



R. Dufy, Musée d'art moderne, Paris

Cours 1: Notions d'électrostatique et grandeurs électriques

**EE 106 – Sciences et
technologies de
l'électricité
Automne 2025**

Communication



- Grandeurs physiques: décrivent une propriété d'un système (exemples: longueur, vitesse, pression, poids, etc...)
 - Elle est constituée d'un **nombre** et d'une **unité**
 - Deux grandeurs égales ont la même unité: les deux côtés d'une équation ont la même unité (homogénéité, analyse dimensionnelle)



Représentation scientifique – grandeurs physiques

- Ecriture littérale: on représente les grandeurs par un **symbole** (une lettre en italique)
- Unités: on représente les unités par une lettre droite (parfois deux)
 - Issue d'un nom propre: majuscule
 - Issue d'un nom commun: minuscule
 - Exemples: $d = 12 \text{ m}$; $U = 230 \text{ V}$
- Multiples: abréviations pour simplifier l'écriture d'unités en fonction des cas
 - Exemple: $t = 0.000001 \text{ s} = 1 \mu\text{s}$

Représentation scientifique – grandeurs physiques

| Préfixe | Symbole | Multiplicateur | Notation scientifique |
|---------|---------|-----------------------------------|-----------------------|
| yotta | Y | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 | 10^{24} |
| zetta | Z | 1 000 000 000 000 000 000 000 | 10^{21} |
| exa | E | 1 000 000 000 000 000 000 | 10^{18} |
| peta | P | 1 000 000 000 000 000 | 10^{15} |
| tera | T | 1 000 000 000 000 | 10^{12} |
| giga | G | 1 000 000 000 | 10^9 |
| mega | M | 1 000 000 | 10^6 |
| kilo | k | 1 000 | 10^3 |
| | | 1 | 10^0 |
| milli | m | 0.001 | 10^{-3} |
| micro | μ | 0.000 001 | 10^{-6} |
| nano | n | 0.000 000 001 | 10^{-9} |
| pico | p | 0.000 000 000 001 | 10^{-12} |
| femto | f | 0.000 000 000 000 001 | 10^{-15} |
| atto | a | 0.000 000 000 000 000 001 | 10^{-18} |
| zepto | z | 0.000 000 000 000 000 000 001 | 10^{-21} |
| yocto | y | 0.000 000 000 000 000 000 000 001 | 10^{-24} |

- Unité du système international (SI)
 - Uniformisation des unités dans la communauté scientifique
 - Les unités sont définies par 7 grandeurs fondamentales

| Grandeur fondamentale | Unité | | Dimension |
|-----------------------|------------|---------|-----------|
| | Nom | Symbole | Symbole |
| longueur | mètre | m | L |
| masse | kilogramme | kg | M |
| temps | seconde | s | T |
| intensité électrique | ampère | A | I |
| température | kelvin | K | θ |
| quantité de matière | mole | mol | N |
| intensité lumineuse | candela | cd | J |

Analyse dimensionnelle - Exemple



$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

↑ masse
↙ vitesse

$$[E_c] = [m] \cdot [v]^2$$

$$= M \cdot (L \cdot T^{-1})^2$$

$$[E_c] = M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$$

$$J \equiv kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

$$x(t) = \frac{1}{2} mg t^2$$

$$L = ?$$

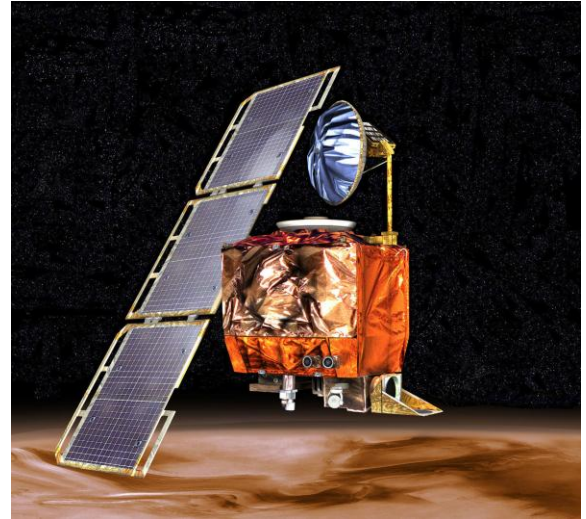
$$[mg t^2] = M \cdot L \cdot T^{-2} \cdot T^2$$

$$= M \cdot L$$

\Rightarrow équation fautive

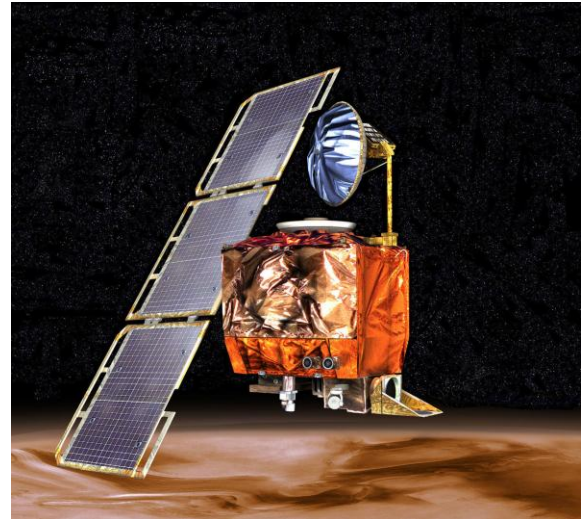
De l'importance d'être clair dans les unités

- Mission de la NASA en 1998: satellite d'étude de Mars



- Mission de la NASA en 1998: satellite d'étude de Mars détruit à cause... d'une mauvaise conversion d'unité!
 - Coût: \$125 million

*“Designed to study Mars from orbit and serve as a communications relay for the Mars Polar Lander and Deep Space probes, the Mars Climate Orbiter was **unsuccessful due to a navigation error caused by a failure to translate English units to metric.** Last contact with the spacecraft was on September 23, 1999, nine months after launch, and an investigation found that the spacecraft burned up in Mars' atmosphere.”*



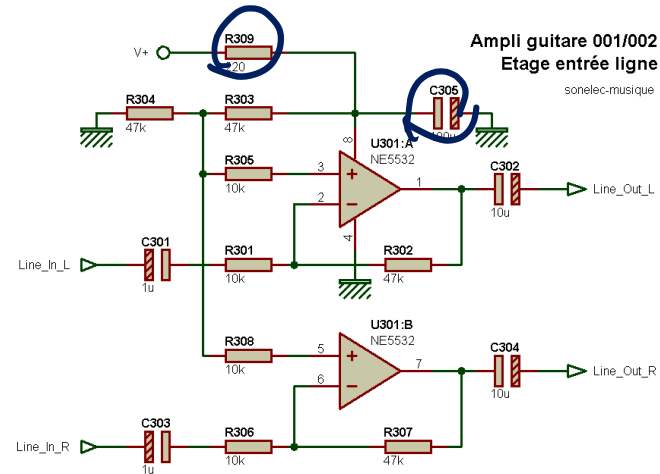
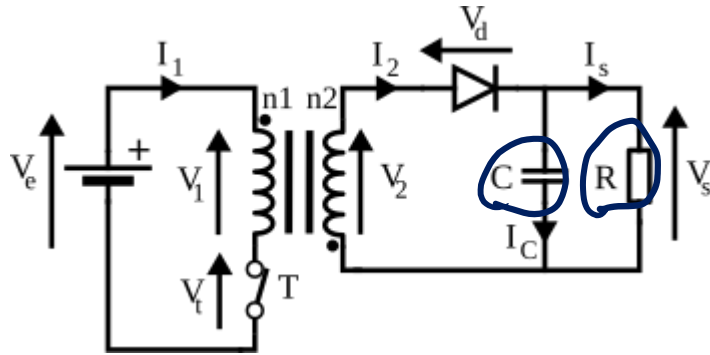
Représentation scientifique – forme graphique

- Un système peut être représenté graphiquement
 - Le schéma doit être clair
 - Le schéma doit être universel

















- Un système peut être représenté graphiquement
 - Le schéma doit être clair
 - Le schéma doit être universel

- Les schémas électriques sont soumis à des conventions



Représentation scientifique – forme graphique

| Symbole | Signification | Symbole | Signification |
|---|---------------------------------|---|--------------------------|
|  | Conducteur parfait (fil) |  | Source idéale de tension |
|  | Résistance (R) ou impédance (Z) |  | Source idéale de courant |
|  | Condensateur (C) |  | Croisement sans contact |
|  | Inductance (L) |  | ampèremètre |
|  | Diode |  | voltmètre |
|  | Lampe |  | terre |
|  | Interrupteur |  | masse |



Points clés

- Toujours préciser les unités
- Vérifier l'homogénéité des équations (même unité de chaque côté)
- Utiliser des multiplicateurs appropriés
- Utiliser un seul système d'unité (on ne mélange pas des mètres et des yards...)
- Respecter les conventions graphiques

Notions d'électrostatique



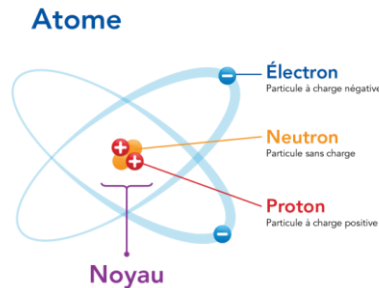
Charge électrique

- Il existe deux types de charges:
 - Charge positive (proton, cation)
 - Charge négative (électron, anion)
- La charge électrique est quantifiée
 - Le proton a une charge $q = +e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - L'électron a une charge $q = -e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - e : charge élémentaire
- Un système avec autant de charges positives que négatives est dit **électriquement neutre**

→ coulomb

Charge électrique – atome et ion

- Un atome est constitué de protons, de neutrons et d'électrons
 - Il y a autant de protons que d'électrons: l'atome est électriquement neutre



- Si l'on change le nombre d'électrons, l'atome devient un ion
 - Un ion est chargé positivement s'il a plus de protons que d'électrons
 - Un ion est chargé négativement s'il a plus d'électrons que de protons

- Les charges électriques peuvent s'attirer ou se repousser: une force électrostatique peut mettre des charges en mouvement
 - Les charges de mêmes signes se repoussent
 - Les charges de signes opposés s'attirent

- Loi de Coulomb:

Valeur des charges électriques

Vecteur unitaire

$$\vec{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

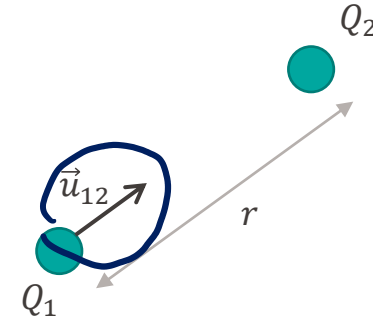
$$\|\vec{u}_{12}\| = 1$$

Unité: newton (N)

Distance entre les charges

Permittivité diélectrique

Force subie par Q_2 due à Q_1



Charles-Augustin Coulomb
1736-1806
Physicien et ingénieur
français



- Loi de Coulomb:

Valeur des charges électriques

Vecteur unitaire

$$\vec{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

Force subie par Q_2 due à Q_1

Distance entre les charges

Permittivité diélectrique

- La permittivité est une propriété du matériau. Dans le vide, elle vaut:
 $\epsilon_0 \simeq 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
- Dans un matériau diélectrique, elle s'écrit: $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

- Comment représenter l'influence d'un environnement sur une charge?

$$\vec{F}_{12} = Q_2 \cdot \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

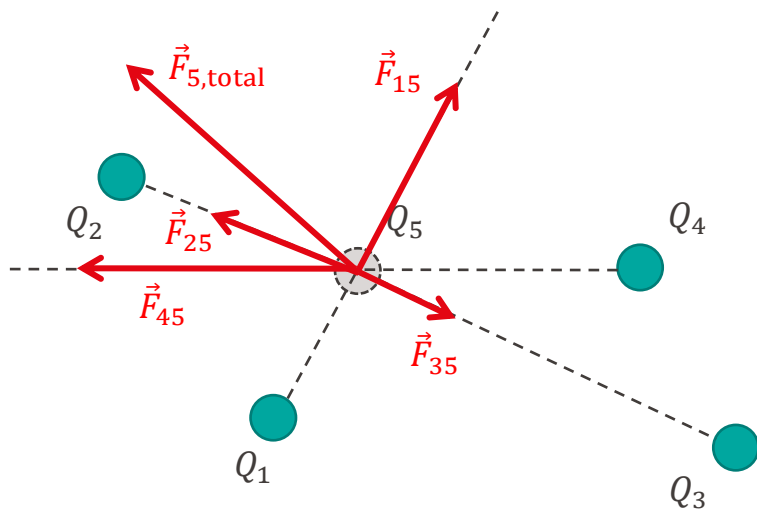
Dépend de la particule étudiée Dépend de l'environnement

- Le champ électrique d'une charge ponctuelle:

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_{12}}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_1$$

Unité: volt par mètre (V/m)

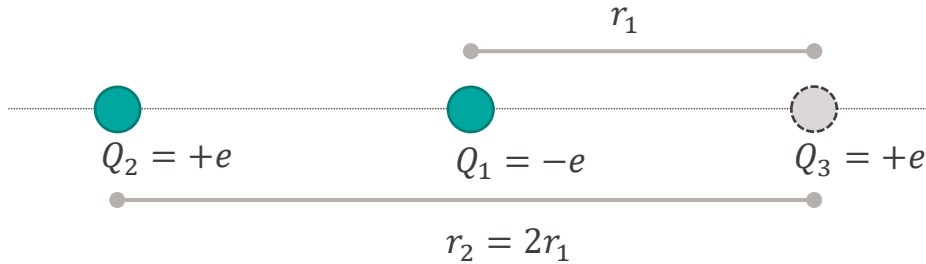
- Que se passe-t-il lorsqu'il y a plusieurs charges?
 - Les forces de plusieurs sources s'additionnent (et donc les champs électriques aussi!)



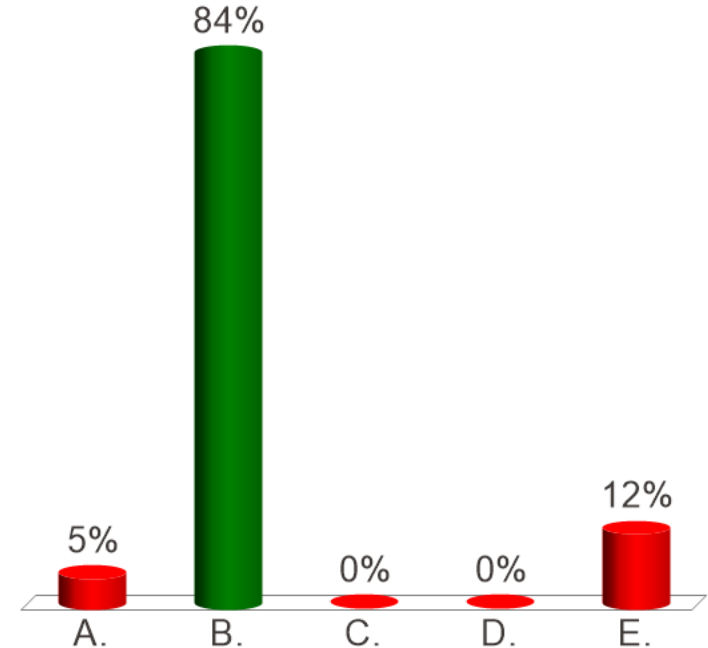
$$\vec{F}_{j,\text{total}} = \sum_{k=1}^N \vec{F}_{kj} = Q_j \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{4\pi\epsilon r_k^2} \vec{u}_{kj}$$

$$\vec{E}_j = \frac{\vec{F}_{j,\text{total}}}{Q_j} \Rightarrow \vec{E}_j = \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{4\pi\epsilon r_k^2} \vec{u}_{kj}$$

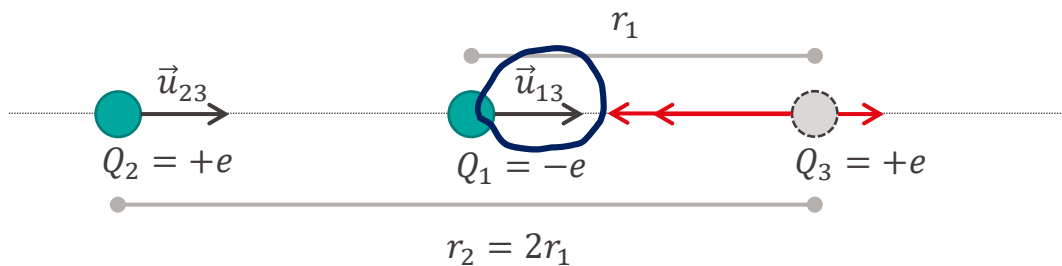
Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?



- A. Vers la droite
- ✓ B. Vers la gauche
- C. Vers le haut
- D. Vers le bas
- E. Elle ne bouge pas



- Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?

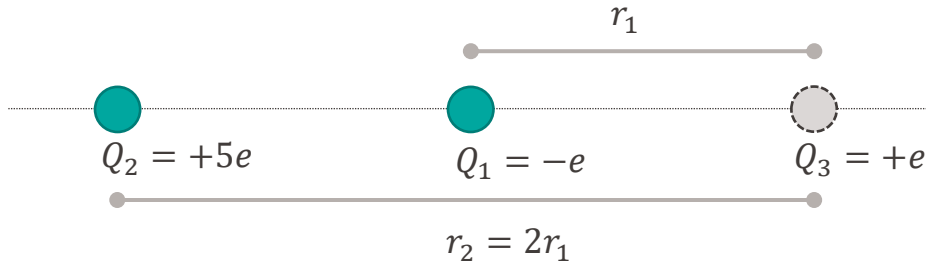


$$\vec{F}_{13} = \frac{(+e)(-e)}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

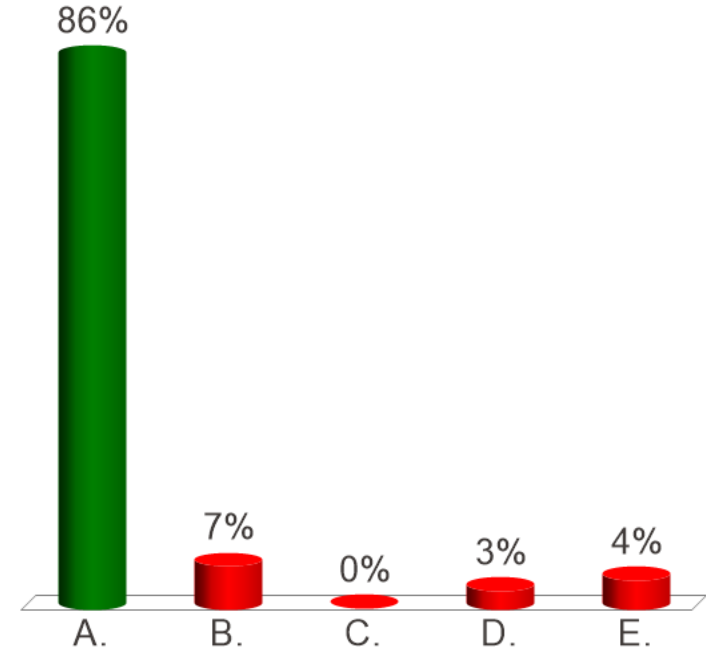
$$\vec{F}_{23} = \frac{(+e)(+e)}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{u}_{23} = +\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4r_1^2} \vec{u}_{13}$$

$$\Rightarrow \vec{F}_{\text{total}} = -\frac{3e^2}{16\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

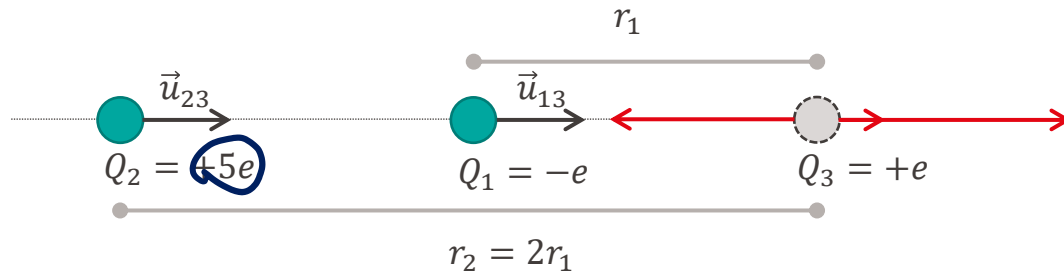
Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?



- ✓ A. Vers la droite
- B. Vers la gauche
- C. Vers le haut
- D. Vers le bas
- E. Elle ne bouge pas



- Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?

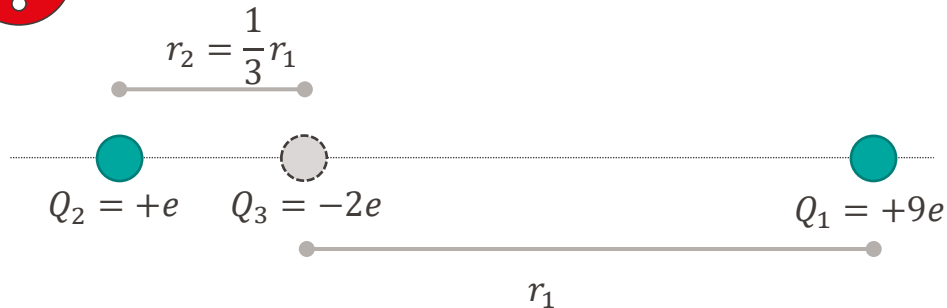


$$\vec{F}_{13} = \frac{(+e)(-e)}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

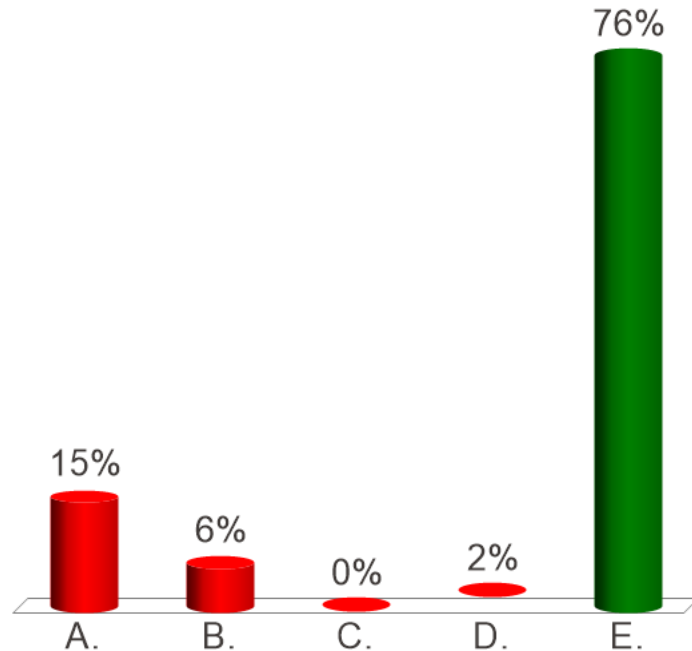
$$\vec{F}_{23} = \frac{(+e)(+5e)}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{u}_{23} = +\frac{5e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4r_1^2} \vec{u}_{13}$$

$$\Rightarrow \vec{F}_{\text{total}} = +\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

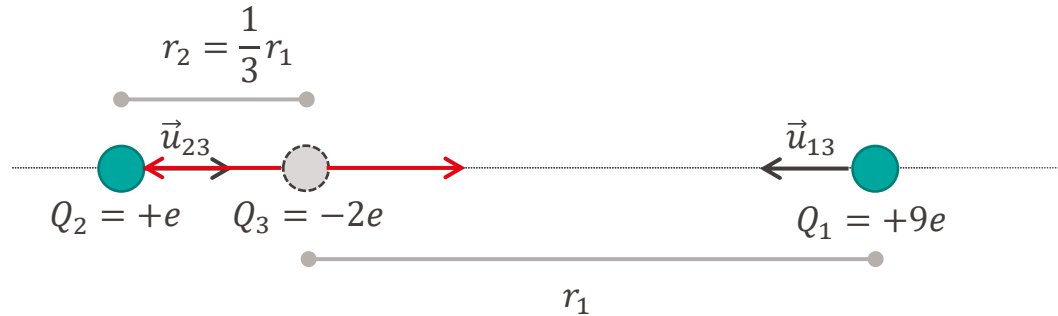
Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?



- A. Vers la droite
- B. Vers la gauche
- C. Vers le haut
- D. Vers le bas
- ✓ E. Elle ne bouge pas



- Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?

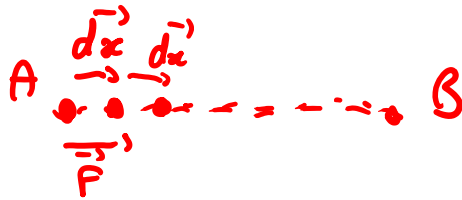
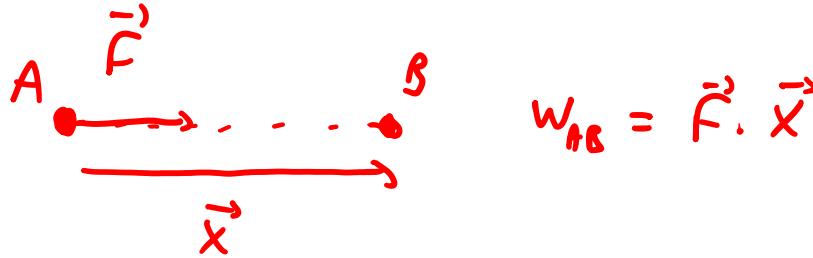


$$\vec{F}_{13} = \frac{(-2e)(+9e)}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13} = -\frac{18e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

$$\Rightarrow \vec{F}_{\text{total}} = \vec{0}$$

$$\vec{F}_{23} = \frac{(-2e)(+e)}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{u}_{23} = +\frac{18e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

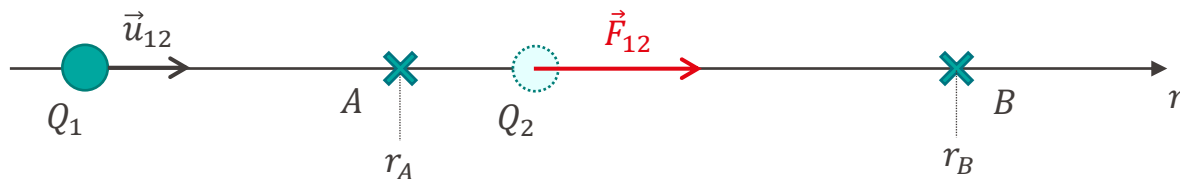
- La force électrostatique produit un **travail mécanique** durant le déplacement d'un point A à un point B



$$W_{AB} = \sum \vec{F} \cdot d\vec{x} \quad \rightsquigarrow \quad W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{x}$$



- La force électrostatique produit un **travail mécanique** durant le déplacement d'un point A à un point B
- Exemple: déplacement unidimensionnel



$$W_{AB} = \int_{r_A}^{r_B} F_{12}(r) dr$$

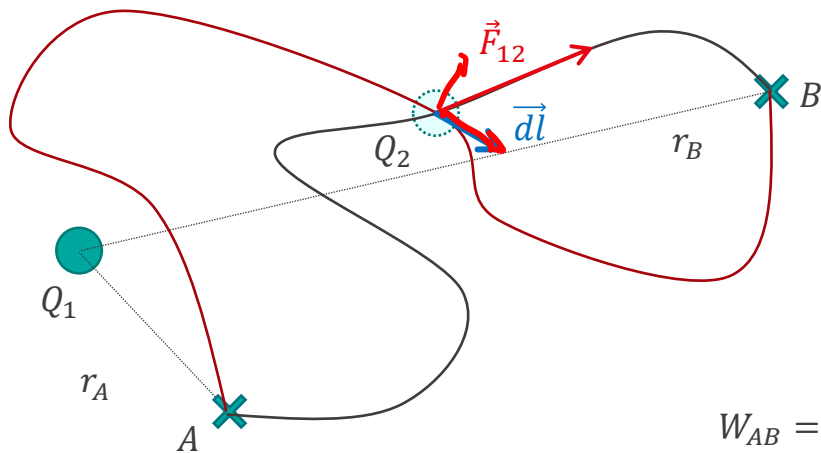
$$W_{AB} = \underbrace{Q_2}_{\text{Dépend de la}} \int_{r_A}^{r_B} \underbrace{E_1(r)}_{\text{Dépend de l'environnement}} dr$$

Unité: joule (J)

Dépend de la
particule étudiée

Dépend de l'environnement

- La force de Coulomb est **conservative**.
 - Son travail mécanique ne dépend pas du chemin emprunté



$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F}_{12} \cdot d\vec{l} = \int_{r_A}^{r_B} |F_{12}(r)| dr$$

$$W_{AB} = Q_2 \int_{r_A}^{r_B} |E_1(r)| dr = Q_2 \frac{Q_1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

Force électrostatique – potentiel électrique

- Le travail mécanique correspond à une variation d'**énergie potentielle**
- L'énergie potentielle dépend de la charge et du champ électrique environnant
- On définit la différence de **potentiel électrique** comme la circulation du champ électrique entre A et B

$$V_A - V_B = \int_{r_A}^{r_B} E(r) dr$$

- Le travail mécanique correspond à une variation d'**énergie potentielle**
- L'énergie potentielle dépend de la charge et du champ électrique environnant
- On définit la différence de **potentiel électrique** comme la circulation du champ électrique entre A et B

$$V_A - V_B = \int_{r_A}^{r_B} E(r) dr$$

- Potentiel électrique d'une charge ponctuelle à une distance r :

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} + V_{\text{ref}}$$

Unité: volt (V)

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} + V_{\text{ref}}$$

- Le potentiel est défini par rapport à une référence.
 - En électromagnétisme, on prend l'infini comme référence, en posant:

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} V(r) = 0$$

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}$$

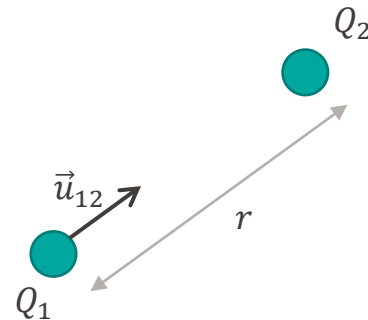
- Dans un circuit, on choisit un point arbitraire comme référence, appelé « masse ».

- La force électrostatique met les charges en mouvement
- La force électrostatique peut être attractive ou répulsive en fonction du type de charges
- On définit des propriétés globales: le champ électrique, le potentiel électrique
- Forces, champs et potentiels électriques obéissent au principe de superposition: les influences individuelles s'ajoutent pour donner l'influence totale

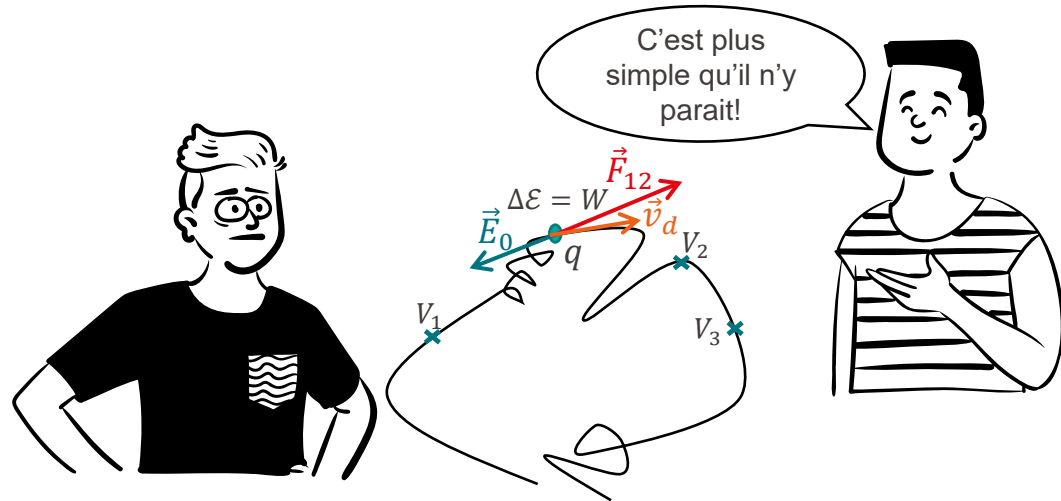
$$\vec{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_{12}}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} + V_{\text{ref}}$$



Grandeurs électriques

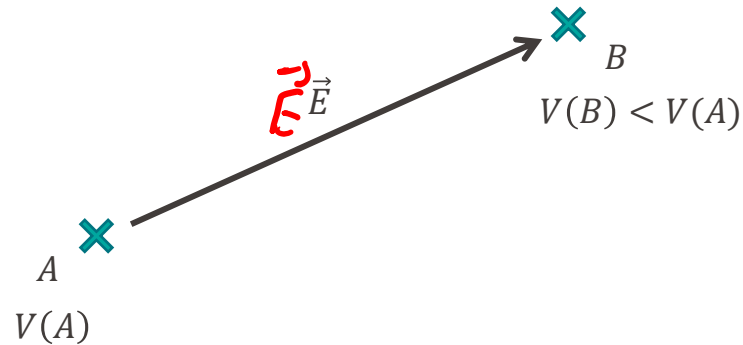


Force électrostatique – potentiel électrique

- La différence de potentiel entre deux points distants est appelée tension électrique.

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_{r_A}^{r_B} E(r) dr$$

Unité: volt (V)



Force électrostatique – potentiel électrique

- La différence de potentiel entre deux points distants est appelée tension électrique.

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_{r_A}^{r_B} E(r) dr$$

Unité: volt (V)

- La différence de potentiel entre deux points distants est appelée tension électrique.

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_{r_A}^{r_B} E(r) dr$$

Unité: volt (V)

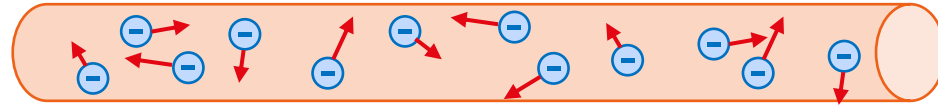
- Dans un matériau électriquement neutre, le champ électrique est constant. On en déduit:

$$V_{AB} = E \cdot d$$

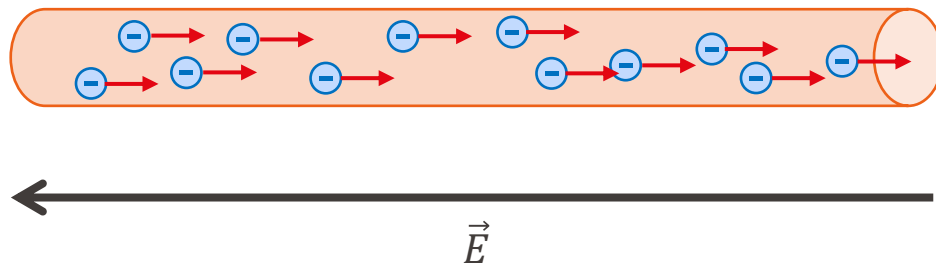
$$E = \frac{V_{AB}}{d} \Rightarrow E \cong V \cdot m^{-1}$$

- Un matériau ayant des électrons libres est dit **conducteur**. Les électrons peuvent circuler librement dans le matériau
 - Exemples: les métaux, les solutions ioniques
- Sans stimulation, les électrons bougent aléatoirement, sans direction donnée (vitesse moyenne nulle)
- Sous l'effet d'un champ électrique, les électrons se déplacent dans une direction donnée. La vitesse moyenne n'est pas nulle
 - On parle de **courant électrique**

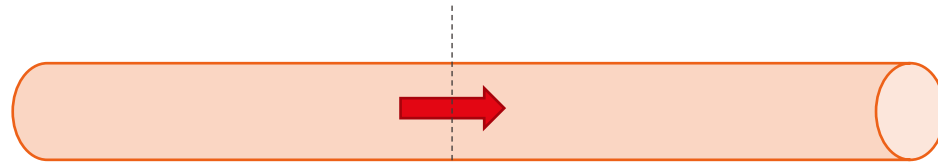
- Pas de champ électrique: pas de déplacement moyen des charges



- Champ électrique: déplacement directionnel des charges



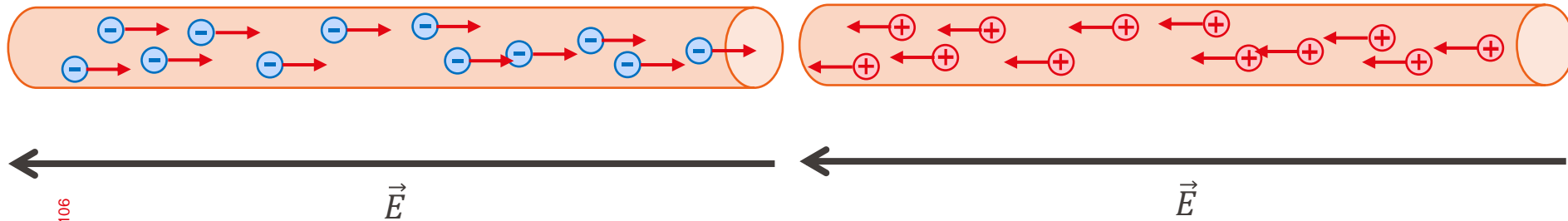
- On définit le courant électrique comme le flux de charges traversant le matériau (combien de charges passent à un endroit donné pendant un temps donné)



$$I = \frac{dq}{dt}$$

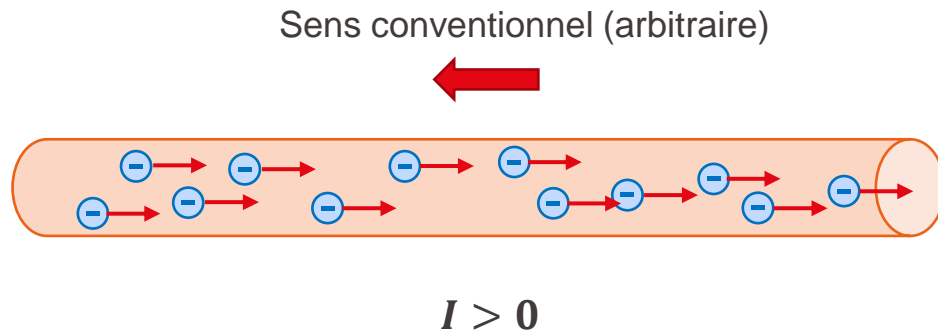
Unité: ampère (A)

- On définit le courant électrique comme le flux de charges traversant le matériau (combien de charges passent à un endroit donné pendant un temps donné)
- Par convention, le courant électrique est défini comme le **flux de charges positives**



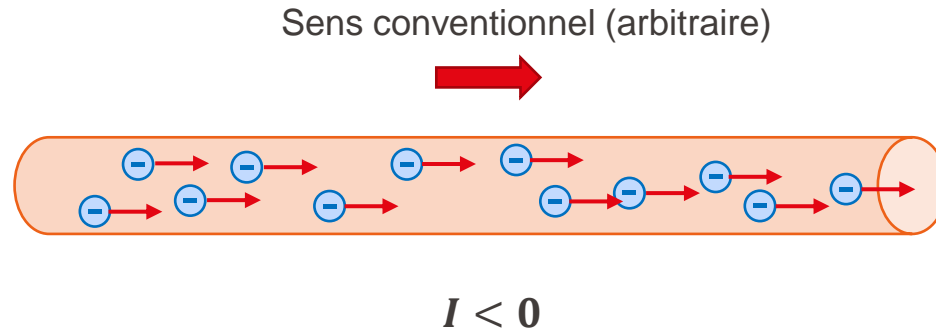
Matériaux conducteurs

- Par convention, le courant électrique est défini comme le **flux de charges positives**
- On définit un sens conventionnel pour représenter le courant graphiquement
 - Le sens conventionnel n'est pas forcément le sens physique de déplacement des charge!



Matériaux conducteurs

- Par convention, le courant électrique est défini comme le **flux de charges positives**
- On définit un sens conventionnel pour représenter le courant graphiquement
 - Le sens conventionnel n'est pas forcément le sens physique de déplacement des charge!

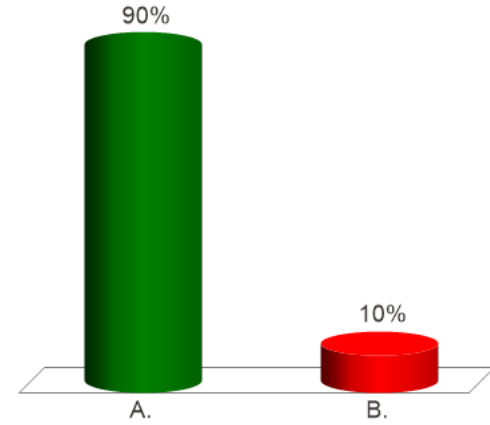




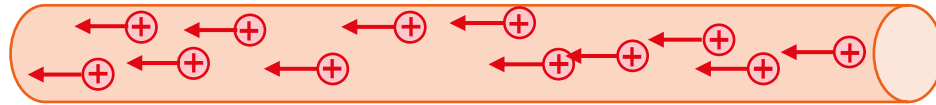
Quel est le signe du courant?

✓ A. $I < 0$

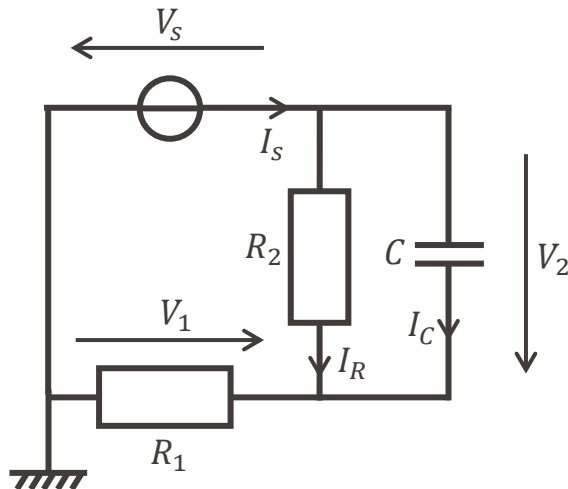
B. $I > 0$



Sens conventionnel (arbitraire)



Exemple de schéma électrique



- Chaque grandeur peut être positive ou négative
- Le choix des sens conventionnels est arbitraire et libre

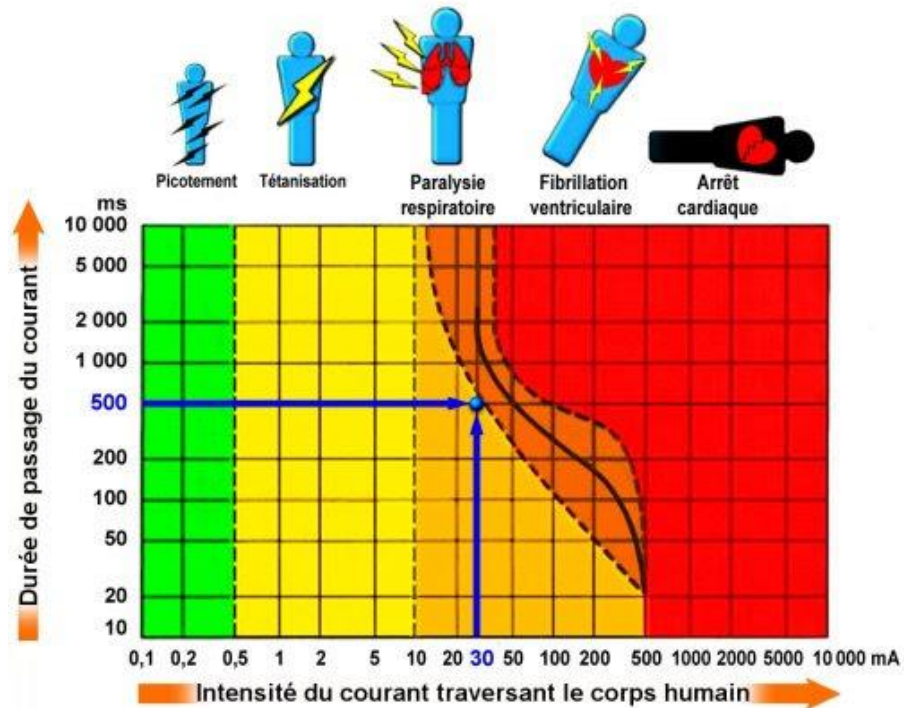
- Certains matériaux n'ont pas de charges libres, toutes les charges sont fixes. On parle de matériau **isolant**
 - Exemple: le verre
- Il ne peut pas y avoir de courant continu traversant un isolant
- Sous l'effet d'un champ électrique trop fort, un isolant peut devenir conducteur. On parle de claquage (ou de rigidité diélectrique)
 - Exemple: la foudre



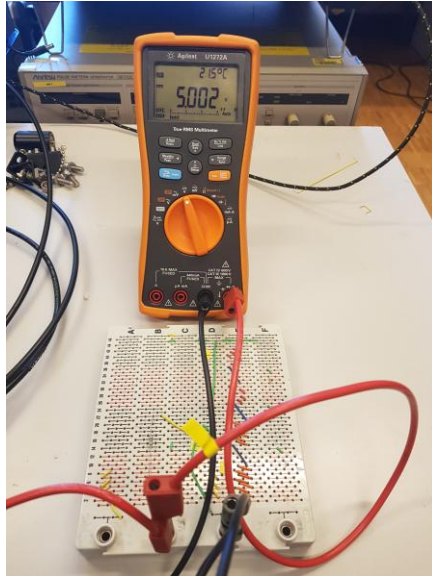
| Conducteurs | Isolants |
|-------------|------------|
| Argent | Céramiques |
| Or | Verre |
| Cuivre | Air |
| Eau salée | Eau pure |

| Conducteurs | Isolants |
|---------------------|------------|
| Argent | Céramiques |
| Or | Verre |
| Cuivre | Air |
| Eau salée | Eau pure |
| Corps humain | |

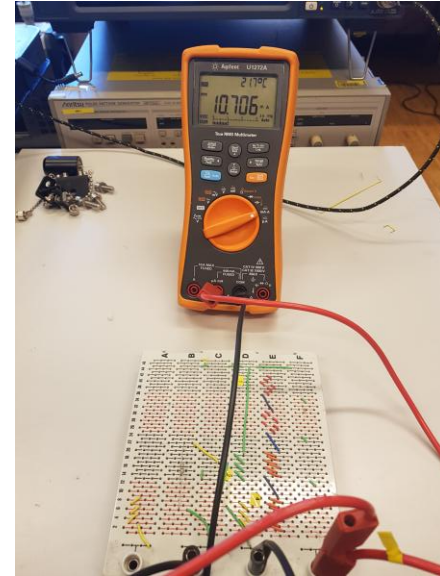
- L'électricité peut être dangereuse
- Toujours prendre les précautions nécessaires pour rester en sécurité



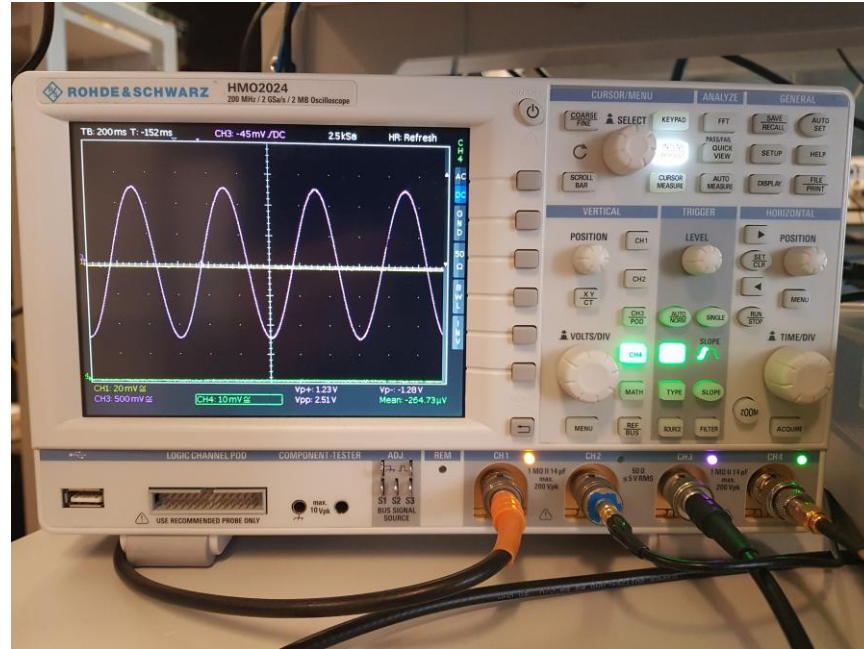
- La tension électrique se mesure avec un voltmètre



- Le courant électrique se mesure avec un ampèremètre



- On peut aussi visualiser des signaux électriques avec un oscilloscope





Points clés

- On définit deux grandeurs de base en électricité: la tension et le courant
- Certains matériaux permettent le déplacement de charges (conducteurs, principalement les métaux), d'autres le bloque (isolants)
- Les grandeurs électriques sont fondées sur des conventions de sens, définissant les signes

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_{r_A}^{r_B} E(r) dr$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Pour aller plus loin



- Il existe des matériaux qui ne sont considérés ni comme isolants, ni comme conducteurs: **les semiconducteurs**

- Leurs propriétés peuvent être modifiées par l'inclusion de dopants

- Ils sont utilisés massivement en microélectronique
 - Transistors
 - Diodes

- Exemples: silicium, arséniure de gallium, phosphore d'indium...

R. Dufy, « La fée électricité »
Musée d'art moderne, Paris

**Merci pour votre
attention**

