

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 pour 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 et 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 : les électrons peuvent, individuellement, 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 conducteurs 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.

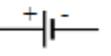
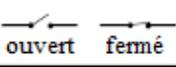
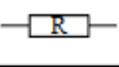
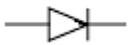
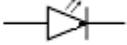
Générateur 	Pile 	Fil conducteur — ou 
Interrupteur 	Résistance 	Lampe 
Diode 	Diode Electroluminescente 	Moteur 

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 noeuds 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.

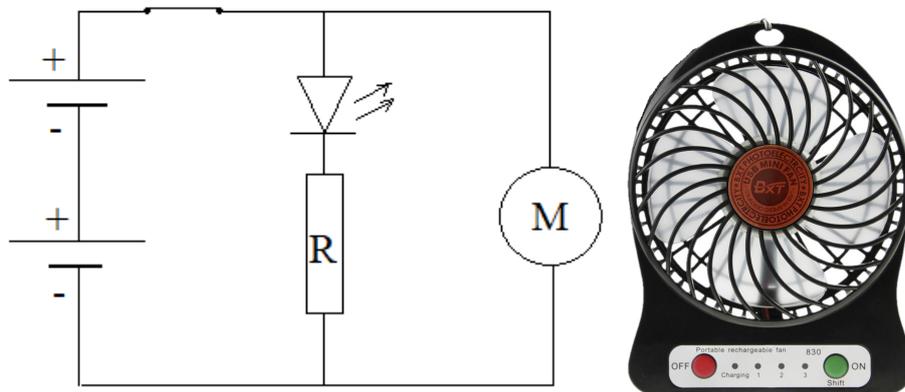


FIGURE 2 – Gauche : schéma du circuit électrique qui modélise le ventilateur ; droite : photographie du ventilateur

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 y est nulle.

Le régime stationnaire est parfois appelé **régime continu** (DC pour "direct current"), ou encore **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").

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 $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la célérité de toute onde électromagnétique dans le vide.

Le signal s en un point M et à un instant t est identique 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** du point S au point M. Prendre en compte cet aspect ondulatoire compliquerait l'étude des circuits électriques, car les grandeurs électriques 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 très faible devant la durée caractéristique τ de ce 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 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 $L = 300 \text{ km}$ 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 $f \sim 10$ MHz, déterminer si on peut l'étudier dans le cadre de l'ARQS.

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

2 Principales grandeurs électriques

Nous adoptons 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.

Dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires, les lois de l'électrocinétiques sont les mêmes qu'en régime continu.

2.1 Charge électrique

La **charge électrique** Q est une propriété fondamentale des particules et des entités chimiques qui constituent la matière. Elle s'exprime en coulomb, de symbole C.

Il s'agit d'une propriété intrinsèque, au même titre que la masse : deux particules de même nature (par exemple, deux électrons) ont toujours la même masse et la même charge, mais elles n'ont pas forcément la même vitesse, qui n'est pas une propriété intrinsèque.

Contrairement à la masse, la charge peut être positive ou négative. Elle est aussi **quantifiée** : il existe une **charge élémentaire**, qui vaut $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, et toute charge qu'on peut isoler en est un multiple entier relatif, de sorte que $Q = N \times e$. Tout comme la masse, la charge électrique 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 ;
- Q_{Na^+} d'un ion sodium Na^+ ;
- $Q_{Fe^{3+}}$ d'un ion ferrique Fe^{3+} ;
- Q_{I^-} d'un ion iodure I^- ;
- $Q_{SO_4^{2-}}$ d'un ion sulfate SO_4^{2-} .

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

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. Dans le cadre de l'ARQS, la charge ne peut pas non plus s'accumuler en un point d'un circuit.

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.

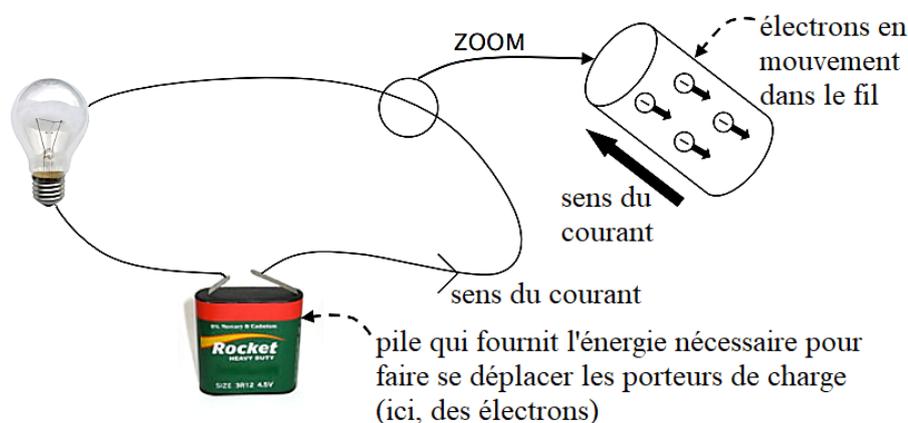


FIGURE 3 – Schéma illustrant le sens conventionnel du courant électrique

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 .	Soit Q la charge électrique traversant, dans un sens choisi, une section S de conducteur pendant la durée Δt .
Le débit volumique moyen est $D_v = \frac{V}{\Delta t}$.	L' intensité moyenne est $i = \frac{Q}{\Delta t}$.

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 ($C \cdot s^{-1}$) :

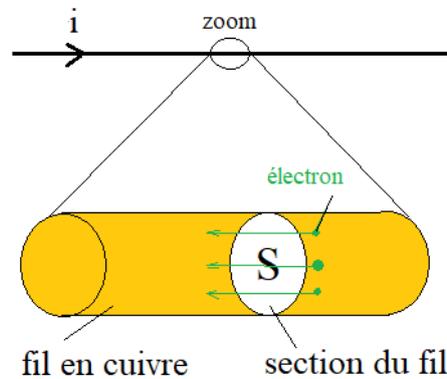
$$1A = 1C \cdot s^{-1}.$$

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 :

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

2.2.2 Intensité algébrique d'un courant

Afin que l'intensité soit définie de façon **algébrique**, ce qui donne l'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 dans ce sens est alors comptée positivement.



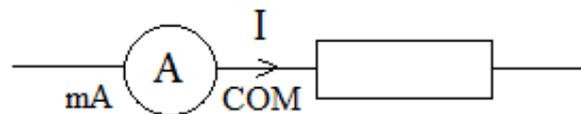
Avec cette convention :

▷ 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) afin qu'il soit traversé par le même courant que lui :



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, symbolisé par un cercle contenant la lettre A, 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 : 10^5 A.

2.2.4 Caractère continu de l'intensité

On notera que malgré la quantification de la charge électrique, l'intensité du courant apparaît comme 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. 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.

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

3. 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 Loi des nœuds

Comme aucune charge ne peut être créée ni disparaître, et que dans le cadre de l'ARQS les charges ne peuvent pas non plus s'accumuler en un point d'un circuit, l'intensité du courant est 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 redistribuée 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 dans un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui sortent du nœud. De façon équivalente, la somme des courants algébriques entrant dans un nœud est nulle :

$$\sum_k \epsilon_k i_k = 0,$$

où on affecte aux courants un coefficient $\epsilon_k = +1$ s'ils entrent dans le nœud et $\epsilon_k = -1$ s'ils sortent du nœud.

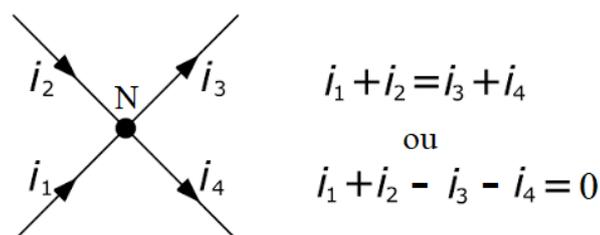
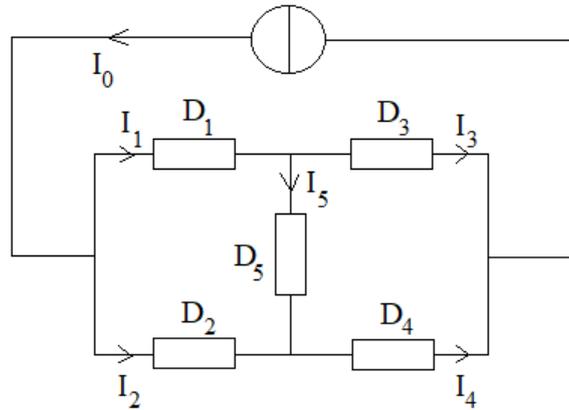


FIGURE 4 – Illustration de la loi des nœuds au niveau du nœud N. Les sens indiqués pour les courants y correspondent à leur sens "réel" : $i_k \geq 0$.

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



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

Calculer les intensités I_2 , I_3 et I_5 .

2.3 Potentiel électrique et tension

2.3.1 Définitions

Le courant électrique décrit le mouvement d'ensemble des charges, mais il n'explique pas pourquoi ce mouvement d'ensemble a lieu.

On peut raisonner encore une fois par analogie avec l'écoulement d'une rivière. Le sens spontané d'écoulement de l'eau se fait des zones de haute altitude (donc de haute énergie potentielle de pesanteur) vers les zones de basse altitude.

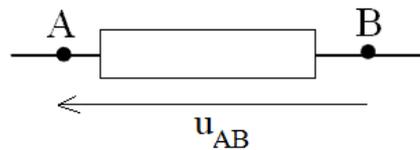
Dans un circuit, il existe des zones de haute énergie potentielle électrique, et d'autres d'énergie potentielle plus faible. Ici, la valeur de l'énergie potentielle dépend du type de charge. On admet qu'on peut définir en chaque point M un **potentiel électrique** V tel que $E_p = qV(M)$ soit l'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q placée au point 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.

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

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

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 u_{AB} pointe de B vers A, alors qu'un vecteur \vec{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 (comme l'énergie potentielle de pesanteur). Seule une différence de potentiel (une tension) peut être mesurée et possède une signification physique. Le choix de l'origine des potentiels est donc 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 de référence des potentiels. Dans la pratique, les générateurs sont reliés à la terre, qui joue alors le rôle de masse, via la prise de terre.

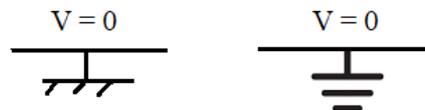
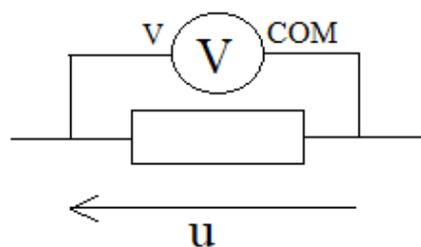


FIGURE 5 – Gauche : symbole de la masse d'un circuit ; droite : symbole de la terre

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 nécessaires sur le schéma. Elles indiquent comment faire les branchements des fils sur les bornes du voltmètre, symbolisé par un cercle contenant la lettre V, 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 : 1 mV
- ▷ potentiel d'action dans un neurone, circuits électroniques : 100 mV ;
- ▷ pile : 1 V ;
- ▷ ligne à haute tension : 1 à 100 kV ;
- ▷ nuage d'orage : jusqu'à 100 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 (dans le cadre du modèle du fil idéal), donc que la tension aux bornes d'un fil est nulle.

Dans une branche d'un circuit, il y a **additivité des tensions** entre les 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 :

$$\sum_k \epsilon_k u_k = 0,$$

où $\epsilon_k = +1$ si la tension est orientée dans le sens positif et $\epsilon_k = -1$ dans le cas contraire.

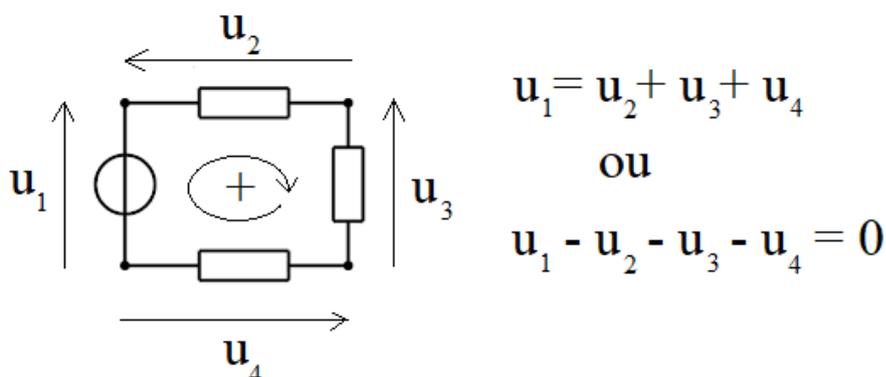
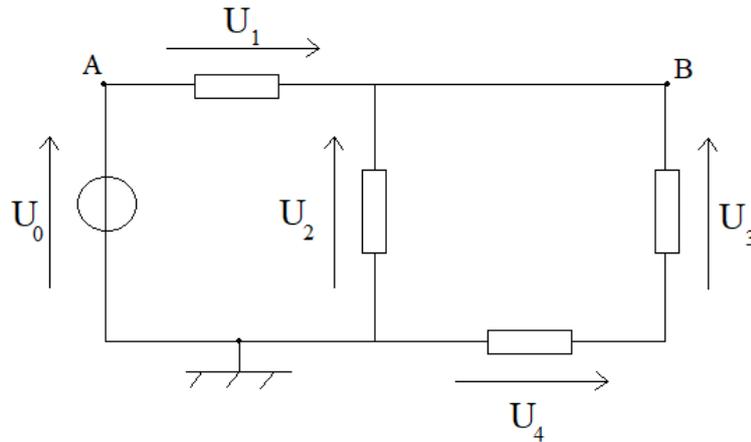


FIGURE 6 – Illustration de la loi des mailles

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

Exercice d'application 6 :
CAPACITÉ TRAVAILLÉE :
Utiliser la loi des mailles.



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

1. Calculer les tensions U_1 et U_4 .
2. Déterminer les potentiels électriques V_A et 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 tension et intensité sont orientées dans le même sens.

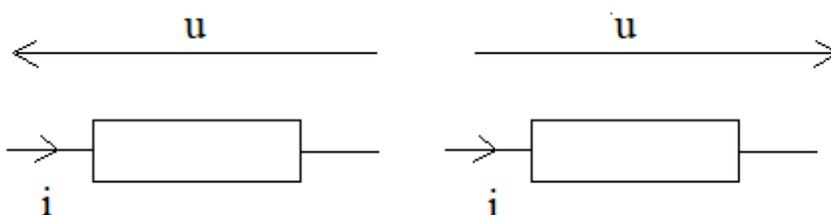


FIGURE 7 – Gauche : convention récepteur ; droite : convention générateur

3.1.2 Caractéristique et relation constitutive d'un dipôle

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

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

Pour l'établir en convention récepteur, il suffit de réaliser le montage schématisé ci-dessous :

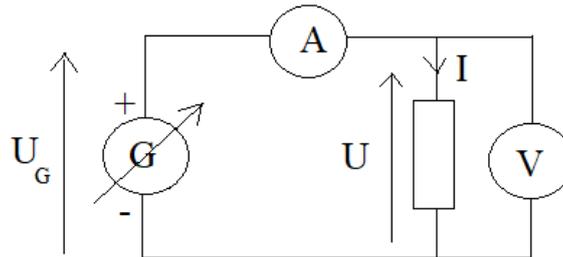


FIGURE 8 – Schéma d'un montage permettant d'établir la caractéristique d'un dipôle, ici en convention récepteur. La flèche qui traverse le symbole du générateur de tension indique que la valeur de la tension U_G qu'il délivre est réglable

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

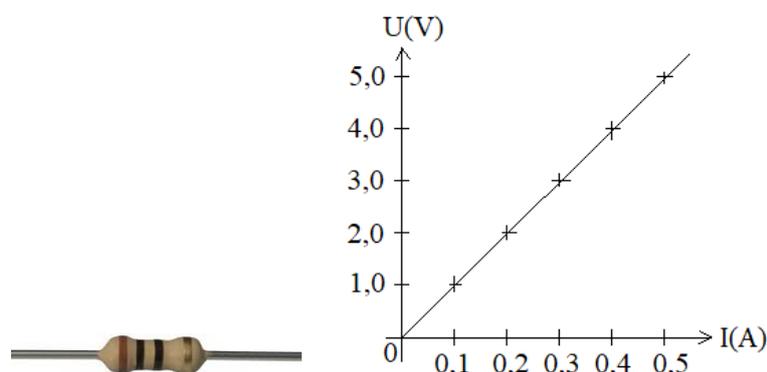


FIGURE 9 – Gauche : dipôle testé ; droite : caractéristique du dipôle en convention récepteur

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 $V \cdot A^{-1}$. On donne un nom à l'unité volt par

ampère : c'est l'ohm, de symbole Ω . Ici, $R = 10\Omega$.

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

$$U = RI,$$

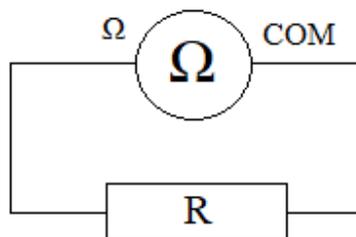
et porte le nom de **loi d'Ohm**. Un dipôle qui la vérifie est qualifié de **dipôle ohmique**, de **résistor**, ou encore de **résistance**. De nombreux dipôles ont un comportement ohmique sur une certaine plage de faibles intensités. C'est le cas en particulier des fusibles dans les disjoncteurs.

La loi d'Ohm reste valable dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires :

$$u = Ri.$$

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 dont on veut mesurer la résistance.



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 :

- ▷ 10 à 100k Ω dans les circuits électroniques ;
- ▷ 1M Ω 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 des mailles, la loi des nœuds et la loi d'Ohm, montrer que :

1. Si on les branche en série, leur association est équivalente à un dipôle ohmique de résistance

$$R_{\text{eq,série}} = R_1 + R_2.$$

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

$$\frac{1}{R_{\text{eq,parallèle}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

ou encore

$$G_{\text{eq,parallèle}} = G_1 + G_2,$$

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

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

3.2.3 Ponts diviseurs de tension et de courant

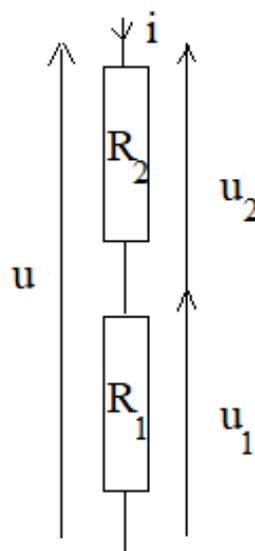
Afin de ne pas systématiquement utiliser la loi des mailles et la loi des nœuds, on établit des relations utiles, dites de **ponts diviseurs**, qui permettent de calculer rapidement une tension ou une intensité en reconnaissant des configurations expérimentales particulières.

Exercice d'application 8 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

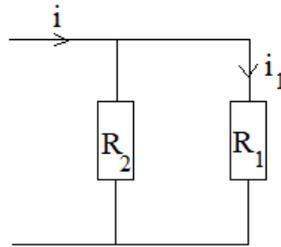
Établir et exploiter les relations de diviseurs de tension ou de courant.

1. On rencontre souvent, en pratique, la configuration suivante appelée **pont diviseur de tension** :



Déterminer l'expression de la tension u_1 en fonction de u , R_1 et R_2 .

2. On rencontre aussi très souvent la configuration suivante, appelée **pont diviseur de courant** :



Déterminer l'expression de la tension i_1 en fonction de i , G_1 et G_2 .

3.3 Modèle du générateur de Thévenin



Il existe plusieurs façons de représenter un générateur de tension continue, une pile ou une batterie sur les schémas.

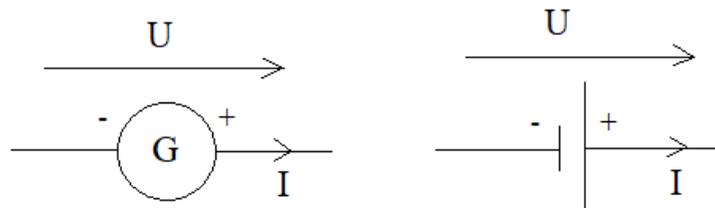


FIGURE 10 – Symboles d'un générateur de tension en convention générateur

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.

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.

La tension à ses bornes, constante, 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.

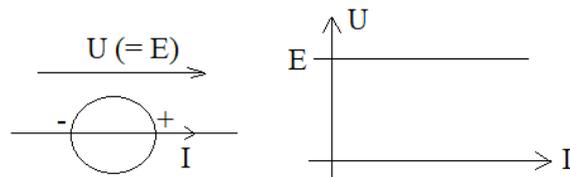
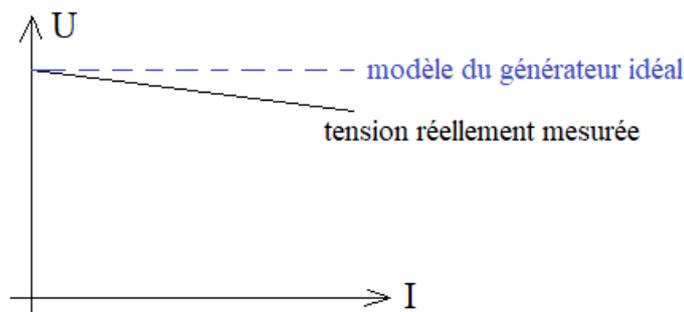


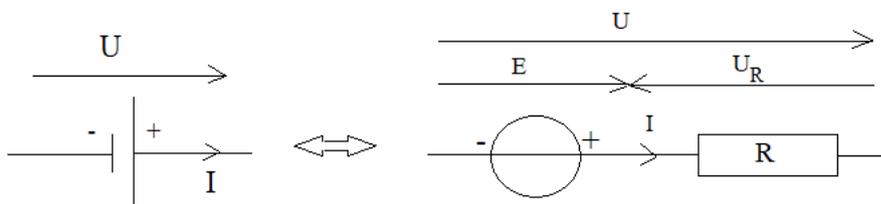
FIGURE 11 – Symbole et caractéristique d'un générateur de tension idéal

Toutefois, la majorité des générateurs de tension réels ont une caractéristique qui ressemble certes à celle d'un générateur idéal, mais ne lui est pas exactement identique. On constate expérimentalement qu'au lieu d'être une fonction constante de la variable intensité, la tension en est une fonction affine, 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 (source de tension) et d'un dipôle ohmique. Cette association est appelée **modèle de Thévenin** d'un générateur.



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

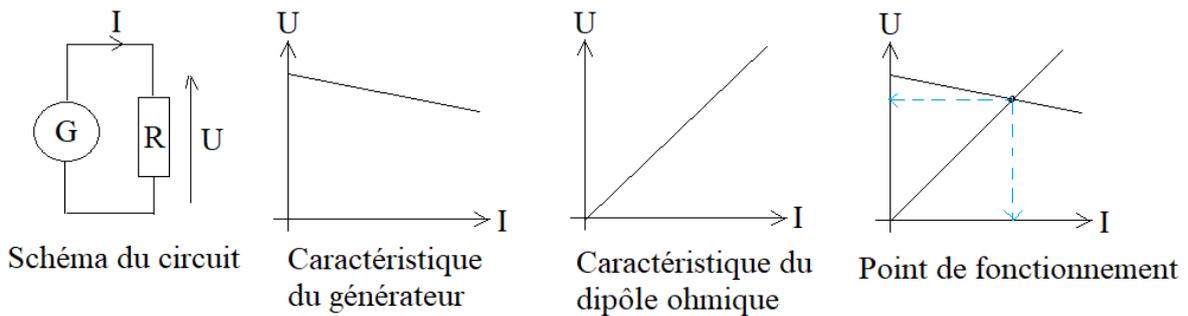
Un **fil idéal** a une tension nulle à ses bornes, quelle que soit l'intensité du courant qui le traverse.

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.

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, où on a connecté un générateur de tension et un dipôle ohmique :



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

$$1W = 1V \cdot A.$$

En convention récepteur, la puissance définie plus haut est la **puissance 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 la **puissance fournie** par le dipôle au reste du circuit. 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 :

$$p_J = Ri^2 = \frac{u^2}{R}.$$

L'effet Joule est souvent gênant en électronique ou en électrotechnique, car il a tendance à faire chauffer les installations et à dégrader leurs performances, ce qui oblige à mettre en place un système de refroidissement potentiellement 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 12 – De gauche à droite : 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)