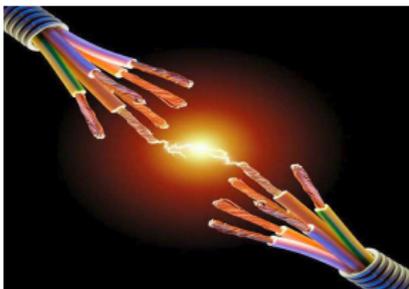


Cours préparatoire en Médecine

Électricité



Dr D. Wattiaux

Université de Mons

8 *novembre* 2017

Sommaire

- 1 Electricité statique
- 2 Loi de Coulomb
- 3 Champ électrique, tension électrique et intensité de courant
- 4 Circuits électriques

Charge électrique

La **charge électrique** est une propriété fondamentale de la plupart des particules élémentaires de l'Univers qui permet d'expliquer les interactions électromagnétiques (au même titre que la masse décrit les interactions gravitationnelles).

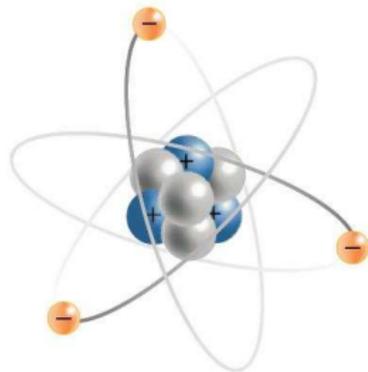
Il existe deux types de charges électriques, que l'on distingue par leurs signes, **positif** ou **négalif**. Des charges de **même signe** se **repoussent**, tandis que celle de **signes opposés** s'**attirent**.

La charge électrique **élémentaire** est celle de l'**électron** qui est **négalive** et est égale à :

$$q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

L'Unité S.I de la charge électrique est le **Coulomb** (C).

L'atome est constitué d'un noyau (proton et neutron) chargé positivement et d'un nuage d'électrons chargés négativement.

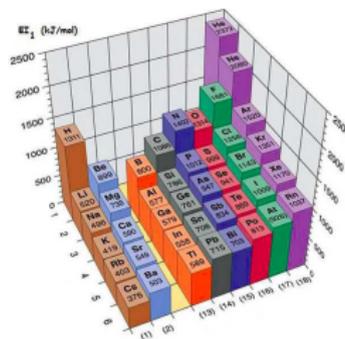


Triboélectricité

La **triboélectricité** (du grec tribo qui signifie frotter et électron qui signifie ambre) désigne le phénomène **électrostatique** créé par la **mise en contact** de deux matériaux de nature différente : une partie des **électrons** de la surface de contact d'un des deux matériaux est **transférée** à l'autre et ce transfert subsiste lors de la séparation (**ionisation** de la matière). L'**effet triboélectrique** peut être augmenté par apport d'énergie mécanique en frottant les matériaux l'un contre l'autre.

La quantité de charges électriques transférée dépend essentiellement de la nature des deux matériaux en contact. Lorsqu'on met en contact deux matériaux d'**affinités électroniques** différentes, des électrons passent du matériau de moins grande affinité au matériau de plus grande affinité. L'affinité électronique correspond à l'énergie libérée par un atome lorsqu'il capture un électron.

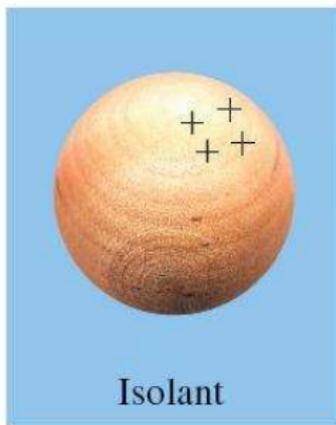
+	↑	peau humaine sèche cuir fourrure de lapin verre quartz cheveux nylon laine fourrure de chat soie aluminium
neutre ou quasi neutre		papier coton acier bois
-	↓	ambre cuivre argent or platine polystyrène cellophane PVC silicone téflon caoutchouc de silicone



Isolant et Conducteur

Lorsqu'un **isolant** reçoit une charge, il la retient où elle a été déposée.

Lorsqu'un **conducteur** reçoit une charge, celle-ci se répartit sur toute sa surface extérieure, en raison de la répulsion des électrons mobiles; aucune charge ne subsiste sur la surface intérieure d'un conducteur comportant une cavité (cage de Faraday).

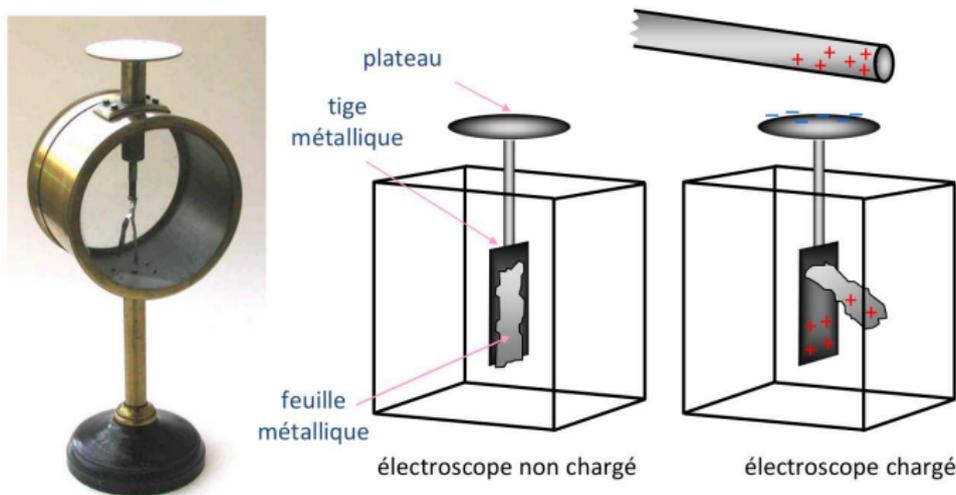


Influence électrostatique

À l'approche d'un corps chargé, les charges d'un corps neutres se répartissent différemment ; c'est le **phénomène d'influence** (induction par influence).

Un corps extérieur chargé négativement attire (**repousse**) les charges positives (**néglatives**) du corps neutre.

L'influence électrostatique peut être utilisée pour détecter des charges électriques (exemple de l'**électroscope** à feuilles).



Loi de Coulomb

La **loi de Coulomb** (1785) exprime la force d'interaction entre deux particules chargées électriquement et peut s'énoncer de la manière suivante :

L'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges. La force est portée par la droite passant par les deux charges.

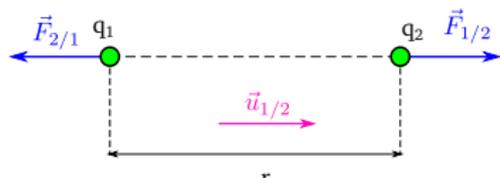
D'un point de vue mathématique, la **loi de coulomb** s'exprime de la manière suivante :

$$\vec{F}_{1/2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{12}$$

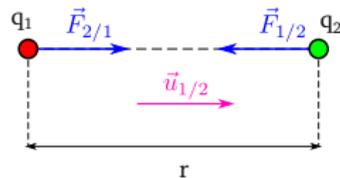
où k est une constante caractéristique du milieu qui est égale, dans le vide, à :

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

Si charges de même signe : répulsion



Si charges de signe contraire : attraction



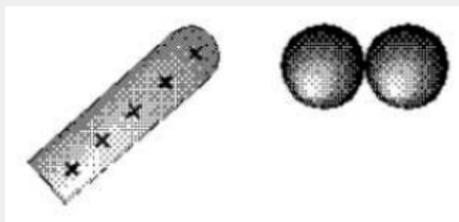
Remarque : $\vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}$ (Principe de l'action/réaction)

Influence électrostatique

Exercices d'application

Exercice 144 du syllabus

On approche une barre isolante chargée **positivement** de deux sphères métalliques, sans les toucher. Les deux sphères sont en contact l'une avec l'autre et ne porte pas de charge au départ. Si on sépare ensuite les deux sphères, quelle charge portera la sphère de droite ?



- a. une charge nulle
- b. une charge positive
- c. une charge négative
- d. une charge impossible à déterminer

Loi de Coulomb

Exercices d'application

Exercice 145 du syllabus

Deux corps possédant une charge électrique exercent l'un sur l'autre une force dont l'intensité est égale à 400 mN. Quelle sera l'intensité de cette force si, en les déplaçant, on réduit leur distance à seulement un huitième de sa longueur initiale ?

Exercice 146 du syllabus

Calculez la grandeur F de la force d'attraction électrique qui s'exerce entre le noyau d'un atome de Fe ($Z=26$) et l'électron qui est le plus rapproché, sachant que la distance qui les sépare est égale à 1 pm. Considérez le noyau de cet atome comme une charge ponctuelle.

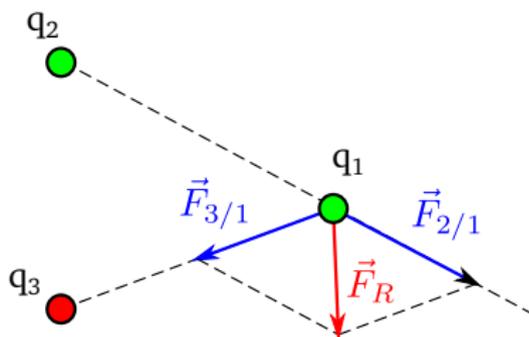
Rappels

- $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$
- $q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Principe d'indépendance des forces et principe de superposition

Les forces électriques satisfont au **principe d'indépendance des forces** et **principe de superposition** :

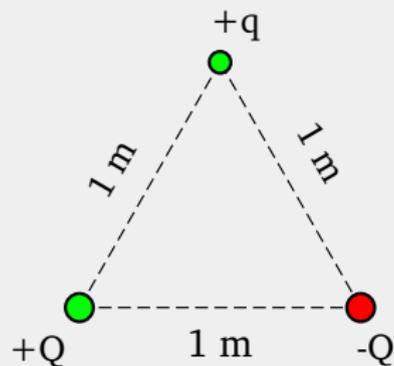
- la force entre deux charges ne dépend pas des autres charges en présence (principe d'indépendance des forces) ;
- la force résultante \vec{F}_R sur une charge **test** (q_1) est la somme vectorielle des forces exercées par les autres charges, calculées l'une après l'autre (principe de superposition).



Principe d'indépendance des forces et principe de superposition

Exercices d'application

Exercice 147 du syllabus



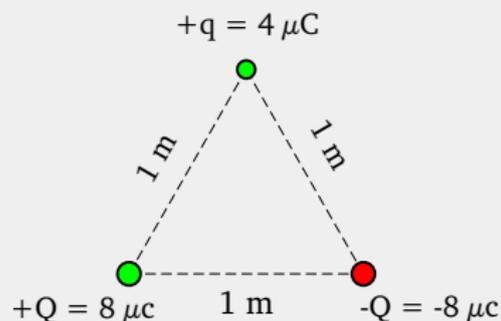
Trois charges électriques $+q$, $+Q$ et $-Q$ (les charges $+Q$ et $-Q$ sont identiques en valeur absolue) sont placées au trois coins d'un triangle équilatéral comme indiqué sur la figure ci-dessous. La force nette agissant sur la charge $+q$ due aux deux autres charges est orientée :

- vers le haut
- vers le bas
- vers la gauche
- vers la droite

Principe d'indépendance des forces et principe de superposition

Exercices d'application

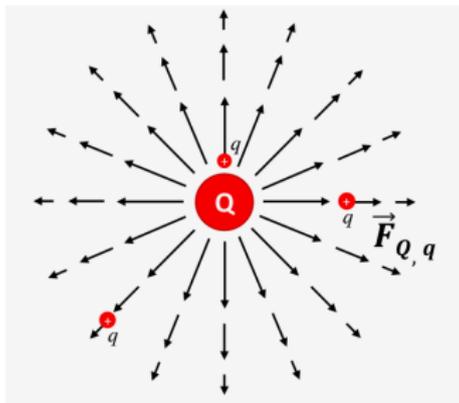
Exercice 152 du syllabus



On place trois particules $+Q$; $-Q$ et $+q$ dotées respectivement de charges électriques valant $8\ \mu\text{C}$, $-8\ \mu\text{C}$ et $4\ \mu\text{C}$ aux sommets d'un triangle équilatéral dont les côtés mesurent 1 m (cf. Figure ci-dessous). On demande de déterminer l'amplitude F de la force nette s'exerçant sur la charge électrique $+q$.

Champ électrique : définition

Deux charges électriques interagissent à distance. Pour expliquer cette interaction à distance, on introduit la notion de **champ électrique** : toute particule chargée produit dans son entourage un champ électrique. C'est avec ce champ électrique qu'interagissent les autres charges électriques.



Le vecteur champ électrique en un point de l'espace est défini comme la force subie par une charge **positive** et **unitaire** (1C) située en ce point :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \text{ où}$$

- q est une charge test, définie comme positive (Unité S.I : C)
- \vec{F} est le vecteur force subit par la charge q (Unité S.I : N)
- \vec{E} représente le champ électrique (Unité S.I : N/C)

Remarque : la force subie par une charge q , plongée dans un champ électrique \vec{E} est égale à

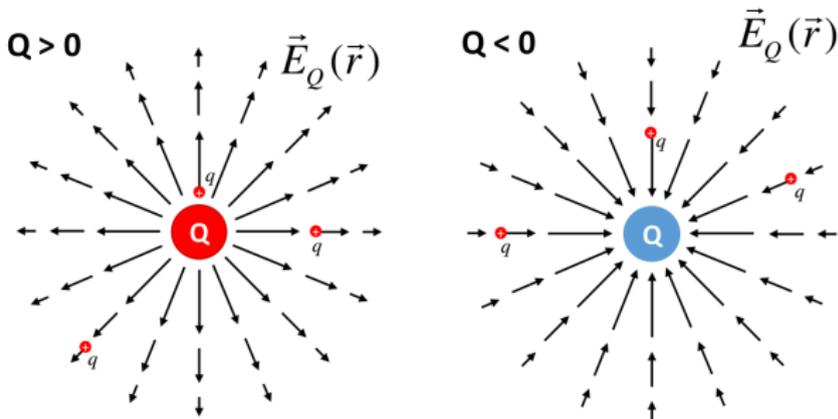
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Champ électrique : ligne de champ électrique

Le champ électrique généré par une charge électrique **ponctuelle** Q est donné par :

$$\vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

où le vecteur \vec{u}_r est un vecteur **unitaire** et **radial** orienté vers l'**extérieur**.



Pour représenter le champ électrique, on utilise des **lignes de champ**. Celles-ci sont tangentes au vecteur champ électrique, et on le même sens

Champ électrique

Exercices d'application

Exercice 154 du syllabus

Le champ électrique dû à une charge électrique ponctuelle est égal à 10 N/C à une distance d de la charge. Que vaut le champ électrique si on double la distance ?

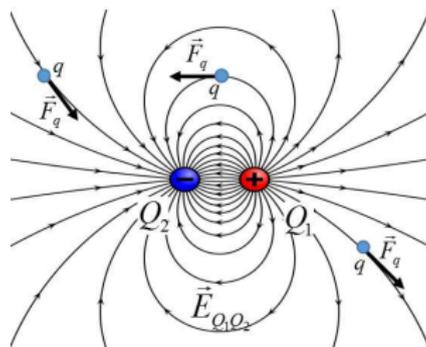
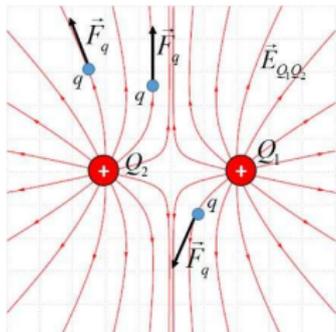
Exercice 153 du syllabus

La force électrique s'exerçant sur une charge de $2 \mu\text{C}$ correspond à une force dont l'intensité est égale à $8 \times 10^{-4} \text{ N}$. Calculez la valeur du champ électrique à la position occupée par cette charge.

Champ électrique : principe de superposition

Si le champ électrique est créé par un **ensemble de charges ponctuelles** q_i ($i = 1, \dots, n$), le champ électrique total \vec{E} s'obtient par l'application du principe de superposition :

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = k \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_{r_i}$$



Propriétés des lignes de champ électrique

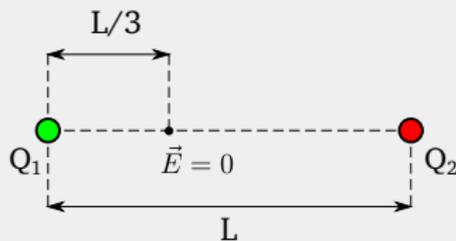
- Les lignes de champ électrique partent toujours d'une charge **positive** et aboutissent à une charge **négative**.
- La densité des lignes de champ électrique est proportionnelle à l'intensité du champ électrique \vec{E} .
- Les lignes de champ total ne se croisent jamais.

Champ électrique

Exercices d'application

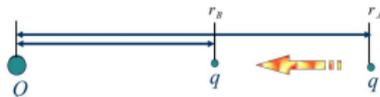
Exercice 158 du syllabus

Deux charges ponctuelles inconnues, Q_1 et Q_2 , sont reliées par un fil. En un point situé à un tiers de la distance qui les séparent (par rapport à la charge Q_1), le champ électrique \vec{E} est nul. Que pouvez-vous dire de ces deux charges électriques ?



- 1 $Q_1 = 4Q_2$
- 2 $Q_1 = -4Q_2$
- 3 $Q_2 = 4Q_1$
- 4 $Q_2 = -4Q_1$

Energie potentielle



Soit une charge $q > 0$ (charge-test) placée à une distance r_A d'une charge statique $Q > 0$.
Approchons la charge-test à une distance r_B .
Dans l'exemple considéré, il faut vaincre la force répulsive entre Q et q : fournir un **travail**.

Le **travail contre le champ** Coulombien s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\Delta W_{A \rightarrow B} &= \int_A^B -q \vec{E} \cdot d\vec{r} \\ &= -q \int_A^B k \frac{Q}{r^2} dr = k \frac{Qq}{r_B} - k \frac{Qq}{r_A} \\ &= U(B) - U(A)\end{aligned}$$

où U représente l'**énergie potentielle** de la charge q dans le champ électrique de la charge Q :

$$U = k \frac{Qq}{r}$$

Le travail $W_{A \rightarrow B}$ effectué est indépendant du chemin parcouru mais uniquement de la position initiale et de la position finale de la particule. On dit que les forces Coulombiennes sont **conservatives**.

On peut se servir de U comme de n'importe quelle énergie potentielle : si T représente l'énergie cinétique de la charge-test q , l'énergie totale $E = T + U$ est **constante** (cf. cours Mécanique).

Energie potentielle

Exercices d'application

Exercice 159 du syllabus

Déterminez l'énergie potentielle U d'un électron qui se situe à 50 pm d'un proton.

Potentiel électrique

Le **potentiel électrique** V d'une charge statique Q est l'énergie potentielle électrique U par unité de charge :

$$V = \frac{U}{q} = k \frac{Q}{r} \quad \text{Unité S.I : Volt (1V = J/C)}$$

La valeur du potentiel V est indépendante de la charge d'essai et est uniquement fonction de la position des charges **sources**.

La différence de potentiel entre deux points A et B est égale au travail effectué contre le champ pour déplacer une charge **positive unité** de A vers B

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta W_{A \rightarrow B}}{q} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

Le potentiel électrique V est une quantité **relative**, seule les différences de potentiel ont un sens ; on choisit généralement la Terre comme zéro de potentiel électrique. En électricité, le potentiel électrique V est également appelée la **tension** électrique.

Tout système évolue spontanément pour minimiser son énergie. Une charge **positive** se déplace spontanément vers les potentiels **décroissants**, une charge **négative** vers les potentiels **croissants**.

Remarque importante : de part l'équation (1), on exprime parfois l'intensité d'un champ électrique en volt/mètre (V/m) \rightarrow N/C=V/m

Potentiel électrique (Tension)

Exercices d'application

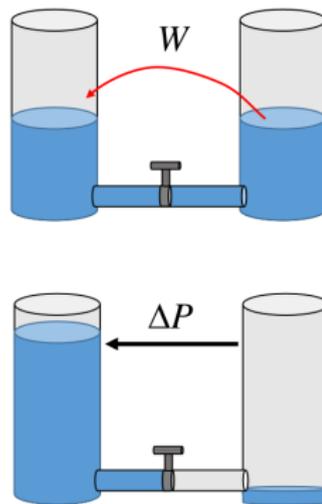
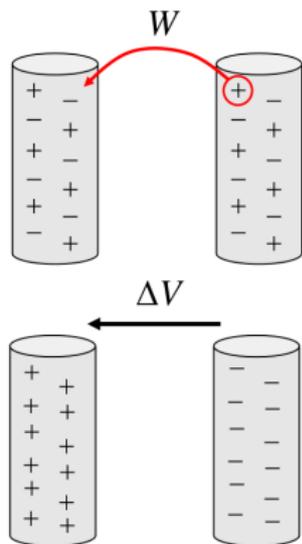
Exercice 161 du syllabus

Un électron, de masse $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg, immobile dans le tube cathodique d'un téléviseur subit une accélération sous l'effet d'une différence de potentielle $V = 5000$ V. Déterminer sa variation d'énergie potentielle U ainsi que la vitesse v que cette accélération lui permet d'atteindre.

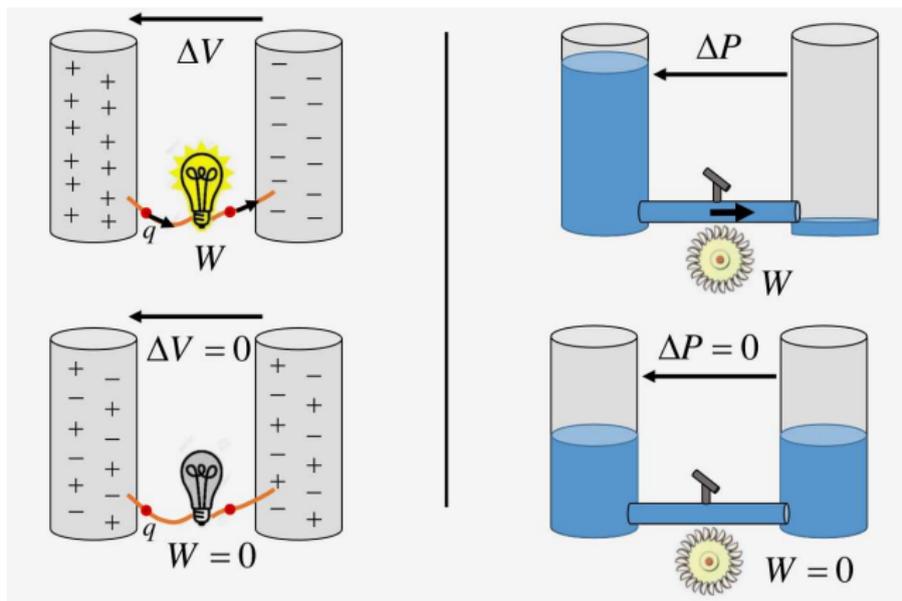
Exercice 162 du syllabus

Calculez la différence de potentielle V requise pour qu'un noyau d'hélium ($Z=2$) acquière une énergie cinétique de 48 keV.

Potentiel électrique : Stockage de l'énergie électrique

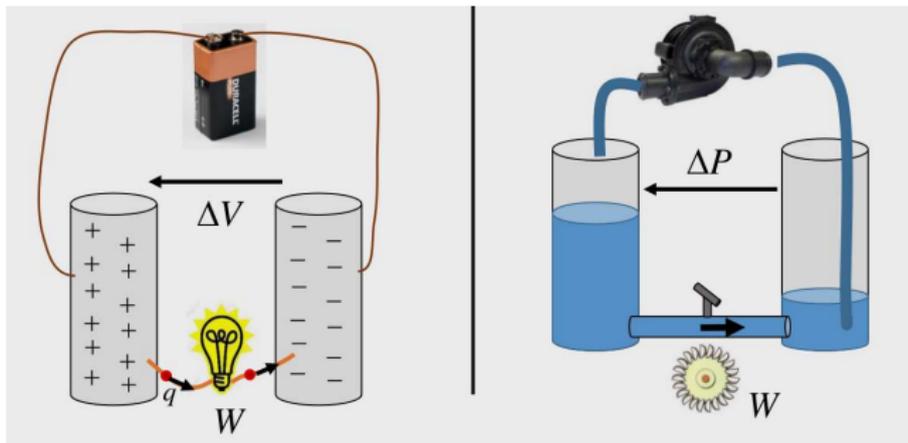


Potentiel électrique : mouvement de charges électriques



Potentiel électrique : Entretenir le courant

Pour entretenir un courant électrique, il faut une source d'énergie extérieure, un **générateur** de tension. Par exemple, les **piles** transforment de l'énergie chimique en énergie électrique



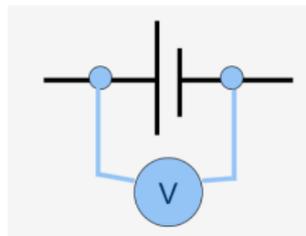
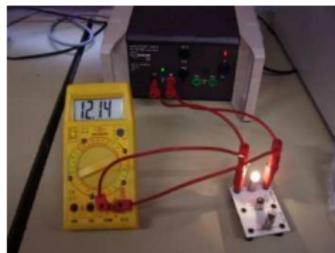
Générateur de tension

Un **générateur** est un dispositif capable de générer une différence de potentiel électrique (une tension) de manière continue. Le mécanisme de cette génération peut être mécanique, chimique, thermique, ...

Dans un schéma électrique, un générateur est symbolisé par

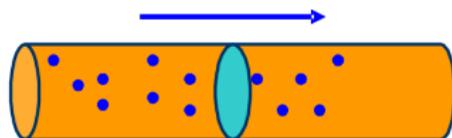


La différence de potentiel entre les bornes d'un générateur se mesure grâce à un **voltmètre**.



Courant électrique : définition

Une différence de potentielle génère un déplacement de charges : un courant électrique, dit continu si son sens ne change pas.



En pratique, le courant est majoritairement lié à un déplacement d'électrons dans un conducteur, même si d'autres formes peuvent exister (électrolytes).

L'intensité I d'un courant électrique est le rapport entre la variation de charge ΔQ qui passe à travers la section d'un conducteur et la durée Δt de ce passage.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Unité S.I : Ampère (A) $\rightarrow 1\text{A} = 1\text{C}/1\text{s}$

Sens conventionnel du courant

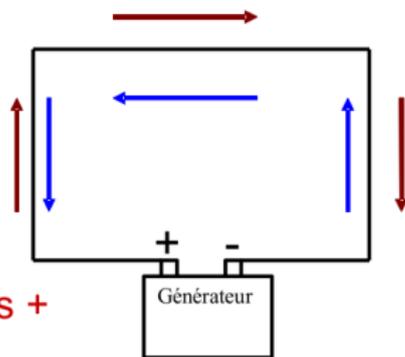
Dans les conducteurs solides, le courant électrique correspond au déplacement d'électrons.

Par **convention** (et pour des raisons historiques), on admet que le sens du courant électrique part du pôle positif (potentiel le plus élevé) du générateur et revient au pôle négatif (potentiel le moins élevé).

→ sens réel : sens des électrons

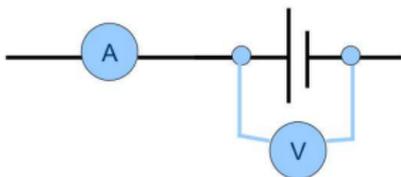
→ sens conventionnel :

« comme si » des charges + se déplaçaient



Mesure du courant

Une intensité de courant peut se mesurer grâce à un **ampèremètre**

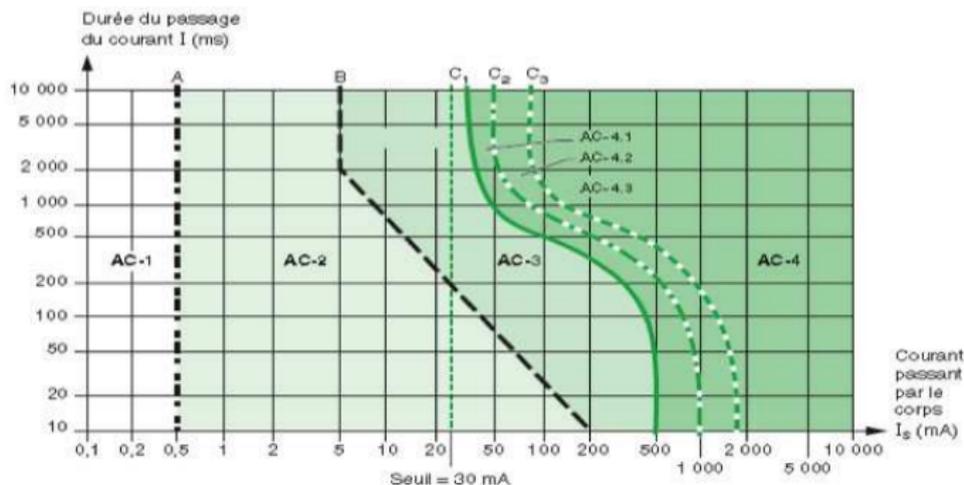


Exemples de courants :

- 10 A : bouilloire électrique de 2300 W en 230 V
- 500 A : batterie automobile



Effet du courant sur le corps humain



Zone AC-1 : Perception

Zone AC-2 : Contractions musculaires involontaires

Zone AC-3 : Difficultés de respiration

Zone AC-4 : Effets pathophysiologiques graves

AC-4.1 : risque de fibrillation ventriculaire jusqu'à 5 %

AC-4.2 : risque de fibrillation ventriculaire jusqu'à 50 %

AC-4.3 : risque de fibrillation ventriculaire supérieur à 50 %

Courant électrique

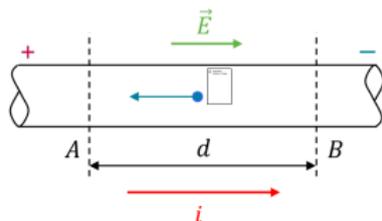
Exercices d'application

Exercice 164 du syllabus

Un mécanicien charge une batterie de voiture en lui transmettant un courant de 6.5 A pendant 5 heures. Quelle quantité de charge traverse la batterie ?

Loi d'Ohm

Dans un conducteur rectiligne, le champ électrique \vec{E} transporte le courant électrique i



La différence de potentiel entre 2 points A et B du conducteur, séparés d'une distance d , dans le sens de i , égale à :

$$V = V_B - V_A = -Ed$$

Il s'agit d'une **chute de tension**

Cette chute de tension V est proportionnelle au courant i :

$$V = Ri$$

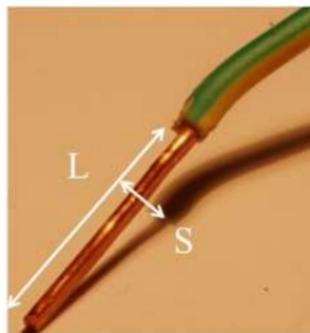
Le facteur de proportionnalité R est appelé **Résistance** du conducteur. L'unité de la résistance électrique est l'**Ohm** : $\Omega = V/A$

Loi de Pouillet

Soit un matériau de longueur L et de section S .
La loi de Pouillet dit que la résistance de ce matériau vaut :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

où ρ représente la **résistivité** du matériau (Unité S.I : Ωm).



On classe les matériaux en fonction de leur résistivité en trois groupes :

- Conducteur : $\rho < 10^{-5} \Omega\text{m}$
- Isolant : $\rho > 10^5 \Omega\text{m}$
- Autres (semi-conducteurs, solutions, ...)

La résistivité ρ est fonction de la température T . Pour de petites variations de températures ΔT autour d'une température de référence de 20°C , on a :

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

où le coefficient α représente le **coefficient thermique de résistivité**.

Puissance électrique

Soit Δq une charge élémentaire traversant un élément de circuit subissant une chute de tension V ; la variation d'énergie potentielle électrique vaut :

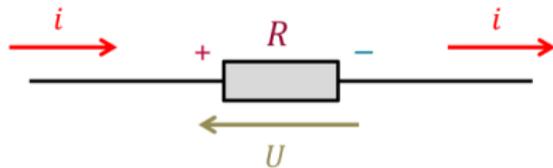
$$\Delta W = \Delta q V$$

La **puissance** fournie est le dégagement d'énergie par unité de temps :

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} V = IV$$

La puissance s'exprime en **watts** (W) : $W = J/s = V.A$ (volt. ampère).

Tout récepteur traversé par un courant I et possédant une différence de potentiel V génère une puissance P donnée par $P = IV$.

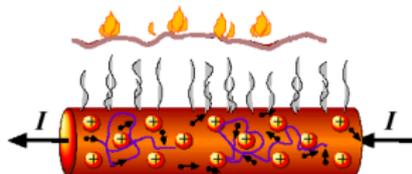


Effet Joule

Par **effet Joule**, on désigne le dégagement de chaleur provoqué par le passage d'un courant électrique dans un matériau conducteur lui opposant une résistance.

La puissance dégagée par effet Joule par le passage d'un courant est proportionnel au carré de l'intensité de ce courant.

$$P = IV = I(IR) \rightarrow \boxed{P = RI^2}$$



Remarque : L'effet Joule est faible dans certains matériaux comme l'argent et le cuivre et peut être négligeable dans des matériaux supraconducteurs dont la résistance est nulle en dessous d'une température dite « critique ».

Loi d'Ohm, loi de Pouillet et effet Joule

Exercices d'application

Exercice 165 du syllabus

Une ampoule lumineuse consomme de l'énergie électrique avec une puissance de 100 W sous une différence de potentiel de 120 V. Quelle serait cette puissance si la différence de potentiel n'était que de 60 V ? (on néglige l'effet de la température)

Exercice 175 du syllabus

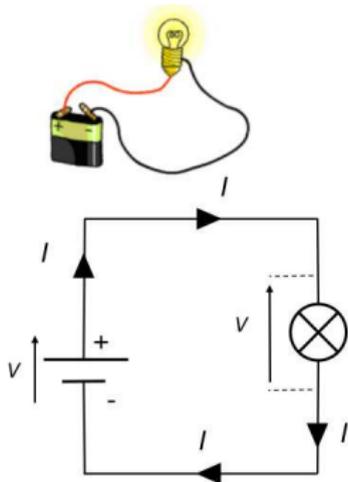
La résistivité de l'aluminium est le double de celle du cuivre et sa densité est le tiers de celle du cuivre. Que vaut le rapport entre la résistance d'un fil d'aluminium à celle d'un fil de cuivre de même longueur et de même masse par unité de longueur ?

Exercice 170 du syllabus

Une heure d'utilisation d'un aspirateur domestique sur le réseau électrique européen correspond à une énergie consommée de l'ordre de

Circuit électrique

Le circuit électrique le plus simple est constitué d'un générateur et d'une **résistance** (par exemple une ampoule).



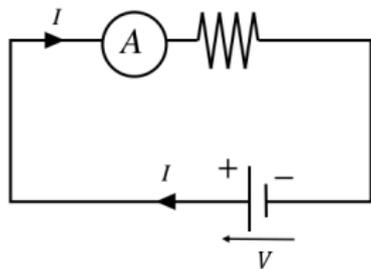
Dans ce circuit élémentaire, le générateur génère une tension v , et le circuit est parcouru par un courant d'intensité I . Alors, la résistance R de l'ampoule est telle que

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{c'est la loi d'Ohm}$$

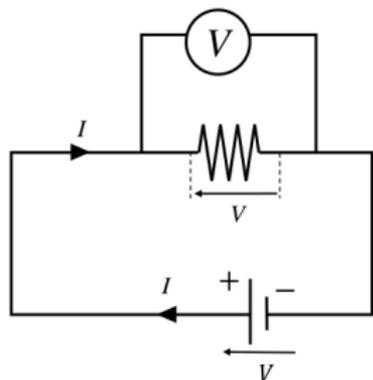
Un circuit **ohmique** est un circuit composé uniquement de générateurs et de résistances.

Mesure du courant et de la tension

Mesure de courant : ampèremètre
(brachement en série)

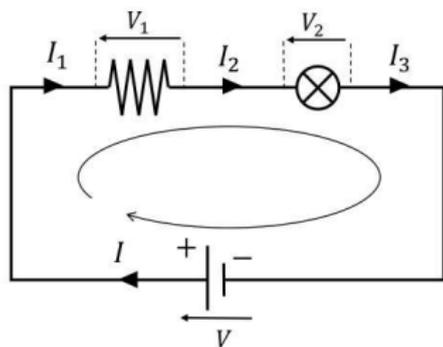


Mesure de tension : voltmètre
(brachement en parallèle)



Règles de Kirchhoff

- 1 **Conservation de l'énergie** : la somme des différences de potentielle le long de tout chemin fermé est nulle.
- 2 **Conservation de la charge** : En tout point d'un circuit, le courant entrant doit être égal au courant sortant.



- 1 **Conservation de l'énergie**

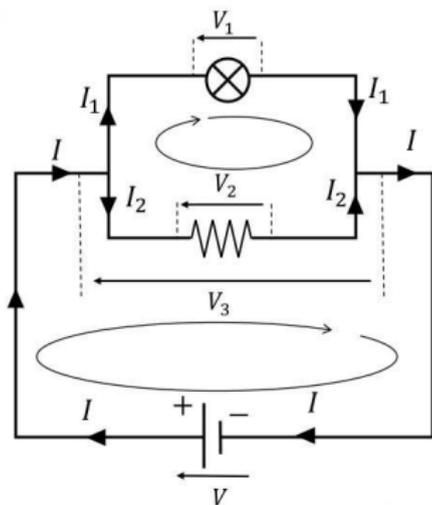
$$V - V_1 - V_2 = 0 \rightarrow V = V_1 + V_2$$

- 2 **Conservation de la charge**

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

Règles de Kirchhoff (suite)

- 1 **Conservation de l'énergie** : la somme des différences de potentielle le long de tout chemin fermé est nulle.
- 2 **Conservation de la charge** : En tout point d'un circuit, le courant entrant doit être égal au courant sortant.



- 1 **Conservation de l'énergie**

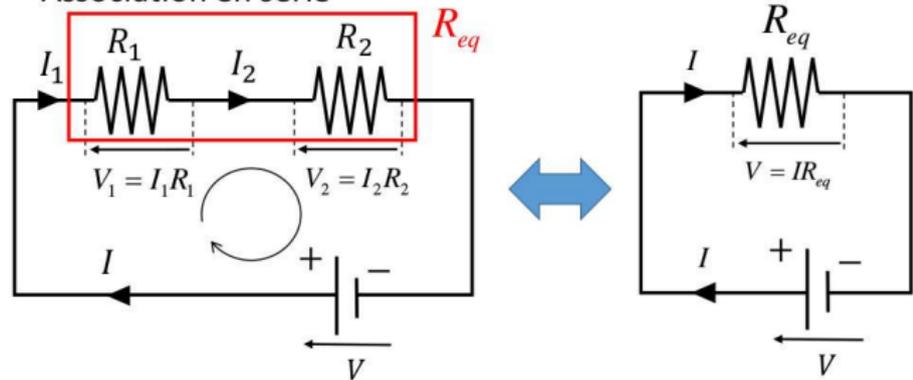
$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

- 2 **Conservation de la charge**

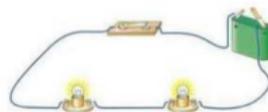
$$I = I_1 + I_2$$

Association de résistances (en série)

- Association en série

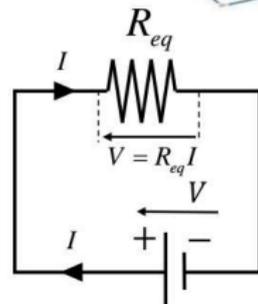
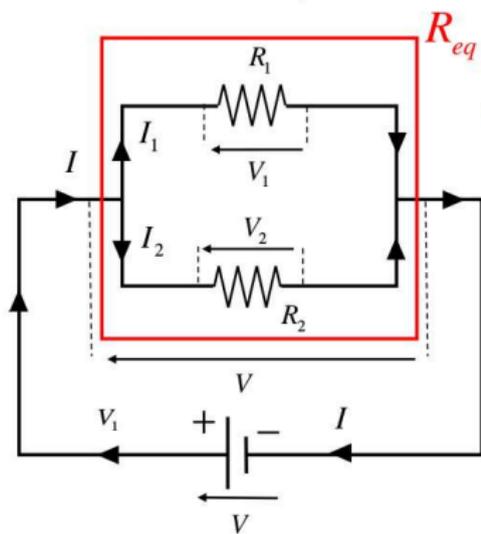


$$\left. \begin{array}{l} I = I_1 = I_2 \\ V = V_1 + V_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} V = I_1 R_1 + I_2 R_2 \\ = I R_1 + I R_2 \\ = I (R_1 + R_2) = I R_{eq} \end{array} \Rightarrow R_{eq} = R_1 + R_2$$



Association de résistances (en parallèle)

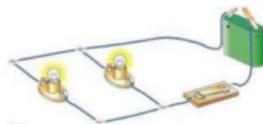
- Association en parallèle



$$\left. \begin{array}{l} I = I_1 + I_2 \\ V = V_1 = V_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} I = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \\ = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = \frac{V}{R_{eq}} \end{array} \right\}$$



$$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$



Exercice 180 syllabus

On dispose de 4 résistances de $10\ \Omega$. Pour obtenir exactement $4\ \Omega$, il faut associer :

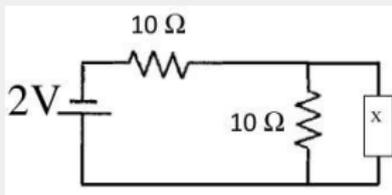
- a. quatre branches en parallèle comportant chacune une résistance.
- b. une résistance en série avec les trois autres en parallèles.
- c. en série deux groupement de deux résistances en parralèle.
- d. en parallèle, deux branches comportant une résistance et une branche de deux résistances en série.

Circuits électriques

Exercices d'application

Exercices 183 et 184 du syllabus

Soit le circuit électrique décrit ci-dessous



Si x représente un voltmètre de résistance interne infinie. Quelle valeur indique-t-il ?

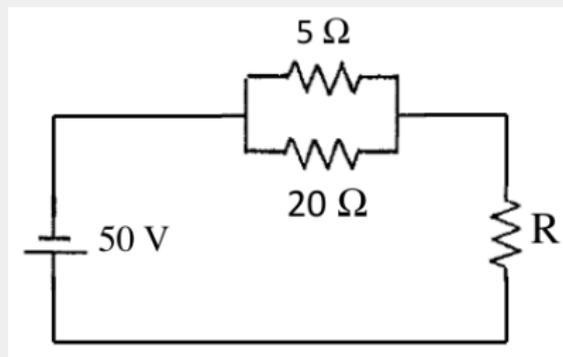
Si x représente un ampèremètre de résistance interne nulle. Quelle valeur indique-t-il ?

Circuits électriques

Exercices d'application

Exercice 186 du syllabus

Dans le circuit ci-dessous, quelle doit être la résistance R pour que la résistance de $5\ \Omega$ dissipe une puissance de $20\ \text{W}$?

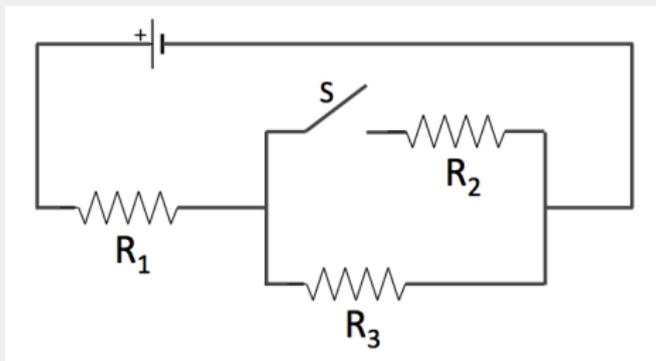


Circuits électriques

Exercices d'application

Exercice 189 du syllabus

Le circuit ci-dessous est constitué d'une pile, trois résistances R_1 , R_2 et R_3 ainsi que d'un interrupteur S . On suppose que les trois résistances sont les mêmes ($R_1 = R_2 = R_3 = R$). Lorsque S est fermé (le courant passe dans la résistance R_2), la pile débite un courant d'intensité I . Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'intensité du courant débité par la pile est :

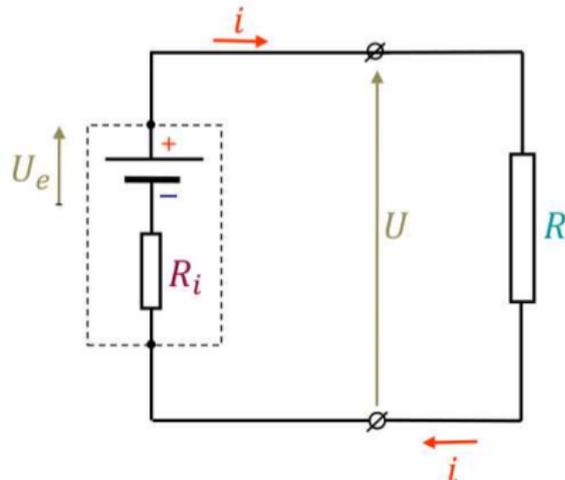
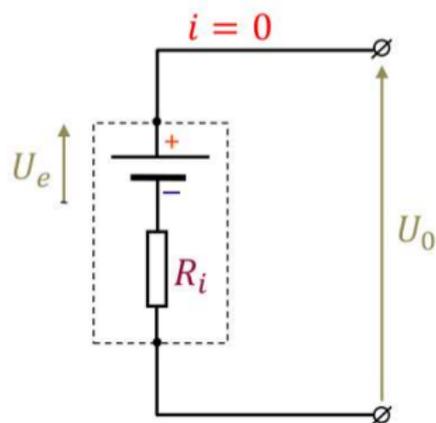


Force électromotrice et résistance interne

Un **générateur réel** (une batterie, une pile) est composé d'un **générateur idéal** de « force » électromotrice (f.e.m.) V_e et d'une résistance interne R_i .

À vide, c'est-à-dire Lorsque aucun courant ne circule vers un circuit extérieur, un générateur maintient entre ses bornes une tension $V_0 = V_e$. Si le générateur débite un courant I dans un circuit, la tension V à ses bornes vaut :

$$V = V_e - IR_i$$



Force électromotrice et résistance interne

Exercices d'application

Exercice 192 du syllabus

Déterminez la résistance interne d'une batterie de voiture de 12 V dont la tension aux bornes diminue à 7.8 V lorsque le démarreur prend un courant de 70 A.