Chapitre 1 - Lois générales des courants électriques

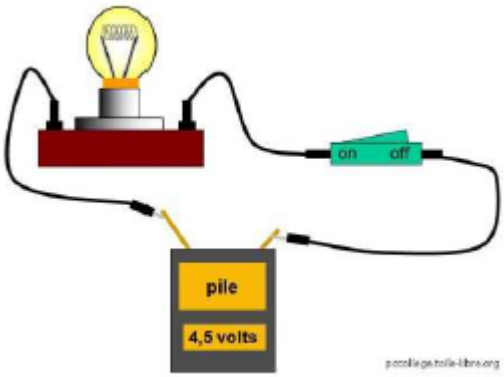
Objectifs du chapitre

- Définir les trois grandeurs que sont la *tension*, l'*intensité* et la *puissance*. Quelle est l'origine du courant électrique dans un circuit ?
- Enoncer et appliquer les lois qui régissent le comportement d'un circuit, appelées *Lois de Kirchhoff*.

I. Le courant électrique

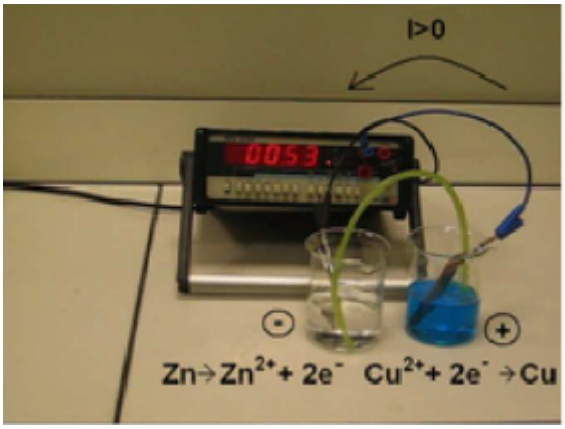
1. Tension électrique et générateur de tension

Décrivons un circuit aussi simple que possible : Pile, interrupteur, lampe.
Le générateur (la pile) entretient entre ses bornes une différence de potentiel, aussi appelée tension électrique. C'est à la borne positive de la pile que, dans le circuit, le potentiel est le plus élevé. A la borne négative, le potentiel est le plus faible. Sous l'influence de la différence de potentiel, un courant électrique va circuler à travers le circuit fermé, et la lampe va briller.
Si on ouvre l'interrupteur, il existe toujours une différence de potentiel aux bornes de la pile, mais les bornes de la lampe auront une même valeur de potentiel. Aucun courant ne circulera, ni à travers le générateur, ni à travers la lampe.
La tension électrique maximale aux bornes d'un générateur s'appelle la *force électromotrice du générateur E* en volts (V). C'est lorsque le générateur ne débite aucun courant que cette tension est maximale.

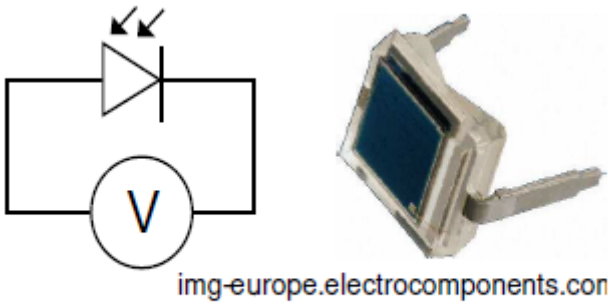


Un générateur transforme une énergie quelconque en énergie électrique. Il y a plusieurs possibilités pour créer cette énergie électrique : l'énergie chimique dans une pile ou l'énergie du rayonnement dans les panneaux solaires sont bien des énergies primaires.

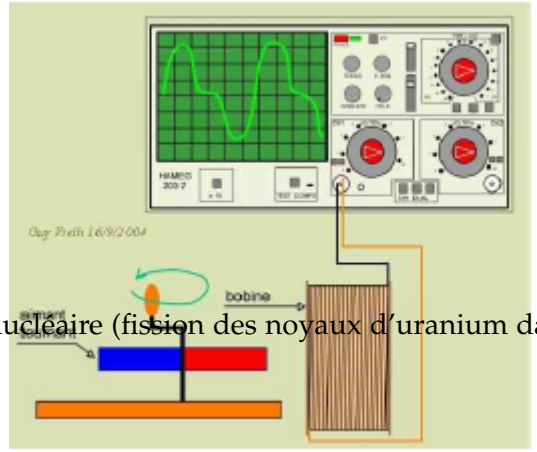
Energie chimique→ Energie électrique
ex : piles



Energie du rayonnement → Energie électrique
ex : photodiode



En Energie mécanique → Energie électrique
ex : dynamo, alternateur dans les centrales électriques



revanche, il faut une énergie primaire pour fournir l'énergie mécanique à l'alternateur. On peut penser à l'énergie du vent (éoliennes), l'énergie de pesanteur dans le cas de l'hydroélectricité mais le plus souvent cette énergie est une énergie thermique, d'origine chimique (combustion du charbon ou du pétrole dans les centrales classiques) ou d'origine nucléaire (fission des noyaux d'uranium dans les centrales nucléaires).

La tension électrique ente deux points A et B dans un circuit est la différence entre le potentiel au point A, noté V_A et le potentiel au point B, noté V_B. On note alors $U_{AB} = V_A - V_B$ la tension entre A et B. Elle s'exprime en Volts.

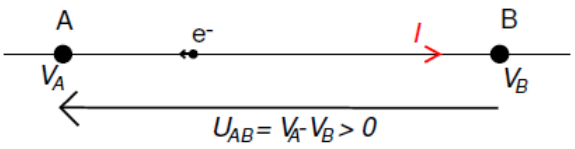
2. Le courant électrique

Par définition, un conducteur est un corps contenant des porteurs de charge mobiles. Peu importe le signe de ces charges ; il dépend de la nature du conducteur. A l'échelle microscopique, un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge. Quand un conducteur est connecté aux bornes d'un générateur, la différence de potentiel entre les deux bornes de celui-ci engendre un courant électrique dans le conducteur : les porteurs chargés positivement « descendent » les potentiels (déplacement dans le sens des potentiels décroissants) ; les porteurs négatifs « remontent » les potentiels. Ces déplacements de charges dans des sens opposés imposent le choix d'un sens conventionnel pour le courant électrique.

Sens conventionnel du courant : Par convention le courant descend les potentiels à l'extérieur du générateur.

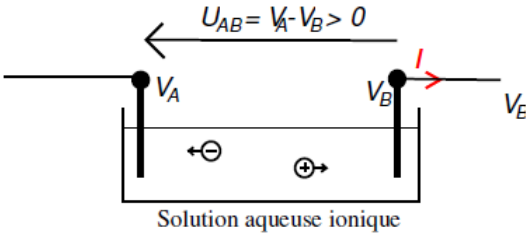
Envisageons deux exemples de conducteurs usuels. Soient A et B leurs bornes, et dans les deux cas, le potentiel V_A en A est supposé supérieur au potentiel V_B. La tension électrique $U_{AB} = V_A$-V_B est donc positive.

Conducteur métallique
Les électrons de conduction se déplacent dans le sens opposé au sens conventionnel.



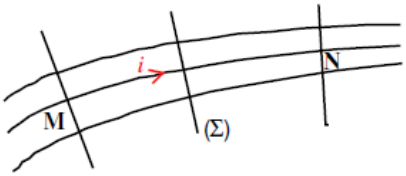
Conducteur métallique

Solution ionique
Les cations se déplacent dans le sens conventionnel ; les anions dans le sens opposé.



Solution aqueuse ionique

3. L'intensité du courant électrique



•On définit **l'intensité instantanée** : $\boxed{i(t) = \frac{dq}{dt} \text{ unité : A}}$

dq (Coulomb : C) est la quantité infinitésimale de charge qui traverse la surface transverse du conducteur (Σ) pendant le temps infinitésimal dt.

L'intensité correspond au *débit de charge* à travers la section Σ du conducteur.

Le sens de l'intensité est choisi **arbitrairement**. L'intensité i peut donc être positive ou négative.

Utilisons cette notion pour déterminer la vitesse d'ensemble des électrons de conduction dans un conducteur. Un fil de cuivre cylindrique de section $S = 1$ mm^2 est parcouru par un courant continu d'intensité $I = 1,0$ A. Dans les conditions usuelles, le cuivre contient $n = 8,48.10^{28}$ électrons de conduction par mètre cube.
Charge élémentaire : $e = 1,6.10^{-19}$ C

Le courant est continu, l'intensité instantanée est donc égale à l'intensité moyenne : $i(t) = I = \frac{|\Delta q|}{\Delta t}$. *C'est la quantité de charges Δq qui traverse une section du conducteur pendant le temps Δt. On prend la valeur absolue car les électrons sont des porteurs de charges négatives.*

A l'instant t, cette quantité d'électrons est contenue dans le volume $V = S \times (v\Delta t)$ avec v la vitesse des électrons (ce qu'on cherche). Le nombre d'électrons dans ce volume est $N = n \times V = n\,S\,v\Delta t$ et $\Delta q = |N \times (-e)|$ puisque chaque électron a une charge négative $-e$.

On détermine l'expression de I : $I = \frac{N\,e}{\Delta t} = \frac{n\,S\,v\Delta t\,e}{\Delta t} = n\,S\,e\,v$.

On en déduit l'expression de v : $\boxed{v = \frac{I}{n\,S\,e}}$

Application numérique : $v = \frac{1,0}{8,48.10^{28} * 10^{-6} * 1,6.10^{-19}} = 7,4.10^{-5}\ m.s^{-1}$.

C'est une vitesse extrêmement petite. Elle ne correspond pas à la vitesse individuelle des électrons, c'est la vitesse à laquelle se déplace le nuage d'électrons de conduction sous l'action de la tension électrique aux bornes du fil. La vitesse individuelle d'un électron est essentiellement due à son agitation thermique ; elle est très élevée : $10^5\ m.s^{-1}$.

4. Puissance électrique dans un dipôle

On définit la puissance instantannée comme la dérivée de l'énergie par rapport au temps : $\boxed{\mathcal{P}(t) = \dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}}$.

Habituellement, en électricité, la puissance électrique se calcule en faisant le produit $U(t) \times i(t)$.

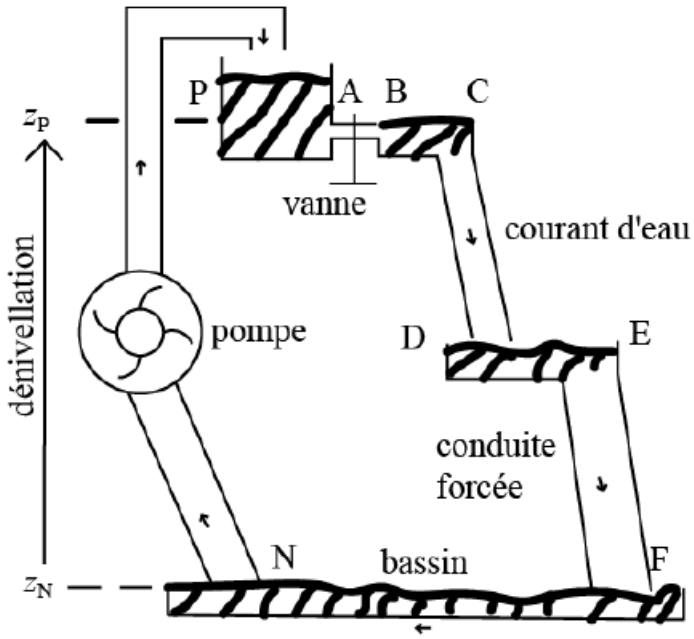
⚠ Comme le sens de i est choisi **arbitrairement**, il y a deux possibilités ou **conventions** pour orienter la tension aux bornes d'un dipôle par rapport à l'intensité. La valeur du produit $U(t) \times i(t)$ n'a pas la même signification dans chaque cas.

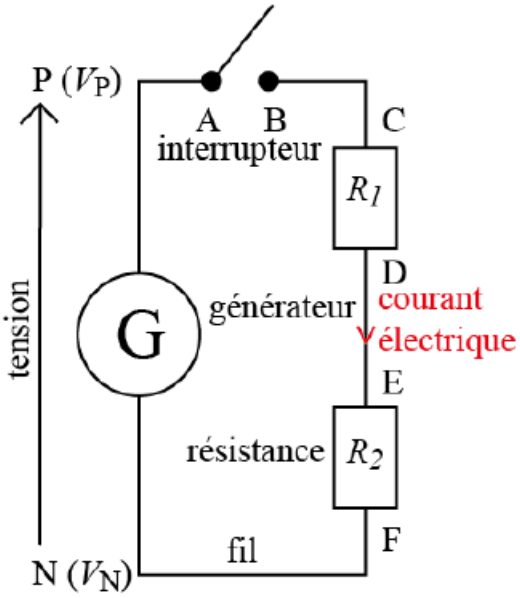
- En convention générateur, on calcule la puissance **fournie**.
- En convention récepteur, on calcule la puissance **absorbée**.

dipôle générateur ou dipôle récepteur

5. Analogie hydro-électrique

Le comportement d'un circuit électrique se comprend plus aisément si on le compare au comportement d'un circuit hydraulique.





La pompe entretient une dénivellation (différence d'altitude) qui provoque un débit d'eau (courant d'eau).

Le débit d'eau est limité par les conduites forcées.

Le courant d'eau descend les altitudes à l'extérieur de la pompe.

Les molécules d'eau dans le bassin DE sont à la même altitude. Pas de dénivellation entre D et E.

Le générateur entretient une tension (différence de potentiel) qui provoque un débit de charge (courant électrique).

Le débit de charge est limité par les résistances.

Le courant électrique descend les potentiels à l'extérieur du générateur.

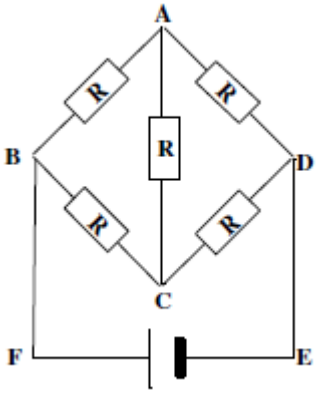
Les charges dans le fil DE sont au même potentiel. Pas de tension électrique entre D et E.

II. Constitution des circuits électriques - Lois de Kirchhoff

1. Vocabulaire des circuits électriques

Un circuit simple est constitué de **dipôles** : constituants d'un circuit électrique munis de deux bornes (pile, lampe, résistance, etc.).
Il présente des noeuds, des branches et des mailles.

- Noeud : point de jonction de trois conducteurs au moins.
- Branche : ensemble de dipôles montés en série entre deux noeuds.
- Maille : contour fermé constitué par une suite de branches.



Exemple :
Le circuit ci-contre est constitué d'une pile (E,F) et de cinq résistances.
Dénombrons noeuds, branches et mailles.

- 4 noeuds : A ; B ; C ; D
- 6 branches : (AB) ; (BC) ; (CD) ; (DA) ; (AC) ; (BFED)

- 5 mailles (au moins) : (ABC) ; (ACD) ; (ABCD) ; (ABFED) ; (BCDEF). Il existe encore d'autres mailles, qui seraient peu utilisées.

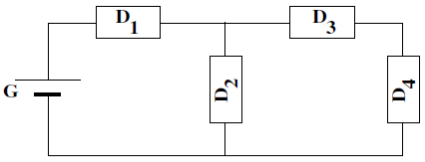
On peut définir pour ce cicuit 6 intensités différentes, autant que de branches différentes.

2. Association en série et en parallèle

Deux dipôles sont en série s'ils appartiennent à une même branche.
Propriété : Deux dipôles en série sont traversés par une même intensité.

Deux dipôles sont en parallèle si leurs bornes sont reliées deux à deux.
Propriété : Les tensions aux bornes de deux branches en parallèle sont égales.
Exemple :

- Dipôles traversés par la même intensité : G et D1 D3 et D4 D1 et D2 ne sont pas traversés par la même intensité (présence d'un noeud entre les deux). De même pour D2 et D3.
- Tensions égales aux bornes de : Association (G,D1) et D2 Association (D3,D4) et D2 Ce n'est pas la même tension aux bornes de D2 et D4, qui n'ont qu'une borne commune.

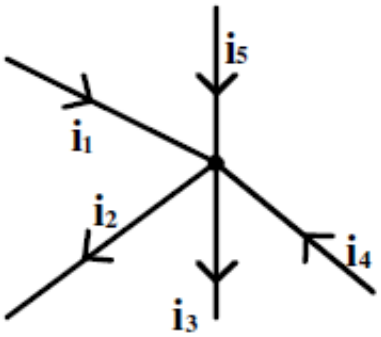


3. Enoncé des lois de Kirchhoff

Loi des noeuds

La somme algébrique de toutes les intensités algébriques arrivant à un noeud, est nulle.

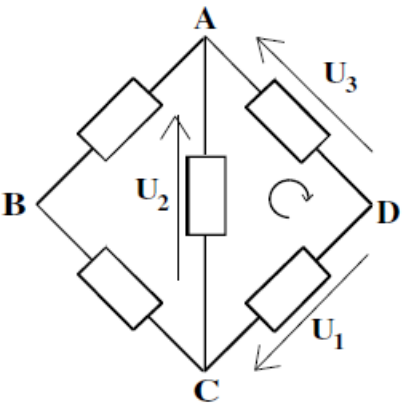
$$\sum_k \epsilon_k i_k = 0 \text{ avec } \begin{array}{l} \epsilon_k = +1 \text{ si } i_k \text{ repart du noeud} \\ \epsilon_k = -1 \text{ si } i_k \text{ arrive au noeud} \end{array}$$



Loi des mailles

Le sens de parcours d'une maille ayant été préalablement *choisi*, la somme algébrique des tensions est nulle. La tension est affectée d'un signe « + » si la flèche la symbolisant correspond au sens de parcours, et d'un signe « - » dans l'autre cas..

$$\sum_k \epsilon_k U_k = 0 \text{ avec } \begin{array}{l} \epsilon_k = +1 \text{ si } U_k \text{ est dans le sens de la maille.} \\ \epsilon_k = -1 \text{ si } U_k \text{ est opposé au sens de la maille} \end{array}$$

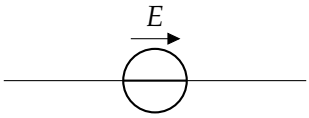


III. Générateurs et récepteurs

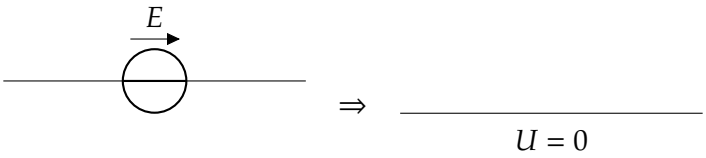
1. Source idéale de tension et source idéale de courant

Source idéale de tension

Une source idéale de tension maintient une tension constante à ses bornes quelque soit l'intensité qui la traverse. On utilise le symbole suivant :

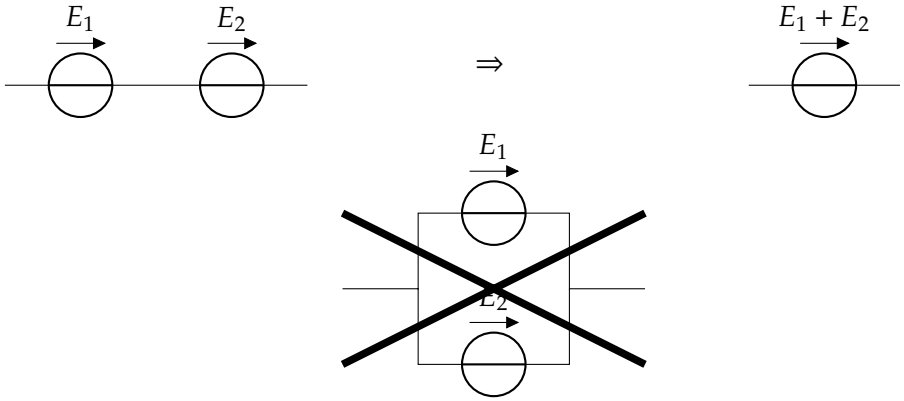


Lorsqu'on éteint une source idéale de tension dans un circuit, on la remplace par un fil :



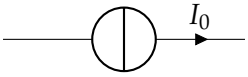
Un fil est caractérisé par une tension nulle à ses bornes.

Association de sources de tension

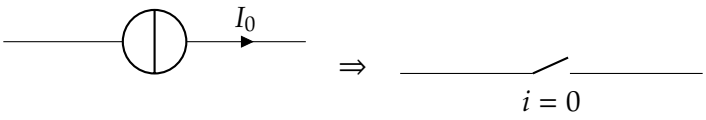


Source idéale de courant

Une source idéale de courant délivre une intensité constante quelque soit la tension à ses bornes. On utilise le symbole suivant :

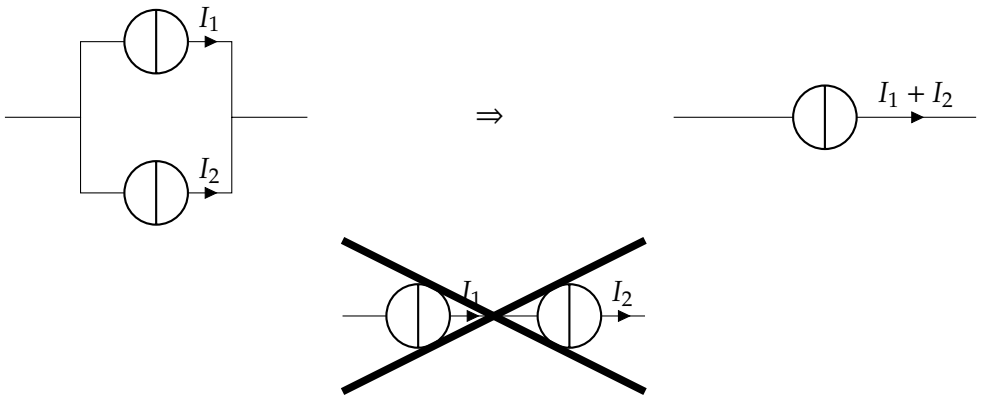


Lorsqu'on éteint une source idéale de courant dans un circuit, on la remplace par un interrupteur ouvert :



Un interrupteur ouvert est traversé par une intensité nulle.

Association de sources de courant



2. Résistance électrique : loi de Joule et loi d'Ohm

Origine microscopique de la résistance

Un porteur de charge soumis à une différence de potentiel continue subit une force électrique. Sous l'action de cette force, d'après la deuxième loi de Newton, cette particule accélère « indéfiniment », c'est-à-dire tant que l'on reste dans le domaine de la mécanique non relativiste (vitesse très inférieure à la vitesse de la lumière). Pourtant, dans un conducteur métallique, une tension continue engendre un courant continu : la vitesse de conduction est constante. D'après la deuxième loi de Newton, l'électron est pseudo-isolé. C'est donc qu'en plus de la force électrique, l'électron subit une autre force qui compense la première. Quelle est l'origine de cette force ? Les électrons de conduction font partie de l'ensemble plus vaste des électrons des atomes constituant le cristal de métal. Il est donc logique de penser que c'est le réseau cristallin qui exerce ce qui peut s'apparenter à une force de frottement : Le métal exerce une résistance au passage du courant.

Résistivité d'un matériau

Quels paramètres caractéristiques du composant conducteur influent sur la résistance de celui-ci ?
Il s'agit d'appréhender la capacité qu'a le composant à s'opposer au passage du courant. Cette opposition sera d'autant plus grande que :

- la section du conducteur est petite (la section S limite le débit de charge, donc l'intensité du courant). R varie en $1/S$.
- la longueur du conducteur est grande (plus le conducteur est long, plus le porteur subit de « frottements » de la part du réseau cristallin). R est proportionnelle à l.

R est donc proportionnelle à l/S ; ce qui s'écrit $R = \rho\dfrac{l}{S}$.
Mais la résistance dépend encore d'autres paramètres, notamment de la nature du matériau conducteur. ρ est la résistivité du matériau conducteur. Plus ρ est grande, moins le matériau est conducteur.
Unité de résistivité : l'ohm-mètre (Ω.m)

Limites du modèle classique

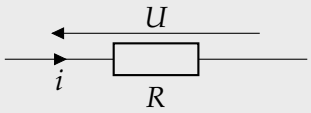
C'est dans le cadre de la mécanique classique que nous avons ici interprété le phénomène de résistance. Or, elle s'applique pour des vitesses pas trop élevées (les vitesses thermiques des électrons sont ici pourtant très grandes), et pour des distances grandes devant les distances atomiques (nous raisonnons ici pourtant sur des particules élémentaires). On peut donc s'attendre à l'observation de phénomènes inexplicables par notre modèle. On peut citer par exemple le phénomène de supraconductivité, qui ne peut s'étudier que dans le cadre de la physique quantique : En deçà d'une certaine température (très basse), certains

matériaux conducteurs perdent toute résistance : le courant peut circuler « indéfiniment » dans le circuit, sans aucune atténuation.

Loi d'Ohm

Pour bon nombre de conducteurs, notamment métalliques, la tension électrique est proportionnelle à l'intensité du courant. La loi d'Ohm ainsi énoncée traduit la résistance du composant au passage du courant.

En convention récepteur



$$\mathbf{U = R \cdot i}$$

U en V, R en Ω, i en A

La résistance, définie comme le coefficient de proportionnalité entre U et i, s'exprime en ohms (Ω).

La loi d'Ohm peut également s'exprimer en termes de conductance : $\boxed{i = G \cdot U}$ où $G = \dfrac{1}{R}$ est la conductance en Siemens.

Loi de Joule

Nous interprétons le phénomène de résistance comme des frottements exercés par le cristal sur les électrons de conduction. Or les frottements engendrent une dissipation d'énergie sous forme d'énergie thermique. Pour une résistance, toute l'énergie électrique absorbée par le composant est dissipée dans le milieu extérieur sous forme d'énergie thermique. C'est la loi de Joule.

Puissance électrique absorbée par un conducteur ohmique et dissipée par effet Joule :

$$\boxed{\mathcal{P}_J = U \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{U^2}{R} > 0.}$$

La puissance absorbée par un conducteur ohmique est toujours positive. Un conducteur ohmique est toujours récepteur.

Association de résistances

Associations de résistances en série

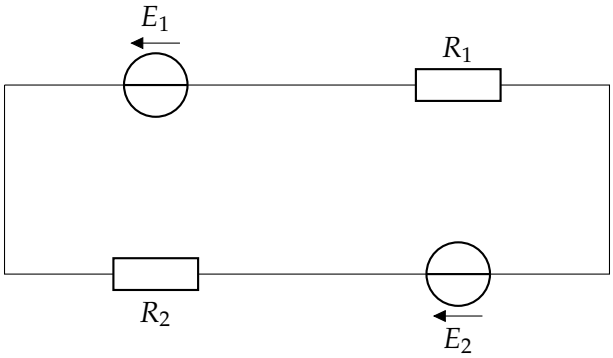
Démontrer que 2 résistances R_1 et R_2 en série sont équivalentes à une seule résistance de valeur $R_{eq} = R_1 + R_2$.

Associations de résistances en parallèle

Démontrer que 2 résistances R_1 et R_2 en parallèle sont équivalentes à une seule résistance telle que $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

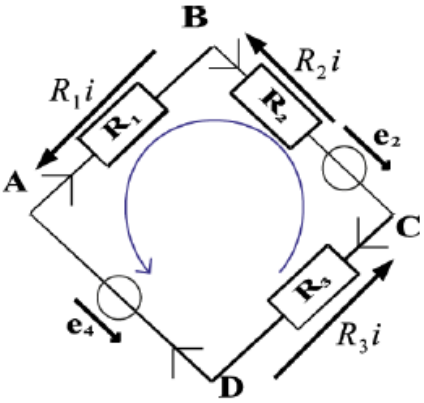
3. Application

La batterie d'une voiture est déchargée. Pour recharger cette voiture, modélisée par une source de tensions de $f.e.m = E_1 = 12$ V en série avec une résistance de $R_1 = 0,2\,\Omega$, on la branche sur un chargeur de $f.e.m = E_2 = 13$ V et de résistance interne $R_2 = 0,3\,\Omega$. On lit sur la batterie qu'elle a une "capacité" de 50 A.h (Ampères-heures).
Déterminer le caractère générateur ou récepteur de chaque dipôle. Calculer le temps qu'il faut pour charger la batterie si elle est initialement totalement déchargée.



Mise en oeuvre des lois de Kirchhoff

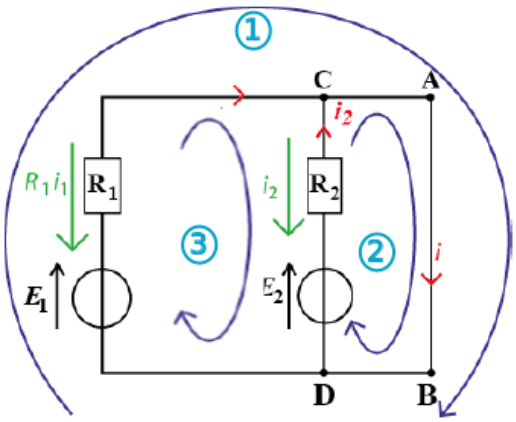
- **Choisir** le sens de l'intensité dans chaque branche.
- Flécher les tensions aux bornes de chaque dipôle.
- **Choisir** un sens de parcours pour chaque maille.
- Ecrire la loi des mailles pour chaque maille et la loi des noeuds pour chaque noeud.



Exemple 1 : Ici, il n'y a pas de noeuds. Il y a une seule branche (1 seule intensité) et 1 seule maille.

Loi des mailles : $R_1\, i + e_4 + R_3\, i - e_2 + R_2\, i = 0 \Rightarrow \boxed{i = \dfrac{e_2 - e_4}{R_1 + R_2 + R_3}}$.

Exemple 2 : A et B sont reliés par un fil de résistance négligeable. On cherche i entre A et B.
Il y a deux noeuds C et D (A et C sont au même potentiel, B et D aussi). Il y a donc trois branches (3 intensités) et 3 mailles (1, 2 et 3).



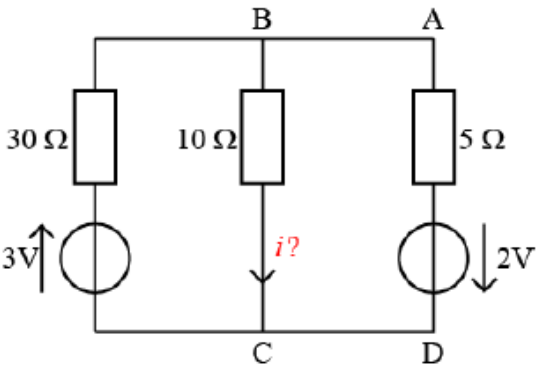
- Loi des noeuds en C : $i_1 + i_2 - i = 0$.
- Loi des noeuds en D : $i - i_1 - i_2 = 0$.
- Loi des mailles pour la maille (1) : $E_1 - R_1\, i_1 = 0$.
- Loi des mailles pour la maille (2) : $E_2 - R_2\, i_2 = 0$.
- Loi des mailles pour la maille (3) : $E_1 - R_1\, i_1 + R_2\, i_2 - E_2 = 0$.

On remarque que les deux lois des noeuds donnent le même résultat. De même, la loi des mailles (3) est une combinaison linéaire des deux autres lois des mailles (1)-(2)=(3).
En fait, on a dans ce circuit 3 inconnues : i_1, i_2 et i. On a donc besoin de seulement trois équations (une loi des noeuds et 2 lois des mailles).

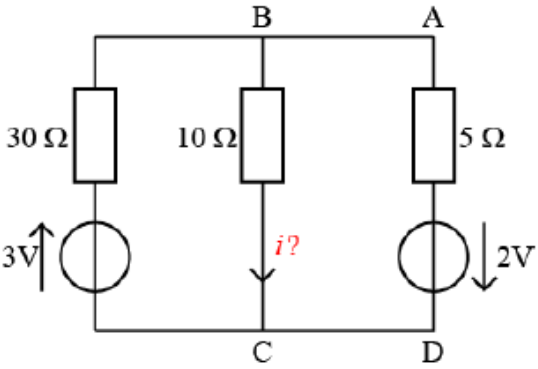
Finalement, on a $i = i_1 + i_2$ avec $i_1 = \frac{E_1}{R_1}$ et $i_2 = \frac{E_2}{R_2}$.

$$\boxed{i = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2}}$$

Exemple 3 (Pour s'entrainer) :



1. Sur le premier schéma, repasser d'une même couleur les portions de fil qui sont au même potentiel.
2. Sur le deuxième schéma, repasser d'une même couleur les portions de fil parcourues par la même intensité.
3. Déterminer l'intensité et le sens conventionnel du courant dans la résistance de 10 Ω.



Résultat : 90 mA de C vers B.