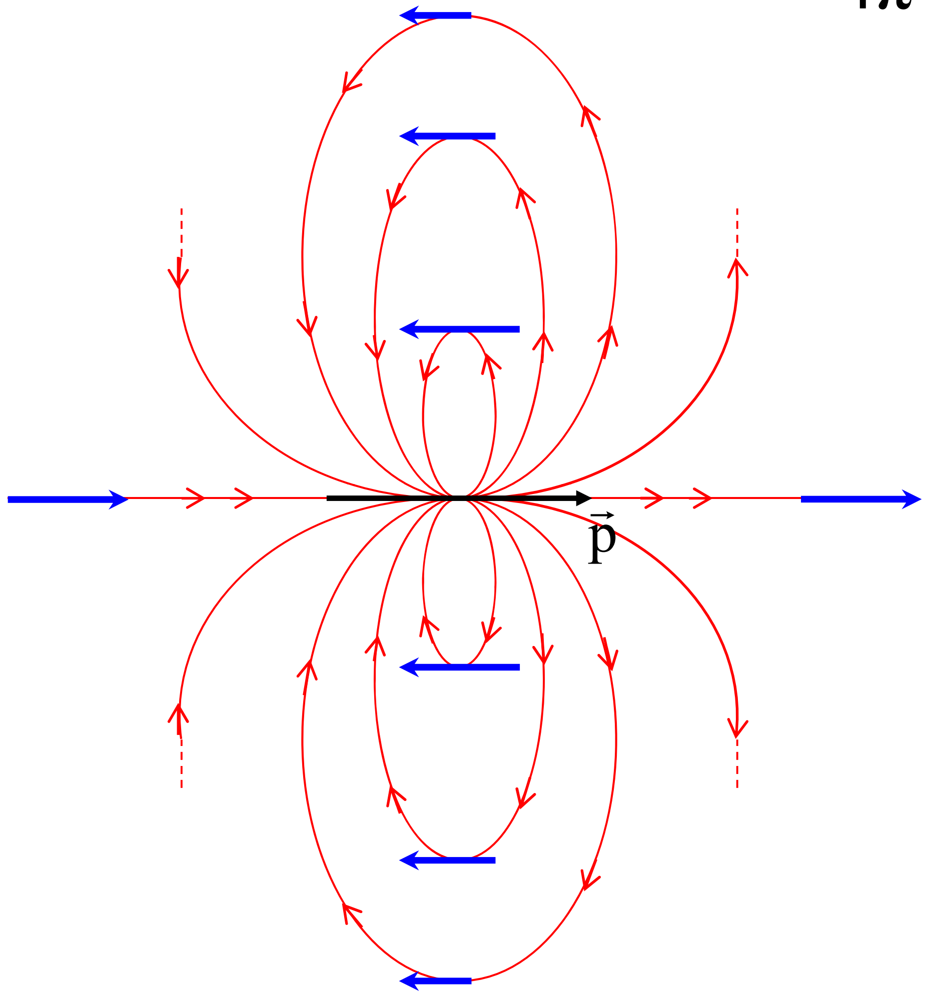
$$\vec{E}_M = \vec{E}_{-q} + \vec{E}_{+q}$$



Champ à grande distance du dipôle (3)

- Positions particulières :

$\theta = \pi/2$ rad $\Rightarrow E_r = 0$ $\qquad E_\theta = \dfrac{q\ell}{4\pi\,\varepsilon_0}\dfrac{1}{r^3}$



$\theta = 0 \Rightarrow E_\theta = 0$

$$E_r = \frac{2q\ell}{4\pi\,\varepsilon_0}\frac{1}{r^3}$$

Action d'un champ électrique uniforme sur un dipôle (1)

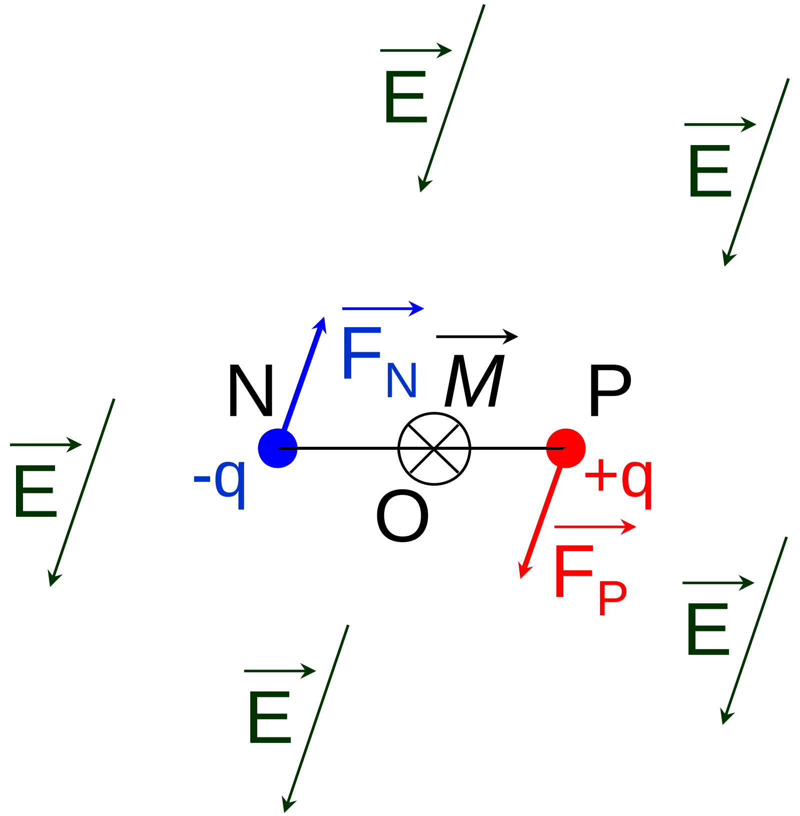
$$\vec{M}_N = \overrightarrow{ON} \wedge \overrightarrow{F_N}$$

$$\vec{M}_P = \overrightarrow{OP} \wedge \overrightarrow{F_P}$$

$$\vec{M} = \vec{M}_N + \vec{M}_P$$

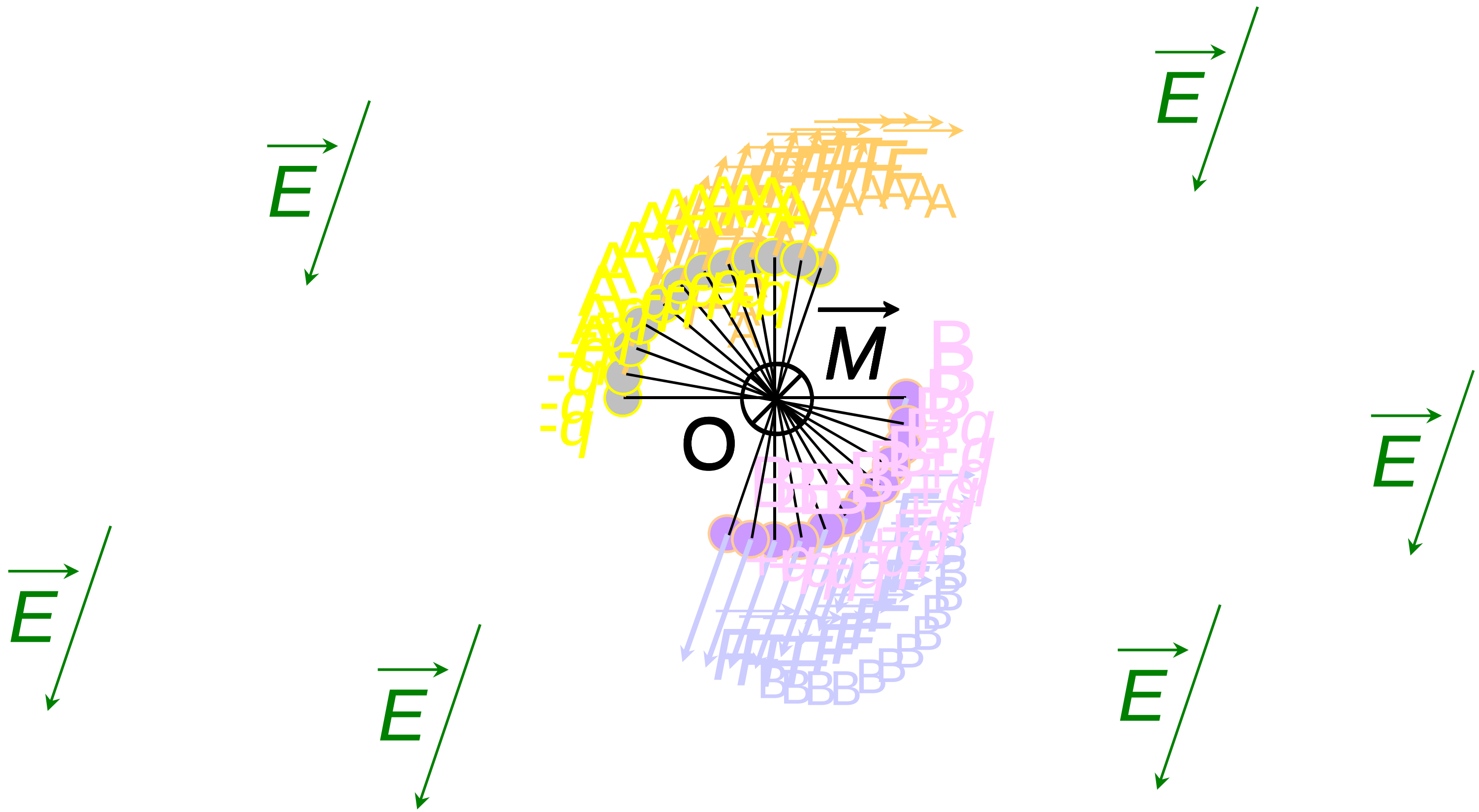
$$= \overrightarrow{NP} \wedge \overrightarrow{F_P}$$

$$\vec{M} = \vec{p} \wedge \vec{E} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$



Le dipôle s'aligne dans le sens du champ électrique

Orientation d’un dipôle / champ uniforme



Action d’un champ électrique uniforme sur un dipôle (2)

Dipôle en équilibre lorsque :

$$\overset{\curvearrowright}{M} = \vec{p} \wedge \vec{E} = \vec{0}$$

c'est-à-dire : $\left\|\overset{\curvearrowright}{M}\right\| = \left\|\vec{p}\right\| . \left\|\vec{E}\right\| \sin\theta \; = 0$ avec $\theta = (\vec{p}\,,\vec{E})$

$\Rightarrow$ 2 positions d’équilibre :

- si $\theta = 0$, $\Rightarrow$ $\vec{p}$ et $\vec{E}$ de même sens
  équilibre stable
- si $\theta = \pi$, $\Rightarrow$ $\vec{p}$ et $\vec{E}$ en sens contraire
  équilibre instable

Energie potentielle d'un dipôle placé dans un champ électrostatique externe uniforme

- Pour 2 charges ponctuelles :

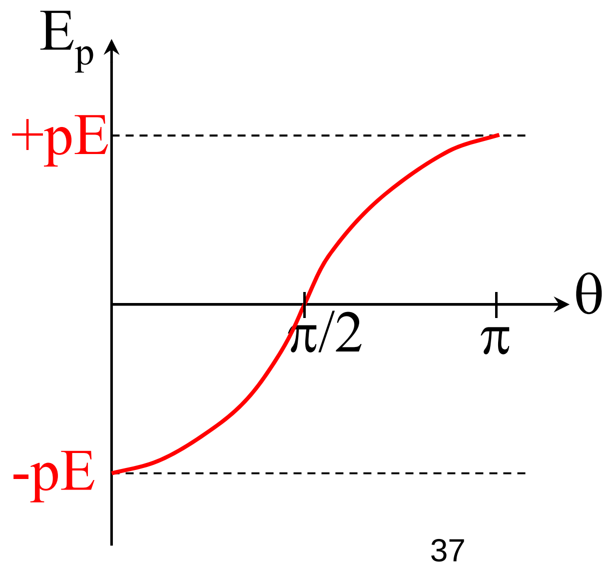
$$E_p = qV_P + (-q)V_N = q(V_P - V_N) \qquad (1)$$

- $$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V \quad \Leftrightarrow \quad dV = -\vec{E}.\,d\vec{\ell}$$

$$V_P - V_N = \int_N^P -\vec{E}\cdot d\vec{\ell} = -\vec{E}\int_N^P d\vec{\ell} = -\vec{E}\cdot\overrightarrow{NP} \qquad (2)$$

- (1) et (2) $\Rightarrow$ $E_p = -q\,\vec{E}.\overrightarrow{NP} = -q\overrightarrow{NP}.\vec{E}$

$$\boxed{E_p = -\vec{p}.\vec{E} = -\left\|\vec{p}\right\|.\left\|\vec{E}\right\|\cos\theta}$$



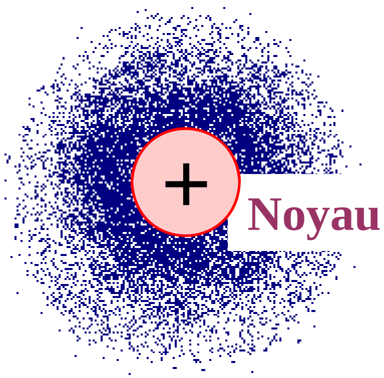
- Déplacement spontané $\leftrightarrow E_p \downarrow$
  - $\theta = 0 \rightarrow E_p$ min $\leftrightarrow$ équilibre stable
  - $\theta = \pi \rightarrow E_p$ max $\leftrightarrow$ équilibre instable

Les dipôles dans la matière

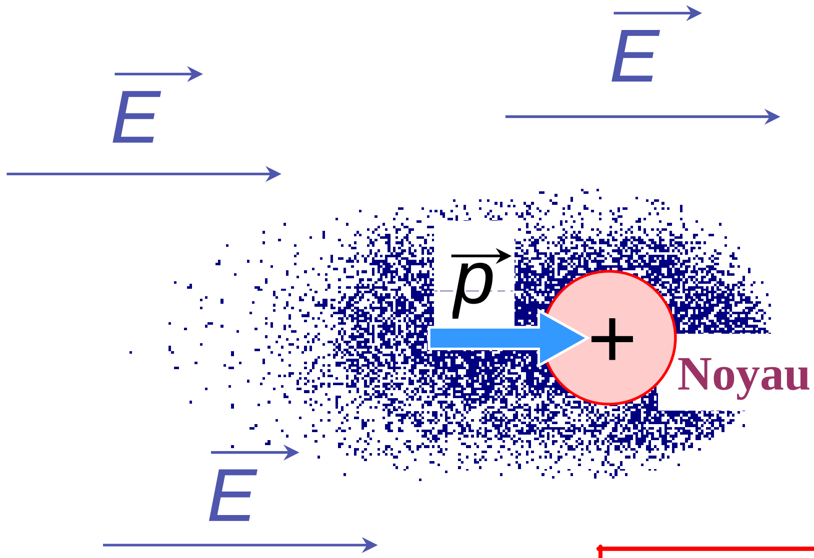
- Polarisation d'un atome
- Les molécules polaires
- Le moment dipolaire de l'eau

Polarisation d'un atome- polarisabilité

Sans champ électrique extérieur



Avec champ électrique extérieur

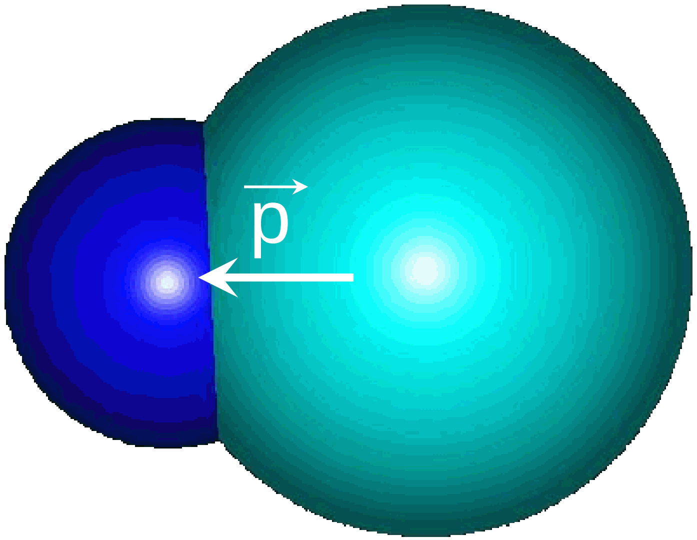


→ dipôle induit $\vec{p}$ $\boxed{\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E}}$

α polarisabilité de l'atome

$\alpha_H = 2{,}19.10^{-11}\ \mathrm{D.m.V^{-1}}$

Molécule polaire – exemple : HCl



H —— Cl

$+\delta$ $-\delta$

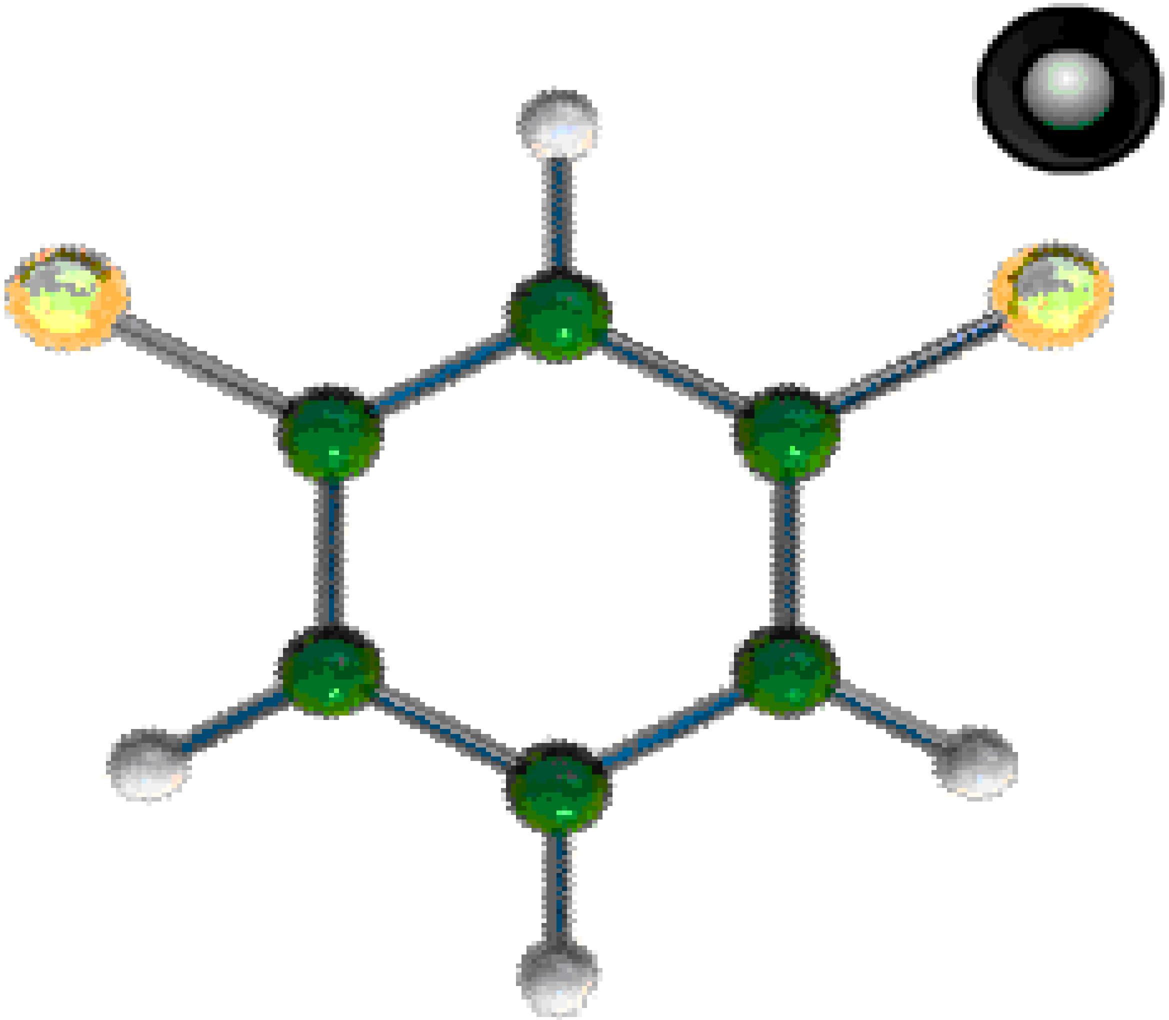
Moment dipolaire électrique permanent

Électronégativité

$$\chi_{Cl} > \chi_{H}$$

$$p = 1{,}03 \text{ D}$$

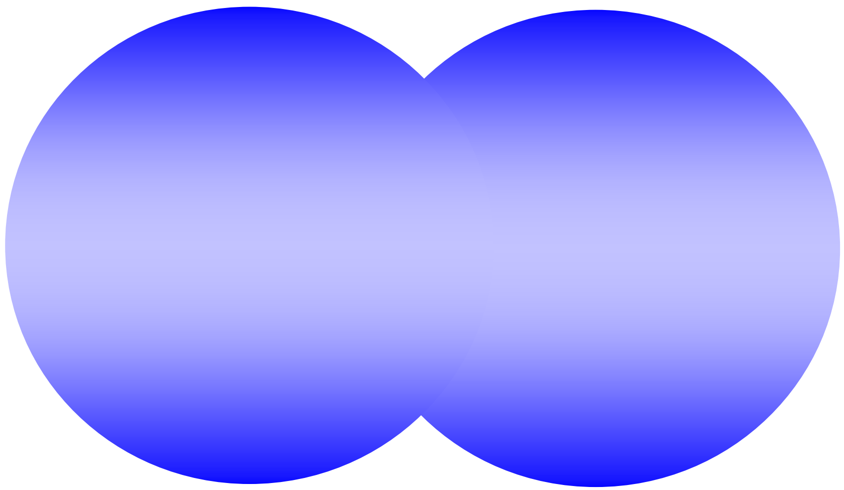
Molécule polaire : $C_6H_4Cl_2$



$\chi_{Cl} > \chi_C$

Les molécules apolaires (1)

- Exemple de molécule apolaire : le diazote



N ≡ N

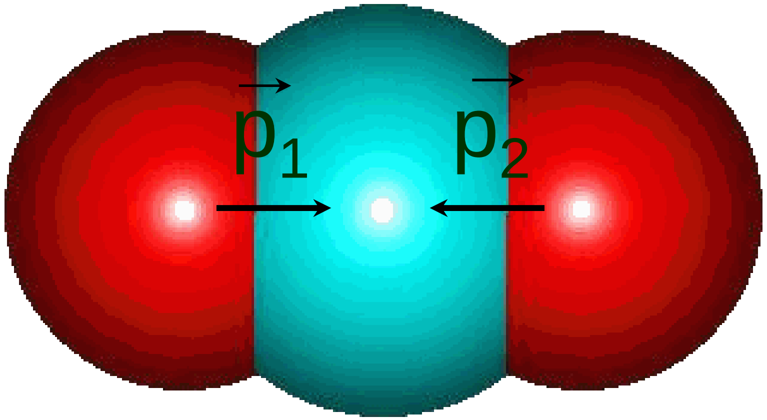
Diazote N_2

Pas de différence de χ

$p = 0$ D

Les molécules apolaires (2)

- Exemple de molécule apolaire : CO_2



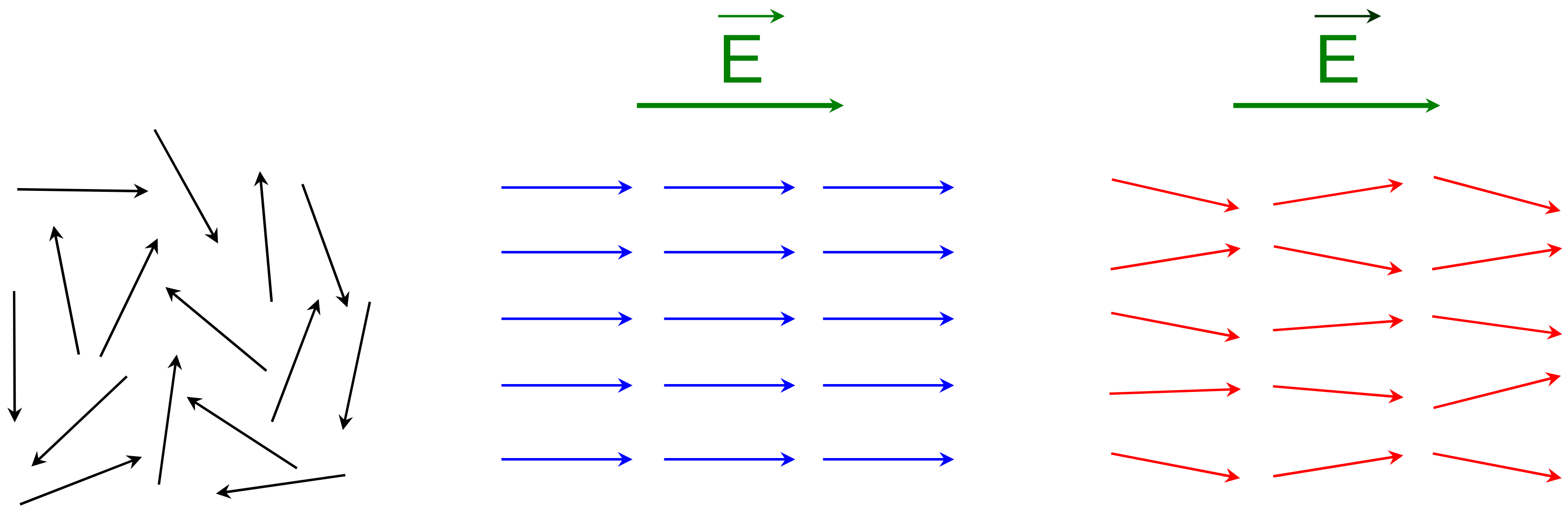
$O=C=O$

$$\chi_O > \chi_C$$

$$\vec{p}_1, \vec{p}_2$$

Mais $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{0}$

Action d'un champ électrique sur les molécules polaires



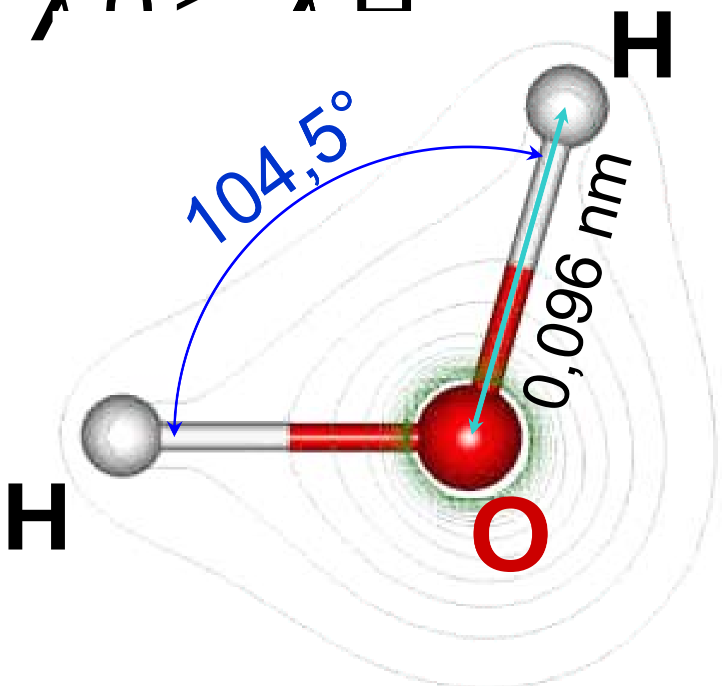
pas de champ électrique extérieur

champ électrique extérieur – milieu sans interactions moléculaires

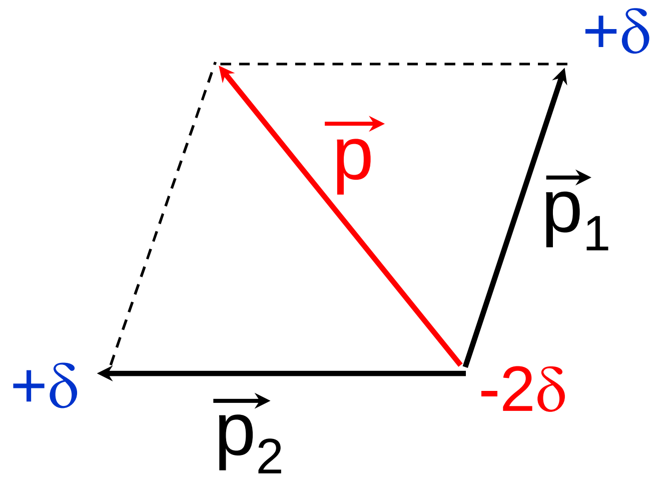
champ électrique extérieur – milieu avec interactions moléculaires

Le moment dipolaire de l’eau

$\chi_O > \chi_H$



Moment dipolaire équivalent



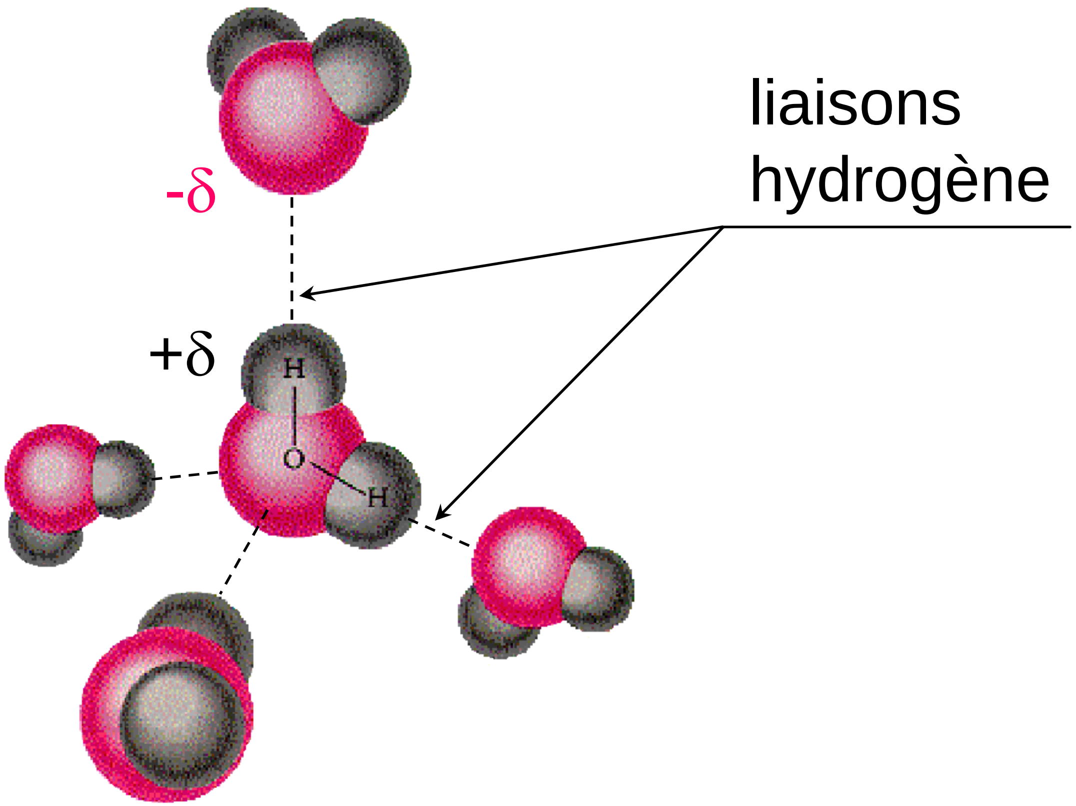
$$\|\vec{p}\| = 6{,}2.10^{-30}\ \text{C.m} = 1{,}85\ \text{D}$$

Calcul de la distance a entre les centres de gravité des charges > 0 et < 0 :

$$\|\vec{p}\| = q.a \quad \Rightarrow \quad a = \frac{\|\vec{p}\|}{q} = \frac{6{,}2.10^{-30}}{10\times 1{,}6.10^{-19}} = 3{,}9.10^{-12}\ \text{m} = 3{,}9\ \text{pm}$$

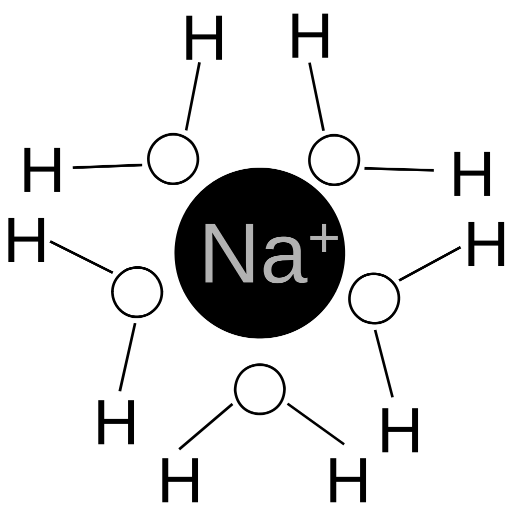
avec charge commune : q = 10e

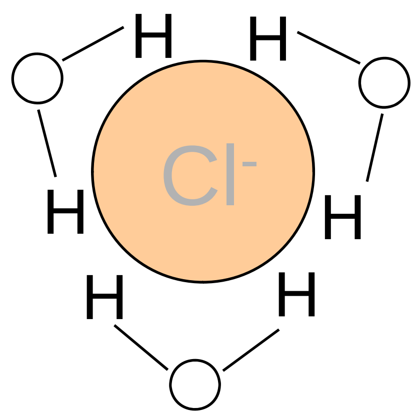
L’arrangement des molécules d’eau



Hydratation des ions et molécules polaires en solution aqueuse

- Exemple : hydratation des ions Na^+ et Cl^-





- Interaction ion - dipôle permanent
  Ex : K^+, 4 H_2O

Influence du milieu polaire sur les grandeurs électriques

- Dans le vide, toutes les grandeurs électriques dépendent de sa permittivité ε_0 (A.s.V^{-1}.m^{-1})

- Dans la matière, on remplace ε_0 par ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \,.\, \varepsilon_r$$

permittivité relative ou

constante diélectrique ($\varepsilon_r > 1$)

- Exemples :

ε_r (gaz) $\approx$ 1

ε_r (verre) = 4

ε_r (alcool) = 20 - 40

ε_r (eau) = 80

Les molécules et la polarité - résumé

- Une molécule présente un moment dipolaire si:
  - un champ électrique extérieur est appliqué
  - la molécule est polaire ($\vec{p} \neq \vec{0}$), même sans champ extérieur
- Une molécule polaire induit un champ électrique qui
  - oriente les molécules entre elles
  - les lie par liaisons hydrogène
  - peut dissocier des liaisons ioniques ou polaires plus faibles (dissolution des solides ioniques et des structures à molécules polaires liées)
- Un milieu composé de molécules polaires possède une constante diélectrique élevée

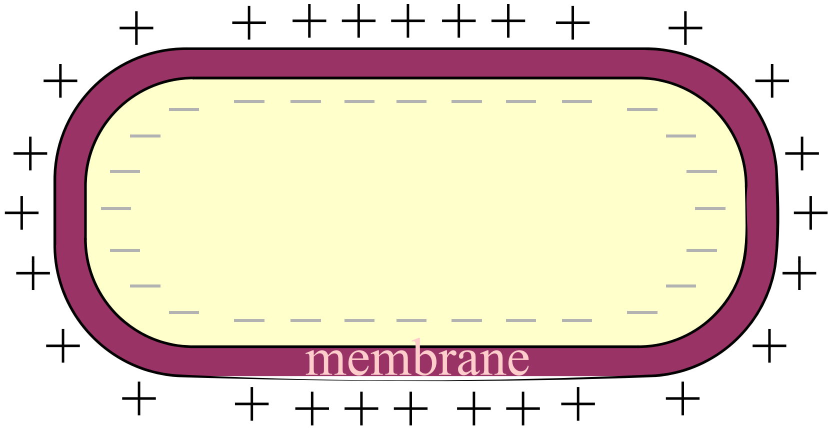
3. L'électrocardiographie

L'électrocardiographie (ECG)

- Polarisation d'une fibre nerveuse ou musculaire
- Principe de l'ECG
- Le dipôle cardiaque équivalent – le vectocardiogramme
- Le triangle d'Einthoven et les axes de Bailey
- Notions sommaires sur les anomalies électrocardiographiques

Polarisation d'une fibre nerveuse ou musculaire (1)

- Etat de repos



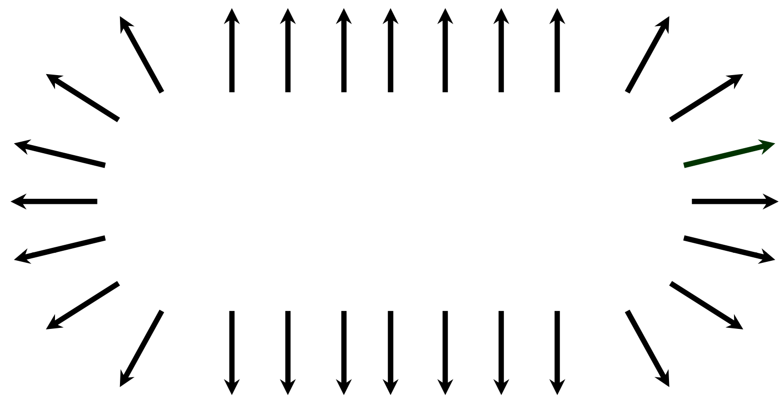
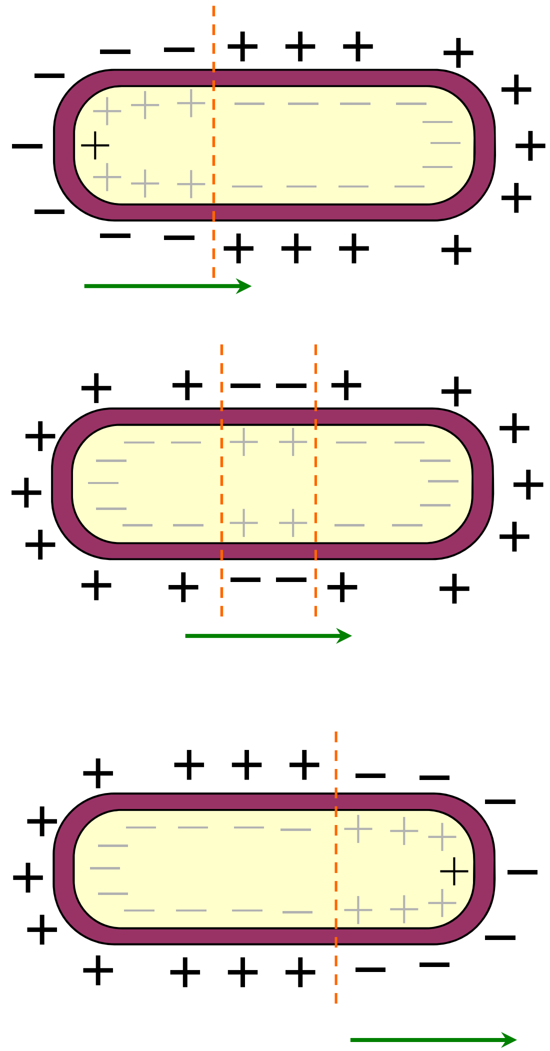


Schéma dipolaire équivalent

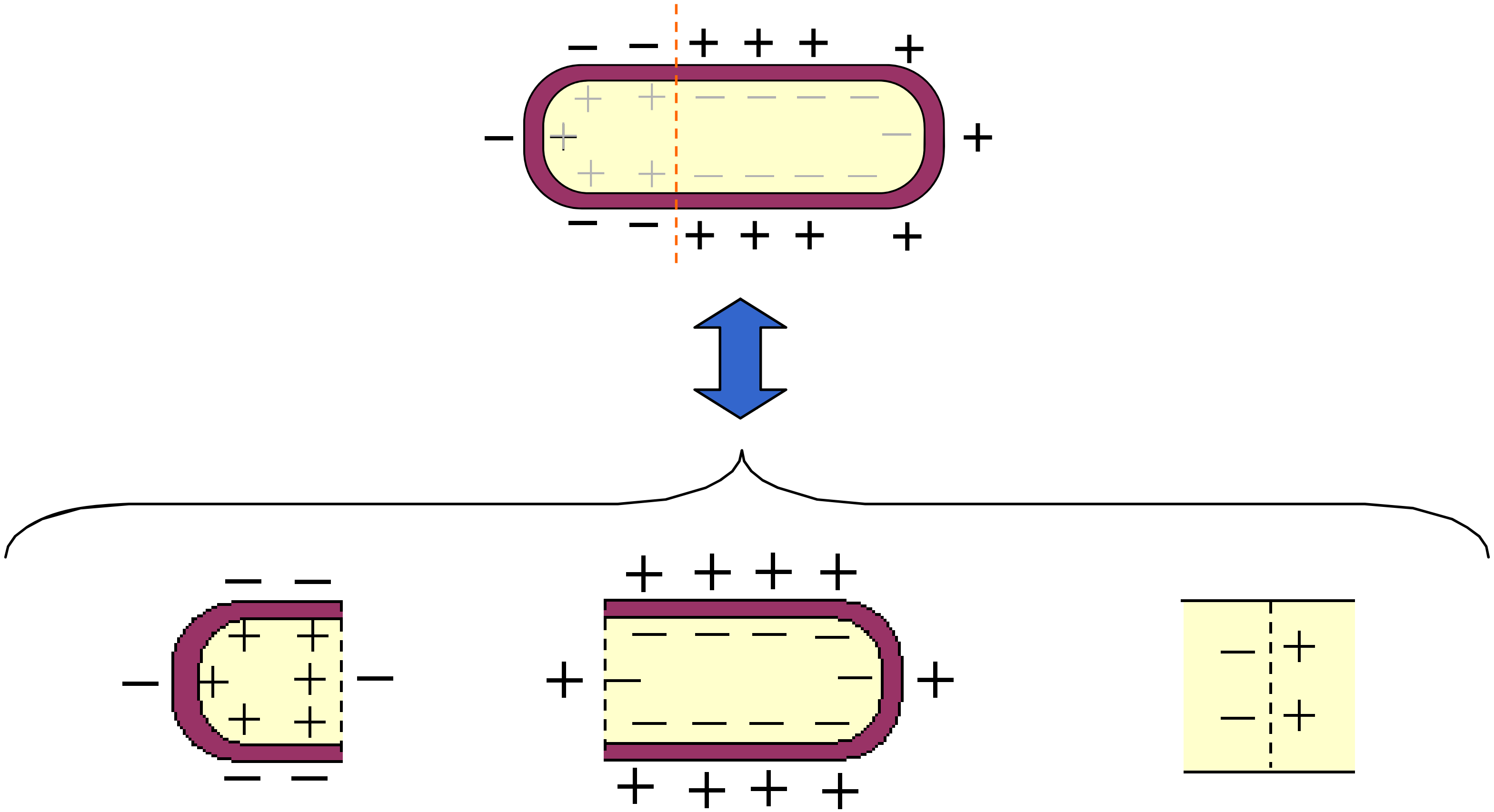
Polarisation d'une fibre nerveuse ou musculaire (2)

- Progression
  de l'influx électrique

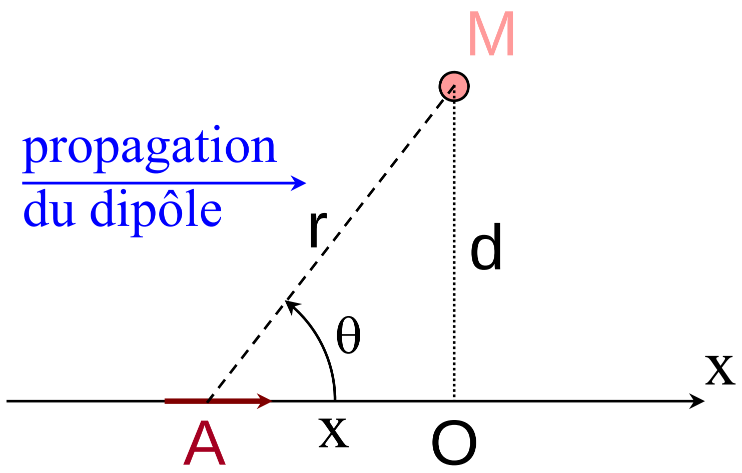


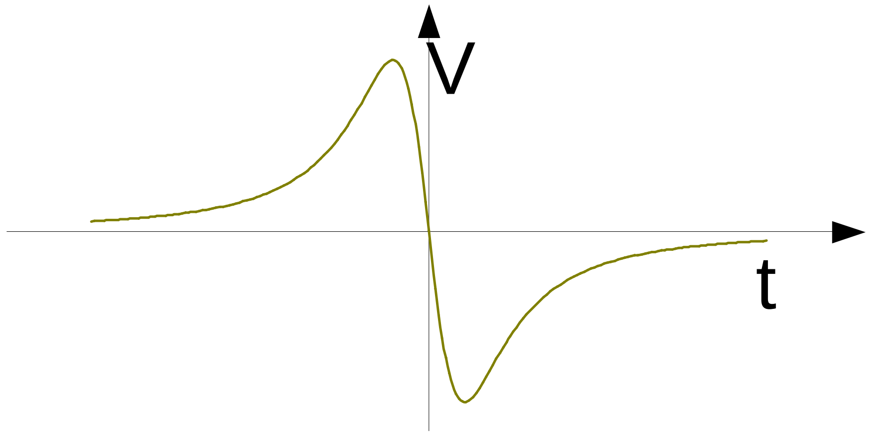
Polarisation d'une fibre nerveuse ou musculaire (3)

- Equivalence dipolaire d'une cellule excitée



Variation de potentiel due à la propagation du dipôle équivalent





$$V \approx \frac{p.\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0.r^2}$$

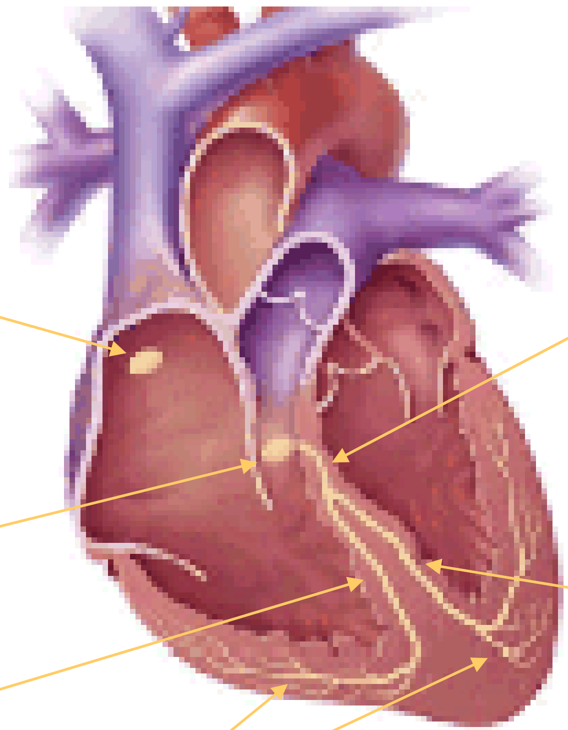
$$V \approx -\frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{x}{(x^2+d^2)^{3/2}}$$

$$V \approx -\frac{p}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{vt}{((vt)^2+d^2)^{3/2}}$$

Propagation du dipôle à vitesse v constante $\Rightarrow$ x = vt

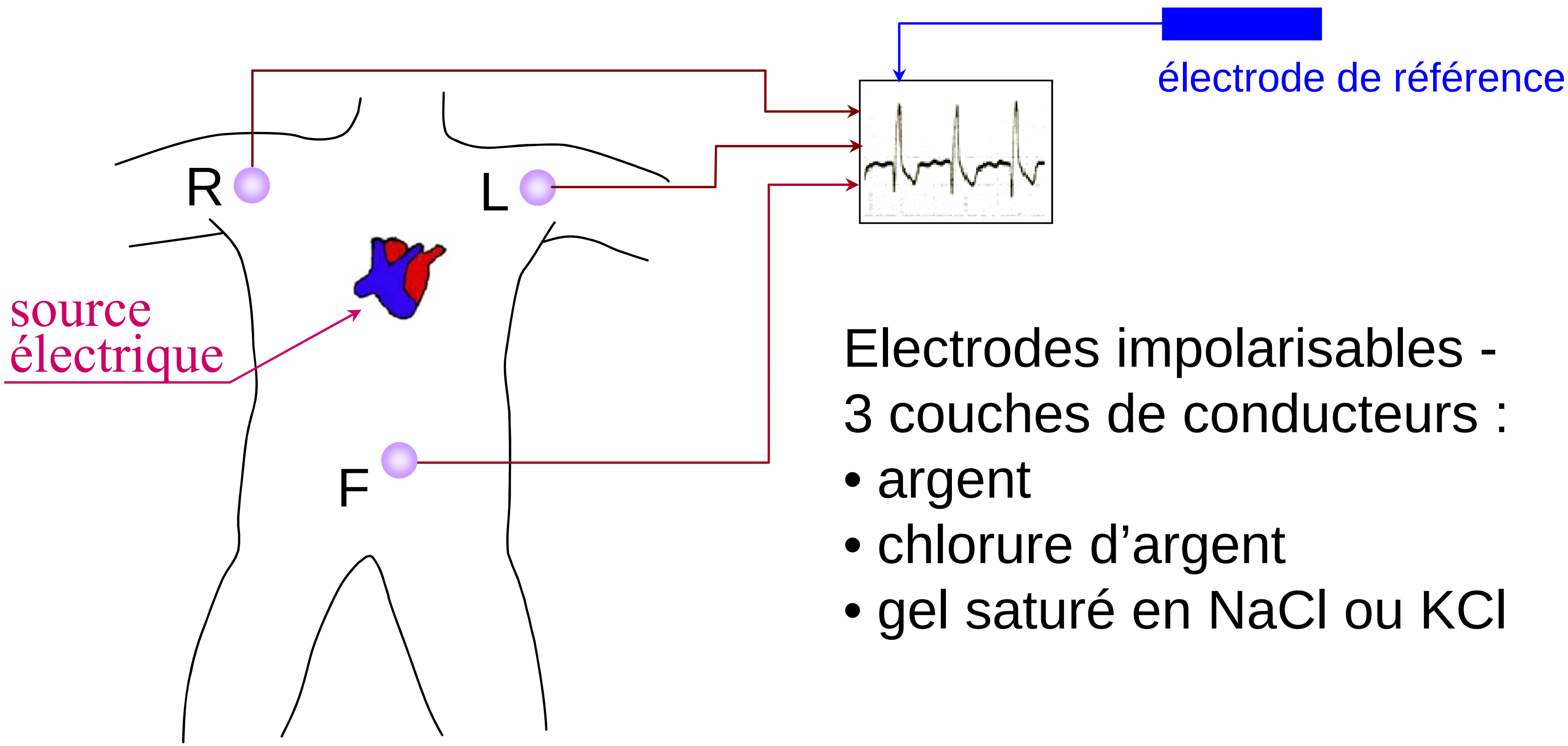
Principe de l'ECG

- Propagation de l'onde électrique dans le tissu nodal



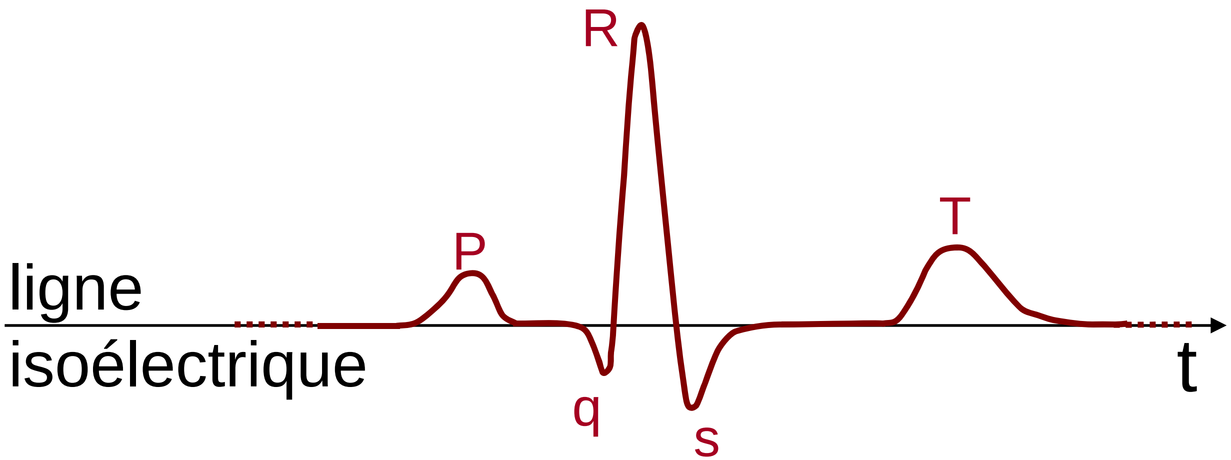
Mesure de l'ECG à l'aide d'électrodes

- Dérivation des membres = plan frontal



Electrodes impolarisables -
3 couches de conducteurs :
- argent
- chlorure d'argent
- gel saturé en NaCl ou KCl

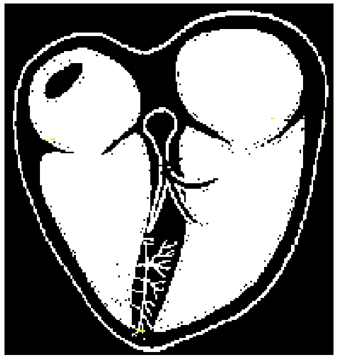
Tracé typique de l'ECG



Onde P : dépolarisation oreillettes (0,2 mV, 80-100 ms)

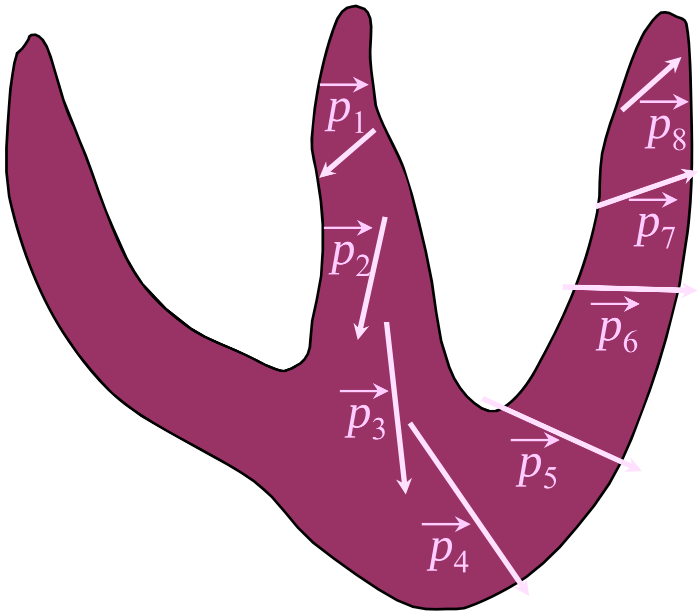
Complexe qRs : dépolarisation ventriculaire (1,0 à 1,5 mV, 80 ms)

Onde T : repolarisation ventriculaire (lente)



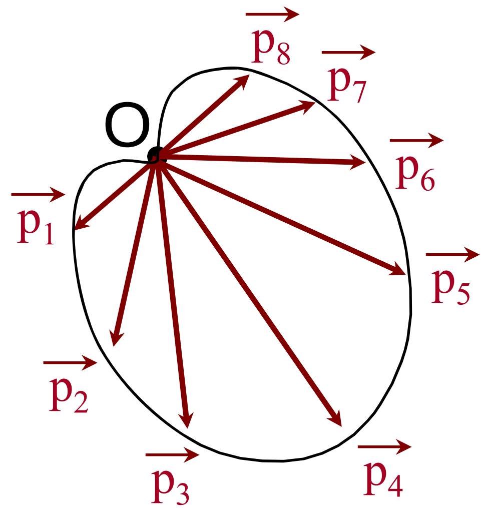
Le dipôle cardiaque équivalent

Propagation du moment dipolaire équivalent



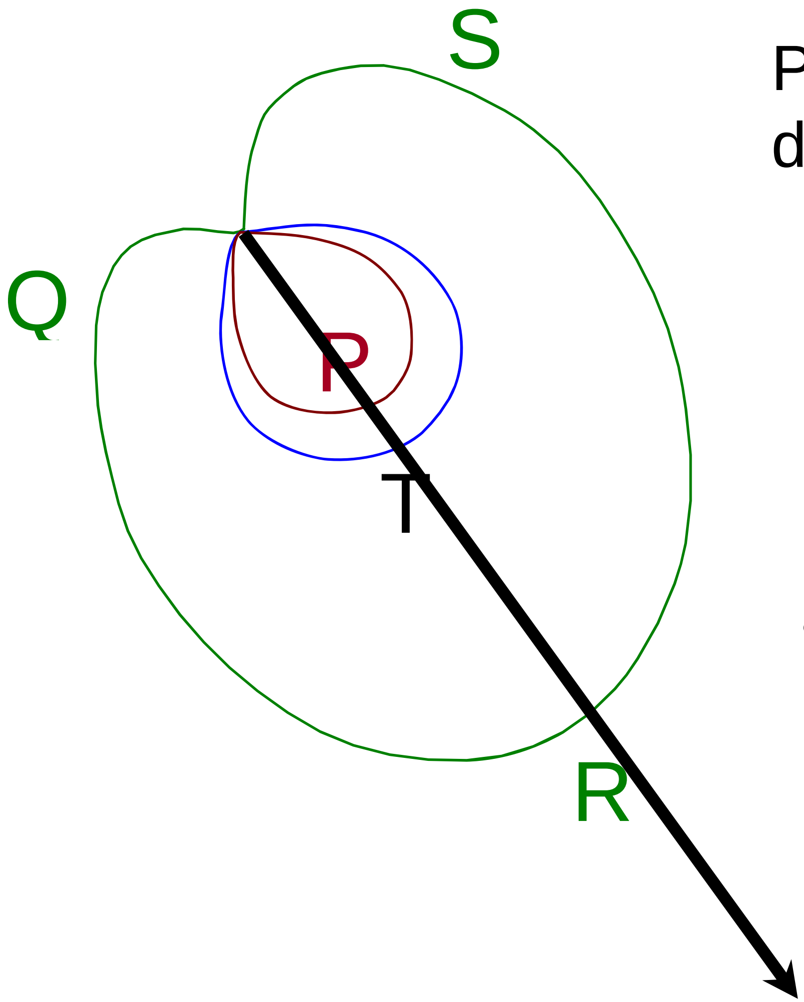
Dépolarisation ventriculaire

A grande distance : origine commune O



Vectocardiogramme d'activation ventriculaire

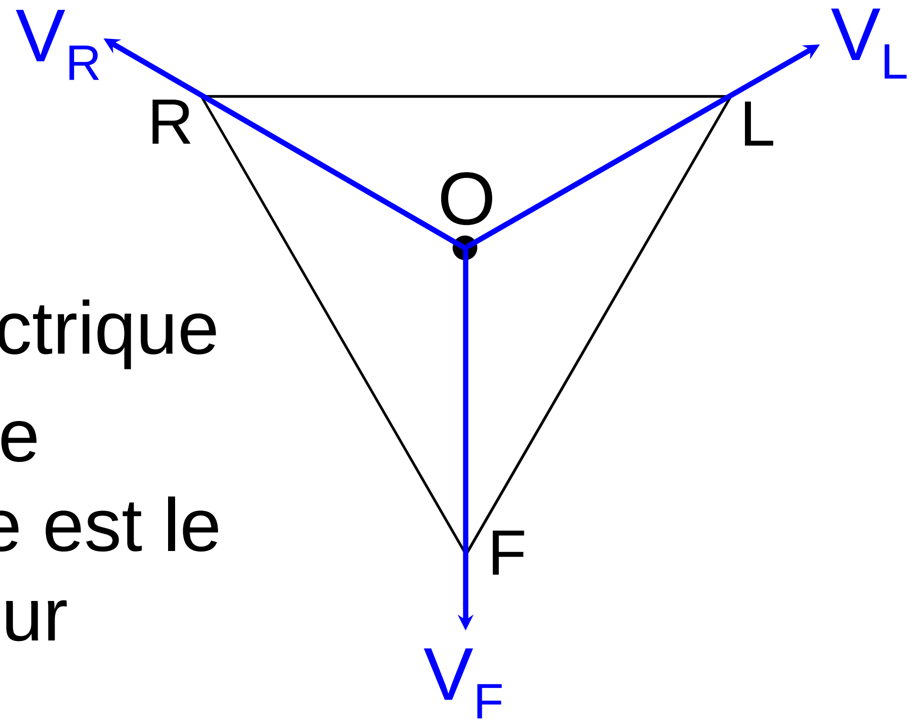
Vectocardiogramme complet



Position moyenne du moment dipolaire équivalent :

- axe électrique d'activation auriculaire A_P
- axe électrique d'activation ventriculaire A_{QRS}
- axe électrique de repolarisation ventriculaire A_T

Théorie d'Einthoven - hypothèses

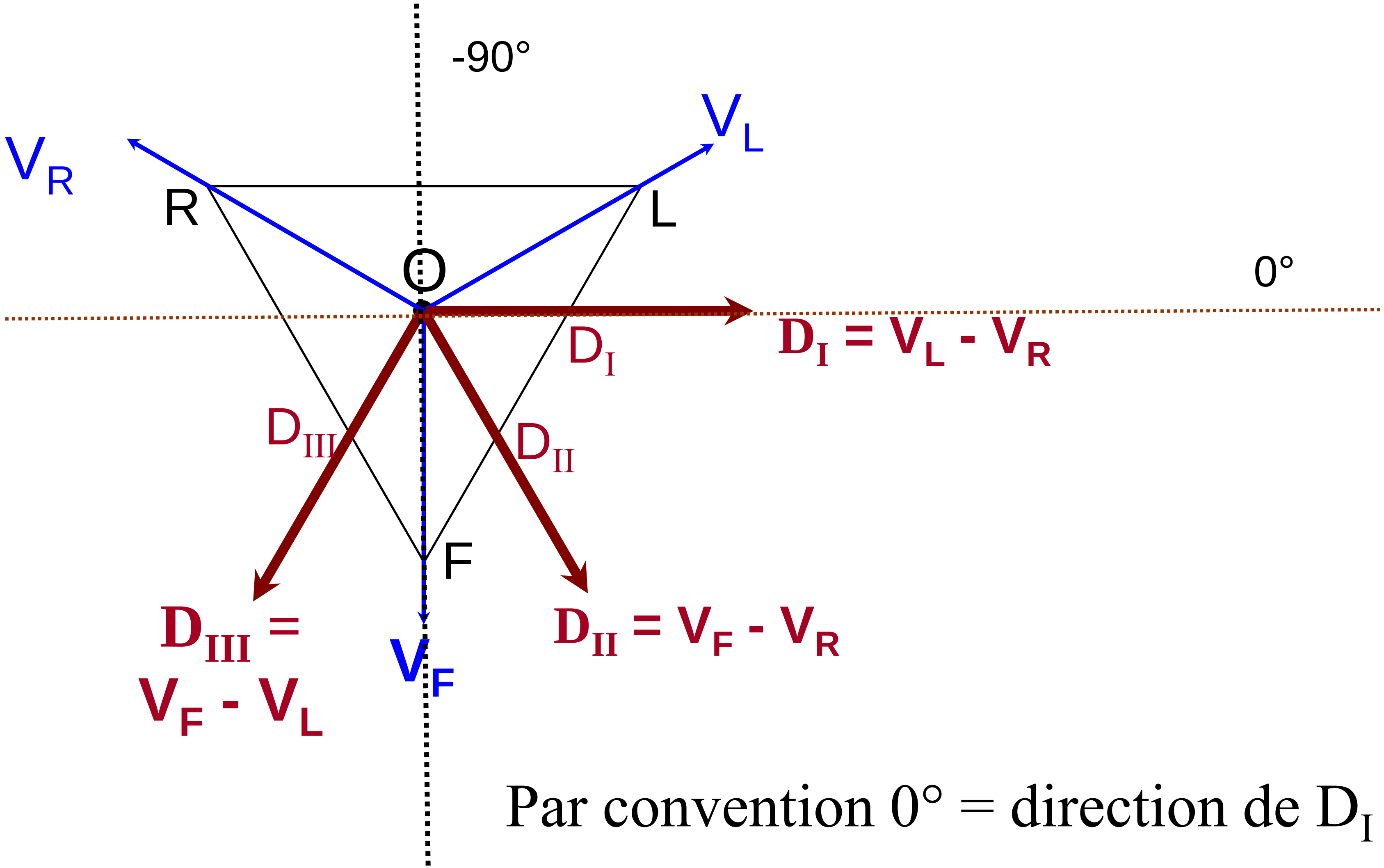


1. Dipôle unique
2. Origine fixe = centre électrique
3. R,L,F = sommets triangle équilatéral dont le centre est le centre électrique du coeur

Les dérivations frontales permettent de suivre en f(t) les projections du moment dipolaire équivalent au cœur selon la direction de dérivation.

Les 3 dérivations bipolaires – les 6 axes de Bailey

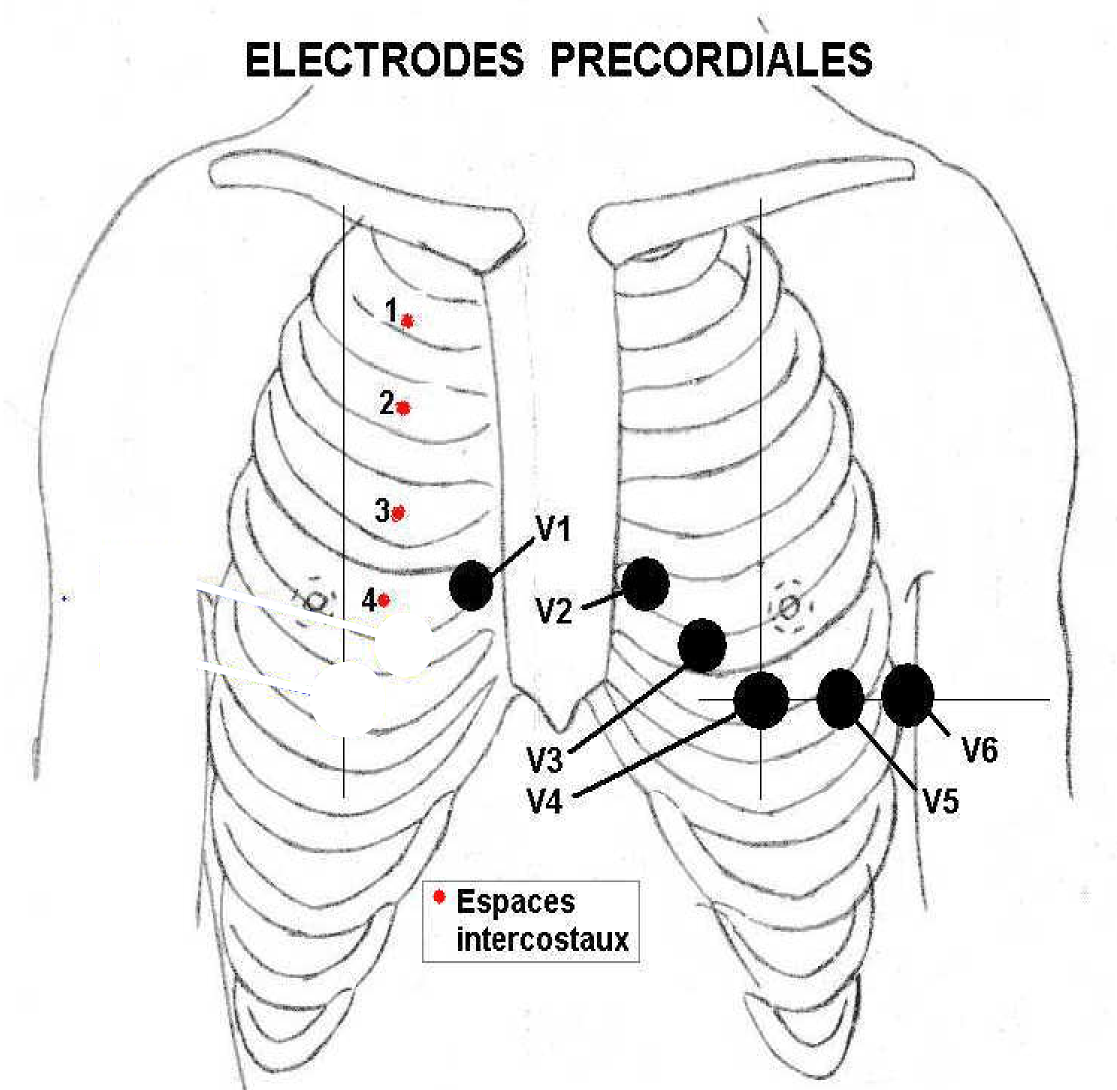
(OR), (OL), (OF), (OD_I), (OD_{II}) et (OD_{III})



Par convention 0° = direction de D_I

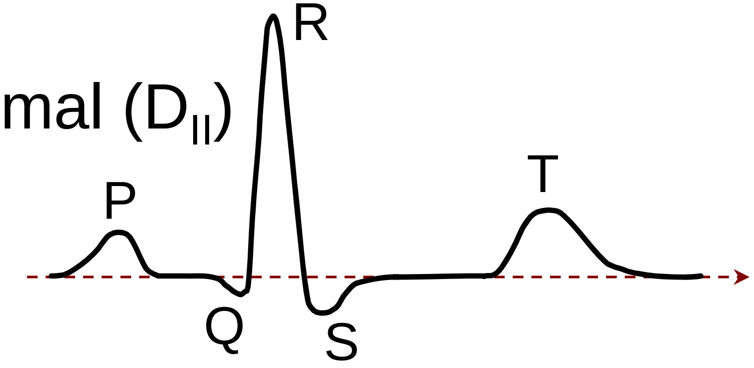
Les Six dérivations précordiales

- Plan horizontal
- Théorie du feuillet
- Face au cœur

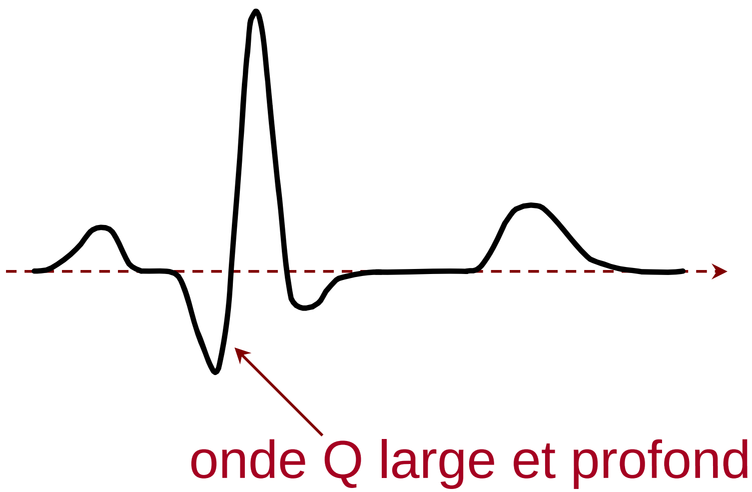


Notions sommaires sur les anomalies électrocardiographiques

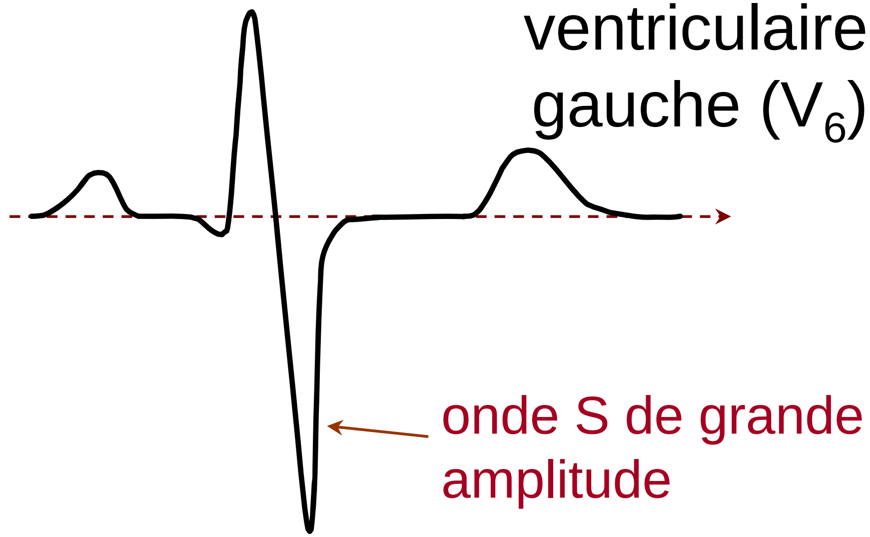
ECG normal (D_{II})



Infarctus du myocarde (D_{II})

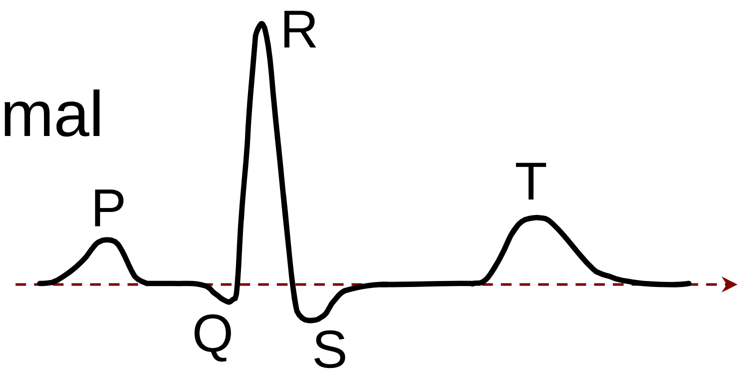


Hypertrophie ventriculaire gauche (V_6)

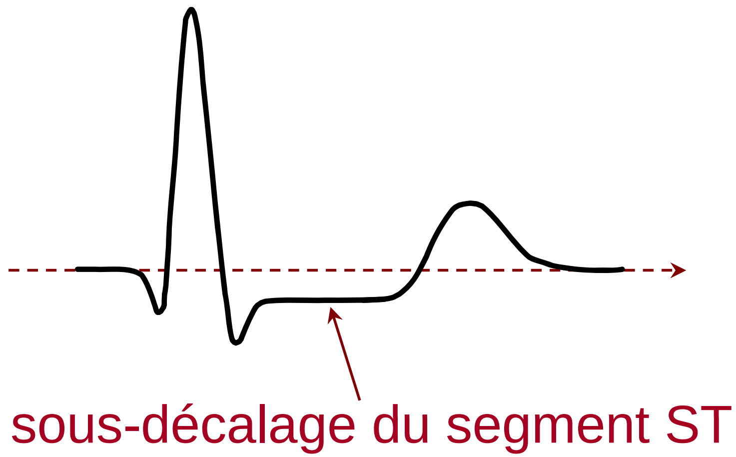


Notions sommaires sur les anomalies électrocardiographiques

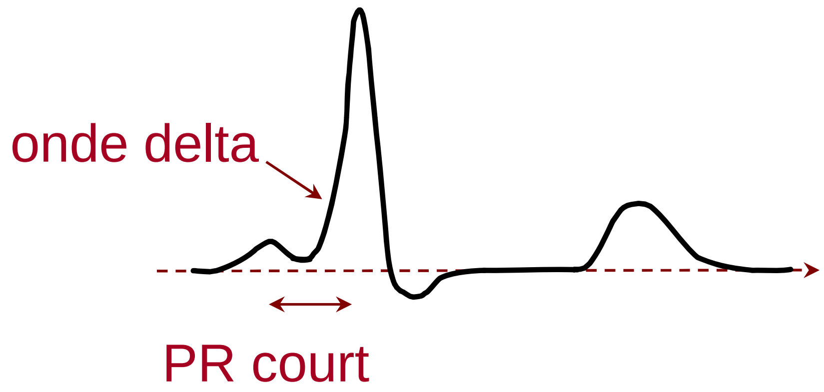
ECG normal



Ischémie myocardique



Trouble de la conduction



4. Autres applications

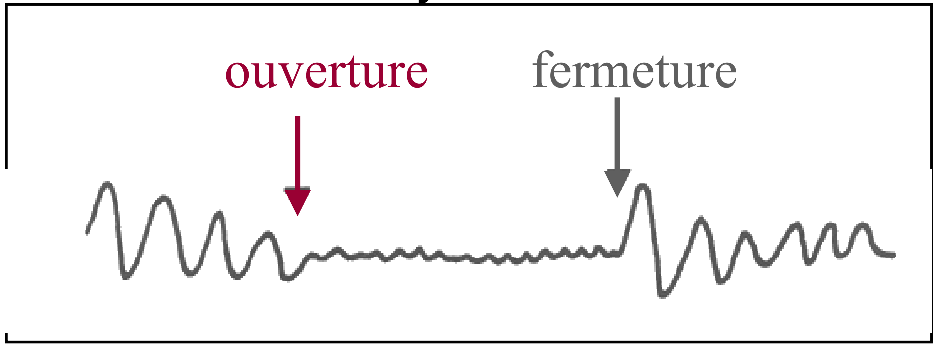
Autres applications

- Electromyographie (EMG)
- Electroencéphalographie (EEG)
- Electrophorèse

L'électroencéphalographie (EEG)

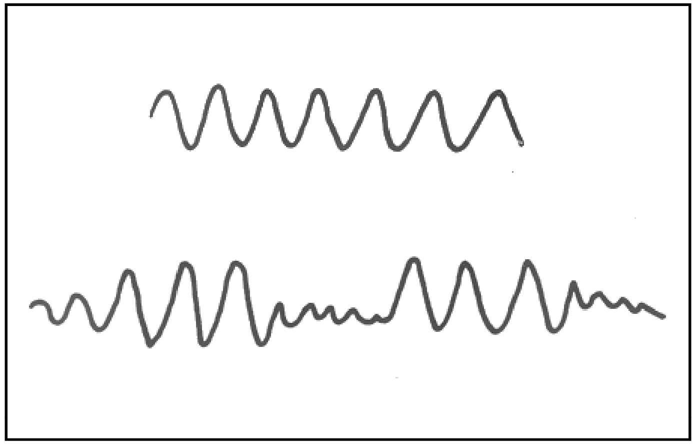
Tracés typiques des ondes EEG

Influence de l'ouverture des yeux sur le rythme α

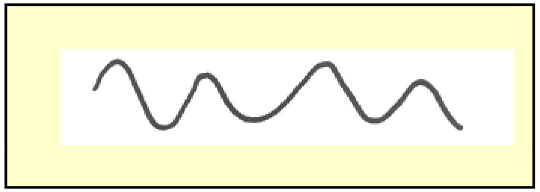


Physio éveillé au repos cortical

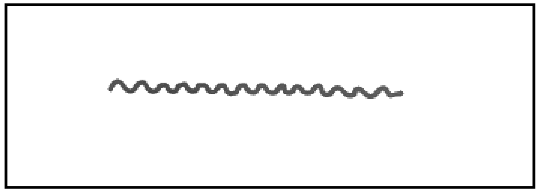
ondes α : 8 à 13 /s



ondes θ : 4 à 7 /s endormi



ondes β : > 13 /s

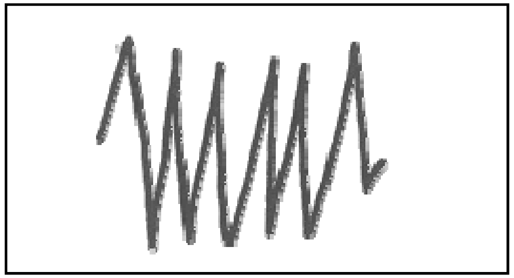


ondes δ : 0,5 à 4 /s

Physio éveillé au repos

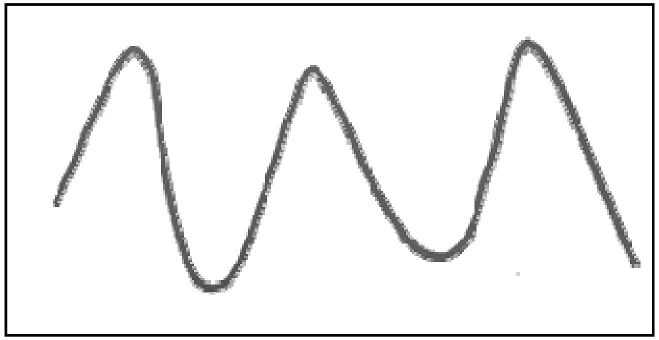
EEG : figures propres à l ’épilepsie

- pointes

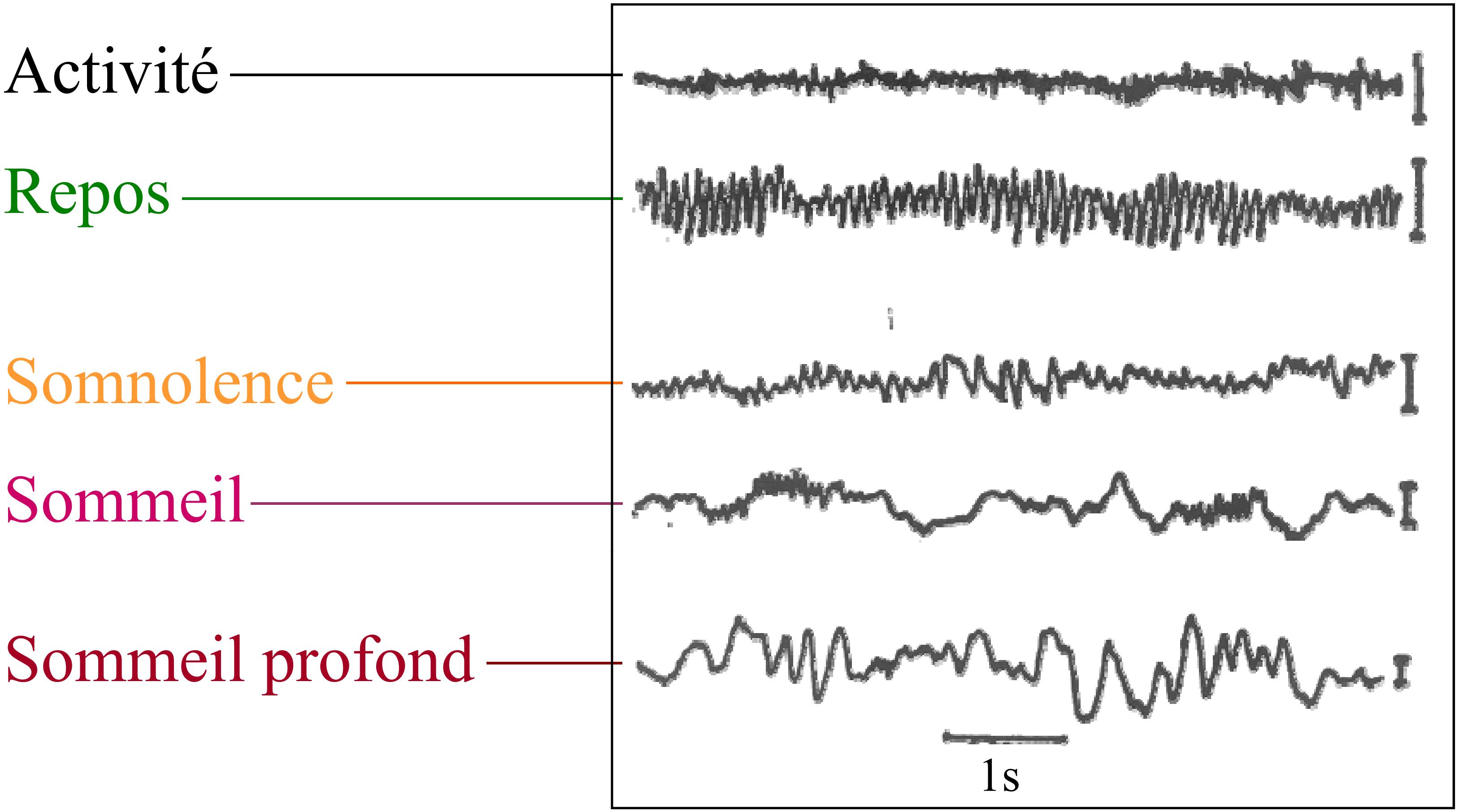


- pointes-ondes

- ondes lentes hypersynchrones



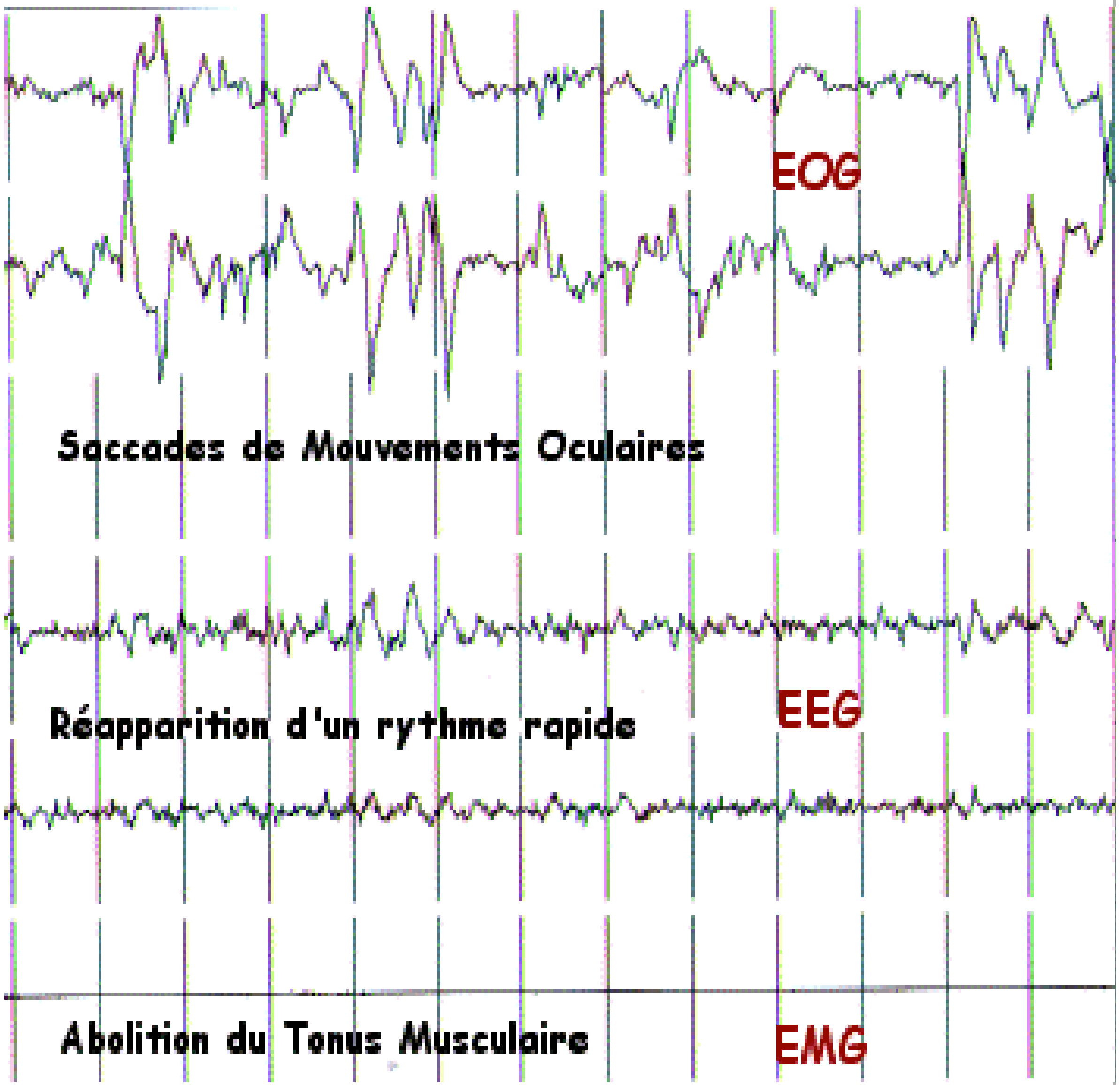
EEG : Tracé de sommeil



Le sommeil normal se traduit par un ralentissement progressif du rythme**.**

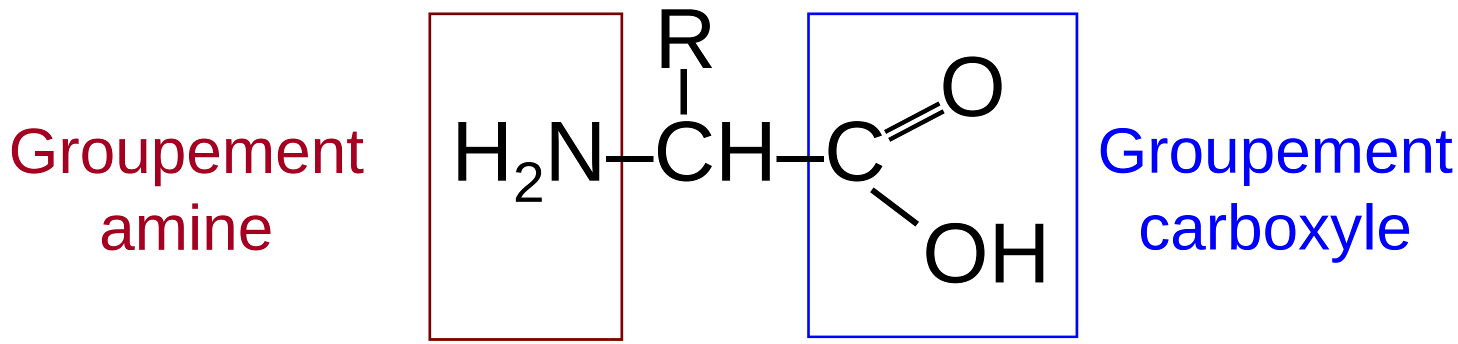
EEG et Sommeil Paradoxal

Activité corticale (EEG) rapide et peu ample, intermédiaire entre celle de l'éveil et celle de l'endormissement.
Mouvements oculaires saccadés (EOG)
Mais, le sujet dort très profondément et présente une atonie posturale complète (EMG).



Autre application : l’électrophorèse

- Structure générale d’un acide aminé (AA) :

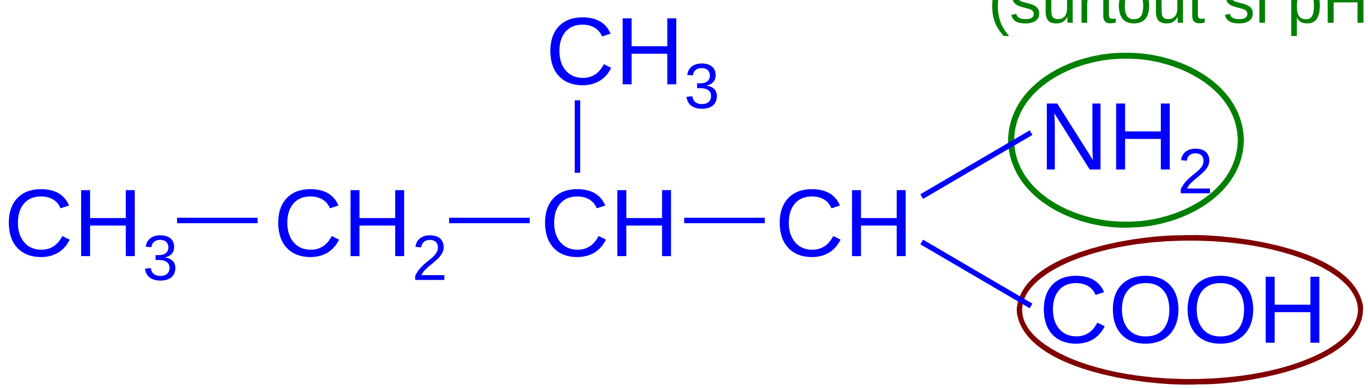


- Ces groupements sont polaires et susceptibles de s’ioniser en fonction du pH $\rightarrow$ équilibres :
  - $R\text{-}COOH \rightleftarrows R\text{-}COO^- + H^+$
  - $R\text{-}NH_3^+ \rightleftarrows R\text{-}NH_2 + H^+$

L’électrophorèse – les AA

- Exemple d’acide aminé avec un moment dipolaire élevé : l’isoleucine

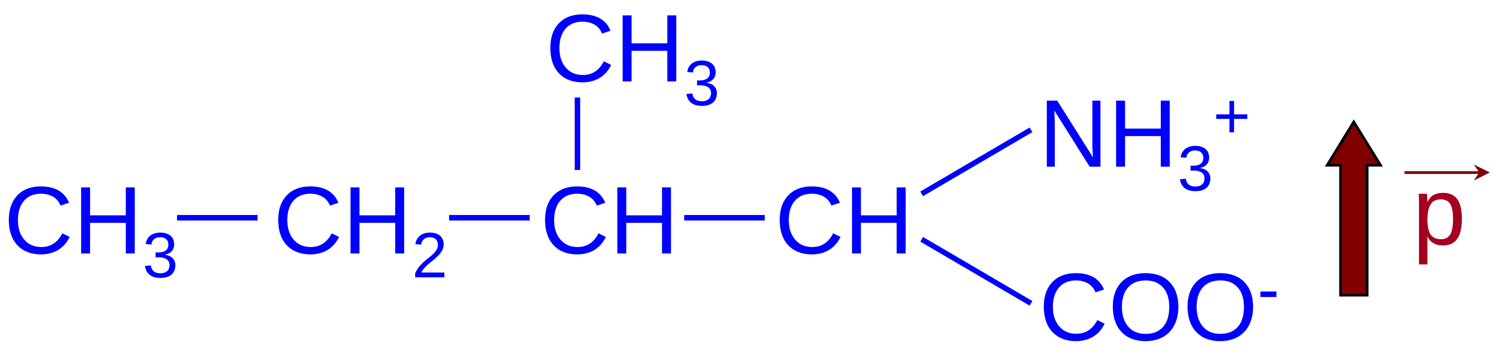
Peut capter un proton (surtout si pH < 10)



Peut céder un proton (surtout si pH >2)

L'électrophorèse – les AA

- Exemple d'acide aminé avec un moment dipolaire élevé : l'isoleucine



L'électrophorèse – les protéines

- Protéine = assemblage de centaines d'AA

  ↳ Possibilité de contenir un grand nombre de charges électriques élémentaires

- -100e < charge globale < +100e

  Elle dépend :

  - de la protéine
  - du pH

Exemples de charges d'une protéine

pH = 2

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & NH_3^+ & & COOH & & & & NH_3^+ & & \\ & & | & & | & & & & | & & \\ {}^+{}_3HN & - & Lys & - & Glu & - & Leu - Leu & - & Lys & - & COOH \end{array}$$

charge nette : +3

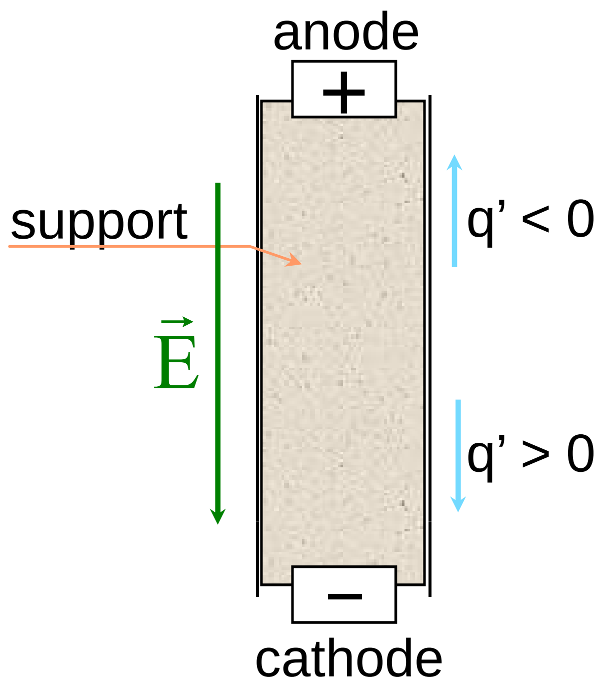
pH = 10

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & NH_3^+ & & COO^- & & & & NH_3^+ & & \\ & & | & & | & & & & | & & \\ {}_2HN & - & Lys & - & Glu & - & Leu - Leu & - & Lys & - & COO^- \end{array}$$

charge nette : 0

pI ou pHi = 10

Principe de l'électrophorèse de zone



Supports solides utilisés :

- acétate de cellulose
- Gel d'agarose
- Gel d'acrylamide
- Capillaire de silice

Mobilité électrophorétique u :

$$\left\|\vec{u}\right\| = \frac{\left\|\vec{v}\right\|}{\left\|\vec{E}\right\|} = \frac{q'}{6\pi\eta r}$$

$\vec{\mathbf{v}}$ **vitesse** $\vec{\mathbf{E}}$ **champ électrique**

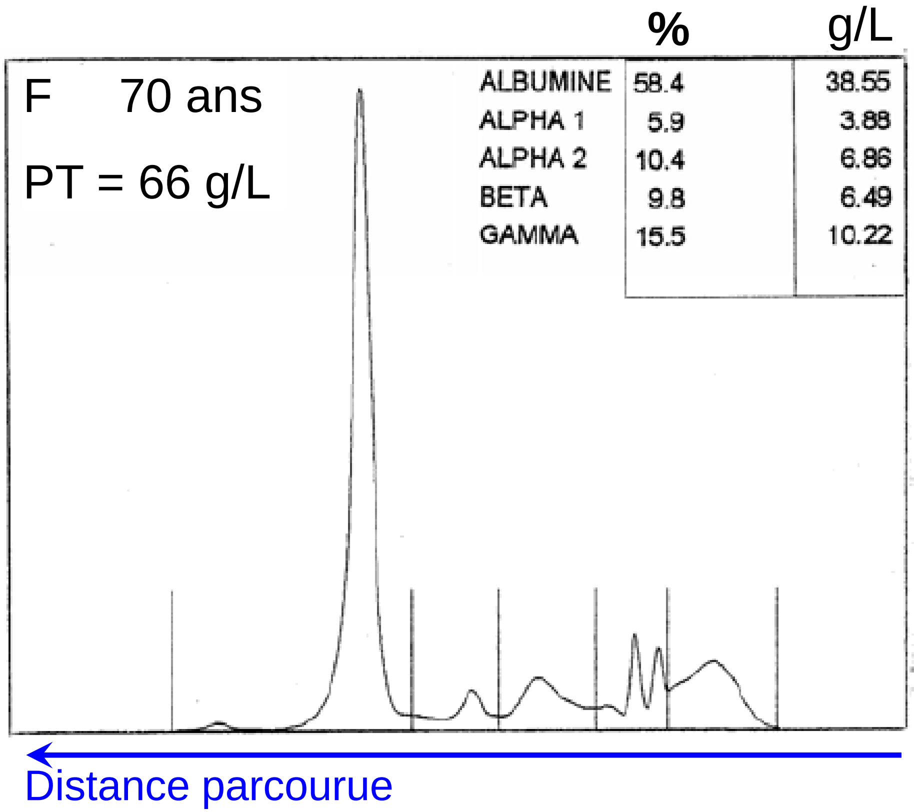
$\vec{\mathbf{F}} = \mathbf{q}'\vec{\mathbf{E}}$ **force électrique**

$\vec{\mathbf{f}}_{\mathbf{Stokes}} = -6\pi\eta\mathbf{r}\vec{\mathbf{v}}$ **force de frottement**

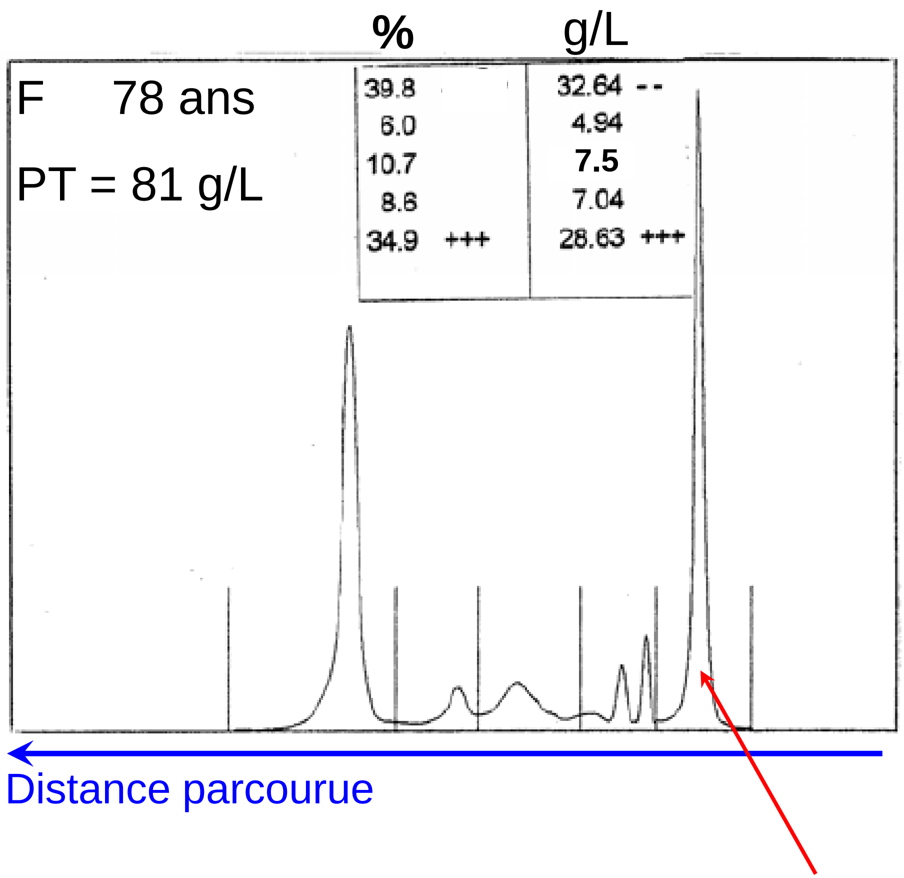
pour une particule sphérique (r) dans un liquide de viscosité η.

À l'équilibre : $\left\|\vec{\mathbf{F}}\right\| = \left\|\vec{\mathbf{f}}_{\mathbf{Stokes}}\right\|$

Exemples de profils électrophorétiques sériques obtenus par électrophorèse capillaire



Profil normal



Gammapathie monoclonale à pic unique (en γ moyen)