

Yves Granjon

TOUT EN FICHES

EXERCICES ET MÉTHODES D' ÉLECTRICITÉ

LICENCE, CAPES, IUT

2^e
ÉDITION

DUNOD

© Dunod, Paris, 2017, 2023

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-086352-5

Table des matières

Avant-propos

VII

1	Généralités sur les circuits électriques. Lois de Kirchhoff en régime continu	1
	Fiche 1 Définitions et principes fondamentaux	2
	Fiche 2 Conventions	4
	Fiche 3 Dipôles passifs linéaires	4
	Fiche 4 Associations de dipôles	5
	Fiche 5 Régimes électriques	6
	Fiche 6 Lois de Kirchhoff en régime continu	7
	QCM	10
	Vrai ou faux ?	14
	Exercices	16
2	Théorèmes généraux de l'électricité en régime continu	47
	Fiche 1 Théorème de Millman	48
	Fiche 2 Principe de superposition	49
	Fiche 3 Théorèmes de Thévenin et de Norton	50
	Fiche 4 Équivalence Thévenin - Norton	51
	QCM	52
	Vrai ou faux ?	55
	Exercices	57
3	Les circuits électriques en régime sinusoïdal	77
	Fiche 1 Le régime sinusoïdal	78
	Fiche 2 Notion d'impédance	79
	Fiche 3 Modèle complexe d'un circuit en régime sinusoïdal	80
	Fiche 4 Lois et théorèmes de l'électricité en régime sinusoïdal	82
	QCM	84
	Vrai ou faux ?	88
	Exercices	90
4	Les circuits électriques en régime transitoire	121
	Fiche 1 Régime variable et régime transitoire	122
	Fiche 2 Mise en équation des régimes transitoires	123
	Fiche 3 Équations différentielles du premier ordre	124
	Fiche 4 Équations différentielles du deuxième ordre	124
	QCM	127
	Vrai ou faux ?	130
	Exercices	132
5	Puissance et énergie électriques	149
	Fiche 1 Définitions	150
	Fiche 2 Puissance en régime continu	151
	Fiche 3 Puissance en régime sinusoïdal	152
	QCM	154
	Vrai ou faux ?	157
	Exercices	161

6	Quadripôles en régime sinusoïdal	193
	Fiche 1 Définitions et conventions	194
	Fiche 2 Modèles associés aux quadripôles	195
	Fiche 3 Impédances d'entrée et de sortie	197
	Fiche 4 Schémas équivalents des quadripôles	199
	Fiche 5 Associations de quadripôles	200
	QCM	202
	Vrai ou faux ?	205
	Exercices	207
7	La jonction PN et les diodes à semi-conducteurs	241
	Fiche 1 La conduction électrique intrinsèque	242
	Fiche 2 Semi-conducteurs dopés	243
	Fiche 3 La diode à jonction	244
	Fiche 4 Caractéristiques électriques des diodes à jonction	245
	Fiche 5 Polarisation de la diode	247
	Fiche 6 Puissance dissipée dans une diode	247
	Fiche 7 Diodes Zener	248
	QCM	249
	Vrai ou faux ?	252
	Exercices	254
	<i>Formulaire</i>	271
	<i>Index</i>	273

Avant-propos

Cet ouvrage rassemble l'ensemble des éléments essentiels de l'électrocinétique généralement enseignée au cours des premiers cycles scientifiques et technologiques. Il est structuré en sept chapitres qui traitent des notions fondamentales des circuits électriques en régimes continu, sinusoïdal et transitoire.

La présentation de cet ouvrage a été conçue de manière à aborder les différentes notions de manière progressive : au sein de chaque chapitre, le lecteur découvrira d'abord, en quelques pages, l'essentiel du cours où les connaissances indispensables sont présentées, sans démonstration, de manière claire et précise. Il sera ensuite confronté à de nombreux exercices, de difficultés variées. Des simples applications du cours aux cas plus originaux, en passant par des thèmes très classiques, les exercices et problèmes permettront au lecteur de se familiariser avec les bases de l'électricité, puis, en abordant des sujets plus complexes, d'acquérir suffisamment de recul et de savoir-faire pour résoudre avec succès n'importe quel problème d'électrocinétique.

Tous les exercices et problèmes sont entièrement corrigés, la résolution étant systématiquement présentée dans tous ses détails. De nombreux commentaires attireront l'attention de l'étudiant sur les pièges à éviter, sur les techniques à acquérir absolument et sur les astuces lui permettant de progresser plus rapidement. Chaque énoncé est pourvu d'un indicateur de difficulté, de une à trois étoiles (du plus facile au plus difficile).

Il est conseillé de traiter l'ensemble des exercices dans l'ordre, de ne pas négliger tel ou tel qui semble facile, et de ne pas succomber trop rapidement à la tentation de lire la solution. La maîtrise des circuits électriques est indissociable de l'effort fourni à rechercher soi-même les solutions des problèmes proposés.

Au fur et à mesure de sa progression, le lecteur deviendra de plus en plus familier avec les techniques de résolution et acquerra suffisamment de méthode pour aborder avec aisance des problèmes de plus en plus sophistiqués.

L'électrocinétique n'est pas une discipline extrêmement difficile pour qui l'aborde avec rigueur et méthode. Les concepts mathématiques nécessaires sont relativement simples et concernent notamment la trigonométrie, le calcul différentiel et intégral et les nombres complexes. Les formules de mathématiques essentielles sont regroupées au sein d'un formulaire dans les pages qui suivent.

Il est recommandé au lecteur de toujours veiller à respecter les conventions de signes, de sens des flèches de tension ou de courant et d'utiliser systématiquement les unités du système international.

Cet ouvrage ayant été conçu avec le souci constant de la pédagogie et la volonté de rendre les concepts de l'électrocinétique accessibles à chacun, je souhaite que tout étudiant en ayant fait l'acquisition puisse y trouver les clés de sa réussite.

Yves Granjon

Généralités sur les circuits électriques. Lois de Kirchhoff en régime continu

1

MOTS-CLÉS

■ courant ■ tension ■ dipôles passifs ■ dipôles actifs ■ résistance ■ bobine ■ condensateur ■ association en série ■ association en parallèle ■ auto-inductance ■ capacité ■ convention récepteur ■ convention générateur ■ lois de Kirchhoff ■ loi des nœuds ■ loi des mailles ■ générateurs ■ régime continu ■ pont diviseur de tension

Du montage le plus basique au système le plus complexe, tous les circuits électriques obéissent aux mêmes lois simples qui, au final, sont peu nombreuses. Pour être appliquées avec efficacité et conduire aisément à la résolution de problèmes parfois ardues, ces lois doivent être connues et utilisées avec la plus grande rigueur. En particulier, il convient de respecter un certain nombre de conventions sans lesquelles l'approche de cette résolution serait impossible. Ce premier chapitre a pour objectif de familiariser le lecteur avec les outils les plus fondamentaux, dans le cadre du régime de fonctionnement le plus simple : le régime continu.

Définitions et principes fondamentaux

D'une manière générale, tout circuit électrique peut se représenter sous la forme d'un *générateur* d'énergie alimentant un *récepteur* chargé de transformer l'énergie électrique reçue en une autre forme exploitable, les deux dispositifs étant reliés par des conducteurs.

Le fonctionnement d'un circuit électrique est décrit par un transfert de charges entre ces deux éléments (figure 1.1). Il est couramment admis de représenter ce transfert par un flux d'électrons que l'on modélise par un courant électrique traversant les conducteurs. Ce courant électrique (exprimé en ampères) représente la quantité de charges q (en coulombs) traversant une section donnée du conducteur par unité de temps, soit :

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

Les électrons possédant une charge négative, la logique veut que le courant i soit représenté en sens contraire du flux d'électrons.

Dans un circuit composé d'une seule *boucle*, le même courant circule à chaque instant dans tout le circuit.

Générateurs et récepteurs simples possèdent en général deux bornes. Ce sont des **dipôles électriques**. Les dipôles générateurs sont dits **actifs**, ceux qui ne font que consommer de l'énergie sont des **dipôles passifs**.

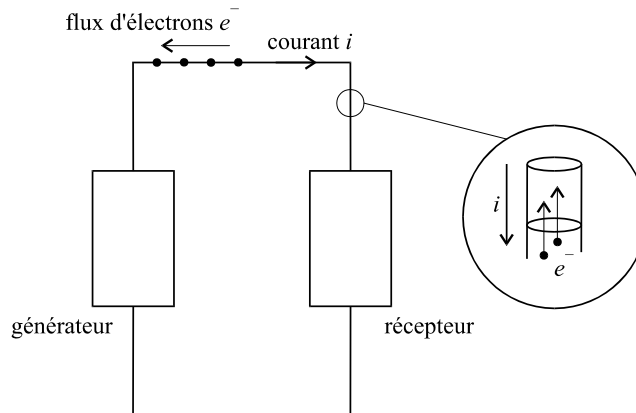


Figure 1.1

Les dipôles actifs les plus fréquemment rencontrés (figure 1.2) sont :

- Le **générateur de tension parfait**, qui délivre une tension e (en volts) et l'impose au dipôle récepteur qui présente donc à ses bornes la même tension e . Le courant qui apparaît alors dans le circuit dépend de e et du récepteur. Cette tension e est la différence de potentiel $V_A - V_B$. La flèche symbolisant cette différence de potentiel est dirigée vers le potentiel le plus élevé. Comme les électrons sont attirés par le point correspondant au potentiel le plus élevé (A), le courant sera orienté, au sortir du générateur, par une flèche dirigée vers le potentiel le plus élevé.

- Le **générateur de courant parfait**, qui impose un courant i au dipôle récepteur. La tension qui apparaît alors aux bornes du dipôle récepteur dépend de i et du récepteur.

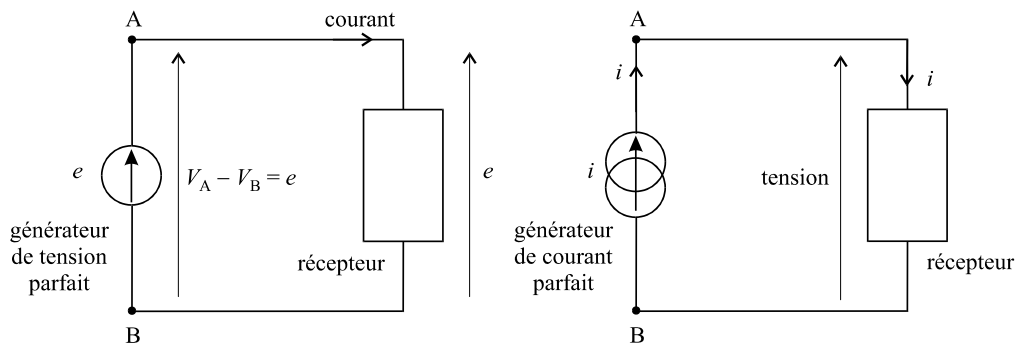


Figure 1.2

Pour un circuit alimenté par un générateur de tension, on considère en général que sa borne B constitue la référence de tension pour l'ensemble du circuit et se trouve donc au potentiel 0 V (on dit aussi à *la masse*).

Sa borne A se trouve donc au potentiel $V_A = e$. On assimile donc toute différence de potentiel entre un point X quelconque et cette référence, au potentiel du point X.

Les générateurs sont dits *parfaits* au sens où la tension délivrée par un générateur de tension parfait ne dépend pas du reste du circuit. De même, un générateur de courant parfait délivre un courant qui ne dépend pas du reste du circuit.

Dans la réalité, les générateurs ne sont pas parfaits et on considère qu'un modèle plus proche de la réalité consiste à associer une résistance en série avec un générateur de tension parfait, ou une résistance en parallèle avec un générateur de courant parfait. Ces résistances sont appelées **résistances internes** des générateurs (figure 1.3).

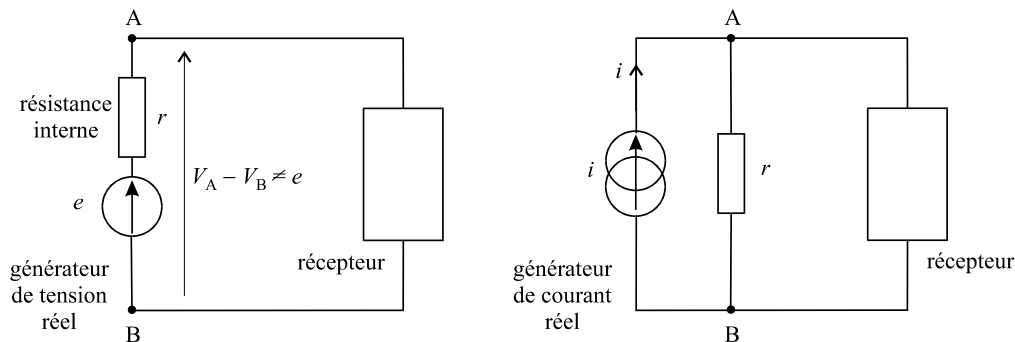


Figure 1.3

Conventions

Dans un circuit simple composé d'un générateur de tension et d'un dipôle récepteur, compte tenu du fait que la même tension règne aux bornes des deux éléments, et que le même courant circule dans tout le circuit, on note que du côté du générateur, courant et tension sont représentés par des flèches dirigées dans le même sens, alors que du côté du récepteur, elles sont dirigées en sens contraires (figure 1.4).

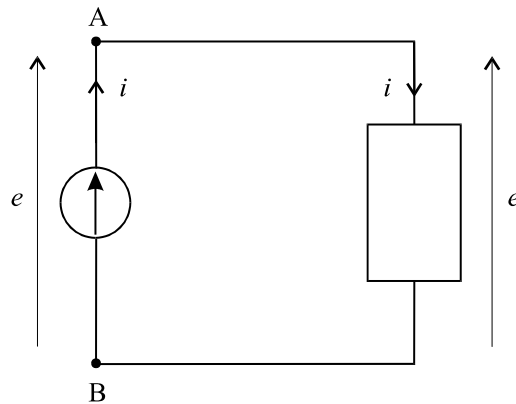


Figure 1.4

Par convention, nous dirigerons systématiquement les flèches des courants et des tensions dans le même sens pour le générateur (convention générateur), et en sens contraires pour tout récepteur (convention récepteur).

En règle générale, un circuit comprend un seul générateur. Toutefois, certains peuvent en contenir plusieurs. Dans ce cas, si un générateur est considéré comme appartenant à la partie réceptrice du circuit, c'est la convention récepteur que nous utiliserons.

Dipôles passifs linéaires

Trois dipôles passifs sont couramment utilisés dans les circuits électriques. Ils ont la particularité de posséder un fonctionnement qui s'exprime sous la forme d'une équation différentielle simple, linéaire, à coefficients constants.

L'équation de fonctionnement d'un dipôle lie la tension à ses bornes et le courant qui le traverse. En supposant que, dans le cas le plus général, ces deux grandeurs sont variables dans le temps, les lois de fonctionnement des trois dipôles passifs usuels sont présentées sur la figure 1.5.

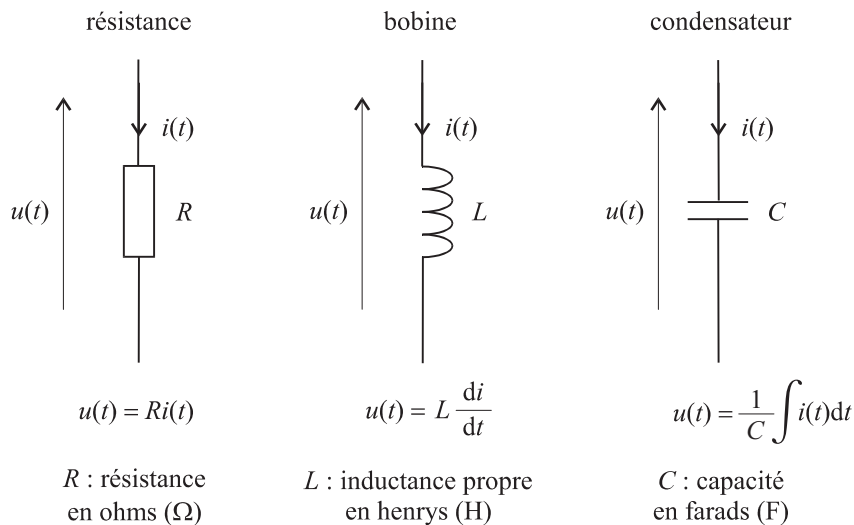


Figure 1.5

La loi de fonctionnement d'une résistance est appelée **loi d'Ohm**.

Fiche 4

Associations de dipôles

Deux dipôles quelconques sont dits **associés en série** si une des bornes de l'un est relié à une des bornes de l'autre, l'ensemble formant un nouveau dipôle.

Ils sont dits **associés en parallèle** si les paires de bornes sont connectées deux à deux (figure 1.6).

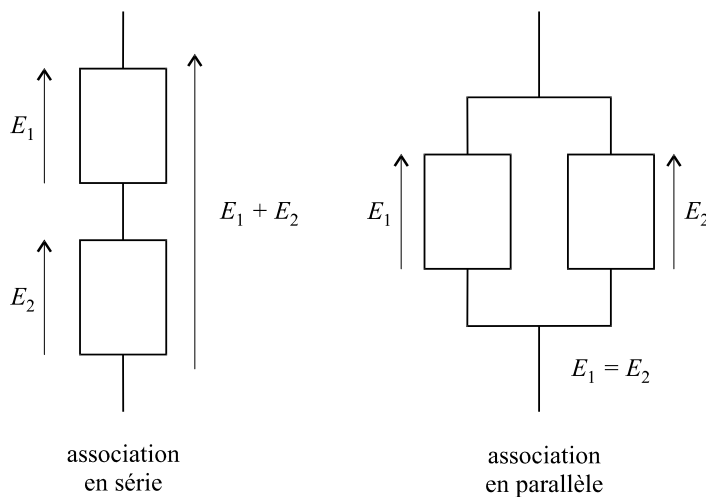


Figure 1.6

Dans le cas de l'association en série, les deux dipôles sont parcourus par le même courant. La tension totale aux bornes de l'ensemble est égale à la somme des deux différences de potentiel aux bornes de chacun des deux dipôles. Dans le cas de l'association

en parallèle, la même différence de potentiel règne aux bornes de chacun des deux dipôles.

En associant des résistances on forme un dipôle qui se comporte comme une résistance, dont la valeur est appelée **résistance équivalente**. Il en est de même en associant des condensateurs. La figure 1.7 présente quelques associations usuelles très simples.

On remarquera que les règles d'associations des résistances et celles d'associations des condensateurs se trouvent inversées.

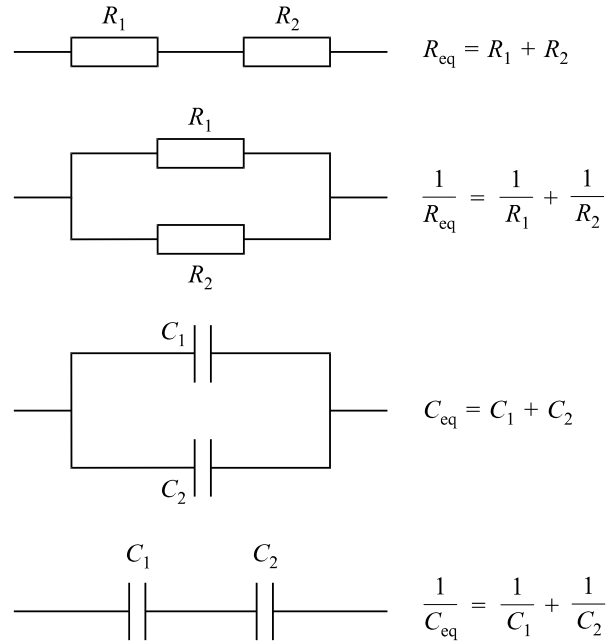


Figure 1.7

Fiche 5

Régimes électriques

Selon la forme de la tension (ou du courant) délivrée par le générateur qui alimente un circuit, on dit que ce circuit fonctionne selon un certain régime :

- s'il délivre une tension constante, le circuit fonctionne en **régime continu**. Les grandeurs continues seront notées avec des lettres majuscules (E pour une tension par exemple).
- s'il délivre une tension variable au cours du temps, nous serons dans le cas d'un **régime variable** et on désignera les grandeurs par des lettres minuscules : $e(t)$, par exemple.
- si la tension délivrée est sinusoïdale : $e(t) = E_0 \cos \omega t$, le **régime** sera dit **sinusoïdal** ou **harmonique**.

Les régimes continus et sinusoïdaux font partie des **régimes** dits **permanents** ou établis. Souvent, les régimes variables surviennent lorsqu'un circuit passe d'un état permanent à un autre. On parle alors de **régimes transitoires**.

Dans un circuit en régime continu, les tensions et courants dans le circuit sont en général continus. Dans un circuit en régime sinusoïdal, tensions et courants sont tous sinusoïdaux, de même fréquence que la source de tension, mais présentant *a priori* des déphasages.

En régime continu, un élément inductif (une bobine) n'a aucun effet. Son équation de fonctionnement :

$$u(t) = L \frac{di}{dt} \quad (1.2)$$

montre bien que, parcourue par un courant constant quelconque, une bobine présentera toujours une différence de potentiel nulle à ses bornes.

De même pour un condensateur, l'équation :

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (1.3)$$

montre que si $u(t) = C^{te}$, on a bien :

$$i(t) = 0 \quad (1.4)$$

Donc, en régime continu, aucun courant ne peut traverser un condensateur. En revanche, tout condensateur qui se voit imposer une tension U présente une charge emmagasinée Q telle que :

$$Q = CU \quad (1.5)$$

Un condensateur parfait possède en outre la propriété de conserver cette charge emmagasinée, une fois retirée l'alimentation U . Ceci, bien évidemment, à condition qu'il soit isolé, c'est-à-dire que ses deux bornes ne soient reliées à aucun autre circuit.

Fiche 6

Lois de Kirchhoff en régime continu

1. Définitions

Réseau électrique. Toute association simple ou complexe de dipôles interconnectés, alimentée par un générateur.

Branche. Partie dipolaire d'un réseau parcourue par un même courant.

Nœud d'un réseau. Tout point du réseau commun à plus de deux branches.

Maille d'un réseau. Tout chemin constituant une boucle et formé de plusieurs branches. Dans le schéma de la figure 1.8, l'association de R_1 , R_2 , R_3 , R_4 et R_5 formant le dipôle AC constitue un réseau électrique alimenté par le générateur de tension E . A, B, C et D sont les nœuds de ce réseau.

Le schéma montre trois mailles. Il en existe d'autres, par exemple, en partant du point A, on peut définir une maille qui comprend R_2 , R_3 , R_5 , qui passe par D, puis C et qui rejoint A en incluant R_1 .

2. Loi des nœuds (première loi de Kirchhoff)

La somme des courants se dirigeant vers un nœud est égale à la somme des courants qui sortent de ce nœud.

Ou encore : la somme algébrique des courants dirigés vers un nœud d'un circuit est nulle (en comptant positivement les courants dirigés vers le nœud et en comptant négativement ceux qui en sortent). Cette loi exprime le fait qu'il ne peut pas y avoir accumulation de charges en un point quelconque d'un conducteur du réseau. Dans notre exemple, on pourra écrire entre autres équations :

$$I_0 = I_1 + I_2$$

$$I_2 = I_3 + I_4$$

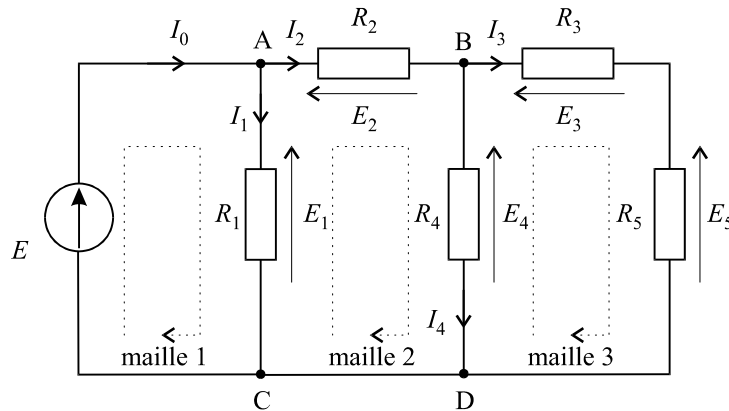


Figure 1.8

3. Loi des mailles (deuxième loi de Kirchhoff)

La somme algébrique des différences de potentiel le long d'une maille, obtenue en parcourant la maille dans un sens donné, est nulle. Les différences de potentiel orientées dans le même sens que le sens de parcours de la maille sont comptées positivement. Les différences de potentiel orientées dans le sens opposé au sens de parcours de la maille sont comptées négativement.

Ainsi, dans notre exemple :

$$\text{Maille 1 : } E - E_1 = 0$$

$$\text{Maille 2 : } E_1 - E_2 - E_4 = 0$$

$$\text{Maille 3 : } E_4 - E_3 - E_5 = 0$$

Ces lois de Kirchhoff sont présentées ici en régime continu (lettres majuscules pour les tensions et les courants). En réalité, elles restent valables quel que soit le régime. Comme ces lois de Kirchhoff, la plupart des résultats présentés dans ce rappel de cours du premier chapitre sont également valables quel que soit le régime. Toutefois, les exercices qui suivent ne concernent que des circuits en régime continu.