



R. Dufy, Musée d'art moderne, Paris

Cours 1: Notions d'électrostatique et grandeurs électriques

EE 106 – Sciences et
technologies de
l'électricité

Automne 2024

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

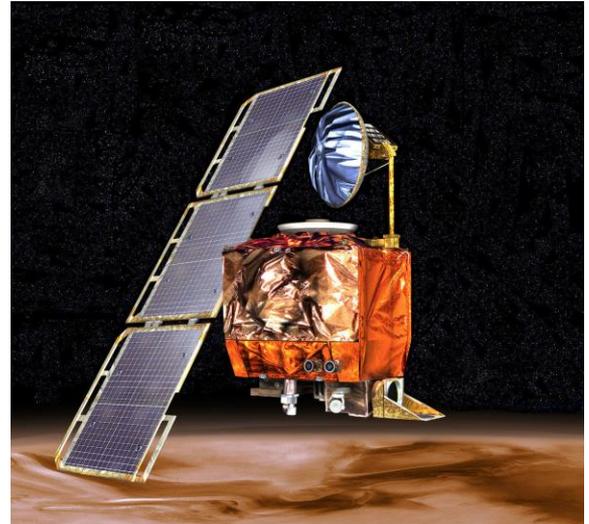
Exemple: $[U] = M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$ donc $V \equiv \text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{s}^3 \cdot \text{A})$



De l'importance d'être clair dans les unités

- 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.”*



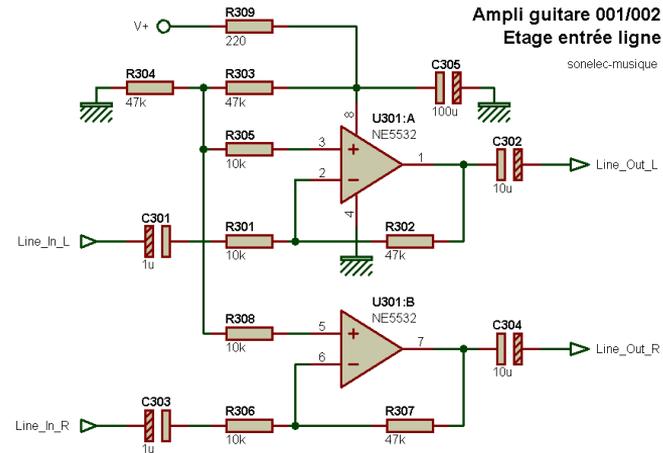
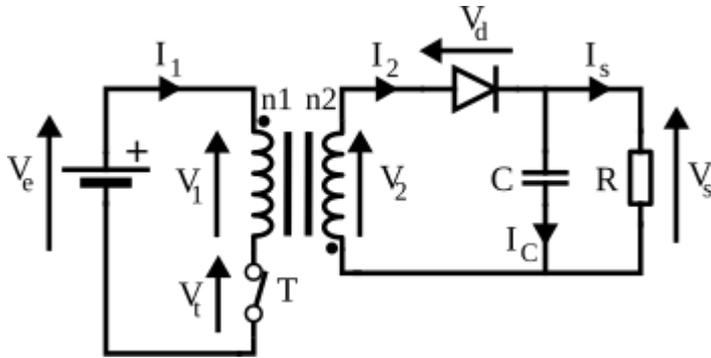
Représentation scientifique – forme graphique

- 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



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

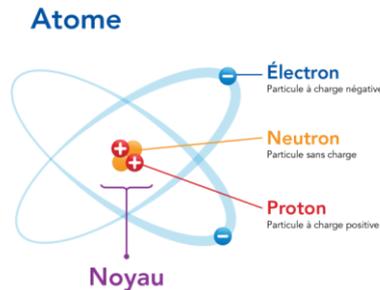


Charge électrique

- 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**

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

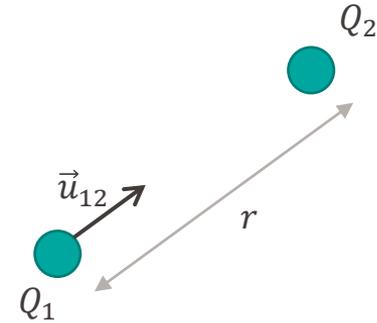
$$\vec{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

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?

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

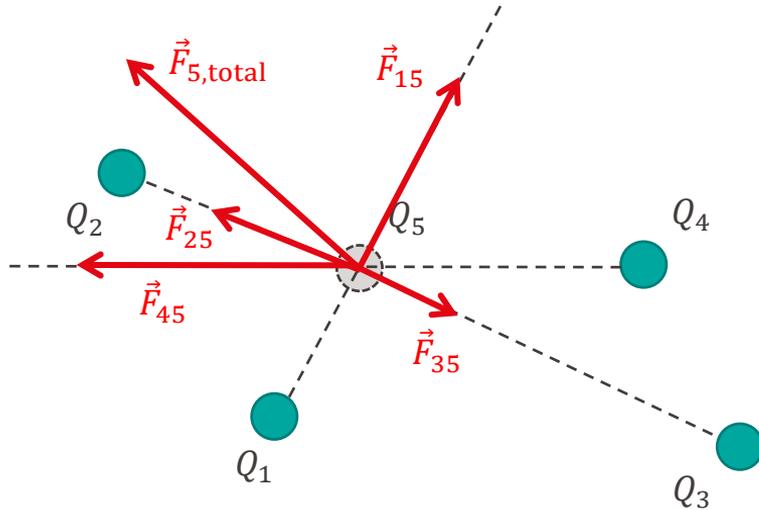
Dépend de la particule étudiée Dépend de l'environnement

- 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)

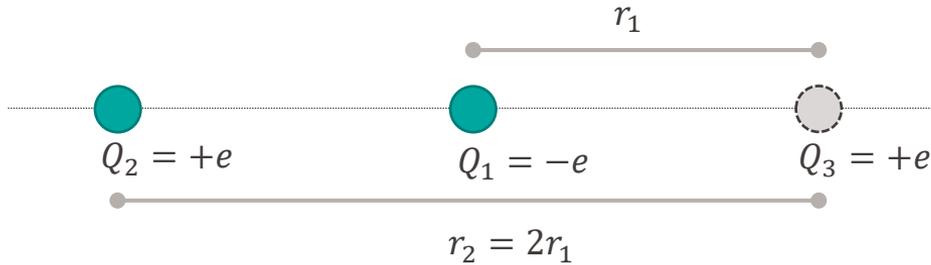
- Que se passe-t-il lorsqu'il y a plusieurs charges?
 - Les forces de plusieurs sources s'additionnent (et donc les champs électriques aussi!)



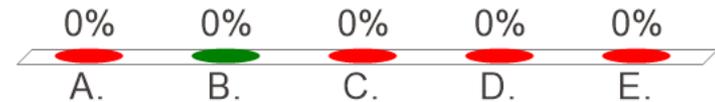
$$\vec{F}_{j,\text{total}} = \sum_{k=1}^N \vec{F}_{kj} = Q_j \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{4\pi\epsilon r_k^2} \vec{u}_{kj}$$

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

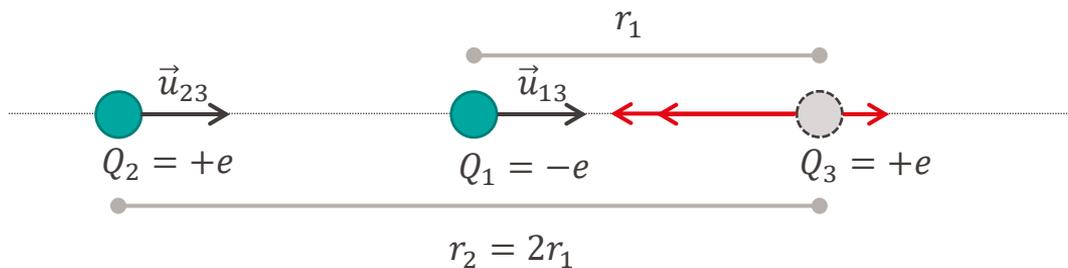
Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?



- 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?

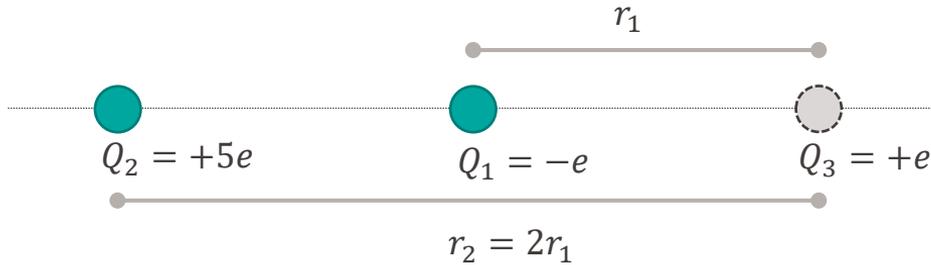


$$\vec{F}_{13} = \frac{(+e)(-e)}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

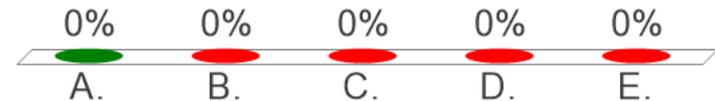
$$\vec{F}_{23} = \frac{(+e)(+e)}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{u}_{23} = +\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4r_1^2} \vec{u}_{13}$$

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

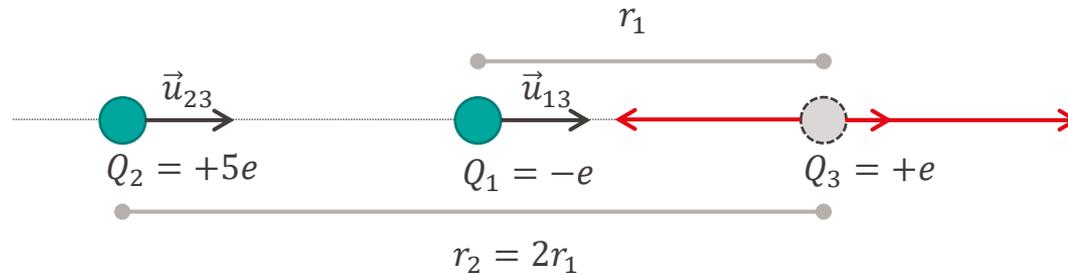
Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?



- ✓ 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?

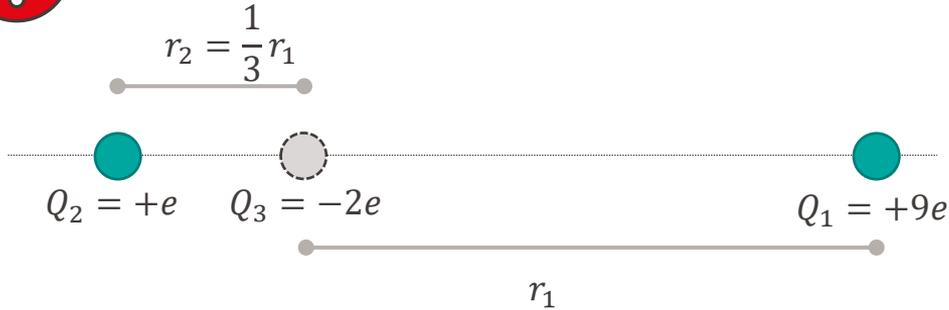


$$\vec{F}_{13} = \frac{(+e)(-e)}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

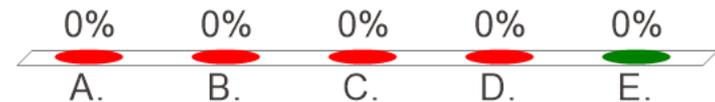
$$\vec{F}_{23} = \frac{(+e)(+5e)}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{u}_{23} = +\frac{5e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4r_1^2} \vec{u}_{13}$$

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

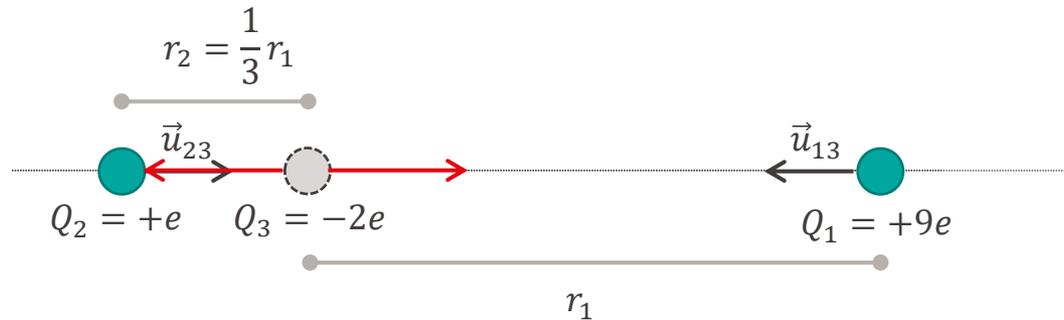
Dans quelle direction la particule Q_3 va-t-elle partir?



- 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?



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

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

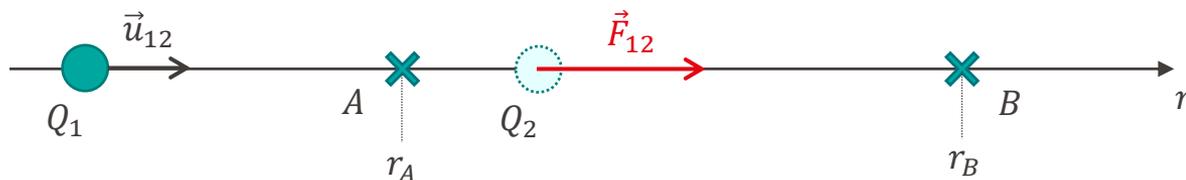
$$\vec{F}_{23} = \frac{(-2e)(+e)}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{u}_{23} = +\frac{18e^2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{u}_{13}$$

Force électrostatique - travail



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

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



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

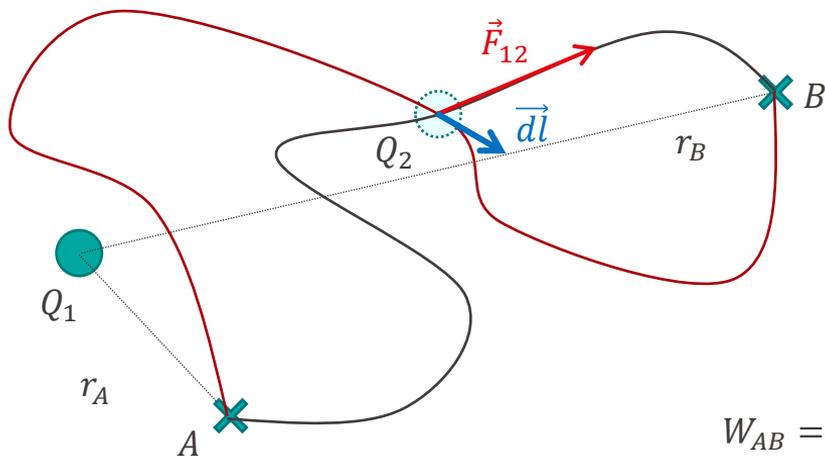
$$W_{AB} = \underbrace{Q_2}_{\text{Dépend de la}} \int_{r_A}^{r_B} \underbrace{E_1(r)}_{\text{Dépend de l'environnement}} dr$$

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



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

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

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

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

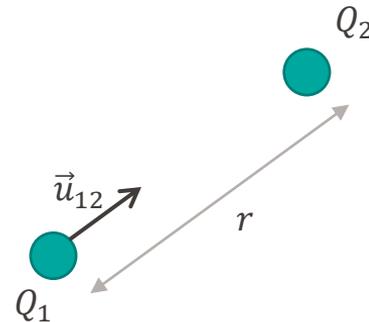
- Dans un circuit, on choisit un point arbitraire comme référence, appelé « masse ».

- 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

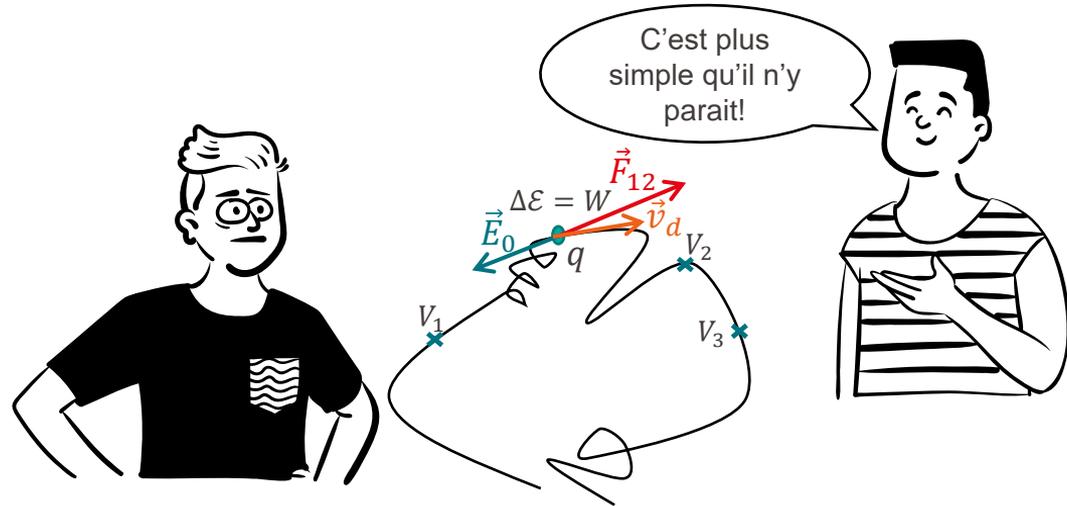
$$\vec{F}_{12} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \vec{u}_{12}$$

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

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



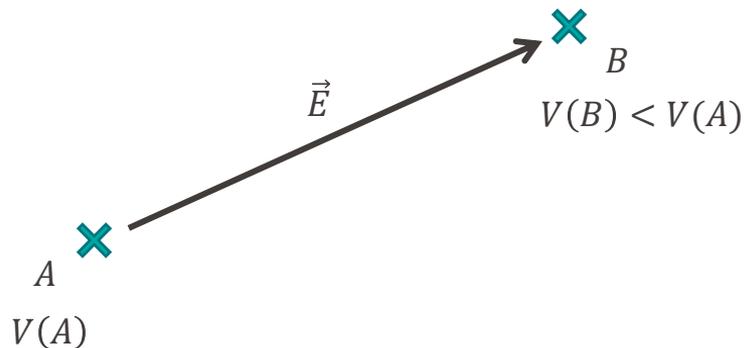
Grandeurs électriques



- 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)

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)

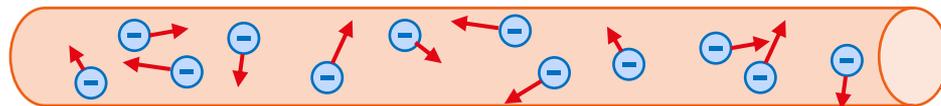
- Dans un matériau électriquement neutre, le champ électrique est constant. On en déduit:

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

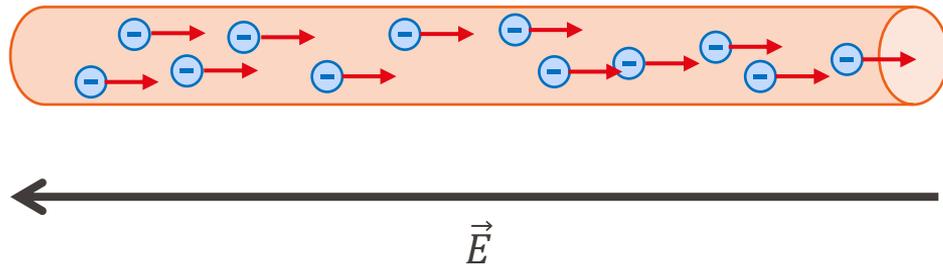
$$E = \frac{V_{AB}}{d}$$

- 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**

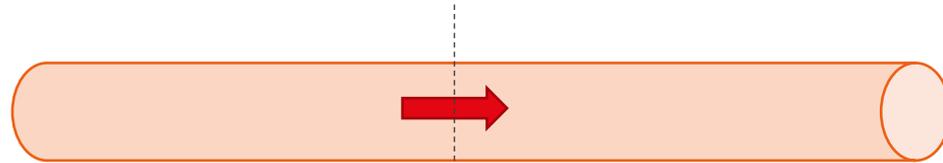
- Pas de champ électrique: pas de déplacement moyen des charges



- Champ électrique: déplacement directionnel des charges



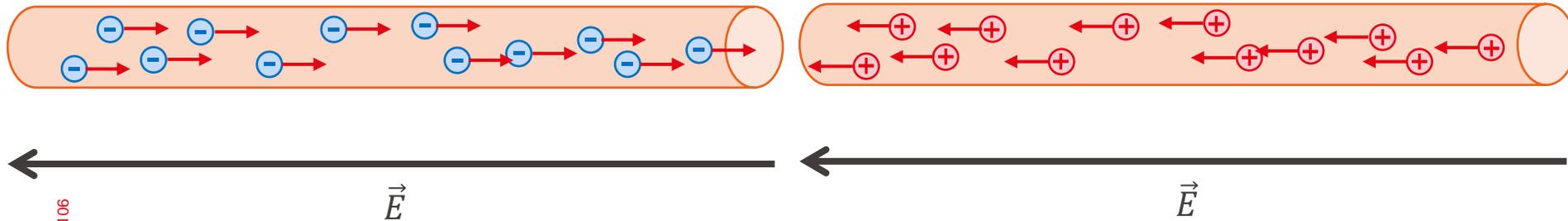
- On définit le courant électrique comme le flux de charges traversant le matériau (combien de charges passent à un endroit donné pendant un temps donné)



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

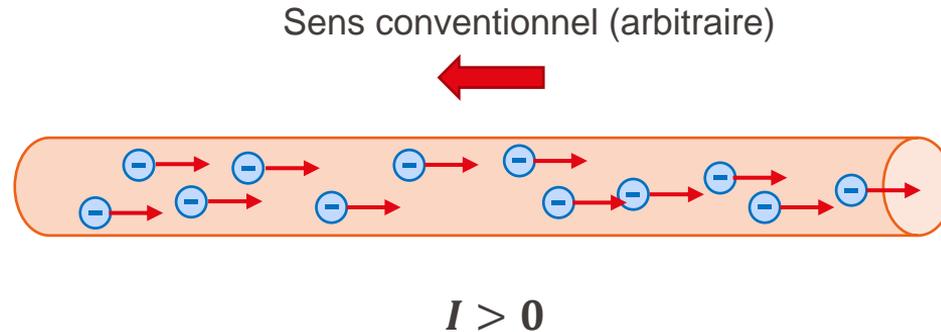
Unité: ampère (A)

- 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**



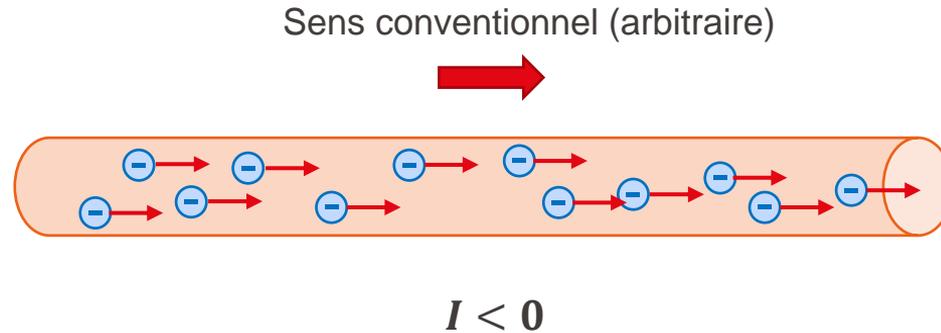
Matériaux conducteurs

- 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!





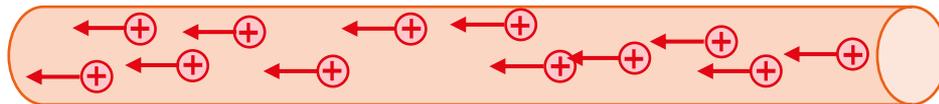
Quel est le signe du courant?

✓ A. $I < 0$

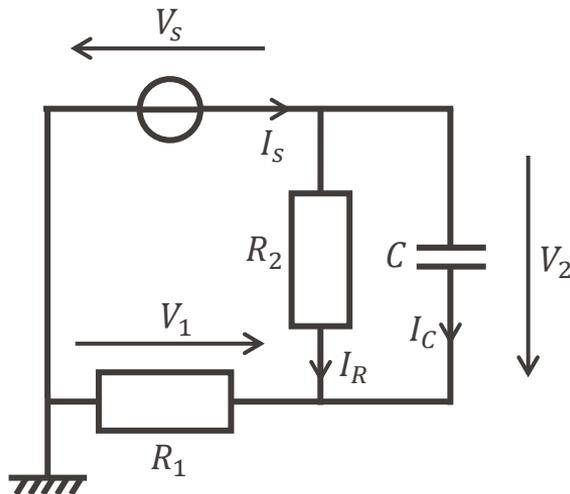
B. $I > 0$



Sens conventionnel (arbitraire)



Exemple de schéma électrique



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

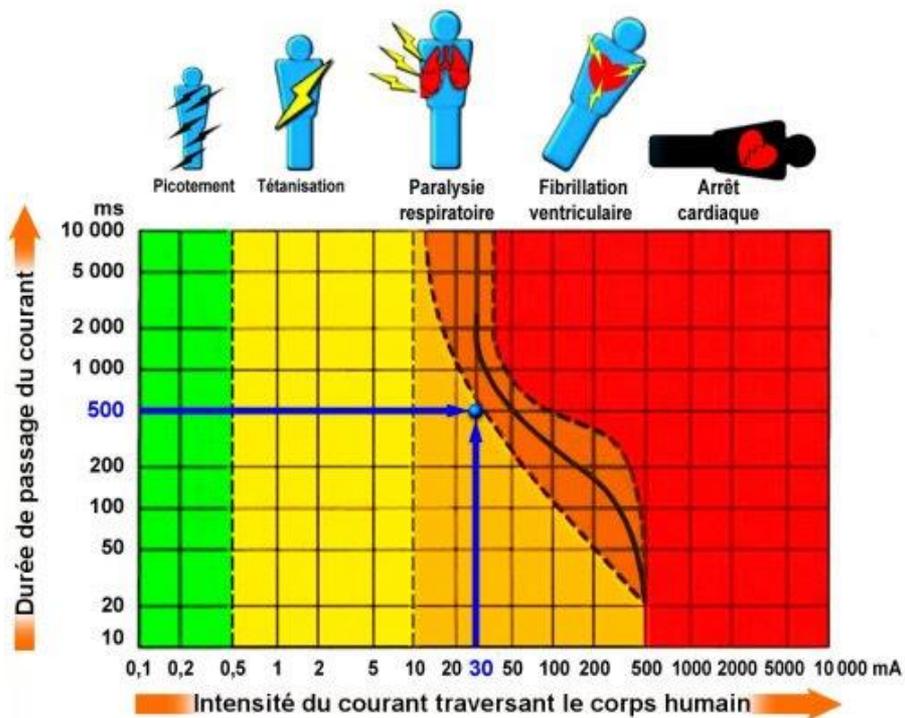
- Certains matériaux n'ont pas de charges libres, toutes les charges sont fixes. On parle de matériau **isolant**
 - Exemple: le verre
- Il ne peut pas y avoir de courant continu traversant un isolant
- Sous l'effet d'un champ électrique trop fort, un isolant peut devenir conducteur. On parle de claquage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



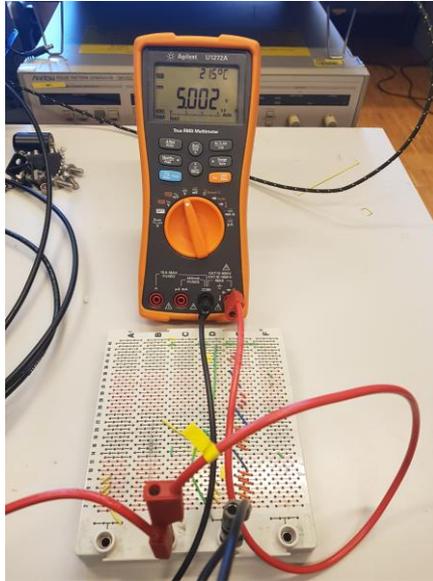
Conducteurs	Isolants
Argent	Céramiques
Or	Verre
Cuivre	Air
Eau salée	Eau pure

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

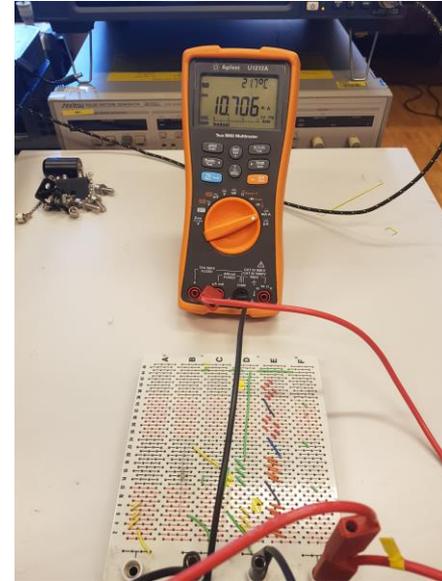
- L'électricité peut être dangereuse
- Toujours prendre les précautions nécessaires pour rester en sécurité



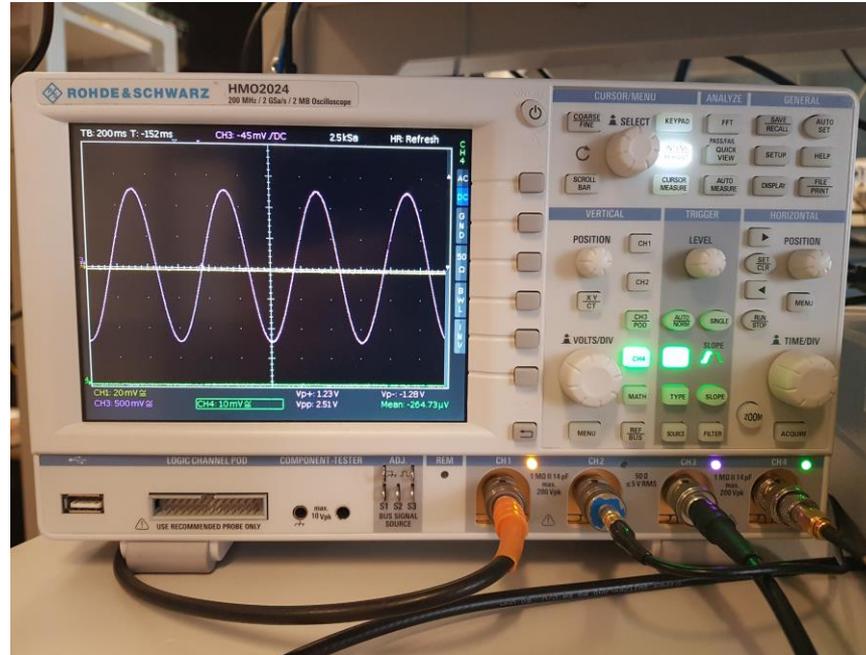
- La tension électrique se mesure avec un voltmètre



- 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 bloquent (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**