CHAPITRE 7

Bases de l'électrocinétique

L'**électrocinétique** est l'étude des circuits électriques. Elle s'appuie sur des lois énoncées dès le milieu du 19^e siècle et s'est considérablement développée depuis la seconde moitié du 20^e siècle. On distingue deux grands domaines d'application :

▷ l'**électronique** : le courant électrique y est essentiellement utilisé pour transporter une information. Les puissances électriques mises en jeu sont généralement faibles, comme dans un ordinateur ou un smartphone ;

▷ l'**électrotechnique**, ou **génie électrique** : le courant électrique y est utilisé pour transporter de l'énergie électrique. Les puissances mises en jeu sont importantes, comme dans l'alimentation d'un TGV ou le générateur d'une centrale électrique.

1 Cadre et hypothèses de travail

1.1 Définitions relatives aux circuits

▷ Un **courant électrique** désigne un déplacement d'ensemble ordonné de **porteurs de charges** électriques dans un **milieu conducteur**.

milieu conducteur	métal	électrolyte	semi-conducteur	plasma
porteurs de charges	électrons	ions	électrons et trous	électrons

Ce mouvement est relativement lent : sa vitesse est de l'ordre du millimètre par seconde pour les électrons dans un conducteur métallique. Il se superpose à un mouvement d'agitation thermique désordonné : chaque électron peut atteindre des vitesses de l'ordre du centième de la vitesse de la lumière. Des ondes électromagnétiques sont produites et se propagent pratiquement à la vitesse de la lumière.

▷ Un **circuit électrique** est un ensemble de composants électriques (générateurs, lampes, diodes, etc.) reliés entre eux (souvent, par des fils électriques), dans lequel un courant électrique peut circuler.

▷ Un **dipôle** électrocinétique est un composant électrique qui possède deux bornes (une borne d'entrée du courant et une borne de sortie du courant).

Dans les schémas des circuits, on représente un dipôle quelconque par un rectangle. On attribue à certains dipôles un symbole particulier.

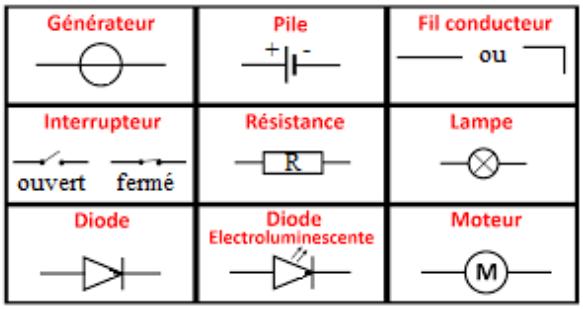


FIGURE 1 – Exemples de symboles de dipôles

▷ Un **noeud** est un point qui relie les bornes d'au moins trois dipôles. C'est un embranchement dans un circuit.

▷ Une **branche** est une portion de circuit qui relie deux noeuds consécutifs. Elle peut contenir plusieurs dipôles.

▷ Une **maille** est un parcours fermé (une boucle) dans un circuit, constitué de branches successives et qui ne passe qu'une seule fois par les nœuds rencontrés.

▷ Des dipôles sont **en série** s'ils appartiennent à une même branche.

▷ Des dipôles sont **en dérivation** (ou **en parallèle**) s'ils sont reliés aux deux mêmes noeuds.

Exercice d'application 1 :
On modélise un ventilateur de poche par un circuit électrique simple.

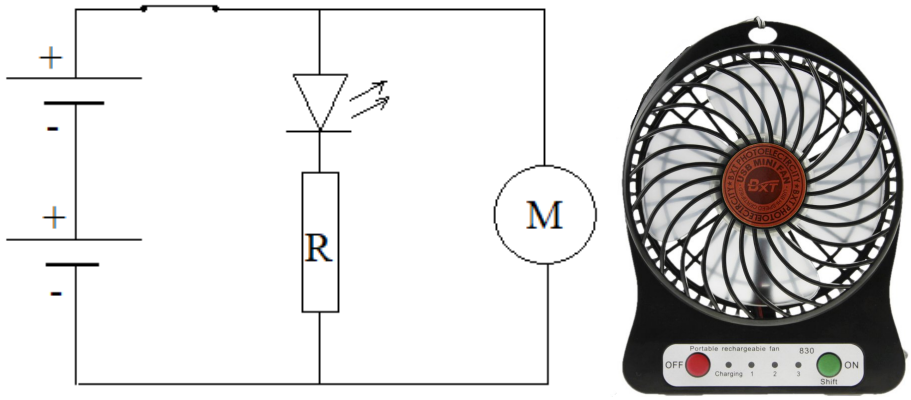


FIGURE 2 – Gauche : schéma du circuit électrique qui modélise le ventilateur ; droite : photographie du ventilateur

Décrire ce circuit en utilisant le vocabulaire ci-dessus.

1.2 Régimes de fonctionnement

Notre étude des circuits électriques se limite au **régime stationnaire** (RS), ou au cadre plus vaste de l'**approximation des régimes quasi-stationnaires** (ARQS).

1.2.1 Régime stationnaire et régime variable

Le **régime stationnaire** est indépendant du temps : toutes les grandeurs physiques y sont constantes (elles ne dépendent pas de la variable temporelle t). Par conséquent, toute dérivée temporelle (c'est-à-dire par rapport au temps) d'une grandeur physique x est nulle à chaque instant : $\frac{dx}{dt} = 0$.

Le régime stationnaire est parfois appelé **régime continu** (DC pour "direct current"). Il est qualifié de **régime permanent** si une évolution temporelle a eu lieu précédemment mais qu'elle n'est plus perceptible désormais.

Un régime qui n'est pas stationnaire est qualifié de **variable** : certaines grandeurs physiques dépendent du temps. C'est le cas en particulier si le courant est **alternatif** (AC pour "alternative current"), c'est-à-dire s'il change de signe au cours du temps.

1.2.2 Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS)

Dans un circuit électrique, un **signal électrique** ne se propage pas instantanément, mais à une vitesse proche de $c = 3{,}00 \times 10^8$ m·s^{-1}, la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide.

Le signal s en un point M situé à une distance L de la source est identique à un instant t à ce qu'il était au niveau de la source S à l'instant $t - \frac{L}{c}$:

$$s(M, t) = s\left(S, t - \frac{L}{c}\right),$$

avec $\frac{L}{c} = \Delta t$ le **retard dû à la propagation** de l'onde du point S au point M. Prendre en compte cet aspect ondulatoire compliquerait l'étude des circuits électriques, car les grandeurs électriques y dépendraient non seulement du temps, mais aussi de la position précise dans circuit.

L'**approximation des régimes quasi-stationnaires** (ARQS) consiste à négliger les effets liés à la propagation des signaux : on considère que cette propagation est instantanée, ce qui permet d'étudier des **signaux** $s(t)$, plutôt que des **ondes** $s(M, t)$.

Pour que cette approximation soit valide, il faut que la durée Δt de propagation d'un signal soit négligeable par rapport à la durée caractéristique τ de l'évolution du signal : $\Delta t \ll \tau$. Il s'agit donc d'un régime "lentement variable".

Si les signaux sont sinusoïdaux, on peut prendre comme durée caractéristique τ leur période T. La condition pour se placer dans l'ARQS peut alors se traduire par :

$$L \ll \frac{c}{f},$$

où f désigne la fréquence du signal. Cette condition peut aussi s'écrire sous la forme :

$$L \ll \lambda.$$

Le circuit doit être beaucoup plus petit que la longueur d'onde de l'onde électromagnétique assurant le transport de l'information dans le circuit.

Exercice d'application 2 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence.





1. Rappeler la fréquence de la tension alternative délivrée dans les prises électriques par EDF. Déterminer si une ligne électrique de longueur $L = 300$ km peut être étudiée dans le cadre de l'ARQS. Déterminer jusqu'à quelle longueur de ligne environ on pourrait se placer dans ce cadre. Commenter.

2. Une puce électronique a pour côté $a \sim 1$ cm. Sachant que les signaux n'y dépassent pas une fréquence f ~ 10 MHz, déterminer si on peut l'étudier dans le cadre de l'ARQS.

3. Une antenne radio de longueur $\mathrm{L} = 50$ cm capte une onde électromagnétique de fréquence $\nu = 145$ MHz. Déterminer si on peut étudier son fonctionnement dans le cadre de l'ARQS.

Nous admettrons le résultat suivant : les lois de l'électrocinétiques valables en régime stationnaire le restent dans le cadre de l'ARQS. Dans la suite du cours d'électrocinétique, nous nous placerons dans ce cadre si le régime est variable.

Nous adopterons la convention suivante :

▷ dans le cadre du régime stationnaire, où toutes les grandeurs électriques sont constantes, leurs symboles sont en majuscule : U, I, etc.

▷ en régime variable, où les valeurs de certaines grandeurs électriques varient au cours du temps, leurs symboles sont en minuscule : u, i, etc. Parfois, nous indiquerons explicitement cette dépendance temporelle : $u(t)$, $i(t)$, etc.

2 Principales grandeurs électriques

2.1 Charge électrique

La **charge électrique** Q est une grandeur associée aux particules et aux entités chimiques qui constituent la matière. Elle s'exprime en coulomb, de symbole C, et peut prendre des valeurs positives ou négatives. La force électrostatique que subit une particule chargée en présence d'une autre particule chargée est proportionnelle au produit de leurs charges.

La charge électrique est une grandeur **quantifiée** : il existe une **charge élémentaire**, qui vaut $e = 1,6 \times 10^{-19}\mathrm{C}$, et toute charge qu'on peut isoler en est un multiple entier relatif, de sorte que $\mathrm{Q} = \mathrm{N} \times e$.

C'est une grandeur additive : la charge électrique totale d'un système est la somme de celles de tous ses sous-systèmes.

Exercice d'application 3 :

1. Rappeler ou calculer la valeur de la charge :
— Q_e d'un électron ;
— Q_p d'un proton ;
— Q_n d'un neutron ;
— Q_a d'un atome ;
— Q_m d'une molécule ;
— $\mathrm{Q}_{\mathrm{N}a^+}$ d'un ion sodium Na^+ ;
— $\mathrm{Q}_{\mathrm{F}e^{3+}}$ d'un ion ferrique Fe^{3+} ;
— $\mathrm{Q}_{\mathrm{I}^-}$ d'un ion iodure I^- ;
— $\mathrm{Q}_{\mathrm{SO}_4^{2-}}$ d'un ion sulfate SO_4^{2-}.

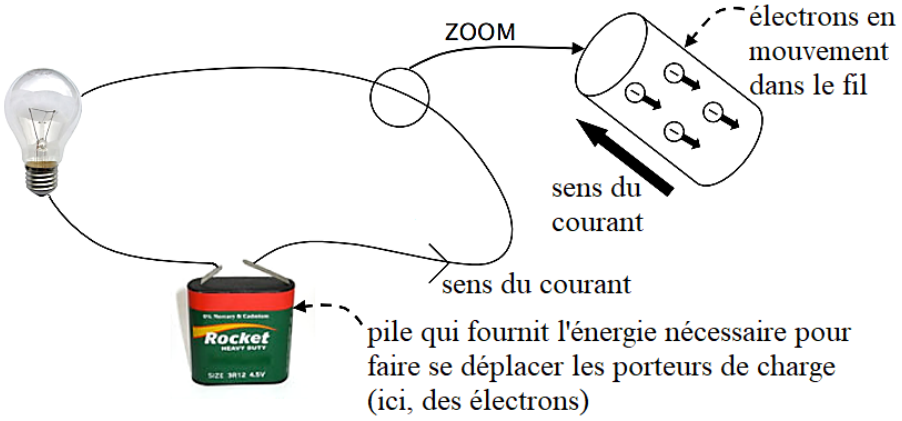
2. La **constante de Faraday** $\mathscr{F}$ désigne la valeur absolue de la charge électrique par mole d'électrons. Calculer sa valeur, sachant que la constante d'Avogadro vaut $\mathrm{N_A} = 6,0 \times 10^{23}$ mol^{-1}.

2.2 Intensité d'un courant électrique

2.2.1 Définition

Un **courant électrique** désigne un déplacement d'ensemble et ordonné de porteurs de charges électriques dans un milieu conducteur.

Pour des raisons historiques, le sens "réel" du courant électrique est celui du déplacement des charges positives. Les charges négatives vont en sens opposé.



La définition de la grandeur physique qui quantifie le courant électrique, appelée **intensité** (électrique), repose sur une analogie avec l'hydrodynamique :

Courant d'eau dans une canalisation	Courant électrique dans un conducteur
Soit V le volume d'eau traversant, dans un sens choisi, une section S de canalisation pendant la durée Δt. Le **débit volumique moyen** est $\mathrm{D_V} = \frac{\mathrm{V}}{\Delta t}$.	Soit Q la charge électrique traversant, dans un sens choisi, une section S de conducteur pendant la durée Δt. L'**intensité moyenne** est $\mathrm{I} = \frac{\mathrm{Q}}{\Delta t}$.

Ainsi, l'intensité d'un courant électrique représente le débit de charges électriques à travers une section de conducteur.

Par **analyse dimensionnelle**, on voit que l'unité de l'intensité électrique, l'ampère, de symbole A, n'est autre que celle de la charge divisée par celle du temps, soit dans le système international d'unités, le coulomb par seconde $(\mathrm{C{\cdot}s^{-1}})$:

$$1\mathrm{A} = 1\mathrm{C} \cdot \mathrm{s}^{-1}.$$

L'intensité moyenne est susceptible de varier en fonction de la durée Δt choisie, si on n'est pas en régime stationnaire. On définit l'**intensité (instantanée)** à chaque instant t, comme la limite, quand la durée Δt tend vers zéro, de l'intensité moyenne. On assimilera cette grandeur à une dérivée de la charge par rapport au temps :

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

2.2.2 Intensité algébrique d'un courant

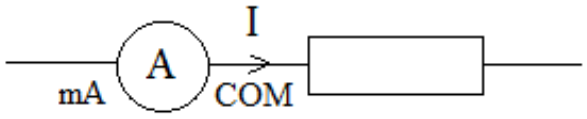
Afin que l'intensité soit définie de façon **algébrique**, ce qui permet de conserver une information sur le sens du courant, on dessine une flèche sur le conducteur dans un sens choisi arbitrairement.

Une charge positive qui traverse la section du conducteur dans ce sens est comptée positivement, si elle va en sens inverse elle est comptée négativement. Pour une charge négative, on inverse les signes.

Avec cette convention :
▷ si $i > 0$, alors le sens réel du courant correspond au sens d'orientation du fil choisi arbitrairement ;
▷ si $i < 0$, alors le sens réel du courant est l'opposé de celui choisi arbitrairement.

2.2.3 Mesure d'intensité et valeurs typiques

Pour mesurer l'intensité du courant électrique qui traverse un dipôle, on peut utiliser un **ampèremètre**, qui doit se situer dans la même branche que le dipôle (donc en série avec lui) afin qu'il soit traversé par le courant à mesurer :



Les indications mA et COM ne sont pas indispensables sur le schéma. Elles indiquent comment faire les branchements des fils sur les bornes de l'ampèremètre pour que l'intensité soit positive si le sens réel du courant est celui choisi arbitrairement ici.

On retiendra quelques ordres de grandeur de valeurs d'intensité dans différents domaines d'application :
▷ courant dans un canal synaptique : 1 pA ;
▷ seuil de perception par le corps : 1 mA ;
▷ circuits électroniques : 1 mA à 1 A ;
▷ ampoule électrique : 1 A ;
▷ moteur de TGV : 1 kA ;
▷ foudre : 100 kA.

2.2.4 Continuité de l'intensité

Malgré la quantification de la charge électrique, qui a donc un caractère discret à l'échelle microscopique, l'intensité du courant est modélisée par une **fonction continue** de la variable temps à l'échelle macroscopique.

Exercice d'application 4 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Utiliser les ordres de grandeur des charges des électrons en vue de légitimer l'utilisation de grandeurs électriques continues.

Le temps de réponse d'un ampèremètre est de l'ordre de la centaine de microsecondes : il affiche l'intensité moyenne calculée sur cet intervalle de temps.
1. Rappeler la définition de l'intensité moyenne.
2. Déterminer un ordre de grandeur typique du nombre d'électrons qui traversent la section d'un fil pendant le temps de réponse de l'ampèremètre.

3. Déterminer un ordre de grandeur de la variation relative d'intensité que représenterait une augmentation d'un électron par rapport au nombre trouvé précédemment.

4. Justifier alors qu'on peut considérer l'intensité comme une fonction continue de la variable temps lorsqu'on fait une étude théorique d'un circuit électrique.

2.2.5 Conservation de la charge et loi des nœuds

La **conservation de la charge** électrique est une loi fondamentale de la physique : la charge électrique ne peut pas être créée ni détruite, mais seulement transportée d'un endroit à un autre, ou échangée. Par ailleurs, dans le cadre de l'ARQS, la charge ne peut pas s'accumuler en un point d'un circuit.

L'intensité du courant est donc la même en tout point d'un conducteur de section constante, en particulier d'un fil de connexion. Ce n'est qu'au niveau des nœuds que l'intensité peut être distribuée dans les différentes branches.

La première loi de Kirchhoff, ou **loi des nœuds**, est l'une des lois fondamentales de l'électrocinétique. Elle indique que la somme des intensités des courants entrant (réellement) dans un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui sortent (réellement) du nœud :

$$\sum i_e = \sum i_s.$$

De façon équivalente, la somme des courants algébriques entrant dans un nœud est nulle :

$$\sum_k \overline{i_k} = 0,$$

où l'indice k sert à numéroter les branches reliées au nœud.

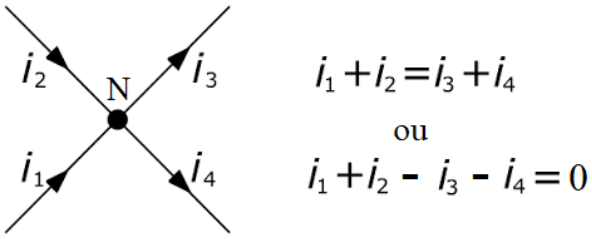
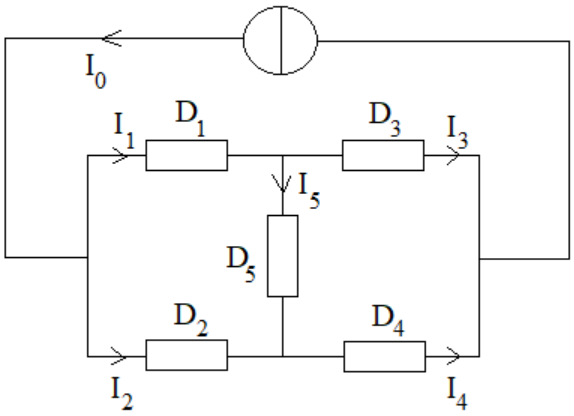


FIGURE 3 – Illustration de la loi des nœuds au niveau du nœud N. Les sens indiqués pour les courants y correspondent à leur sens "réel" : $i_k \geq 0$.

Exercice d'application 5 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Utiliser la loi des noeuds.

Dans le circuit schématisé ci-dessous, qui contient une source idéale de courant et cinq dipôles, des ampèremètres non représentés mesurent $\mathrm{I_0} = 4{,}00$ A, $\mathrm{I_1} = 1{,}00$ A et $\mathrm{I_4} = 2{,}00$ A.

Calculer les intensités $\mathrm{I_2}$, $\mathrm{I_3}$ et $\mathrm{I_5}$.



2.3 Potentiel électrique et tension

2.3.1 Définitions

Pour expliquer pourquoi un courant électrique s'établit et dans quel sens, on peut raisonner encore une fois par analogie avec la mécanique des fluides.

Dans un cours d'eau, l'écoulement de l'eau se fait spontanément des zones de haute énergie potentielle de pesanteur (et donc de haute altitude) vers les zones de basse énergie potentielle de pesanteur. Dans un circuit électrique, il se fait des zones de haute énergie potentielle électrostatique vers celles d'énergie potentielle électrostatique plus faible.

On peut définir en chaque point M un **potentiel électrique** V tel que l'énergie potentielle électrostatique d'une particule de charge q placée au point M vérifie :

$$\mathrm{E}_p(\mathrm{M}) = q\mathrm{V}(\mathrm{M}).$$

Le potentiel électrique s'exprime en volt, de symbole V.

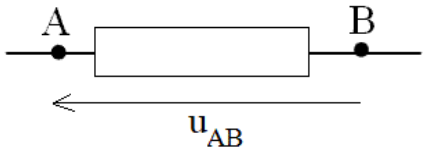
De la même manière que dans le cas d'une rivière ce ne sont pas les valeurs des altitudes qui comptent mais leur différence, dans le cas d'un circuit ce ne sont pas les valeurs des potentiels, mais leur différence, qui joue un rôle dans l'établissement d'un courant dans un sens donné.

Par définition, la **tension** électrique u_{AB} entre les bornes A et B d'un dipôle est la différence de potentiel entre ces bornes :

$$u_{\mathrm{AB}} = \mathrm{V_A} - \mathrm{V_B}.$$

Elle s'exprime en volt, de symbole V.

Sur les schémas, elle est représentée par une flèche allant de B vers A :



Attention, avec cette convention la tension $\mathrm{u_{AB}}$ pointe de B vers A, alors qu'un vecteur $\overrightarrow{\mathrm{AB}}$, lui, pointerait de A vers B !

Souvent, pour alléger les notations, on omet de noter les points entre lesquels on définit la tension, qu'on note simplement u.

2.3.2 Référence de potentiel

Le potentiel électrique est défini à une constante additive près, de sorte que seule une différence de potentiel (une tension) peut être mesurée et possède une signification physique. Le choix de l'origine des potentiels est arbitraire.

On appelle **masse** d'un circuit un point dont on a décidé que son potentiel électrique est nul, et qui joue donc le rôle d'origine des potentiels. Dans la pratique, les générateurs sont reliés à la terre via la prise de terre, et on décide souvent de lui attribuer le rôle de masse du circuit.

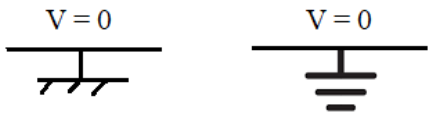
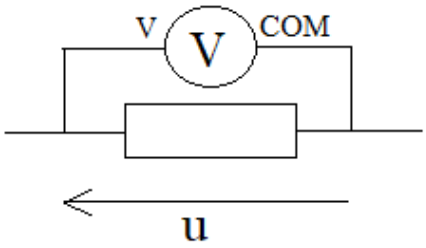


FIGURE 4 – Gauche : symbole de la masse d'un circuit ; droite : symbole de la terre

2.3.3 Mesure de tension et valeurs typiques

Pour mesurer la tension aux bornes d'un dipôle, on peut utiliser un **voltmètre**, qui se branche en dérivation sur les bornes du dipôle (donc en parallèle avec lui) afin de pouvoir avoir accès au potentiel électrique en entrée et en sortie.



Les indications V et COM ne sont pas indispensables. Elles indiquent comment faire les branchements des fils sur les bornes du voltmètre pour que la tension affichée soit positive si le potentiel d'entrée est supérieur au potentiel de sortie.

Un **oscilloscope** permet aussi de mesurer une tension, et même d'afficher le graphe du signal $u(t)$. Il n'y a alors qu'un seul branchement à faire, car les tensions sont mesurées par rapport à la masse de l'oscilloscope, qui n'est autre que la terre.

On retiendra les ordres de grandeur de quelques tensions usuelles :
▷ bruit de fond électrique dans les circuits : $1\ \mathrm{mV}$
▷ potentiel d'action dans un neurone, circuits électroniques : $100\ \mathrm{mV}$;
▷ pile : $1\ \mathrm{V}$;
▷ ligne à haute tension : 1 à $100\ \mathrm{kV}$;
▷ nuage d'orage : $100\ \mathrm{MV}$.

2.3.4 Loi des mailles

Nous ferons l'hypothèse simplificatrice que le potentiel électrique garde la même valeur en tout point d'un fil de connexion, donc que la tension aux bornes d'un fil est nulle : c'est le **modèle du fil idéal**.

Dans une branche d'un circuit, il y a **additivité des tensions** aux bornes des différents dipôles. C'est une conséquence directe de la définition de la tension comme une différence de potentiel.

La deuxième loi de Kirchhoff, ou **loi des mailles**, est l'autre loi fondamentale de l'électrocinétique.

Elle indique que quand on oriente une maille de façon arbitraire, la somme des tensions orientées dans le sens positif est égale à la somme des tensions orientées dans le sens négatif. De façon équivalente, la somme des tensions algébriques dans le sens de parcours choisi est nulle :

$$\sum_k \overline{u_k} = 0.$$

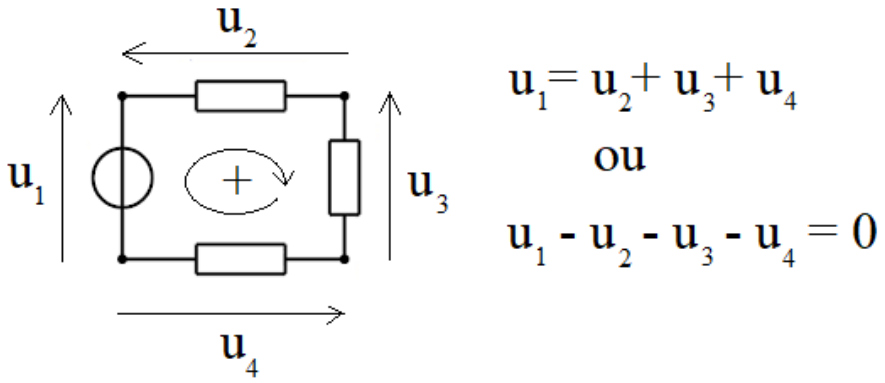


FIGURE 5 – Illustration de la loi des mailles

L'analogie avec une promenade en montagne permet de retenir facilement la loi des mailles : quand le circuit choisi fait une boucle, les dénivelés positifs et négatifs se compensent.

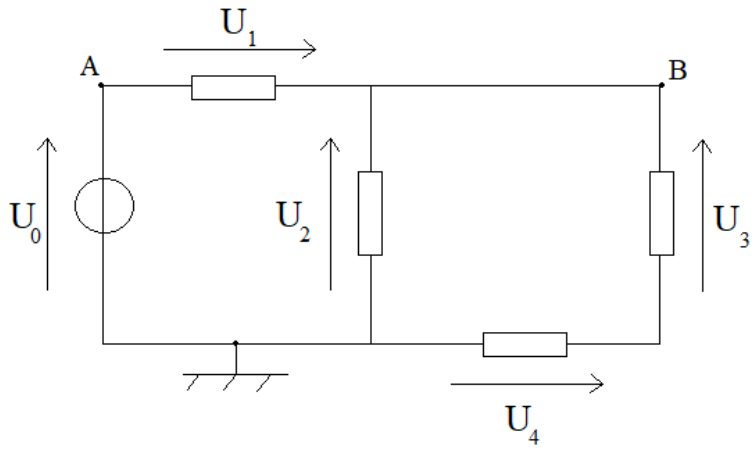
Exercice d'application 6 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Utiliser la loi des mailles.

Dans le circuit schématisé ci-dessous, qui comporte un générateur de tension idéal et quatre dipôles, des voltmètres non représentés mesurent $\mathrm{U_0 = 5{,}0\ V}$, $\mathrm{U_2 = 1{,}0\ V}$ et $\mathrm{U_3 = 3{,}0\ V}$.

1. Calculer les tensions $\mathrm{U_1}$ et $\mathrm{U_4}$.
2. Déterminer les potentiels électriques $\mathrm{V_A}$ et $\mathrm{V_B}$.



3 Dipôles électriques

3.1 Décrire le fonctionnement d'un dipôle

3.1.1 Conventions récepteur et générateur

Comme les tensions et les intensités algébriques peuvent être orientées comme on le souhaite sur les schémas des circuits électriques, il existe deux cas de figure pour un dipôle quelconque :

▷ la **convention récepteur**, si tension et intensité sont orientées en sens opposé ;
▷ la **convention générateur**, si elles sont orientées dans le même sens.

Les lois qui relient tension et intensité ont un signe global qui dépend de la convention choisie.

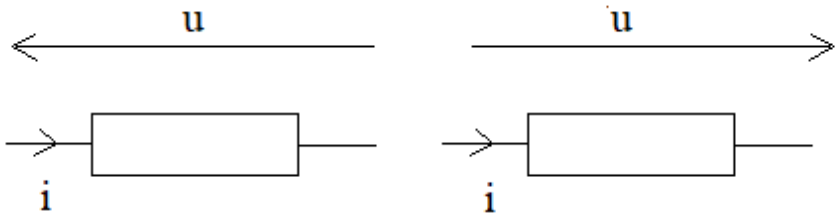


FIGURE 6 – Gauche : convention récepteur ; droite : convention générateur

3.1.2 Caractéristique et relation constitutive d'un dipôle

La constitution d'un dipôle et les phénomènes microscopiques qui y ont lieu font que la tension à ses bornes est une fonction de l'intensité du courant qui le traverse.

En régime stationnaire, on appelle **caractéristique (statique) d'un dipôle** la représentation graphique de la fonction $\mathrm{U} = f(\mathrm{I})$, pour une convention donnée.

Pour l'établir en convention récepteur, on peut s'appuyer sur le montage schématisé ci-dessous :

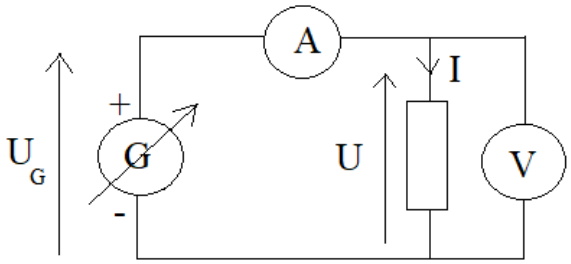


FIGURE 7 – Schéma d'un montage permettant d'établir la caractéristique d'un dipôle, ici en convention récepteur. La flèche qui traverse le symbole du générateur de tension indique que la valeur de la tension $\mathrm{U_G}$ qu'il délivre est réglable.

L'équation $u = f(i)$ qui relie l'intensité i du courant qui traverse un dipôle et la tension u à ses bornes dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires est appelée **équation caractéristique** (ou encore **loi de comportement** ou **relation constitutive**) d'un dipôle. Elle est plus difficile à établir.

3.2 Modèle du dipôle ohmique, loi d'Ohm

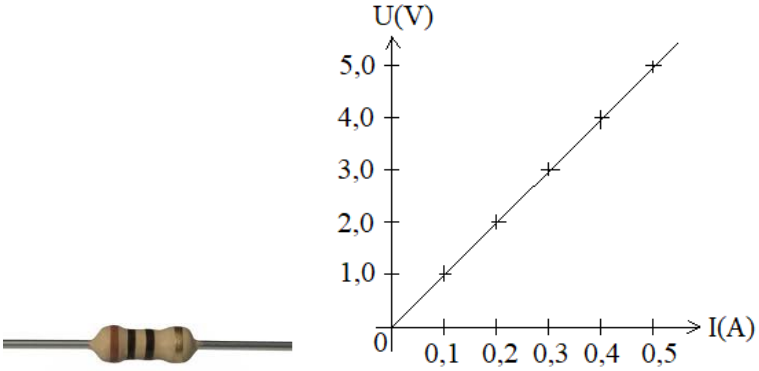


FIGURE 8 – Gauche : dipôle testé ; droite : caractéristique du dipôle en convention récepteur

Dans l'exemple ci-dessus, les points expérimentaux sont alignés le long d'une droite passant par l'origine du repère, ce qui traduit une relation de proportionnalité entre la tension et l'intensité. Le coefficient directeur de cette droite, nommé **résistance** du dipôle et noté R, s'exprime en $\mathrm{V \cdot A^{-1}}$. On donne un nom à l'unité volt par ampère : c'est l'ohm, de symbole Ω. Ici, $\mathrm{R} = 10\ \Omega$.

En convention récepteur, la loi de comportement de ce dipôle s'écrit

$$\mathrm{U = RI},$$

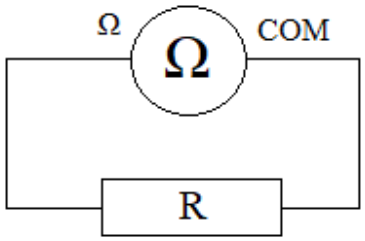
et porte le nom de **loi d'Ohm**. Un dipôle qui la vérifie est qualifié de **dipôle ohmique**, de **résistor**, ou encore de **résistance**. De nombreux dipôles ont un comportement ohmique sur une certaine plage de faibles intensités. C'est le cas en particulier des fusibles dans les disjoncteurs.

La loi d'Ohm reste valable dans le cadre de l'ARQS :

$$u = \mathrm{R}i.$$

3.2.1 Mesure de résistance et valeurs typiques

Pour mesurer rapidement une résistance, on peut utiliser un **ohmmètre**. On le branche, hors circuit, sur les bornes du dipôle ohmique.



Les symboles Ω et COM ne sont pas nécessaires sur le schéma, car l'ohmmètre affiche la même valeur quel que soit le sens de branchement.

On retiendra les ordres de grandeur de quelques valeurs typiques de résistances :
▷ 10Ω à 100 kΩ dans les circuits électroniques ;
▷ 1 MΩ pour la résistance interne d'un voltmètre.

3.2.2 Associations de résistances

Quand on dispose de plusieurs résistances, on peut par exemple les brancher en série ou en dérivation. Le dipôle formé par cette association se comporte également comme une résistance, qu'on qualifie de **résistance équivalente**, dans la mesure où il vérifie lui aussi la loi d'Ohm.

Exercice d'application 7 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente.

On dispose de deux dipôles ohmiques de résistances respectives R_1 et R_2. En vous appuyant sur la loi d'Ohm et la loi d'additivité des tensions ou la loi des nœuds, montrer que :
1. Si on les branche en série, leur association est équivalente à un dipôle ohmique de résistance

$$\mathrm{R}_{\text{eq,série}} = \mathrm{R}_1 + \mathrm{R}_2.$$

2. Si on les branche en dérivation, leur association est équivalente à un dipôle ohmique dont la résistance vérifie

$$\frac{1}{\mathrm{R}_{\text{eq,parallèle}}} = \frac{1}{\mathrm{R}_1} + \frac{1}{\mathrm{R}_2},$$

ou encore

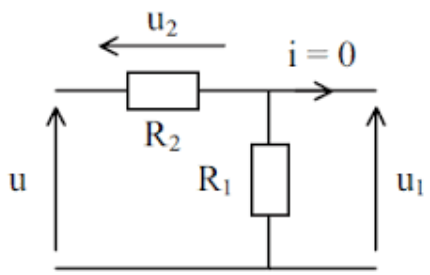
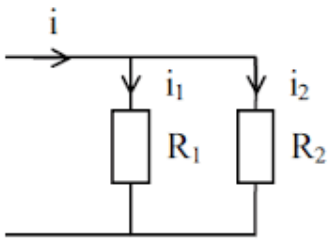
$$G_{eq,parallèle} = G_1 + G_2,$$

où on a introduit la **conductance** $G = \frac{1}{R}$.

3. Exprimer $R_{eq,parallèle}$ en fonction de R_1 et R_2.

3.2.3 Ponts diviseurs de tension et de courant

Les relations de **pont diviseur** permettent de calculer rapidement une tension ou une intensité sans repasser systématiquement par les lois de Kirchhoff, en reconnaissant des configurations expérimentales particulières.

	schéma	relations
pont diviseur de tension		$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u$ $u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u$
pont diviseur de courant		$i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i$ $i_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} i$

Exercice d'application 8 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Établir et exploiter les relations de diviseurs de tension ou de courant.

1. En appliquant la loi des mailles, la loi des nœuds et la loi d'Ohm, établir les expressions des ponts diviseurs données dans le tableau ci-dessus.
2. Proposer un dispositif expérimental simple permettant de multiplier ou diviser une tension par un facteur 2. Idem pour une intensité.

3.3 Modèle du générateur de Thévenin

Il existe plusieurs façons de représenter un générateur de tension continue (au sens de constante), une pile ou une batterie sur les schémas.

On a choisi la convention générateur. Ce choix a l'avantage de permettre à la tension et à l'intensité d'être positives simultanément, mais il reste arbitraire.

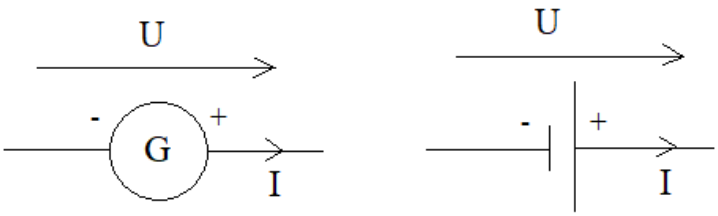


FIGURE 9 – Symboles d'un générateur de tension en convention générateur

Un **générateur de tension idéal** est un modèle de générateur tel que la tension à ses bornes ne dépend pas de l'intensité du courant qu'il délivre. C'est une source de tension continue (au sens de constante).

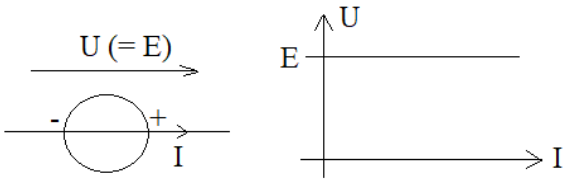
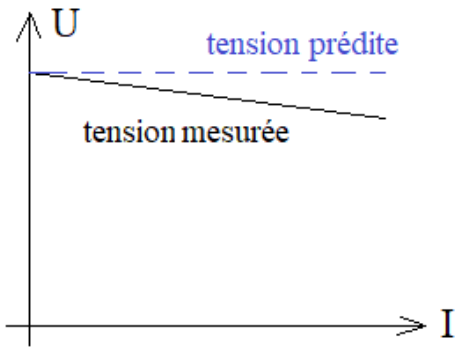


FIGURE 10 – Symbole et caractéristique d'un générateur de tension idéal

La tension à ses bornes est traditionnellement notée E et appelée **force électromotrice** (bien que ce ne soit pas une force, mais une tension électrique).

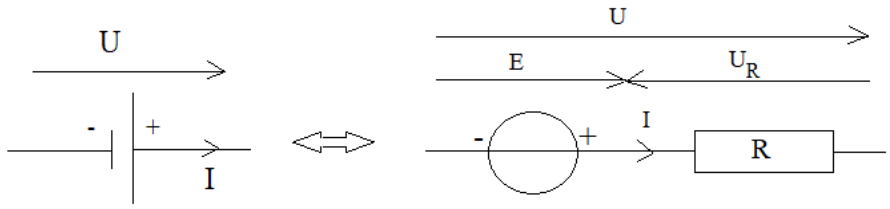
Certains générateurs, tels que les **alimentations stabilisées en tension**, ont une caractéristique qui ressemble beaucoup à celle du générateur de tension idéal pour les faibles intensités.

Toutefois, la majorité des générateurs de tension ont une caractéristique telle que la tension est mieux modélisée par une fonction affine de l'intensité, avec un coefficient directeur négatif (et faible).



Le modèle du générateur idéal ne reproduit pas parfaitement les données : il est trop simpliste. Pour autant, l'erreur commise est petite, la différence entre modèle et réalité est de quelques pourcents seulement quand l'intensité prend des valeurs faibles. Si on n'a pas besoin de beaucoup de précision, on se contentera du modèle du générateur idéal, plus facile à manipuler. Si on veut gagner en compréhension et en précision, il faut raffiner le modèle.

On peut voir un générateur réel comme une association en série d'un générateur idéal et d'un dipôle ohmique. Cette association est appelée **modèle de Thévenin** d'un générateur de tension.



En effet, étant donné l'orientation des flèches qui symbolisent les tensions, la tension U aux bornes du générateur peut être réécrite sous la forme suivante :

$$U = E - U_R = E - RI,$$

où R est appelée **résistance interne**, ou encore **résistance de sortie**, du générateur de Thévenin.

Sa valeur est typiquement de quelques ohms ou quelques dizaines d'ohms tout au plus : elle n'est pas très élevée en comparaison de celle des résistors utilisés dans les montages, qui ont souvent une résistance de l'ordre du kiloohm, voire plus.

3.3.1 Quelques autres dipôles élémentaires

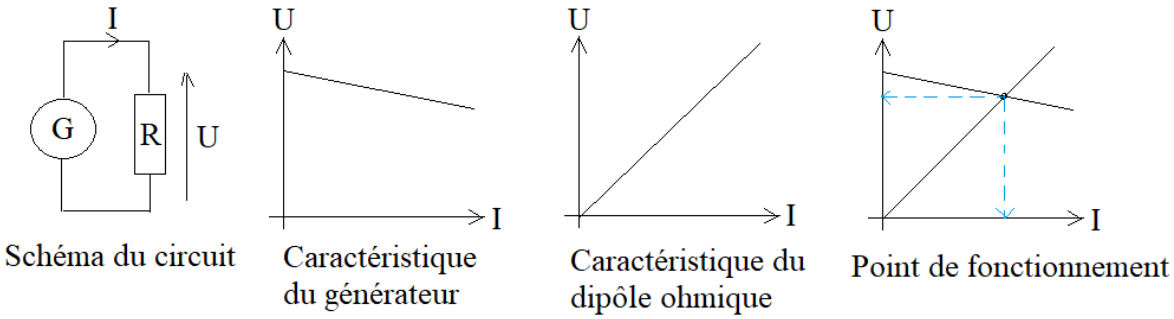
Un **fil idéal** a une tension nulle à ses bornes, quelle que soit l'intensité du courant qui le traverse.

Un objet isolant peut être considéré comme un dipôle appelé **coupe-circuit**, pour lequel l'intensité est nulle quelle que soit la tension.

Un **interrupteur** (idéal), lorsqu'il est ouvert, est équivalent à un coupe-circuit. Lorsqu'il est fermé, il est équivalent à un fil (idéal).

3.3.2 Point de fonctionnement

De manière générale, connaître la caractéristique de deux dipôles permet de prévoir le fonctionnement du circuit obtenu en les branchant l'un à l'autre, comme illustré dans l'exemple ci-dessous :



L'intersection des deux caractéristiques, appelée **point de fonctionnement**, est un point dont l'abscisse donne l'intensité du courant dans le circuit et l'ordonnée la tension aux bornes des deux dipôles. On peut déterminer le point de fonctionnement graphiquement, ou analytiquement si on connaît les équations caractéristiques des dipôles et qu'elles sont suffisamment simples.

S'il n'existe pas de point de fonctionnement, alors le circuit ne peut pas fonctionner. Cela se traduit en pratique par la détérioration des dipôles.

4 Puissance électrique

4.1 Définition

La **puissance électrique** échangée par un dipôle avec le reste du circuit est

$$p = ui,$$

où u est la tension aux bornes du dipôle et i l'intensité du courant qui le traverse. Elle s'exprime en watt, de symbole W, tel que $1\mathrm{W} = 1\mathrm{V} \cdot \mathrm{A}$.

En convention récepteur, la puissance est celle **reçue** par le dipôle. Si elle est positive, le dipôle fonctionne réellement comme un récepteur : il reçoit effectivement de l'énergie. Sinon, il se comporte réellement comme un générateur.

En convention générateur, cette puissance est celle **cédée** par le dipôle. Si elle est positive, le dipôle fonctionne en générateur : il fournit effectivement de l'énergie. Sinon, il se comporte comme un récepteur.

On retiendra quelques ordres de grandeur de puissances :
- ordinateur : 10 à 100 W ;
- appareil électroménager : 1 kW ;
- véhicule électrique : 10 kW à 100 kW ;
- centrale électrique : 10 MW à 10 GW.

4.2 Effet Joule dans une résistance

Un dipôle ohmique convertit la puissance électrique qu'il reçoit en puissance thermique, ce qui a tendance à réchauffer son environnement : c'est l'**effet Joule**. La puissance dissipée par effet Joule par une résistance R a pour expression :

$$p_\mathrm{J} = \mathrm{R}i^2 = \frac{u^2}{\mathrm{R}}.$$

L'effet Joule est souvent gênant en électronique ou en électrotechnique, car il a tendance à faire chauffer les installations et donc à dégrader leurs performances, ce qui oblige parfois à mettre en place un système de refroidissement coûteux et encombrant.

Il est néanmoins mis à profit au quotidien dans bon nombre de dispositifs de chauffage : radiateur électrique, plaque de cuisson, bouilloire, grille-pain, etc.



FIGURE 11 – Portraits de Charles-Augustin Coulomb (1736-1806), Gustav Kirchhoff (1824-1887), André-Marie Ampère (1775-1836), Georg Ohm (1789-1854) et James Prescott Joule (1818-1889)