

ELECTRODINAMIQUE : CONCEPTS DE BASE

La science des circuits électriques est une science jeune qui s'appuie fondamentalement sur les lois de l'électromagnétisme (cf cours de PTSI et de PT sur le sujet).

Notre objectif : Résoudre un circuit électrique, c'est-à-dire :

- Déterminer les **courants électriques** qui parcourent les fils de connexion.
- Déterminer les **tensions** entre deux points quelconques du circuit.

I – Charge électrique et courant électrique

1.1 La charge électrique

La charge électrique (ou simplement charge) est la grandeur de base dans l'étude des circuits électriques.

La charge électrique est une propriété fondamentale des particules élémentaires qui constituent la matière. Elle s'exprime en Coulomb (C) ou en Ampère par seconde ($A.s^{-1}$).

Exemples :

Electron: charge élémentaire $-q \approx -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Proton: charge élémentaire $q \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. C'est exactement l'opposée de la charge de l'électron.

Neutron: charge élémentaire nulle.

Points importants:

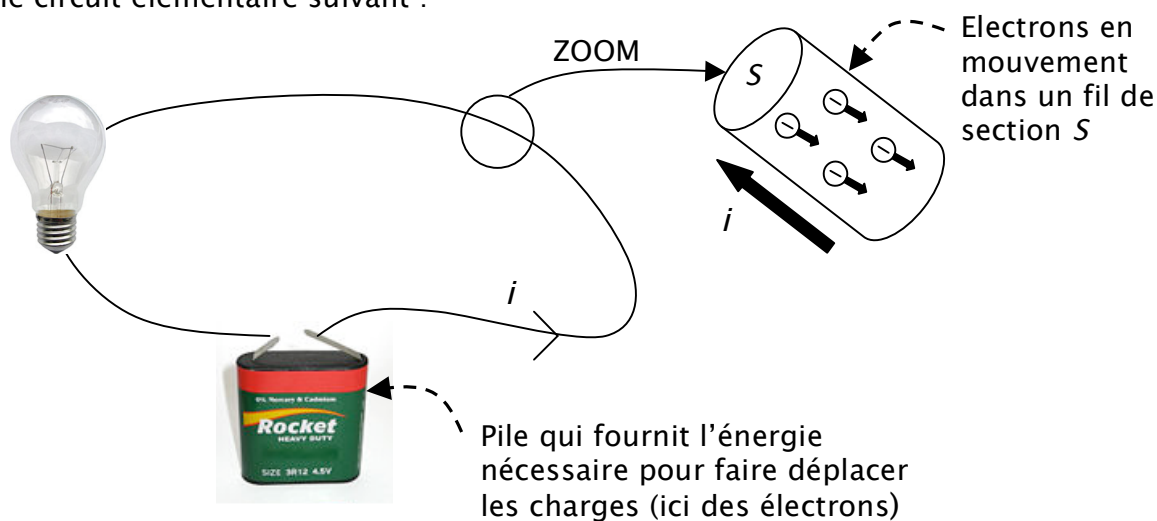
- Une charge de 1 C est une charge « importante ». Il faut $\frac{1}{1,6 \times 10^{-19}} = 6,24 \times 10^{18}$ électrons pour produire une telle charge.
- D'après l'expérience, toutes les charges rencontrées dans la nature sont des multiples entiers de la charge élémentaire $\pm q \approx \pm 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Les protons et les neutrons sont constitués de quarks dont la charge vaut $-\frac{1}{3}q$ ou $+\frac{2}{3}q$ mais nous ne pouvons observer ces derniers à l'état libre. Ils sont toujours confinés par trois à l'intérieur du proton et du neutron.
- **La loi de conservation de la charge** : aucune charge ne peut être créée ou détruite mais seulement transférée d'un point à un autre. En réalité, dans les laboratoires de physique des particules, dans le rayonnement cosmique ou encore au bord des trous noirs, des charges sont

régulièrement créées et détruites mais toujours par paire. Si un électron de charge $-q \approx -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ est produit, il doit être accompagné d'une particule de charge $q \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ comme le positon (l'antiélectron). Si un électron est détruit, un positon doit aussi disparaître. Ainsi globalement, il n'y a pas de création ou de production nette de charge.

1.2 Le courant électrique

Le courant électrique résulte du **mouvement d'ensemble ordonné de charges électriques**. Dans les fils électriques métalliques, les porteurs de charge sont les électrons (seul cas que l'on va considérer dans ce cours). Dans les solutions ioniques (eau salée, fluide intercellulaire), les porteurs de charges sont les cations positifs et les anions négatifs

Considérons le circuit élémentaire suivant :



Le courant électrique est le taux de variation de la charge, mesuré en Ampères (A), c'est-à-dire le nombre de charges élémentaires δq qui traversent la section S du fil conducteur pendant l'intervalle élémentaire de temps dt .

Traduction mathématique :

$$i(t) = \frac{\delta q(t)}{dt} \quad \left(\text{noté plutôt } \frac{dq(t)}{dt} \right) \Rightarrow \begin{cases} \text{Sens mathématique: } i(t) \text{ est la dérivée de } q(t) \text{ par rapport au temps.} \\ \text{Interprétation physique: rapport de la quantité élémentaire de charge } \delta q \text{ qui traverse la section } S \text{ du fil conducteur pendant l'intervalle de temps élémentaire } dt. \end{cases}$$

L'intensité s'exprime en ampère, la charge en coulomb et le temps en seconde.

La **charge totale** qui traverse la section S entre les instants t_0 et t est obtenue par intégration de la relation précédente :

$$Q(\text{charge totale}) = \int \delta q = \int_{t_0}^t i(t) dt$$

Attention : il faut noter que la convention (introduite par Benjamin Franklin 1706–1790) consiste à prendre l'intensité dans le sens contraire de l'écoulement des charges négatives (donc des électrons dans notre cas) ce qui revient à dire que l'intensité est orientée dans le même sens que l'écoulement des charges positives.

Par la suite, nous allons rencontrer essentiellement deux types de courant $i(t)$ (cf figure ci-contre):

- **Les courants continus** (noté DC pour « Direct Current » en anglais). $i(t)$ noté I est constant au cours du temps.
- **Les courants alternatifs** (dits aussi sinusoïdaux) (noté AC pour « Alternating Current » en anglais). $i(t)$ varie de façon sinusoïdale avec le temps.

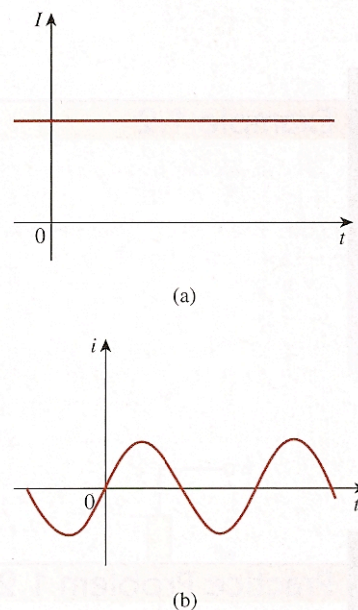
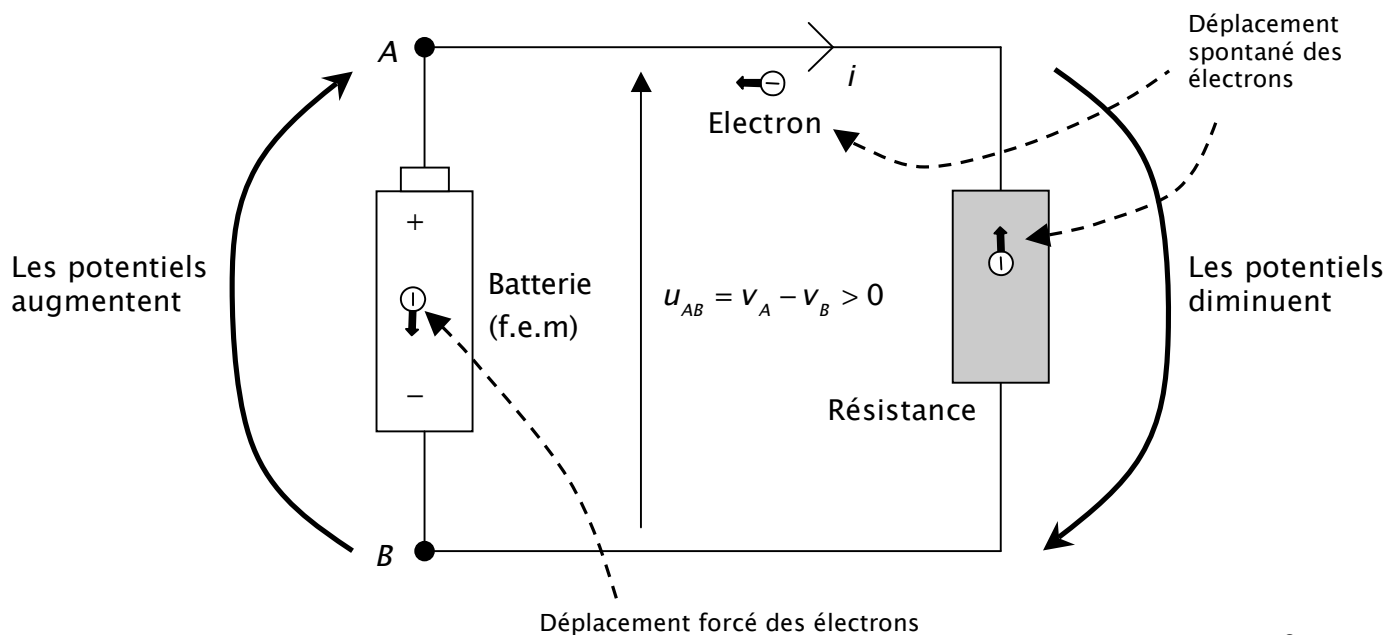


Figure 1.4
Two common types of current: (a) direct current (dc), (b) alternating current (ac).

II – Potentiel et tension

Pour créer un mouvement ordonné des électrons dans un conducteur (création d'un courant), il faut de l'énergie. Cette énergie est fournie par une source externe que l'on appelle **force électromotrice** (notée en général f.e.m) telle qu'une batterie, un générateur. Le nom force est mal choisi puisque la f.e.m n'est pas une force mais l'intégrale (le travail) d'une force par unité de charge c'est-à-dire une énergie par unité de force. Vous en apprendrez mieux en PTSI. Cette f.e.m produit une **différence de potentiel** ou **tension** entre deux points d'un circuit.



La différence de potentiels $v_A - v_B$ (exprimée en volt, symbole V) entre les points A et B, que l'on appelle la tension u_{AB} , représente **l'énergie nécessaire pour faire bouger une charge de 1 C** entre les points A et B.

qv_A représente l'énergie potentielle (d'origine électrostatique) d'une charge q au point A.

Ces deux résultats seront justifiés dans le cours d'électrostatique. On peut déjà faire l'analogie suivante : une particule de masse m dans le champ de pesanteur terrestre à une hauteur z possède (à une constante près) une énergie potentielle mgz . Cette énergie potentielle a pour origine l'interaction gravitationnelle (entre la terre et la masse). Ainsi, le potentiel v en un point est, dans le cas de l'interaction électrostatique, l'analogue de gz et q est l'analogue de la masse m .

Notons les points importants suivants :

- A l'extérieur de la batterie, le courant (assimilable à un déplacement organisé de charge positive) circule spontanément des potentiels les plus élevés aux plus faibles. Les électrons circulent donc des potentiels les plus faibles aux plus élevés.
- A l'intérieur de la batterie, on force le courant à remonter les potentiels par apport d'énergie (énergie chimique, énergie mécanique etc...). On force donc les électrons à aller des potentiels les plus hauts aux potentiels les plus bas.
- qv est homogène à une énergie donc $1 \text{ V} = 1 \text{ J.C}^{-1}$.

Comme pour les courants électriques, nous allons rencontrer essentiellement des tensions AC et des tensions DC. On notera par une lettre majuscule les tensions et les potentiels constants dans le temps et par une lettre minuscule les tensions variables dans le temps (en particulier sinusoïdales).

III - Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

Les intensités et les tensions sont des grandeurs **qui se propagent** dans les conducteurs avec une vitesse finie de l'ordre de $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ (cf cours d'électromagnétisme de PT). Il n'est pas possible de parler de façon rigoureuse de $i(t)$ (ou de $u(t)$) dans un circuit à un instant t puisque sa valeur dépend du point du circuit où nous l'évaluons (même pour une branche sans dérivation). En toute rigueur, $i(t)$ et $u(t)$ sont des fonctions non seulement du temps mais aussi de l'espace ; $i = i(t, x, y, z)$ et $u = u(t, x, y, z)$.

Considérons les deux temps caractéristiques suivants :

- τ le temps de propagation du signal ($i(t)$ ou $u(t)$) sur la longueur ℓ circuit.
- t un temps intervenant dans le circuit (période d'un signal alternatif, temps de montée du signal, temps d'acquisition des mesures etc...).

Si $t \gg \tau$, nous pouvons **négliger les phénomènes de propagation des signaux**, il s'agit de l'approximation des régimes (on dit aussi état) quasi-stationnaire (ARQS).

ARQS \Rightarrow $\begin{cases} i(t) \text{ identique en tout point du circuit pour une branche sans dérivation.} \\ u(t) \text{ identique en tout point du circuit aux bornes d'un dipôle.} \end{cases}$

Dans le cours, les TD et les TP, nous serons toujours dans le cadre de cette approximation.

Domaine de validité de l'ARQS :

- si $\ell = 1$ m (ordre de grandeur des circuits en TP), $\tau \approx \frac{\ell}{c} \approx 3,3 \times 10^{-9}$ s et $\frac{1}{\tau} \approx 3 \times 10^8$ Hz. L'ARQS est valable si $t \gg \tau$ soit $f \ll \frac{1}{\tau} \approx 3 \times 10^8$ Hz = 300 MHz. En TP, la fréquence des signaux est telle que $f \in [10 \text{ Hz} - 1 \text{ MHz}]$, nous sommes dans le domaine de validité de l'ARQS.
- Pour les signaux reçus par les récepteurs paraboliques dont le diamètre est de quelques cm ($\ell \approx 1$ cm), l'ARQS n'est plus valable car $f \approx 1 \times 10^9$ Hz = 1 GHz.

IV - Les dipôles

Dans un circuit électrique (on dit aussi **un réseau**), nous allons connecter entre eux différents éléments nommés **dipôles** car ils ont **deux bornes**, une borne d'entrée et une borne de sortie.

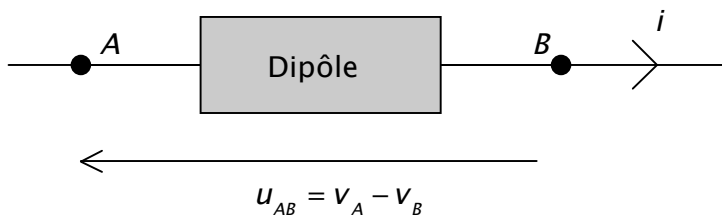
Pour caractériser un dipôle, il nous suffira de connaître la relation entre la tension $u(t)$ à ses bornes et l'intensité $i(t)$ qui le traverse, c'est-à-dire $u = f(i)$. Il n'est pas indispensable de connaître le fonctionnement physique interne des dipôles. Dans ce cours, nous étudierons les dipôles suivants :

- Les **résistances**, symboles R .
- Les **condensateurs**, symbole C .
- Les **inductances** (ou plus simplement bobines), symbole L .

Tous ces dipôles sont dits **passifs** car ils ne nécessitent pas d'alimentation extérieure. Nous étudierons aussi l'**amplificateur opérationnel** (symbole AO) qui possède deux bornes d'entrée et une borne de sortie. Il nécessite en plus une alimentation externe.

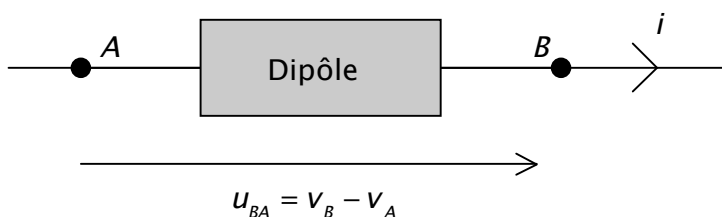
La connaissance de $u = f(i)$ ne suffit pas pour l'étude des circuits, il faut encore savoir dans quelle **convention** nous allons travailler, c'est-à-dire si l'on prend u et i dans le même sens ou pas.

- Convention récepteur



($i_A = i_B$ car nous sommes dans l'ARQS)

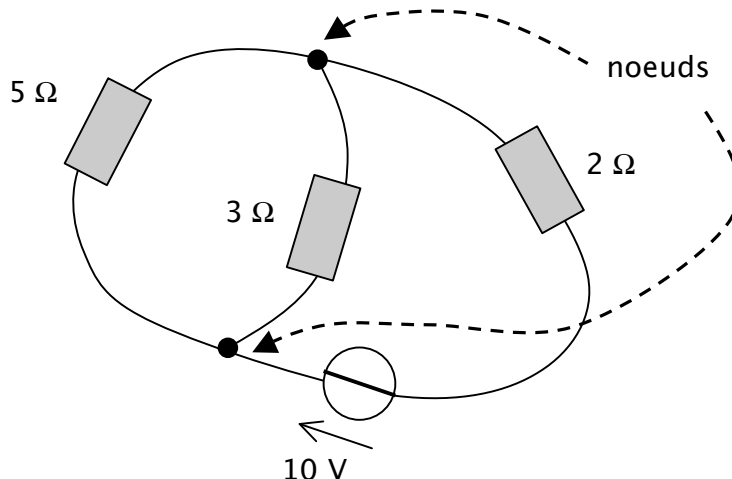
- Convention générateur



V - Nœud, Branches, Mailles

5.1 Nœud

Un nœud est une jonction entre au moins 3 fils de connexion.

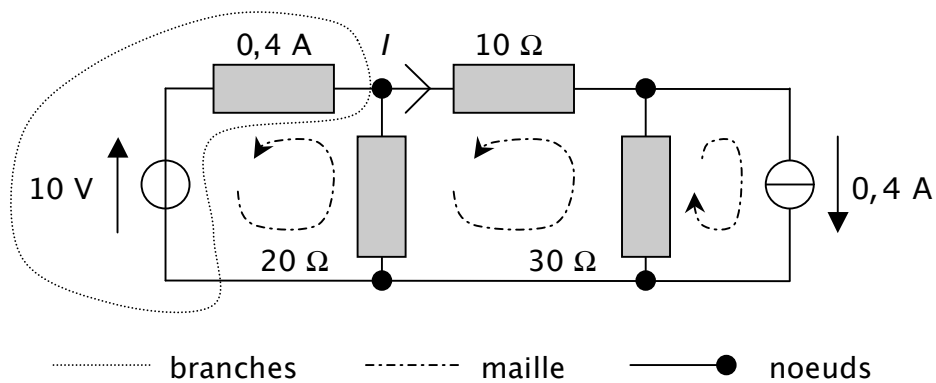


5.2 Branche

Une branche représente un ensemble de dipôles montés en série entre 2 noeuds.

5.3 Maille

Une maille est un ensemble de branches formant un contour fermé que l'on peut parcourir en ne passant qu'une fois par chaque nœud intermédiaire (une maille peut être orientée).



VI - Lois de Kirchhoff

Gustav Robert Kirchhoff, physicien allemand (1824–1887), a établi en 1847 deux lois qui fondent tous les calculs des circuits électriques :

- **Loi des nœuds** (relatives aux courants).
- **Loi des mailles** (relatives aux tensions).

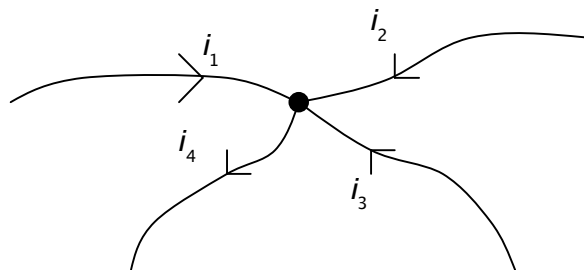
6.1 Loi des nœuds de Kirchhoff

Cette loi repose physiquement sur la conservation de la charge électrique.

La somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants quittant ce nœud. Traduction mathématique :

$$\sum_n \varepsilon_n i_n = 0 \text{ avec } \begin{cases} \varepsilon_n = +1 \text{ si } i_n \text{ arrive au nœud} \\ \varepsilon_n = -1 \text{ si } i_n \text{ repart du nœud} \end{cases}$$

Dans l'exemple suivant : $i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$.



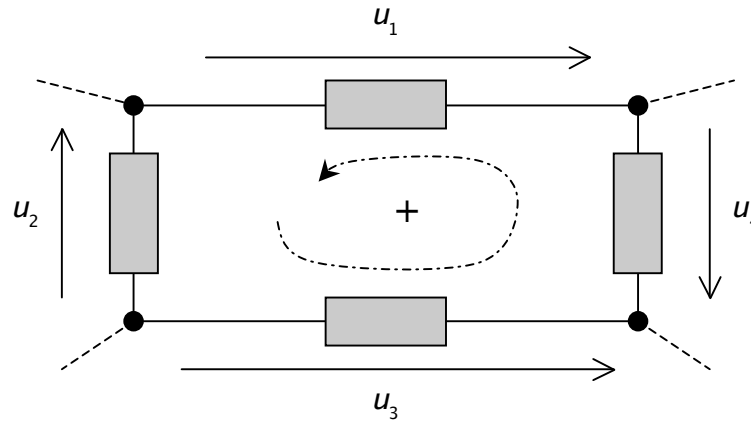
6.2 Loi des mailles de Kirchhoff

Cette loi repose physiquement sur l'additivité des tensions c'est-à-dire la conservation de l'énergie.

La somme algébrique des tensions le long d'un chemin fermé (une maille) est égale à 0. Traduction mathématique :

$$\sum_n \varepsilon_n u_n = 0 \text{ avec } \begin{cases} \varepsilon_n = +1 \text{ si } u_n \text{ orienté dans le sens de la maille} \\ \varepsilon_n = -1 \text{ si } u_n \text{ orienté dans le sens contraire de la maille} \end{cases}$$

Dans l'exemple suivant : $-u_1 - u_2 - u_4 + u_3 = 0$.

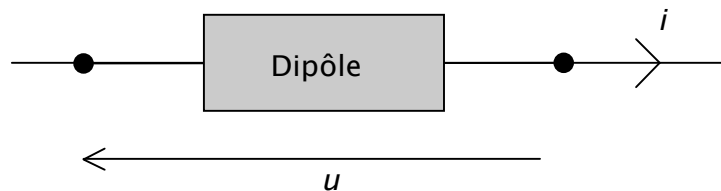


VII - Puissance

On cherche à exprimer la **puissance** $P(t)$ reçue ou cédée par un dipôle. Les résultats suivants seront justifiés dans le cours d'électrostatique.

- Convention récepteur :

$$P(t) = u(t)i(t)$$



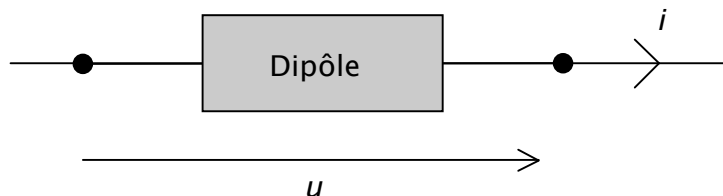
$P(t)$ s'exprime en $W = J.s^{-1}$, $u(t)$ en $V = J.C^{-1}$ et $i(t)$ en $A = C.s^{-1}$. $u(t)i(t)$ est bien homogène à une puissance.

→ Si $P > 0$, le dipôle absorbe de l'énergie, il a un comportement récepteur.

→ Si $P < 0$, le dipôle cède de l'énergie, il a un comportement générateur.

- Convention générateur :

$$P(t) = -u(t)i(t)$$



→ Si $P > 0$, le dipôle absorbe de l'énergie, il a un comportement récepteur.

→ Si $P < 0$, le dipôle cède de l'énergie, il a un comportement générateur.

Attention : Le choix de la convention récepteur ou générateur dépend de la personne qui étudie le circuit. Le caractère récepteur ou générateur d'un dipôle dépend de sa nature physique indépendamment du choix de la convention utilisée.