Manuel d'électricité

2e édition

Christophe Palermo

Maître de conférences au département Mesures physiques de l'IUT de Montpellier-Sète et à l'Institut d'Électronique et des Systèmes (université de Montpellier).

Jérémie Torres

Maître de conférences au département Mesures physiques de l'IUT de Montpellier-Sète et à l'Institut d'Électronique et des Systèmes (université de Montpellier).

DUNOD

Une autre version de cet ouvrage existe
dans la collection « Parcours IUT »

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Conception graphique de couverture : Élizabeth Riba
Illustration de couverture : © Flegere – Shutterstock.com

© Dunod, 2015, 2020
ISBN 978-2-10-081669-9
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

1 Électricité en régime continu 1

1.1 Grandeurs électriques et outils de représentation 2
1.1.1 Notions de base de l'électricité 2
1.1.2 Grandeurs et modèles 4
1.1.3 Représentation des tensions et des courants 10
1.2 Symboles électriques et modèles équivalents 13
1.2.1 Description des phénomènes physiques 14
1.2.2 Symboles pour lier les grandeurs 16
1.2.3 Un premier modèle électrique 19
1.3 Les lois de Kirchhoff 20
1.3.1 La loi des mailles 20
1.3.2 Loi des nœuds 22
1.4 Loi d'Ohm, conventions récepteur et générateur 23
1.4.1 Loi d'Ohm 23
1.4.2 Convention récepteur 23
1.4.3 Convention générateur 25
1.4.4 Choix d'une convention 26
1.5 Résistances équivalentes 31
1.5.1 Montage série 31
1.5.2 Montage parallèle (ou en dérivation) 32
1.5.3 Analogie hydraulique 34
1.6 Ponts diviseurs 39
1.6.1 Pont diviseur de tension 39
1.6.2 Pont diviseur de courant 41
1.7 Méthode des motifs 42
1.8 Puissance électrique en régime continu 46
1.8.1 Puissance consommée 47
1.8.2 Puissance générée 49
1.8.3 Cas de la résistance : loi de Joule 50
1.8.4 Théorème de Boucherot en régime continu 50

2 Réseaux linéaires en régime continu 55
2.1 Définitions générales . . . 55
2.1.1 Réseau électrique . . . 55
2.1.2 Nœuds, branches, mailles . . . 56
2.1.3 Problème d'électricité . . . 57
2.2 Méthode de Kirchhoff . . . 58
2.2.1 Problématique . . . 58
2.2.2 Choix des équations indépendantes . . . 59
2.3 Principe de superposition . . . 67
2.3.1 Principe physique . . . 67
2.3.2 Principe de superposition en électricité . . . 68
2.3.3 Énoncé . . . 70
2.3.4 Extinction d'une source . . . 70
2.3.5 Exercices corrigés . . . 72
2.4 Théorème de Millman . . . 81
2.4.1 Énoncé général . . . 81
2.4.2 Le circuit à deux nœuds . . . 85
2.4.3 Énoncé du théorème de Millman dans les circuits à deux nœuds : motif de Millman . . . 86
2.5 Théorèmes du dipôle linéaire . . . 101
2.5.1 Dipôles . . . 101
2.5.2 Dipôles actifs et dipôles passifs . . . 102
2.5.3 Dipôles linéaires . . . 104
2.5.4 Théorème de Thévenin . . . 107
2.5.5 Mesure de R_θ par la méthode de la demi-tension . . . 119
2.5.6 Associations de sources de tension . . . 121
2.5.7 Théorème de Norton . . . 123
2.5.8 Associations de sources de courant . . . 132
2.5.9 Transformation Thévenin-Norton . . . 133

3 Du régime variable au régime alternatif sinusoïdal 141
3.1 Représentation temporelle et grandeurs caractéristiques 141
3.1.1 Régime périodique . . . 142
3.1.2 Régime alternatif . . . 146
3.1.3 Régime alternatif sinusoïdal . . . 148
3.1.4 Caractérisation d'un signal périodique . . . 151
3.2 Puissances électriques en régime alternatif . . . 158
3.2.1 Puissance et grandeurs associées . . . 159
3.2.2 Théorème de Boucherot . . . 166
3.3 Composants réactifs . . . 168

3.3.1 Capacité 168
3.3.2 Inductance 172
3.3.3 Modélisation d'une ligne électrique 179

4 Réseaux linéaires en régime alternatif sinusoïdal 181
4.1 Outils mathématiques du régime alternatif sinusoïdal . . 182
4.1.1 Les phaseurs 183
4.1.2 Généralisation de la loi d'Ohm et impédances complexes 185
4.1.3 Propriétés des impédances 188
4.1.4 Phaseurs et les puissances 194
4.2 Les lois et théorèmes en régime alternatif sinusoïdal . . 195
4.2.1 Lois de Kirchhoff 195
4.2.2 Ponts diviseurs de tension et de courant 211
4.2.3 Théorèmes du dipôle actif linéaire 217
4.2.4 Le principe de superposition 219

5 Régime transitoire 235
5.1 Utilisation d'un oscilloscope pour l'étude du régime transitoire 236
5.2 Le régime transitoire dans un circuit RC 238
5.2.1 Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance 239
5.2.2 Énergie stockée par la capacité 247
5.2.3 Applications du régime transitoire 249
5.2.4 Notion de filtrage 257
5.3 Le régime transitoire dans un circuit RL 260
5.3.1 Établissement et rupture du courant dans la bobine . 260
5.3.2 Énergie stockée par l'inductance 265

1

Électricité en régime continu

L'objectif de ce premier chapitre est tout d'abord d'introduire les différentes grandeurs électriques d'intérêt telles que la tension, le courant, la résistance ou encore la puissance. Nous nous plaçons pour cela en régime continu, c'est-à-dire dans la situation où les différentes quantités décrites restent constantes dans le temps. L'électricité étant invisible, il peut être difficile d'avoir une réflexion intuitive sur le comportement et les liens entre les grandeurs électriques. Aussi, chaque fois que cela sera possible, nous raisonnerons par analogie hydraulique ou gravitationnelle. Nous aborderons en parallèle les différents outils de représentation des grandeurs électriques en nous arrêtant sur la notion de convention générateur et convention récepteur.

Nous décrirons ensuite les différents symboles électriques au travers de la notion de schéma équivalent. En recensant les phénomènes physiques, nous modéliserons notre premier circuit et ferons apparaître sans aucun calcul le modèle de Thévenin des différents éléments.

Puis, nous aborderons les lois fondamentales de l'électricité en régime continu. La loi d'Ohm, qui relie les tensions et les courants dans les résistances, et les lois de Kirchhoff aussi appelées lois des mailles et des nœuds, seront décrites. Ainsi, nous pourrons dresser les formules très utiles des ponts diviseurs et déterminer la résistance équivalente d'une association.

Enfin, nous présenterons la méthode des motifs, qui permet de résoudre un problème électrique simple en se ramenant, selon le contexte, à une résistance unique ou à un pont diviseur (de tension ou de courant).

1.1 Grandeurs électriques et outils de représentation

1.1.1 Notions de base de l'électricité

a) Conducteurs et isolants

Le courant électrique est un déplacement de charges électriques. De ce point de vue, on peut définir deux grandes familles de matériaux :

— celle des **isolants** qui s'opposent au passage du courant et qui sont composés de matériaux tels que le verre, le bois ou encore les composés plastiques ;

— celle des **conducteurs** (et des **semi-conducteurs**), qui permettent au courant de circuler plus ou moins facilement : les câbles métalliques et les résistors.

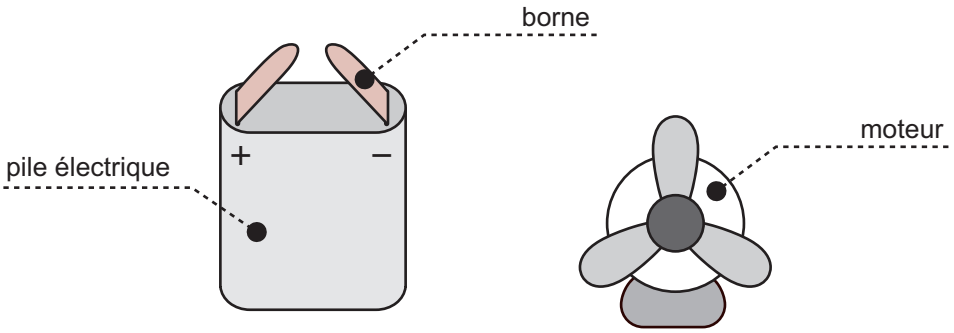
Dans le domaine de l'électricité, plus précisément appelé électrocinétique, dès lors que l'on s'intéresse au mouvement des charges électriques et à leur comportement de groupe, nous considérons plus particulièrement les conducteurs et les semi-conducteurs.

b) Conversion énergétique

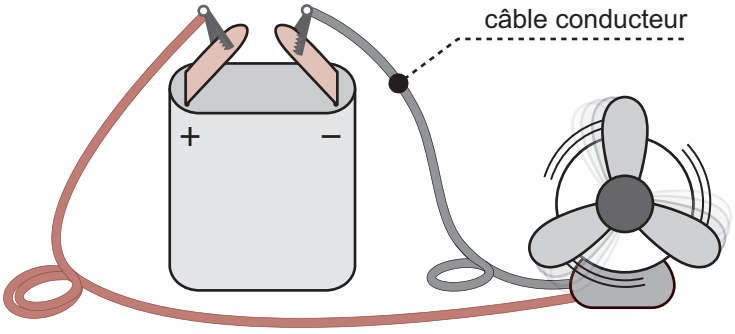
L'électricité est ce que l'on appelle une énergie secondaire, c'est-à-dire qu'elle n'existe pas à l'état de gisement naturel. Elle ne s'extrait pas, mais se produit au travers d'une conversion depuis une autre forme d'énergie. Pour ce faire, on utilise des **convertisseurs énergétiques**, comme les alternateurs (qui convertissent de l'énergie mécanique en énergie électrique alternative), les panneaux photovoltaïques (qui convertissent l'énergie de la lumière solaire en électricité sous forme continue) ou encore les piles et les accumulateurs (où l'énergie est stockée sous forme chimique afin d'être convertie en énergie électrique continue). De la même façon, l'électricité ne s'utilise pas en tant que telle : on ne peut par exemple pas la consumer comme on le ferait pour le charbon. Il faut donc avoir recours pour son utilisation à une conversion énergétique.

c) Un premier montage

Nous allons introduire progressivement les différentes grandeurs de l'électricité, en commençant par la tension et le courant. Prenons pour cela l'exemple d'une pile connectée à un petit ventilateur, comme reporté sur le volet (a) de la figure 1.1.



a *La pile et le moteur ne sont pas connectés*



b *La pile et le moteur sont connectés*

Figure 1.1 — **Exemple de conversion énergétique illustrant les grandeurs de tension et de courant.**

• *La pile*

La pile est un générateur de tension continue et de courant continu. Cela veut dire que, en fonctionnement, ces deux grandeurs électriques gardent des valeurs constantes dans le temps. La pile possède deux bornes, qui présentent chacune un potentiel différent. Le potentiel le plus haut est noté avec un signe plus (+) et le potentiel le plus bas est noté avec un signe moins (−). Attention, ces deux signes permettent juste de noter la hauteur relative des deux potentiels mais ne présagent en aucun cas des signes de ces derniers.

• *Le moteur*

Le moteur est un récepteur d'électricité. Dans notre exemple, il reçoit du courant continu dans la mesure où il fonctionne avec une pile. C'est également un convertisseur puisqu'il convertit l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie mécanique.

• *La tension*

Tant que les bornes de la pile ne sont pas connectées, la seule grandeur électrique présente est la différence entre les potentiels des deux bornes de la pile. Cette différence de potentiels, notée d.d.p., est appelée la **tension**. Si l'on ne relie pas les deux bornes par le biais d'un conducteur, on n'observe rien d'autre que la tension.

• *Le courant électrique*

Le courant électrique s'établit à partir du moment où il existe un lien électrique entre les deux bornes, c'est-à-dire lorsqu'un conducteur les relie. Dans ce cas, la tension (c'est-à-dire la d.d.p.) entraîne un mouvement de charges. Au même titre que pour une rivière, le mouvement des charges électriques constitue ce que l'on appelle le **courant**. Nous n'entrerons pas dans les détails des particules et ions constituant le courant électrique (qui varient selon que l'on se trouve dans une solution ionique ou dans un conducteur), et nous retiendrons que le sens conventionnel du courant électrique est celui des charges positives.

Le **sens conventionnel** du courant électrique est le sens de déplacement des charges positives.

Le courant ne pouvant s'établir que lorsqu'il existe un lien électrique entre les bornes $+$ et $-$ du générateur, on pourra retenir que les charges électriques ne quittent le générateur que s'il existe un chemin pour y revenir.

1.1.2 Grandeurs et modèles

Au regard de l'expérience que nous venons de décrire, on peut se poser un certain nombre de questions. Par exemple, la pile est-elle adaptée au moteur ? Sinon, quelle pile doit-on choisir ? Combien de temps le moteur va-t-il pouvoir tourner avant que la pile ne se décharge complètement ? Y aura-t-il

un échauffement excessif du moteur ou, même, de la pile ? Comment peut-on faire pour contrôler la vitesse du moteur ?

C'est à ce genre de questions que l'on tente de répondre en étudiant l'électricité, et l'on a besoin pour apporter ces réponses de définir et de maîtriser les **grandeurs** électriques et de dresser des **modèles**.

a) Grandeurs électriques

Afin de mieux cerner les grandeurs électriques, nous proposons de faire une analogie hydraulique. Attention toutefois à bien noter que cette analogie, comme toutes celles qui vont suivre dans ce chapitre, n'est valable qu'en régime continu et dans la limite des fluides incompressibles en écoulements laminaires.

• *Le courant électrique*

Le courant électrique décrit le mouvement des charges électriques dans leur ensemble, lorsqu'on les considère comme un flux. À ce titre, le courant est l'analogue hydraulique du débit. L'unité du courant électrique est l'**ampère** (A).

• *Le potentiel électrique*

Le potentiel électrique est une notion plus subtile que le courant. Il est assimilable à la pression statique. Prenons le cas d'un liquide dans une seringue, comme représenté sur la figure 1.2.

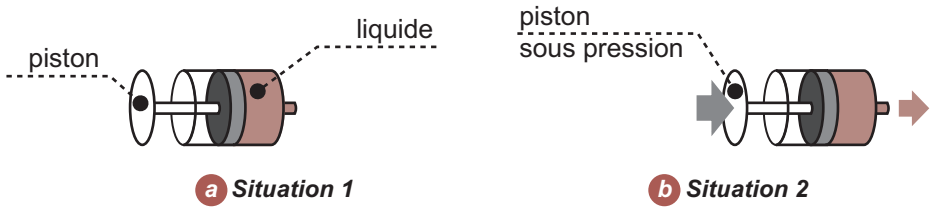


Figure 1.2 — **Analogie hydraulique du potentiel (comparé à la pression) et du courant électrique (comparé au débit volumique).**

— Lorsque la pression du piston est la même que la pression atmosphérique à la sortie de la seringue, comme pour la situation 1, aucun mouvement n'est induit. D'un point de vue électrique, c'est

exactement la même chose : si deux points A et B sont au même potentiel, la tension entre ces points est nulle et le courant électrique ne circule pas.

— En revanche, s'il existe une différence de pressions, comme c'est le cas dans la situation 2, le liquide entre en mouvement. Intuitivement, on peut dire que pour une seringue et un liquide donnés, le débit sera d'autant plus important que la différence de pressions sera grande. En électricité, c'est la différence de potentiels, appelée **tension**, qui va être de la même manière responsable du courant électrique.

L'unité du potentiel et la même que celle de la tension : le **volt** (V).

• *Sens de déplacement du courant*

La seringue ne produit pas la différence de pressions, mais elle la subit. Dans notre analogie électrique, elle décrit par conséquent un récepteur électrique. Au même titre que le liquide se déplace de la pression la plus haute vers la pression la plus basse, le courant électrique conventionnel circule, dans un récepteur, du potentiel le plus haut vers le potentiel le plus bas.

> Dans un **récepteur**, le sens conventionnel du courant électrique est dirigé du potentiel le plus haut (+) vers le potentiel le plus bas (−).

Intéressons-nous au montage de la figure 1.3 et suivons le déplacement du courant conventionnel à partir de la borne +. Pour ce faire, indiquons quatre points A, B, C et D :

— le point A est au potentiel le plus haut car il est relié à la borne + ;
— le point D est au potentiel le plus bas car il est relié à la borne − ;
— le potentiel en B est supérieur au potentiel en C.

La différence de potentiels fait que le courant sort de A, passe par B puis traverse le moteur afin de le faire tourner. Il en ressort en C pour rejoindre le point D. Une fois au point D, le courant est ramené par la pile au point A : dans ces conditions, la pile peut être vue comme une pompe permettant aux charges arrivées au potentiel le plus bas de remonter vers le potentiel le plus haut, alimentant ainsi le cycle. Cette analogie restera vraie pour n'importe quel générateur continu.

> Dans un **générateur**, le sens conventionnel du courant électrique est dirigé du potentiel le plus bas (−) vers le potentiel le plus haut (+).

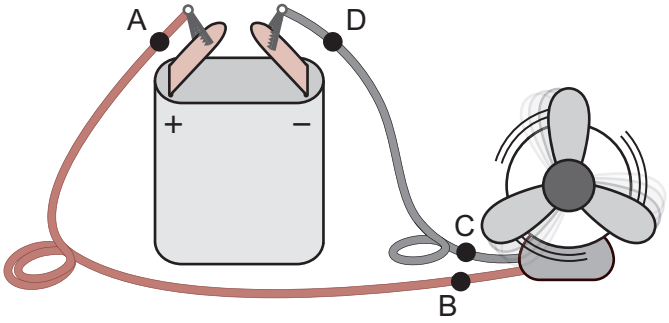


Figure 1.3 — **Illustration du sens de déplacement du courant électrique.**

b) Notion de résistance

La tension et le courant électriques sont liés par la notion de résistance. Pour cela, nous reprenons l'exemple du liquide soumis à des différences de pressions par le biais d'une seringue, à laquelle nous adjoignons des tuyaux de différentes sections, comme reporté sur la figure 1.4.

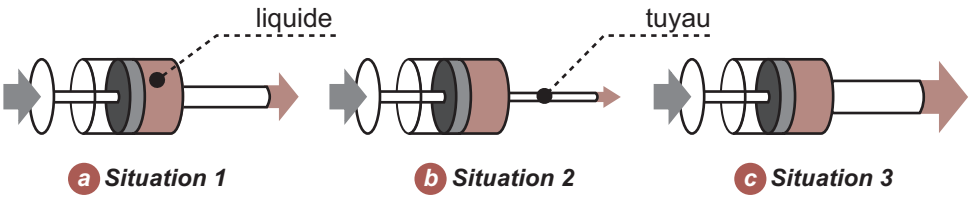


Figure 1.4 — **Pression sur une seringue dans trois situations différentes. (a) Une pression sur la seringue entraîne l'injection du liquide dans un tuyau. Le débit peut être évalué à la sortie du tuyau. (b) Le tuyau est plus étroit que dans la situation 1. Une même pression entraîne un débit injecté moindre. (c) Dans la situation 3, le tuyau est plus large que dans les situations 1 et 2. Une même pression entraîne un débit plus important que dans les deux précédentes situations.**

— Dans la situation 1, une pression sur le piston de la seringue crée une différence de pressions entre l'entrée et la sortie. Le liquide se déplace alors. Électriquement, une tension (d.d.p.) entraîne un courant.