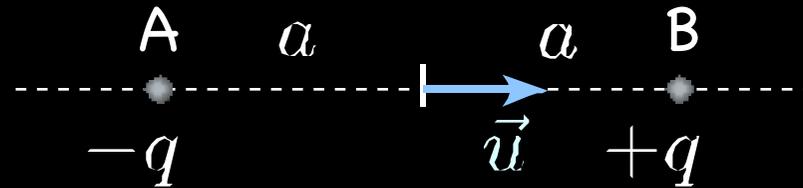


## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

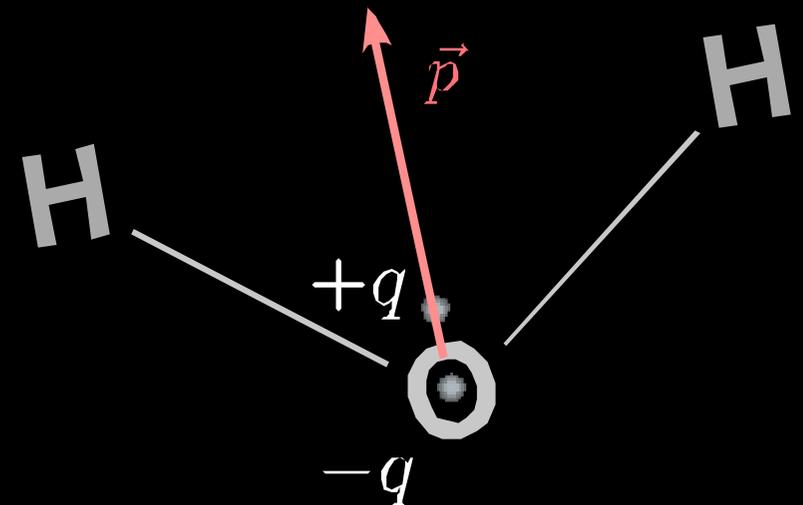
#### 1) Définition - moment dipolaire

Un dipôle est un ensemble de deux charges ponctuelles  $+q$  et  $-q$ , identiques mais de signe opposé, séparées d'une distance égale à  $2a$ .



Un dipôle peut être représenté par son **moment dipolaire**  $\vec{p}$  :  $\vec{p} = q \cdot \overrightarrow{AB} = 2aq \cdot \vec{u}$

où  $q$  est positif, et  $\vec{u}$  est un vecteur unitaire, dirigé de la charge négative vers la charge positive

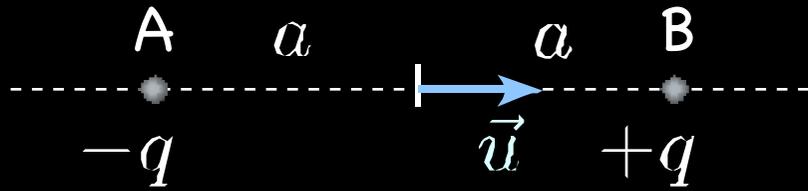


# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 1) Définition - moment dipolaire

Un dipôle est un ensemble de deux charges ponctuelles +q et -q, identiques mais de signe opposé, séparées d'une distance égale à 2a.



Un dipôle peut être représenté par son **moment dipolaire**  $\vec{p}$  :  $\vec{p} = q \cdot \overrightarrow{AB} = 2aq \cdot \vec{u}$

où q est positif, et  $\vec{u}$  est un vecteur unitaire, dirigé de la charge négative vers la charge positive

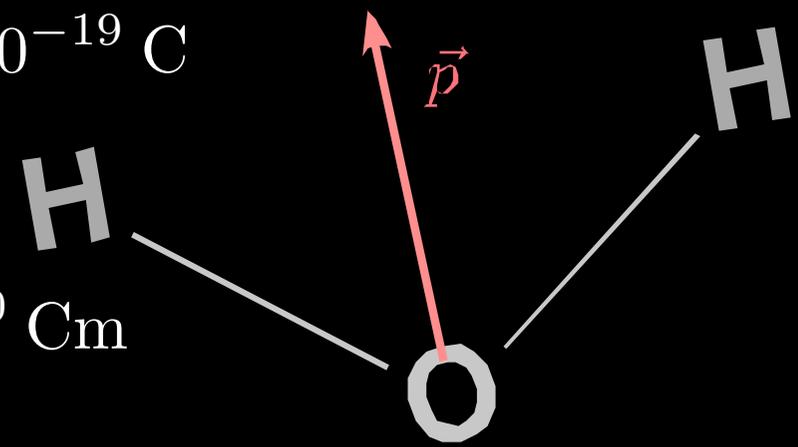
Norme du moment dipolaire :  $p = 2aq$  (unité : le coulomb-mètre)

Ordre de grandeur dans la matière :  $q \approx e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  C

$a \approx 10^{-10}$  m

$p \approx 10^{-29}$  Cm

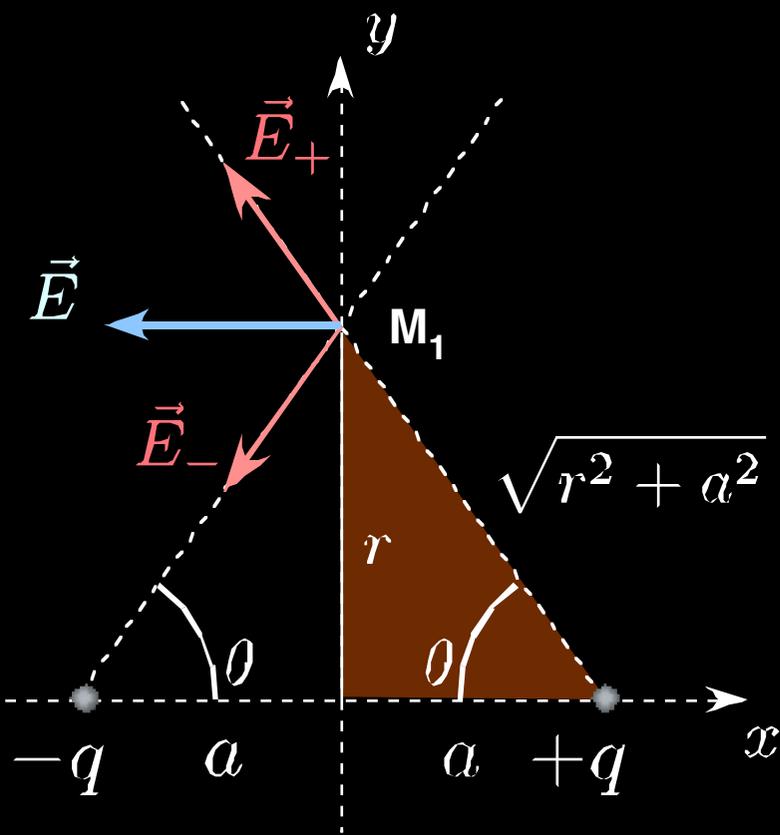
Moment dipolaire de l'eau (H<sub>2</sub>O) :  $p \approx 6,2 \cdot 10^{-30}$  Cm



### Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

#### B. Le dipôle électrique

2) Champ et potentiel créés par un dipôle



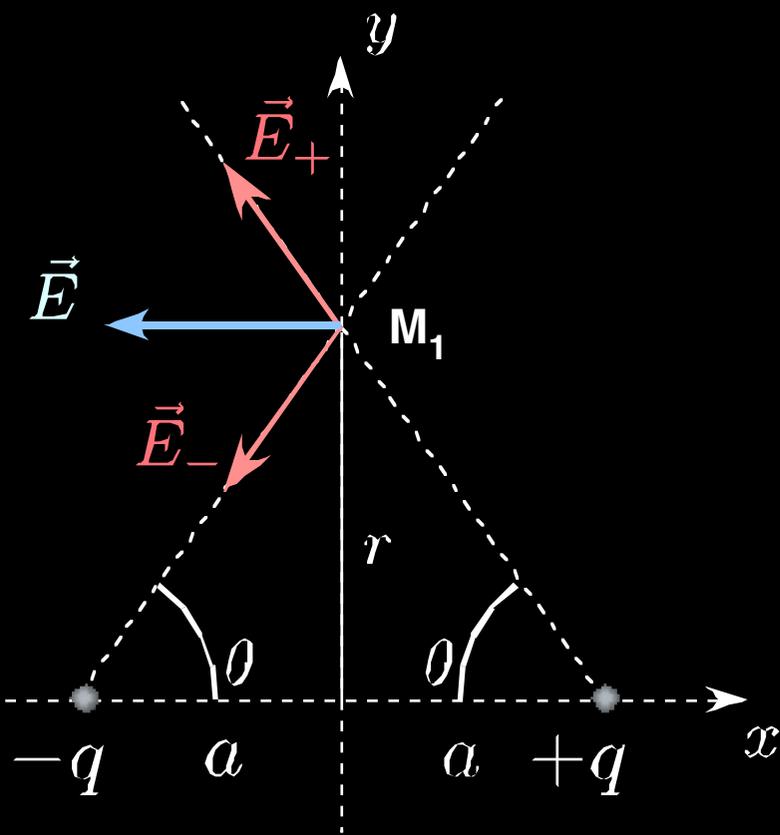
En un point  $M_1$  sur la médiatrice du dipôle :  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$

Par symétrie, on a  $E_+ = E_- = \frac{Kq}{r^2 + a^2}$

### Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

#### B. Le dipôle électrique

2) Champ et potentiel créés par un dipôle



Loin du dipôle ( $r \gg a$ ) :

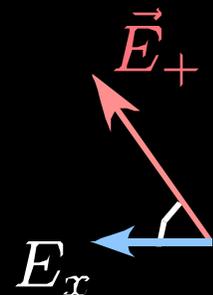
En un point M1 sur la médiatrice du dipôle :  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$

Par symétrie, on a  $E_+ = E_- = \frac{Kq}{r^2 + a^2}$

Dans l'addition vectorielle, les composantes sur y s'annulent. Les composantes sur x s'ajoutent.

$$E = 2E_x = 2E_+ \cos \theta$$

or  $\cos \theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}}$



d'où

$$E = \frac{2aqK}{(a^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$\vec{E} = \frac{-K\vec{p}}{(a^2 + r^2)^{3/2}}$$

champ électrique au voisinage d'un dipôle, sur sa médiatrice

$$E = \frac{2aqK}{r^3}$$

$$\vec{E} = \frac{-K\vec{p}}{r^3}$$

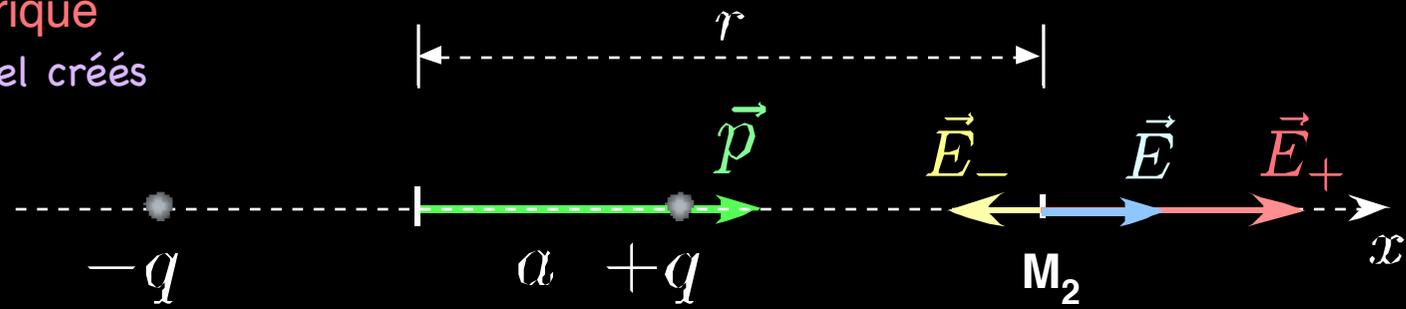
champ électrique loin d'un dipôle, sur sa médiatrice

Potentiel électrique au point M1 :  $V = V_+ + V_- = \frac{Kq}{r} + \frac{K(-q)}{r} = 0$

### Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

#### B. Le dipôle électrique

2) Champ et potentiel créés par un dipôle



En un point  $M_2$  sur l'axe du dipôle :  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$

avec  $\vec{E}_+ = \frac{Kq}{(r-a)^2} \cdot \vec{u}$  et  $\vec{E}_- = \frac{-Kq}{(r+a)^2} \cdot \vec{u}$

soit :  $\vec{E} = Kq \frac{4ar}{(r^2 - a^2)^2} \cdot \vec{u}$  ou encore

$$\vec{E} = \frac{2Kr}{(r^2 - a^2)^2} \cdot \vec{p}$$

champ électrique sur l'axe et au voisinage d'un dipôle

Loin du dipôle ( $r \gg a$ ) :  $\vec{E} = \frac{2K}{r^3} \cdot \vec{p}$

champ électrique lointain sur l'axe d'un dipôle

Potentiel électrique au point  $M_2$  :

$$V = V_+ + V_- = \frac{Kq}{r-a} + \frac{K(-q)}{r+a} \quad \text{d'où}$$

$$V = \frac{Kp}{r^2 - a^2}$$

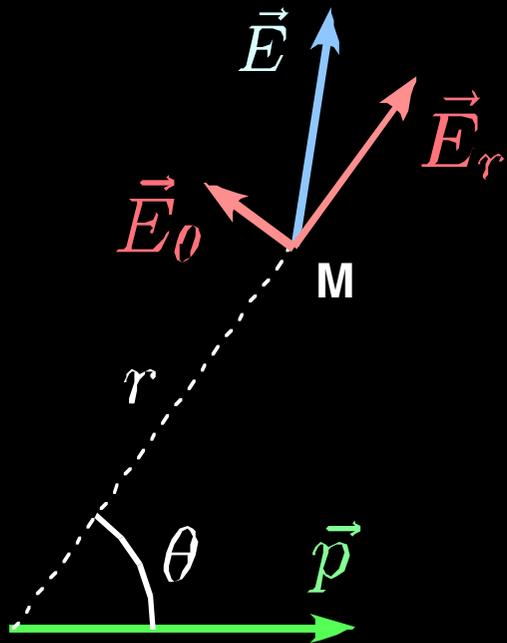
et

$$V = \frac{Kp}{r^2} \quad \text{loin du dipôle } (r \gg a)$$

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 2) Champ et potentiel créés par un dipôle



Le potentiel électrique un point M quelconque, éloigné du dipôle :

$$V = \frac{Kp \cos \theta}{r^2}$$

En ce point M le champ E créé par le dipôle peut se décomposer en une composante radiale :

$$E_r = \frac{2Kp \cos \theta}{r^3}$$

et une composante normale :

$$E_\theta = \frac{Kp \sin \theta}{r^3}$$

Ces équations permettent de modéliser l'action d'un dipôle sur son entourage (connaissant champ et potentiel électrique créés par le dipôle, il est donc possible de calculer la force qui s'exercerait sur une charge placée au point M, ainsi que son énergie potentielle).

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad E_P = q \cdot V$$

La matière étant généralement constituée de dipôles électriques, il nous faut connaître comment l'existence d'un champ électrique influence non pas une autre charge ponctuelle, mais un autre dipôle.

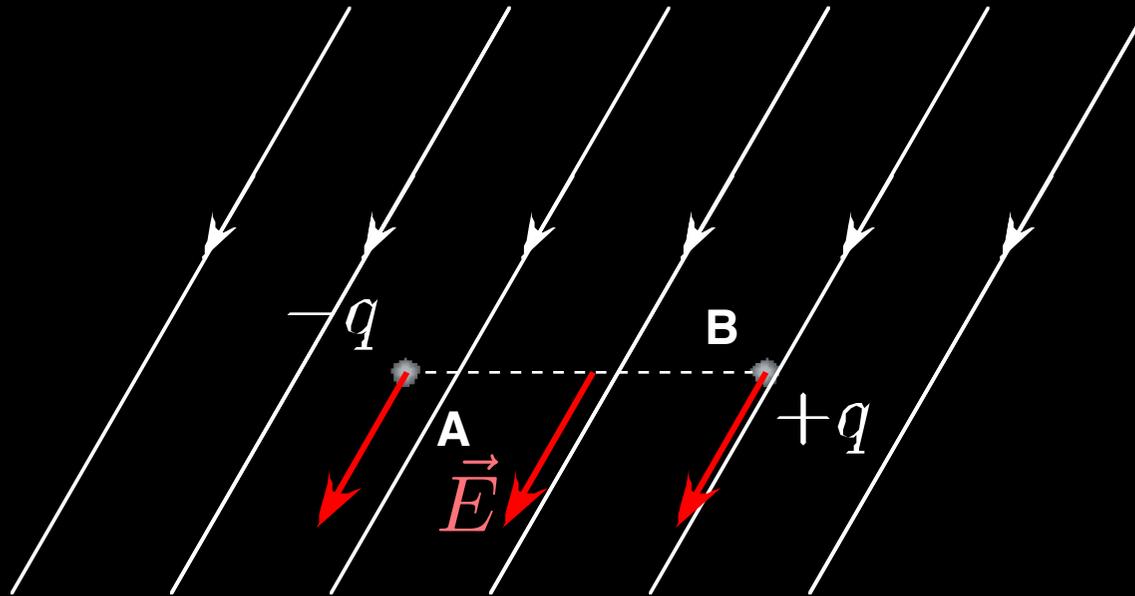
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME

Qu'est-ce qu'un **champ électrique uniforme** (ou isotrope) ?

C'est un champ identique en tout point de l'espace (norme, direction et sens).



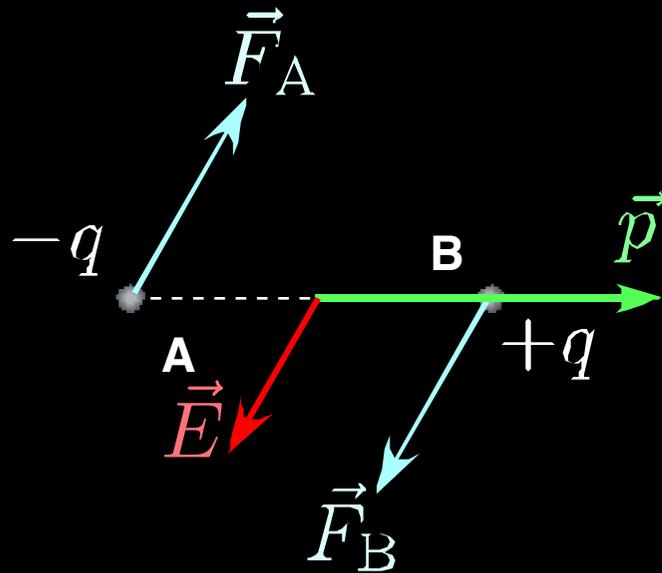
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME

Qu'est-ce qu'un **champ électrique uniforme** (ou isotrope) ?

C'est un champ identique en tout point de l'espace (norme, direction et sens).



$$\text{Force : } \vec{F} = \pm q \vec{E}$$

$$\text{Couple : } \vec{\Gamma} = \vec{p} \times \vec{E}$$

Chaque charge subit une force électrostatiques,  $F_A$  et  $F_B$ .

Si le dipôle, rigide, ne se déforme pas, il subit un couple de force. Son centre de gravité est immobile (PFD).

Le couple de force tend à faire tourner le dipôle sur son axe, de manière à aligner son moment dipolaire avec le champ électrique.

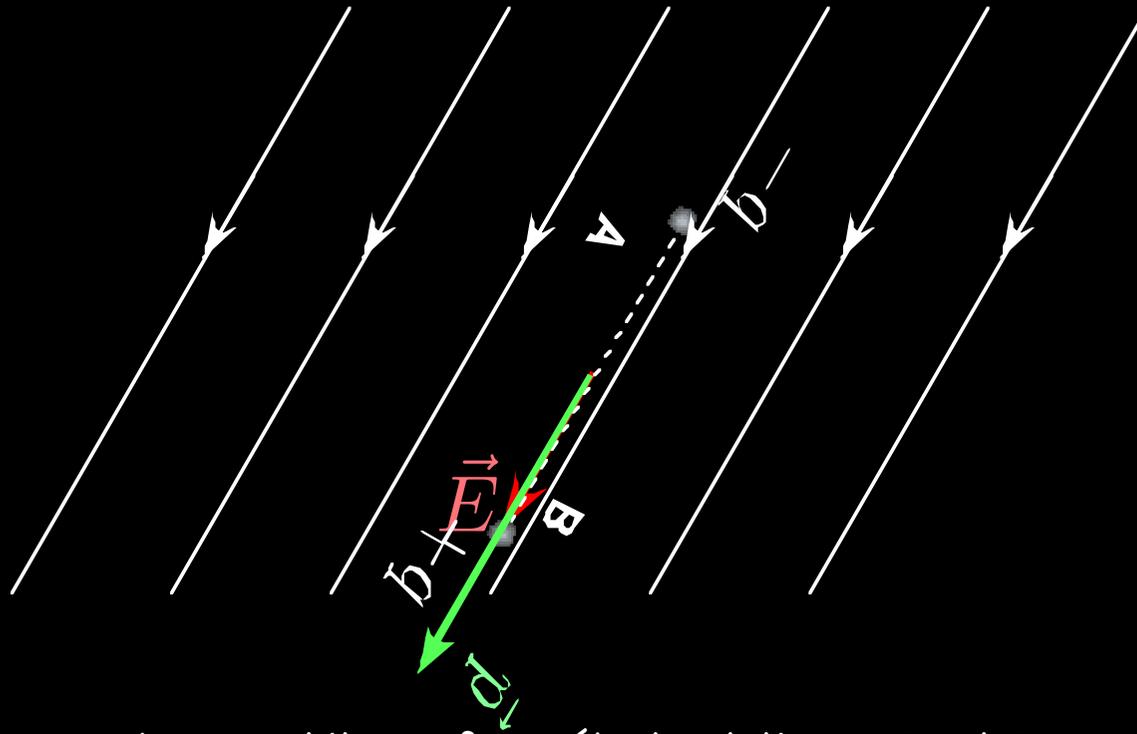
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME

Qu'est-ce qu'un **champ électrique uniforme** (ou isotrope) ?

C'est un champ identique en tout point de l'espace (norme, direction et sens).



Force :  $\vec{F} = \pm q \vec{E}$

Couple :  $\vec{\Gamma} = \vec{p} \times \vec{E}$

Chaque charge subit une force électrostatiques,  $F_A$  et  $F_B$ .

Si le dipôle, rigide, ne se déforme pas, il subit un couple de force. Son centre de gravité est immobile (PFD).

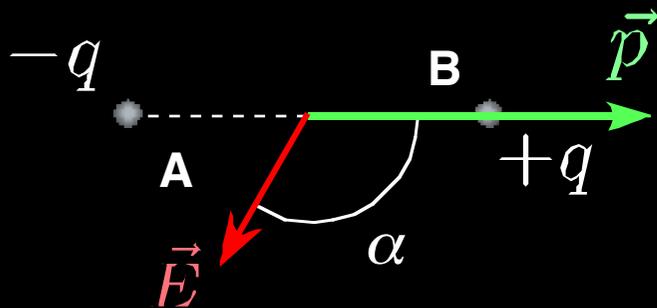
Le couple de force tend à faire tourner le dipôle sur son axe, de manière à aligner son moment dipolaire avec le champ électrique.

En résumé : le dipôle subit une rotation (si elle est possible) autour de son axe de manière à s'aligner dans le champ. Pas de translation.

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME



L'énergie potentielle du dipôle est la somme des énergies potentielles de chacune des deux charges :

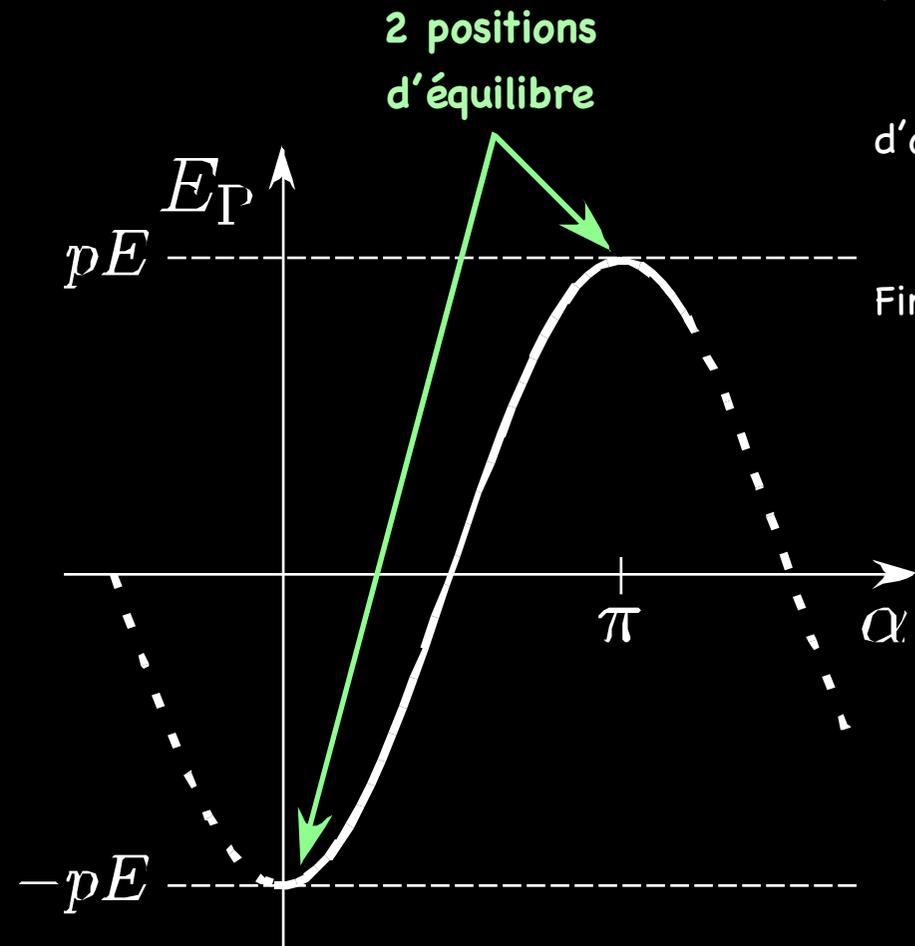
$$E_P = (-q) \cdot V_A + q \cdot V_B = q (V_B - V_A)$$

on a vu : 
$$\vec{E} = -\frac{dV}{dl} \cdot \vec{dl}$$

d'où 
$$E_P = q \int_A^B -\vec{E} \cdot \vec{dl} = -q \vec{AB} \cdot \vec{E}$$

Finalemment :

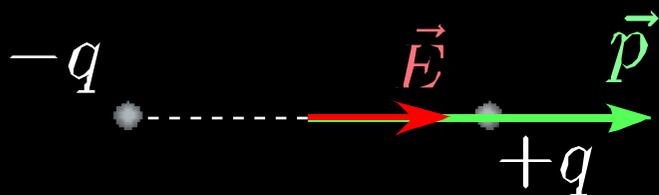
$$E_P = -\vec{p} \cdot \vec{E} = -pE \cos \alpha$$



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

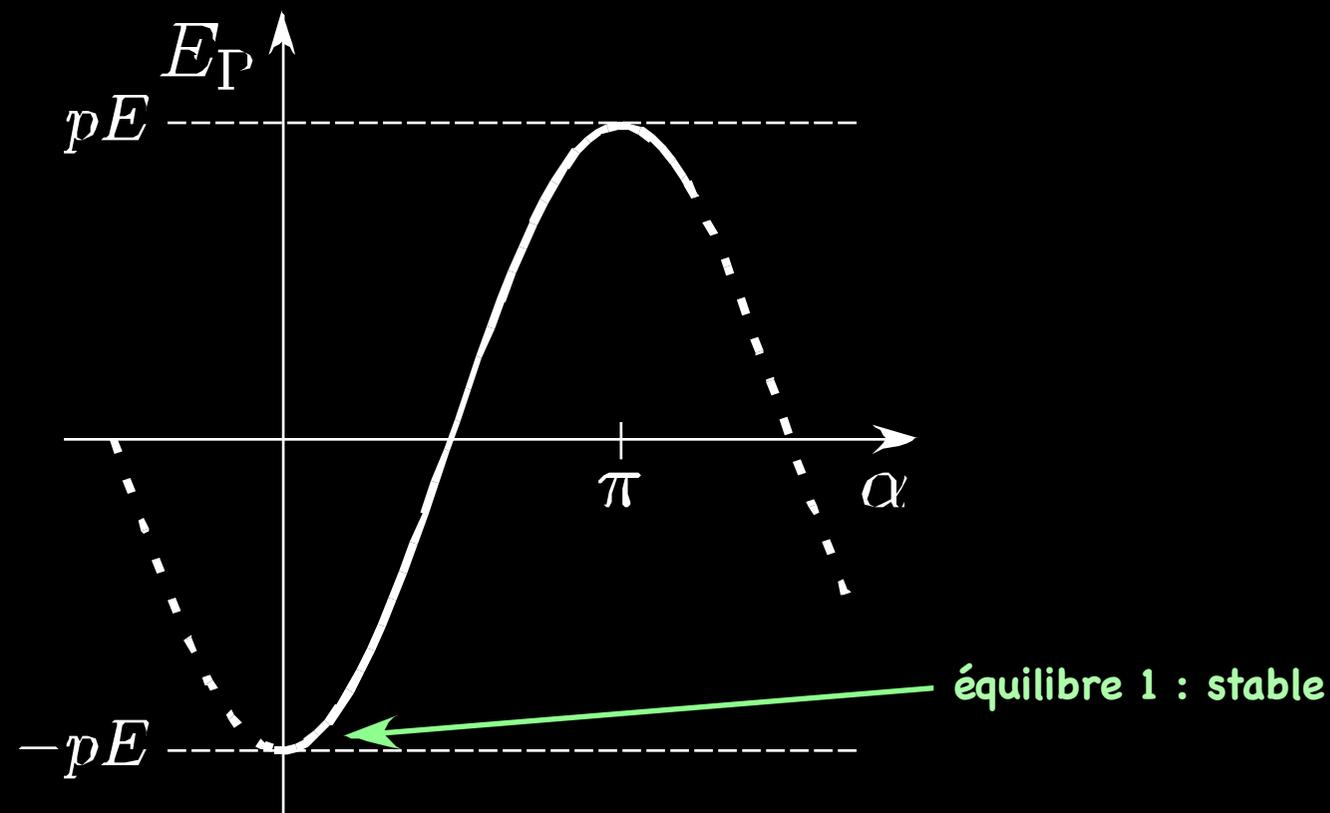
### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME



Equilibre 1 :  $\alpha = 0$

cdts d'équilibre  $\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_A + \vec{F}_B = 0 \\ \vec{\Gamma} = 0 \end{array} \right.$

$E_P = -pE$  (énergie potentielle minimale)



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME

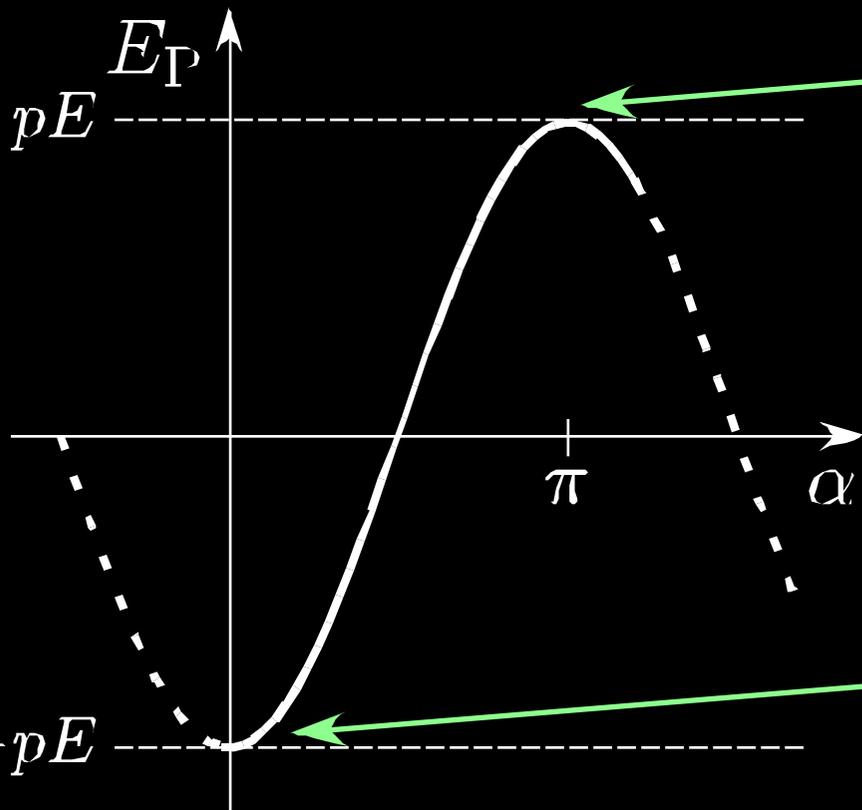


**Equilibre 2** :  $\alpha = \pi$

cdts d'équilibre

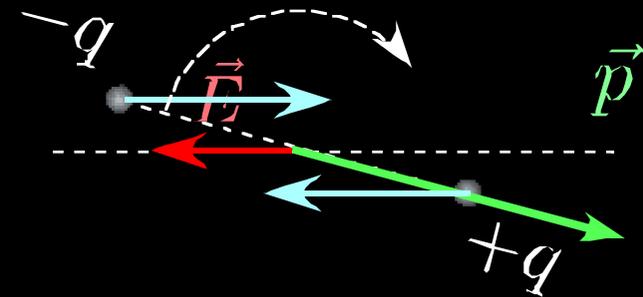
$$\begin{cases} \vec{F}_A + \vec{F}_B = 0 \\ \vec{\Gamma} = 0 \end{cases}$$

$$E_P = pE \quad (\text{énergie potentielle maximale})$$



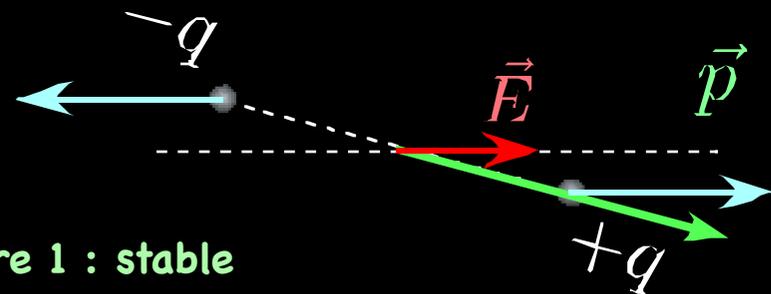
#### équilibre 2 : instable

Si on s'écarte légèrement de la position d'équilibre, une ou plusieurs forces s'exercent de manière à s'éloigner de la position d'équilibre instable.



#### équilibre 1 : stable

Si on s'écarte légèrement de la position d'équilibre, une ou plusieurs forces s'exercent de manière retourner vers l'équilibre stable



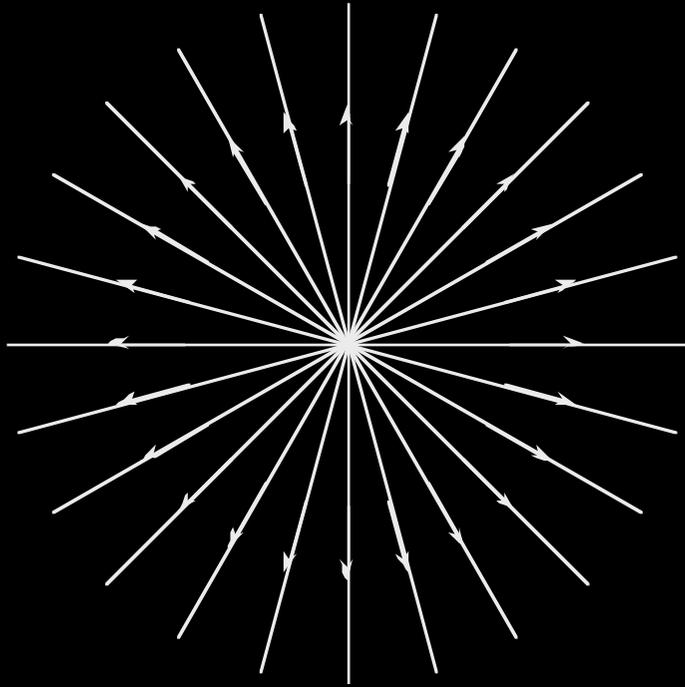
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

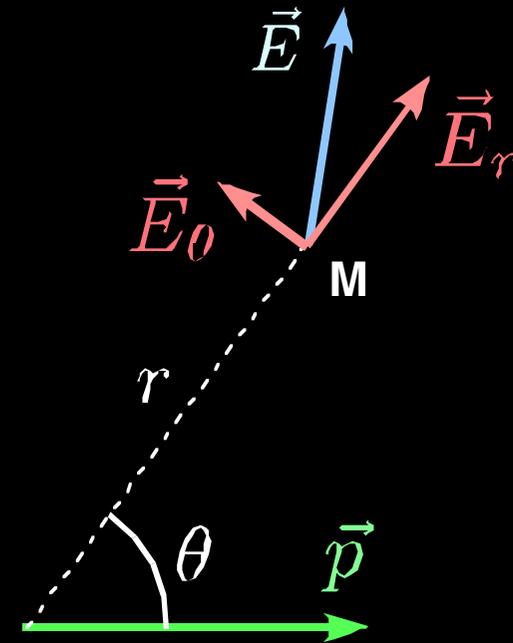
Dans la nature, les champs électriques sont rarement uniformes (ou anisotrope).

Nous avons déjà vu que le champ créé par un charge ponctuelle n'est pas uniforme.



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

De même, le champ électrique créé par un dipôle électrique est anisotrope.



$$E_r = \frac{2Kp \cos \theta}{r^3}$$

$$E_\theta = \frac{Kp \sin \theta}{r^3}$$

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

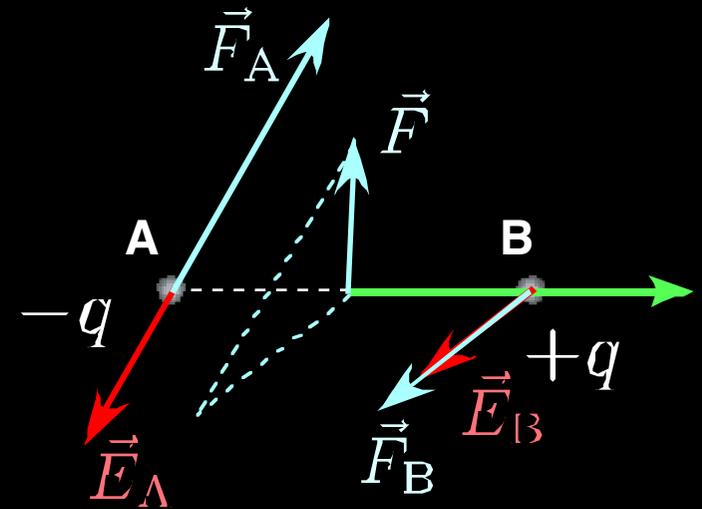
#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

Dans la nature, les champs électriques sont rarement uniformes (ou anisotrope).

Le champ électrique n'est pas uniforme :  $\vec{E}_A \neq \vec{E}_B$

$$\text{d'où } \vec{F}_A + \vec{F}_B = q \left( -\vec{E}_A + \vec{E}_B \right) \neq 0$$

Le centre de gravité du dipôle subit une force résultante  $F$ , il est donc soumis à une accélération.



Placé dans un champ non uniforme, un dipôle libre de se déplacer est animé d'un double mouvement :

- un mouvement de translation de son centre de gravité, dans le sens du champ électrique croissant;
- un mouvement de rotation de manière à orienter son moment dipolaire sur les lignes de champ.

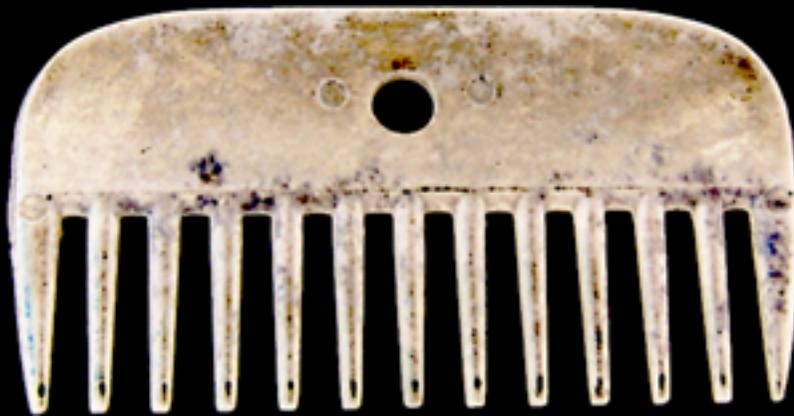
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

Exemple du peigne et des morceaux de papier.

Un peigne, électriquement neutre, est approché d'un petit morceau de papier, lui aussi électriquement neutre. Que se passe-t-il ?



Rien ne se passe !

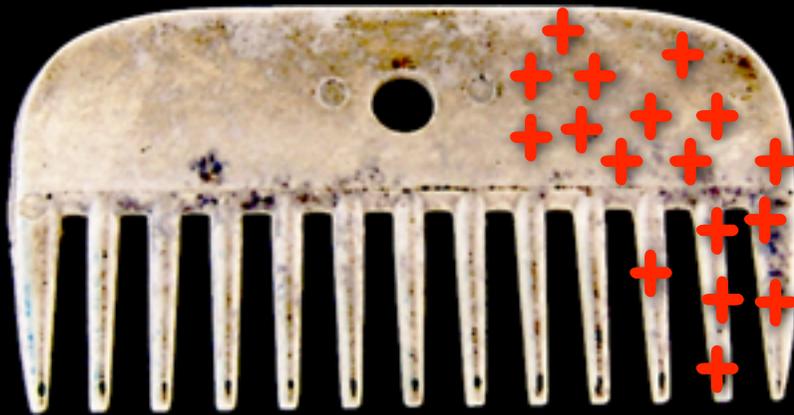
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

Exemple du peigne et des morceaux de papier.

Un peigne chargé positivement, est approché d'un petit morceau de papier électriquement neutre. Que se passe-t-il ?



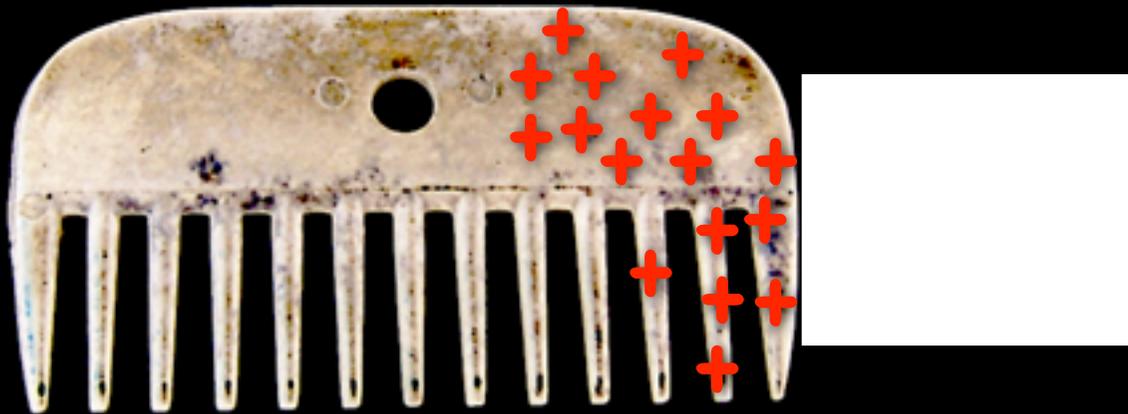
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

Exemple du peigne et des morceaux de papier.

Un peigne chargé positivement, est approché d'un petit morceau de papier électriquement neutre. Que se passe-t-il ?



Le peigne... attire le papier !

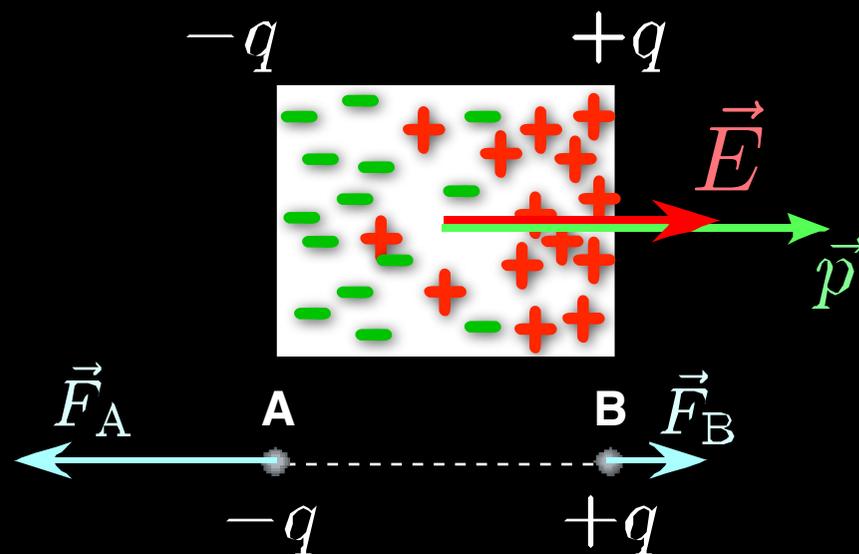
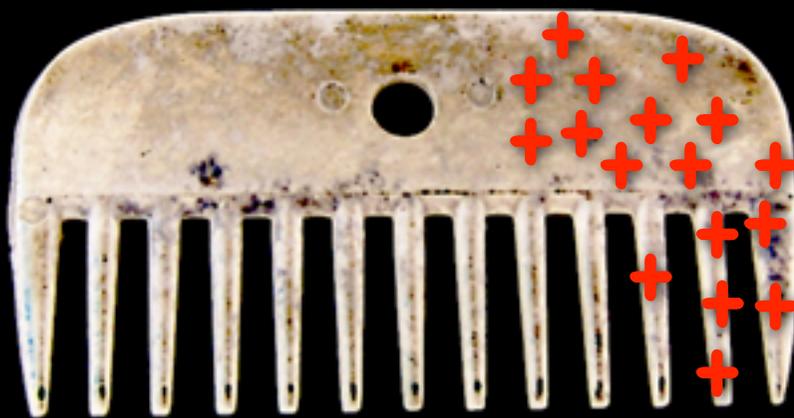
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

Exemple du peigne et des morceaux de papier.

Un peigne chargé positivement, est approché d'un petit morceau de papier électriquement neutre. Que se passe-t-il ?



Sous l'effet du champ électrique créé par le peigne, quelques électrons du papier sont attirés par le peigne et se déplacent vers celui-ci, laissant derrière des charges positives. Le papier est polarisé : on parle de **dipôle induit** (le papier est devenu un dipôle, il possède un moment dipolaire non nul).

Comme le champ électrique du peigne n'est pas uniforme (il diminue lorsqu'on s'éloigne du peigne), la charge négative du papier subit une force attractive plus grande que sa charge positive. Le centre de gravité du papier entre en translation sous l'effet de l'attraction résultante.

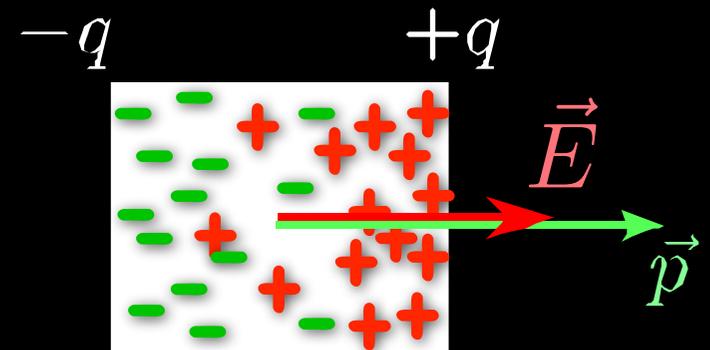
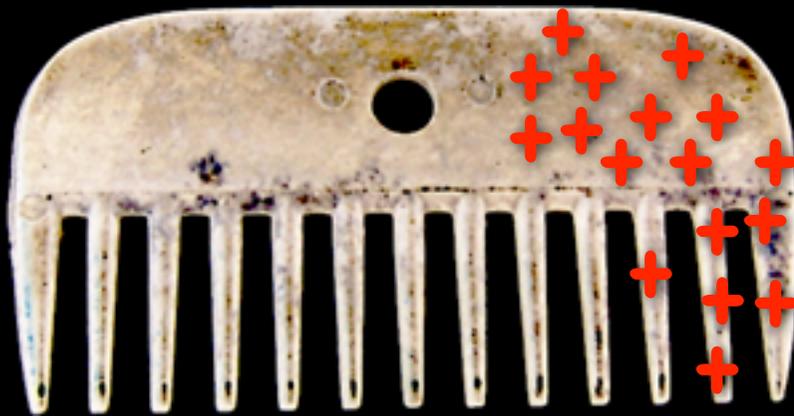
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle : CHAMP ELECTRIQUE NON UNIFORME

Exemple du peigne et des morceaux de papier.

Un peigne chargé positivement, est approché d'un petit morceau de papier électriquement neutre. Que se passe-t-il ?



Le papier subit-il une rotation ?

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

##### a. Molécules et atomes

### DIPÔLES PERMANENTS

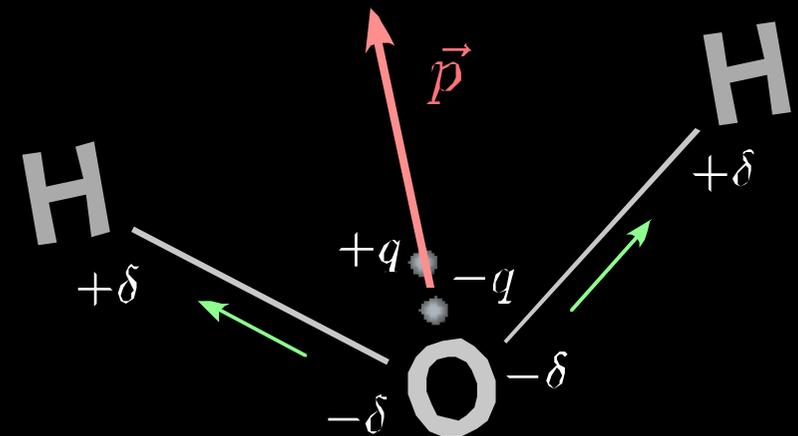
Une molécule est un assemblage de différents atomes, liés par des liaisons chimiques qui traduisent la mise en commun d'électrons.

Dans les molécules diatomiques homonucléaires, du type  $H_2$  ou  $O_2$ , le partage des électrons est totalement symétrique : les électrons mis en communs sont situés à part égale sur chaque atome.

Ces molécules ne possèdent aucun moment dipolaire car le barycentre des charges positives de la molécule coïncide avec le barycentre des charges négatives. D'autres molécules qui possèdent un centre de symétrie sont apolaires :  $CH_4$ ,  $CCl_4$ , etc...

Les liaisons hétéronucléaires possèdent un moment dipolaire permanent du fait que certains atomes sont plus électronégatifs que d'autres. Ainsi, la molécule d'eau possède deux liaisons polaires, ce qui confère globalement à la molécule un moment dipolaire permanent  $p = 6,2 \cdot 10^{-30} \text{ C.m}$

La polarisation permanente de la molécule d'eau permet d'expliquer beaucoup de ses propriétés : solvant, micro-ondes, amphotère, etc...



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

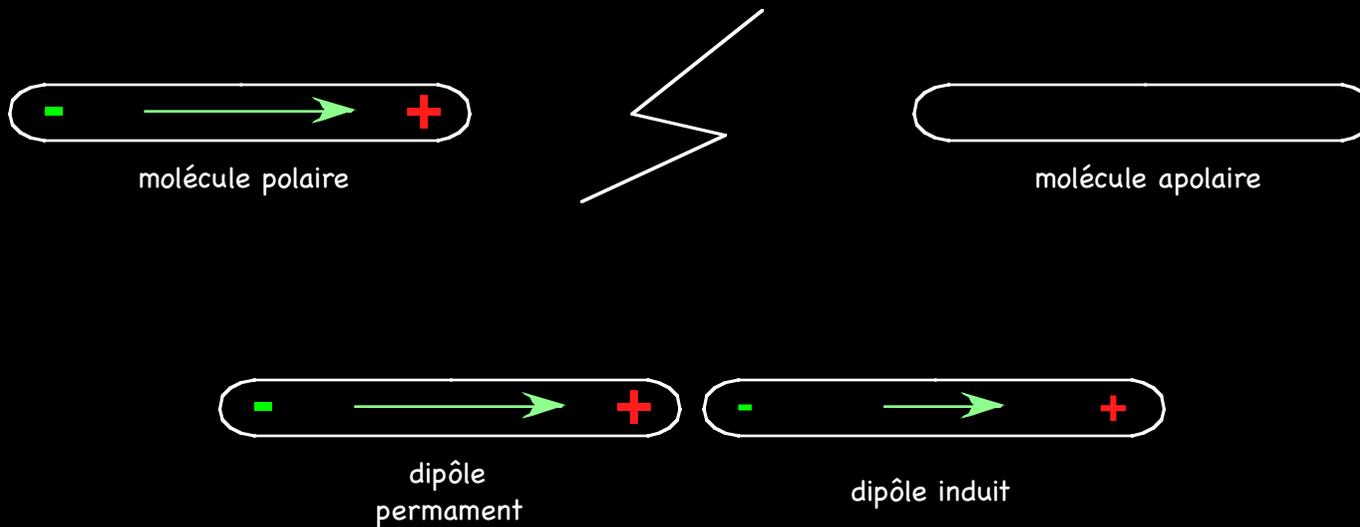
### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

##### a. Molécules et atomes

### DIPOLES INDUITS

Que se passe-t-il lorsqu'une molécule non polaire est placée dans un solvant polaire ? La même chose que pour le morceau de papier au voisinage du peigne chargé : la molécule apolaire se polarise.



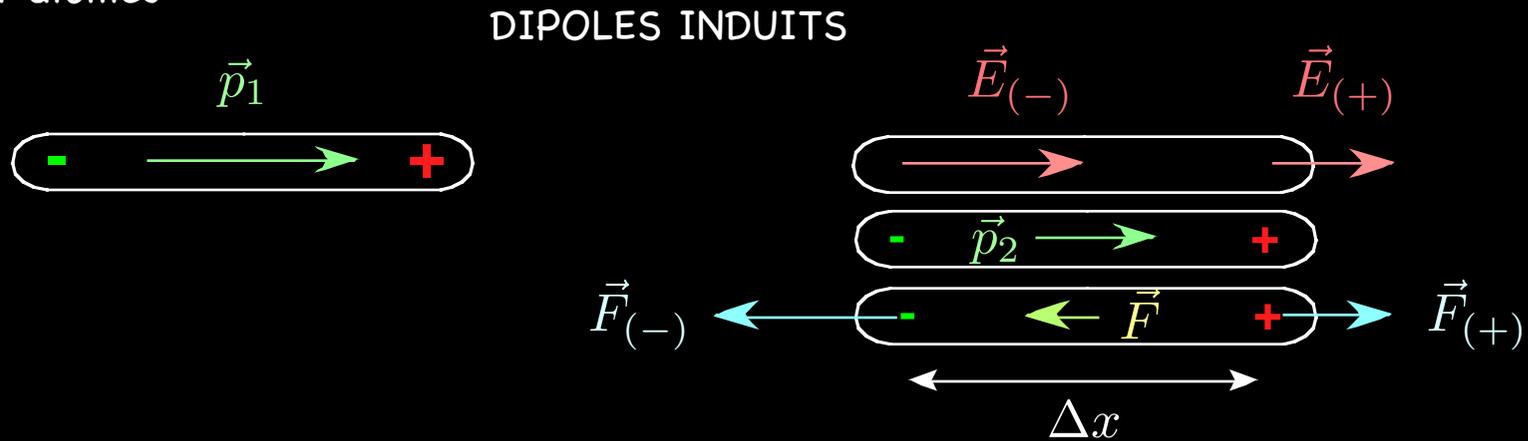
Le moment dipolaire induit est d'autant plus fort que le moment dipolaire du solvant est élevé et que la molécule apolaire est polarisable.

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

#### a. Molécules et atomes



Sous l'effet du champ électrique créé par le dipôle permanent  $E = \frac{2Kp_1}{x^3}$ , la répartition des charges dans la molécule apolaire est perturbée, faisant apparaître un dipôle induit.

Le champ n'est pas uniforme (il dépend de la distance  $x$ ), il existe donc une force résultante qui s'exerce sur le dipôle induit :

$$F = -qE_{(-)} + qE_{(+)} = q \cdot \Delta E \quad \text{or} \quad p_2 = q \cdot \Delta x$$

$$\text{d'où} \quad F = p_2 \frac{\Delta E}{\Delta x} \quad \text{soit encore}$$

$$F = p_2 \frac{dE}{dx}$$

Or  $p_2$  est proportionnel à  $E$ , il varie comme  $1/x^3$ , et  $dE/dx$  varie comme  $1/x^4$ .

Donc, la force attractive entre les dipôles varie comme :

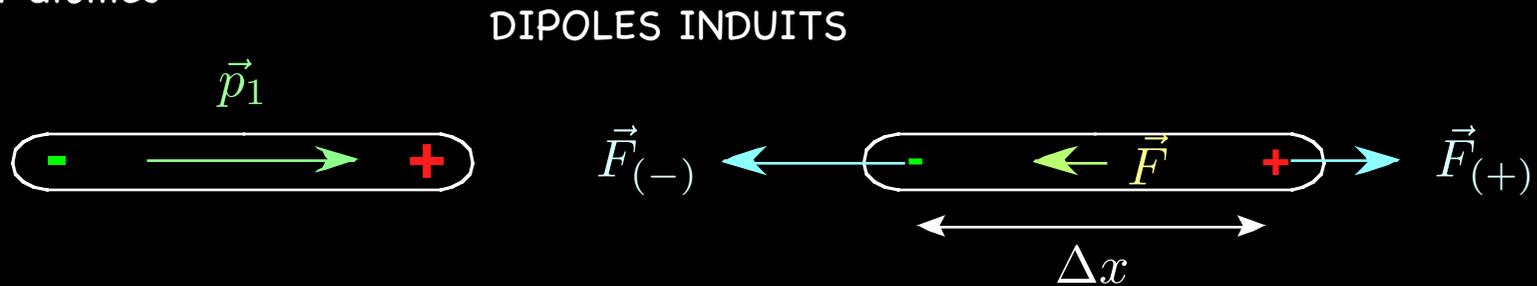
$$F \propto \frac{1}{x^7}$$

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

#### a. Molécules et atomes



La force attractive entre les dipôles varie comme :

$$F \propto \frac{1}{x^7}$$

On a vu la relation entre énergie potentielle et force électrostatique :  $F = -\frac{dE_P}{dx}$

D'où l'énergie d'attraction dipôle/dipôle, lorsque les molécules ne sont pas trop proches l'une de l'autre :

$$E_{\text{attraction}} = -\frac{k_1}{x^6}$$

On montre que si les molécules se rapprochent, la répulsion entre cortèges électroniques devient prépondérante : à courte distance, l'énergie d'interaction est due à la répulsion, elle est de la forme :

$$E_{\text{répulsion}} = +\frac{k_2}{x^{12}}$$

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

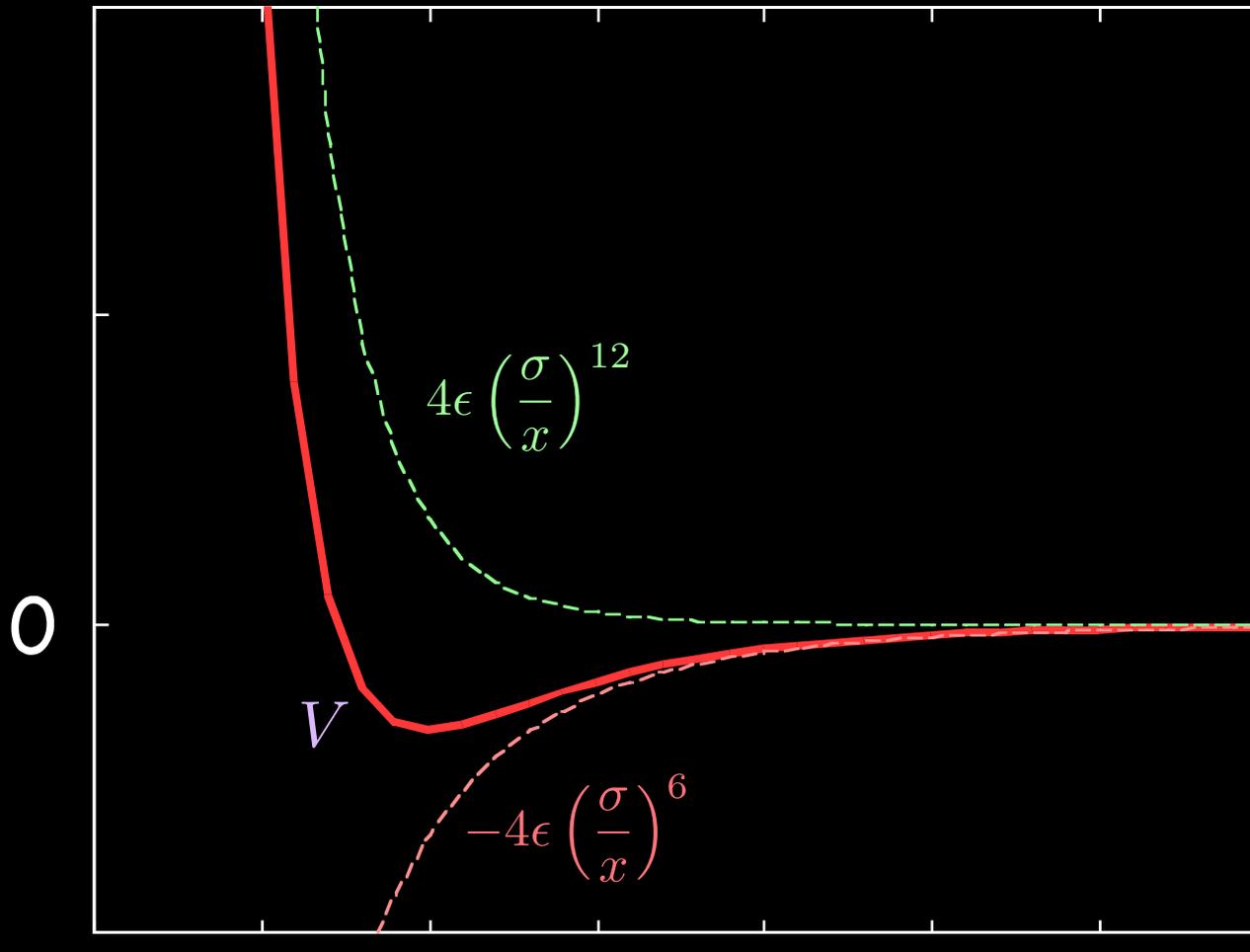
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

#### a. Molécules et atomes

Potentiel de Lennard Jones

$$V = 4\epsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{x} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{x} \right)^6 \right]$$



V = énergie

Le potentiel de Lennard Jones est la somme des interactions polaires attractives et répulsives. Il permet de modéliser les interactions entre 2 atomes ou 2 molécules au sein de la matière.

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

##### a. Molécules et atomes

### Interactions de Van der Waals

Les interactions de Van Der Waals sont de 3 types.

1/ interactions dipôle permanent – dipôle permanent : **forces de Keesom**

2/ interactions dipôle permanent – dipôle induit : **forces de Debye**

3/ interactions entre dipôles instantanés : **forces de London**

Ces 3 interactions permettent d'expliquer les phénomènes de solvatation des ions complexes, de calculer les constantes d'acidité, d'étudier la stabilité des composés comme les liaisons hydrogènes (Keesom), etc...

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

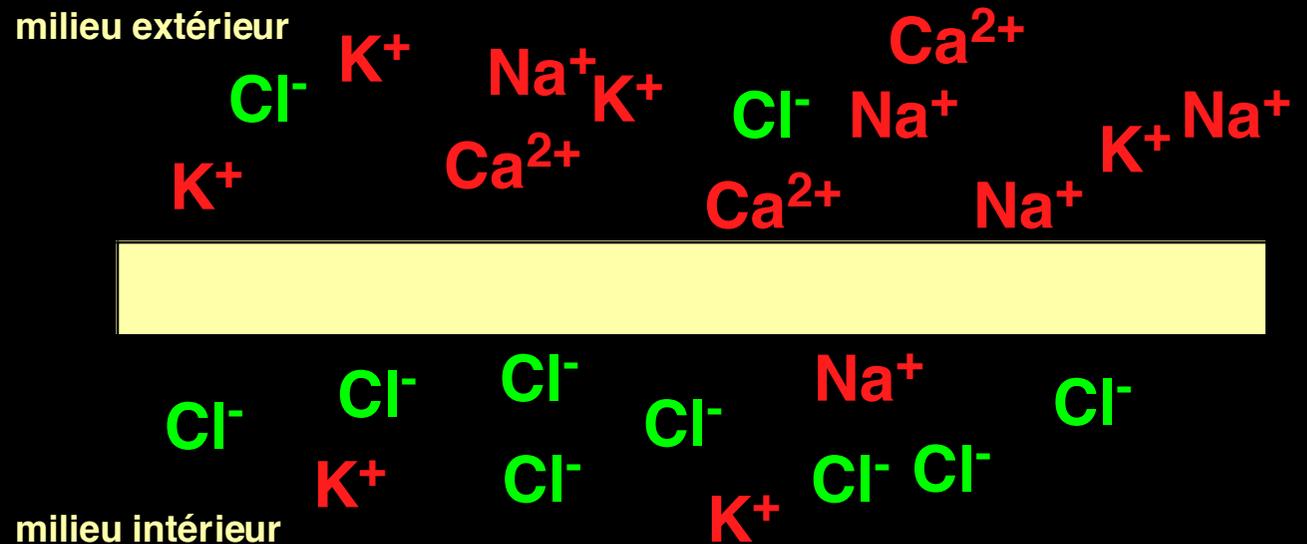
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

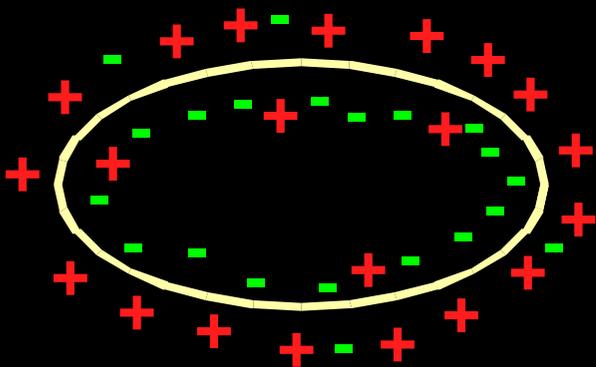
#### b. Polarisation des cellules

## Polarisation des membranes biologiques (électrophysiologie)

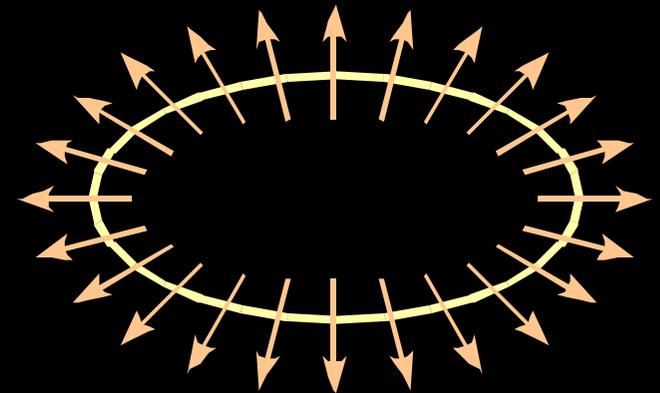
Une membrane biologique est perméable, sous certaines conditions, aux différents ions constitutifs des milieux qu'elle sépare.



Les mécanismes actifs ou passifs de transfert des ions maintiennent généralement chaque espèce d'ion dans une concentration différente de part et d'autre de la membrane. La membrane est donc polarisée.



Une cellule est un ensemble neutre, mais sa membrane peut être assimilée à une série de dipôles électriques.



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

#### b. Polarisation des cellules

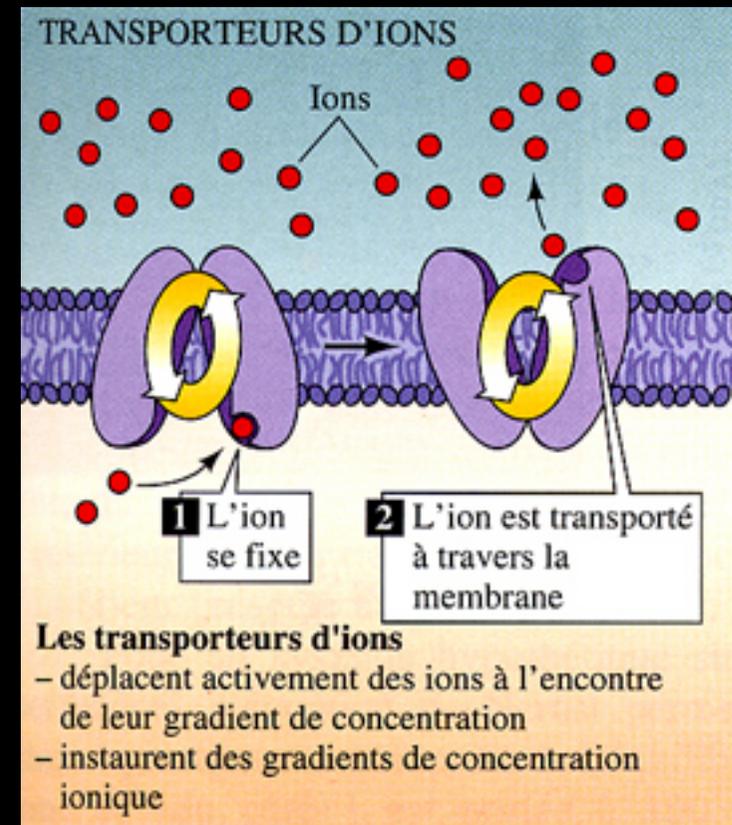
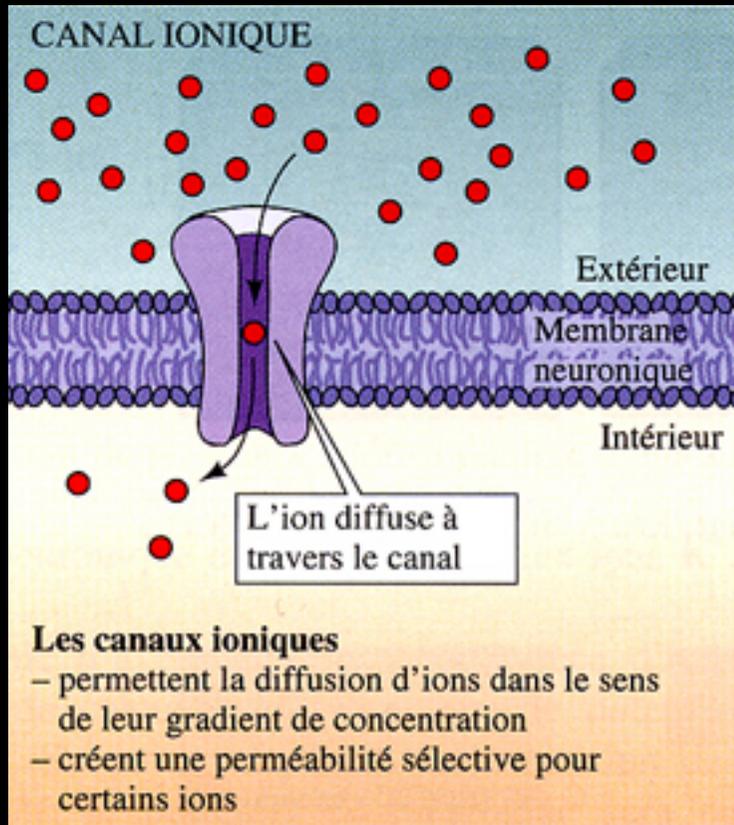
Les protéines membranaires sont plus ou moins perméable aux ions, selon leur type. Les passages transmembranaires sont de plusieurs types :

#### CANAUX IONIQUES

- canaux de fuite :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  traversent plus ou moins librement la membrane
- canaux sélectifs à voltage dépendant (CVD) : un seul type d'ion transféré, selon conditions de polarisation

#### TRANSPORTEURS D'IONS

- pompe à sodium : ouverte ou fermée, selon les ions présents à proximité



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

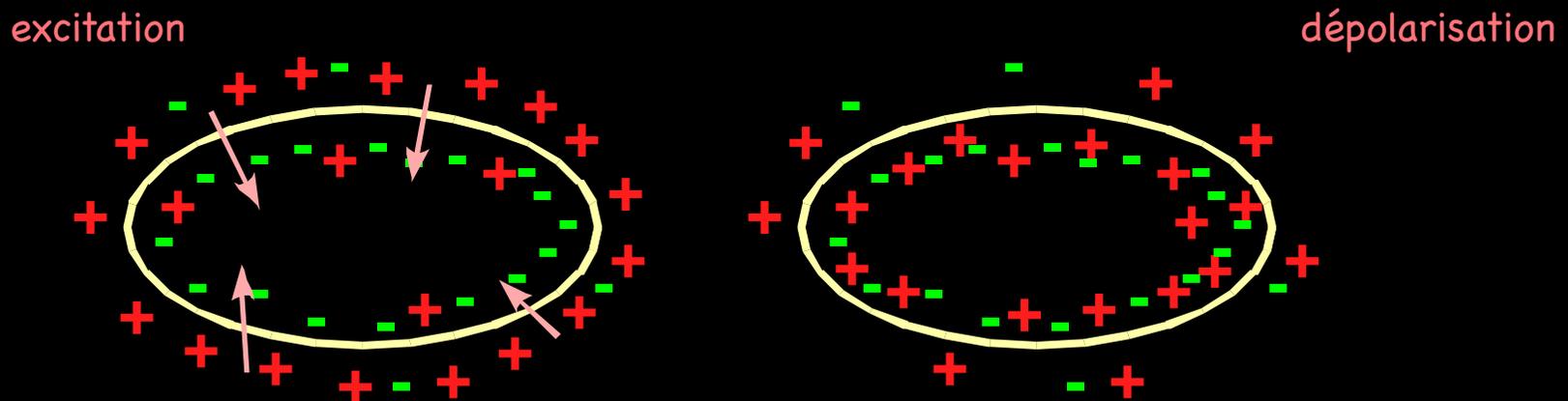
##### b. Polarisation des cellules

Les membranes sont donc polarisées, le potentiel électrique extérieur  $V_e$  est différent du potentiel électrique intérieur  $V_i$ . La différence  $V_i - V_e$  est appelée **potentiel de membrane**.

**Situation de "repos"** : le potentiel de repos, qui varie de  $-50$  mV à  $-90$  mV, repose sur un équilibre dynamique d'échange d'ions.

**Excitation** : certaines membranes sont excitable comme les fibres nerveuses, les récepteurs sensoriels (photorécepteurs de la rétine, récepteurs mécaniques : organe de Corti dans l'oreille interne, corpuscules de Pacini dans la peau, les fibres musculaires striées, la fibre myocardique, etc...

L'excitation membranaire résulte de la libération de médiateurs chimiques qui conduisent à l'ouverture des canaux ioniques, notamment les pompes à sodium. Ce dernier pénètre alors massivement dans le milieu intérieur. C'est la **dépolarisation de la membrane** : le potentiel s'inverse ( $+30$  mV).



La **dépolarisation** entraîne l'ouverture de CVD ( $K^+$ ) : la membrane retrouve son potentiel de repos, c'est la **repolarisation**.

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

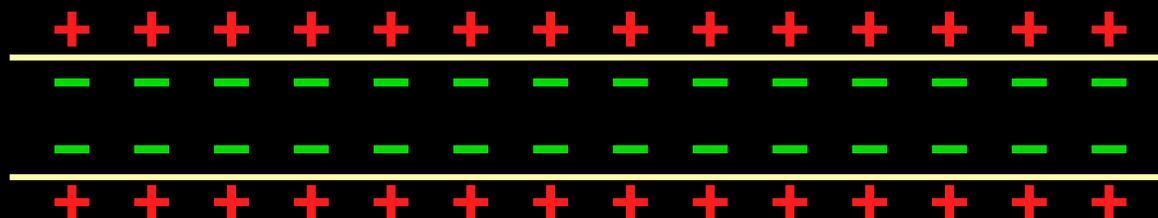
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

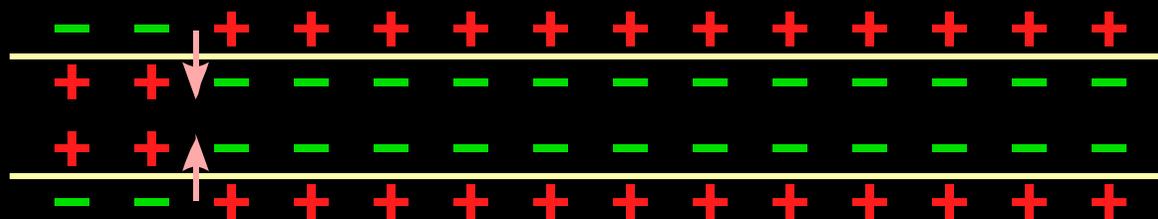
#### b. Polarisation des cellules

## Propagation de l'excitation le long d'une fibre nerveuse

fibre au repos



excitation de la fibre



ouverture  
des canaux  
CVD (Na<sup>+</sup>)

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

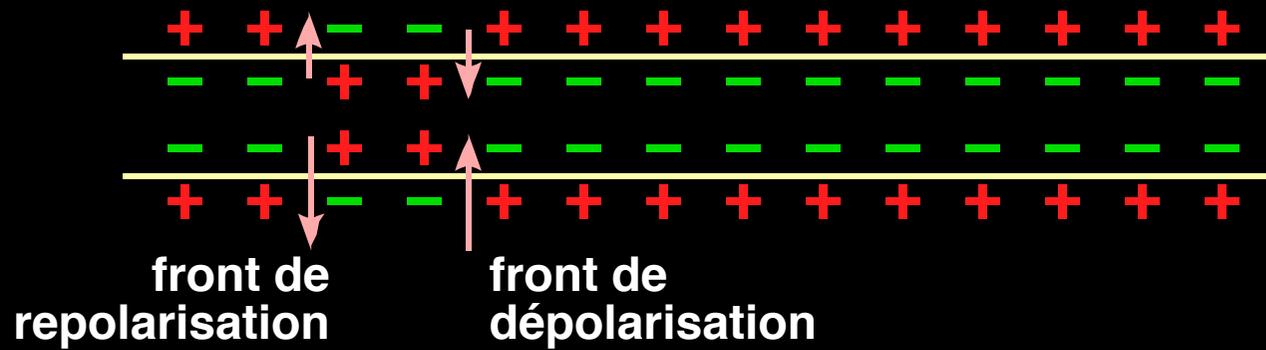
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

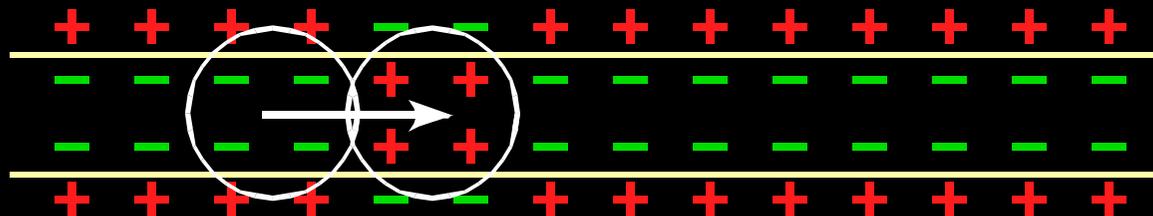
#### b. Polarisation des cellules

### Propagation de l'excitation le long d'une fibre nerveuse

propagation de l'onde de dépolarisation



propagation d'un dipôle électrique



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

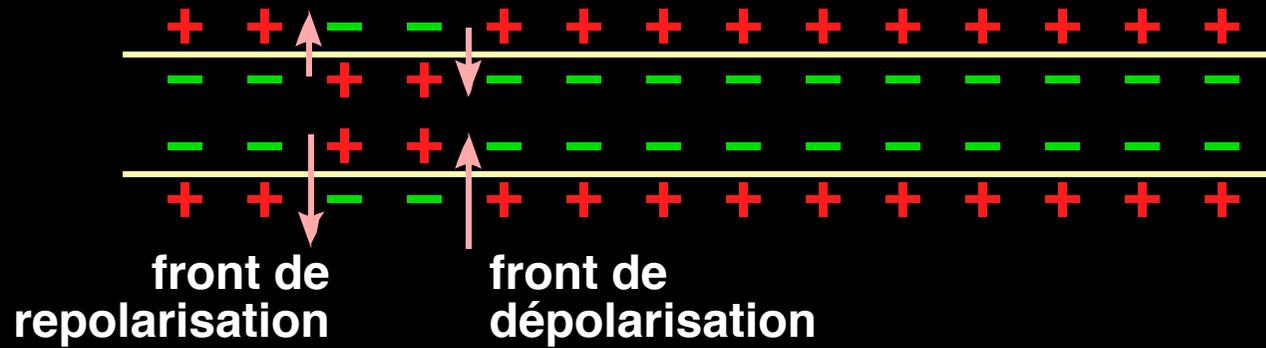
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

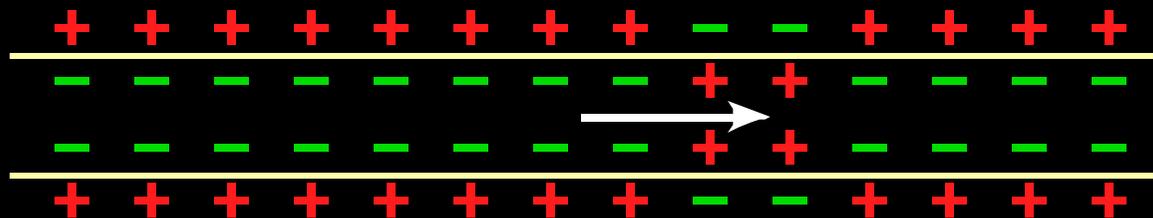
#### b. Polarisation des cellules

Propagation de l'excitation le long  
d'une fibre nerveuse

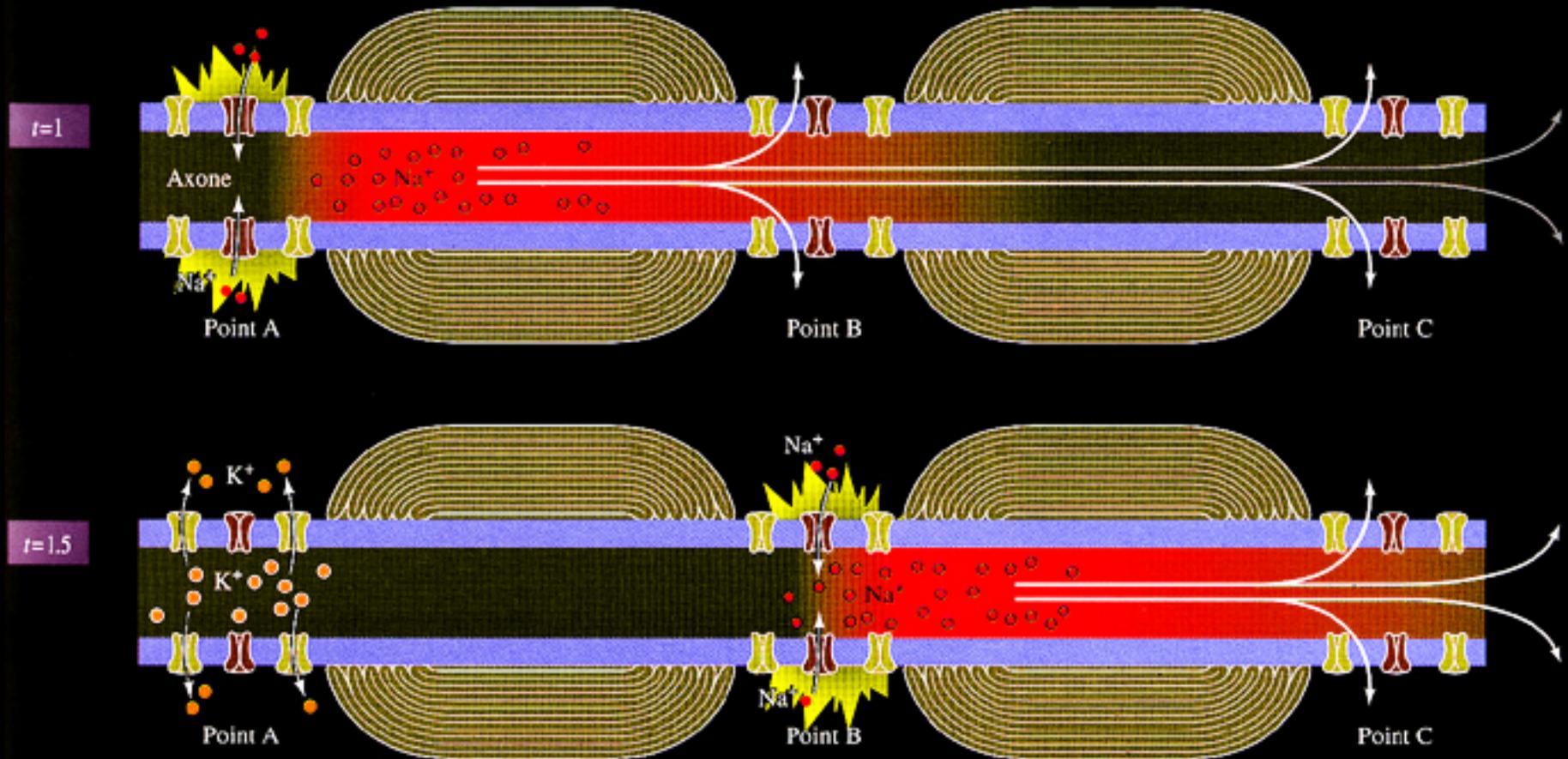
propagation de l'onde de  
dépoléarisation



propagation d'un dipôle  
électrique



# Conduction saltatoire le long d'un nerf (nœuds de Ranvier dans la gaine de myéline)



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

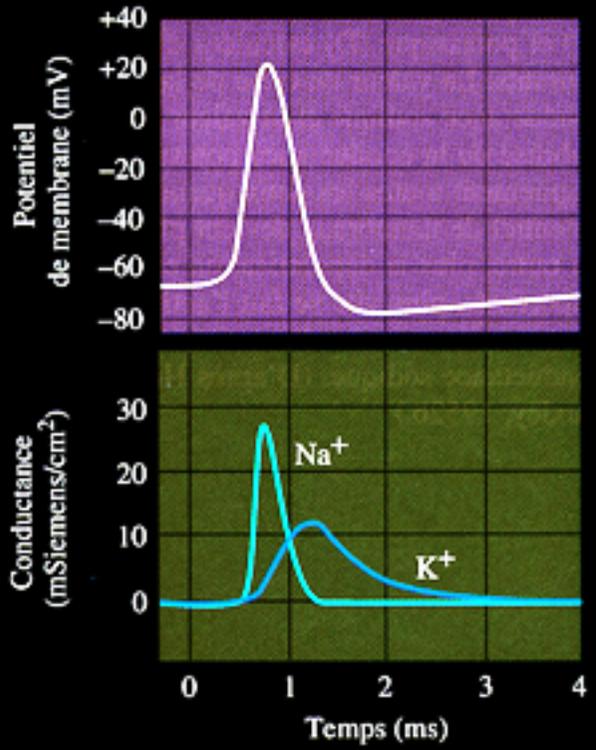
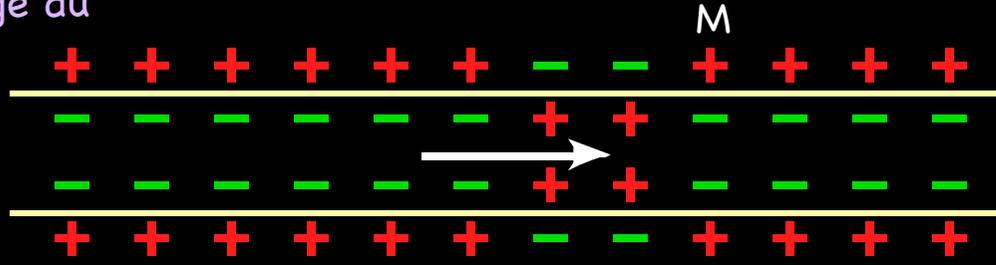
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

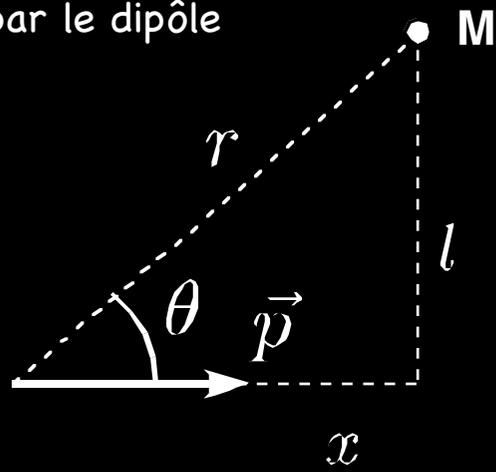
#### b. Polarisation des cellules

Propagation de l'excitation le long d'une fibre nerveuse

Potentiel en un point de la membrane, au passage du dipôle



potentiel créé par le dipôle



$$V_{(M)} = \frac{Kp \cos \theta}{r^2}$$

or

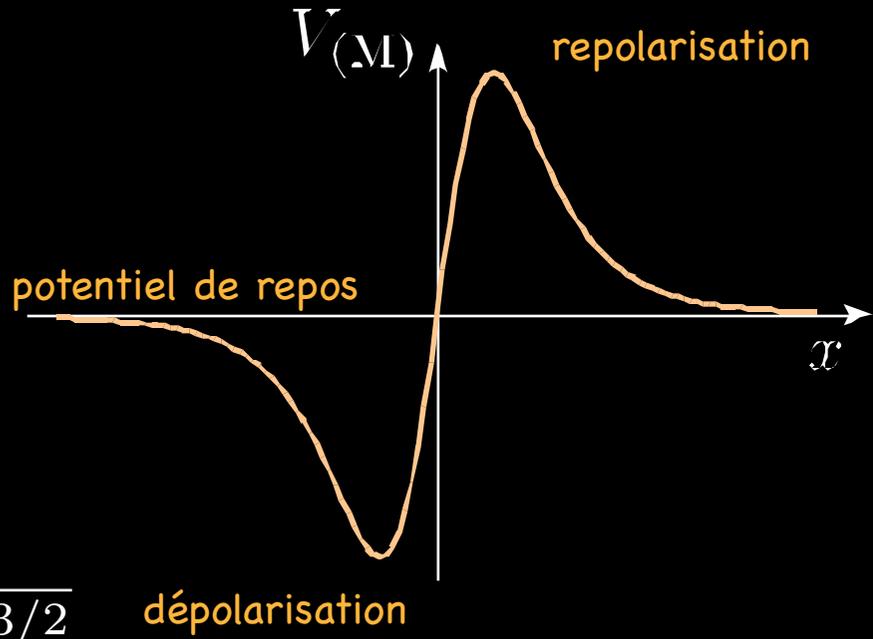
$$\cos \theta = \frac{x}{r}$$

et

$$r = \sqrt{x^2 + l^2}$$

d'où

$$V_{(M)} = Kp \frac{x}{(x^2 + l^2)^{3/2}}$$



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

#### c. Electrophysiologie et médecine

### Applications de l'électrophysiologie en médecine

L'activité physiologique des tissus vivants est de nature électrique : on parle d'électrophysiologie.

La modification in vivo des propriétés électriques des tissus permet, par l'enregistrement des variations du potentiel électrique, d'étudier le fonctionnement de ces tissus de manière non invasive ou ou bien d'observer leur réaction suite à une stimulation électrique. Diverses techniques d'enregistrement existent :

ECG : électrocardiogramme

EEG : électroencéphalogramme

EMG : électromyogramme

Monitoring utérin

Etude des organes sensoriels (électrorétinogramme, etc...)

La nature excitable de ces tissus permet aussi leur stimulation à des fins thérapeutique :

en cardiologie

en neurologie

en traumatologie, etc....

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

#### c. Electrophysiologie et médecine

## Applications de l'électrophysiologie : exemple de l'électrocardiogramme

Les fibres du muscle cardiaque sont des fibres excitables, subissant des contractions autonomes (1,6 Hz).

Lors de l'activité du cœur, ces fibres subissent des cycles de dépolarisation-repolarisation déphasés selon leur rôle (oreillettes, ventricules). La modification concertée des potentiels de membrane, localisés, est caractéristique du fonctionnement du cœur. Leur résultante peut être enregistrée.

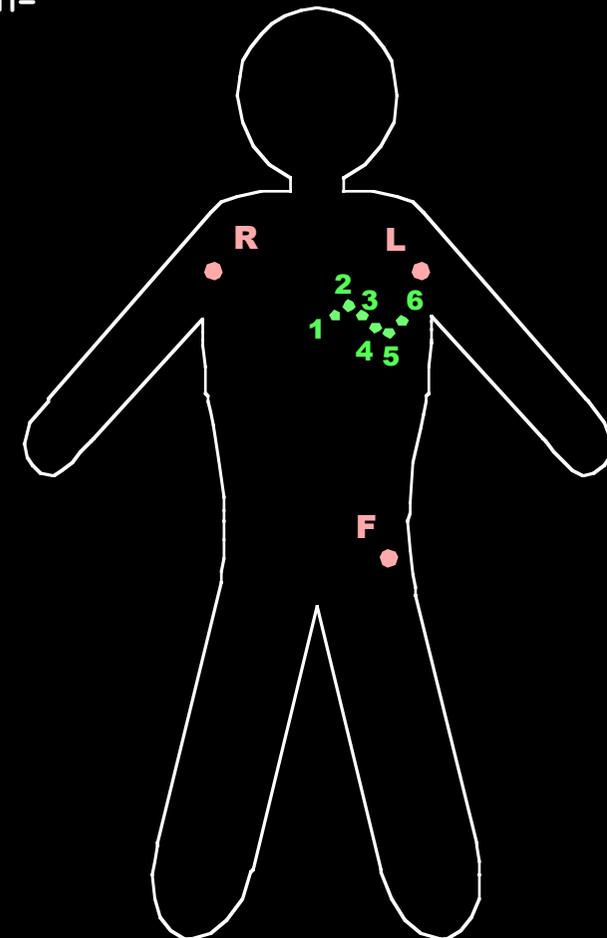
L'enregistrement d'un électrocardiogramme nécessite de placer 9 électrodes sur des parties conventionnelles du corps :

- 3 dérivations des membres notées R, L et F
- 6 dérivations péricardiales notées de 1 à 6

Ces 9 points de mesure du potentiel électrique permettent d'enregistrer :

- les potentiels  $V_R$ ,  $V_L$  et  $V_F$ , ainsi que les ddp  $D_I = V_L - V_R$ ,  $D_{II} = V_F - V_R$  et  $D_{III} = V_F - V_L$ ,
- les 6 potentiels péricardiaux  $V_1$  à  $V_6$ .

Un électrocardiogramme est la mesure de l'évolution de ces 12 potentiels ou différences de potentiel au cours du temps.



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

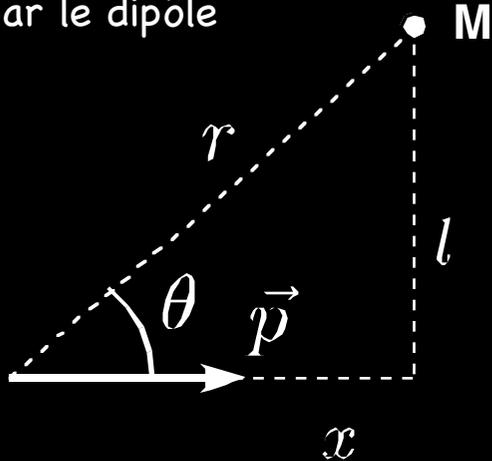
#### c. Electrophysiologie et médecine

## Applications de l'électrophysiologie : exemple de l'électrocardiogramme

De par sa nature électrophysiologique, le cœur possède, en première approximation, un moment dipolaire. Au cours des différentes phases d'un cycle cardiaque, ce moment dipolaire évolue, en intensité comme en direction.

Nous avons déjà modélisé le potentiel créé par un dipôle se déplaçant par rapport au point de mesure. **RAPPEL :**

potentiel créé  
par le dipôle



$$V_{(M)} = \frac{Kp \cos \theta}{r^2}$$

or

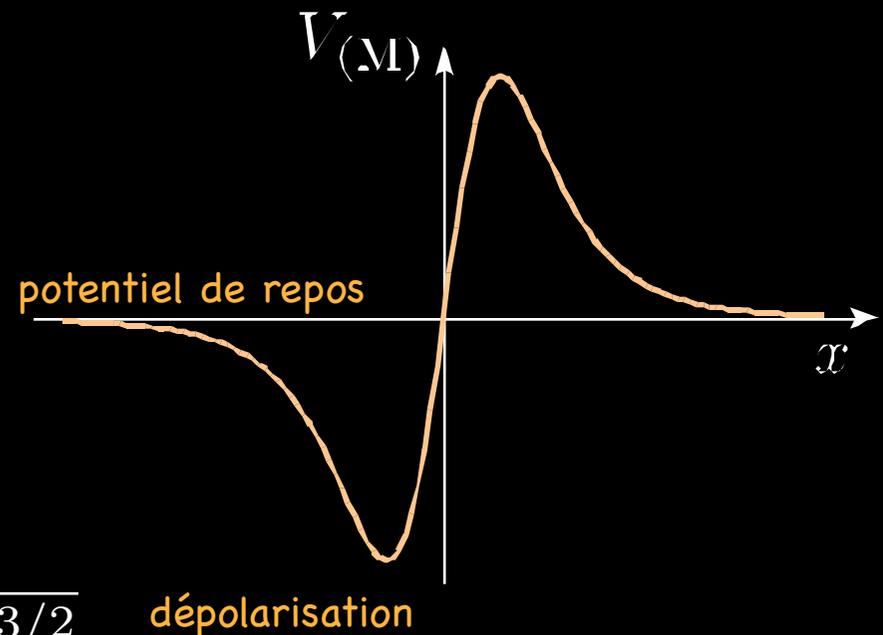
$$\cos \theta = \frac{x}{r}$$

et

$$r = \sqrt{x^2 + l^2}$$

d'où

$$V_{(M)} = Kp \frac{x}{(x^2 + l^2)^{3/2}}$$



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

#### c. Electrophysiologie et médecine

### Applications de l'électrophysiologie : exemple de l'électrocardiogramme

De par sa nature électrophysiologique, le cœur possède, en première approximation, un moment dipolaire. Au cours des différentes phases d'un cycle cardiaque, ce moment dipolaire évolue, en intensité comme en direction.

Nous avons déjà modélisé le potentiel créé par un dipôle se déplaçant par rapport au point de mesure. **RAPPEL :**

$$V_{(M)} = \frac{Kp \cos \theta}{r^2}$$

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 3) Les dipôles dans la matière

#### c. Electrophysiologie et médecine

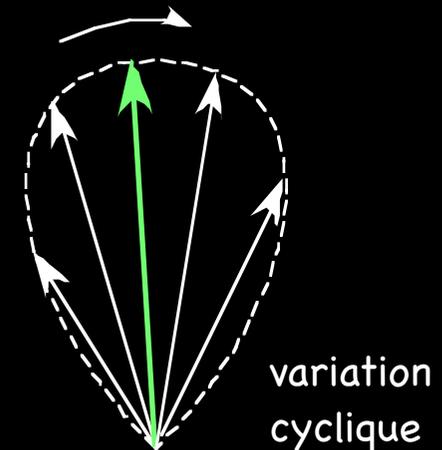
### Applications de l'électrophysiologie : exemple de l'électrocardiogramme

De par sa nature électrophysiologique, le cœur possède, en première approximation, un moment dipolaire. Au cours des différentes phases d'un cycle cardiaque, ce moment dipolaire évolue, en intensité comme en direction.

Nous avons déjà modélisé le potentiel créé par un dipôle se déplaçant par rapport au point de mesure. **RAPPEL** :

$$V_{(M)} = \frac{Kp \cos \theta}{r^2}$$

Dans le cas de l'ECG, seuls le moment dipolaire  $p$  et l'angle varient.



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

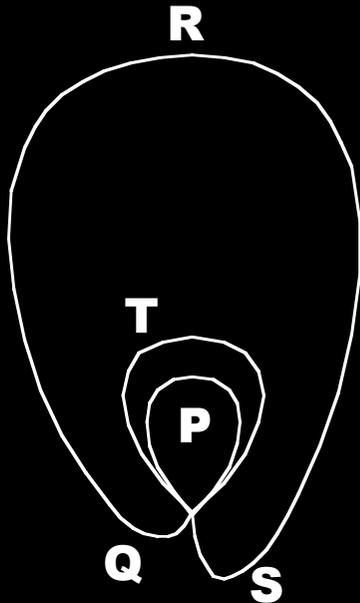
## B. Le dipôle électrique

### 3) Les dipôles dans la matière

#### c. Electrophysiologie et médecine

## Cycle cardiaque

Le cycle cardiaque est constitué d'une succession d'activations et désactivations des différents muscles cardiaques. Ce cycle peut être schématiquement composé en trois phases. Ces trois phases correspondent à trois rotations du moment dipolaire cardiaque.

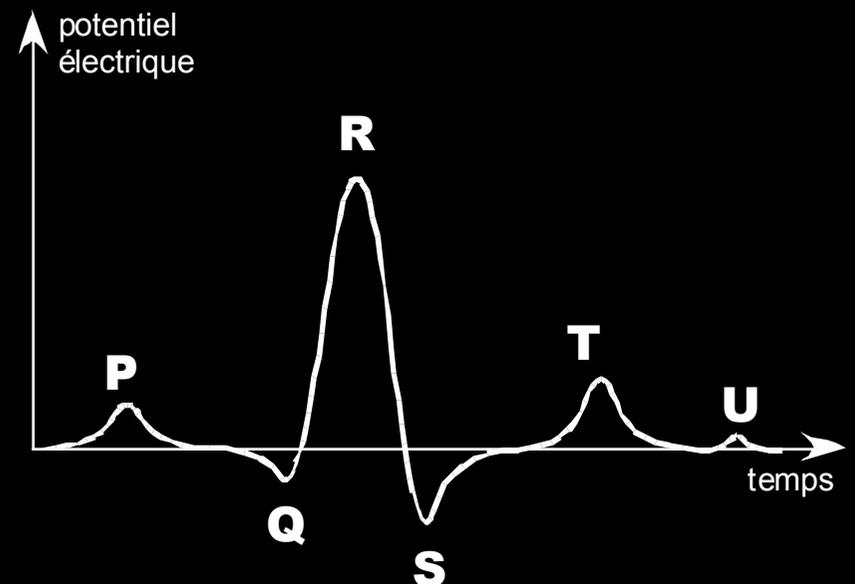


**P** : dépolarisation des oreillettes  
(activation du muscle auriculaire)

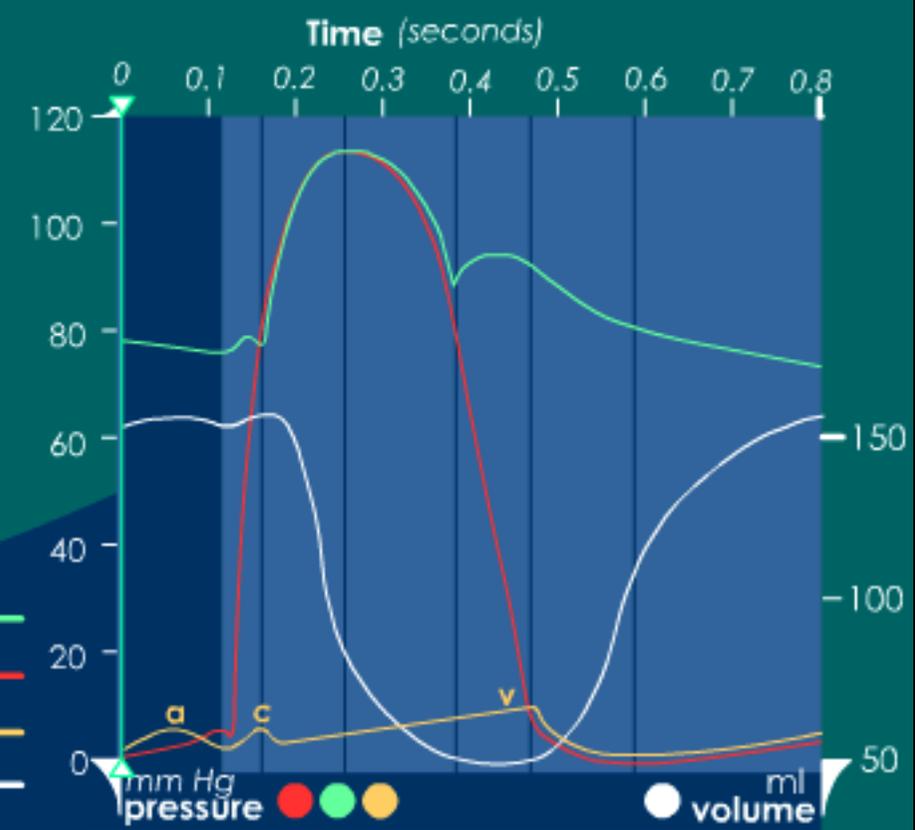
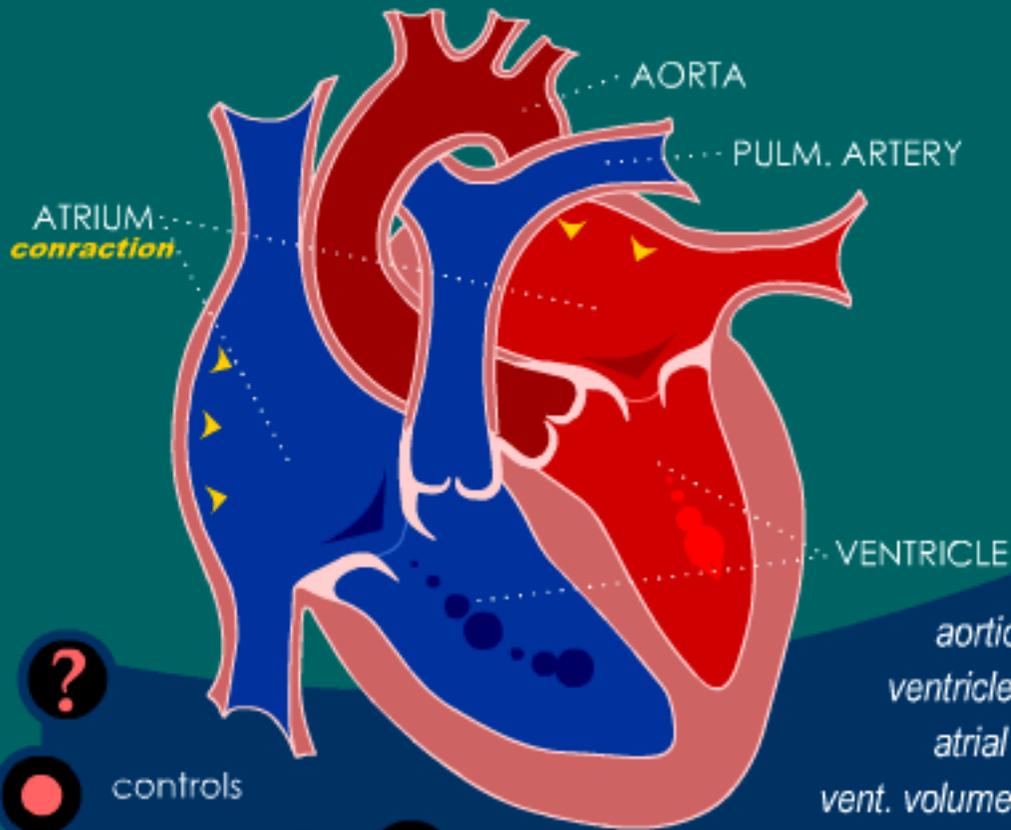
**QRS** : dépolarisation des ventricules  
(activation des muscles ventriculaires)

**T** : repolarisation des oreillettes

Variations du potentiel électrique associées  
à la rotation du moment dipolaire



# Cycle cardiaque



Controls:

- Question mark icon
- Red circle icon
- Play button icon
- Red square icon
- Fast forward icon
- Fast reverse icon

**SYSTOLE** *DIASTOLE*

- atrial systole
- isovolumetric contraction
- rapid ejection
- reduced ejection
- isovolumetric relaxation
- rapid ventricular filling
- diastasis

**Tutorials** ▼



electrocardiogram

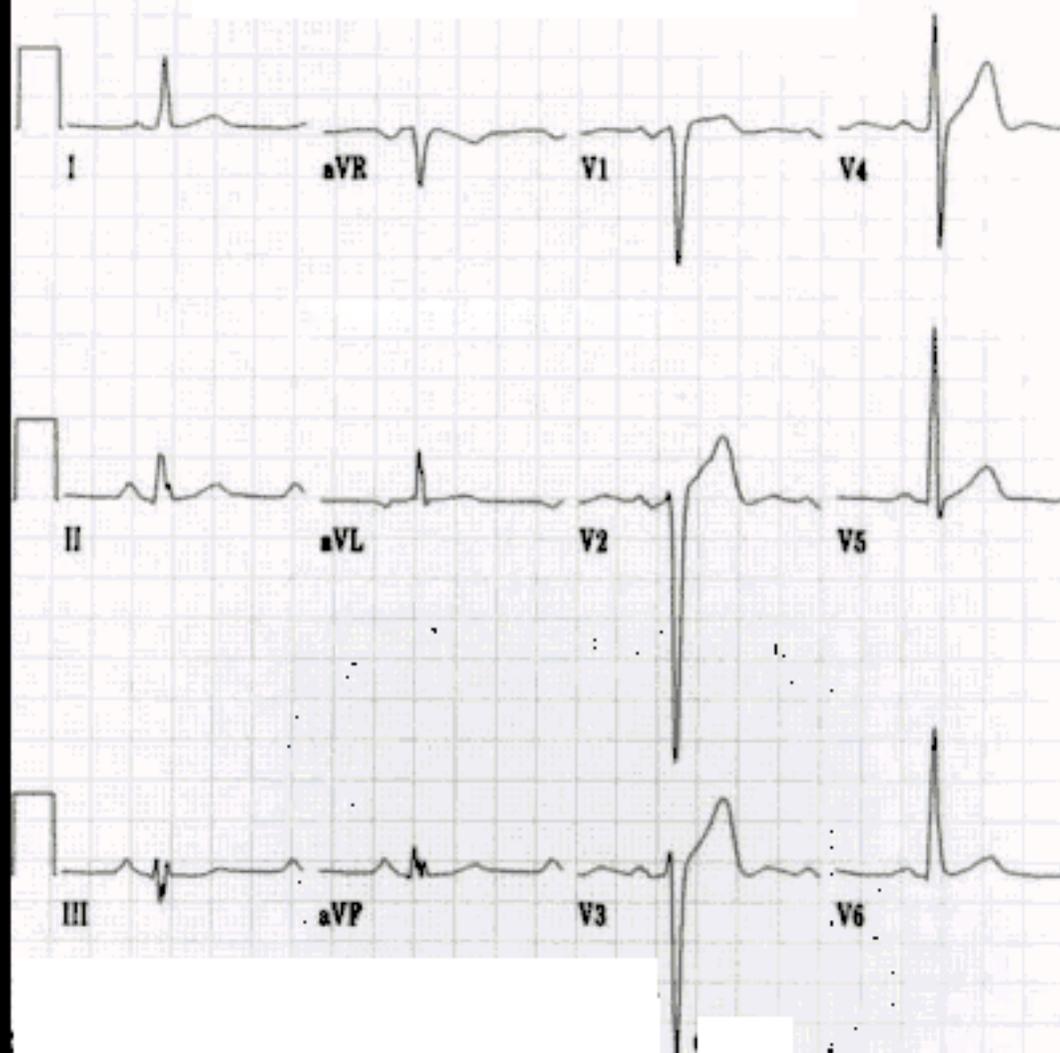


heart sounds

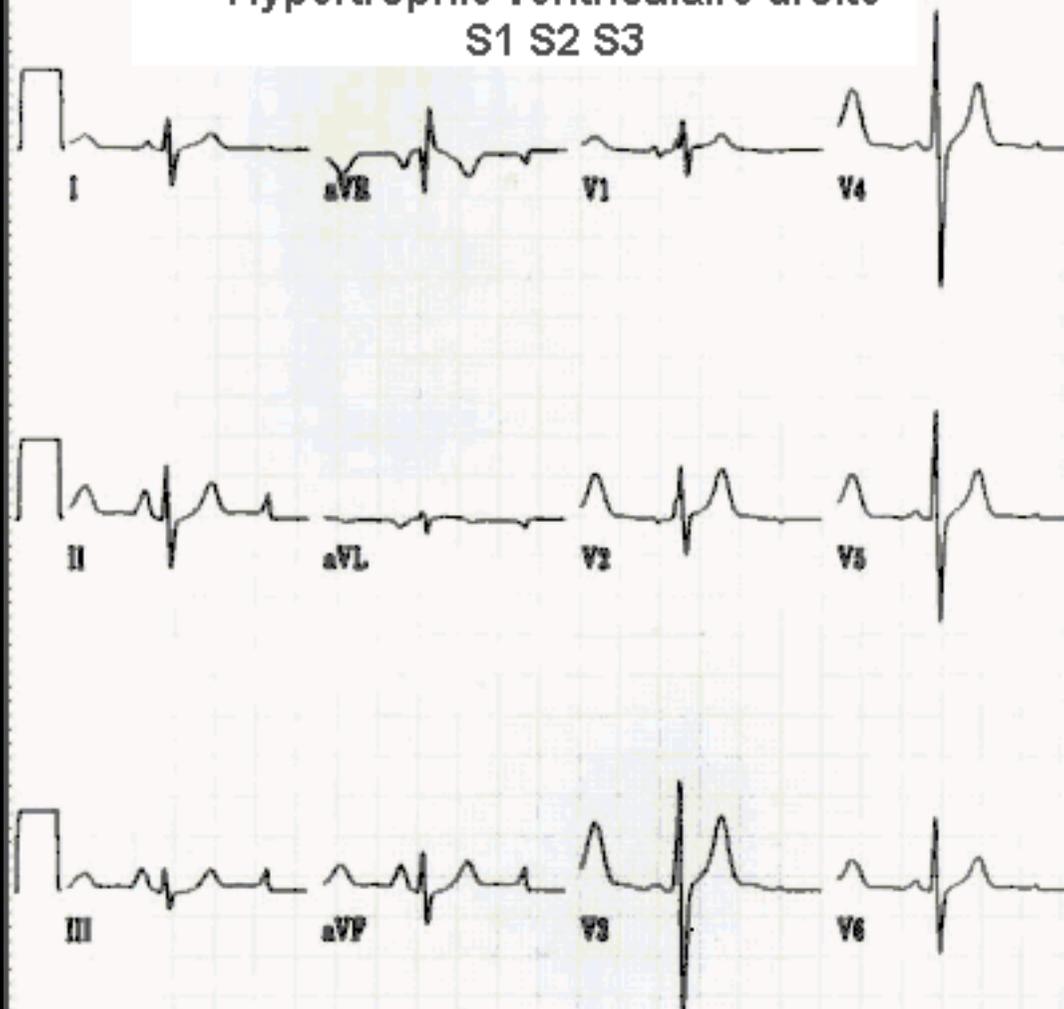
ECG normal



## Hypertrophie auriculaire gauche



Hypertrophie ventriculaire droite  
S1 S2 S3

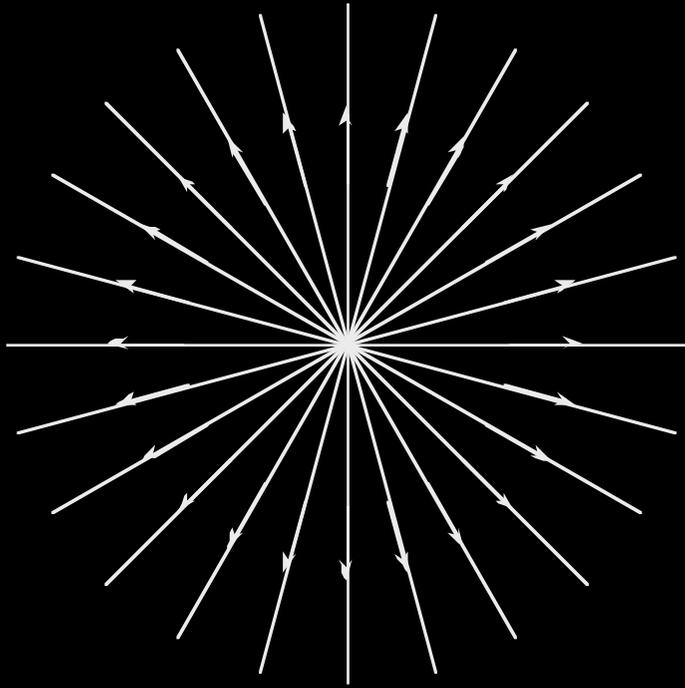


## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

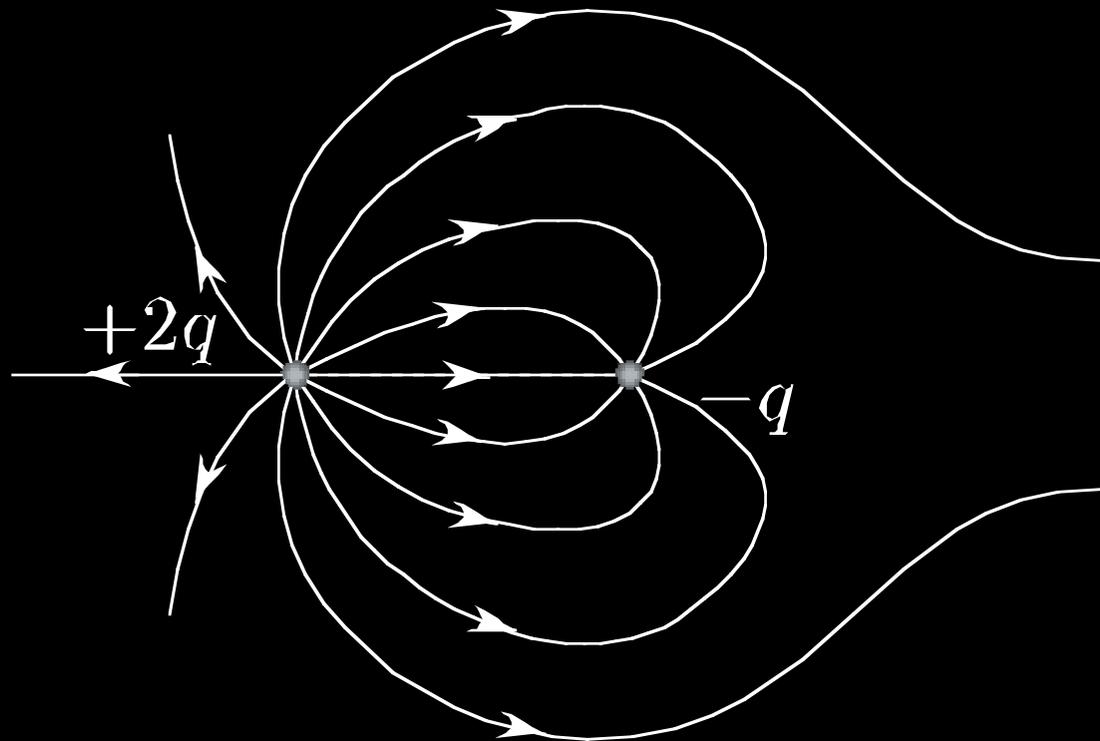
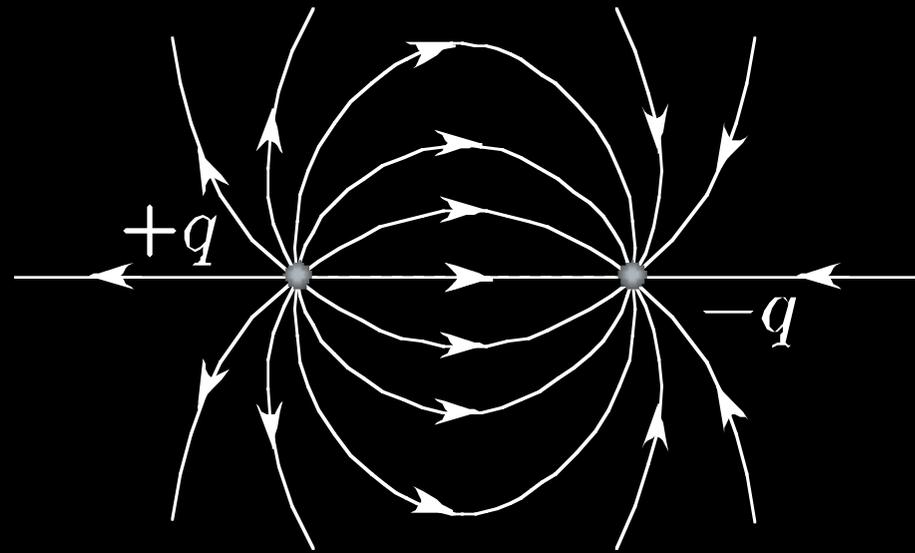
### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

Lignes de champ : densité proportionnelle à l'intensité du champ

Lignes de champ pour une charge ponctuelle positive.



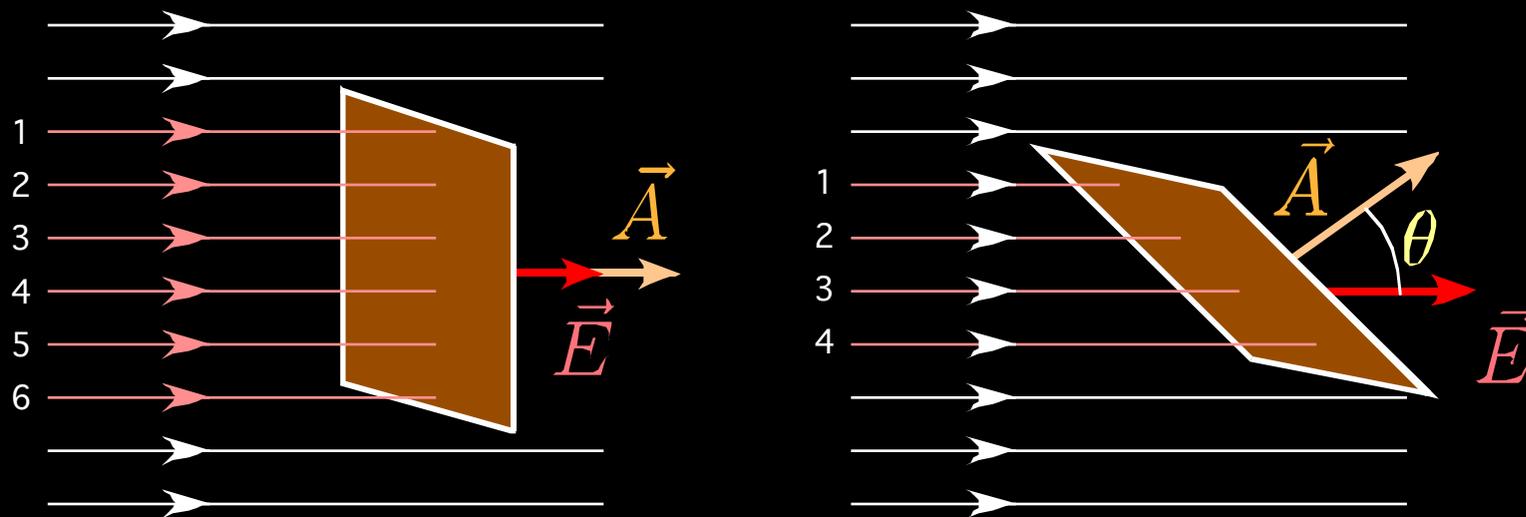
Lignes de champ pour un dipôle.



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

#### Flux d'un champ uniforme au travers d'une surface plane



1/ plus le champ  $E$  est intense, plus les lignes sont denses, plus le flux est élevé

$$\Phi \propto E$$

2/ plus la surface  $A$  est grande, plus le flux est élevé

$$\Phi \propto A$$

3/ angle nul = flux maximum, angle droit = flux nul

$$\Phi \propto \cos \theta$$

d'où  $\Phi = E \cdot A \cdot \cos \theta$  ou encore

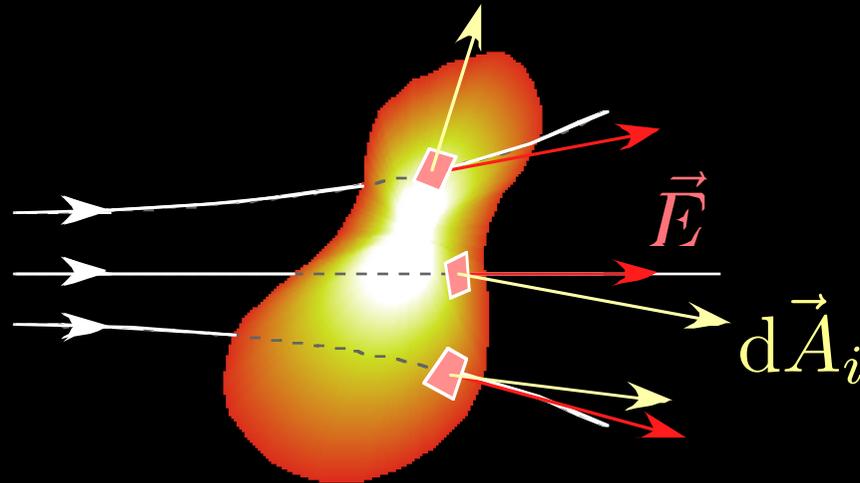
$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{A}$$

champ uniforme, surface plane

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

#### Champ non uniforme et/ou surface non plane



1/ on subdivise la surface en surfaces élémentaires d'aire  $dA_i$

2/ on exprime le flux à travers chaque surface élémentaire

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{A}_i$$

3/ on exprime le flux total :

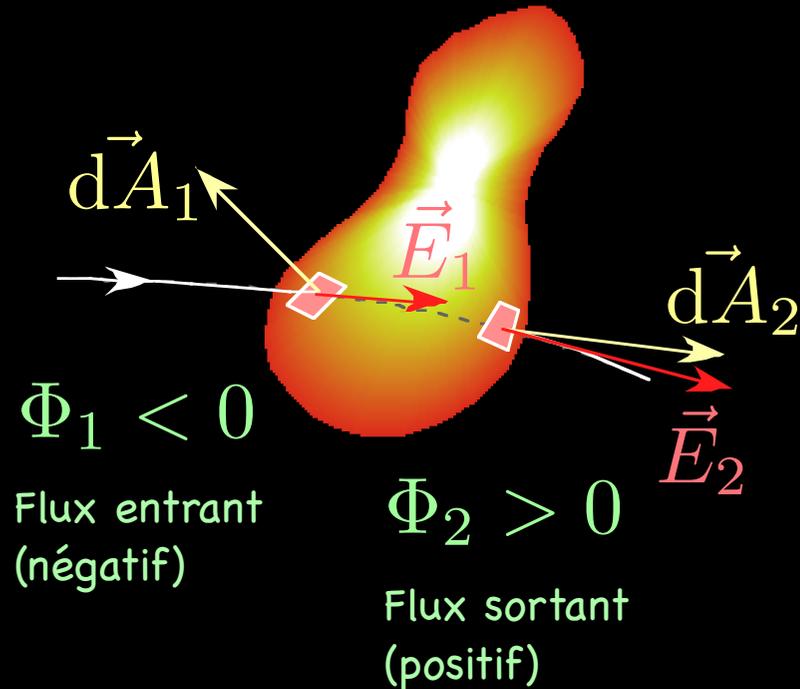
$$\Phi = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A}_i$$

intégrale de surface

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

#### Flux au travers d'une surface fermée



Le flux total au travers d'une surface fermée est calculé en sommant tous les flux élémentaires, flux entrant et flux sortant.

Si la surface fermée ne contient aucune charge, le nombre de lignes "entrantes" est le même que le nombre de lignes "sortantes" : flux entrant et flux sortant sont égaux (au signe près).

Le flux total au travers d'une surface fermée est nul si cette surface ne renferme aucune charge "nette".

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

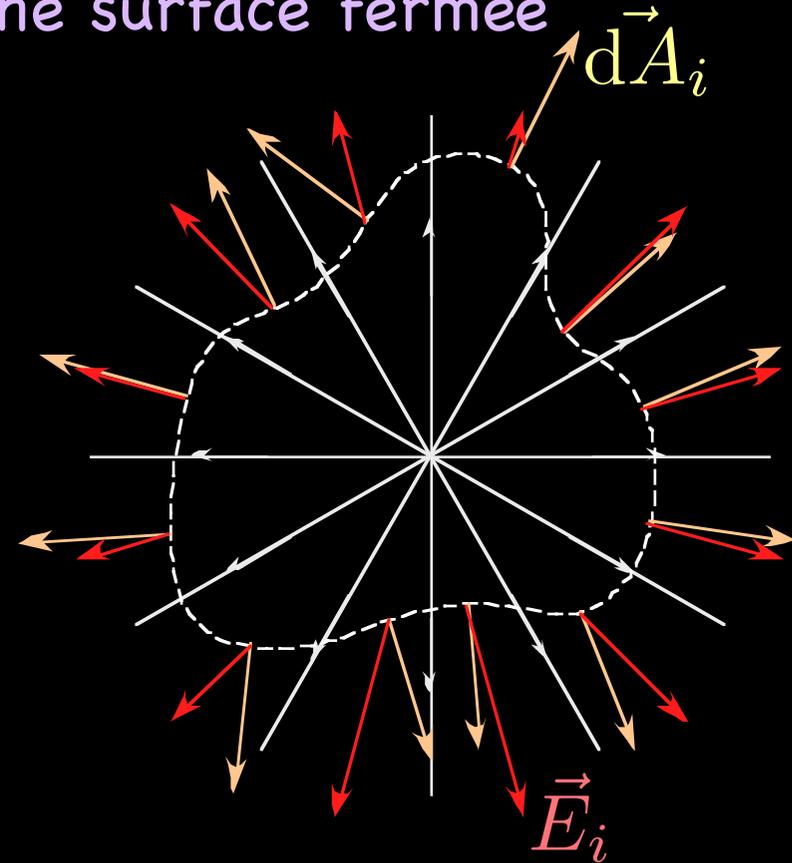
#### Flux au travers d'une surface fermée

Surface fermée renfermant une charge ponctuelle (positive)

$$\Phi = \int_A \vec{E}_i \cdot d\vec{A}_i$$

Le calcul du flux au travers d'une surface quelconque est difficile car l'orientation des vecteurs  $E_i$  et  $dA_i$  varie en chaque point de la surface, tout comme varie l'intensité  $E_i$ .

La surface, lorsqu'on peut la choisir, doit respecter la symétrie du système (symétrie sphérique pour une charge ponctuelle).



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

#### Flux au travers d'une surface fermée

Surface sphérique, de rayon  $r$  : l'intensité du champ est constante sur la sphère,  $E_i$  et  $dA_i$  sont colinéaires.

$$\begin{aligned}\Phi &= \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A}_i = \int_A E \cdot dA_i \\ &= E \int_A dA_i = E \cdot A \\ &= E (4\pi r^2)\end{aligned}$$

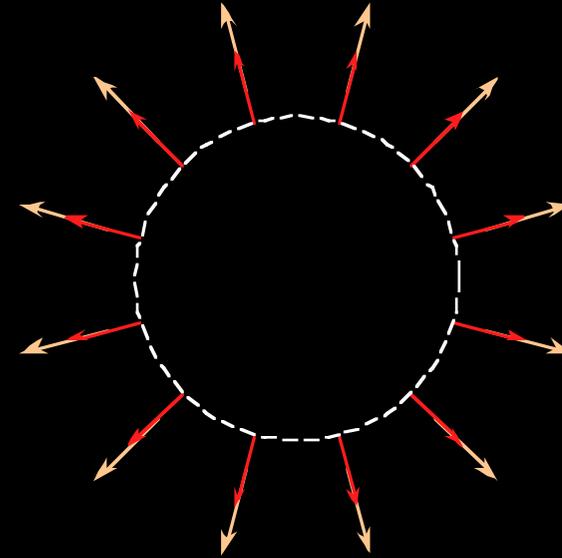
Or le champ vaut :  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$

d'où

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

1/ Ce résultat est indépendant du rayon de la sphère ! (même nombre de lignes de champs dans tous les cas)

2/ et si la surface n'est pas sphérique ? Même nombre de lignes de champs = même flux !



Pour toute surface fermée contenant une charge ponctuelle  $Q$  :

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

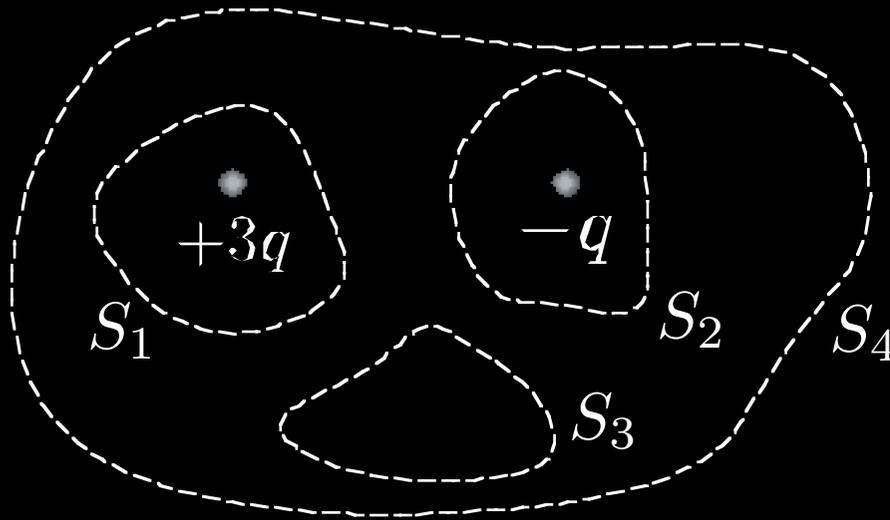
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

## Théorème de Gauss

Le théorème de Gauss généralise le résultat précédent pour toute surface fermée intégrant une charge nette totale  $Q$  :

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$



$$\Phi_1 = \oint_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{3q}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_2 = \oint_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{-q}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_3 = \oint_{S_3} \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\Phi_4 = \oint_{S_4} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{2q}{\epsilon_0}$$

Un flux est nul : si la charge nette est nulle, si  $E=0$  sur la surface, si  $E$  est toujours tangent à la surface, si la surface est nulle, etc...

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

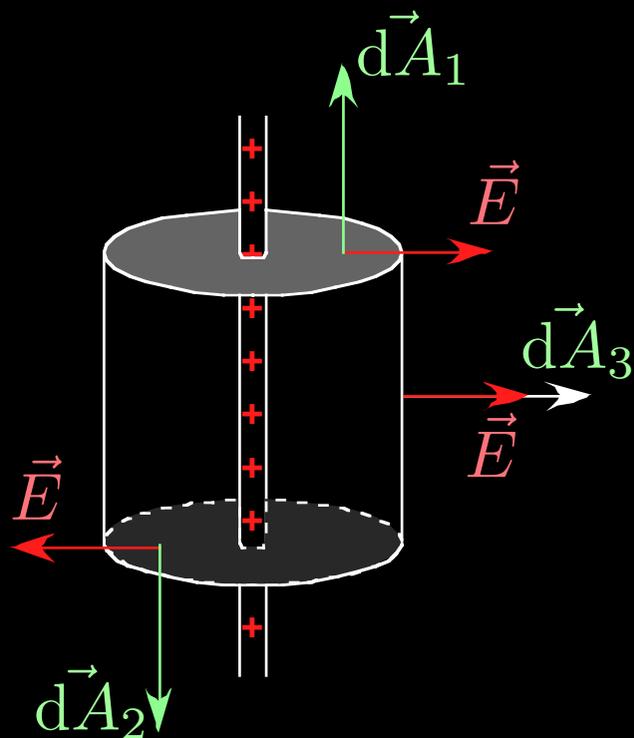
## A quoi sert le théorème de Gauss ?

A connaître très rapidement et sans trop de calculs le champ électrique... à condition :

- de bien repérer et utiliser la symétrie du champ
- de choisir une surface fermée sur laquelle le champ est tangent et/ou normal
- de choisir une surface fermée sur laquelle le champ est constant ou nul (selon les zones)

Exemple : fil infini, chargé uniformément

- $\lambda$  : densité de charge (linéique, en C/m)
- cylindre de longueur  $L$  contenant la charge  $Q = \lambda L$
- le champ est radial (par rapport à l'axe du fil)



$$\Phi_1 = \int_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{A}_1 = 0 \quad \Phi_2 = \int_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{A}_2 = 0$$

$$\Phi = \sum_i \Phi_i = \Phi_3 = E(r) \int_{S_3} dA_3 = \boxed{E(r) \cdot (2\pi r L) = \frac{\lambda L}{\epsilon_0}}$$

$$\text{d'où } \boxed{E(r) = \frac{\lambda}{2\pi r \epsilon_0}}$$

## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### D. La conduction électrique

#### 1) Matériaux conducteurs / isolants

Un **matériau conducteur** est un matériau au sein duquel peuvent se déplacer des charges électriques.

Exemples de conducteurs :

- les métaux : les porteurs de charge sont des électrons libres
- les électrolytes : ions en solution (l'eau par exemple, ou le corps humain)

A l'inverse, les porteurs de charge d'un **matériau isolant** ne peuvent pas se déplacer. Un isolant peut devenir conducteur sous certaines conditions; les porteurs de charge acquièrent suffisamment d'énergie pour s'émanciper :

- sous l'effet d'une tension très élevée : phénomène de claquage (au-delà d'un certain seuil, les électrons liés aux noyaux sont subitement libérés)
- sous l'effet d'un éclaircissement : photorésistance
- sous l'effet de variations de la température : thermorésistances

**Attention !**

**charges en mouvement = électrocinétique**

**charges immobiles = électrostatique**

Pour des déplacements "lents", les lois de l'électrostatique restent valables : une photo, instantané du mouvement, permettrait alors de déterminer les forces de Coulomb en jeu et de prédire le mouvement. Mais à l'échelle macroscopique, le nombre de charges élevé rend les calculs trop complexes. Les lois de l'électrocinétique (fonctionnement des circuits) décrivent plus simplement le mouvement d'ensemble à cette échelle.

**électrocinétique = "résumé" macroscopique des interactions électromagnétiques**

# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## D. La conduction électrique

### 1) Matériaux conducteurs / isolants

#### Equilibre électrostatique

Dans un conducteur, les porteurs de charge sont mobiles, du fait de l'agitation thermique. Les mouvements sont désordonnés, non corrélés : en moyenne, ces charges peuvent être considérées comme fixe.

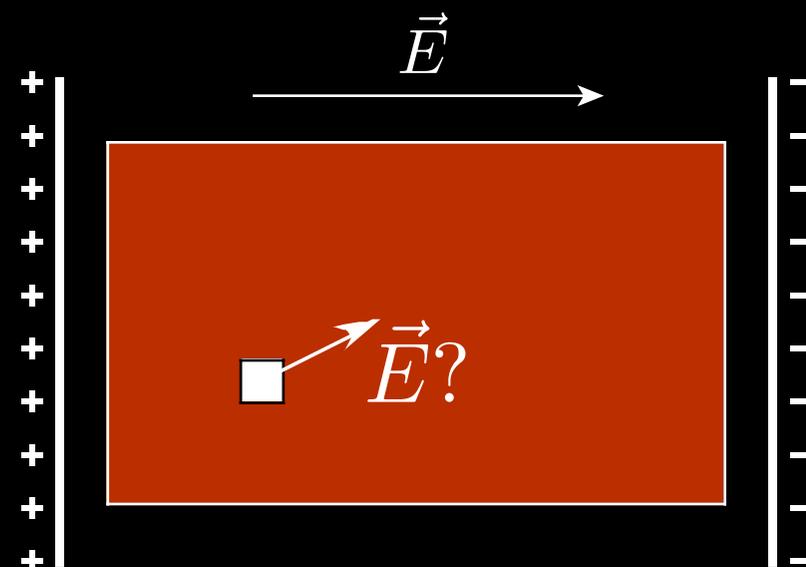
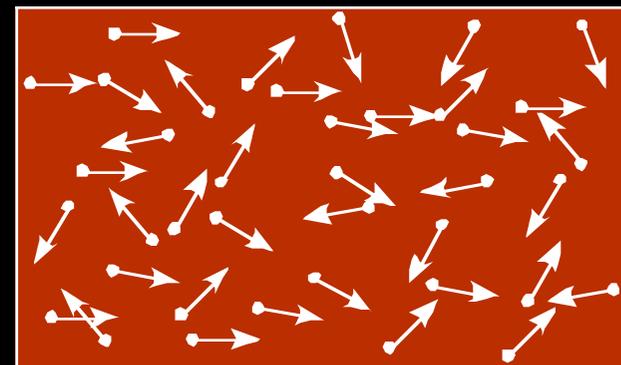
Si on place ce conducteur dans un champ électrique, les porteurs de charge vont, dans un temps donné (environ  $10^{-12}$  s dans un métal) subir un réarrangement, puis être à nouveau immobiles "en moyenne" : c'est l'équilibre électrostatique.

Considérons une petite zone du conducteur : le champ électrique peut-il être non nul dans cette zone ?

**Réponse** : le conducteur est à l'équilibre électrostatique, or si le champ est non nul, les charges devraient être en mouvement.

**Conclusion** : le champ est nul partout à l'intérieur du conducteur.

#### Equilibre dynamique



# Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

## D. La conduction électrique

### 1) Matériaux conducteurs / isolants

#### Equilibre électrostatique

Dans un conducteur, les porteurs de charge sont mobiles, du fait de l'agitation thermique. Les mouvements sont désordonnés, non corrélés : en moyenne, ces charges peuvent être considérées comme fixe.

Si on place ce conducteur dans un champ électrique, les porteurs de charge vont, dans un temps donné (environ  $10^{-12}$  s dans un métal) subir un réarrangement, puis être à nouveau immobiles "en moyenne" : c'est l'équilibre électrostatique.

Considérons une petite zone du conducteur : le champ électrique peut-il être non nul dans cette zone ?

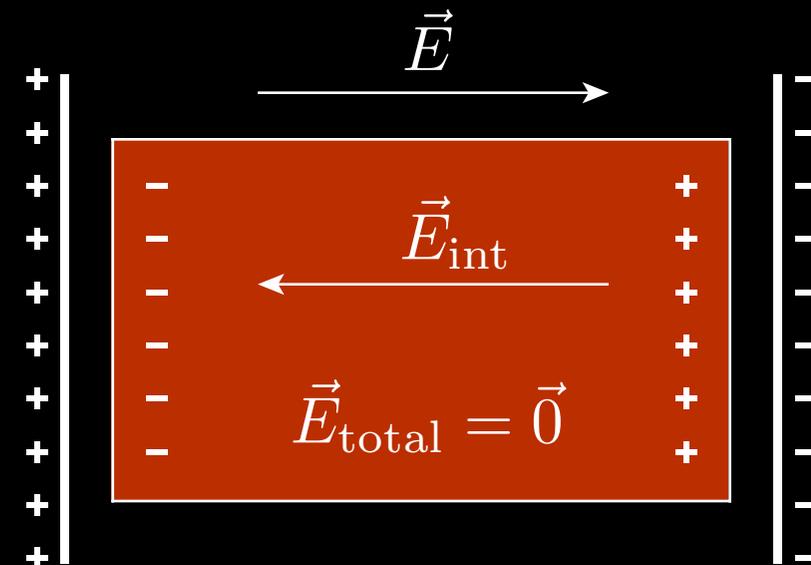
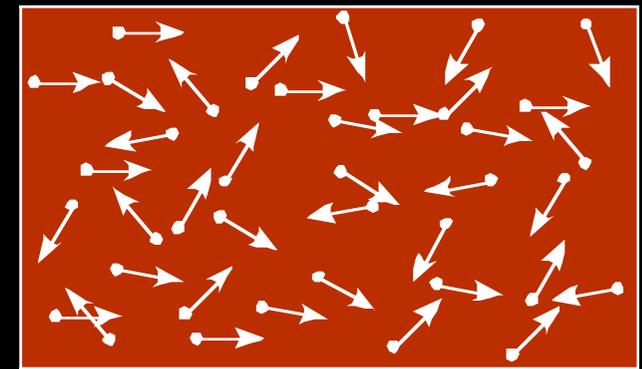
**Réponse** : le conducteur est à l'équilibre électrostatique, or si le champ est non nul, les charges devraient être en mouvement.

**Conclusion** : le champ est nul partout à l'intérieur du conducteur.

Les charges se réarrangent donc de manière à créer un champ électrique intérieur qui compense exactement le champ électrique extérieur.

Le conducteur est donc le siège d'une **polarisation induite**. Une fois l'équilibre électrostatique atteint, la distribution des charges est invariante (hormis l'agitation thermique).

#### Equilibre dynamique



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### D. La conduction électrique

#### 1) Matériaux conducteurs / isolants

#### Résultats

1/ Dans un conducteur homogène en équilibre électrostatique, le champ électrique total est nul.

2/ A l'équilibre électrostatique, le champ électrique extérieur à proximité immédiate du conducteur est normal à sa surface. (Une composante tangentielle ferait se déplacer les charges en surface => le conducteur serait hors équilibre)

3/ A l'équilibre électrostatique, la charge nette d'un conducteur se répartit à sa surface.

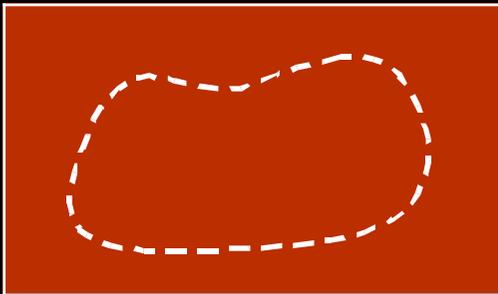
Soit une surface de Gauss (fermée) à l'intérieur du conducteur en équilibre.

En tout point de cette surface, on a :  $\vec{E} = \vec{0}$

$$\text{d'où } \Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0 = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

La charge nette à l'intérieur de cette surface vaut :  $Q = 0$

En étendant la surface de Gauss à la surface du conducteur... CQFD.



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### D. La conduction électrique

#### 1) Matériaux conducteurs / isolants

#### Résultats

1/ Dans un conducteur homogène en équilibre électrostatique, le champ électrique total est nul.

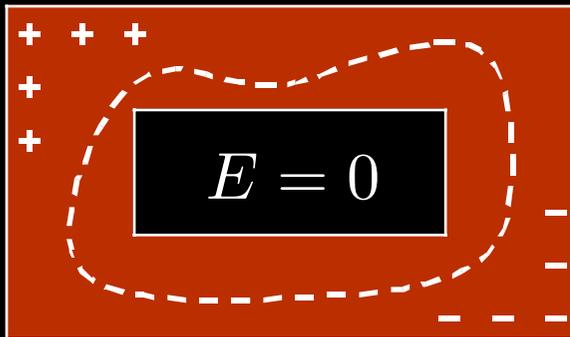
2/ A l'équilibre électrostatique, le champ électrique extérieur à proximité immédiate du conducteur est normal à sa surface. (Une composante tangentielle ferait se déplacer les charges en surface => le conducteur serait hors équilibre)

3/ A l'équilibre électrostatique, la charge nette d'un conducteur se répartit à sa surface.

4/ Sur la surface, le champ électrique vaut  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

5/ Tous les points à l'intérieur du conducteur sont au même potentiel, car  $E = -\frac{dV}{dr} = 0$

#### Application : la cage de Faraday



- Soit un conducteur creux.
- perturbation électrostatique => modification transitoire
- L'équilibre électrostatique est déplacé.
- Le champ est nul sur la surface fermée, la charge nette est nulle.
- Dans la cage de Faraday, le champ électrique est nul.
- Protection contre les champ électriques (blindage).

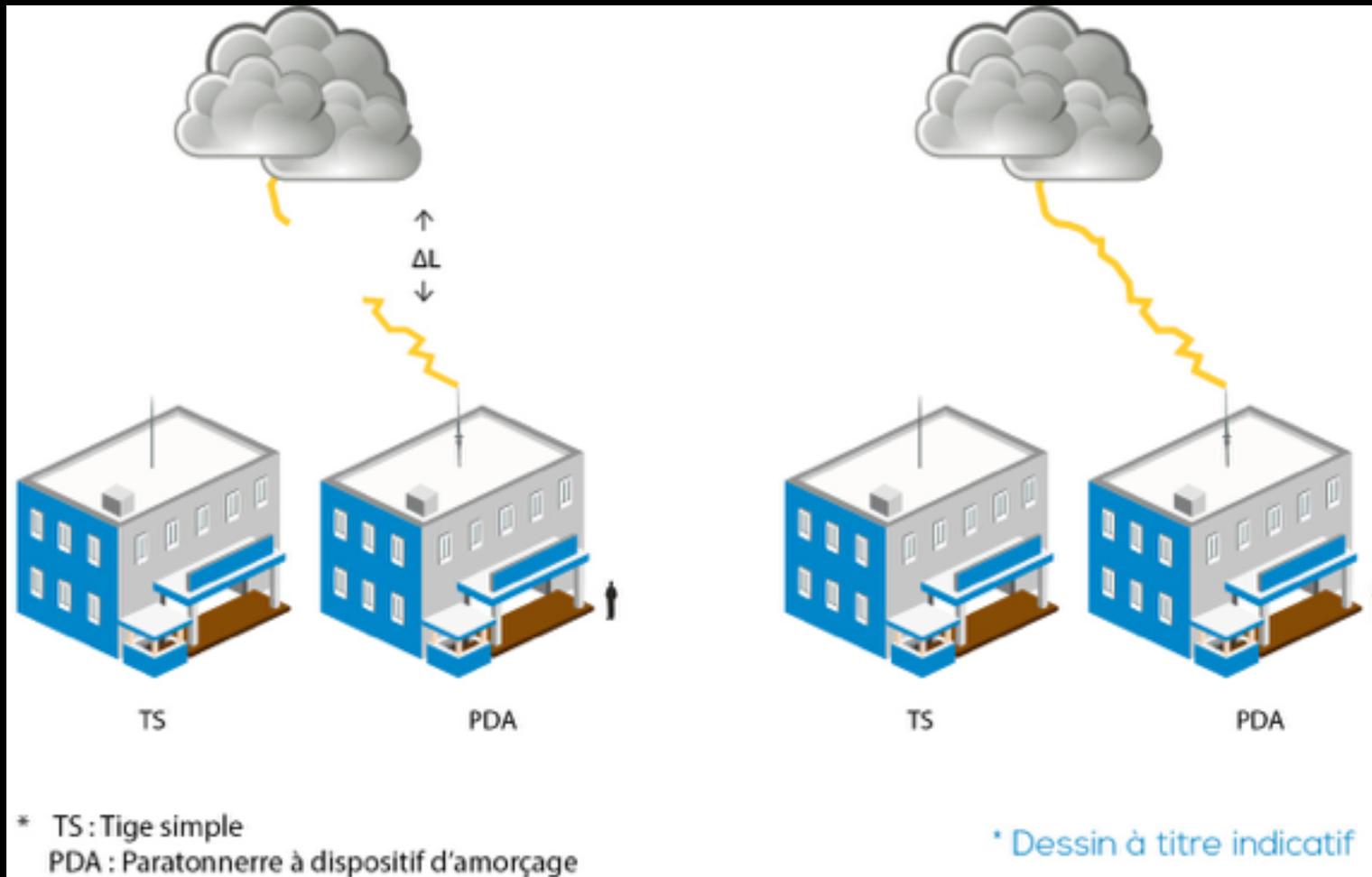
## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### D. La conduction électrique

#### 3) Applications : effet de pointe et paratonnerres

paratonnerre : le but n'est pas d'attirer la foudre sur sa maison, mais de canaliser la foudre vers le sol si jamais la foudre venait à frapper près du paratonnerre.

Exemple de publicité dangereuse !

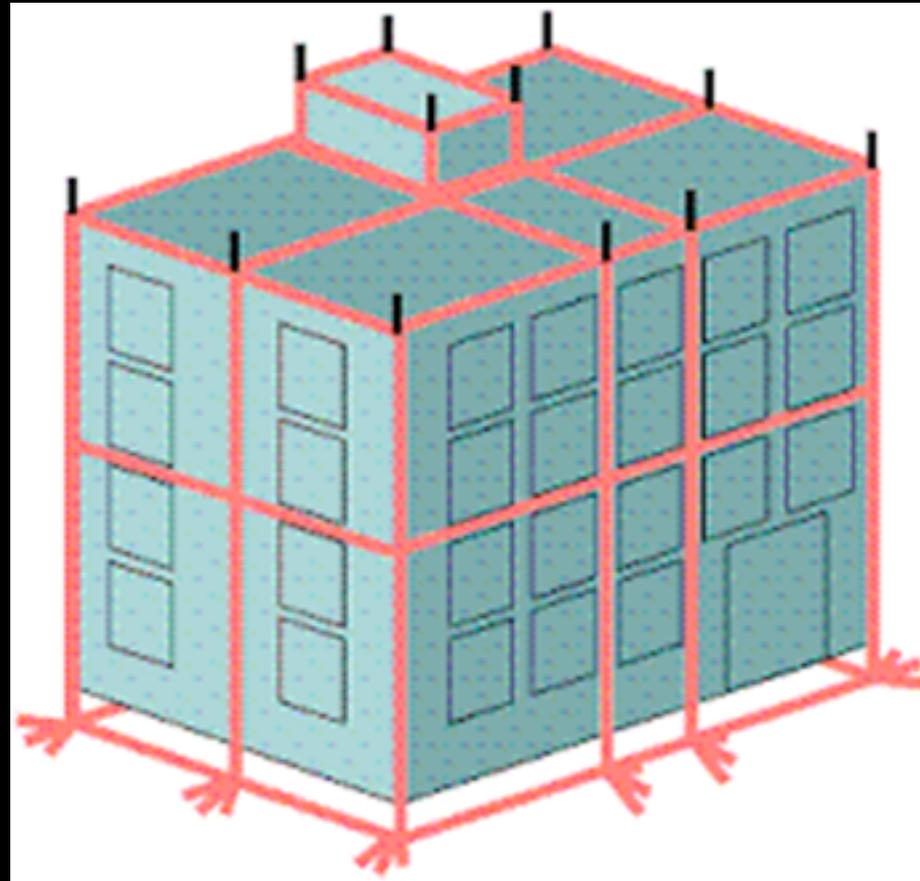


## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### D. La conduction électrique

#### 3) Applications : effet de pointe et paratonnerres

La bonne protection d'un bâtiment consiste en un maillage conducteur (effet cage de Faraday) relié à plusieurs paratonnerres et à la terre.



## Partie 3 – L'électrostatique – le dipôle électrique

### A. Force, champ et potentiel électriques

#### 1) Force et champ électriques

- force entre deux charges ponctuelles : force de Coulomb
- principe de superposition
- distribution de charges ponctuelles
- champ électrique

#### 2) Energie et potentiel électrique

### B. Le dipôle électrique

#### 1) Définition – moment dipolaire

#### 2) Champ et potentiel créés par un dipôle

#### 3) Action d'un champ électrique sur un dipôle

- cas d'un champ électrique uniforme - positions d'équilibre
- cas d'un champ électrique non uniforme

#### 4) Les dipôles dans la matière

- molécules et atomes (dipôles permanents, induits, potentiel de Lennard-Jones, forces de Van Der Waals, solvation, micro-ondes)
- polarisation des membranes cellulaires (équilibre dynamique, propagation des ondes de polarisation-dépolarisation, électrocardiogramme)

### C. Champ électrique et flux : théorème de Gauss

### D. La conduction

- matériaux conducteurs – isolants
- applications : cage de Faraday, effet de pointe, paratonnerre

### E. Capacité électrique – condensateurs