

Circuits électriques dans l'ARQS

7

L'électrocinétique concerne l'étude du mouvement de particules chargées dans la matière. Dans ce chapitre, on définit les notions fondamentales comme le courant et la tension et on précise les lois générales de l'électricité, dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires.

1 Intensité du courant électrique

1.1 Charge électrique

Certains corps sont susceptibles d'accepter ou de perdre des particules chargées : on dit qu'ils s'électrisent. On peut citer :

- le verre qui, frotté avec de la soie, perd des électrons,
- l'ébonite ou l'ambre qui, frottés avec une fourrure, acquièrent des électrons.

L'électrisation obéit à plusieurs lois qualitatives :

- les corps électrisés exercent des actions mécaniques : ils attirent par exemple des objets légers comme des petits bouts de papier (c'est ce type d'expériences, mettant en évidence l'électrisation des corps, qui a permis la découverte de l'électricité dès l'Antiquité),
- l'électrisation peut se transférer d'un corps à un autre,
- il existe deux types d'électrisation qui seront qualifiés conventionnellement de positive et de négative,
- deux corps de même type d'électrisation se repoussent, tandis que deux corps de type différent d'électrisation s'attirent,
- tout corps électrisé peut attirer un corps non électrisé.

Ces résultats expérimentaux s'interprètent par la notion de charge électrique obtenue grâce aux travaux de Coulomb¹ de 1785 et à la découverte de l'électron en 1881 par Thomson².

1. Charles-Augustin Coulomb, 1736 – 1806, ingénieur français, célèbre pour ses lois du frottement en mécanique et ses expériences sur la force exercée entre charges électriques.

2. Sir Joseph John Thomson, 1856 – 1940, physicien anglais qui découvrit l'électron et inventa la spectrométrie de masse. Il reçut le prix Nobel de Physique en 1906.

La **charge électrique** est une grandeur scalaire positive ou négative vérifiant les propriétés suivantes.

- Elle peut exister sous deux formes qu'on qualifie de positive et de négative. Le choix de l'électron comme porteur d'une charge négative est purement conventionnel, mais admis de tous. Une charge sera donc positive si elle est attirée par un électron et négative si elle est repoussée par ce dernier. Ceci permet de satisfaire les phénomènes d'attraction et de répulsion observés expérimentalement.
- La charge électrique est une grandeur **additive** dans la même acceptation que celle qui sera adoptée en thermodynamique : la charge ne dépend que de l'état du système et elle est égale à la somme algébrique des charges élémentaires qui la constituent. On peut formuler cette définition en considérant un système formé de l'association de deux sous-systèmes, l'un de charge électrique q_1 , l'autre de charge électrique q_2 . La charge totale q du système est $q = q_1 + q_2$.
- La charge électrique est une grandeur **conservative** au sens où la charge électrique totale d'un système isolé est constante au cours du temps. Les variations de la charge d'un système ne sont donc dues qu'aux échanges avec l'extérieur. Pour un système isolé, il n'y a ni création ni disparition de charges, sa charge électrique ne varie pas.
- La charge électrique se mesure en coulomb, unité de symbole C.
- Les lois de l'électrolyse découvertes par Michael Faraday (1791-1862) s'interprètent par l'existence d'une charge électrique élémentaire notée $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. L'ensemble des expériences qui ont été réalisées à ce jour indique que toute charge électrique rencontrée dans la nature est un multiple entier de cette charge, ce qui justifie le fait de parler de charge élémentaire : $q = \pm Ze$ avec $Z \in \mathbb{Z}$. On introduit ainsi la notion de quantification de la charge électrique : celle-ci ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs qui sont les multiples de la charge élémentaire. Cette idée de la quantification de la charge électrique est apparue lors de la découverte de la structure de l'atome. La charge élémentaire joue donc le rôle de quantum pour les charges électriques.
- Le fait d'attribuer un signe + ou un signe - à une charge ou à un porteur de charge est une pure convention mais il est important de s'y conformer afin que tout le monde parle le même langage.

1.2 Porteurs de charges

a) Rappel sur les atomes

La matière est constituée d'atomes qui sont formés :

- d'un noyau comportant :
 - des neutrons, particules non chargées, de masse $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg,
 - des protons, particules chargées positivement par convention, leur charge étant la valeur de la charge élémentaire $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C et de masse $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg,
- d'un cortège électronique constitué d'électrons qui sont des particules chargées négativement par convention, dont la charge est en valeur absolue la charge élémentaire $q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C et de masse $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg.

Les atomes sont électriquement neutres : leur charge totale est nulle et il y a donc autant de protons que d'électrons dans les atomes.

b) Conduction métallique

Les métaux sont des empilements réguliers d'atomes. La conduction métallique est liée à l'existence d'**électrons libres** ou **électrons de conduction**. En moyenne, un atome du métal conducteur comme le cuivre libère un électron de conduction. Ce dernier peut se déplacer au sein du métal entre les différents atomes : il n'est pas lié à un atome d'où le nom de libre qui lui est donné.

c) Solutions électrolytiques

On s'intéresse en particulier à la conduction dans des solutions, par exemple aqueuses. Les porteurs de charge sont dans ce cas les ions. Les atomes décrits précédemment peuvent céder ou gagner des électrons : on parle d'ionisation de l'atome. Les ions ainsi obtenus ont donc par définition une charge non nulle contrairement aux atomes. On distingue deux types d'ions en fonction du signe de leur charge totale :

- les cations qui ont une charge positive, ce qui correspond à une perte d'électrons, par exemple H_3O^+ ,
- les anions qui ont une charge négative, ce qui correspond à un gain d'électrons, par exemple $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$.

La charge des ions est un multiple de la charge élémentaire suivant le nombre d'électrons qui ont été gagnés ou cédés. Il convient de noter que la matière est globalement neutre conformément au principe de conservation de la charge. Le phénomène d'ionisation correspond à une modification de la répartition des charges mais il n'y a ni apparition ni disparition de charges.

Dans tous les cas :

La charge électrique d'un électron, d'un proton, d'un atome ou d'une molécule est **quantifiée**. Elle est un multiple entier relatif de la charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

1.3 Le courant électrique

a) Définition

Le **courant électrique** est un déplacement de charges.

On prend l'exemple d'une solution de sel de cuisine NaCl , dissocié en Na^+ et Cl^- en solution aqueuse. Si on la soumet à un dispositif qui met en mouvement les charges, par exemple un champ électrique entre deux électrodes, comme le montre la figure 7.1, on observe que les charges positives et les charges négatives se déplacent en sens opposé. L'ensemble du mouvement des charges de signes opposés forment le courant électrique. On convient du sens conventionnel suivant :

Le sens du courant est conventionnellement le sens de déplacement des charges positives.

Dans le cas de la conduction métallique (voir figure 7.2), assurée par des électrons, ceux-ci bougent dans le sens opposé à celui du courant.

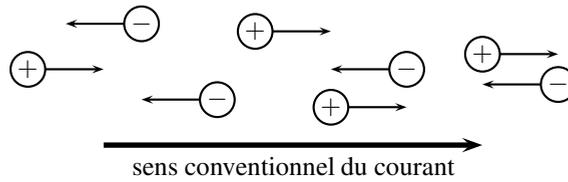


Figure 7.1 – Déplacement de quelques charges et sens conventionnel du courant.

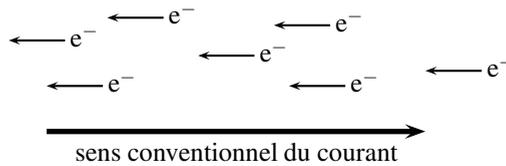


Figure 7.2 – Déplacement des électrons et sens conventionnel du courant.

b) Le courant, grandeur algébrique

Dans un fil électrique, les charges peuvent se déplacer dans les deux sens. On choisit donc, arbitrairement, un sens positif pour le courant. Si celui-ci se déplace dans le sens positif, alors le courant est positif, s'il se déplace dans l'autre sens, alors il est négatif. Ce sens positif arbitraire est signalé par une flèche sur le fil électrique :



Figure 7.3 – Sens arbitraire positif du courant.

1.4 Intensité du courant

On peut développer une analogie hydraulique de l'intensité du courant. Soit un fleuve, de débit D , exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, qui représente le volume qui traverse une section du fleuve par unité de temps. Ce débit est le rapport entre le volume ΔV d'eau qui traverse une section S de référence pendant la durée Δt , et cette durée Δt , comme le montre la figure 7.4 :

$$D = \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

On considère de même un fil conducteur et une section S de référence. La charge qui traverse cette section S pendant la durée Δt est notée Δq . On définit alors l'**intensité** I d'un courant permanent, c'est-à-dire invariable dans le temps, par :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

C'est le débit de charge dans le fil. La formule ci-dessus donne le débit moyen sur la durée Δt . Dans le cas où le courant varie dans le temps, pour avoir l'intensité instantanée i on considère une durée dt infiniment petite et la charge écoulee dq est également infiniment

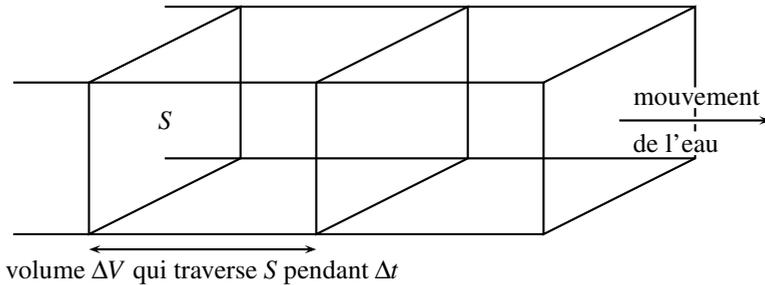


Figure 7.4 – Analogie hydraulique de l'intensité du courant.

petite. L'intensité instantanée se définit alors par :

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

1.5 Mesure de l'intensité d'un courant

L'intensité d'un courant se mesure avec un **ampèremètre**. Il ne s'agit pas ici de développer la technologie des ampèremètres, mais plus simplement d'indiquer leur branchement.

L'ampèremètre doit compter la charge qui traverse une section d'un fil en cours du temps. Pour cela, on le branche en série sur le fil dont on souhaite mesurer l'intensité du courant. L'ampèremètre est symbolisé par un \textcircled{A} . De la même manière que le débit hydraulique à travers un tuyau, sans fuite, est une constante, l'intensité d'un courant dans un fil unique reste constante, quelque soit la position dans le fil.

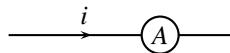


Figure 7.5 – Branchement d'un ampèremètre.

L'intensité du courant se mesure en ampère³, unité de symbole A : $1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$.

Quel est l'ordre de grandeur de l'intensité i du courant ? Elle est très variable. On définit les domaines de :

- l'électronique signal, où les intensités des courants sont de l'ordre de grandeur du mA. Cette électronique est celle des ordinateurs ou des téléphones portables.
- l'électrotechnique, où les courants peuvent atteindre 10^3 A . Citons dans ce cas les moteurs électriques des TGV (500 à 10^3 A) ou la consommation électrique d'usine.
- les phénomènes naturels, par exemples les éclairs d'orages où l'intensité du courant peut atteindre $50 \cdot 10^3 \text{ A}$, pendant une durée très brève.

3. en l'honneur d'André-Marie Ampère, 1775 – 1836, chimiste, mathématicien et physicien français. Il introduisit l'usage des mathématiques en physique et contribua au développement de l'électromagnétisme. Il fait partie des 72 scientifiques français des XVIII^e et XIX^e siècles dont le nom est inscrit en lettres d'or au premier étage de la tour Eiffel, à Paris.

1.6 Loi des nœuds

On considère un embranchement électrique, par exemple celui réalisé par une prise multiple, où un fil se sépare en deux. Cet embranchement est nommé **nœud** en électricité.

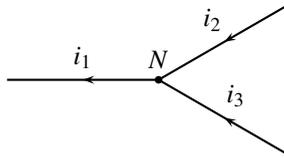


Figure 7.6 – Nœud en électricité.

On oriente les courants des trois fils dans les sens positifs de la figure 1.6. Pendant la durée dt , une charge dq_2 traverse une section du fil 2 et une charge dq_3 une section du fil 3. Alors, les fils électriques ne stockant aucune charge, une charge $dq_2 + dq_3$ doit passer pendant la même durée dans le fil 1, c'est-à-dire :

$$dq_2 + dq_3 = dq_1.$$

En divisant par la durée dt :

$$i_2 + i_3 = i_1.$$

Ce résultat constitue la loi des nœuds. Elle est analogue à la conservation du débit lorsque deux cours d'eau se rejoignent : le débit en aval du confluent est la somme des deux débits en amont.

Un nœud est un embranchement électrique entre plusieurs fils. La **loi des nœuds** stipule qu'en un nœud électrique, la somme des intensités des courants entrant est égale à la somme des intensités des courants sortant du nœud.

Dans un schéma électrique, un nœud est représenté par un point épais.

1.7 Intensité constante, intensité variable

L'intensité d'un courant peut être constante ou dépendre du temps, par exemple avec une loi harmonique $i(t) = I_0 \cos(\omega t)$. Il est d'usage de noter une intensité constante avec une lettre majuscule I , et une intensité variable en fonction du temps avec une lettre minuscule i .

L'usage consacre la lettre majuscule I pour des intensités constantes et la minuscule i pour des intensités variables dans le temps.

2 Tension électrique

2.1 Analogie hydraulique

Le courant électrique dans un fil est analogue à un courant d'eau dans un tuyau. Ce courant d'eau entre deux récipients n'existe spontanément que s'il existe une différence de niveau

entre les deux surfaces. Par exemple, dans la figure 7.7 (à gauche), le récipient A se vide spontanément dans le B ; on observe alors un débit d'eau D dans le tuyau qui les relie.

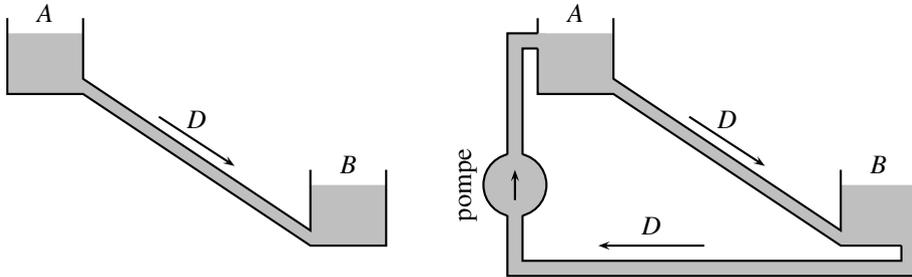


Figure 7.7 – Analogie hydraulique : courant d'eau spontané (à gauche), mouvement entretenu (à droite).

Toutefois, le récipient A finit par se vider complètement. Pour entretenir le mouvement d'eau, il faut fermer le circuit et ajouter une pompe qui assure le débit de fluide. Un générateur hydraulique impose le débit d'eau.

Un circuit électrique fonctionne de la même façon. Un générateur électrique assure le débit de charge, c'est-à-dire la circulation d'un courant électrique, à travers un récepteur électrique, par exemple une lampe, comprise entre les points A et B, comme le montre la figure 7.8.

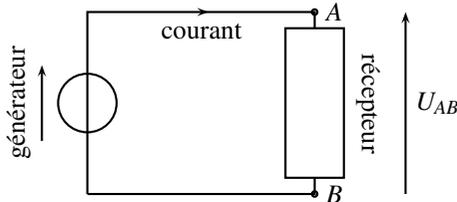


Figure 7.8 – Notion de circuit électrique.

La flèche à côté du générateur indique dans quel sens celui-ci fait circuler le courant électrique. C'est ce qui s'appelle, dans la suite, la convention générateur.

2.2 Notion de tension

Comme le montre la figure 7.8, un courant circule du point A vers le point B, à travers le récepteur. On dit alors qu'il existe une tension électrique entre le point A et le point B, notée U_{AB} . Cette tension est représentée sur le schéma par une flèche qui part de B et pointe vers A. On observe une tension entre deux points d'un circuit si un courant le traverse. Un générateur électrique permet de maintenir des tensions dans le circuit, afin d'imposer la circulation d'un courant électrique.

La **tension** U_{AB} est représentée par une flèche qui part de B et pointe vers A.



Attention à ne pas intervertir la direction de la flèche qui symbolise la tension U_{AB} .

2.3 Mesure d'une tension

La tension entre deux points se mesure avec un **voltmètre**⁴. Il ne s'agit pas ici de développer la technologie des voltmètres, mais plus simplement d'indiquer leur branchement.

Le voltmètre mesure la tension entre deux points, il doit donc être relié à ces deux points. De plus, il ne doit pas perturber le circuit, c'est-à-dire ne pas prélever de courant. Par construction, un voltmètre n'est traversé par aucun courant, d'où le 0 sur la figure 7.9 qui explique que le courant qui y passe est bien nul.

Le voltmètre est symbolisé par un \textcircled{V} . Il mesure la tension U_{AB} sur la figure suivante.

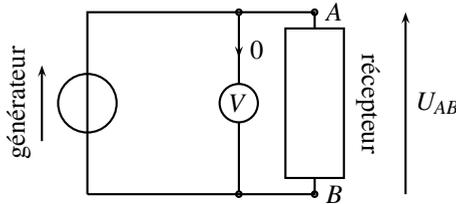


Figure 7.9 – Branchement d'un voltmètre.

Une tension s'exprime en volt, unité de symbole V.

Quel est l'ordre de grandeur d'une tension ? Elle est très variable. On peut citer :

- la tension entre les extrémités d'un éclair lors d'un orage, jusqu'à 500 MV,
- la tension domestique délivrée par EDF, 230 V,
- la tension dans les circuits d'un téléphone portable, quelques mV à quelques centaines de mV.

2.4 Tension constante, tension variable

Une tension peut être constante ou dépendre du temps, par exemple avec une loi harmonique $u(t) = u_0 \cos(\omega t)$. Il est d'usage de noter une tension constante avec une lettre majuscule U , et une tension variable en fonction du temps avec une lettre minuscule u .

L'usage consacre la lettre majuscule U pour des tensions constantes et la minuscule u pour des tensions variables dans le temps.

2.5 Différence de potentiel et tension

Sur la figure 7.10 suivante, la pompe permet de maintenir constantes les hauteurs d'eau z_A et z_B en régime permanent. La pompe impose la différence d'altitude $h_{AB} = z_A - z_B$. De même, le générateur impose la tension U_{AB} . Par analogie, on définit le **potentiel électrique** d'un point, noté V_A pour le point A, V_B pour le point B, par :

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

4. En l'honneur d'Alessandro Volta, 1745 – 1827, physicien italien dont les travaux portèrent sur l'électricité et qui inventa la première pile.

La tension électrique est alors identique à une différence de potentiel. Le potentiel a donc la même unité que la tension, le volt.

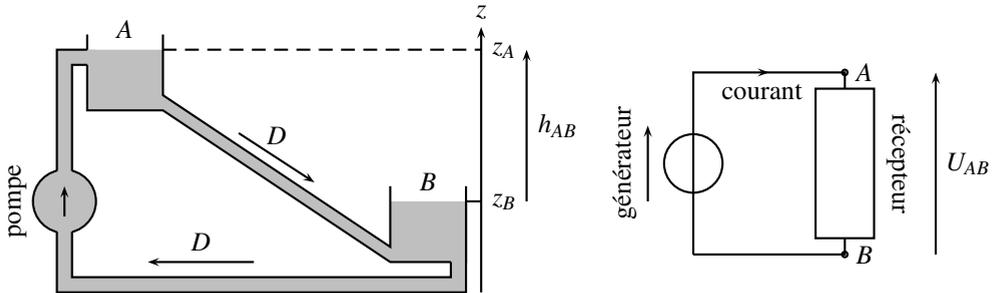


Figure 7.10 – Analogie hydraulique et différence de potentiel.

Une tension U_{AB} est égale à une différence de potentiel : $U_{AB} = V_A - V_B$. Le potentiel V en un point s'exprime en volts.



Attention à ne pas intervertir les indices dans la formule $U_{AB} = V_A - V_B$.

Comme pour l'intensité du courant ou la tension, un potentiel constant est noté avec la majuscule V , alors qu'un potentiel variable dans le temps est noté avec la minuscule v .

2.6 Référence de potentiel

Par définition, une tension est égale à une différence de potentiel. Comme on a :

$$U_{AB} = V_A - V_B = (V_A - C) - (V_B - C),$$

quelque soit la valeur de la constante C , le potentiel est défini à une constante additive près. Ceci permet de décider que le potentiel d'un nœud particulier est nul. Ce nœud est appelé **masse**.

La masse est le point de potentiel nul. Sa position est un choix arbitraire.

Ce choix arbitraire de la masse est noté sur un circuit par des hachures penchées :

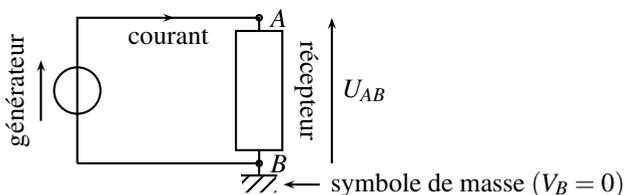


Figure 7.11 – Masse d'un circuit.

2.7 Additivité des tensions, loi des mailles

Considérons le circuit électrique de la figure suivante. Il est constitué d'une **maille**, c'est-à-dire une boucle sans embranchement parcourue par un courant. Cette maille est constituée d'un générateur et de deux récepteurs. Chaque récepteur est soumis à une tension, ou différence de potentiel, U_{AB} ou U_{BC} .

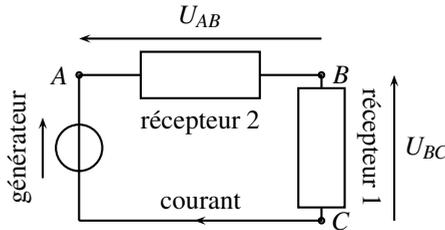


Figure 7.12 – Loi d'additivité des tensions.

Que vaut la tension U_{AC} aux bornes des deux récepteurs pris dans leur ensemble ? La réponse est évidente avec la définition de différence de potentiel :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_A - V_B \\ U_{BC} = V_B - V_C \end{cases} \text{ donc } U_{AB} + U_{BC} = V_A - V_B + V_B - V_C = V_A - V_C = U_{AC}.$$

C'est la loi d'additivité des tensions qui est analogue à la relation de Chasles des vecteurs.

La loi d'additivité des tensions stipule que : $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$.

On en déduit immédiatement que $U_{AB} = -U_{BA}$ ainsi que :

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} \text{ soit } U_{DA} + U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = 0.$$

La loi des mailles stipule que : $U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$.

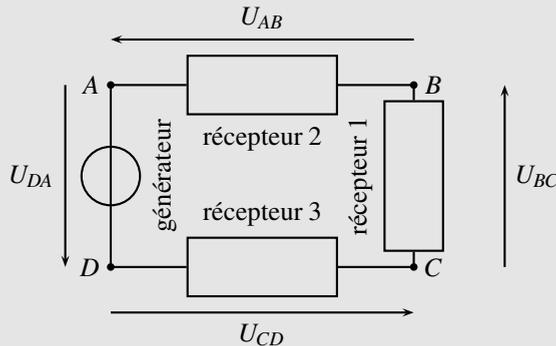


Figure 7.13 – Loi des mailles.

2.8 Notation simplifiée de la tension

Dans la notation U_{AB} , les indices expliquent clairement les deux points entre lesquels on considère la tension. Il s'agit d'un usage, lorsqu'un schéma électrique est dessiné, d'omettre ces indices. En effet, la représentation de la tension sous forme d'une flèche permet sans ambiguïté de visualiser les deux potentiels qu'on soustrait.

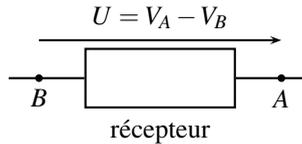


Figure 7.14 – Notation simplifiée, sans indice, d'une tension.



Attention à ne pas intervertir les potentiels. Une tension, symbolisée par une flèche, est le potentiel du bout de la flèche, moins celui de la base de la flèche.

3 Circuit électrique

3.1 Circuit fermé

Un circuit électrique associe toujours un élément actif, ou générateur, qui délivre un certain courant ou une certaine tension, et un élément passif, ou récepteur, qui les utilise. Par exemple pour une lampe, le générateur est l'alimentation EDF et le récepteur la lampe ; pour un téléphone portable, le générateur est l'accumulateur et le récepteur toute l'électronique du téléphone.

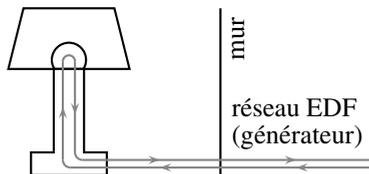


Figure 7.15 – Circuit électrique d'une lampe : en gris, le cheminement du courant électrique.

Un point important doit être souligné :

Un circuit électrique est un circuit **fermé**. Le générateur met en mouvement le courant, qui passe à travers le récepteur pour revenir dans le générateur.

C'est la raison pour laquelle les fils électriques possèdent deux fils côte-à-côte, et que les prises électriques présentent deux fiches. Une fiche sert à conduire le courant vers le récepteur, l'autre à le ramener vers le générateur. Expérimentalement, une fiche EDF, nommée **phase**, est au potentiel de 240 V, l'autre, nommée **neutre**, est au potentiel nul, c'est la masse.

3.2 Schéma électrique simplifié

Un circuit électrique est électriquement fermé. Ce point est toujours vérifié, à tel point qu'il est possible de ne pas le dessiner sur un schéma électrique, comme le montre la figure suivante :

- la générateur n'est représenté que par la tension qu'il impose,
- les tensions sont mesurée par rapport à une masse arbitrairement choisie,
- le circuit se boucle par un fil non représenté.

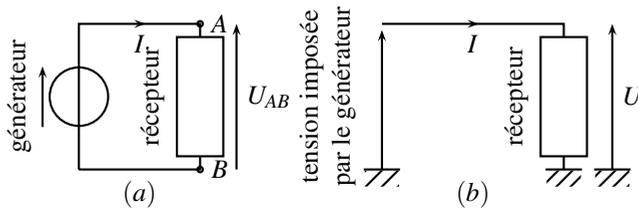


Figure 7.16 – Simplification d'un circuit électrique, (a) schéma réel, (b) schéma simplifié.

3.3 La terre

Certaines prises possèdent, outre la phase et le neutre, une troisième fiche métallique apparente, nommée la **terre**. Elle est directement reliée à un conducteur métallique planté dans le sol. Cette prise de terre est obligatoire dans le cas d'équipement comportant une carcasse métallique, comme une machine à laver par exemple.

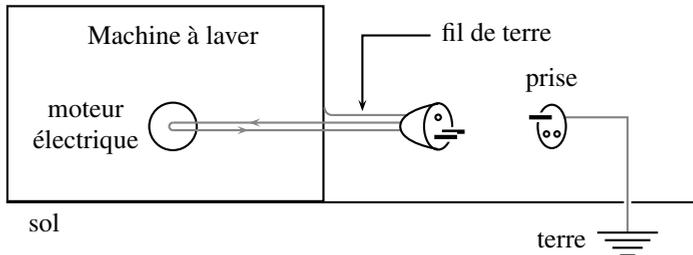


Figure 7.17 – Branchement d'une prise de terre.

La prise de terre est reliée à la carcasse métallique. Sans elle, en cas de faux contact, l'enveloppe de l'appareil peut être portée au potentiel de la phase, et électrocuter un utilisateur qui la toucherait. Avec la prise de terre, la carcasse reste au potentiel de la terre. Les pieds et la main de l'utilisateur qui touche l'appareil, sont au même potentiel ; donc il ne court aucun danger.

3.4 Convention générateur, convention récepteur

Le sens des tensions et des courants sont liés en ce qui concerne les générateurs, qui font circuler le courant, et les récepteurs (appelés parfois charges) qui l'utilisent pour fonctionner.

Dans le circuit suivant, le générateur impose une tension U_{AB} . On observe que cette tension et le courant sont dans la même direction pour le générateur, alors qu'ils sont de sens opposés dans le cas du récepteur. Cette observation correspond aux conventions générateur et récepteur.

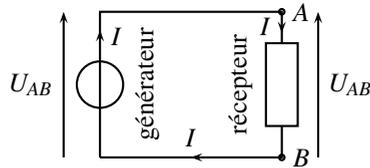
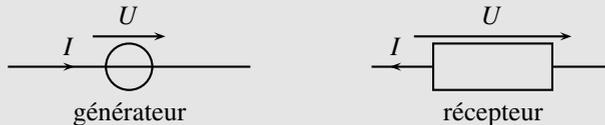


Figure 7.18 – Convention générateur ou récepteur.

La **convention générateur** stipule que pour un générateur, les orientations conventionnellement positives de la tension et du courant sont dans le même sens.



La **convention récepteur** stipule que pour un récepteur, les orientations conventionnellement positives de la tension et du courant sont dans des sens opposés.

3.5 L'approximation des régimes quasi-stationnaires

Lorsqu'on allume un interrupteur, le courant électrique ne traverse pas immédiatement la lampe. Il existe un délai de propagation qui est égal à environ $\frac{L}{c}$, où L est la longueur du fil entre l'interrupteur et la lampe et c la vitesse de la lumière dans le vide. Quel est l'ordre de grandeur ? Avec $L = 10$ m, $c = 3.10^8$ m.s⁻¹, on trouve $\frac{L}{c} = 3,3.10^{-7}$ s, ce qui est négligeable par rapport à l'échelle de temps de variation du courant 50 Hz : $T = \frac{1}{f} = 2.10^{-2}$ s.

Pour une antenne FM, de longueur $L = 1$ m, alimentée par un courant de fréquence $f = 100$ MHz, $\frac{L}{c} = 3,3.10^{-9}$ s, qui n'est pas négligeable devant $T = \frac{1}{f} = 10^{-8}$ s. Dans ce cas, quand l'intensité varie en un bout de l'antenne, elle n'a pas encore varié à l'autre bout. L'**approximation des régimes quasi-stationnaire**, ou **ARQS**, est vérifiée dès que tous les points d'un circuit sont « immédiatement » au courant des variations de la source, c'est-à-dire que la durée de propagation du signal est négligeable devant le temps caractéristique de variation de la source :

$$\Delta t \ll T, \quad \text{donc} \quad L \ll cT.$$

Exemple

L'ARQS est-elle vérifiée pour une ligne à haute tension EDF, d'une longueur $L = 300$ km, qui sépare une centrale électrique d'un particulier ? Le temps caractéristique de variation de la tension est l'inverse de la fréquence EDF $f = 50$ Hz :

$$L = 300 \text{ km} \ll cT = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^3 \text{ km} : \text{ARQS vérifiée.}$$

De même, pour un circuit électronique, de taille caractéristique $L = 10$ cm, qui travaille à 10 MHz :

$$L = 10^{-1} \text{ m} \ll cT = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^7} = 30 \text{ m} : \text{ARQS vérifiée.}$$

Dans l'ARQS, toute variation de la source se répercute immédiatement à tous les points du circuit.

Si, par exemple, on débranche la source, le récepteur s'arrête immédiatement de fonctionner. De même, dès qu'on branche un générateur, tous les points d'un même fil sont immédiatement au même potentiel ; c'est la raison pour laquelle, sur la figure 7.18, la tension aux bornes du générateur est la même qu'aux bornes du récepteur.

4 Dipôles

4.1 Définition

En électricité, un dipôle est tout élément qui possède deux bornes. Le courant entre par une borne et sort par l'autre.

4.2 Dipôles passifs

Un **dipôle passif** est un dipôle qui ne peut pas créer lui-même du courant. S'il n'est soumis à aucune tension, aucun courant ne le traverse. Sa loi courant-tension, c'est-à-dire le graphe du courant qui le traverse en fonction de la tension à ses bornes, passe par l'origine ($I = 0, U = 0$).

Il existe de nombreux dipôles passifs. Les trois suivants sont les plus utilisés, car ils permettent de modéliser le comportement des autres dipôles.

a) La résistance

C'est le dipôle passif le plus simple, où la tension appliquée est proportionnelle à l'intensité du courant qui la traverse. La constante de proportionnalité est nommée **résistance** et notée R . La résistance s'exprime en **ohm**⁵, unité dont le symbole est la lettre grecque oméga majuscule Ω . Une résistance est symbolisée par un rectangle dans les schémas électriques.

5. En l'honneur de Georg Ohm, 1789 – 1854, physicien allemand dont les travaux portèrent sur l'électrocinétique et qui formula la loi d'Ohm.

Les valeurs numériques des résistances sont très variables, de quelques Ω à plus de $10^7 \Omega$. Une résistance « moyenne » en électronique est de l'ordre de $1000 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$.

La loi de la résistance est $U = RI$, ou $u = Ri$ si le courant et la tension dépendent du temps. Cette loi est nommée **loi d'Ohm**.

La loi d'Ohm est la loi qui relie la tension aux bornes d'une résistance et l'intensité du courant qui la traverse. Avec R la valeur de la résistance du dipôle, qui s'exprime en Ω :

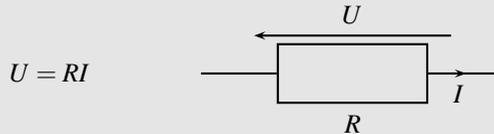


Figure 7.19 – Résistance en convention récepteur.

b) Le condensateur

Les condensateurs sont des dipôles indispensables dans presque tous les circuits électriques en régime variable, c'est-à-dire pour toutes les applications qui dépendent du temps. Elles sont innombrables, comme dans un téléphone portable ou un ordinateur.

L'intensité du courant qui traverse un condensateur est proportionnelle à la variation de la tension à ses bornes. La constante de proportionnalité est nommée **capacité** et notée C . Ainsi :

$$i = C \frac{du}{dt}.$$

La capacité d'un condensateur s'exprime en **farad**, unité de symbole F. Les valeurs numériques des capacités sont très variables. Le farad est une unité énorme ; les valeurs les plus utilisées vont du pF (picofarad) au mF (millifarad).

Un condensateur est créé grâce à deux surfaces métalliques en regard, éventuellement enroulées. Le schéma électrique d'un condensateur rappelle cette technologie de base.

La tension aux bornes d'un condensateur et l'intensité du courant qui le traverse sont reliés par la loi :

$$i = C \frac{du}{dt},$$

où C est la capacité du condensateur, exprimée en farad F.

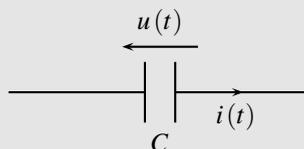


Figure 7.20 – Condensateur en convention récepteur.

c) La bobine

Les bobines sont des dipôles indispensables dans les applications de forte puissance (moteur de TGV par exemple). En traitement du signal, on préfère les simuler avec des circuits électroniques adéquats, beaucoup plus facilement miniaturisables.

La tension aux bornes d'une bobine est proportionnelle à la variation de l'intensité du courant qui la traverse. La constante de proportionnalité est nommée **inductance** et notée L . Ainsi :

$$u = L \frac{di}{dt}$$

L'unité d'inductance est le **henry**, de symbole H. Les valeurs numériques des inductances varient du mH (millihenry) au henry.

Une bobine est créée grâce à un fil électrique enroulé. Le schéma électrique d'un condensateur rappelle cette technologie de base.

La tension aux bornes d'un condensateur et l'intensité du courant qui le traverse sont reliés par la loi :

$$u = L \frac{di}{dt}$$

où L est l'inductance de la bobine, exprimée en henry H.

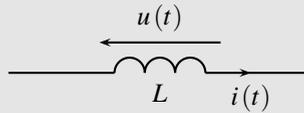


Figure 7.21 – Bobine en convention récepteur.

4.3 Dipôles actifs

Un **dipôle actif** est un dipôle qui permet le passage d'un courant dans le circuit. Il a une fonction génératrice, il génère le déplacement des électrons dans le circuit, on le nomme **générateur**.

Un **générateur idéal de tension** impose une tension U_0 , quel que soit le courant qui le traverse. La tension imposée est nommée tension du générateur ou force électromotrice. Un tel générateur est représenté dans un schéma électrique par un cercle traversé par le fil électrique.

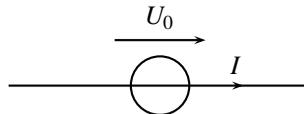


Figure 7.22 – Générateur idéal de tension.

Toutefois, quand on relève expérimentalement la loi courant-tension d'un générateur réel, on trouve la caractéristique de la page suivante. Plus l'intensité du courant débité par le géné-

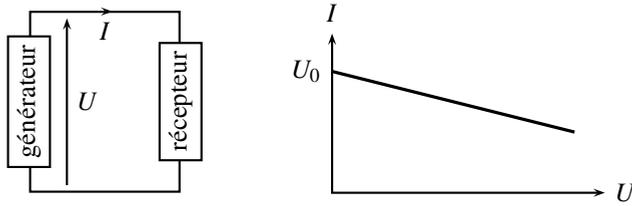


Figure 7.23 – Loi courant-tension d'un générateur réel.

rateur augmente, plus la tension du générateur chute. La loi courant-tension qui modélise ce comportement est alors :

$$U = U_0 - R_g I,$$

où U_0 est la tension à vide, c'est-à-dire quand aucun courant n'est débité, et R_g la résistance interne du générateur.

Le **générateur de tension réel** est représenté par un schéma électrique (nommé modèle de Thévenin) qui associe un générateur idéal de tension et une résistance R_g , appelée résistance interne du générateur :

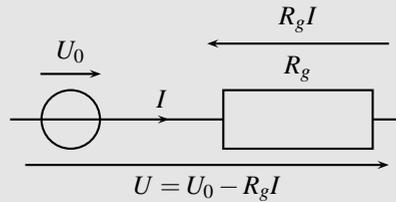


Figure 7.24 – Schéma électrique de Thévenin d'un générateur réel.

5 Associations de dipôles

5.1 Association de résistances

Il existe deux types d'association de résistances : en série et en parallèle. Deux résistances en série sont parcourues par la même intensité ; deux résistances en parallèle sont soumises à la même tension.

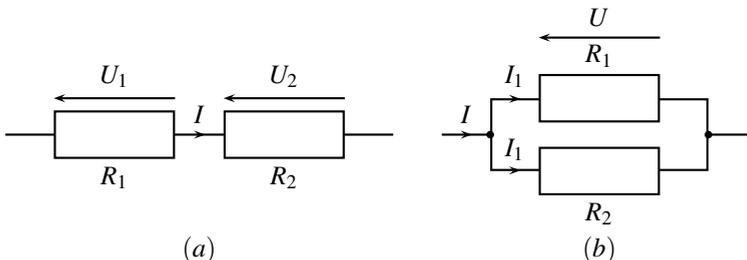


Figure 7.25 – Association de résistances (a) en série, (b) en parallèle.

a) En série

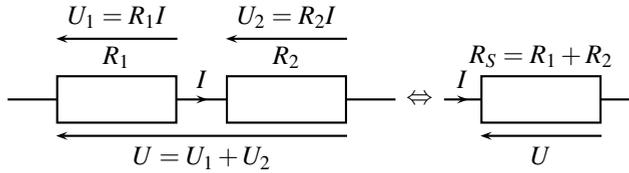


Figure 7.26 – Association de résistances en série.

La tension aux bornes des deux résistances est :

$$U = U_1 + U_2 = R_1I + R_2I = (R_1 + R_2)I = R_S I.$$

Les deux résistances sont équivalentes à une seule résistance, de valeur $R_S = R_1 + R_2$. Ce résultat est extrapolable à plus de deux résistances.

Plusieurs résistances R_i , montées **en série**, sont équivalentes à une unique résistance R_S , dont la valeur est la somme des résistances individuelles : $R_S = \sum_i R_i$.

b) En parallèle

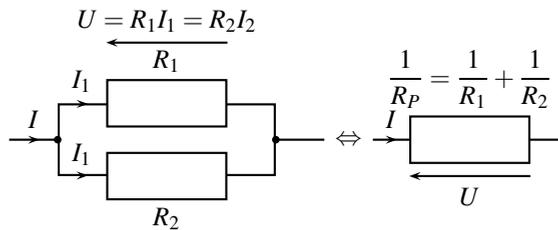


Figure 7.27 – Association de résistances en parallèle.

La loi des nœuds impose :

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U}{R_P}.$$

Les deux résistances sont équivalentes à une seule résistance R_P telle que : $\frac{1}{R_P} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Ce résultat est extrapolable à plus de deux résistances.

Plusieurs résistances R_i montées **en parallèle**, sont équivalentes à une unique résistance R_P , telle que : $\frac{1}{R_P} = \sum_i \frac{1}{R_i}$.

5.2 Associations de générateurs

L'association de générateurs de tension est possible, sous certaines conditions, car il existe une configuration dangereuse et donc interdite.

L'association en série mène immédiatement à un générateur équivalent unique qui impose la tension $U_1 + U_2$ (voir figure 7.28). C'est ce que l'on fait lorsqu'on met des piles tête-bêche dans un appareil électrique.

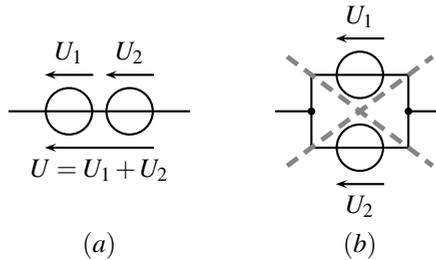


Figure 7.28 – Association de générateurs (a) permise en série, (b) interdite en parallèle.

Dans l'association en parallèle, que vaudrait la tension aux bornes de l'ensemble des deux générateurs? U_1 ou U_2 ? Le résultat final ne serait ni l'un, ni l'autre, mais plus sûrement l'endommagement des deux générateurs. C'est pourquoi cette configuration est interdite.

5.3 Diviseur de tension

Un **diviseur de tension** est un circuit électrique qui permet, au prix d'une perte de puissance (voir paragraphe 8), de diminuer la valeur d'une tension.

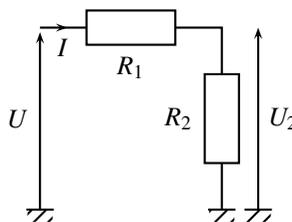


Figure 7.29 – Diviseur de tension.

La loi des mailles impose :

$$\begin{cases} U_2 = R_2 I \\ U = R_2 I + R_1 I \end{cases} \quad \text{donc} \quad U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U.$$

La tension E est multipliée par un terme inférieur à un, d'où le nom de diviseur de tension.



Toute la démonstration repose sur le fait que le même courant, d'intensité I , circule dans les deux résistances, et que les résistances sont montées en série. Si tel n'est pas le cas, la formule du diviseur de tension est fautive.

La tension est récupérée aux bornes de la résistance R_2 . Ainsi, la puissance Joule $R_1 I^2$, vue ci-après, dissipée dans la résistance R_1 , représente des pertes. Ce montage est donc à proscrire dans toutes les installations où le rendement est primordial. On utilise alors des hacheurs, convertisseurs de haute technologie, inventés dans la seconde moitié du XX^e siècle.

5.4 Diviseur de courant

Un **diviseur de courant** permet de diviser un courant entre deux dipôles en parallèle (voir figure 7.30).

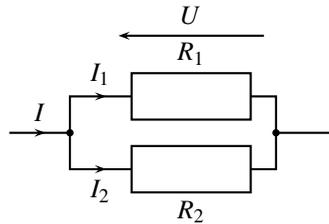


Figure 7.30 – Diviseur de courant.

La même tension U est aux bornes des deux résistances. La loi d'Ohm mène à :

$$U = R_1 I_1 = R_2 I_2.$$

La loi des nœuds impose :

$$I = I_1 + I_2 = I_1 + \frac{R_1}{R_2} I_1.$$

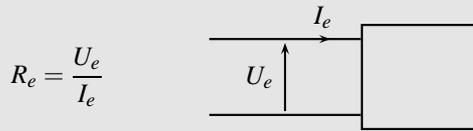
Finalement :

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad \text{et de même} \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I.$$

6 Résistances de sortie et d'entrée

6.1 Résistance d'entrée

Un dispositif électrique, comme un ordinateur vu de l'alimentation, un moteur électrique, une lampe, peut être compliqué. Toutefois, dans tous les cas, un générateur extérieur impose une certaine tension et le dispositif électrique, qui constitue le récepteur, laisse circuler un certain courant à travers lui afin de fonctionner. On peut alors définir le rapport entre la tension imposée et l'intensité du courant, homogène à une résistance. Cette résistance est nommée **résistance d'entrée** du dispositif électrique.



$$R_e = \frac{U_e}{I_e}$$

Figure 7.31 – Résistance d'entrée.

La **résistance d'entrée** d'un dipôle passif est la résistance équivalente vue de l'extérieur. Elle modélise électriquement le comportement du dipôle.

6.2 Résistance de sortie

On a vu au paragraphe 4.3 qu'un générateur de tension présente une certaine résistance R_g . Cette résistance interne au générateur est nommé **résistance de sortie**, car elle est placée en sortie du générateur.

La **résistance de sortie** d'un dipôle actif est la résistance du générateur de Thévenin équivalent vue de l'extérieur. Elle modélise électriquement la chute de tension du dipôle quand il débite un courant.

7 Point de fonctionnement d'un circuit

Soit un circuit constitué d'un dipôle actif, le générateur, et d'un dipôle passif, le récepteur. On cherche à trouver l'intensité du courant qui traverse le circuit ainsi que la tension aux bornes des dipôles. L'ensemble est modélisé par la figure 7.34 page suivante.

7.1 Caractéristique d'un dipôle

La caractéristique d'un dipôle est sa loi courant-tension. Elle peut prendre la forme d'une équation, $I(U)$, ou d'un graphe, où I est tracé en fonction de U . La représentation graphique est surtout utilisée dans le cas où le dipôle n'est pas linéaire, ou qu'elle ne se met pas sous la forme d'une équation.

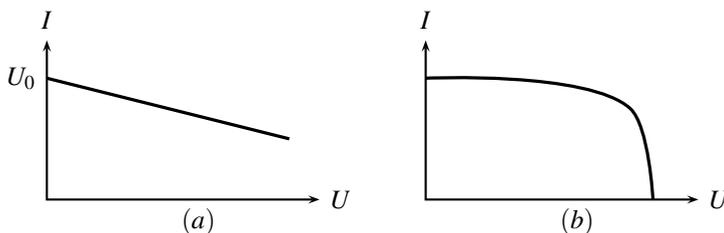


Figure 7.32 – Exemples de caractéristique de dipôle actif (a) linéaire, (b) non linéaire.

Le graphe de la caractéristique d'un dipôle actif linéaire correspond à l'équation

$U = U_0 - R_g I$. Un dipôle actif non linéaire peut avoir des formes diverses.

La caractéristique d'un dipôle passif passe par le point $(I = 0, U = 0)$ car l'intensité du courant qui le traverse est nulle quand il n'est pas alimenté. Un dipôle passif peut être tant linéaire, une résistance par exemple, que non linéaire.

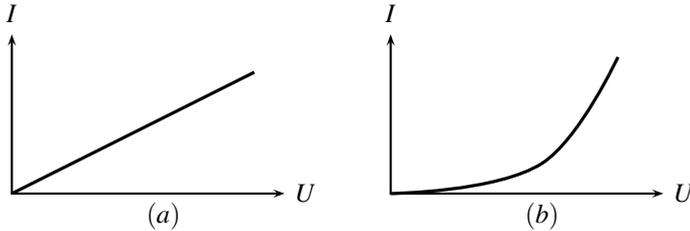


Figure 7.33 – Exemples de caractéristique de dipôle passif (a) linéaire, (b) non linéaire.

7.2 Résolution graphique

Le **point de fonctionnement** du circuit correspond à la valeur de l'intensité I du courant qui traverse les deux dipôles, et à celle de la tension à leurs bornes. On l'obtient graphiquement en superposant les deux caractéristiques. Par exemple :

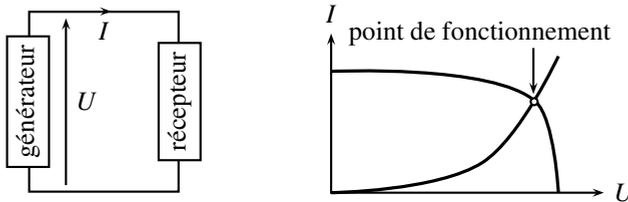


Figure 7.34 – Point de fonctionnement d'un circuit.

7.3 Résolution algébrique

La résolution algébrique n'est possible que si l'on est capable d'exprimer les fonctions $I(U)$ pour les dipôles. C'est possible dans les cas de dipôles linéaires simples, comme un générateur décrit par son modèle de Thévenin, ou une résistance, par exemple la résistance d'entrée R d'un récepteur :

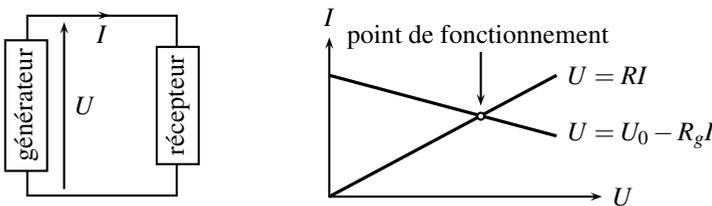


Figure 7.35 – Point de fonctionnement d'un circuit linéaire.

$$\left\{ \begin{array}{l} U = U_0 - R_g I \\ U = RI \end{array} \right. \text{ implique } \left\{ \begin{array}{l} U = \frac{R}{R + R_g} U_0 \\ I = \frac{U_0}{R + R_g} \end{array} \right.$$

Toutefois, de nombreux autres cas existent, où seule une résolution graphique est possible.

8 Puissance et énergie électriques

8.1 Les unités

L'**énergie** s'exprime en joule⁶, symbolisé par la lettre **J** majuscule. On montre en mécanique que le joule s'exprime, dans le système international, en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Une **puissance** s'exprime en watt⁷, symbolisé par la lettre **W** majuscule. La puissance est, par définition, l'énergie développée par unité de temps. Par exemple, si un dispositif consomme une énergie de 20 J pendant 5 s, alors la puissance moyenne consommée vaut $\frac{20}{5} = 4 \text{ W}$.

Quand l'énergie disponible est une fonction $\mathcal{E}(t)$ du temps, on définit alors la puissance instantanée par :

$$\mathcal{P}(t) = \frac{d\mathcal{E}}{dt}.$$

Une énergie s'exprime en joule, unité de symbole J.

Une puissance est homogène à une énergie divisée par un temps ; elle s'exprime en watt, unité de symbole W.

8.2 Puissance électrique

Soit un circuit très simple, constitué d'un générateur et d'un dipôle passif. On mesure, au moyen d'un wattmètre, schématisé par un \textcircled{W} , la puissance délivrée par le générateur et consommée par le dipôle passif (voir figure 7.36). On remarque que le wattmètre ne modifie ni l'intensité du courant qui le traverse, ni la tension.

On observe expérimentalement que la puissance est proportionnelle tant à U qu'à I et s'exprime par :

$$\mathcal{P} = UI.$$

Si les grandeurs dépendent du temps, il est d'usage de les noter avec des lettres minuscules :

$$\mathcal{P}(t) = u(t)i(t).$$

6. En l'honneur de James Prescott Joule, 1818 – 1889, physicien britannique, auteur de travaux fondamentaux en thermodynamique, sur l'équivalence entre travail et transfert thermique. Il étudia de plus l'énergie dissipée dans une résistance, nommé depuis effet Joule.

7. En l'honneur de James Watt, 1736 – 1819, ingénieur écossais, qui développa les machines à vapeur, sources de la révolution industrielle.

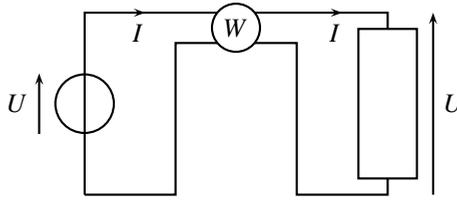


Figure 7.36 – Circuit de mesure de puissance.

8.3 Puissance Joule dans une résistance

Lorsqu'un électron parcourt un fil électrique, son mouvement n'est pas une ligne droite. Il est en effet en mouvement dans un milieu constitué d'atomes métalliques et de cations fixes. Il est alors soumis à de nombreuses interactions avec les ions du réseau ou avec les plans de rupture de l'empilement des atomes. Ces interactions, dénommées chocs, perturbent sa trajectoire. L'électron perd de l'énergie à chaque choc, au profit des atomes et cations du fil, qui s'échauffent alors. Cette perte d'énergie des électrons, et l'échauffement du fil qui en résulte, est nommée effet Joule.

Quelle est la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance de valeur R ? Aux bornes de la résistance :

$$\begin{cases} \mathcal{P} = UI \\ U = RI \end{cases} \quad \text{implique} \quad \mathcal{P} = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

L'**effet Joule** est la transformation d'énergie électrique en énergie thermique. La puissance Joule dissipée dans une résistance de valeur R , parcourue par un courant d'intensité I , soumise à une tension U , est :

$$\mathcal{P} = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

8.4 Énergie stockée dans un condensateur ou une bobine

Les condensateurs et les bobines emmagasinent de l'énergie. Pour la calculer, on écrit, pour chaque composant, la puissance disponible, puis on en déduit l'énergie stockée.

a) Cas du condensateur

La puissance \mathcal{P} , disponible pour le condensateur est :

$$\begin{cases} \mathcal{P} = ui \\ i = C \frac{du}{dt} \end{cases} \quad \text{donc} \quad \mathcal{P} = Cu \frac{du}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Cu^2 \right).$$

Or la puissance instantanée $\mathcal{P}(t)$ représente l'énergie par unité de temps, c'est-à-dire $\mathcal{P}(t) = \frac{d\mathcal{E}}{dt}$. On en déduit ainsi que l'énergie du condensateur est :

$$\mathcal{E}_{\text{élec}} = \frac{1}{2}Cu^2.$$

Il convient d'insister sur le fait suivant :

Un condensateur ne consomme aucune énergie. Il stocke de l'énergie pour la délivrer ensuite.

b) Cas d'une bobine

La puissance \mathcal{P} , disponible pour la bobine est :

$$\begin{cases} \mathcal{P} = ui \\ u = L\frac{di}{dt} \end{cases} \text{ donc } \mathcal{P} = Li\frac{di}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}Li^2 \right).$$

On en déduit ainsi que l'énergie de la bobine :

$$\mathcal{E}_{\text{magné}} = \frac{1}{2}Li^2.$$

Il convient d'insister sur le fait suivant :

Une bobine ne consomme aucune énergie. Elle stocke de l'énergie pour la délivrer ensuite.

SYNTHÈSE

SAVOIRS

- savoir que la charge électrique est quantifiée
- relier l'intensité du courant au débit de charge
- exprimer la condition de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence
- ordres de grandeur d'intensités du courant
- ordres de grandeur de tensions
- relations entre l'intensité du courant et la tension pour une résistance, un condensateur, une bobine
- ordres de grandeur de résistances, capacités, inductances
- puissance dissipée par effet Joule dans une résistance
- énergies stockées dans un condensateur et une bobine
- modèle de Thévenin d'une source de tension non idéale
- établir la relation du diviseur de tension
- établir la relation du diviseur de courant
- connaître les notions de résistance d'entrée et de sortie

SAVOIR-FAIRE

- utiliser la loi des mailles
- algébriser les grandeurs électriques
- utiliser les conventions générateur et récepteur
- remplacer une association série ou parallèle de résistance par une résistance unique
- utiliser la relation du diviseur de tension
- utiliser la relation du diviseur de courant

MOTS-CLÉS

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| • charge électrique | • énergie | • résistance de sortie |
| • intensité du courant | • résistance | • caractéristique d'un di- |
| • tension | • condensateur | pôle |
| • potentiel | • capacité | • point de fonctionnement |
| • masse ou référence de po- | • bobine | d'un circuit |
| tentiel | • inductance | |
| • puissance | • résistance d'entrée | |