

PHYSIQUE 4

CIRCUITS ÉLECTRIQUES DANS L'ARQS

Expériences

- ☞ Caractéristique d'un générateur réel

Table des matières

I	Electricité en régime continu	2
1	Lois de Kirschhoff	2
1.1	Courant électrique	2
1.1.1	Définitions	2
1.1.2	Conventions	2
1.1.3	Ordres de grandeurs et mesure	2
1.1.4	Loi des nœuds	3
1.2	Tension électrique	3
1.2.1	Définitions	3
1.2.2	Ordre de grandeur et mesure	3
1.2.3	Loi des mailles	4
1.2.4	Mesures à l'oscilloscope	4
2	Dipôles	4
2.1	Généralités	4
2.1.1	Définitions et conventions	4
2.1.2	Caractéristique d'un dipôle	5
2.1.3	Puissance et énergie électriques	5
2.2	Dipôles usuels	5
2.2.1	Générateurs idéaux	5
2.2.2	Résistances	5
2.2.3	Générateurs réels	5
2.3	Associations de dipôles	6
2.3.1	Association de résistances	6
2.3.2	Association de générateurs	6
2.3.3	Diviseur de tension	7
2.3.4	Diviseur de courant	7
2.4	Résistances d'entrée et de sortie	7
2.4.1	Définitions et exemples	7
2.4.2	Utilisation	7
2.4.3	Mesures	8

On va étudier dans ce chapitre les lois de l'électricité qui régissent la majorité des expériences d'électronique que vous pourrez réaliser cette année. Le cadre principal est l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) dans lequel tout se passe comme si la vitesse de la lumière était infinie. Nous verrons dans quel cadre on pourra faire cette approximation et donc comment des variations de tension ou de courant se répercute sur l'ensemble d'un circuit électrique. Toutefois, nous étudierons dans un premier temps le régime continu afin de bien fixer les notations et conventions et découvrir les premières lois.

Première partie

Electricité en régime continu

1 Lois de Kirschhoff

1.1 Courant électrique

1.1.1 Définitions

Un **courant électrique** est un déplacement d'ensemble (donc macroscopique) de particules chargées.

Dans les cas étudiés cette année, les particules chargées peuvent être des électrons (dans les métaux) ou des ions (dans les solutions électrolytiques). Il peut aussi s'agir d'autres particules dans d'autres cas plus particuliers (supraconducteurs, semi-conducteurs, plasmas). Puisque tant les électrons que les ions ont une charge multiples de la charge élémentaire, la quantité de charge qui se déplace est **quantifiée** : c'est un multiple de la charge élémentaire.

Le déplacement d'ensemble peut être causé par connexion d'un générateur à un circuit électrique ou sans contact par une onde (plaques à induction, antenne de télévision ou de téléphone portable, transformateurs)

Pour mesurer le courant électrique, on compte la quantité de charges électriques dq qui traverse une section S du conducteur par unité de temps dt . Schéma.

On note mathématiquement :

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

où i est le courant en ampère (A), dq une charge en coulomb (C), et dt une durée en seconde (s). Cette notation signifie que le courant est la dérivée de la charge par rapport au temps.

1.1.2 Conventions

Lorsqu'on applique un champ électrique à une solution électrolytique (par exemple de l'eau salée, contenant les ions Na^+ et Cl^-), les anions se déplacent dans une direction et les cations dans l'autre. Par convention, on choisit que le sens du courant est le sens de déplacement des porteurs de charges positifs. C'est aussi le sens de la borne positive à la borne négative du générateur.

Attention

Dans un conducteur métallique, les électrons vont dans le sens opposé à celui du courant (les électrons sont des porteurs de charge négatifs).

Pour les mesures, on choisit le sens que l'on veut (c'est ce qu'on appelle un choix arbitraire), que l'on représente par une flèche le long du fil. On peut donc avoir un courant positif (s'il est mesuré dans le même sens que celui de la convention) ou négatif (s'il est mesuré dans l'autre sens). Le courant électrique est une **grandeur algébrique** puisqu'il a un signe. Ce n'est pas grave d'avoir un courant négatif, ça veut juste dire qu'il est positif dans l'autre sens !

1.1.3 Ordres de grandeurs et mesure

L'intensité d'un courant électrique peut varier énormément en fonction de l'application considérée. On peut donner comme exemples :

- l'électronique signal (ordinateurs, téléphones portables) : de l'ordre du mA ;
- l'usage domestique : de l'ordre de l'ampère

- l'électrotechnique (motrices TGV, usines) : jusqu'au kA
- foudre : jusqu'à la centaine de kA.

L'appareil utilisé pour mesurer le courant électrique est un ampèremètre, symbolisé par un A encadré. L'ampèremètre se branche **en série**, le courant entre par la borne rouge A ou mA, et ressort par la borne noire COM. Un ampèremètre idéal ne perturbe pas du tout le circuit et est équivalent à un fil. Ainsi, branché en parallèle, il crée un court-circuit !

1.1.4 Loi des nœuds

La charge électrique est une grandeur conservative comme la masse : il n'est pas possible de faire disparaître ou apparaître de la charge électrique.

Imaginons alors un **nœud**, point de rencontre de plusieurs conducteurs. On représente les nœuds en électricité par un point épais. On choisit par convention de compter tous les courants i_n comme positifs si ils vont vers le nœud. Pendant un temps dt , la charge accumulée par le nœud est :

$$dq = dq_1 + dq_2 + dq_3 + \dots + dq_N = \sum_{n=1}^N i_n dt.$$

Or il est impossible d'accumuler de la charge dans un conducteur, ni d'en détruire, on doit donc avoir $dq = 0$. La condition sur les courants est donc :

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0.$$

Un **nœud** est un embranchement entre plusieurs fils, représenté par un point épais. La **loi des nœuds** stipule qu'en un nœud électrique, la somme des courants entrant est égale à la somme des courants sortants.

Une conséquence de cette loi est que le long d'un conducteur, le courant est le même partout puisqu'il n'y a pas d'accumulation ni de destruction ou création de charges. Nous verrons dans la deuxième partie à quelle condition sur la vitesse de variation du courant cette propriété est toujours valable.

1.2 Tension électrique

1.2.1 Définitions

Dans un circuit électrique, les charges sont mises en mouvement par un champ électrique. Ce champ est dû à la différence de potentiel électrique entre différents points du circuit.

Analogie avec l'hydrodynamique : le courant électrique est l'analogie du débit massique (on compte la quantité d'eau qui traverse une section de fleuve pendant un temps donné), alors que la tension est l'analogie de la différence d'altitude entre deux points du fleuve (ce qui met en mouvement l'eau).

On note V_A le potentiel électrique du point A, il se mesure en volt V. C'est une grandeur qui n'a aucun intérêt si elle est donnée toute seule : il faut une référence (c'est comme dire que Dijon est à 300 km sans préciser de quoi).

On choisit la valeur zéro du potentiel électrique où l'on veut (tout comme on choisit la valeur 0 de l'altitude pour un fleuve différemment selon les pays), c'est le point que l'on appelle **la masse**.

La **tension électrique** est la différence de potentiel entre 2 points : $U_{AB} = V_A - V_B$. Elle se mesure donc en volt. On a directement les propriétés : $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$ (additivité des tensions) et $U_{BA} = -U_{AB}$. On peut donc avoir des tensions négatives, c'est aussi une grandeur algébrique.

Avec un schéma, il est possible d'alléger la notation en représentant la tension par une flèche allant de B à A (attention au sens!).

1.2.2 Ordre de grandeur et mesure

La tension est aussi une grandeur électrique dont l'ordre de grandeur varie grandement en fonction de l'usage :

- électronique : de l'ordre du millivolt au volt ;
- usage domestique : de l'ordre de la centaine de volt (220 V ou 380 V en France) ;
- électrotechnique ou ligne haute tension : de l'ordre de la centaine de kV ;
- foudre : de l'ordre de la dizaine de MV.

La tension entre deux point se mesure avec un voltmètre, symbolisé par un V encadré. Le voltmètre se branche **en parallèle**, en reliant la borne rouge V au point A et la borne noire COM au point B. Un voltmètre idéal ne perturbe pas le circuit, il est équivalent à un coupe-circuit (un interrupteur ouvert), donc il modifie grandement le circuit si branché en série (mais pas grave contrairement à un ampèremètre mal branché).

1.2.3 Loi des mailles

Considérons un circuit composé de n points A_1, A_2, \dots, A_n . Alors si on considère la somme :

$$U = U_{A_2 A_1} + U_{A_3 A_2} + \dots + U_{A_n A_{n-1}} + U_{A_1 A_n} = \sum_{i=1}^n U_{A_{i+1} A_i}$$

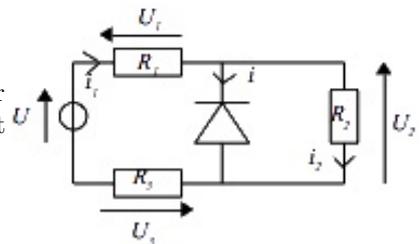
où l'on note pour simplifier $A_{n+1} = A_1$, alors on peut changer chaque tension par une différence de potentiel :

$$\begin{aligned} U &= \sum_{i=1}^n V_{A_{i+1}} - V_{A_i} = \sum_{i=1}^n V_{A_{i+1}} - \sum_{i=1}^n V_{A_i} \\ &= \sum_{j=2}^{n+1} V_{A_j} - \sum_{i=1}^n V_{A_i} \\ &= V_{A_{n+1}} - V_{A_1} = 0 \end{aligned}$$

La loi des mailles stipule que l'addition de toutes les tensions le long d'une maille (en faisant bien évidemment attention aux orientations) donne un résultat nul.

Les lois de Kirschhoff correspondent à la loi des nœuds et la loi des mailles.

Exercice : comment brancher l'ampèremètre ou le voltmètre pour mesurer i_1 ou U_2 ? On donne $i_1 = 3,0 \text{ A}$, $i_2 = 4,0 \text{ A}$, $U_1 = 2,0 \text{ V}$, $U_2 = 3,0 \text{ V}$ et $U_3 = 1,0 \text{ V}$. Que valent U et i ?



1.2.4 Mesures à l'oscilloscope

Un oscilloscope est en fait un ensemble de 2 ou 4 voltmètres, tous reliés à la même masse (la borne noire). Si en plus on utilise un GBF, la masse est commune au GBF et à l'oscilloscope (reliés par la terre). Dans le montage précédent, comment brancher l'oscilloscope pour observer i_2 ? Est-il possible d'observer U en même temps ?

2 Dipôles

2.1 Généralités

2.1.1 Définitions et conventions

Un **dipôle** est un composant électrique à deux "pattes" (résistances, condensateurs, bobines, piles, diodes, etc) par opposition aux multipôles qui en ont plus que deux (transistors, circuits intégrés, etc).

Dans ce chapitre on s'intéressera pas à la manière dont les dipôles sont fabriqués ni de quoi ils sont constitués. On les considèrera comme des boîtes noires. Par exemple, une portion très complexe d'un circuit peut être considérée comme un dipôle (schéma).

Pour cette vision boîte noire on va se fixer deux conventions :

- la **convention récepteur** : la tension et le courant ont des sens opposés. C'est généralement le cas pour les dipôles qui consomment de l'électricité ;
- la **convention générateur** : la tension et le courant sont de même sens. C'est généralement le cas pour les dipôles qui produisent de l'électricité.

Ces deux conventions sont compatibles, par exemple sur un schéma avec une pile alimentant une lampe.

2.1.2 Caractéristique d'un dipôle

Il y a souvent un lien entre la tension aux bornes d'un dipôle et le courant qui le traverse, cette relation permet de distinguer les différents types de dipôles.

On donne souvent la relation $i = f(U)$ et le graphe correspondant, on appelle cette relation la **caractéristique du dipôle**. Exemple pour une résistance : $i = \frac{U}{R}$. On peut aussi donner la **caractéristique tension- courant** $U = g(i)$ (pour une résistance $U = Ri$).

Sur le graphique de la caractéristique, chaque point de la courbe est un **point de fonctionnement** du dipôle, c'est-à-dire un couple (courant, tension) auquel il est susceptible de fonctionner. L'intérêt est qu'en associant deux caractéristiques, on peut déterminer le point de fonctionnement (c'est à dire le courant et la tension) d'un circuit. Exemple : pile + lampe.

2.1.3 Puissance et énergie électriques

Pour calculer la puissance électrique, il faut savoir quelle convention est utilisée.

- en convention **récepteur**, la puissance **consommée** par le dipôle est $P = Ui$. Elle est positive ou négative (une puissance consommée négative correspond à une puissance effectivement fournie par le dipôle);
- en convention **générateur**, la puissance **fournie** par le dipôle est $P = Ui$. Elle est positive ou négative (une puissance fournie négative correspond à une puissance effectivement consommée par le dipôle).

L'énergie est quant à elle calculée, à puissance constante par la formule $E = P\Delta t$ (à puissance variable $E = \int P dt$) où E est l'énergie consommée (ou fournie) par le dipôle pendant le temps Δt .

2.2 Dipôles usuels

2.2.1 Générateurs idéaux

Une **source de tension** est un générateur idéal de tension : elle impose la tension U_0 à ses bornes, quelle que soit l'intensité du courant i qui la traverse. On ne peut donc que les associer en série, jamais en dérivation. On la représente par un cercle traversé par le circuit électrique. Sa caractéristique est une droite parallèle à l'axe représentant l'intensité.

Une **source de courant** est un générateur idéal de courant : elle impose le courant i_0 qui la traverse, quelle que soit la tension U à ses bornes. On ne peut donc que les associer en dérivation, jamais en série. On la représente aussi par un cercle barré perpendiculairement au circuit électrique. Sa caractéristique est une droite parallèle à l'axe représentant la tension.

2.2.2 Résistances

Dans la plupart des conducteurs, on s'aperçoit qu'il y a proportionnalité entre la tension aux bornes du conducteur et le courant qui le traverse. On appelle la constante de proportionnalité la **résistance** du conducteur (fonction de ses dimensions et du matériau utilisé).

Un tel conducteur est appelé un **conducteur ohmique** car il suit la **loi d'Ohm** : $U = Ri$, où U est la tension aux bornes du conducteur, i le courant qui le traverse et R sa résistance en ohm (symbole Ω). Les conducteurs ohmiques sont des dipôles passifs, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas créer eux-mêmes du courant donc leur caractéristique passe par le point ($U=0, i=0$), on utilise donc implicitement la convention récepteur pour écrire la loi d'Ohm.

La résistance R d'un conducteur ohmique dépend du matériau dont il est constitué et de ses dimensions (elle augmente quand L augmente ou S diminue). Pour un fil électrique, nous considérerons que $R = 0 \Omega$, c'est-à-dire que l'on négligera la résistance des fils.

La puissance reçue par un conducteur ohmique est $P = Ui = Ri^2 = \frac{U^2}{R}$. Elle est dissipée sous forme de chaleur (expérimentalement, un conducteur ohmique chauffé quand un courant le traverse), c'est l'**effet Joule**. L'effet Joule peut-être bénéfique (chauffage électrique, appareil à raclette, ampoule à incandescence), ou au contraire et la plupart du temps nuisible (nécessité des ventilateurs pour un ordinateur par exemple, de plus en plus important que S diminue).

2.2.3 Générateurs réels



Caractéristique d'un générateur réel



⊖ 5 min

On branche un générateur sur une décade de résistance, et un voltmètre mesure la tension délivrée par le générateur. On part d'une résistance très élevée (par exemple $1\text{ M}\Omega$), et on diminue progressivement la valeur de la résistance. Lorsque la résistance devient de l'ordre de la dizaine d'ohm, on remarque une chute de la tension délivrée par le générateur

Pour un générateur réel, on se rend compte expérimentalement que la caractéristique n'est pas celle d'un générateur idéal, on observe une loi affine : $U = e - Ri$ où e est la **force électromotrice** aussi appelée **tension à vide** (celle qu'on mesurerait en branchant uniquement un voltmètre idéal sur la source).

R est la résistance interne du générateur, elle est de l'ordre de $50\ \Omega$. Lorsque la résistance interne est nulle, on est en présence d'un générateur idéal.

Schéma équivalent.

Ceci constitue le **modèle de Thévenin**, suivi par la plupart des générateurs réels.

2.3 Associations de dipôles

2.3.1 Association de résistances

Il est possible d'associer deux résistances R_1 et R_2 de deux manières différentes :

- en série : le courant qui les traverse toutes les deux est le même. Elles sont "l'une à la suite de l'autre". La tension aux bornes des deux résistances est $U = U_1 + U_2 = R_1i + R_2i = (R_1 + R_2)i$, donc l'association des deux résistances est équivalente à une résistance équivalente $R_s = R_1 + R_2$.
- en parallèle : la tension aux bornes des deux résistances est la même. Elles sont "l'une à côté de l'autre". Le courant total qui passe par les deux résistances est alors $i = i_1 + i_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \frac{U}{R_p}$, donc l'association de deux résistances en parallèle est équivalente à une résistance équivalente $R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

On peut généraliser à N résistances :

- en série : $R_s = \sum_{i=1}^N R_i$
- en parallèle : $\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$

Application calculer le courant délivré par un générateur de tension idéal de 5V alimentant une résistance $R_1 = 100\ \Omega$ associée en parallèle à deux résistances en série $R_2 = 80\ \Omega$ et $R_3 = 20\ \Omega$.

2.3.2 Association de générateurs

- Générateurs de tension :

On peut facilement associer en série deux générateurs de tension U_1 et U_2 (c'est ce que l'on fait quand on introduit plusieurs piles tête-bêche dans un appareil électrique), on obtient alors un générateur équivalent de tension $U = U_1 + U_2$.

Par contre si on met deux générateurs de tension U_1 et U_2 en parallèle, quelle est la tension aux bornes des générateurs ? Il faut que U_1 soit égal à U_2 , et donc en pratique, chaque générateur va essayer d'imposer sa tension à l'autre, résultant en la destruction des générateurs.

- Générateurs de courant :

On peut facilement associer en dérivation deux générateurs de courant i_1 et i_2 , on obtient alors un générateur équivalent de courant $i = i_1 + i_2$.

Par contre si on met deux générateurs de courant i_1 et i_2 en série, quelle est le courant qui traverse les deux générateurs ? Il faut que i_1 soit égal à i_2 , et donc en pratique, chaque générateur va essayer d'imposer son courant à l'autre, résultant en la destruction des générateurs.

2.3.3 Diviseur de tension

On considère deux résistances R_1 et R_2 en série, alimentées par une tension U .

Alors le courant qui traverse les deux résistances est $i = \frac{U}{R_1 + R_2}$, et donc la tension aux bornes de la deuxième résistance est $U_2 = R_2 i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$.

La tension U est donc multipliée par un coefficient plus petit que 1, d'où le nom de diviseur de tension.

Schéma.

En pratique : on voit la plus grosse tension aux bornes de la résistance la plus grande.

2.3.4 Diviseur de courant

On considère deux résistances R_1 et R_2 en parallèle, alimentées par un courant total i .

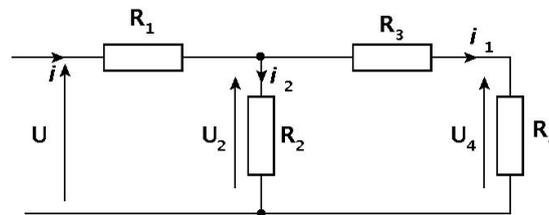
Alors la tension aux bornes des deux résistances est $U = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i$, et la tension aux bornes de la deuxième résistance est $U_2 = R_2 i_2$.

On a donc $i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$, donc le courant i est multiplié par un coefficient plus petit que 1, d'où le nom de diviseur de courant.

Schéma.

En pratique : le courant passe plus par la branche de résistance la plus faible, c'est le "chemin le plus facile" pour lui. C'est le danger des courts circuits.

Exercice d'application : déterminer la valeur de $U_4 = f(U)$.



2.4 Résistances d'entrée et de sortie

2.4.1 Définitions et exemples

On a vu qu'un générateur n'est jamais idéal : on modélise donc tout générateur par un générateur de Thévenin, c'est-à-dire une source de tension idéale suivie d'une résistance interne. Toute partie de circuit contenant un générateur est aussi modélisable avec le modèle de Thévenin, elle est donc équivalente à une source de tension idéale en série avec une résistance, c'est la **résistance de sortie**. C'est par exemple le cas d'un générateur, d'un GBF, de la sortie d'un amplificateur, etc. Schéma.

De la même manière, on modélise toute partie du circuit réceptrice par une résistance appelée résistance d'entrée.

Pour un filtre ou un amplificateur (ou autres) on a à la fois une entrée et une sortie, on modélise donc l'élément par une résistance d'entrée, un générateur idéal et une résistance de sortie. Schéma.

Ordres de grandeur

- Résistance de sortie générateur $\sim 50\Omega$
- Résistance d'entrée voltmètre $\sim 1M\Omega$
- Résistance d'entrée ampèremètre $\sim 10\Omega$
- Résistance entrée haut-parleur $\simeq 8\Omega$

2.4.2 Utilisation

La plupart du temps on va brancher les différents éléments les uns aux autres, par exemple un microphone (=générateur) sur un amplificateur puis sur un haut-parleur. La tension aux bornes du haut-parleur dépend alors des différentes résistances d'entrée et de sortie.

Exemple : si on branche un générateur de tension $U_0 = 5 \text{ V}$ avec une résistance de sortie $R_i = 50\Omega$ sur un voltmètre de résistance d'entrée $R_V = 1M\Omega$, on mesure :

$$U = \frac{R_V}{R_i + R_V} U_0 \simeq U_0.$$

De manière plus générale, si la résistance d'entrée est bien plus grande que la résistance de sortie, on a le même comportement qu'à vide (c'est ce qui est cherché la plupart du temps). Par contre si on le branche sur un haut-parleur de résistance d'entrée $R_{HP} = 8\Omega$, la tension aux bornes du haut-parleur est :

$$U = \frac{R_{HP}}{R_{HP} + R_i} U_0 = 0,7V.$$

On voit donc qu'il y a une perte de tension. En fait une grande partie de la tension est aux bornes de la résistance de sortie qui la dissipe par effet Joule, et donc le générateur est moins efficace. De manière générale, dès que la résistance d'entrée est de l'ordre de la résistance de sortie ou inférieure, il y a un abaissement de la tension.

2.4.3 Mesures

Pour mesurer une résistance d'entrée, un ohmmètre suffit, ou bien on peut alimenter le dipôle avec plusieurs tensions et regarder le courant puis faire une régression linéaire.

Pour mesurer une résistance de sortie, ce n'est pas possible : le circuit débiterait alors du courant. On utilise donc la méthode de la demi-tension qui consiste à mesurer la tension à vide U_0 (avec un voltmètre), puis de brancher le générateur sur une résistance variable. On mesure la tension aux bornes de la résistance, et la valeur de la résistance telle que $U = U_0/2$ est la même que la valeur de la résistance de sortie (pont diviseur de tension).