Chapitre 2 - Signaux et composants électriques

Les phénomènes électriques et magnétiques sont connus depuis la Grèce antique. On savait qu'en frottant un morceau d'ambre avec une peau de chat, l'ambre s'électrisait : une décharge électrique se produisait lorsqu'on s'en rapprochait. **Le mot latin *electrum* signifiant ambre**, a été par la suite utilisé pour forger le mot électricité.

On peut réaliser une expérience similaire avec une tige de verre et un morceau de soie. En frottant la tige de verre, on l'électrise. La preuve en ait qu'approchant la tige électrisée d'un morceau de polystyrène suspendu à un fil, le morceau de polystyrène est attiré par la tige électrisé.

Dans ce chapitre nous allons définir les **grandeurs physiques électriques** qui permettent de comprendre le fonctionnement de **composants électroniques**. Ces composants peuvent être assemblés afin de construire des **circuits électriques** acheminant des **signaux électriques** : des grandeurs électriques encodant une **information** d'un émetteur à un récepteur.

Leçon I. Grandeurs électriques

Afin d'étudier les signaux électriques, il nous faut définir les différentes grandeurs physiques utiles à la construction d'un circuit électrique, en commençant par la grandeur au coeur de **l'électrocinétique**, le domaine la Physique portant sur l'étude des circuits électriques.

I.1. Charge et courant électriques

La grandeur physique à la base de l'électrocinétique est la **charge électrique**. Cette charge est une propriété fondamentale de la matière qui nous permet de définir une autre grandeur.

I.1.a Charge électrique

De nombreuses expériences ont permis de définir des propriétés de la charge électrique.

♥ Définitions

La charge électrique est une propriété de la matière s'exprimant en une unité scalaire noté q dont l'unité est le Coulomb, de symbôle C. Elle a plusieurs propriétés.

- La charge électrique est une **grandeur algébrique**, pouvant être positive ou négative.
- Elle est aussi **additive**. La charge d'un système de N particules est somme des charges de chaque particules.

À partir de ces propriétés d'autres expériences nous ont permis de comprendre la composition de la matière.

En 1897, J. J. Thomson découvre que les atomes sont composés de particule qu'il nomme **électron**. D'après les conventions prises à l'époque, cette particule possède une charge électrique négative.

En 1909, son ancien disciple, puis collègue, E. Rutherford découvre le noyau de l'atome. D'après les conventions de l'époque, le noyau a une charge positive. Des expériences montrent que les différents noyaux d'atomes sont composé de particules de charge positive qu'on nomme **protons**.

En 1932, l'ancien disciple de Rutherford, J. Chadwick, découvre que le noyau de l'atome est aussi composé de particules sans charge électrique : **les neutrons**.

On sait de quoi est finalement fait la matière. Elle est composée d'atomes. Un atome possède un noyau contenant en général

- de neutrons, de masse $m_n = 1{,}675.10^{-27}$ kg, et ne possédant de charge électrique
- de protons, de masse $m_p = 1{,}673.10^{-27}$ kg, et possédant une charge électrique $q_p = 1{,}67.10^{-19}$ C

ainsi qu'un nuage électronique composé d'électrons de masse $m_e = 9{,}109.10^{-31}$ kg, et possédant une charge électrique $q_e = -1{,}67.10^{-19}$ C.

La charge Q d'un atome étant nulle, il possède donc autant de protons que d'électrons, de telle manière que

$$Q = Zq_p + Zq_e = Z(q_p + q_p) = Z(1{,}67.10^{-19} - 1{,}67.10^{-19}) = 0$$

avec Z le numéro atomique de l'atome, soit son nombre de protons et d'électrons.

Mais l'atome peut perdre un ou plusieurs électrons, il devient alors un ion avec une charge électrique positive. Néanmoins le système ion et électrons perdus, conserve une charge totale nulle. Cela met en évidence une propriété fondamentale de la charge électrique.

♥ Définition

La charge électrique d'un système isolé (système qui ne peut effectuer d'échange de matière avec l'extérieur) est **conservée**.

Au niveau macroscopique, la matière qui est un agencement d'atomes de charge totale nulle, possède aussi une charge électrique nulle (les êtres humains, les planètes, les galaxie ont une charge électrique nulle).

Néanmoins, dans un système composé de deux sous-systèmes, ont peut déséquilibrer la répartition des charges électriques négatives et positives. C'est ce que l'on a fait en frottant le morceau de tissu sur les assiettes en plastique : on a arraché des électrons aux assiettes en plastique qui ont acquis chacune une charge totale positive, et le tissus qui a acquis une charge totale négative. On le constate car les charges de signes opposés s'attirent et les charges de mêmes signes se repoussent.

On voit donc que les charges peuvent migrer. Cette migration dépend des particules portant les charges, qu'on nomme donc **porteurs de charges**, et du milieu dans lequel elles se déplacent. On peut définir plusieurs types de milieux selon qu'ils permettent ou non le déplacement de ces porteurs de charges.

L'étude des phénomènes qui sont liés aux déplacement de la charge électrique est appelé **électrocinétique**. C'est ce déplacement de la charge qui nous permet de créer des circuits électriques.

I.1.b Conducteurs électriques

Lorsque les porteurs de charges ne peuvent pas se déplacer librement dans un milieu, on le qualifie d'**isolant électrique**. Lorsqu'ils se déplacent librement dans un milieu, on qualifie ce milieu de **conducteur électrique**. Il existe plusieurs type de conducteurs.

- **Les métaux** sont conducteurs. Cela s'explique par leur structure. Un métal peut être modélisé comme un réseau d'atomes liés entre eux par une liaison métallique. Ces atomes possèdent un nombre d'électrons inférieur au nombre requis pour remplir toutes leurs couches électroniques et donc être stables. Afin d'obtenir ce nombre supplémentaire d'électrons, il y a mise en commun d'électrons par tous les atomes : tous les atomes du métal se partage un lot d'électrons mis en communs. Ce lot, ou nuage électronique, est libre de se déplacer partout dans le métal. Ainsi, les électrons de ce métal qui portent une charge négative peuvent conduire leur charge partour dans le métal, on les appelle **électrons de conduction**, ou **électrons libre**.

  Il faut se rappeler qu'il y a conservation de la charge totale nulle du métal : si les électrons de conductions emportent une charge négatives, les atomes qu'ils ont quitté et qui forme le réseau deviennent alors des ions positifs, soit des cations.

- **Les solutions ioniques** sont aussi conducteurs. Les porteurs de charges ne sont pas des électrons, mais des **ions**, qui sont de teux types, des cations, et des ions négatifs : les anions.
  Les solutions ioniques sont notamment utilisées dans les piles (piles alcalines communes utilisant l'hydroxyde HO^-) ou les accumulateurs (batterie lithium-ion).
  La conservation de la charge est respecté dans une solution ionique car le nombre de cations compense le nombre d'anions.
- **Les semi-conducteurs** sont des matériaux qui ont la capacité de contrôler la conduction de porteurs de charges qui sont les électrons, en fonction de leur structure chimique, de la température, de l'illumination ou de la présence dans le matériau d'autres éléments chimiques. Leur conductivité électrique est comprise entre celle d'un isolant et d'un conducteur. Le germanium est un exemple de semi-conducteur.

Étudions maintenant comment les porteurs de charge circulent dans les conducteurs.

I.1.c Courant électrique

Considérons un tube dans lequel on a introduit une solution ionique. On étudie sa section $\mathcal{S}$ comme illustré Figure 2.1. Il existe une force produite par un champ électrique que nous étudierons plus tard, qui **met en mouvement les porteurs de charges**, dans notre cas les cations et les anions. **Cette force déplace les porteurs de charges positives dans un sens, et les porteurs de charges négatives dans le sens opposé.**

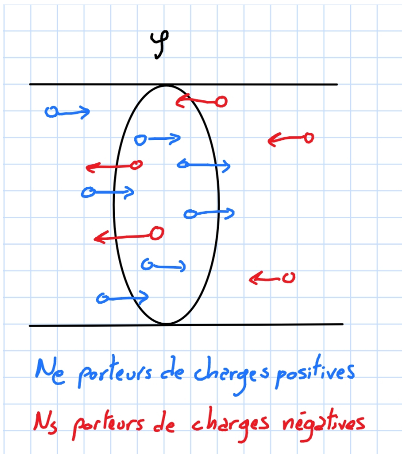


Figure 2.1 – Déplacement des porteurs de charges à travers une section $\mathcal{S}$.

On note Δq la charge totale **entrant** par la section $\mathcal{S}$ durant une durée Δt.

Cette charge Δq dépend du nombre N_e de porteur de la charge positive $q^+ > 0$ qui entrent dans $\mathcal{S}$, soit les cations ; et du nombre N_s de porteurs de la charge négative $q^- < 0$, soit les anions qui sortent de $\mathcal{S}$ (si le nombre de porteurs de charges négatives diminue, la charge totale augmente). Il vient que

$$\Delta q = N_e q^+ - N_s q^-.$$

Grâce à cette expression de la charge passant dans un petit volume $\mathcal{V}$ pendant une durée Δt, on peu définir une nouvelle grandeur.

♥ Définition

La quantité de charges Δq qui passe par un volume $\mathcal{V}$ pendant une certaine durée Δt est appelée **courant électrique**. Cette grandeur est notée I et a pour unité l'ampère de symbôle A, qui correspond à 1 C.s^{-1}.

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

C'est **une quantité algébrique** : le signe du courant indique s'il est orienté dans le même sens qu'un sens conventionnel qu'on a établi.
On peut faire l'analogie entre le courant et **un débit de porteurs de charge** (le débit est un volume par unité de temps).

Dans le cas de la solution ionique prise en exemple, le courant passant dans le petit volume $\mathcal{V}$ est

$$I = \frac{N_e q^+ - N_s q^-}{\Delta t}.$$

On voit donc qu'un courant électrique I est, en général, produit par deux déplacements.
D'abord le déplacement dans un sens de porteurs de charges positives qui produit un courant I^+ tel que

$$I^+ = \frac{N_e q^+}{\Delta t}.$$

Ce courant est positif si les porteurs de charges positives entrent dans la section $\mathcal{S}$.
Ensuite il y a le déplacement dans le sens opposé de porteurs de charges négatives qui produit un courant I^- tel que

$$I^- = -\frac{N_s q^-}{\Delta t}.$$

Comme $q^- < 0$, **ce courant est positif si les porteurs de charges négatives sortent de la section $\mathcal{S}$.**

Dans le cas d'**un fil électrique** composé d'un métal, donc conducteur, les seuls porteurs de charges sont les électrons de conductions de charge négative. Le courant dans un fil électrique se ramène donc à

$$I \equiv I^- = -\frac{N_s q^-}{\Delta t}$$

or la charge de l'électron $q^- = -e$, donc

$$I = \frac{N_s e}{\Delta t}.$$

Le courant dans le fil est positif s'il les électrons sortent par la section $\mathcal{S}$.
Cela revient à dire que **les électrons se déplacent toujours dans le sens opposé au sens du courant, indiqué par sa valeur algébrique. C'est une convention qui a été établie par les fondateurs de l'électrocinétique.**

Cependant, devant un circuit, réel ou schématisé, on ne sait pas d'emblée le sens de déplacement des électrons et donc la valeur algébrique du courant. Pour commencer à travailler, **l'utilisateur va choisir, va imposer un sens positif : il établi une convention**. Sur un schéma électrique cela se traduit par le dessin d'une flèche dans le sens choisi par l'utilisateur.
Si, en mesurant le courant dans le sens de la flèche choisi par l'utilisateur, on trouve, par calcul ou par mesure, une valeur positive du courant $I > 0$ alors le courant va dans le même sens que le sens choisi par convention.

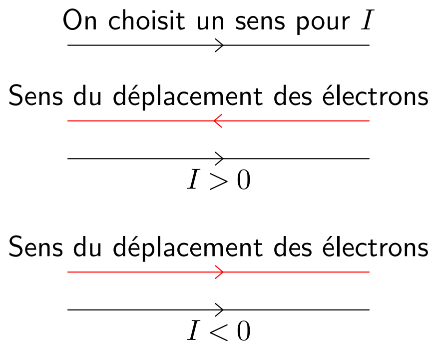


Figure 2.2 – Schéma du choix de convention pour le sens du courant.

Inversement, si, par calcul ou par mesure, on obtient une valeur négative du courant $I < 0$, alors le courant va dans le sens opposé au sens choisi par convention.

Le courant électrique peut rester constant au cours du temps, ou il peut varier. Étudions ces deux cas de figure.

- Lorsqu'une grandeur ne varie pas dans le temps en physique, on la qualifie de **stationnaire**. Étudions un courant stationnaire. En électrocinétique on préfère appelé ce type de courant, **un courant continu**.
  Comme ce courant ne varie pas dans le temps, sa valeur est la même en tout point d'un fil électrique, donc est la même pour n'importe quelle section du fil.
  Reprenons l'exemple précédant, où nous étudions le courant I passant par la section $\mathcal{S}$. Ce courant est continu tel que
  $$I = \frac{N_s e}{\Delta t} = \text{cst.}$$
  Dans une autre section $\mathcal{S}'$ du même fil électrique, le courant I est le même et est tel que
  $$I = \frac{N_s' e}{\Delta t} = \text{cst.}$$
  Comme le courant I, la charge e, et la durée Δt sont constants entre les deux sections $\mathcal{S}$ et $\mathcal{S}'$, on constate que le nombre d'électrons N_s sortant par $\mathcal{S}$ est égal au nombre d'électrons N_s' sortant par $\mathcal{S}'$. Comme le courant est continu, dans la portion du fil entre les sections $\mathcal{S}$ et $\mathcal{S}'$, les électrons ne sont pas stockés.

  Afin de mesurer le courant qui circule dans un fil électrique, on utilise un **ampèremètre**. C'est un outil symbolisé par un A entouré d'un cercle, qui mesure le courant qui le traverse. L'intensité de ce courant est compté positivement lorsqu'il sort de l'appareil par sa borne **com**.

- Le courant circulant dans un fil peut aussi voir sa valeur varier dans le temps, on a a affaire à l'intensité d'un courant **variable**. Par convention, en électrocinétique, on utilise une minuscule pour représenter les grandeurs physiques variables. Ainsi l'intensité d'un courant variable est noté $i(t)$ et est définie telle que
  $$i(t) = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$$
  avec $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ l'expression de la dérivée par rapport au temps.
  D'après l'étude précédente, nous ne pouvons plus affirmer que l'intensité du courant passant par une section $\mathcal{S}$ d'un fil, est égale à celle du courant passant par une autre section $\mathcal{S}'$ de ce fil.

Si étudions un courant dont l'intensité $i(t)$ varie périodiquement, le temps caractéristique de la variation est la période T du courant. Pour un courant continu, la période de variation tend vers l'infini : il n'y a pas de variation.
Cette période est la même que celle du champ électrique $\vec{E}$ qui provoque la circulation du courant. Ce champ électrique variable varie donc dans le temps, mais aussi dans l'espace. Si nous étudions ce champ à un instant t fixé, nous voyons que sa valeur varie le long du fil électrique, et donc que la valeur de l'intensité du courant dans le fil, varie de manière similaire.
Néanmoins, on peut considérer que si on regarde une portion du fil électrique de longueur L très petite devant la longueur d'onde de l'onde électrique, la variation est très faible : la valeur du champ et la valeur de l'intensité du courant varie peu sur cette distance L.

♥ Définition

L'approximation de régimes quasi-stationnaires ou ARQS est applicable pour l'étude d'un courant électrique si la longueur des fils est tel que

$$L << \lambda$$

avec λ la longueur d'onde du champ électrique générant le courant $i(t)$. Cette longueur d'onde est liée à la période du champ de telle manière que

$$\lambda = cT$$

avec c la vitesse du onde EM dans le vide.
La condition sur la longueur du fil peut ainsi être exprimée en fonction du temps caractéristique de variation du courant T telle que

$$L << cT.$$

L'étude de l'électrocinétique se place dans le cadre de l'ARQS, aussi appelé régime lentement variable.

Lorsque l'ARQS est valable, on démontrera en deuxième année que la quantité de charges comprises entre deux section quelconque $\mathcal{S}$ et $\mathcal{S}'$ d'un fil ne varie pas au cours du temps : **la portion entre $\mathcal{S}$ et $\mathcal{S}'$ ne stocke pas la charge.**
L'ARQS nous permet donc de définir l'intensité du courant $i(t)$ passant par un fil, comme nous l'avons fait en régime stationnaire en considérant le courant continu I.

I.1.d Loi des noeuds

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

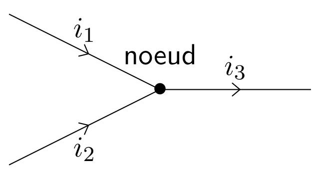


Figure 2.3 – Schéma d'un noeud.

On choisit d'orienter les courants i_1, i_2 et i_3 dans le sens donné par la figure Figure 2.3. Pendant une durée Δt, une quantité de charge $\mathrm{d}q_1$ traverse une section du fil 1 ; une autre quantité de charge $\mathrm{d}q_2$

traverse une section du fil 2 ; et une quantité de charge $\mathrm{d}q_3$ traverse une section du fil 3. On a vu que les fils ne stockaitent pas la charge dans l'ARQS, donc les charges ne sont pas stockées dans les fils 1 et 2, ils sont distribués au fil 3, soit

$$\mathrm{d}q_1 + \mathrm{d}q_2 = \mathrm{d}q_3$$

ces quantités de charges par unité de temps deviennent

$$\frac{\mathrm{d}q_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}q_2}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}q_3}{\mathrm{d}t}$$

soit

$$i_1 + i_2 = i_3$$

ce résultat illustre **la loi des noeuds**.

♥ Définitions

- Dans un circuit électrique, un point de jonction entre des fils est appelé un **point du circuit**. Les points de circuit intéressant sont souvent repérés par un point épais sur un schéma électrique.
- Un point de jonction entre au moins trois fils électriques est appelé **un noeud électrique**.
- **La loi des noeuds** stipule qu'en un noeud électrique, la somme des intensités des courants entrants est égale à la somme des intensités des courants sortant du noeud.

I.1.e Ordre de grandeur

L'ordre de grandeur de l'intensité du courant électrique varie énormément selon le domaine d'application.

Dans le domaine de l'électronique signal, soit celle des ordinateurs et des téléphones portables, l'ordre de grandeur du courant est le mA.

En électrotechnique, domaine d'étude des moteurs de TGV ou de la consommation d'une usine, l'ordre de grandeur du courant s'étend de 500 A à 10^3 A.

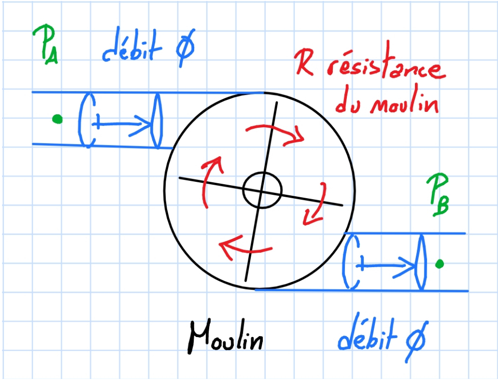
Enfin, les éclairs peuvent produire, pendant une durée très courte, des intensités de 5.10^4 A.

I.2. Tension et conventions

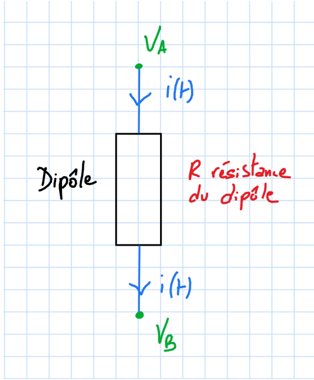
Nous venons d'étudier la charge électrique et le courant électrique qui nous permet de quantifier la quantité de charge passant dans la section d'un fil électrique. Nous allons voir la grandeur à l'origine de la mise en mouvement des charges.

I.2.a Loi d'Ohm

Utilisons une analogie hydraulique. Imaginons un petit moulin alimenté par une conduite dans laquelle circule de l'eau. L'eau passe de la conduite, fait tourner le moulin, puis s'écoule dans une autre conduite comme c'est illustré Figure 2.4.



(a)



(b)

Figure 2.4 – Analogie entre un (a) une portion de circuit hydraulique et (b) une portion de circuit électrique.

Le débit d'eau ϕ, le volume d'eau par unité de temps, qui entre dans le moulin est égal au débit d'eau qui sort : le moulin ne stocke pas l'eau. En faisant l'analogie avec un circuit électrique, nous retrouvons les conclusions que nous avons faite dans le cas de l'étude du courant électrique.

Mais nous ne nous sommes pas posé la question de la cause du mouvement de l'eau. Quel phénomène est responsable de la circulation de l'eau dans un conduit ?

Dans le cas d'un circuit hydraulique le phénomène est la différence de pression. Pour que l'eau circule dans le moulin, il faut que la pression à l'entrée du moulin, prenons un point A de pression P_A, soit plus importante que la pression à la sortie, au point B de pression P_B.

Mais plus grande comment ? Peut-on prendre n'importe quelle valeur de pression ? Non, cela va dépendre du débit d'eau ϕ qu'on utilise : plus le volume d'eau par seconde sera important, plus la différence de pression sera importante ; et de la résistance du moulin vis-à-vis de la circulation de l'eau : plus le moulin sera rouillé, plus sa résistance à l'écoulement R sera importante, plus la différence de pression devra être importante. On peut obtenir l'expression d'une loi phénoménologique qui décrit ce lien entre différence de pression, débit et résistance

$$P_A - P_B = R\phi.$$

Ce constat a été fait par Georg Ohm en 1827 dans le cas de circuit électrique : pour faire circuler **un courant électrique I dans un composant électrique qui présente une résistance R à la circulation de ce courant, il faut imposer aux bornes de ce composant une différence de potentiel électrique** $V_A - V_B$ telle que

$$V_A - V_B = RI$$

c'est **la loi d'Ohm** bien connue. Dans l'analogie hydraulique, La pression correspond au **potentiel électrique**.

♥ Définition

Le potentiel électrique en un point A est notée V_A. Son unité est le volt, également notée V. Le potentiel électrique défini l'état électrique d'un point de l'espace. Elle est liée au champ électrique et à l'énergie potentielle électrostatique.

☛ ***Nota bene***

Dans le cas d'un fil électrique, comme on suppose que sa résistance est extrêmement faible ($R \approx 0$), il n'y a pas d'opposition à la circulation du courant : il n'y a pas besoin d'imposer une différence de potentiel électrique pour faire circuler le courant, donc **le potentiel est le même en tout point d'un fil**.

Nous allons voir comment représenter la différence de potentiel et le courant selon le type d'élément électronique étudié.

I.2.b Convention récepteur

Reprenons l'analogie du moulin. Le moulin tourne grâce à la circulation de l'eau, une puissance $\mathcal{P}$, soit de l'énergie par unité de temps, lui est donc fournie. On peut montrer que cette puissance fournie $\mathcal{P}$ est

$$\mathcal{P} = \Delta P \phi$$

avec ΔP la différence de pression.

Le signe de la différence de pression ΔP est choisi en fonction de l'information que l'on veut donner à un interlocuteur.

Comme on étudie un élément qui reçoit de l'énergie, on considère que l'interlocuteur sait que l'élément est un élément récepteur, on va donc faire en sorte d'écrire la différence de pression ΔP de telle manière que l'expression de la puissance $\mathcal{P}$ nous donne une valeur positive si le récepteur reçoit ou gagne bien de la puissance, et une valeur négative si le récepteur perd de la puissance.

Or nous savons que le moulin tourne grâce à la circulation de l'eau, seulement si la pression P_A au point où entre l'eau, est plus grande que la pression P_B au point où sort l'eau. Donc lorsque le moulin reçoit de la puissance, $P_A > P_B$, donc $P_A - P_B > 0$, on prendra cette définition de la différence de pression

$$\mathcal{P} = (P_A - P_B)\,\phi > 0$$

$$\mathcal{P} = \Delta P \phi > 0.$$

Ainsi, dans le cas où un élément électronique est récepteur, la différence de potentiel est prise entre le point où entre le courant, et le point où sort le courant. D'après le schéma présenté Figure 2.5, la différence de potentiel est

$$V_A - V_B.$$

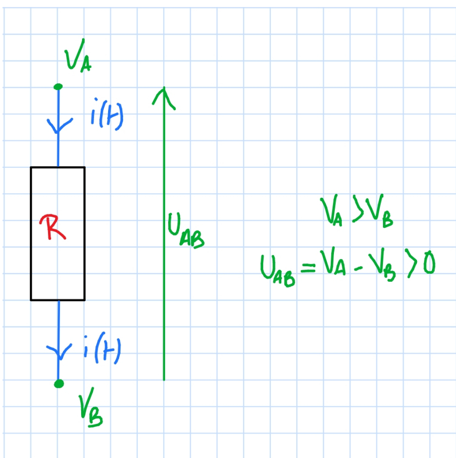


Figure 2.5 – Convention de la tension pour un élément récepteur.

Une différence de potentielle est aussi appelée **tension électrique**, elle a donc la même unité que le potentiel électrique, soit le volt. Aux bornes de l'élément récepteur, on peut noter cette tension électrique U_{AB} telle que

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

La tension est ici positive donc la puissance fournie à l'élément est telle que

$$\mathcal{P} = U_{AB} I > 0$$

car la tension $U_{AB} > 0$ et le courant $I > 0$.

Pour symboliser cette tension aux bornes d'un élément, on dessine une flèche orientée vers le premier point indicé par la tension U_{AB}, soit ici le point A. **Cela vaut pour n'importe quel type d'élément** : les éléments récepteurs que l'on vient de considérer, et les éléments générateurs que l'on va voir à présent.

♥ Définitions

- **La tension électrique** U_{AB} est la différence de potentiels électriques entre les points A et B

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

  La flèche symbolisant cette tension est orientée de B vers A.
  On constate alors que la tension U_{BA} est l'opposée de la tension U_{AB} car d'après la définition de la tension

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

  La flèche de la tension U_{BA} a un sens opposé à celle de U_{AB}.

- Dans le cas d'un élément considéré **en convention récepteur**, la flèche de la tension est orientée dans le sens opposé au sens du courant.

☛ *Nota bene*

Quand la tension d'un élément électronique est bien déterminée, on peut noter sa tension simplement U, ou s'il y a d'autres éléments, par exemple une résistance R_1 ou R_2, on peut noter leur tension U_1 et U_2.

I.2.c Convention générateur

On a vu que s'il y avait une résistance dans le circuit, il fallait imposer une différence de potentiel, ou tension, pour que le courant circule. Cette tension est imposée par un générateur. On peut le comparer à une pompe dans un circuit hydraulique qui impose une pression différente à l'entrée et à la sortie d'un circuit.

L'information que l'on veut donner à un interlocuteur quand on parle d'un élément générateur, c'est la puissance que ce générateur fournie, donc qu'il perd. À l'inverse d'un récepteur, on souhaite que la puissance perdue apparaisse comme positive, et la puissance gagnée comme négative, car ce n'est pas le rôle d'un générateur de gagner de la puissance.

Ainsi si on exprime la puissance fournie par un générateur $\mathcal{P} = UI$ avec U la différence de potentiel entre les bornes du générateur, soit **la tension du générateur**, I étant positif, il faut, pour que $\mathcal{P}$ soit positive, que U soit définie de manière à être positive. D'après l'analogie hydraulique, le potentiel à la sortie du générateur, soit le point D dans le schéma Figure 2.6, est plus important qu'à l'entrée du générateur, soit le point C dans le schéma Figure 2.6. Donc la tension à prendre pour le générateur est

$$U = U_{DC} = V_D - V_C.$$

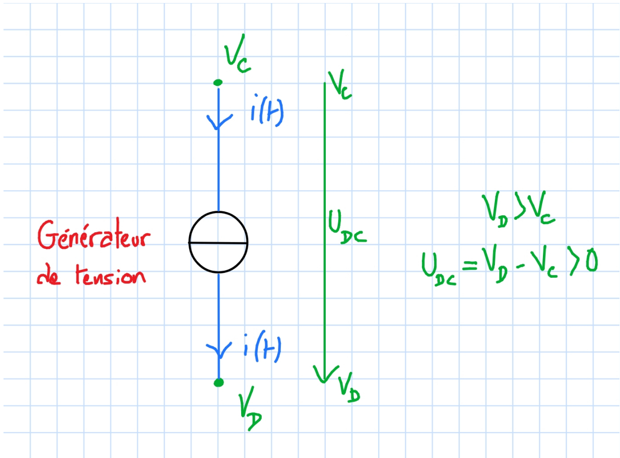


Figure 2.6 – Convention de la tension pour un élément générateur.

On constate, si on trace la flèche de la tension du générateur U_{DC}, qu'elle orientée vers le premier indice, soit le point D : **la flèche de tension est orientée dans le même sens que le courant dans le cas d'un élément en convention générateur**.

♥ Définition

Dans le cas d'un élément considéré **en convention générateur**, la flèche de la tension est orientée dans le même sens que le courant.
Schéma flèche tension récepteur potentiel U_C et U_D

☛ Nota bene

Branchons un conduit entre le point de la pompe qui impose une pression forte P_D et le point de la pompe qui impose une pression faible P_C. On considère que ce conduit, comme un fil électrique, ne présente pas de résistance. S'il ne présente pas de résistance, la pression sera la même entre le point D et tous les autres points du conduit. Or si on impose une forte pression alors qu'il n'y en a pas besoin pour faire circuler l'eau car la résistance est très faible, on voit d'après la loi donné plus haut que le courant dans conduit est tel que

$$\lim_{R\longrightarrow 0} \frac{\Delta P}{R} = \phi \longrightarrow \infty.$$

Le débit devient très important, trop important pour la pompe.
Il en va de même pour un circuit électrique si on branche un fil directement entre les bornes d'un générateur. Le courant dans le fil est

$$\lim_{R\longrightarrow 0} \frac{U}{R} = I \longrightarrow \infty.$$

Du fait de la faible résistance du fil, le courant I devient trop important, la puissance fournie au fil est

$$\lim_{I\longrightarrow \infty} \mathcal{P} = UI \longrightarrow \infty.$$

Cette puissance n'a pas le temps d'être dissipée sous forme de chaleur, le fil fond, voire se sublime (passage de l'état solide à gazeux).

Avec un générateur, un élément récepteur et des fils électriques, on peut construire un circuit électrique.

I.2.d Ordre de grandeur

L'ordre de grandeur des tensions est, comme celui des intensités, très variable.

Dans le domaine de l'électronique signal, soit celle des ordinateurs et des téléphones portables, l'ordre de grandeur de la tension est de quelques mV à quelques centaines de mV.

Au bornes d'une pile électrique est de 1,5 V.

La tension domestique délivrée par EDF est de 230 V (aux États-Unis de 110 V).

Enfin, entre les extrémités d'un éclair lors d'un orage, la tension peut atteindre 500 MV.

I.3. Circuit électrique

I.3.a Branche et maille

Un circuit électrique est constitué de composants électriques reliés entre eux par des conducteurs, en général filiformes appelés **fils de connexion**.

Chaque composant électrique, générateur de tension, générateur de courant, résistance, condensateur, bobine, etc. sont représentés par un symbole particulier. Les fils de connexions sont représentés par des traits continus.

♥ Définition

Une branche est une portion de circuit comprise entre deux noeuds consécutifs.

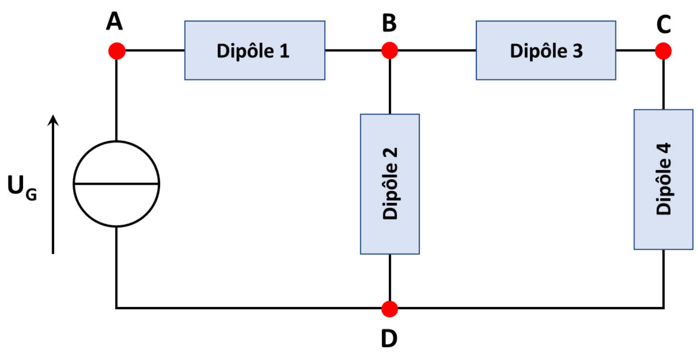


Figure 2.7 – Schéma d'un circuit électrique contenant 4 branches : AB, BD, BC, CD et DA.

Un circuit électrique est, comme son nom l'indique, un circuit donc il doit être fermé : il doit exister au moins un chemin pour que le courant électrique traversent les composants et revienne à son point de départ. **Une maille** est un ensemble de branches formant une boucle fermée. Par exemple sur le schéma électrique de la Figure 2.7, il y a trois mailles : $ABDA$, $BCDB$ et $ABCDA$.

I.3.b Loi des mailles

Grâce à la définition de la tension on peut obtenir la tension aux bornes de points de connexions du circuit en fonction d'autres tensions aux bornes du circuit.

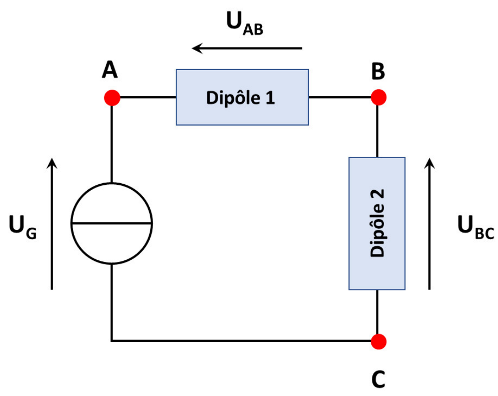


Figure 2.8 – Schéma d'un circuit électrique.

Par exemple dans le schéma présenté Figure 2.8, on peut exprimer la tension U_{AC} aux bornes des point de connexions A et C

$$U_{AC} = V_A - V_C = V_A + (V_B - V_B) - V_C = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) = U_{AB} + U_{BC}.$$

On a mis en évidence **la loi d'additivité des tensions**.

De la même manière, on peut exprimer la tension U_G aux bornes du générateur. D'après la convention générateur

$$U_G = U_A - U_C = U_{AC}.$$

Il vient donc que

$$U_G = U_{AB} + U_{BC}.$$

On peut aussi écrire

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$$

$$-U_{CA} = U_{AB} + U_{BC}$$

$$0 = U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}$$

on vient de mettre en évidence **la loi des mailles**.

♥ Définition

Sur une maille comportant n points et U_1, U_2 ... U_n les tensions entre les points de la mailles orientées toutes dans le même sens autour de la maille.
La loi des mailles s'écrit

$$\sum_{k=1}^{n} U_k = 0.$$

Il en va de même en régime variable

$$\sum_{k=1}^{n} u_k(t) = 0.$$

I.3.c Masse et Terre

On a vu que les tensions étaient des différences de potentiels. Or, on ne peux pas mesurer un potentiel, **on ne sait que mesurer des différences de potentiels**. Afin de définir et de mesurer les potentiels dans un circuit électrique, on choisi un point quelconque du circuit et on utilise son potentiel comme **un potentiel de référence** noté V_M ou $v_M(t)$ qu'on prend égal à zéro.

♥ Définition

Le point du circuit dont on prend le potentiel comme référence de potentiel est appelée **la masse**. On considère que son potentiel est nul : $V_M = 0$ ou $v_M(t) = 0$.

La position de la masse M dans le montage est sans influence sur les valeurs des tensions, mais un choix judicieux permet parfois de simplifier les calculs.

Le symbole de la masse peut être représenté en plusieurs du circuit : cela signifie que ces points sont reliés entre eux et qu'ils sont tous au potentiel nul, ils sont tous à la masse.

Les électroniciens distinguent en général la masse carcasse de la masse signal dont on peut voir les différents symboles sur la Figure 2.9.

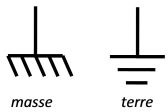


Figure 2.9 – Symboles de la masse et de la terre

La masse carcasse symbolisée par est reliée à **la terre** : qui a la particularité d'avoir un potentiel est constant.

La masse signal symbolisée par est une référence des potentiels pour un circuit donné. Ce potentiel n'est pas forcément constant. Par exemple dans une voiture la batterie, l'autoradio, les ampoules et tous les autres composants électriques sont branchés sur la carcasse de la voiture qui est pris comme la masse du circuit. Cette masse est une masse signal et son potentiel n'est pas obligatoirement constant dans le temps. Par temps sec, la carrosserie d'une automobile s'électrise par frottements dans l'air, comme nous l'avons vu dans l'expérience illustratrice en début de la leçon. Son potentiel prend alors une valeur différente de celle du potentiel constant de la Terre, puisque les pneumatiques, dans ces conditions, isolent la voiture du sol. Cela explique la secousse électrique ressentie parfois lorsque nous descendons d'une voiture dont le potentiel de la carrosserie est différent de celui du sol.

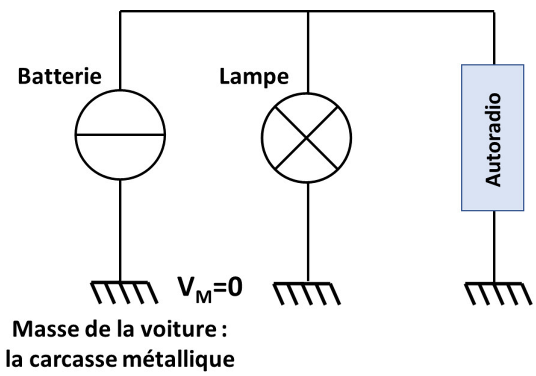


Figure 2.10 – Circuit électrique d'une voiture.

Synthèse

Connaissances

- Charge électrique, intensité du courant électrique ; régime variable et régime continu.
- Potentiel, tension, référence de potentiel.
- Puissance électrique.

Savoir-faire

- **Relier** l'intensité d'un courant électrique au débit de charges.
- **Utiliser** la loi des noeuds et la loi des mailles.
- **Algébriser** les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur.
- **Citer** les ordres de grandeur d'intensités, de tensions et de puissances dans différents domaines d'application.

Leçon II. Dipôles électriques usuels

Dans cette leçon nous allons nous intéresser aux éléments électrocinétiques élémentaires permettant de réaliser des circuits électroniques. Ces éléments sont tous des **dipôles**.

Commençons par étudier deux dipôles pouvant être utiliser un **courant continu**.

II.1. Dipôles électrocinétiques en courant continu

Comme son nom l'indique, un dipôle est un élément connecté par deux fils au reste du circuit. En régime stationnaire ou régime variable compatible avec l'ARQS, un dipôle ne stocke pas de charge, donc l'intensité du courant entrant dans le dipôle est égale à l'intensité du courant sortant du dipôle.

L'état d'un dipôle est défini par trois grandeurs physiques

- **l'intensité du courant** I le traversant
- **la tension** U à ses bornes
- et **la puissance** $\mathcal{P}$ qu'il échange avec le reste du circuit, définie telle

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

On a vu que lorsque nous considérons un dipôle en **convention récepteur**, la puissance $\mathcal{P}$ est comptée positivement si elle est reçu par le dipôle. Pour respecter cette convention, **la tension du dipôle est orientée dans le sens opposé au courant**.

En convention générateur, la puissance $\mathcal{P}$ est comptée positivement si elle est fournie par le dipôle. Pour respecter cette convention, **la tension du dipôle est orientée dans le même sens que le courant**.

Étudions un premier dipôle récepteur.

II.1.a Résistor

Le **résistor**, qu'on nomme plus communément résistance, est un dipôle passif.

La tension à ses bornes U est liée au courant qui le traverse I par la loi d'Ohm

$$U = RI$$

avec R la résistance électrique du résistor, dont l'unité est représentée par la lettre grecque majuscule Ω, nommée Ohm.

Pour caractériser un composant électrocinétique, on peut tracer **sa caractéristique** : généralement, il s'agit de la variation de l'intensité du courant qui le traverse en fonction de la tension à ses bornes $I = f(U)$, mais on peut également tracer $U = f(I)$.

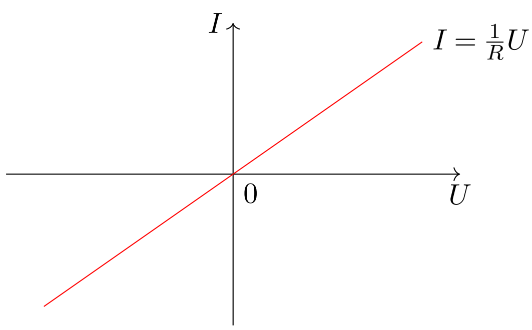


Figure 2.11 – Caractéristique de la résistance.

La caractéristique du résistor est présenté Figure 2.11 en convention récepteur. On constate que l'intensité du courant évolue de manière linéaire en fonction de la tension : l'intensité est fonction de la tension à la puissance 1. On dit que le résistor est **un dipôle linéaire**.

Un résistor est symbolisé par un rectangle.

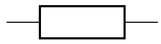


Figure 2.12 – Schéma d'un résistor

OdG : les résistor possèdent des résistances de valeurs comprises entre quelques Ω et $10^7\ \Omega$.

On peut considérer qu'un **interrupteur ouvert** peut être modélisé comme une résistance infini, car ainsi

$$\lim_{R \longrightarrow \infty} I = \frac{U}{R} \longrightarrow 0$$

le courant est nul, c'est bien ce que l'on constate lorsqu'on ouvre un circuit.

De manière analogue, on peut considérer qu'un **interrupteur fermé** peut être modélisé comme fil électrique, c'est-à-dire un dipôle de résistance nulle, car ainsi

$$U = RI = 0$$

la tension, ou la différence de potentiel aux bornes du dipôle est nulle, c'est bien ce que l'on constate mesure la tension d'un interrupteur fermé ou d'un fil.

II.1.b Générateurs de tension

Un générateur est **un dipôle actif linéaire**.

- **Générateur de tension idéal**
  Un générateur de tension idéal impose entre ces bornes une tension qui a la même valeur quelque soit la valeur du courant à fournir au circuit

  $$U = E = \text{cst.}$$

  E est appelé **force électromotrice** du générateur.

  Le générateur de tension est symbolisé par un cercle traversé par un fil. La tension E imposée par le générateur de tension est, d'après la convention générateur, symbolisée par une flèche orientée dans le sens du courant qu'il fournit.

- **Modèle de Thévenin d'une source réelle**
  Pour représenter de manière plus réaliste une source de tension, on utilise **le modèle de Thévenin** : il associe un générateur de tension idéal de force électromotrice E avec un résistor de résistance R_g, appelé **résistance interne du générateur**.
  Afin d'obtenir la valeur de la tension U aux bornes d'un tel générateur on étudie la portion de circuit présenté Figure 2.13.

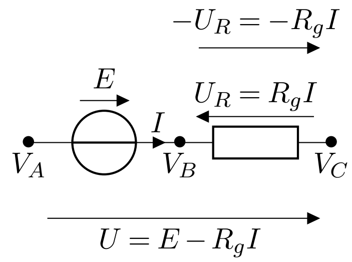


Figure 2.13 – Tensions aux bornes du générateur de Thévenin

D'après la loi d'additivité des tensions, la tension du générateur est égale à la somme des tensions dans le même sens quelle

$$U = V_C - V_A = V_C - V_B + V_B - V_A$$

avec $U_R = V_B - V_C$, donc $-U_R = V_C - V_B$ et $E = V_B - V_A$, soit

$$\boxed{U = E - U_R = E - R_g I.}$$

On peut ainsi obtenir la caractéristique du générateur de Thévenin et le comparer à la caractéristique du générateur idéal, comme c'est illustré Figure 2.14.

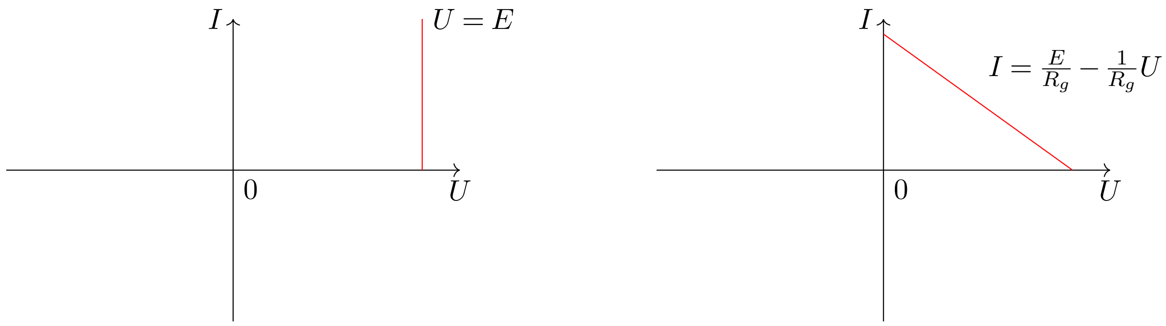


Figure 2.14 – Caractéristiques en convention générateur (a) du générateur de tension idéal et (b) du générateur de tension de Thévenin.

On peut considérer qu'un générateur de tension idéal est un générateur de tension de Thévenin avec une résistance interne nulle $R_g = 0$.

II.2. Associations de dipôles

Les associations de résistors de résistances connues, nous permettent d'obtenir des tensions à leurs bornes, ou des intensités de courant les traversant différentes de celles imposées par le générateur du circuit.

II.2.a Diviseur de tension

Considérons des résistors de résistance R_1, R_2 et R_3 branchés en série comme illustré Figure 2.15

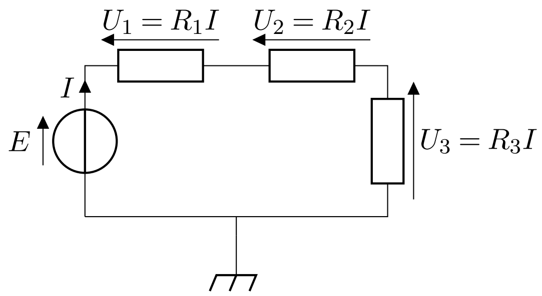


Figure 2.15 – Circuit électrique diviseur de tension

Nous souhaitons obtenir la valeur de la tension U_2 aux bornes du résistor de résistance R_2 en fonction des résistances du circuit et de la tension E du générateur idéal.

Il n'y a pas de noeud dans ce circuit, l'intensité I est donc le même dans tout le circuit (le "débit"du courant électrique n'est pas dévisé).

Utilisons la loi des mailles. Orientons toutes les tensions dans le même sens, le sens trigonométrique : on a seulement à orienter la tension du générateur qui devient $-E$, ainsi

$$0 = -E + U_1 + U_2 + U_3.$$

On peut exprimer les tensions des résistors grâce à la loi d'Ohm

$$0 = -E + R_1 I + R_2 I + R_3 I.$$

On obtient une expression de l'intensité I en fonction de la tension du générateur et des résistances du circuit

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Nous pouvons utiliser cette expression de l'intensité pour exprimer la tension aux bornes de n'importe quelle résistor grâce à la loi d'Ohm, en autre le résistor de résistance R_2

$$U_2 = R_2 I$$

$$U_2 = R_2 \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$U_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Ce montage électrique nous permet de diviser la tension E d'un générateur en exploitant la tension aux bornes de résistors branchés en série.

♥ Définition

La loi du diviseur de tension donne la tension U_k aux bornes d'une résistance R_k branchée en série avec d'autres résistances R_1, R_2 ... R_n en fonction de la tension U aux bornes de l'ensemble des n résistances

$$U_k = U \frac{R_k}{\sum_{i=1}^{n} R_i}.$$

II.2.b Diviseur de courant

Considérons des résistors de résistance R_1, R_2 et R_3 branchés en parallèle comme illustré Figure 2.16

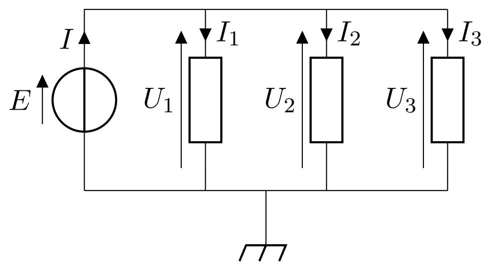


Figure 2.16 – Circuit électrique diviseur de courant

Nous souhaitons obtenir la valeur de l'intensité du courant I_3 circulant au travers du résistor de résistance R_3 en fonction des résistances du circuit et de l'intensité du courant fourni par le générateur idéal.

D'après la loi des mailles, on a une première maille pour laquelle

$$0 = -E + U_1$$

une deuxième pour laquelle

$$0 = -E + U_2$$

et une troisième pour laquelle

$$0 = -E + U_3.$$

Il vient donc que $E = U_1 = U_2 = U_3$, les tensions aux bornes des résistors sont les mêmes (on pouvait aussi voir que les résistors partagent les mêmes potentiels à leurs bornes).

Utilisons maintenant la loi des noeuds. Dans le premier noeud l'intensité du courant se divise de telle manière que

$$I = I_1 + I'.$$

Dans le deuxième noeud

$$I' = I_2 + I_3.$$

Finalement

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

On peut exprimer l'intensité du courant traversant les résistor en fonction de leur tension grâce à la loi d'Ohm

$$I = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}$$

or comme les tensions sont les mêmes, il vient que

$$I = E\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right).$$

La tension aux bornes des résistors est donc

$$E = I\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

On peut alors exprimer l'intensité du courant I_3 parcourant le résistor de résistance R_3

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}$$

$$I_3 = \frac{E}{R_3} = \frac{1}{R_3}E$$

$$I_3 = \frac{1}{R_3} I \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$I_3 = I \frac{\frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Ce montage électrique nous permet de diviser l'intensité du courant I d'un générateur en exploitant le courant circulant dans des résistors branchés en parallèle.

♥ Définition

La loi du diviseur de courant donne l'intensité du courant I_k circulant dans une résistance R_k branchée en parallèle avec d'autres résistances R_1, R_2 ... R_n en fonction de l'intensité du courant I traversant l'ensemble des n résistances

$$I_k = I \frac{\frac{1}{R_k}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}}.$$

II.2.c Résistances d'entrée et de sortie

Cette année, nous allons utiliser des appareils compliqués (multimètre, oscilloscope, générateur de fonctions, etc.) qui se branchent sur un circuit électrique avec seulement deux fils, donc comme des dipôles.

Du point de vue du circuit, ces appareils se comportent soit comme des dipôles actifs (générateur de fonctions), soit comme des dipôles passifs (multimètre, oscilloscope).

Pour comprendre l'impact qu'ont ces appareils sur le circuit, il nous faut connaître leur résistance de sortie pour les dipôles actifs, et leur résistance de sortie pour les dipôles passifs. Les valeurs de ces grandeurs sont données dans les notices fournies par le constructeur.

- **Résistance de sortie** Un appareil se comportant dans un circuit comme un dipôle actif linéaire est modélisable par un générateur de Thévenin présentant une certaine résistance interne. Cette résistance est appelée **résistance de sortie** de l'appareil et notée R_s.

  Exemple
  La résistance de sortie R_s d'un générateur de fonction est de l'ordre de $50\ \Omega$. Branché aux bornes d'une résistance de l'ordre de 1 kΩ, donc très supérieur à R_s, il se comporte pratiquement comme un générateur idéal.

- **Résistance d'entrée** Un appareil se comportant dans un circuit comme un dipôle passif linéaire est caractérisée par sa **résistance d'entrée** notée R_e et définie telle que

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

  avec U_e la tension imposée entre les fils de connexion de l'appareil **prise en convention récepteur**, et I_e l'intensité du courant traversant l'appareil. Pour le circuit, l'appareil est équivalent à un résistor de résistance R_e.

  Exemple
  La résistance d'entrée d'un oscilloscope R_e est de l'ordre de 1 M$\Omega = 1.10^6\ \Omega$. Branchés en parallèle

sur une résistance moyenne de 1 kΩ, donc bien plus faible que R_e, l'oscilloscope ne perturbe pas le fonctionnement du circuit.
La résistance d'entrée du multimètre qu'on utilise en TP (Metrix MTX 203) en mode voltmètre R_e présente une résistance d'entrée comprise entre 10 MΩ et 500 kΩ selon le calibre. Branchés en parallèle sur une résistance moyenne de 1 kΩ, donc bien plus faible que R_e, l'oscilloscope ne perturbe pas le fonctionnement du circuit.
La résistance d'entrée du multimètre qu'on utilise en TP en mode ampèremètre R_e présente une résistance d'entrée comprise entre 100 Ω et 0,01 Ω selon le calibre. Branchés en parallèle sur une résistance moyenne de 1 kΩ, donc bien plus importante que R_e, l'oscilloscope ne perturbe pas le fonctionnement du circuit.

II.3. Dipôles électrocinétique fondamentaux du régime variable

II.3.a Résistor

La loi d'Ohm est encore valable en régime variable.
En convention récepteur

$$u(t) = Ri(t)$$

et en convention générateur

$$u(t) = -Ri(t).$$

Les lois du diviseur de tension et du diviseur de courant sont également encore valable.

La puissance instantanée reçue par un résistor de résistance R est notée $\mathcal{P}_R(t)$. Son expression est la même que la puissance reçue par un résistor en régime stationnaire

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

Grâce à la loi d'Ohm on peut réexprimer cette relation

$$\mathcal{P}_R(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{R} = Ri^2(t).$$

Comme la résistance R est positive, la puissance reçue par le résistor de la part du circuit est toujours positive, il ne peut que recevoir de l'énergie de la part du circuit. Cette énergie est ensuite convertie en énergie thermique, ce qui se traduit par l'échauffement du composant. Ce phénomène porte le nom de **l'effet Joule**.

Attention si c'est la tension $u(t)$ qui est imposée dans le circuit, il faut exprimer $\mathcal{P}_R(t)$ en fonction $u(t)$, soit

$$\mathcal{P}_R(t) = \frac{u^2(t)}{R}.$$

Lorsque la tension est fixée dans un circuit, plus la résistance du circuit est importante, plus la puissance reçue est faible, et donc plus l'énergie dissipée par effet Joule est faible.

Si c'est c'est l'intensité du courant $i(t)$ qui est imposée, il faut exprimer $\mathcal{P}_R(t)$ en fonction $i(t)$, soit

$$\mathcal{P}_R(t) = Ri^2(t).$$

Lorsque l'intensité du courant est fixé, plus la résistance du circuit est importante, plus la puissance reçue est importante, et donc plus l'énergie dissipée par effet Joule est importante.

C'est pour cela que l'on utilise des lignes à hautes tensions pour faire fournir l'électricité sur de longues distances : on fixant un tension $u(t)$ importante mais en utilisant des câbles électriques de résistance R très importante on réduit les pertes par effet Joule, car $1/R$ est très faible.

Si on utilisait des lignes à hautes intensités, c'est le courant qui serait imposé et la puissance serait proportionnelle à la fois à l'intensité et à la résistante des câbles qui est très importante : on aurait de fortes pertes par effet Joule car les câbles ont des résistances importantes.

II.3.b Générateurs idéal

De la même manière qu'en régime stationnaire, le générateur idéal de tension variable impose entre ses bornes une tension notée $e(t)$ appelée **force électromotrice** qui peut être, par exemple

- une **tension sinusoïdale** telle que
$$e(t) = E_0 \cos(\omega t)$$
avec les constantes E_0 l'amplitude de la tension et ω la pulsation. La pulsation est liée à la fréquence de telle manière que
$$\omega = 2\pi f$$
et son unité est le rad.s^{-1}.
- un **échelon de tension** tel que
$$e(t) = 0 \quad \text{si} \quad t < t_0 \qquad \text{et} \qquad e(t) = E_0 \quad \text{si} \quad t > t_0$$
avec la constante E_0 l'amplitude de tension.

Le schéma du générateur de tension idéal en régime variable est identique à celui du régime stationnaire. On l'étudie en convention générateur.

II.3.c Le condensateur

Le condensateur est un dipôle linéaire. Il est indispensable dans presque tous les circuits électriques en régime variable, c'est-à-dire pour toutes les applications qui traitent de signaux dépendant du temps, cela va des enceintes hautes fidélités (hifi) à l'ordinateur en passant par les téléphones portables.

Un condensateur est constitué de deux surfaces métalliques en regard. Le schéma électrique d'un condensateur rappelle cette disposition comme cela est illustré Figure 2.17.

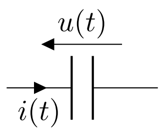


Figure 2.17 – Schéma électrique d'un condensateur en convention récepteur

C'est sur cette disposition que repose le principe de fonctionnement du condensateur. Le condensateur accumule une charge $q(t)$ sur la surface métallique située à l'extrémité de la flèche représentant la tension $u(t)$, et une charge $-q(t)$ sur l'autre surface. Comme ces deux quantités de charges s'annulent, le condensateur ne stocke pas la charge.

La faculté d'un condensateur à accumuler des charges $q(t)$ et $-q(t)$ sur ses surfaces en fonction d'une tension imposée à ses bornes $u(t)$ est appelée **la capacité** du condensateur. Elle est notée C et a pour unité le **farad**, dont le symbole est F. Elle est liée à la charge $q(t)$ et à la tension $u(t)$ de telle manière que

$$\boxed{q(t) = Cu(t)}$$

en convention récepteur et

$$q(t) = -Cu(t)$$

en convention générateur.

Or la définition de l'intensité du courant étant

$$i(t) = \frac{\mathrm{d}q(t)}{\mathrm{d}t}$$

on peut obtenir la relation caractéristique du condensateur en exprimant $q(t)$ en fonction de $u(t)$ et C

$$i(t) = \frac{\mathrm{d}Cu(t)}{\mathrm{d}t}$$

et comme C ne dépend pas du temps

$$\boxed{i(t) = C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}}$$

en convention récepteur, et

$$i(t) = -C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}$$

en convention générateur.

On constate que la relation caractéristique du condensateur est une relation différentielle.

Lorsque les charges $q(t)$ et $-q(t)$ sont nulles aux bornes du condensateur, on dit qu'**il est déchargé**. On voit également, si $q(t) = 0$, que $Cu(t) = 0$, C étant différent de 0, c'est la tension $u(t)$ aux bornes du condensateur qui est nulle.

OdG : les valeurs numériques des capacités sont très variables. Comme le farad est une unité extrêmement grande, les valeurs les plus utilisées vont du pF (picofarad) au mF (millifarad) en passant par le µF (microfarad), ordre de grandeur le plus répandu.

Pour les tensions avec des basses fréquences, on peut considérer que la durée caractéristique de variation de la tension est importante ($f \propto 1/\mathrm{d}t$, si f faible alors $\mathrm{d}t$ est important), ainsi $\mathrm{d}u(t)/\mathrm{d}t$ est faible, donc $i(t)$ est faible aussi.

Dans le cas limite où la fréquence est nulle, c'est-à-dire que la tension est continue, l'intensité du courant tend vers 0, **le condensateur agit comme un interrupteur ouvert pour les basses fréquences de tension.**

Pour les tensions avec des hautes fréquences, on peut considérer que la durée caractéristique de variation de la tension est faible ($f \propto 1/\mathrm{d}t$, si f importante alors $\mathrm{d}t$ est faible), ainsi $\mathrm{d}u(t)/\mathrm{d}t$ est important, donc $i(t)$ est important aussi.

Pour le cas limite où la fréquence est très grande, l'intensité est aussi importante, le condensateur laisse circuler le courant librement **le condensateur agit comme un interrupteur fermé pour une tension continue.**

On peut calculer la puissance instantanée $\mathcal{P}_C(t)$ reçue par un condensateur de capacité C (on se place donc en convention récepteur)

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

or en convention récepteur

$$i(t) = C\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}$$

donc

$$\mathcal{P}_C(t) = Cu(t)\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}.$$

Or on sait que la dérivée du carré d'une fonction $f(t)$ est

$$\left(f^2(t)\right)' = 2f(t)f'(t)$$

donc le produit d'une fonction et de sa dérivée est égal à la moitié de la dérivée du carré de cette fonction

$$f(t)f'(t) = \frac{1}{2}\left(f^2(t)\right)'$$

ainsi

$$u(t)\frac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}u^2(t)}{\mathrm{d}t}.$$

La puissance instantanée $\mathcal{P}_C(t)$ reçue par un condensateur est donc

$$\mathcal{P}_C(t) = \frac{1}{2}C\frac{\mathrm{d}u^2(t)}{\mathrm{d}t}.$$

La capacité C étant constante dans le temps, on peut généraliser la dérivation

$$\mathcal{P}_C(t) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}Cu^2(t)\right).$$

Or la puissance instantanée $\mathcal{P}_C(t)$ reçue par le condensateur correspond à la dérivée de l'énergie reçue par le condensateur $\mathcal{E}(t)$, soit

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

Cette énergie reçue par le condensateur correspond à **l'énergie électrique** stockée par le condensateur $\mathcal{E}(t) \equiv \mathcal{E}_{\text{élec}}(t)$, et on voit qu'elle est telle que

$$\mathcal{P}_C(t) = \frac{\mathrm{d}\mathcal{E}_{\text{élec}}(t)}{\mathrm{d}t}$$

or

$$\mathcal{P}_C(t) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}Cu^2(t)\right)$$

donc

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

Le condensateur ne consomme pas d'énergie, il la stocke sous forme d'énergie électrique $\mathcal{E}_{\text{élec}}(t)$ qu'il peut restituer.

Quand la puissance $\mathcal{P}_C(t)$ est positive, le condensateur stocke de l'énergie électrique fourni par le circuit, quand la puissance $\mathcal{P}_C(t)$ est négative, c'est le condensateur qui donne de l'énergie au circuit.

II.3.d La bobine

Les bobines sont des dipôles indipensables dans les applications de fortes puissance (moteur de TGV par exemple). En traitement du signal les bobines ont été remplacées par des éléments qui simulent leur comportement et qui sont plus facilement miniaturalisables.

La loi de la bobine reliant la tension à ses bornes et le courant qui la traverse est aussi une relation différentielle

$$\boxed{u(t) = L\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}}$$

où L est appelée **inductance** de la bobine. L'inductance s'exprimer en **henry**, unité dont le symbole est H.

La bobinne est créée grâce à un fil électrique enroulé. Le schéma électrique d'un condensateur rappelle cette configuration de base.

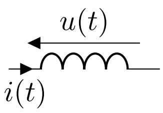


Figure 2.18 – Schéma électrique d'une bobine en convention récepteur

OdG : les valeurs numériques des inductances varient du millihenry (mH) au henry (H).

Pour les courants de des basses fréquences, on peut considérer que la durée caractéristique de variation de l'intensité est importante ($f \propto 1/\mathrm{d}t$, si f faible alors $\mathrm{d}t$ est important), ainsi $\mathrm{d}i(t)/\mathrm{d}t$ est faible, donc $u(t)$ est faible aussi.

Dans le cas limite où la fréquence est nulle, c'est-à-dire que la tension est continue, la tension aux bornes de la bobine est nulle, la différence de potentielle est nulle, la bobine se comporte comme un fil, **la bobine agit comme un interrupteur fermé pour les basses fréquences de courant.**

Pour les courants de hautes fréquences, on peut considérer que la durée caractéristique de variation de la tension est faible ($f \propto 1/\mathrm{d}t$, si f importante alors $\mathrm{d}t$ est faible), ainsi $\mathrm{d}i(t)/\mathrm{d}t$ est important, donc $u(t)$ est important aussi.

Pour le cas limite où la fréquence est très grande, la tension est aussi importante, la différence de potentiels aux bornes de la bobine est importante, **la bobine agit comme un interrupteur ouvert pour un courant continu.**

On peut calculer la puissance instantanée $\mathcal{P}_L(t)$ reçue par une bobine d'inductance L

$$\mathcal{P}_L(t) = u(t)i(t) = Li(t)\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}$$

$$\mathcal{P}_L(t) = \left(\frac{1}{2}Li^2(t)\right).$$

De manière analogue au condensateur la bobine stocke à l'instant t une énergie qui correspond à **une énergie magnétique**

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

La bobine ne consomme pas d'énergie, elle la stocke sous forme d'énergie magnétique $\mathcal{E}_{\text{magné}}(t)$ qu'elle peut restituer.

Quand la puissance $\mathcal{P}_L(t)$ est positive, la bobine stocke de l'énergie magnétique qui est fournie par le circuit, quand la puissance $\mathcal{P}_L(t)$ est négative, c'est la bobine qui donne de l'énergie au circuit.

Puissance perdue par effet Joule dans une ligne à haute tension

Modélisons une centrale électrique par une générateur idéal délivrant une tension E et une habitation par un résistor de résistance R_h (on ne considère pas les transformateur des hautes tensions, entre 230 kV et 33 kV, vers les moyennes tensions, entre 33 kV et 1000 V, vers la tension du secteur valant 220 V).

La centrale et l'habitation sont reliées par une ligne à haute tension qui peut être modélisé par un fil idéal et un résistor de résistance R_l.

Le schéma électrique du modèle est présenté ci-dessous.

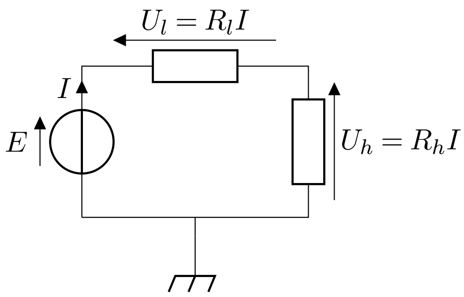


Figure 2.19 – Circuit électrique modélisant le transport de l'électricité d'une centrale vers une habitation.

La puissance fournie par la centrale est

$$\mathcal{P}_c = EI.$$

La puissance reçue par l'habitation est

$$\mathcal{P}_h = U_h I.$$

La puissance reçue par la ligne à haute tension, et donc perdue par effet Joule lors du transport de l'électricité est

$$\mathcal{P}_l = U_l I$$

c'est-à-dire

$$\text{soit} \quad \mathcal{P}_l = \frac{U_l^2}{R_l} \quad \text{soit} \quad \mathcal{P}_l = R_l I^2.$$

Faut-il diminuer la résistance du fil R_l ou l'augmenter pour diminuer la puissance perdue $\mathcal{P}_l$?

Pour le savoir nous devons recherchée la ou les grandeurs dont la ou les valeurs nous sont imposées. Dans notre situation c'est la **la puissance fournie par la centrale $\mathcal{P}_c$ qui est fixée**. Nous devons donc apparaître $\mathcal{P}_c$ dans l'expression de la perte de puissance par effet Joule $\mathcal{P}_l$.

On voit que dans $\mathcal{P}_l$, on peut remplacer l'expression de l'intensité du courant I par une expression faisant intervenir la puissance fixe $\mathcal{P}_c$

$$I = \frac{\mathcal{P}_c}{E}$$

ainsi

$$\boxed{\mathcal{P}_l = R_l I^2 = R_l \frac{\mathcal{P}_c^2}{E^2}.}$$

Ainsi **pour diminuer la puissance perdue par effet Joule** $\mathcal{P}_l$ lorsque la puissance fournie est fixée, nous pouvons jouer sur deux leviers : soit nous **diminuons la résistance R_l du fil** ; soit nous **augmentons la tension E délivrée** par la centrale électrique (cette augmentation de la tension E en gardant une puissance fournie $\mathcal{P}_c$ fixe est réalisée grâce à des transformateurs).

Augmenter la tension E délivrée par la centrale revient à **augmenter la tension** U_l aux bornes de la ligne haute-tension car

$$E = U_l + U_h$$

ce qui justifie que la tension des lignes à hautes tension soit importante, d'où leur nom.

A.N. Tension ligne à haute tension $U_l = 100$ kV ; longueur ligne à haute tension $d = 200$ km ; résistance linéique ligne à haute tension $R_l/d = 0,05\ \Omega$.m^{-1}.

$$R_l = \frac{R_l}{d} \times d = 5.10^{-2} \times 2,00.10^5 = 10\ \text{k}\Omega$$

$$I = \frac{U_l}{R_l} = \frac{100.10^3}{1.10^4} = 10\ \text{A}.$$

$$P_l = U_l I = 100.10^3 \times 10 = 1.10^6\ \text{W}.$$

Cette perte par effet Joule $\mathcal{P}_l$ dû à la résistance des câbles haute-tension, de l'ordre de 1 MW, représente 1 à 2% de la puissance fournie par une centrale électrique $\mathcal{P}_c$, qui est, elle, de l'ordre de 100 à 50 MW.

Synthèse

Connaissances

- Sources de tension.
- Systèmes à comportement résistifs.
- Associations de deux résistances. Pont diviseurs de tension et de courant.
- Système à comportement capacitif : modèle du condensateur idéal. Relation entre charge et tension : capacité d'un condensateur. Énergie électrique stockée.
- Système à comportement inductif : modèle de la bobine idéale. Relation entre intensité et tension : inductance d'une bobine. Énergie magnétique stockée.

Savoir-faire

- **Relier** l'intensité d'un courant électrique au débit de charges.
- **Modéliser** une source en utilisant la représentation de Thévenin.
- **Exprimer** la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance.
- **Remplacer** une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente.
- **Exploiter** des ponts diviseurs de tension ou de courant.
- **Exploiter** l'expression fournie de la capacité d'un condensateur en fonction de ses caractéristiques.
- **Établir** l'expression de l'énergie stockée dans un condensateur et dans une bobine.