



sciences de
l'ingénieur

- Alexander
- Sadiku

Analyse des circuits électriques

Analyse des circuits électriques

Dans la collection « Sciences de l'ingénieur »

BEER, JOHNSTON, Mécanique pour ingénieurs. Vol. 1. Statique
BEER, JOHNSTON, Mécanique pour ingénieurs. Vol. 2. Dynamique
CENGEL, BOLES, LACROIX, Thermodynamique. Une approche pragmatique

Chez le même éditeur

BENSON, Physique. 1. Mécanique, 4^e éd.
BENSON, Physique. 2. Électricité et magnétisme, 4^e éd.
BENSON, Physique. 3. Ondes, optique et physique moderne, 4^e éd.
HECHT, Physique
PÉREZ, LAGOUE, PUJOL, DESMEULES, Physique. Une approche moderne
SÉGUIN, TARDIF, DESCHENEAU, Physique XXI. Tome A. Mécanique
SÉGUIN, TARDIF, DESCHENEAU, Physique XXI. Tome B. Électricité et magnétisme
SÉGUIN, TARDIF, DESCHENEAU, Physique XXI. Tome C. Ondes et physique moderne
TAILLET, VILLAIN, FEBVRE, Dictionnaire de physique, 2^e éd.
WILDI, SYBILLE, Électrotechnique, 4^e éd.

**sciences de
l'ingénieur**

◀ Alexander

◀ Sadiku

Analyse des circuits électriques

Ouvrage original

Fundamentals of Electric Circuits, 3rd edition. Published by McGraw-Hill.

Original edition copyright © 2007 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

French edition copyright © 2012 by Groupe de Boeck s.a. All rights reserved.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : www.deboeck.com

© Groupe De Boeck s.a., 2012
Éditions De Boeck Université
Rue des Minimes 39, B-1000 Bruxelles
Pour la traduction et l'adaptation française

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Imprimé en Italie

Dépôt légal :

Bibliothèque nationale, Paris : janvier 2012

Bibliothèque royale Albert I^{er}, Bruxelles : 2012/0074/048

ISBN 978-2-8041-6602-1

Cet ouvrage est dédié à nos épouses Kikelomo et Hannah. C'est grâce à leur compréhension et encouragement permanent que notre travail a pu aboutir.

Matthew
et
Chuck

Cet ouvrage a été traduit en français par :

Ir. Marius Dancila

Professeur,

Haute École de Namur

Dr. Ir. Dragos Dancila

Assistant de recherche,

Université catholique de Louvain

Les traducteurs remercient les éditions De Boeck et plus particulièrement Madame Florence Lemoine, Madame Mélanie Kuta, Monsieur Fabrice Serville et Monsieur Fabrice Chrétien, pour leur aide et bienveillante attention.

Table des matières

Préface	xiv
Remerciements	xviii
Visite guidée	xxi
Avis aux étudiants	xxiii
Les auteurs	xxv

PREMIERE PARTIE Circuits à courant continu (c.c.) 2

Chapitre 1 Concepts de base 3

1.1	Introduction	4
1.2	Système d'unités de mesure	4
1.3	Charge et courant électrique	6
1.4	Différence de potentiel	9
1.5	Puissance et énergie électrique	11
1.6	Éléments de circuit	15
1.7	† Applications	17
1.7.1	Le tube cathodique TV	
1.7.2	La facture d'électricité	
1.8	† Résolution de problèmes	20
1.9	Résumé du chapitre	23
	Questions récapitulatives	24
	Problèmes à résoudre	24
	Problèmes récapitulatifs	27

Chapitre 2 Lois fondamentales 29

2.1	Introduction	30
2.2	La loi d'Ohm	30
2.3	† Nœuds, branches et boucles	35
2.4	Les lois de Kirchhoff	37
2.5	Résistors en série et diviseur de tension	43
2.6	Résistors en parallèle et diviseur de courant	44
2.7	† Transformations étoile–triangle	52
2.8	† Applications	58
2.8.1	Les systèmes d'éclairage	
2.8.2	L'adaptation des instruments de mesure à c.c.	
2.9	Résumé du chapitre	65
	Questions récapitulatives	66
	Problèmes à résoudre	67
	Problèmes récapitulatifs	78

Chapitre 3 Méthodes d'analyse 81

3.1	Introduction	82
3.2	Analyse nodale	82
3.3	Analyse nodale pour circuits avec sources de tension	88
3.4	Analyse de mailles	92
3.5	Analyse de mailles pour circuits avec sources de courant	97
3.6	† Analyse nodale et de mailles par inspection du circuit	99
3.7	Analyse nodale versus analyse de mailles	103
3.8	Analyse des circuits avec le logiciel <i>PSpice</i>	104
3.9	† Applications : les circuits en c.c. d'un transistor	106
3.10	Résumé du chapitre	111
	Questions récapitulatives	112
	Problèmes à résoudre	113
	Problème récapitulatif	125

Chapitre 4 Théorèmes des circuits 127

4.1	Introduction	128
4.2	Propriété de linéarité	128
4.3	Principe de superposition	130
4.4	Transformation de sources	135
4.5	Théorème de Thévenin	139
4.6	Théorème de Norton	145
4.7	† Variantes pour les théorèmes de Thévenin et de Norton	148
4.8	Transfert de puissance maximale	150
4.9	Vérification des théorèmes de circuit avec <i>PSpice</i>	152
4.10	† Applications	155
4.10.1	Modélisation des sources	
4.10.2	Mesure des résistances	
4.11	Résumé du chapitre	160
	Questions récapitulatives	161
	Problèmes à résoudre	162
	Problèmes récapitulatifs	173

Chapitre 5 Amplificateurs opérationnels **175**

- 5.1 Introduction **176**
- 5.2 Amplificateurs opérationnels **176**
- 5.3 L'ampli op idéal **180**
- 5.4 L'amplificateur inverseur **181**
- 5.5 L'amplificateur non-inverseur **183**
- 5.6 L'amplificateur sommateur **185**
- 5.7 L'amplificateur différentiel **186**
- 5.8 Cascades d'amplis op **189**
- 5.9 Analyse des amplis op avec *PSpice* **193**
- 5.10 † Applications **194**
 - 5.10.1 Convertisseur numérique-analogique
 - 5.10.2 Amplificateurs d'instrumentation
- 5.11 Résumé du chapitre **198**
 - Questions récapitulatives **200**
 - Problèmes à résoudre **201**
 - Problèmes récapitulatifs **212**

Chapitre 6 Condensateurs et inducteurs **213**

- 6.1 Introduction **214**
- 6.2 Condensateurs **214**
- 6.3 Condensateurs en série et en parallèle **220**
- 6.4 Inducteurs **224**
- 6.5 Bobines en série et en parallèle **228**
- 6.6 † Applications **231**
 - 6.6.1 L'intégrateur
 - 6.6.2 Le différenciateur
 - 6.6.3 Le calculateur analogique
- 6.7 Résumé du chapitre **239**
 - Questions récapitulatives **240**
 - Problèmes à résoudre **241**
 - Problèmes récapitulatifs **250**

Chapitre 7 Circuits du premier ordre **251**

- 7.1 Introduction **252**
- 7.2 Circuit *RC* libre de source **252**
- 7.3 Circuit *RL* libre de source **257**
- 7.4 Fonctions singulières **263**
- 7.5 Réponse échelon d'un circuit *RC* **271**
- 7.6 Réponse échelon d'un circuit *RL* **277**
- 7.7 † Circuits ampli op du premier ordre **281**
- 7.8 Analyse transitoire avec *PSpice* **286**
- 7.9 † Applications **290**
 - 7.9.1 Circuits de temporisation
 - 7.9.2 Unité flash photographique
 - 7.9.3 Circuits à relais
 - 7.9.4 Circuit d'allumage d'une automobile
- 7.10 Résumé du chapitre **296**
 - Questions récapitulatives **298**
 - Problèmes à résoudre **299**
 - Problèmes récapitulatifs **309**

Chapitre 8 Circuits du second ordre **311**

- 8.1 Introduction **312**
- 8.2 Valeurs initiales et finales des variables du circuit **313**
- 8.3 Circuit *RLC* série libre de source **317**
- 8.4 Circuit *RLC* parallèle libre de source **324**
- 8.5 Réponse échelon d'un circuit *RLC* série **329**
- 8.6 Réponse échelon d'un circuit *RLC* parallèle **334**
- 8.7 Généralités sur les circuits du second ordre **336**
- 8.8 Circuits du second ordre avec amplis op **341**
- 8.9 Analyse des circuits *RLC* avec *PSpice* **344**
- 8.10 Principe de la dualité **347**
- 8.11 † Applications **351**
 - 8.11.1 Système d'allumage d'automobile
 - 8.11.2 Circuits de lissage
- 8.12 Résumé du chapitre **354**
 - Questions récapitulatives **355**
 - Problèmes à résoudre **356**
 - Problèmes récapitulatifs **365**

**DEUXIEME PARTIE** Circuits à courant alternatif (c.a.) **366****Chapitre 9** Grandeurs sinusoïdales et phaseurs **367**

- 9.1 Introduction **368**
- 9.2 Grandeurs sinusoïdales **369**
- 9.3 Phaseurs **374**
- 9.4 Relations entre phaseurs et éléments de circuit **382**
- 9.5 Impédance et admittance **384**
- 9.6 † Les lois de Kirchhoff dans le domaine phasoriel **387**
- 9.7 Association d'impédances **387**
- 9.8 † Applications **393**
 - 9.8.1 Circuits *RC* de déphasage
 - 9.8.2 Circuits en pont à c.a.
- 9.9 Résumé du chapitre **399**
 - Questions récapitulatives **400**
 - Problèmes à résoudre **400**
 - Problèmes récapitulatifs **409**

Chapitre 10 Analyse des circuits à c.a. **411**

- 10.1 Introduction **412**
- 10.2 Analyse nodale **412**
- 10.3 Analyse de mailles **415**
- 10.4 Théorème de superposition **419**
- 10.5 Transformation de source **422**
- 10.6 Circuits équivalents de Thévenin et de Norton **424**
- 10.7 Circuits à c.a. avec amplis op **428**
- 10.8 Analyse des circuits à c.a. à l'aide de *PSpice* **430**
- 10.9 † Applications **435**
 - 10.9.1 Le multiplicateur de capacité
 - 10.9.2 Oscillateurs
- 10.10 Résumé du chapitre **439**
 - Questions récapitulatives **440**
 - Problèmes à résoudre **441**

Chapitre 11 Puissance en courant alternatif **455**

- 11.1 Introduction **456**
- 11.2 Puissance instantanée et puissance moyenne **456**
- 11.3 Transfert maximal de puissance **462**
- 11.4 Valeur efficace (r.m.s.) **465**
- 11.5 Puissance apparente et facteur de puissance ($\cos\varphi$) **468**
- 11.6 Puissance complexe **471**
- 11.7 † Conservation de l'énergie en c.a. **475**
- 11.8 Amélioration du facteur de puissance **478**
- 11.9 † Applications **480**
 - 11.9.1 Mesure de la puissance et de l'énergie électrique
 - 11.9.2 Coût de la consommation d'électricité
- 11.10 Résume du chapitre **486**
 - Questions récapitulatives **487**
 - Problèmes à résoudre **488**
 - Problèmes récapitulatifs **498**

Chapitre 12 Circuits triphasés **501**

- 12.1 Introduction **502**
- 12.2 Système triphasé équilibré **503**
- 12.3 Système équilibré Y - Y **507**
- 12.4 Système équilibré Y - Δ **510**
- 12.5 Système équilibré Δ - Δ **513**
- 12.6 Système équilibré Δ - Y **514**
- 12.7 Puissance dans un système équilibré **517**
- 12.8 † Systèmes triphasés asymétriques **523**
- 12.9 Utilisation du logiciel *PSpice* pour les circuits triphasés **527**
- 12.10 † Applications **532**

- 12.10.1 Mesure de la puissance en triphasé
- 12.10.2 Le câblage des installations résidentielles

- 12.11 Résumé du chapitre **540**
 - Questions récapitulatives **541**
 - Problèmes à résoudre **542**
 - Problèmes récapitulatives **551**

Chapitre 13 Circuits à couplage magnétique **553**

- 13.1 Introduction **554**
- 13.2 Inductance mutuelle **555**
- 13.3 L'énergie dans un circuit à couplage magnétique **562**
- 13.4 Le transformateur linéaire **565**
- 13.5 Le transformateur idéal **571**
- 13.6 L'autotransformateur idéal **578**
- 13.7 Le transformateur triphasé **581**
- 13.8 *PSpice* pour l'analyse des circuits à couplage magnétique **584**
- 13.9 † Applications **589**
 - 13.9.1 Le transformateur en tant que dispositif de séparation
 - 13.9.2 Le transformateur en tant qu'élément d'adaptation
 - 13.9.3 Distribution de l'énergie électrique
- 13.10 Résumé du chapitre **595**
 - Questions récapitulatives **596**
 - Problèmes à résoudre **597**
 - Problèmes récapitulatifs **609**

Chapitre 14 Réponse en fréquence **611**

- 14.1 Introduction **612**
- 14.2 La fonction de transfert **612**
- 14.3 † L'échelle des décibels **615**
- 14.4 Diagramme de Bode **617**
- 14.5 La résonance d'un circuit série **627**
- 14.6 La résonance d'un circuit parallèle **631**
- 14.7 Filtres passifs **634**
 - 14.7.1 Filtre passe-bas
 - 14.7.2 Filtre passe-haut
 - 14.7.3 Filtre passe-bande
 - 14.7.4 Filtre coupe-bande
- 14.8 Filtres actifs **639**
 - 14.8.1 Filtre passe-bas du premier ordre
 - 14.8.2 Filtre passe-haut du premier ordre
 - 14.8.3 Filtre passe-bande du premier ordre
 - 14.8.4 Filtre coupe-bande (filtre *notch*) du premier ordre
- 14.9 Mise à l'échelle (*scaling*) **644**
 - 14.9.1 Mise à l'échelle (*scaling*) des grandeurs

- 14.9.2 Mise à l'échelle (*scaling*) en fréquence
- 14.9.3 Mise à l'échelle (*scaling*) des valeurs et en fréquence
- 14.10 Utilisation de *PSpice* pour la réponse en fréquence **647**
- 14.11 Utilisation du logiciel *MATLAB* **651**
- 14.12 † Applications **653**
 - 14.12.1 Le récepteur radio
 - 14.12.2 Le téléphone à clavier
 - 14.12.3 Réseau de mixage (audio)
- 14.13 Résumé du chapitre **659**
 - Questions récapitulatives **660**
 - Problèmes à résoudre **661**
 - Problèmes récapitulatifs **670**



TROISIEME PARTIE Analyse avancée des circuits **672**

Chapitre 15 Introduction à la transformée de Laplace **673**

- 15.1 Introduction **674**
- 15.2 Définition de la transformée de Laplace **675**
- 15.3 Propriétés de la transformée de Laplace **678**
- 15.4 L'inverse de la transformée de Laplace **688**
 - 15.4.1 Pôles simples
 - 15.4.2 Pôles multiples
 - 15.4.3 Pôles complexes
- 15.5 L'intégrale de convolution **695**
- 15.6 † Applications aux équations intégrales différentielles **703**
- 15.7 Résumé du chapitre **705**
 - Questions récapitulatives **705**
 - Problèmes à résoudre **706**

Chapitre 16 Applications de la transformée de Laplace **713**

- 16.1 Introduction **714**
- 16.2 Modèles pour les éléments de circuit **714**
- 16.3 Analyse des circuits **720**
- 16.4 Fonctions de transfert **724**
- 16.5 Variables d'état **728**
- 16.6 † Applications **735**
 - 16.6.1 Stabilité du réseau
 - 16.6.2 Synthèse d'un réseau

- 16.7 Résumé du chapitre **743**
 - Questions récapitulatives **744**
 - Problèmes à résoudre **745**
 - Problèmes récapitulatifs **752**

Chapitre 17 Séries de Fourier **753**

- 17.1 Introduction **754**
- 17.2 Séries trigonométriques de Fourier **754**
- 17.3 Considérations sur la symétrie **762**
 - 17.3.1 Symétrie simple ou paire
 - 17.3.2 Symétrie impaire
 - 17.3.3 Symétrie en demi-onde
- 17.4 Applications aux circuits **772**
- 17.5 Puissance active et valeurs efficaces **776**
- 17.6 Séries exponentielles de Fourier **779**
- 17.7 Analyse de Fourier à l'aide du logiciel *PSpice* **785**
 - 17.7.1 Transformée de Fourier discrète (DFT)
 - 17.7.2 Transformée de Fourier rapide (FFT)
- 17.8 † Applications **791**
 - 17.8.1 Analyseurs de spectre
 - 17.8.2 Filtres
- 17.9 Résumé du chapitre **794**
 - Questions récapitulatives **796**
 - Problèmes à résoudre **797**
 - Problèmes récapitulatifs **806**

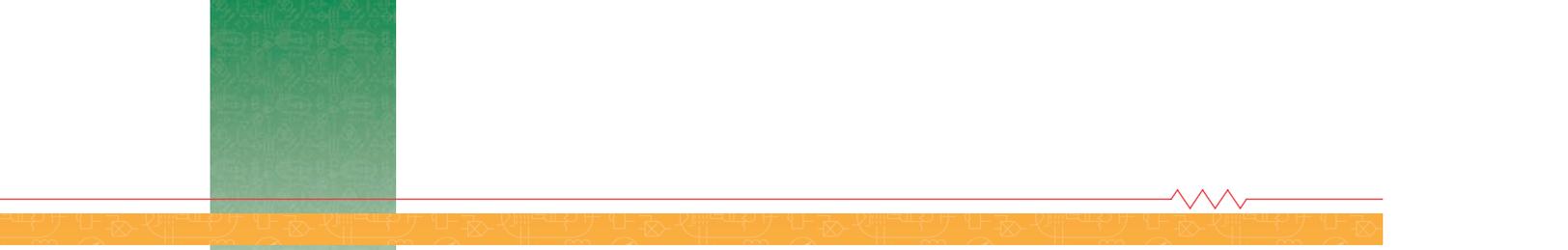
Chapitre 18 Transformée de Fourier **807**

- 18.1 Introduction **808**
- 18.2 Définition **808**
- 18.3 Propriétés **814**
- 18.4 Applications aux circuits **826**
- 18.5 Théorème de Parseval **829**
- 18.6 Comparaison entre les transformées de Fourier et de Laplace **832**
- 18.7 † Applications **833**
 - 18.7.1 Modulation d'amplitude (*AM*)
 - 18.7.2 Échantillonnage des signaux
- 18.9 Résumé du chapitre **837**
 - Questions récapitulatives **838**
 - Problèmes à résoudre **839**
 - Problèmes récapitulatifs **845**

Chapitre 19 Réseaux de quadripôles **847**

- 19.1 Introduction **848**
- 19.2 Paramètres d'impédance **849**
- 19.3 Paramètres d'admittance **853**

19.4	Paramètres hybrides	856	ANNEXE A	Systèmes d'équations et l'inversion des matrices	A
19.5	Paramètres de transmission	861	ANNEXE B	Nombres complexes	A-9
19.6	† Relations entre paramètres	866	ANNEXE C	Formules mathématiques	A-16
19.7	Interconnexion des quadripôles	869	ANNEXE D	<i>PSpice</i> sur Windows	A-21
19.8	Calcul des paramètres des quadripôles à l'aide de <i>PSpice</i>	874	ANNEXE E	<i>MATLAB</i>	A-46
19.9	† Applications	878	ANNEXE F	Réponses aux problèmes impairs	A-65
	19.9.1 Circuits du transistor				
	19.9.2 Synthèse des réseaux en cascade				
19.10	Résumé du chapitre	886			
	Questions récapitulatives	887			
	Problèmes à résoudre	888			
	Problème récapitulatif	899			
			Bibliographie	B-1	
			Index	I-1	



Préface

Travailler ensemble, au sein d'une équipe est, à notre avis, l'aspect le plus important pour le succès d'un ingénieur, aspect que nous signalons et nous encourageons fortement dans ce texte, comme un élément primordial pour la formation des jeunes ingénieurs.

La leçon des éditions précédentes

L'objectif principal de cette troisième édition du livre reste le même que pour les deux éditions précédentes, c'est-à-dire présenter l'analyse des circuits d'une manière plus claire, plus intéressante et plus facile à comprendre pour aider les étudiants à saisir les aspects attractifs de l'ingénierie. Ces objectifs sont atteints par les moyens suivants :

- **Ouverture des chapitres et résumés**
Chaque chapitre s'ouvre sur une discussion sur la façon d'améliorer les compétences qui visent à solutionner les problèmes spécifiques afin d'offrir des opportunités aux jeunes ingénieurs dans une sous-discipline de l'ingénierie électrique. Cette discussion est suivie par un sous-chapitre introductif qui relie le chapitre avec les précédents et énonce les objectifs en vue. Le chapitre se termine par un résumé des points clés et des formules.
- **Méthodologie pour résoudre les problèmes**
Le Chapitre 1 présente une méthode en six étapes pour résoudre les problèmes de circuit. Cette méthode est utilisée tout au long du livre offrant ainsi aux lecteurs un excellent outil de travail.
- **Style accessible et compréhensible**
Tous les principes sont présentés d'une manière logique, étape par étape, dans un style accessible. Autant que possible, les auteurs évitent de donner trop de détails qui pourraient cacher des concepts et entraver la compréhension globale de la matière.
- **Formules et termes clés**
Les principales équations et formules de calcul sont soulignées, constituant ainsi un moyen efficace d'aider les étudiants à trier ce qui est essentiel de ce qui ne l'est pas. De même, pour s'assurer que les étudiants comprennent clairement les éléments clés, ces termes sont définis et mis en évidence.

- **Notes en marge du texte**
Les notes marginales sont utilisées comme outil pédagogique. Elles servent à de multiples usages tels que des conseils, des références croisées, agrémenter l'exposé, des avertissements, des rappels et des idées clés pour la résolution de problèmes.
- **Exemples**
Des exemples, soigneusement choisis et travaillés en détail, sont généreusement présentés à la fin de chaque section. Les exemples sont considérés comme une partie du texte et sont clairement expliqués sans demander au lecteur de faire appel aux éléments déjà expliqués dans les sections précédentes. Les exemples constituent ainsi une bonne base de départ pour offrir aux étudiants une bonne compréhension du processus de solution et la confiance en soi pour résoudre les problèmes plus difficiles proposés à la fin de chaque chapitre. Certains problèmes sont résolus de façon différente, afin de faciliter une compréhension solide et durable de la matière enseignée ainsi qu'une comparaison des différentes approches.
- **Exemples d'applications pratiques**
La dernière section de chaque chapitre est consacrée aux aspects pratiques d'application des concepts abordés dans le chapitre. Le matériel couvert par chaque chapitre est appliqué à au moins un ou deux aspects pratiques. Ceci contribue à aider les étudiants à se rendre compte de la manière dont les concepts théoriques trouvent leurs applications pratiques dans des situations réelles.
- **Questions récapitulatives**
À la fin de chaque chapitre, sont fournies dix questions récapitulatives sous forme de problèmes à choix multiples. Ces questions sont destinées à couvrir les petits « pièges » que les exemples et les problèmes de fin de chapitre ne peuvent pas couvrir. Les questions constituent un dispositif d'auto-test et peuvent aider les étudiants à déterminer eux-mêmes dans quelle mesure ils maîtrisent le chapitre parcouru.
- **Outils informatiques**
Tenant compte de l'intégration des outils informatiques dans l'enseignement, l'utilisation des logiciels spécialisés comme par exemple *PSpice* et *MATLAB* pour les circuits sont encouragés d'une manière permanente. Le logiciel *PSpice* est recommandé dès le début du texte de sorte que les étudiants puissent se familiariser et l'utiliser tout au long du texte. L'Annexe D sert de didacticiel sur *PSpice* pour *Windows*. *MATLAB* est également introduit au début du livre avec un didacticiel disponible à l'Annexe E.
- **Détails historiques**
De courtes notes historiques intégrées dans le texte fournissent aux lecteurs un minimum d'informations sur le profil des pionniers de l'ingénierie électrique et des événements importants.

- **Introduction aux amplificateurs opérationnels (amplis op)**
L'amplificateur opérationnel (ampli op), en tant qu'élément de base des circuits électriques modernes, est introduit au début du texte.
- **Transformées de Fourier et de Laplace**
Pour faciliter la transition entre le cours sur les circuits et les cours spécialisés sur les signaux et les systèmes, le sujet relatif aux transformées de Fourier et de Laplace est couvert avec lucidité et en profondeur. Les chapitres sont développés de manière à ce que l'instructeur puisse s'adresser aux étudiants à partir de solutions de circuits de premier ordre, sujet couvert par le Chapitre 15. Ceci permet alors une progression naturelle vers les transformées de Laplace et de Fourier avec applications en courant alternatif.

Nouveautés dans la troisième édition

Un cours sur l'analyse des circuits est peut-être un des premiers contacts des étudiants avec les aspects spécifiques de l'ingénierie électrique. Nous avons inclus plusieurs nouvelles fonctionnalités pour aider les étudiants à se sentir à l'aise avec le sujet.

- **Présentation graphique attractive**
Une présentation graphique complètement repensée, avec schémas et figures en quatre couleurs, contribue à renforcer les principaux éléments pédagogiques et à offrir une plus grande attractivité pour le lecteur.
- **Exemples étendus**
Les exemples travaillés en détail en utilisant la méthode de résolution de problèmes en six étapes fournit une sorte de feuille de route pour les étudiants dans leur travail journalier focalisé sur la résolution de problèmes de façon cohérente. Au moins un exemple dans chaque chapitre est développé de cette manière.
- **Problèmes à résoudre**
Par rapport aux éditions précédentes, ont été ajoutés plus de 300 nouveaux problèmes en fin de chapitres permettant ainsi aux étudiants de renforcer les concepts clés et d'aborder tous les aspects possibles rencontrés dans la vie professionnelle.
- **Icônes pour les problèmes à résoudre**
Des icônes sont utilisées chaque fois que c'est nécessaire pour mettre en évidence les problèmes qui se rapportent à la conception technique ainsi que les problèmes qui peuvent être résolus en utilisant les logiciels *PSpice* ou *MATLAB*.

Organisation de l'ouvrage

Ce livre, est destiné à servir en tant que cours académique sur l'analyse des circuits électriques, réparti sous deux ou trois semestres. Sous certaines conditions, le livre peut également être utilisé pour un cours d'un semestre par une sélection appropriée des chapitres et sections. Il est globalement divisé en trois parties.

- La première partie, qui comprend les Chapitres 1 à 8, est consacrée aux circuits à courant continu. Elle couvre les lois fondamentales et les théorèmes, les techniques d'analyse des circuits et des éléments de circuit passifs ou actifs.
- La deuxième partie, qui comprend les Chapitres 9 à 14, s'occupe des circuits à courant alternatif. Cette partie introduit les phaseurs, l'analyse sinusoïdale de l'état d'équilibre, les valeurs efficaces, les systèmes triphasés et la réponse en fréquence.
- La troisième partie, qui comprend les Chapitres 15 à 19, est consacrée aux techniques avancées d'analyse de réseaux. Elle fournit aux étudiants une solide introduction à la transformée de Laplace, aux séries de Fourier, la transformée de Fourier et l'analyse de réseaux de quadripôles.

Le cours en trois parties est plus que suffisant pour un cours de deux semestres, de sorte que le formateur doit sélectionner les chapitres ou les sections à couvrir. Les articles marqués (†) peuvent être ignorés, expliqués brièvement ou cédés en devoirs. Ils peuvent être omis sans perte de continuité. Chaque chapitre comporte de nombreux problèmes regroupés selon les différentes sections de l'ouvrage et assez diversifiés pour que l'enseignant puisse choisir quelques exemples et en attribuer d'autres comme devoir pour le travail individuel des étudiants.

Comme indiqué précédemment, pour la première fois à l'occasion de cette nouvelle édition, sont utilisés trois icônes. On utilise l'icône *PSpice* pour désigner les problèmes qui exigent l'utilisation du logiciel *PSpice* dans le processus de solution, où la complexité du circuit est telle que l'outil informatique rendrait le processus plus facile et rapide ou *PSpice* présente la possibilité de vérifier une fois de plus les résultats obtenus. On utilise aussi l'icône *MATLAB* pour désigner les problèmes où l'utilisation de ce logiciel est nécessaire dans le processus de solution, ou en raison de la composition du problème et de sa complexité, ce logiciel s'avère être un excellent moyen pour contrôler les résultats obtenus à l'aide d'autres approches. Enfin, on utilise l'icône du projet, pour identifier les problèmes qui aident l'étudiant à développer des compétences qui sont nécessaires pour améliorer la conception technique. Des problèmes plus difficiles sont marqués d'un astérisque (*). Des problèmes récapitulatifs à la fin de chaque chapitre sont pour la plupart des exemples d'applications qui exigent des compétences tirées du chapitre qui vient de s'achever.



Pré-requis

Comme pour la plupart des cours d'introduction aux circuits électriques, les principales conditions préalables, pour la compréhension du texte, consistent en la maîtrise des notions de base en physique générale et le calcul mathématique. Bien que les connaissances sur les nombres complexes et le travail avec ces nombres soient utile dans la dernière partie du livre, elles ne sont pas considérées en tant qu'un pré-requis. Un atout très important de ce livre est que toutes les équations mathématiques et les fondements de la physique auxquels l'élève est confronté, sont inclus dans le texte.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude pour le soutien et l'amour que nous avons reçus de nos épouses (*Hannah* et *Kikelomo*), nos filles (*Christina*, *Tamara*, *Jennifer*, *Motunrayo*, *Ann* et *Joyce*), notre fils (*Baixi*), et tous les membres de nos familles.

Chez McGraw-Hill, nous tenons à remercier le personnel de l'équipe éditoriale et technique de production, à savoir : *Jeanne Suzanne*, éditeur ; *Michael Hackett*, rédacteur en chef ; *Michelle Flomenhoft* et *Katie White*, les éditeurs de développement ; *Peggy Lucas* et *Joyce Watters*, les gestionnaires de projet ; *Carrie Burger*, chercheur photo et *Rick Noel*, designer, ainsi que les metteurs en page *Pamela Carley* et *George Watson*, ainsi à *Vijay Kataria* de *GTS Companies*. En outre, nous apprécions le travail très soigné de *Tom Hartley* de l'Université d'Akron pour son évaluation très détaillée sur les divers éléments du texte.

Nous tenons à remercier *Yongjian Fu* et son équipe d'étudiants, *Bramarambha Elka* et *Saravaran Chinniah*, pour leurs efforts dans le développement de l'outil informatique.

La troisième édition de cet ouvrage a pleinement bénéficié de l'avis des nombreux réviseurs techniques, repris ci-après (en ordre alphabétique) :

<i>Jean Andrian , Florida International University</i>	<i>Shervin Erfani, University of Windsor</i>
<i>Jorge L. Aravena, Louisiana State University</i>	<i>Alan Felzer, California State Polytechnic University, Pomona</i>
<i>Les Axelrod, Illinois Institute of Technology</i>	<i>Bob Grondin, Arizona State University</i>
<i>Alok Berry, George Mason University</i>	<i>Bob Hendricks, Virginia Polytechnic Inst. and State University</i>
<i>Tom Brewer, Georgia Institute of Technology</i>	<i>Sheila Horan , New Mexico State University</i>
<i>Susan Burkett, University of Arkansas</i>	<i>Hans Kuehl , University of Southern California</i>
<i>Rich Christie, University of Washington</i>	<i>Jack Lee, University of Texas, Austin</i>
<i>Arunsi Chuku, Tuskegee University</i>	<i>Long Lee, San Diego State University</i>
<i>Thomas G. Cleaver, University of Louisville</i>	<i>Sam Lee, University of Oklahoma</i>
<i>Randy Collins, Clemson University</i>	<i>Jia Grace Lu, University of California, Irvine</i>
<i>David Dietz, University of New Mexico</i>	<i>Hamid Majlesein, Southern University & A&M College</i>
<i>Bill Diong, The University of Texas, El Paso</i>	<i>Frank Merat, Case Western Reserve University</i>

<i>Shayan Mookherjea, University of California, San Diego</i>	<i>Ceon Ramon, University of Washington</i>
<i>Mahmoud Nahvi, California Polytechnic State University</i>	<i>Prentiss Robinson, California State Polytech. University</i>
<i>Scott Norr, University of Minnesota, Duluth</i>	<i>Raghu Settaluri, Oregon State University</i>
<i>Barbara Oakley, Oakland University</i>	<i>Marwan Simaan, University of Pittsburgh</i>
<i>Tamara Papalias, San Jose State University</i>	<i>Robin Strickland, University of Arizona</i>
<i>Owe Petersen, Milwaukee School of Engineering</i>	<i>Kalapathy Sundaram, University of Central Florida</i>
<i>Craig Petrie, Brigham Young University</i>	<i>Russell Tatro, California State University</i>
<i>Michael Polis, Oakland University</i>	<i>Xiao Bang Xu, Clemson University</i>
<i>Aleksandar Prodic, University of Toronto</i>	

De même, nous tenons à remercier les réviseurs des éditions précédentes qui ont contribué au succès de cet ouvrage :

<i>Bogdan Adamczyk, Grand Valley State University</i>	<i>Mehmet Cultu, Gannon University</i>
<i>Keyvan Ahdut, University of the District of Columbia</i>	<i>Saswati Datta, University of Maryland Baltimore County</i>
<i>Hamid Allamehzadeh, Eastern New Mexico University</i>	<i>Mohamed K. Darwish, Brunel University (United Kingdom)</i>
<i>Jorge L. Aravena, Louisiana State University</i>	<i>Shirshak Dhali, Southern Illinois University</i>
<i>Idir Azouz, Southern Utah University</i>	<i>Kevin D. Donohue, University of Kentucky</i>
<i>John A. Bloom, Biola University</i>	<i>Fred Dreyfus, Pace University</i>
<i>Kiron C. Bordoloi, University of Louisville</i>	<i>Amelito G. Enriquez, Canada College</i>
<i>James H. Burghart, Cleveland State University</i>	<i>Ali Eydaghi, University of Maryland Eastern Shore</i>
<i>Phil Burton, University of Limerick</i>	<i>Garry K. Feder, Carnegie Mellon University</i>
<i>Edward W. Chandler, Milwaukee School of Engineering</i>	<i>Cynthia J. Finelli, Kettering University</i>
<i>Amit Chatterjea, Purdue University, Fort Wayne</i>	<i>Robert Frohne, Walla Walla College</i>
<i>Erik Cheever, Swarthmore College</i>	<i>Andreas Fuchs, Pennsylvania State University Erie</i>
<i>Fow-Sen Choa, University of Maryland Baltimore County</i>	<i>Tayeb A. Giuma, University of North Florida</i>
<i>Chiu H. Choi, University of North Florida</i>	<i>Chandranth H. Gowda, Tuskegee University</i>
<i>Thomas G. Cleaver, University of Louisville</i>	<i>Duane Hanselman, University of Maine</i>
<i>Michael J. Cloud, Lawrence Technological University</i>	<i>Reza Hashemian, Northern Illinois University</i>

<i>Hassan Hassan, Lawrence Technological University</i>	<i>Sarhan M. Musa, Prairie View A&M University</i>
<i>Rod Heisler, Walla Walla College</i>	<i>Ahmad Nafisi, California Polytechnic State University</i>
<i>Amelito G. Henriquez, University of New Orleans</i>	<i>Nader Namazi, The Catholic University of America</i>
<i>H. Randolph Holt, Northern Kentucky University</i>	<i>Sudarshan Rao Nelatury, Villanova University</i>
<i>Reza Iravani, University of Toronto</i>	<i>Habib Rahman, Saint Louis University</i>
<i>Richard Johnston, Lawrence Technological University</i>	<i>V. Rajaravivarma, Central Connecticut State University</i>
<i>William K. Kennedy, University of Canterbury (New Zealand)</i>	<i>Hadi Saadat, Milwaukee School of Engineering</i>
<i>Albert M. Knebel, Monroe Community College</i>	<i>Robert W. Sherwood, Germanna Community College</i>
<i>William B. Kolasa, Lawrence Technological University</i>	<i>Elisa H. Barney Smith, Boise State University</i>
<i>Roger A. Kuntz, Penn State Erie, The Behrend College</i>	<i>Terry L. Speicher, Pennsylvania State University</i>
<i>Sharad R. Laxpati, University of Illinois at Chicago</i>	<i>James C. Squire, Virginia Military Institute</i>
<i>Choon Sae Lee, Southern Methodist University</i>	<i>David W. Sukow, Washington and Lee University</i>
<i>Venus Limcharoen, Thammasat University</i>	<i>Fred Terry, Christian Brother University</i>
<i>Bin-Da Lio, National Cheng Kung University, Taiwan</i>	<i>Les Thede, Ohio Northern University</i>
<i>Joseph L. LoCicero, Illinois Institute of Technology</i>	<i>Constantine Vassiliadis, Ohio University</i>
<i>Emeka V. Maduiké, New York Institute of Technology</i>	<i>Sam Villareal, The University of Texas, Dallas</i>
<i>Claire L. McCullough, University of Tennessee, Chattanooga</i>	<i>Promos Vohra, Northern Illinois University</i>
<i>José Medina, State University of New York, College of Technology at Delhi</i>	<i>Chia-Jiu Wang, University of Colorado, Colorado Springs</i>
<i>Damon Miller, Western Michigan University</i>	<i>Xingwu Wang, Alfred University</i>
<i>Martin Mintchev, University of Calgary (Canada)</i>	<i>Sandra A. Yost, University of Detroit</i>
<i>Philip C. Munro, Youngstown State University</i>	<i>Hewlon Zimmer, U.S. Merchant Marine Academy</i>

Enfin, nous avons toujours apprécié les commentaires reçus de la part des enseignants et des étudiants qui ont utilisé les éditions précédentes. Nous voulons que cela continue, donc s'il vous plaît, n'hésitez pas à nous envoyer des courriels ou à les diriger vers l'éditeur. Vous pouvez nous joindre aux adresses : c.alexander@ieee.org pour Charles Alexander et sadiku@ieee.org pour Matthew Sadiku.

Charles K. Alexander et Matthew N. O. Sadiku

Visite guidée

L'objectif principal de ce livre est de présenter l'analyse des circuits d'une manière qui est plus claire, plus intéressante et plus facile à comprendre que d'autres textes. Pour vous, les étudiants, voici quelques caractéristiques qui peuvent vous aider à étudier et à réussir ce cours.

Une nouvelle présentation en quatre couleurs donne vie au texte et aux figures et met en valeur les concepts clés.

12 Chapitre 1 Concepts de base

Figure 1.9 Deux exemples d'un élément qui consomme une puissance de 12 W. (a) $i = 4 \text{ A}$, $v = 3 \text{ V}$. (b) $i = -4 \text{ A}$, $v = -3 \text{ V}$.

Figure 1.10 Deux exemples d'un élément qui consomme une puissance de 12 W. (a) $i = 4 \text{ A}$, $v = -3 \text{ V}$. (b) $i = -4 \text{ A}$, $v = 3 \text{ V}$.

Exemple 1.4 Une source d'alimentation soumet un courant de 2 A pendant 10 s à travers une lampe à incandescence. Si une énergie de 2,3 kJ se retrouve sous forme de chaleur et de lumière, calculez la différence de potentiel aux bornes de cette lampe.

Solution :
La quantité totale de charge électrique est
 $\Delta q = i \Delta t = 2 \text{ A} \times 10 \text{ s} = 20 \text{ C}$
La différence de potentiel est
 $v = \frac{W}{q} = \frac{2,3 \times 10^3 \text{ J}}{20 \text{ C}} = 115 \text{ V}$

Exercice 1.4 Pour déplacer une charge électrique q entre le point a et le point b on dépense un travail de -30 J . Déterminez la différence de potentiel (a) si $i = 2 \text{ C}$, (b) si $i = -4 \text{ C}$.

Réponse : (a) -15 V , (b) 5 V .

18 Résolution de problèmes

1.8 Résolution de problèmes

4. **Essayer une première solution du problème.** Il est maintenant temps de commencer à résoudre effectivement le problème. Le processus que vous suivez doit être bien documenté en vue de présenter une solution détaillée, en cas de succès et d'évaluer le processus, si vous ne réussissez pas du premier coup. Cette évaluation situationnelle peut conduire à des corrections qui peuvent alors conduire à une solution satisfaisante. Cela peut aussi conduire à de nouvelles alternatives d'essai. Souvent, il s'avère souhaitable de ne pas précipiter les choses et de présenter la solution sous forme d'équation générale et non pas simplement avec des valeurs numériques. Cela permet de vérifier, par la suite, vos résultats.

5. **Évaluer la solution trouvée et en vérifier l'exactitude.** Vous pouvez maintenant évaluer de façon approfondie ce que vous avez accompli. Décidez vous-même si vous avez une solution acceptable, celle que vous souhaitez présenter à votre équipe, au patron ou à votre professeur.

6. **Si le problème a été résolu de manière satisfaisante :** présenter la solution, réviser à l'étape 7 et recommencer le processus.

7. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** réviser la solution, soit vous essayez une autre solution, soit vous reprenez, la présentation d'une fois de plus le problème et le processus, soit vous essayez toutes les chances.

8. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** dans le cas d'un étudiant qui suit le cours, il est important d'élaborer des questions qui doivent être abordées avant de poursuivre le processus de solution. Si vous avez des questions, vous avez besoin de consulter les personnes appropriées pour obtenir des réponses. Avec ces réponses, vous pouvez maintenant confirmer le problème et choisir le reste du processus de solution.

9. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** réviser la solution, soit vous essayez une autre solution, soit vous reprenez, la présentation d'une fois de plus le problème et le processus, soit vous essayez toutes les chances.

10. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** dans le cas d'un étudiant qui suit le cours, il est important d'élaborer des questions qui doivent être abordées avant de poursuivre le processus de solution. Si vous avez des questions, vous avez besoin de consulter les personnes appropriées pour obtenir des réponses. Avec ces réponses, vous pouvez maintenant confirmer le problème et choisir le reste du processus de solution.

22 Chapitre 1 Concepts de base

Dans notre cas, en faisant appel à l'analyse de circuits pour trouver la valeur du courant i_{10} , nous nous rendons vite compte que cela nous conduira probablement à un travail très fastidieux, nécessitant plus de temps que si l'on utilise l'analyse nodale ou l'analyse des boucles.

Figure 1.21 Utilisation de l'analyse nodale.

Répondez le problème en utilisant l'analyse des boucles, calculez i_{10} figurant à droite en système de deux équations et de résoudre par rapport à i_{10} . Le cas est illustré à la Fig. 1.21. En utilisant l'analyse nodale, il est nécessaire d'écrire une équation par nœud. C'est la meilleure approche. Par conséquent, nous allons résoudre notre cas par l'utilisation de l'analyse nodale.

4. **Essayer une première solution du problème.** Nous allons d'abord écrire toutes les équations qui nous permettent de trouver i_{10} .

$i_{10} = i_1 - i_2 - i_3 - i_4 - i_5 - i_6 - i_7 - i_8 - i_9$

De l'équation précédente on trouve :

$i_{10} = \frac{v_1 - v_2}{2} + \frac{v_2 - v_3}{4} - \frac{v_2 - v_3}{4}$

Ce qui donne : $(4i_1 - 20i_2 + 10i_3 - 2i_4 - 2i_5 - 2i_6 - 2i_7 - 2i_8 - 2i_9) = 0$

Et par conséquent : $4i_1 - 18i_2 + 10i_3 - 2i_4 - 2i_5 - 2i_6 - 2i_7 - 2i_8 - 2i_9 = 0$

5. **Évaluer la solution trouvée et en vérifier l'exactitude.** Maintenant nous pouvons utiliser la loi des tensions de Kirchhoff (KVL) pour vérifier les résultats.

$i_1 = \frac{v_1 - v_2}{2} = \frac{20 - 0}{2} = 10 \text{ A}$
 $i_2 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_3 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_4 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_5 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_6 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_7 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_8 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$
 $i_9 = \frac{v_2 - v_3}{4} = \frac{0 - 0}{4} = 0 \text{ A}$

Si on applique la loi de Kirchhoff (KVL) pour la boucle 1, on obtient :

$-v_1 + v_2 + v_3 = 0 \Rightarrow -20 + 0 + 0 = -20 \neq 0$

De même, pour la boucle 2, on obtient :

$-v_2 + v_3 + v_4 = 0 \Rightarrow -0 + 0 + 0 = 0$

20 Chapitre 1 Concepts de base

1.8 Résolution de problèmes

1. **Définir avec soin le problème.**

2. **Présenter en détail tout ce que vous savez sur le problème.**

3. **Établir un ensemble de solutions alternatives et déterminer celles qui promettent le plus de chances de succès.**

4. **Essayer une première solution du problème.**

5. **Évaluer la solution trouvée et en vérifier l'exactitude.**

6. **Si le problème a été résolu de manière satisfaisante :** présenter la solution, réviser à l'étape 7 et recommencer le processus.

7. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** réviser la solution, soit vous essayez une autre solution, soit vous reprenez, la présentation d'une fois de plus le problème et le processus, soit vous essayez toutes les chances.

8. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** dans le cas d'un étudiant qui suit le cours, il est important d'élaborer des questions qui doivent être abordées avant de poursuivre le processus de solution. Si vous avez des questions, vous avez besoin de consulter les personnes appropriées pour obtenir des réponses. Avec ces réponses, vous pouvez maintenant confirmer le problème et choisir le reste du processus de solution.

9. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** réviser la solution, soit vous essayez une autre solution, soit vous reprenez, la présentation d'une fois de plus le problème et le processus, soit vous essayez toutes les chances.

10. **Si le problème n'a pas été résolu de manière satisfaisante :** dans le cas d'un étudiant qui suit le cours, il est important d'élaborer des questions qui doivent être abordées avant de poursuivre le processus de solution. Si vous avez des questions, vous avez besoin de consulter les personnes appropriées pour obtenir des réponses. Avec ces réponses, vous pouvez maintenant confirmer le problème et choisir le reste du processus de solution.

Une méthodologie en six étapes pour la résolution des problèmes est introduite au chapitre 1 et est utilisée dans de nombreux exercices.

Chaque exemple est immédiatement suivi par un problème pratique afin de contribuer à la meilleure compréhension de la partie théorique.

Le logiciel PSpice® pour Windows est un outil informatique facile d'accès pour les étudiants. Cet outil de travail est introduit au début du texte et utilisé partout, avec des discussions et exemples à la fin de chaque chapitre.

La dernière section de chaque chapitre est consacrée aux applications des concepts abordés afin d'aider les étudiants à appliquer ces concepts à des situations de la vie réelle.

90 Chapitre 3 Méthodes d'analyse

Pour obtenir la relation entre v_1 et v_2 , on applique la KVL au circuit de la Fig. 3.10(b). Pour le tour de la boucle fait dans le sens horaire, nous avons :

$$-v_1 - 2 + v_2 = 0 \quad v_2 = v_1 + 2 \quad (3.3.3)$$

Des équations (3.3.1) et (3.3.2), nous dérivons

$$v_1 = v_1 + 2 = -20 - 2v_1$$

ou

$$3v_1 = -22 \quad v_1 = -7,333 \text{ V}$$

et obtenons pour v_2 $v_2 = v_1 + 2 = -5,333 \text{ V}$. Notez que le résistor de 10 Ω n'a pas aucune influence car il n'est connecté à travers le super-nœud.

Figure 3.10 (a) Application de la loi de Kirchhoff aux nœuds 1 et 2. (b) Application de la loi de Kirchhoff à une boucle fermée.

Exercice 3.3 Trouver v et i pour le circuit de la Fig. 3.11.

Réponse : $i = 0,2 \text{ V}$, $i = 4 \text{ A}$.

Figure 3.11 Pour l'exemple 3.3

Exemple 3.4 Trouver les tensions des nœuds pour le circuit de la Fig. 3.12.

Solution : Les nœuds 1 et 2 forment un super-nœud, même chose pour les nœuds 3 et 4. Nous appliquons la KCL aux deux super-nœuds comme à la Fig. 3.12(a). Pour le super-nœud 1-2, on a :

$$i + 10 = i_1 + i_2$$

et par rapport aux tensions des nœuds, l'équation est

$$\frac{v_1 - v_2}{6} + \frac{v_1 + v_2}{10} = \frac{v_1 - v_2}{3} + \frac{v_1 - v_2}{2}$$

ou

$$5v_1 + v_2 = v_1 - 2v_2 = 60 \quad (3.4.1)$$

3.3 Analyser nodale pour circuits avec sources de tension

Pour le super-nœud 3-4 on a :

$$i = i_1 + i_2 \quad \text{ou} \quad \frac{v_1 - v_2}{6} + \frac{v_1 + v_2}{10} = \frac{v_1 - v_2}{3} + \frac{v_1 - v_2}{2}$$

ou

$$4v_1 + 2v_2 - 5v_1 - 16v_2 = 0 \quad (3.4.2)$$

Figure 3.12 (a) Application de la loi de Kirchhoff à deux super-nœuds. (b) Application de la loi de Kirchhoff à plusieurs boucles.

On applique maintenant la KVL aux branches qui contiennent les sources de tension comme le nœuds 1 et 2 de la Fig. 3.12(b). Pour la boucle 1,

$$-v_1 + 20 + v_2 = 0 \quad v_2 = v_1 - 20 \quad (3.4.3)$$

Pour la boucle 2,

$$-v_1 + 3v_1 = 0$$

Mais comme $v_1 = v_2 + 20$, ceci conduit à :

$$3v_1 - v_2 - 2v_1 = 0 \quad (3.4.4)$$

Pour la boucle 3,

$$v_1 - 3v_1 + 6i - 20 = 0$$

Mais comme $i_1 = i_2 = i$ et $v_1 = v_2 + 20$, on obtient

$$-2v_1 + v_2 + 6i = 20 \quad (3.4.5)$$

Nous devons calculer les quatre tensions des nœuds v_1 , v_2 , v_3 et v_4 . Cela ne nécessite que quatre des cinq équations (3.4.1) à (3.4.5). Bien qu'une des cinq équations soient redondantes, elles sont utiles finalement pour vérifier les résultats obtenus. Évidemment, nous pouvons résoudre les équations (3.4.1) à (3.4.4) directement à l'aide du logiciel MATHEM.

Nous pouvons aussi résoudre le système d'équations par élimination, par exemple, à partir de l'équation (3.4.1) avec $v_1 = v_2 + 20$, substituons ceci dans les équations (3.4.1) et respectivement (3.4.2), on obtient :

$$6v_1 - v_1 - 2v_1 = 80 \quad (3.4.6)$$

et

$$4(v_2 + 20) - 2v_2 - 16v_2 = 40 \quad (3.4.7)$$

Les équations (3.4.4), (3.4.6) et (3.4.7) peuvent être résolues sous forme matricielle comme suit :

3.3 Analyser nodale pour circuits avec sources de tension

SITUATION 2 Si la source de tension (dépendante ou indépendante) est connectée entre deux nœuds non-adjacents, ceux-ci forment un nœud globalisé ou un super-nœud, on applique les deux lois de Kirchhoff (KCL et KVL) pour déterminer les tensions des nœuds.

Un super-nœud est formé en branchant une source de tension (dépendante ou indépendante) entre deux nœuds non-adjacents et tous les autres éléments connectés en parallèle avec.

À la Fig. 3.7 les nœuds 2 et 3 constituent un super-nœud. (Nous pourrions avoir plus que deux nœuds formant un super-nœud unique. Répondre, par exemple, le circuit de la Fig. 3.14.) Un circuit avec super-nœuds est analysé en utilisant les nœuds trois étapes mentionnées dans la section précédente sauf que les super-nœuds sont traités différemment. Pourquoi ? Parce qu'une composante essentielle de l'analyse nodale est l'application de la KCL, ce qui implique de connaître les valeurs des courants à travers chaque élément. Il n'y a aucun moyen de savoir à l'avance le courant à travers une source de tension. Toutefois, la KCL doit être satisfaite pour un super-nœud comme pour n'importe quel autre nœud. Ainsi, au niveau du super-nœud de la Fig. 3.7,

$$i_1 + i_2 = i_3 \quad (3.11a)$$

mais

$$\frac{v_1 - v_2}{2} + \frac{v_1 - v_3}{4} = \frac{v_2 - v_3}{8} \quad (3.11b)$$

Pour appliquer la loi des tensions de Kirchhoff au super-nœud de la Fig. 3.7, nous allons re-dessiner le circuit comme le montre la Fig. 3.8. Le tour de la boucle est fait dans le sens horaire ce qui donne :

$$-v_2 + 5 + v_3 = 0 \quad v_3 = v_2 - 5 \quad (3.12)$$

Des équations (3.11a), (3.11b) et (3.12), on obtient les tensions des nœuds. Retenez les propriétés suivantes d'un super-nœud :

1. La source de tension associée à un super-nœud implique la résolution d'une équation supplémentaire afin d'obtenir les tensions des nœuds.
2. Un super-nœud n'a pas de tension propre.
3. Un super-nœud exige l'application des deux lois de Kirchhoff (KCL et KVL).

Trouver les tensions des nœuds pour le circuit de la Fig. 3.9.

Solution : Le super-nœud contient la source de 2V, les nœuds 1 et 2 et le résistor de 10 Ω. En appliquant la loi de Kirchhoff (KCL) au super-nœud comme le montre la Fig. 3.9(a) on obtient

$$2 = i_1 + i_2 + i_3$$

Expériment i_1 et i_2 en termes de tensions de nœud on a :

$$2 = \frac{v_1 - v_2}{2} + \frac{v_1 - v_2}{4} + \frac{v_1 - v_2}{8} = 8v_1 - 2v_2 + v_3 + 20$$

ou

$$v_3 = -20 - 2v_1 \quad (3.3.1)$$

Figure 3.7 Circuit avec super-nœud

Figure 3.8 Un super-nœud doit être regardé comme une surface fermée qui contourne la source de tension et ses deux nœuds.

Figure 3.9 La détection de Kirchhoff (KVL) appliquée à un super-nœud

Exemple 3.3

Figure 3.9 Pour l'exemple 3.3

Chaque chapitre s'ouvre avec une discussion sur la façon d'améliorer les compétences qui contribuent à la résolution des problèmes techniques réels ainsi que sur les opportunités de carrière dans la sous-discipline de l'ingénierie électrique traitée par le chapitre.

Les icônes adjacentes aux problèmes à résoudre en fin de chaque chapitre se rapportent à la conception technique ou aux outils informatiques à utiliser afin de les solutionner. Des annexes sur ces logiciels fournissent des didacticiels pour leur utilisation.



chapitre

Grandeurs sinusoidales et phaseurs

9

Celui qui ne sait pas, et ne sait pas qu'il ne sait pas, est un fin faiseur. Celui qui ne sait pas et sait qu'il ne sait pas, est un expert, enseignant. Celui qui sait et ne sait pas qu'il sait, il doit réviser. Celui qui sait et sait qu'il sait, est un sage, maître.

—Proverbe persan

Améliorez vos compétences et préparez votre carrière

Travailler en tant que membre d'une équipe pluridisciplinaire et s'habituer à travailler en équipe est une caractéristique essentielle de l'activité d'un ingénieur. De nos jours, un ingénieur travaille rarement tout seul. Il fera toujours partie d'une équipe et ce n'est pas toujours facile de s'adapter et de collaborer avec tous les membres de cette équipe. Une des choses que vous devez à rappeler aux étudiants est que tout le monde ne aime pas travailler dans ces conditions. L'intégration au sein de l'équipe constitue souvent l'un l'élément essentiel du succès professionnel.

Le plus souvent, ces équipes pluridisciplinaires sont composées de personnes provenant d'une variété de disciplines du génie, ainsi que des personnes issues d'autres disciplines tel que le marketing ou les finances.

Les étudiants peuvent facilement développer et renforcer cette compétence pendant leurs études universitaires, en travaillant dans des groupes d'étude. De toute évidence, le travail en équipe, qu'il s'agisse de cours à caractère technique ou d'autres en dehors de votre discipline, vous mettra de nombreuses portes dans votre future carrière.

Photo © Charles Alexander

367



Avis aux étudiants

Ceci est peut-être votre premier cours en génie électrique. Bien que le génie électrique soit une discipline passionnante et stimulante, le cours peut vous intimider. Ce livre a été écrit pour empêcher cela. Un bon manuel et un bon professeur sont un avantage, mais c'est vous qui apprenez. Si vous gardez les idées suivantes à l'esprit, vous réussirez très bien ce cours.

- Ce cours est le fondement sur lequel sont basés tous les autres cours qui constituent le programme d'enseignement de génie électrique. Pour cette raison, mettez autant d'effort que vous pouvez pour l'étudier et étudier le cours régulièrement.

- La résolution de problèmes est un élément essentiel du processus d'apprentissage. Résolvez autant de problèmes que vous le pouvez. Commencez par résoudre les problèmes pratiques suivant l'exemple, et ensuite passez aux problèmes se trouvant en fin de chaque chapitre. La meilleure façon d'apprendre est de résoudre beaucoup de problèmes. Un astérisque en face d'un problème indique un problème difficile.

- *Spice*, un programme d'analyse informatique de circuits, est utilisé dans le manuel. *PSPice*, la version PC de *Spice*, est le programme standard d'analyse de circuits le plus populaire et recommandé par la plupart des universités. *PSPice* sur *Windows* est décrit à l'Annexe D. Faites un effort pour bien apprendre *PSPice*, parce que vous pourrez ainsi vérifier tout problème de circuit avec ce logiciel et être sûr que vous avez obtenu les solutions correctes des problèmes.

- *MATLAB* est un autre logiciel, très utile dans l'analyse de circuits et pour d'autres cours que vous suivez. Un bref didacticiel sur *MATLAB* est donné en Annexe E pour vous aider à démarrer. La meilleure façon d'apprendre *MATLAB* est de commencer à travailler avec, une fois que vous connaissez quelques-unes de ces commandes.

- Chaque chapitre se termine par une section sur la partie théorique couverte par le chapitre et qui peut être appliquée à des situations réelles. Sans doute, vous apprendrez plus de détails dans les autres cours. Nous nous sommes principalement intéressés à ce que vous acquériez une bonne maîtrise de ces notions.

- Essayez de répondre aux questions récapitulatives se trouvant à la fin de chaque chapitre. Ces questions vous aideront à découvrir quelques astuces peu révélées en classe ou dans le manuel.

- Il est évident qu'un grand effort a été donné pour rendre les détails techniques dans ce livre facile à comprendre. Le livre contient également toutes les mathématiques et la physique nécessaires pour comprendre la théorie et sera très utile dans tous vos cours d'ingénierie.

Toutefois, en rédigeant ce cours, nous avons mis l'accent sur la création d'un ouvrage de référence pour vos études, à l'université ou au collège, ainsi que lorsque vous travaillerez dans l'industrie ou dans la recherche.

- Il est très tentant de vendre vos livres une fois que vous avez terminé votre expérience en classe, mais notre conseil est de ne jamais vendre vos cours d'ingénierie ! Nous avons trouvé qu'on avait toujours besoin de la plupart d'entre eux, tout au long de notre carrière !

Une brève partie sur la recherche de déterminants est couverte par l'Annexe A, les nombres complexes à l'Annexe B, et les formules mathématiques dans l'Annexe C. Les réponses aux problèmes impairs à résoudre sont données en Annexe G.

Amusez-vous !

C. K. A. et M. N. O. S.

Les auteurs

Charles K. Alexander est doyen et professeur de génie électrique et informatique au Collège Fenn de l'Université d'État de Cleveland, Ohio. Il est également directeur de deux centres de recherche : le Centre de recherche en électronique et en technologie aérospatiale (*CREATE*), et d'*Ohio ICE*, un centre de recherche en instrumentation, contrôle, électronique et capteurs. De 1998 à 2002, il a été directeur par intérim (2000 et 2001) de l'Institut de recherche sur la corrosion et les technologies multiphase de Stocker et professeur invité de génie électrique et informatique à l'Université d'Ohio. De 1994 à 1996, il a été doyen de génie et d'informatique à l'Université d'État de Californie à Northridge. De 1989 à 1994, il a été doyen intérimaire de la Faculté d'ingénierie à l'Université Temple, et de 1986 à 1989, il fut professeur et président du département de génie électrique à Université Temple. Pour la période de 1980 à 1986, il a occupé la même position à l'Université Technologique de Tennessee. De 1972 à 1980, il a été professeur agrégé et professeur de génie électrique à l'Université d'État de Youngstown, où il fut nommé professeur émérite en 1977 en reconnaissance de ses mérites dans l'enseignement et la recherche. Il a été professeur adjoint en génie électrique à l'Université de l'État d'Ohio en 1971-1972. Il a obtenu le titre de Docteur en 1971 de l'Université d'Ohio, une maîtrise en génie électrique en 1967 et sa licence en électricité en 1965 de la même université.

Dr. Alexander a été consultant auprès de 23 entreprises et organisations gouvernementales, y compris pour l'Armée de l'air et la Marine militaire des États-Unis et de plusieurs cabinets d'avocats. Il a reçu plus de 10 millions de dollars en fonds de recherche et développement pour des projets allant de l'énergie solaire au génie des logiciels. Il est l'auteur de 40 publications, dont un manuel et une série de conférences vidéo. Il est co-auteur de *Fundamentals of Electric Circuits* et de la cinquième édition du *Standard Handbook of Electronic Engineering*, publiés par la maison d'édition McGraw-Hill. Il a rédigé plus de 500 articles professionnels et des présentations techniques.

Dr. Alexander est membre à vie de l'IEEE et a été le président et chef de la direction de cette institution en 1997. Entre 1993 et 1994, il a été le vice-président de l'IEEE, chargé des activités professionnelles. En 1991-1992, il a été directeur de la région 2 de l'IEEE, siégeant au Conseil Régional d'Activités (RAB). Il a été également membre du Conseil des activités éducatives. En 1998, il a reçu de la part du Conseil des Ingénieurs américains le Diplôme de Mérite exceptionnel pour son activité dans le domaine de l'éducation de l'ingénierie. À l'occasion de sa promotion en tant que membre senior de l'IEEE, le docteur Alexander a été félicité « pour son leadership dans le domaine de l'enseignement de



Charles K. Alexander

l'ingénierie et le développement professionnel des étudiants en génie ». En 1984, il a reçu la médaille du Centenaire de l'IEEE, et en 1983 il a reçu le Prix de l'innovation attribué aux membres de l'IEEE qui ont mieux contribué aux objectifs de cette organisation professionnelle.



Matthew N. O. Sadiku

Matthew N.O. Sadiku est actuellement professeur à l'Université Prairie View A & M dans l'état d'Illinois. Avant de rejoindre l'Université de Prairie View, il a enseigné à l'Université Florida Atlantic à Boca Raton, et à l'Université Temple à Philadelphie. Il a également travaillé pour les companies Lucent /Avaya et Boeing Satellite Systems.

Dr. Sadiku est l'auteur de plus de 130 articles professionnels et plus de 20 livres parmi lesquels on cite *Elements of Electromagnetics* (Oxford University Press, 3^e éd., 2001), *Numerical Techniques in Electromagnetics* (2^e éd., CRC Press, 2000), *Simulation of Local Area Networks* (avec M. Ilyas, CRC Press, 1994), *Metropolitan Area Networks* (CRC Press, 1994), et *Fundamentals of Electric Circuits* (avec C.K. Alexander, McGraw-Hill, 3^e éd., 2007). Ses livres sont connus dans le monde entier et certain d'entre eux ont été traduits en coréen, chinois, italien et espagnol. Il a été le récipiendaire du Prix 2000 McGraw-Hill/Jacob Millman pour sa contribution exceptionnelle dans le domaine du génie électrique. Il a été le secrétaire du Comité pour les activités des étudiants pour la région 2 de l'IEEE et président et rédacteur en chef adjoint pour la publication de l'IEEE intitulée *Transactions on Education*. Il a reçu le titre de Docteur à l'Université Technologique du Tennessee, Cookeville.



Analyse des circuits électriques

Circuits à courant continu (c.c.)

CONTENU

- 1 Concepts de base
- 2 Lois fondamentales
- 3 Méthodes d'analyse
- 4 Théorèmes des circuits
- 5 Amplificateurs opérationnels
- 6 Condensateurs et inducteurs
- 7 Circuits du premier ordre
- 8 Circuits du second ordre



Concepts de base

Une chose que j'ai appris tout au long de la vie : toute notre science, par rapport à la réalité, est primitive et enfantine, et pourtant c'est la chose la plus précieuse dont nous disposons.

—Albert Einstein

Améliorez vos compétences et préparez votre carrière

En tant qu'étudiants, vous devez étudier les mathématiques, les sciences et l'ingénierie dans le but d'être en mesure d'appliquer les connaissances apprises à la résolution des problèmes d'ingénierie. La compétence requise ici est la capacité d'appliquer des principes fondamentaux afin de résoudre un certain nombre de problèmes. Dans ce sens, comment allez-vous développer et renforcer cette compétence ?

La meilleure approche est de travailler autant de problèmes que possible dans tous vos cours. Par ailleurs, si vous avez vraiment du succès, vous devriez passer du temps à analyser où et quand et pourquoi vous avez parfois des difficultés à trouver des solutions faciles. Vous seriez surpris d'apprendre que la plupart de vos problèmes sont liés aux mathématiques plutôt qu'à votre compréhension de la théorie. Vous allez peut-être également réaliser que vous commencez à travailler le problème trop tôt. Prendre le temps de réfléchir et comprendre comment vous devez résoudre un problème vous fera toujours gagner du temps et vous évitera certaines frustrations.

J'ai pu remarquer que ce qui fonctionnait le mieux pour moi était d'appliquer une technique en six étapes pour solutionner toutes sortes de problèmes. Ensuite, j'ai pris soin de bien identifier les domaines dans lesquels j'avais des difficultés. Bien des fois, mes carences réelles se trouvaient dans ma compréhension et ma capacité d'utiliser correctement certains principes mathématiques. Je peux retourner à mes livres de mathématiques et examiner attentivement les chapitres appropriées, dans de nombreux cas, revoir les exemples et les solutions. Cela m'amène à vous conseiller de bien garder vos livres de mathématiques, de sciences, d'ingénierie et vos manuels.

Ce processus de recherche continu que vous pensez acquis peut vous sembler fastidieux à première vue, mais comme vos compétences et vos connaissances vont en s'améliorant, ce processus deviendra de plus en plus facile. Personnellement, c'est ce processus qui m'a conduit à partir d'un étudiant inférieur à moyen vers quelqu'un qui a pu réaliser un doctorat et est devenu un chercheur à succès.



Photo © Charles Alexander.

1.1 Introduction

La théorie des circuits électriques et la théorie électromagnétique sont les deux théories fondamentales sur lesquelles toutes les branches de l'ingénierie électrique sont construites. De nombreuses branches de l'ingénierie électrique, comme l'énergétique, les machines électriques, l'automatique, l'électronique, les communications et l'instrumentation, sont basées sur la théorie des circuits électriques. Par conséquent, le cours de base sur la théorie des circuits électriques est de loin le cours le plus important pour un étudiant électricien et toujours un excellent point de départ pour tout étudiant débutant dans l'enseignement du génie électrique. La théorie des circuits est également utile aux étudiants dans les autres branches des sciences physiques, car les circuits sont un excellent modèle pour l'étude des systèmes énergétiques en général et les notions mathématiques utilisées permettent la modélisation de la physique sous-jacente.

En génie électrique, nous nous intéressons à communiquer ou de transférer l'énergie d'un point à un autre. Pour ce faire, nous interconnectons des appareils électriques. Cette interconnexion est appelé *circuit électrique* et chaque composant du circuit est appelé *élément du circuit électrique*.

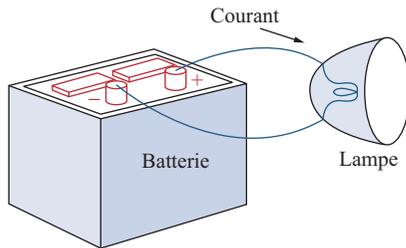


Figure 1.1
Circuit électrique simple.

Un **circuit électrique** est une interconnexion entre éléments électriques.

Un circuit électrique simple est illustré à la Fig. 1.1. Il se compose de trois éléments fondamentaux : une batterie, une lampe et des fils. Un tel circuit peut exister de par lui-même, il peut avoir plusieurs applications comme par exemple être un spot lumineux, une lampe de poche et ainsi de suite.

Un circuit complexe est illustré à la Fig. 1.2 et représente le schéma d'un récepteur radio. Bien que cela semble compliqué, ce circuit peut être analysé en utilisant les techniques que nous découvrirons dans ce livre. Notre objectif, tout au long de cet ouvrage est d'apprendre les différentes techniques d'analyse et d'utiliser les logiciels appropriés pour décrire le comportement de circuits semblables.

Les circuits électriques sont utilisés dans de nombreux systèmes électriques pour accomplir différentes tâches. Notre objectif n'est pas l'étude des diverses utilisations et applications des circuits mais bien l'analyse de ces circuits. Par l'analyse d'un circuit nous entendons une étude du comportement du circuit : comment répond-t-il à un paramètre d'entrée donné ? Comment interagissent les éléments interconnectés d'un circuit donné ?

Nous commencerons notre étude par la définition de certaines notions de base. Avant de définir ces notions, nous devons d'abord établir un système d'unités que nous allons utiliser tout au long de cet ouvrage.

1.2 Système d'unités de mesure

Comme électriciens, nous traitons des quantités bien mesurables. Les mesures effectuées doivent être communiquées dans un langage standard que tous les professionnels peuvent comprendre, quel que soit le pays où

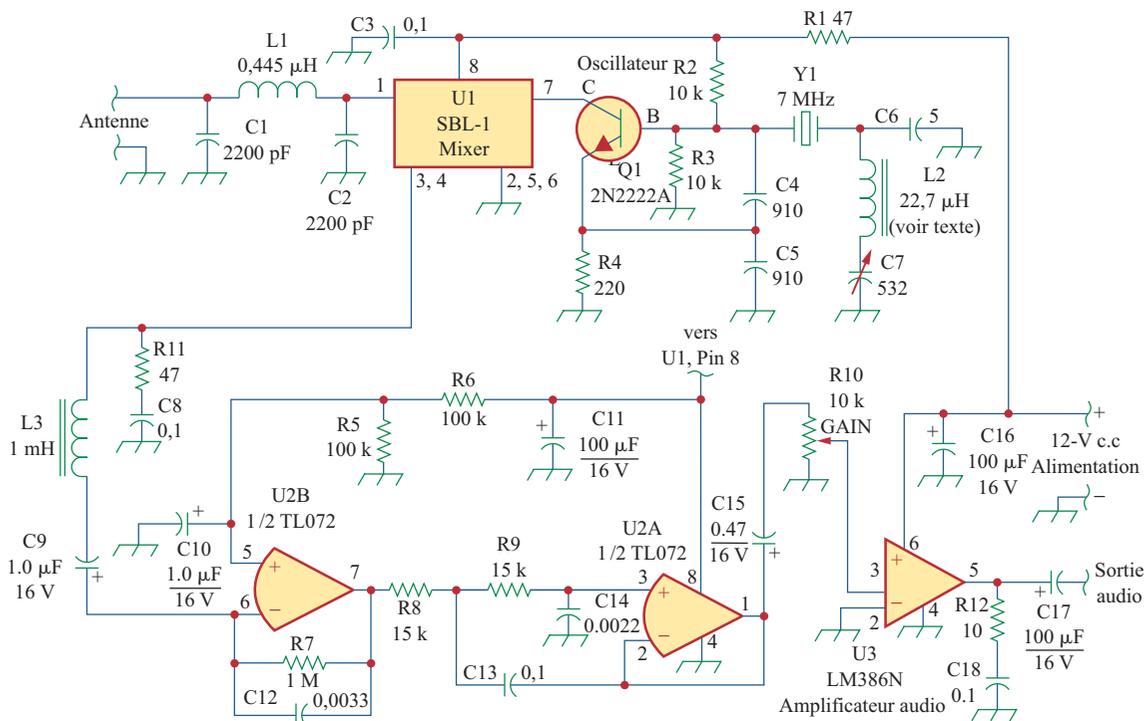


Figure 1.2
Schéma électrique d'un récepteur radio.
(Reproduction avec la permission de *QST*, août 1995, p. 23)

la mesure est effectuée. Un tel système doit être universel et en l'occurrence s'appelle le Système International d'unités (SI). Il a été adopté par la Conférence générale sur les poids et mesures en 1960. Dans ce système, il y a six principales unités à partir desquelles les unités de toutes les autres grandeurs physiques peuvent être dérivées. Le Tableau 1.1 présente ces six unités, leurs symboles et les quantités physiques qu'ils représentent. Dans cet ouvrage nous utiliserons uniquement les unités SI.

Un grand avantage du SI est qu'il utilise des préfixes basés sur la puissance de 10 pour décrire les unités plus grandes et plus petites par rapport à l'unité de base. Le Tableau 1.2 indique ces préfixes et leurs symboles. Par exemple, les valeurs suivantes représentent la même distance, exprimée en mètres (m) :

600 000 000 mm 600 000 m 600 km

TABLEAU 1.1 Les six unités de base SI.

Quantité	Unité de base	Symbole
Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Intensité du courant	ampère	A
Température	degré kelvin	K
Intensité de la lumière	candela	cd

TABLE 1.2 Les préfixes SI

Multiplicateur	Préfixe	Symbole
10 ¹⁸	exa	E
10 ¹⁵	peta	P
10 ¹²	tera	T
10 ⁹	giga	G
10 ⁶	mega	M
10 ³	kilo	k
10 ²	hecto	h
10	deka	da
10 ⁻¹	deci	d
10 ⁻²	centi	c
10 ⁻³	milli	m
10 ⁻⁶	micro	µ
10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁻¹²	pico	p
10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ⁻¹⁸	atto	a

1.3 Charge et courant électrique

La notion de charge électrique est le principe sous-jacent permettant d'expliquer tous les phénomènes électriques. La quantité élémentaire d'électricité est *la charge électrique*. Nous avons tous fait l'expérience de l'effet de la charge électrique, par exemple lorsque nous essayons d'enlever un pull de laine ou de marcher sur un tapis et nous recevons une décharge électrique.

La **charge électrique** est une propriété électrique des particules atomiques qui composent la matière, elle est mesurée en coulombs (C).

Nous savons par la physique élémentaire que toute matière est faite de blocs fondamentaux connus sous le nom d'atomes et que chaque atome est constitué d'électrons, de protons et de neutrons. Nous savons aussi que la charge e d'un électron est négative et est égale à $1,602 \times 10^{-19}$ C, tandis que le proton porte une charge positive de même amplitude que l'électron. La présence d'un nombre égal de protons et d'électrons dans un atome maintient l'atome neutre.

Les points suivants doivent être retenus au sujet de la charge électrique :

1. Les charges électriques sont exprimées en Coulombs. Un Coulomb représente un très grand nombre de charges. En effet, pour 1 C il y a $1/(1,602 \times 10^{-19}) = 6,24 \times 10^{18}$ électrons. Ainsi, les valeurs usuelles qu'on utilise pour des travaux pratiques dans les laboratoires sont de l'ordre du pC, nC ou μC ¹.
2. Selon toutes les observations expérimentales, les seules charges qui existent dans la nature à notre échelle sont des multiples entiers de la charge élémentaire $e = -1,602 \times 10^{-19}$ C.
3. La *loi de la conservation* établit que les charges ne peuvent être ni créées ni détruites, seulement transformées. Ainsi, la somme algébrique des charges électriques ne change pas.

Nous considérons maintenant le flux de charges électriques. Une caractéristique unique de la charge électrique ou de l'électricité est le fait qu'elle est mobile, c'est-à-dire qu'elle peut être transférée d'un endroit à l'autre, où elle peut être convertie en une autre forme d'énergie.

Quand un fil conducteur (composé d'atomes) est relié à une batterie (une source de force électromotrice) les charges sont obligées de se déplacer ; les charges positives se déplacent dans une direction alors que les charges négatives se déplacent dans la direction opposée. Ce déplacement de charges crée le courant électrique. Par convention le sens du courant est donné par le mouvement des charges positives. La circulation des charges négatives est illustrée à la Fig. 1.3. Cette convention a été présentée par Benjamin Franklin (1706 – 1790), le chercheur et inventeur américain. Bien que nous savons maintenant que le courant électrique dans les conducteurs métalliques est dû à des électrons chargés négativement, nous suivons encore sa convention, universellement acceptée selon laquelle le courant est le flux net de charges positives. Ainsi donc :

Le **courant électrique** est le taux de variation de la charge, mesuré en ampères (A).

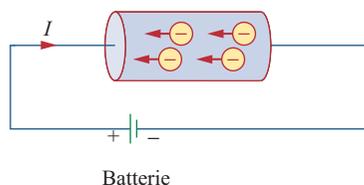


Figure 1.3

Le courant électrique dû à l'écoulement des charges électriques dans un conducteur.

Une convention est un moyen standard de décrire quelque chose afin que les professionnels de la même profession puissent comprendre ce que nous voulons dire. Par conséquent, nous allons utiliser les conventions internationales partout dans ce livre.

¹ Toutefois, un condensateur de grande capacité peut stocker des charges jusqu'à 0,5 C.

Note historique

André-Marie Ampère (1775 – 1836) mathématicien et physicien français, a posé les bases de l'électrodynamique. C'est lui qui a défini le courant électrique et a développé une méthode de mesure, en 1820. Né à Lyon en France, Ampère maîtrisait dès l'âge de 12 ans le Latin, l'apprenant en quelques semaines car il était intensément intéressé par les mathématiques et qu'à l'époque les meilleurs ouvrages étaient écrits en Latin. Il était un brillant scientifique et un écrivain prolifique. Il a formulé les lois de l'électromagnétique. Il a également inventé l'électroaimant et l'ampèremètre. L'unité du courant électrique, l'ampère, a été nommée en son honneur.



Source : Bibliothèque Burndy de l'Institut Diberner pour l'Histoire de la Science et de la Technologie, Cambridge, Massachusetts.

Mathématiquement, la relation entre le courant i , la charge électrique q et le temps t est donnée comme suit :

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

où le courant i est mesuré en ampères (A) et

$$1 \text{ ampère} = 1 \text{ coulomb/seconde}$$

La charge électrique transférée entre le moment t_0 et t est obtenue par l'intégration de l'équation (1.1). Nous obtenons :

$$Q \triangleq \int_{t_0}^t i dt \quad (1.2)$$

La façon dont nous définissons le courant à l'aide de l'équation (1.1) suggère que le courant ne doit pas être une valeur constante. Comme beaucoup d'exemples et de problèmes dans ce chapitre et les chapitres suivants, nous allons constater qu'il existe plusieurs types de courant et c'est la quantité de charges électriques qui peut varier avec le temps.

Si le courant ne change pas avec le temps, donc il demeure constant, on l'appellera *courant continu* (c.c.).

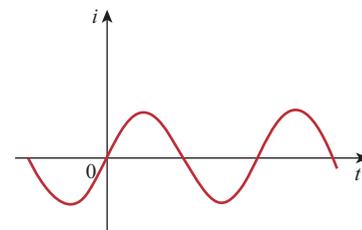
Un **courant continu** (c.c.) est donc un courant indépendant du temps.

Par convention, le symbole I est utilisé pour représenter le courant continu.

Pour un courant variable avec le temps on utilise le symbole i . Un exemple bien connu d'un courant variable est le courant sinusoïdal ou *courant alternatif* (c.a.).



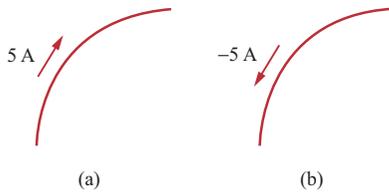
(a)



(b)

Figure 1.4

Deux types de courant électrique : (a) courant continu (c.c.), (b) courant alternatif (c.a.).

**Figure 1.5**

Le sens conventionnel du courant électrique : (a) sens positif, (b) sens négatif.

Le **courant alternatif** est un courant électrique qui périodiquement change de sens.

Ce type de courant est utilisé dans les ménages, pour faire fonctionner le climatiseur, le réfrigérateur, la machine à laver et d'autres appareils électriques. La Fig. 1.4 montre les représentations conventionnelles du courant continu et alternatif ; les types les plus usuels. Nous allons envisager d'autres types de courant, plus tard dans ce livre.

Une fois que nous définissons le courant électrique comme un mouvement des charges, nous nous attendons à avoir une direction associée à ce flux. Comme mentionné précédemment, la direction du courant est conventionnellement adoptée comme la direction de mouvement des charges positives. Sur la base de cette convention, un courant de 5 A peut être représenté positivement ou négativement comme le montre la Fig. 1.5. En d'autres termes, un courant électrique négatif de -5 A qui circule dans le sens défini à la Fig. 1.5(b) est le même qu'un courant électrique de +5 A qui circule dans la direction opposée.

Exemple 1.1

Quelle est la charge électrique qui correspond à 4 600 électrons ?

Solution :

Chaque électron dispose d'une charge électrique de $-1,602 \times 10^{-19}$ C. Par conséquent, 4 600 électrons représentent une charge électrique de $-1,602 \times 10^{-19}$ C/électron \times 4 600 électrons = $-7,369 \times 10^{-16}$ C.

Exercice 1.1

La charge totale circulant dans un conducteur est exprimée par : $q = 5t \sin 4\pi t$ mC. Calculer le courant au moment $t = 0,5$ s.

Réponse : $+ 3,204 \times 10^{-13}$ C

Exemple 1.2

La charge totale circulant dans un conducteur est exprimée par l'expression $q = 5t \sin 4\pi t$ mC. Calculer le courant pour $t = 0,5$ s.

Solution :

$$i = dq/dt = d/dt (5t \sin 4\pi t) \text{ mC/s} = (5 \sin 4\pi t + 20\pi t \cos 4\pi t) \text{ mA}$$

Pour $t=0,5$ s,

$$i = 5 \sin 2\pi + 10 \pi \cos 2\pi = 0 + 10\pi = 31,42 \text{ mA}$$

Exercice 1.2

Trouver la valeur du courant pour $t = 0,5$ s, si l'expression de la charge électrique dans l'exemple précédent est donné par : $q = (10 - 10 e^{-2t})$.

Réponse : $+ 3,204 \times 10^{-13}$

Exemple 1.3

Déterminez la valeur de la charge qui circule dans un conducteur pendant l'intervalle de temps $t = 1$ s et $t = 2$ s, si l'expression du courant est donné par l'équation $i = (3t^2 - t)$ A.

Solution :

$$\begin{aligned} Q &= \int_{t=1}^2 i dt = \int_1^2 (3t^2 - t) dt \\ &= \left(t^3 - \frac{t^2}{2} \right) \Big|_1^2 = (8 - 2) - \left(1 - \frac{1}{2} \right) = 5,5 \text{ C} \end{aligned}$$

Exercice 1.3

Le courant traversant un élément est caractérisé par :

$$i = \begin{cases} 2 \text{ A} & 0 < t < 1 \\ 2t^2 \text{ A} & t > 1 \end{cases}$$

Calculer la valeur de la charge qui circule à travers l'élément de circuit pour l'intervalle de temps de $t = 0$ jusqu'à $t = 2$ s.

Réponse : 6,667 C

1.4 Différence de potentiel

Comme il a déjà été expliqué brièvement dans la section précédente, le déplacement des électrons dans un conducteur suivant une direction particulière exige un certain travail ou transfert d'énergie. Ce travail est accompli par une force extérieure à la charge appelée force électromotrice (f.é.m.) généralement assurée par l'existence d'une source d'alimentation, comme dans le cas de la batterie à la Fig. 1.3. Cette f.é.m. est également connue comme la *tension* ou *différence de potentiel*. La différence de potentiel v_{ab} entre deux points a et b d'un circuit électrique est l'énergie (ou le travail) nécessaire pour déplacer une charge électrique unitaire du point a au point b . Mathématiquement ceci s'exprime par l'équation :

$$v_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq} \quad (1.3)$$

où w est l'énergie, exprimée en joules (J) et q est la quantité de charges électriques, exprimée en coulombs (C). La différence de potentiel v_{ab} ou simplement v , est mesurée en volt (V). Cette unité de mesure est dénommée ainsi en l'honneur du physicien italien Alessandro Antonio Volta (1745-1827) qui a inventé la première batterie voltaïque. De l'équation (1.3) il est évident que :

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ joule/coulomb} = 1 \text{ newton.mètre/coulomb}$$

La *tension* (ou la *différence de potentiel*) est l'énergie nécessaire pour déplacer une charge électrique unitaire à travers un élément de circuit, mesurée en volts (V).

La Fig. 1.6 montre la différence de potentiel aux bornes d'un élément de

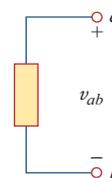


Figure 1.6

La polarité d'une différence de potentiel, v_{ab} .

Note historique



Source : Bibliothèque Burndy de l'Institute Dibner pour l'Histoire de la Science et des Technologies, Cambridge, Massachusetts.

Alessandro Antonio Volta (1745–1827), physicien italien, qui a construit la première pile électrique démontrant ainsi, pour la première fois dans l'histoire, la propriété du courant électrique de parcourir les conducteurs. Il est aussi le premier à construire un condensateur électrique.

Né dans une famille noble à Como en Italie, Volta a commencé ses premières expériences d'électricité à l'âge de 18 ans. L'invention de la pile électrique en 1796 a vraiment révolutionnée l'utilisation de l'électricité. La publication de ses travaux vers l'an 1800 a marqué pour toujours l'histoire de la théorie des circuits électriques. Volta a reçu de nombreux prix durant sa vie. En sa mémoire, l'unité de mesure pour la différence de potentiel porte son nom, le volt.

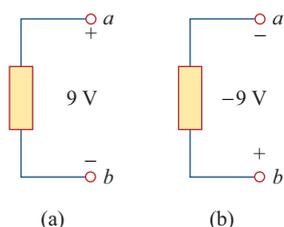


Figure 1.7

Deux représentations conventionnelles de la même différence de potentiel v_{ab} : (a) le point a se trouve au potentiel $+9\text{V}$ par rapport au point b , (b) le point b se trouve au potentiel -9V par rapport au point a .

À retenir que le courant électrique s'établit toujours à travers un élément de circuit tandis que la différence de potentiel est mesurée aux bornes de l'élément ou entre deux points distincts du circuit.

circuit (représenté schématiquement par un rectangle) connecté entre les points a et b du circuit. Les signes plus (+) et moins (-) sont utilisés pour définir la direction de référence du courant électrique ou la polarité de la différence de potentiel. La différence de potentiel v_{ab} peut être interprétée de deux façons : (1) le point a se trouve à un potentiel plus élevée que celui du point b , ou (2) le potentiel du point a par rapport au point b est v_{ab} . Il s'ensuit logiquement et en toute généralité que :

$$v_{ab} = -v_{ba} \quad (1.4)$$

Par exemple, à la Fig. 1.7 nous avons deux représentations de la même différence de potentiel. À la Fig. 1.7(a) le point a est au potentiel $+9\text{V}$ par rapport au point b ; à la Fig. 1.7(b) le point b se trouve à une différence de potentiel de -9V par rapport au point a . En d'autres termes, nous pouvons dire qu'il y a une diminution de potentiel de 9V de a à b ou une augmentation équivalente de 9V , si on change de direction en se dirigeant du point b vers le point a .

Le courant électrique et la différence de potentiel sont les deux variables de base dans les circuits électriques. Le terme de *signal* est utilisée pour une quantité électrique comme un courant ou une tension (ou même une onde électromagnétique) quand ce terme est utilisé pour transmettre une information. Les ingénieurs préfèrent appeler variables de tels signaux plutôt que fonctions mathématiques temporelles, en raison de leur importance dans les communications et d'autres disciplines. Comme pour le courant électrique, une tension constante dans le temps est appelée une *tension continue* (*c.c.*) et est représentée par le symbole V , alors qu'une *tension variable* (*c.a.*) comme par exemple la tension sinusoïdale, est appelée tension alternative et est représentée par le symbole v . Une tension continue est généralement produite par une batterie, la tension à courant alternatif est produite par une génératrice électrique.

1.5 Puissance et énergie électrique

Bien que le courant électrique et la différence de potentiel soient les deux variables de base d'un circuit électrique, ceux-ci ne sont pas suffisants pour définir complètement le circuit. Pour des raisons pratiques, nous avons besoin de savoir la puissance qu'un circuit ou un dispositif électrique peut gérer. Nous savons tous de par l'expérience qu'une ampoule de 100 watts donne plus de lumière qu'une ampoule de 60 watts. Nous savons aussi que lorsque nous payons nos factures d'électricité, nous payons pour l'énergie électrique consommée pendant une certaine période de temps. Ainsi la puissance et l'énergie électrique sont des paramètres très importants dans l'analyse des circuits électriques.

En faisant le lien puissance-énergie et tension-courant, nous nous souvenons de par la physique que :

La **puissance** est la vitesse avec laquelle on consomme de l'énergie, mesurée en watts (W).

Nous pouvons écrire mathématiquement cette relation comme suit :

$$p \triangleq \frac{dw}{dt} \quad (1.5)$$

où p est la puissance électrique en watts (W), w est l'énergie en joules (J) et t est le temps en secondes (s). Des équations (1.1) (1.3) et (1.5) il s'ensuit que :

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = vi \quad (1.6)$$

ou

$$p = v i \quad (1.7)$$

La puissance électrique p dans l'équation (1.7) est une quantité variable dans le temps et est appelée *puissance instantanée* ou *puissance momentanée*. Ainsi, la puissance absorbée ou fournie par un élément de circuit est égale au produit de la différence de potentiel (tension) aux bornes de l'élément et le courant électrique à travers cet élément. Si la puissance a un signe (+) cela signifie que la puissance est absorbée (consommée) par l'élément considéré. Au contraire, si la puissance se voit attribuer le signe négatif (-) cela signifie que la puissance est délivrée par cet élément. Mais, comment pouvons-nous savoir quand la puissance est de signe positif ou négatif ?

Le sens de circulation du courant électrique et la polarité attribuée à la différence de potentiel jouent un rôle déterminant dans la détermination du signe de la puissance. Il est donc important que nous prêtions une attention particulière à la relation entre le courant électrique i et la différence de potentiel v , comme le montre la Fig. 1.8 (a). La polarité de la tension et la direction du courant doivent être conformes à celles de la Fig. 1.8(a) pour que la puissance soit positive. C'est la *convention du signe passif*. Par la convention du signe passif, le courant entre à la polarité positive de la tension. Dans ce cas, $p = +vi$ ou $vi > 0$, ce qui signifie que l'élément de circuit consomme de la puissance. Toutefois, si $p = -vi$ ou $vi < 0$ comme à la Fig. 1.8(b) l'élément de circuit est supposé être une source d'alimentation ou fournisseur d'énergie.

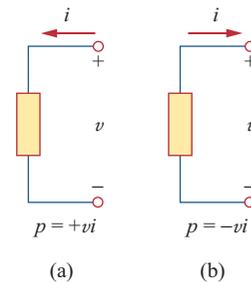
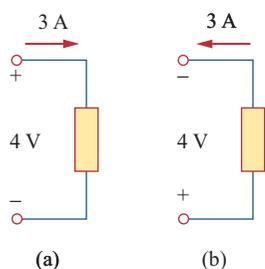


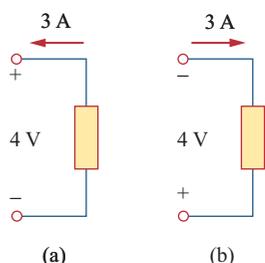
Figure 1.8

Polarité de référence pour la puissance en utilisant la convention du signe passif : (a) puissance absorbée par l'élément de circuit, (b) puissance fournie par l'élément de circuit.

Quand le sens de la différence de potentiel et du courant correspondent à la Fig. 1.8(b) nous pouvons parler de la *convention active du signe* et $p = +vi$.

**Figure 1.9**

Deux exemples d'un élément qui consomme une puissance de 12 W : (a) $p = 4 \times 3 = 12$ W, (b) $p = 4 \times 3 = 12$ W.

**Figure 1.10**

Deux exemples d'un élément qui consomme une puissance de 12 W : (a) $p = -4 \times 3 = -12$ W ; (b) $p = -4 \times 3 = -12$ W.

La **convention du signe passif** est satisfaite lorsque le courant pénètre par la borne positive d'un élément de circuit et dans ce cas $p = +vi$. Si le courant entre par la borne négative, $p = -vi$.

Sauf indication contraire, nous suivrons la convention du signe passif tout au long de cet ouvrage. À titre d'exemple, l'élément dans les deux circuits de la Fig. 1.9 est consommateur d'énergie d'une puissance de + 12 W, car un courant positif entre par la borne de polarité positive de l'élément dans les deux cas. Au contraire, à la Fig. 1.10, l'élément de circuit fournira une puissance de + 12 W, car un courant positif entre par la borne négative de l'élément. Évidemment, la consommation d'une puissance de - 12 W est équivalente à la fourniture d'une puissance de + 12 W. En général,

$$+ \text{ Puissance consommée} = - \text{ Puissance fournie}$$

En fait, *la loi de conservation de l'énergie* doit être respectée dans tout circuit électrique. Pour cette raison, la somme algébrique de la puissance dans un circuit, à tout instant, doit être égale à zéro :

$$\sum p = 0 \quad (1.8)$$

Ceci confirme encore le fait que la puissance totale fournie au circuit doit équilibrer la puissance totale absorbée.

De l'équation (1.6) l'énergie absorbée ou fournie par un élément pendant l'intervalle de temps de t_0 à t est :

$$w = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t v i dt \quad (1.9)$$

L'**énergie** représente la capacité d'un circuit de fournir du travail, mesurée en joules (J).

Les fournisseurs d'énergie électrique mesurent l'énergie fournie en Wattheure (Wh) soit

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$$

Exemple 1.4

Une source d'alimentation assure un courant de 2 A pendant 10 s à travers une lampe à incandescence. Si une énergie de 2,3 kJ se retrouve sous forme de lumière et chaleur, calculer la différence de potentiel aux bornes de cette lampe.

Solution :

La quantité totale de charge électrique est

$$\Delta q = i \Delta t = 2 \times 10 = 20 \text{ C}$$

La différence de potentiel est

$$v = \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{2,3 \times 10^3}{20} = 115 \text{ V}$$

Exercice 1.4

Pour déplacer une charge électrique q entre le point a et le point b on dépense un travail de -30 J. Déterminer la différence de potentiel v_{ab} si : (a) $q = 2 \text{ C}$; (b) $q = -6 \text{ C}$

Réponse : (a) - 15 V ; (b) 5 V.

Exemple 1.5

Pour $t = 3$ ms trouver la valeur de la puissance délivrée à un élément de circuit si le courant entrant par la borne positive de celui-ci. Le courant est donné par l'équation $i = 5 \cos 60 \pi t$ A et la différence de potentiel est : (a) $v = 3i$; (b) $v = 3 \frac{di}{dt}$.

Solution :

(a) La différence de potentiel est $v = 3i = 15 \cos 60 \pi t$ et par conséquent, la puissance électrique est

$$p = vi = 75 \cos^2 60\pi t \text{ W}$$

pour $t = 3$ ms on obtient :

$$p = 75 \cos^2 (60\pi \times 3 \times 10^{-3}) = 75 \cos^2 0,18\pi = 53,48 \text{ W}$$

(b) Nous pouvons calculer la différence de potentiel et la puissance de la manière suivante :

$$v = 3 \frac{di}{dt} = 3(-60\pi)5 \sin 60\pi t = -900\pi \sin 60\pi t \text{ V}$$

$$p = vi = -4500\pi \sin 60\pi t \cos 60\pi t \text{ W}$$

pour $t = 3$ ms on obtient :

$$p = -4500\pi \sin 0,18\pi \cos 0,18\pi \text{ W}$$

$$= -14137,167 \sin 32,4^\circ \cos 32,4^\circ = 6,396 \text{ kW}$$

Exercice 1.5

Calculer la puissance de l'élément de circuit de l'Exemple 1.5 pour $t = 5$ ms si le courant est constant mais la différence de potentiel est :

$$(a) v = 2i \text{ V} ; (b) v = \left(10 + 5 \int_0^t i dt\right) \text{ V}$$

Réponse : (a) 17,27 W ; (b) 29,7 W

Exemple 1.6

Quelle est l'énergie consommée par une ampoule de 100 W pendant deux heures de fonctionnement ?

Solution : $w = p t = 100 \text{ (W)} \times 2 \text{ (h)} \times 60 \text{ (min/h)} \times 60 \text{ (s/min)}$

$$= 720\,000 \text{ J} = 720 \text{ kJ}$$

Soit : $w = p t = 100 \text{ W} \times 2 \text{ h} = 200 \text{ Wh}$

Exercice 1.6

Un élément chauffant d'un four tire un courant de 15 A. Ce four est alimenté par un réseau sous 120 V. En combien de temps le four consomme 30 kJ d'énergie ?

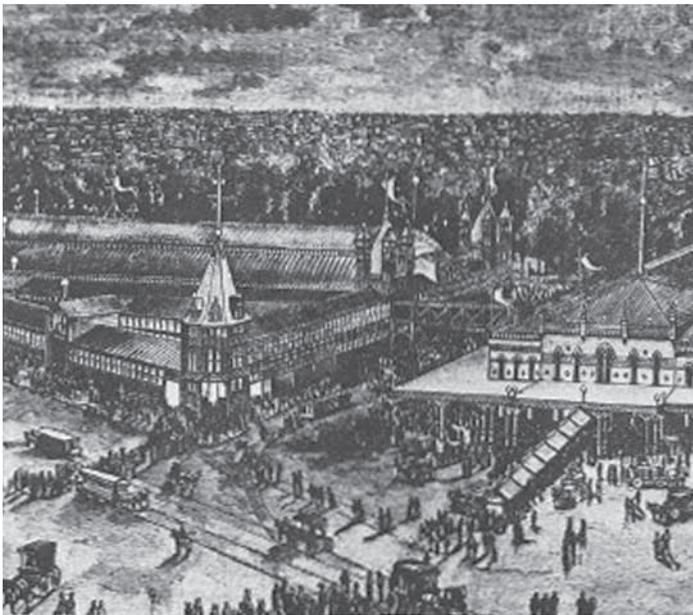
Réponse : 16,667

Note historique

L'Exposition internationale de 1884. Aux États-Unis, l'Exposition internationale sur l'électricité a marqué l'avenir de ce domaine. Essayons d'imaginer un monde sans électricité, un monde éclairé uniquement par des bougies et des lampes à gaz, un monde où le transport en commun se résume à des promenades pédestres à dos de cheval ou dans des calèches tirées par des animaux ! L'exposition a été organisée dans le but de mettre en évidence les travaux remarquables de Thomas Edison, de promouvoir les dernières inventions et produits dans le domaine de l'électricité. L'exposition a donné l'occasion de présenter les derniers exploits spectaculaires de l'éclairage électrique.

Durant l'exposition, Edward Weston a exposé ses lampes électriques et ses dynamos construites par *United States Lighting Company* ainsi que sa collection remarquable d'instruments scientifiques.

Parmi d'autres participants à cette Exposition il faut mentionner Frank Sprague, Elihu Thompson et en égale mesure *Brush Electric Company* de Cleveland. L'*American Institute of Electrical Engineers* (AIEE) a tenu le 7-8 octobre son premier congrès accueilli dans les salons du *Franklin Institute* de Philadelphie. L'AIEE a fusionné finalement avec l'*Institute of Radio Engineers* (IRE) en 1964 pour constituer le fameux *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).



1.6 Éléments de circuit

Comme nous l'avons mentionné à la Section 1.1, un élément du circuit est la pierre angulaire du circuit. Un circuit électrique est tout simplement une interconnexion d'éléments. L'analyse des circuits est le processus par lequel sont déterminées les tensions aux bornes des différents éléments de circuits (ou les valeurs des courants les traversent).

Il existe deux types d'éléments de circuit : des *éléments passifs* et des *éléments actifs*. Un élément actif est capable de produire de l'énergie ce qui n'est pas le cas de l'élément passif. Les résistances électriques, les condensateurs et les inductances sont des éléments passifs. Au contraire, les sources d'alimentation, les piles ou les batteries, les amplificateurs opérationnels sont des éléments actifs. Notre objectif dans cette section est de familiariser l'étudiant avec les éléments actifs les plus utilisés pour constituer les circuits électriques.

Les éléments actifs les plus importants sont représentés par les sources de tension ou de courant. En général, il s'agit d'éléments qui fournissent de l'énergie au circuit connecté à leurs bornes. Il existe deux types de sources d'alimentation : sources indépendantes et sources dépendantes.

Une **source indépendante idéale** est un élément actif qui assure à ses bornes une différence de potentiel ou un courant bien précis qui, en plus est complètement indépendante des autres éléments du circuit.

En d'autres termes, une source indépendante idéale de tension maintiendra à ses bornes une différence constante de potentiel tout en fournissant au circuit alimenté le courant requis. Les sources d'alimentation usuelles, comme par exemple une batterie ou toute autre source physique, peuvent être considérées, avec une bonne approximation, comme sources idéales de tension. La Fig. 1.11 montre les symboles pour désigner les sources de tension indépendantes. Notez que les deux symboles de la Fig. 1.11(a) et (b) peuvent être utilisés pour représenter une source de tension continue, mais seulement le symbole de la Fig. 1.11(a) peut être utilisé pour signaler une source de tension variable dans le temps. De même, une source indépendante de courant est un élément actif qui fournit un courant d'une valeur bien définie, complètement indépendante de la différence de potentiel aux bornes de la source. Autrement dit, la source de courant délivre au circuit le courant désigné, quelle que soit la différence de potentiel aux bornes de la source de courant. Le symbole d'une source indépendante de courant est présenté à la Fig. 1.12 où la flèche indique le sens du courant i .

Une **source dépendante idéale** (ou **contrôlée**) est un élément actif. Le paramètre de sortie de cette source (courant ou différence de potentiel) est à son tour déterminé par un autre courant ou différence de potentiel.

En général, les sources dépendantes sont représentées dans les schémas par un symbole en forme de diamant, comme le montre la Fig. 1.13. Étant donné que le contrôle de la source est réalisé soit par une différence de potentiel (tension) soit par le courant d'un autre élément de circuit, il s'ensuit qu'il y a quatre types possibles de sources dépendantes :

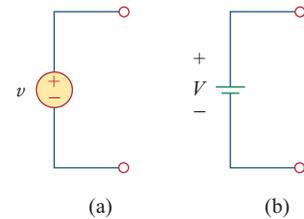


Figure 1.11

Symboles pour les sources indépendantes de tension : (a) pour une source de tension constante ou variable en temps ; (b) pour une source de tension constante continue (c.c.).

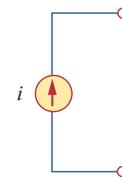


Figure 1.12

Symbole de source indépendante de courant.

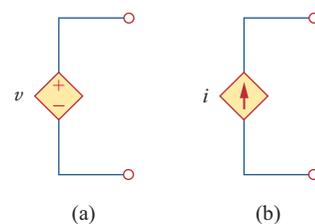


Figure 1.13

Symboles pour : (a) une source dépendante de tension ; (b) une source dépendante de courant.

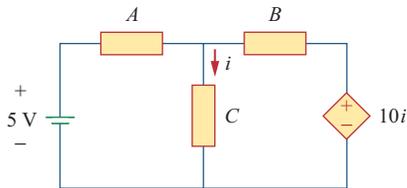


Figure 1.14

La source placée à droite est une source de courant commandée en tension.

1. Source indépendante de tension commandée en tension (VCVS)
2. Source indépendante de courant commandée en tension (CCVS)
3. Source indépendante de tension commandée en courant (VCCS)
4. Source indépendante de courant commandée en courant (CCCS)

Les sources dépendantes (de courant ou de tension) sont utiles dans la modélisation des éléments de circuit tels que des transistors, amplificateurs opérationnels et les circuits intégrés. Un exemple d'une source de tension commandée en courant est donné dans la Fig. 1.14 où la tension de la source de tension $10i$ dépend du courant i qui s'établit à travers l'élément C. Les étudiants peuvent être surpris que la valeur de la source de tension dépendante soit exprimée par $10i$ V (et non $10i$ A !) car il s'agit bien là d'une source de tension. L'idée à garder à l'esprit est qu'une source de tension est livrée avec des polarités relatives au symbole (+ et -) tandis qu'une source de courant est fournie avec une flèche, indépendamment de tout ce que cela implique.

Il convient donc de noter qu'une source idéale de tension (dépendante ou indépendante) produira une intensité de courant nécessaire pour établir une tension indiquée à ses bornes, tandis qu'une source idéale de courant produira la tension nécessaire à ses bornes pour assurer la circulation d'un courant de la valeur définie. Ainsi, une source idéale (de courant ou de tension) pourrait en théorie fournir une quantité infinie d'énergie. Il convient également de noter que ces sources peuvent fournir de l'énergie à un circuit mais qu'elles peuvent agir aussi comme éléments de circuit qui consomment de l'énergie. Par conséquent, pour une source de tension nous pouvons connaître la différence de potentiel à ses bornes mais pas la valeur du courant fourni, tandis que pour une source de courant nous connaissons avec précision la valeur du courant fourni mais pas la différence de potentiel à ses bornes.

Exemple 1.7

Calculer la puissance électrique de chaque élément du circuit de la Fig. 1.15.

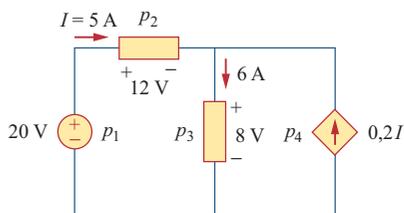


Figure 1.15

Pour l'Exemple 1.7.

Solution :

Nous appliquons la convention du signe tel que présentée à la Fig. 1.8 et Fig. 1.9. Pour calculer p_1 nous tenons compte du fait que le courant de 5 A quitte l'élément par la borne positive, donc :

$$p_1 = 20(-5) = -100 \text{ W} \quad \text{énergie fournie}$$

Concernant p_2 et p_3 , le courant entre par la borne positive de chaque élément.

$$p_2 = 12(5) = 60 \text{ W} \quad \text{énergie consommée}$$

$$p_3 = 8(6) = 48 \text{ W} \quad \text{énergie consommée}$$

pour p_4 il est à noter que la différence de potentiel est de 8 V (polarité positive pour la borne supérieure) la même différence de potentiel considérée pour calculer p_3 , parce que l'élément passif et la source dépendante sont tous les deux connectés aux bornes de même polarité.

(Rappelons que la différence de potentiel est toujours mesurée entre les bornes d'un élément.) Par convention, le sens du courant est sortant par la borne positive de la source.

$$p_4 = 8(-0,2I) = 8(-0,2 \times 5) = -8 \text{ W} \quad \text{énergie fournie}$$

Il faut remarquer que la source indépendante de tension de 20 V et la source dépendante de courant de $0,2I$ alimentent toutes les deux le schéma considéré, tandis que les deux éléments passifs sont des consommateurs. Nous avons ainsi :

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = -100 + 60 + 48 - 8 = 0$$

Ce qui satisfait les conditions de l'équation (1.8) : l'énergie fournie à un circuit est égale à l'énergie consommée.

Calculer l'énergie consommée ou fournie par chaque composant du circuit de la Fig. 1.16.

Réponse : $p_1 = -40 \text{ W}$, $p_2 = 16 \text{ W}$, $p_3 = 9 \text{ W}$, $p_4 = 15 \text{ W}$.

Exercice 1.7

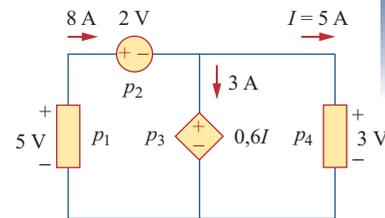


Figure 1.16
Pour l'Exercice 1.7.

1.7 † Applications¹

Dans cette section, nous considérons deux applications pratiques qui regroupent les concepts de base développés dans ce premier chapitre. La première application traite du fonctionnement du tube cathodique de télévision et la deuxième traite de la façon dont les services d'électricité calculent votre facture d'électricité.

1.7.1 Le tube cathodique TV

Une des plus importantes applications du déplacement des électrons est liée à la transmission et à la réception des signaux de télévision. Une caméra de télévision assure la conversion des images optiques en signaux électriques. Le balayage de l'image est assuré, dans la caméra par un faisceau d'électrons.

À la réception, l'image est reconstituée à l'aide d'un tube à rayons cathodiques (CRT) qui est la pièce maîtresse d'un poste TV². Schématiquement, le tube CRT est représenté à la Fig. 1.17. Le faisceau cathodique varie en intensité en fonction du signal d'entrée. Le canon à électrons, maintenu à un potentiel élevé, produit le faisceau d'électrons. Ce faisceau passe à travers les deux jeux de plaques subissant des déviations verticales et horizontales avant d'atteindre finalement l'écran fluorescent du tube TV. Lorsque le faisceau d'électrons frappe l'écran

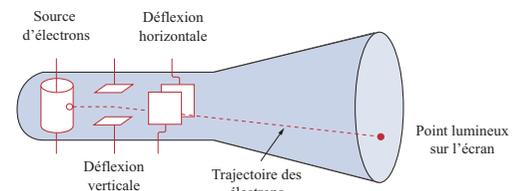


Figure 1.17
Tube cathodique TV.

¹ Ce signe indique le fait que ce sous-chapitre peut être omis, expliqué brièvement ou affecté au travail individuel.

² Les tubes TV modernes font appel à des technologies différentes.

Note historique



Zworykin avec un tube iconoscope.
© Bettmann/Corbis.

Karl Ferdinand Braun (1850-1918), professeur à l'université de Strasbourg, s'intéressa aux phénomènes électriques rapides. Pour pouvoir les étudier, il développa en 1897 un tube cathodique particulier, dit « tube de Braun » qui est à la base des tubes image utilisés pendant de nombreuses années dans les téléviseurs. Il est encore l'appareil le plus économique aujourd'hui, bien que le prix des systèmes à écran plat est en train de devenir compétitif. Son invention mena rapidement au développement de l'oscilloscope, qui plus tard allait permettre de réaliser les tubes cathodiques des téléviseurs, puis les premiers écrans d'ordinateurs. Braun exploita son invention dans la société *Professor Braun Telegrafien GmbH* en collaboration avec **Vladimir K. Zworykin** (1889-1982) pour aboutir à la construction du tube iconoscope à l'aide duquel la télévision deviendra réalité. L'iconoscope a permis de capter des images et de les convertir en signaux envoyés aux appareils récepteurs, les télévisions. Ainsi, naquit la caméra de télévision.

fluorescent du tube CRT, il émet de la lumière à cet endroit et nous assistons à la reconstitution sur l'écran de l'image réceptionnée sous forme des signaux électriques.

Exemple 1.8

Le faisceau d'électrons d'un tube cathodique TV est porteur d'un nombre de 10^{15} électrons par seconde. Déterminer la différence de potentiel V_0 nécessaire pour accélérer les électrons, en sachant que la puissance du faisceau est de 4 W.

Solution :

La charge électrique d'un électron est $e = -1,6 \times 10^{-19}$ C.

Si on suppose N le nombre d'électrons contenus par le faisceau, la charge électrique totale du faisceau est $q = Ne$ et par conséquent

$$i = \frac{dq}{dt} = e \frac{dn}{dt} = (-1,6 \times 10^{-19})(10^{15}) = -1,6 \times 10^{-4} \text{ A}$$

Le signe négatif signifie que le sens du courant est opposé au sens de déplacement des électrons, comme illustré par la Fig. 1.18. La puissance du faisceau est :

$$p = V_0 i \quad \text{ou} \quad V_0 = \frac{4}{1,6 \times 10^{-4}} = 25\,000 \text{ V}$$

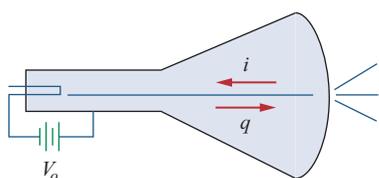


Figure 1.18

Le schéma simplifié du tube à rayons cathodiques pour l'Exemple 1.8.

Exercice 1.8

Si le faisceau d'électrons d'un tube cathodique TV déplace 10^{13} électrons par seconde et la différence de potentiel appliqué aux dispositifs de déviation du faisceau est de 30 kV, calculer la puissance du faisceau.

Réponse : 48 MW

TABLEAU 1.3

Consommations moyennes mensuelles typiques d'énergie d'un ménage aux États-Unis (en kWh)

Appareil	Consommation	Appareil	Consommation
Chauffe-eau	500	Lessiveuse	120
Réfrigérateur	100	Cuisinière	100
Eclairage	100	Séchoir	80
Lave-vaisselle	35	Four à micro-ondes	25
Fer à repasser	15	Ordinateur	12
Poste TV	10	Appareil radio	8
Grille-pain	4	Horloge électrique	2

1.7.2 La facture d'électricité

La deuxième application abordée à titre d'exemple, porte sur la façon dont une société du service public d'électricité calcule les factures de ses clients. Le coût de l'électricité dépend de la quantité d'énergie consommée, mesurée en kilowattheures (kWh) (d'autres paramètres affectant le coût, comprennent la demande et le facteur de puissance seront ignorés, pour l'instant). Cependant, même si un consommateur ne consomme pas d'énergie, il y a un minimum de frais que le client doit payer pour rester connecté à la ligne électrique. Avec l'augmentation de la consommation d'énergie, le coût par kWh baissera, c'est le tarif dégressif. Le Tableau 1.3 présente les consommations moyennes mensuelles d'un ménage composé de cinq personnes, aux États-Unis.

Exemple 1.9

La consommation d'électricité d'un ménage américain au mois de janvier s'élève à 700 kWh. Calculer la facture d'électricité en respectant les tarifs résidentiels suivants :

Frais fixes mensuels : 12,00 \$

Les premiers 100 kWh/mois avec un tarif de 0,16 \$/kWh

Les suivants 200 kWh/mois avec un tarif de 0,10 \$/kWh

Toute consommation dépassant les 300 kWh est comptabilisée avec un tarif de 0,06 \$/kWh

Solution :

Frais mensuelles fixes :		12,00 \$
Les premiers 100 kWh :	$100 \times 0,16 =$	16,00 \$
Les suivants 200 kWh :	$200 \times 0,10 =$	20,00 \$
Les 400 kWh restants :	$400 \times 0,06 =$	24,00 \$
Total facture :		72,00 \$

$$\text{Coût moyen} = \frac{\$72}{100 + 200 + 400} = 10,2 \text{ cents/kWh}$$

Exercice 1.9

Sur base de tarifs résidentiels mentionnés dans l'Exemple 1.9, calculer le coût moyen par kWh si la consommation totale d'électricité au mois de juillet est de 400 kWh

Réponse : 13,5 cents/kWh

1.8 † Résolution de problèmes

Bien que les problèmes à résoudre au cours de votre carrière professionnelle varieront en complexité et ampleur, les principes de base restent toujours les mêmes. Le processus, décrit ci-dessous est celui développé par les auteurs, résultant des longues années d'expérience et de travail avec les étudiants. Celui-ci s'applique à la résolution des problèmes d'ingénierie dans l'industrie ainsi que dans la recherche.

Nous allons dresser la liste des étapes à suivre afin de résoudre correctement n'importe quel problème ou exercice avec lequel vous pourriez être confronté.

1. **Définir** avec soin le problème.
2. **Présenter** en détail tout ce que vous savez sur le problème.
3. Établir un ensemble de **solutions alternatives** et déterminer celles qui promettent le plus de chances de succès.
4. **Essayer** une première solution du problème.
5. **Évaluer** la solution trouvée et en vérifier l'exactitude.
6. Si le problème a été résolu de manière satisfaisante : présenter la solution, sinon, revenir à l'étape 3 et recommencer le processus.

1. Définir avec soin le problème. C'est probablement la partie la plus importante du processus décrit ci-dessus, car c'est le fondement des autres étapes. En général, la présentation des problèmes d'ingénierie est souvent incomplète. Au niveau de cette étape vous devez faire tout votre possible pour vous assurer que vous comprenez le problème de manière aussi approfondie que le concepteur du problème. Le temps consacré à ce point (clairement identifier le problème) vous permettra d'économiser beaucoup de temps et de frustration plus tard. En tant qu'étudiant, vous pouvez obtenir des précisions sur l'énoncé du problème soit en consultant un manuel soit en demandant des précisions à votre professeur. À cette étape, il est important d'élaborer des questions qui doivent être abordées avant de poursuivre le processus de solution. Si vous avez des questions, vous aurez besoin de consulter les personnes appropriées pour obtenir des réponses. Avec ces réponses, vous pouvez maintenant confirmer le problème et choisir le reste du processus de solution.

2. Présenter en détail tout ce que vous savez sur le problème. Vous êtes maintenant prêt à écrire tout ce que vous savez sur le problème et les solutions possibles. Cette étape est importante et va vous faire gagner du temps et réduire les frustrations.

3. Établir un ensemble de solutions alternatives et déterminer celles qui promettent le plus de chances de succès. Presque tous les problèmes auront un certain nombre de chemins possibles qui peuvent conduire à une solution. Il est hautement souhaitable d'identifier le plus grand nombre de chemins possibles. À ce stade, vous devez également déterminer quels outils sont à votre disposition, tels que *PSpice* et/ou *MATLAB* et d'autres logiciels qui peuvent largement réduire les efforts et augmenter la précision de vos calculs. Nous tenons à souligner que le temps passé pour définir correctement et étudier des approches alternatives à la solution, vous permettra d'obtenir un important gain de temps. Évaluer les alternatives et les prémisses valables, assureront le succès du processus de résolution de tout problème.

4. Essayer une première solution du problème. Il est maintenant temps de commencer à résoudre réellement le problème. Le processus que vous suivez doit être bien documenté en vue de présenter une solution détaillée, en cas de succès et d'évaluer le processus, si vous ne réussissez pas du premier coup. Cette évaluation détaillée peut conduire à des corrections qui peuvent alors conduire à une solution satisfaisante. Cela peut aussi conduire à de nouvelles alternatives d'essai. Souvent, il s'avère souhaitable de ne pas précipiter les choses et de présenter la solution sous forme d'équation générale et non pas uniquement avec des valeurs numériques. Cela permettra de vérifier, par la suite, vos résultats.

5. Évaluer la solution trouvée et en vérifier l'exactitude. Vous pouvez maintenant évaluer de façon approfondie ce que vous avez accompli. Décidez vous-même si vous avez une solution acceptable, celle que vous souhaitez présenter à votre équipe, au patron ou à votre professeur.

6. Si le problème a été résolu de manière satisfaisante : présenter la solution, sinon, revenir à l'étape 3 et recommencer le processus. Maintenant, soit vous présentez votre solution, soit vous essayez une autre alternative. À ce stade, la présentation de votre solution peut mettre un terme au processus. Souvent, cependant, la présentation d'une solution conduit à affiner la définition du problème et le processus continue. En poursuivant de cette manière, vous avez toutes les chances d'aboutir à une conclusion satisfaisante.

Appliquons maintenant ce processus dans le cas d'un étudiant qui suit le cours d'ingénieur électricien ou d'informaticien (le processus de base peut s'appliquer à n'importe quel cours ou problème). Gardez à l'esprit que, si les étapes du processus peuvent être simplifiées, le processus doit toujours être suivi. Considérons un exemple simple.

Calculer la valeur du courant qui circule dans la résistance de $8\ \Omega$ présentée à la Fig. 1.19.

Solution :

1. Définir avec soin le problème. Ceci est un exemple simple. Nous pouvons déjà voir que nous ne connaissons pas la polarité de la source, 3 V. Nous avons les options suivantes : soit demander au professeur, soit prendre une décision sur la marche à suivre et attribuer nous même une polarité quelconque. Supposons donc que la polarité est positive tel qu'illustré à la Fig. 1.20.

2. Présenter en détail tout ce que vous savez sur le problème. La présentation de tout ce que nous savons du problème, implique l'étiquetage du circuit afin de définir ce que nous recherchons. Etant donné le circuit de la Fig. 1.20, nous devons trouver la valeur du courant $i_{8\Omega}$, pour le résoudre. C'est à ce moment que nous pouvons vérifier, avec le professeur, si cela est raisonnable, et voir si le problème est bien défini.

3. Établir un ensemble de solutions alternatives et déterminer celles qui promettent le plus de chances de succès. Il existe essentiellement trois techniques qui peuvent être utilisées pour résoudre ce problème. Plus tard dans le texte, vous verrez que vous pouvez utiliser l'analyse des circuits (en utilisant les lois de Kirchoff et la loi d'Ohm) l'analyse nodale et l'analyse des mailles.

Exemple 1.10

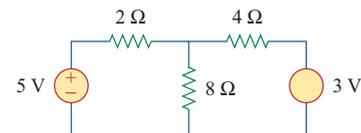


Figure 1.19
Pour l'Exemple 1.10.

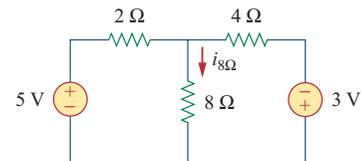


Figure 1.20
Définir le problème.

Dans notre cas, en faisant appel à l'analyse de circuits pour trouver la valeur du courant $i_{8\Omega}$, nous nous rendons vite compte que cela nous conduira probablement à un travail très fastidieux, nécessitant plus de temps que si l'on utilise l'analyse nodale ou l'analyse des boucles.

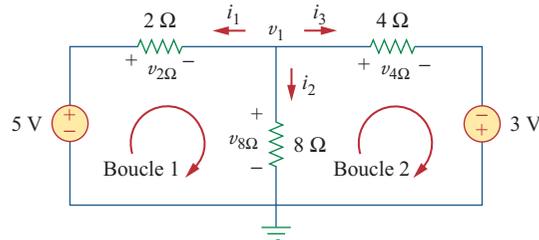


Figure 1.21

Utilisation de l'analyse nodale.

Résoudre le problème en utilisant l'analyse des boucles, calculer $i_{8\Omega}$ équivaut à écrire un système de deux équations et de le résoudre par rapport à $i_{8\Omega}$. Le cas est illustré à la Fig. 1.21. En utilisant l'analyse nodale, il est nécessaire d'écrire une équation par inconnue. C'est la meilleure approche. Par conséquent, nous allons résoudre notre cas par l'utilisation de l'analyse nodale.

4. Essayer une première solution du problème. Nous allons d'abord écrire toutes les équations qui nous permettent de trouver $i_{8\Omega}$.

$$i_{8\Omega} = i_2, \quad i_2 = \frac{v_1}{8}, \quad i_{8\Omega} = \frac{v_1}{8}$$

$$\frac{v_1 - 5}{2} + \frac{v_1 - 0}{8} + \frac{v_1 + 3}{4} = 0$$

De l'équation précédente on trouve v_1 :

$$8 \left[\frac{v_1 - 5}{2} + \frac{v_1 - 0}{8} + \frac{v_1 + 3}{4} \right] = 0$$

$$\text{Ce qui donne : } (4v_1 - 20) + (v_1) + (2v_1 + 6) = 0$$

Et par conséquent : $i_{8\Omega} = v_1/8 = 2/8 = \mathbf{0,25 \text{ A}}$

5. Évaluer la solution trouvée et en vérifier l'exactitude. Maintenant nous pouvons utiliser la loi des tensions de Kirchhoff (KVL) pour vérifier les résultats.

$$i_1 + \frac{v_1 - 5}{2} = \frac{2 - 5}{2} = \frac{3}{2} = -1,5 \text{ A}$$

$$i_2 = i_{8\Omega} = 0,25 \text{ A}$$

$$i_3 = \frac{v_1 + 3}{4} = \frac{2 + 3}{4} = \frac{5}{4} = 1,25 \text{ A}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = -1,5 + 0,25 + 1,25 = \mathbf{0}$$

Si on applique la loi de Kirchhoff (KVL) pour la boucle 1, on obtient :

$$\begin{aligned} -5 + v_{2\Omega} + v_{8\Omega} &= -5 + (-i_1 \times 2) + (i_2 \times 8) \\ &= -5 + (-(-1,5)2) + (0,25 \times 8) \\ &= \mathbf{-5 + 3 + 2 = 0} \end{aligned}$$

De même, pour la boucle 2, on obtient :

$$\begin{aligned} -v_{8\Omega} + v_{4\Omega} - 3 &= -(i_2 \times 8) + (i_3 \times 4) - 3 \\ &= -(0,25 \times 8) + (1,25 \times 4) - 3 \\ &= \mathbf{-2 + 5 - 3 = 0} \end{aligned}$$

Nous avons donc maintenant un très haut degré de confiance dans l'exactitude de notre réponse.

6. *Si le problème a été résolu de manière satisfaisante : présenter la solution, sinon, revenir à l'étape 3 et recommencer le processus.* Oui, ce problème a été résolu de manière satisfaisante.

La valeur du courant qui circule par la résistance de 8Ω est de $0,25 \text{ A}$.
Le sens du courant est celui montré par la Fig. 1.20.

Exercice 1.10

Essayer d'appliquer le processus décrit aux problèmes les plus difficiles se trouvant à la fin de ce chapitre.

1.9

Résumé du chapitre

1. Un circuit électrique est constitué par des éléments de circuit connectés ensemble.

2. Le Système International d'unités (SI) est un langage universel, ce qui permet aux ingénieurs et techniciens de communiquer leurs résultats. Les unités d'autres grandeurs physiques peuvent être dérivées à partir des six unités de base du système international.

3. Le courant électrique est la mesure de la vitesse de déplacement des charges électriques dans un conducteur, à savoir :

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

4. La différence de potentiel est la mesure du travail effectué afin de déplacer une quantité de charge d'1 C, le long d'un conducteur, soit :

$$v = \frac{dw}{dq}$$

5. La puissance est l'énergie fournie ou consommée par unité de temps. Elle est le produit de la tension et du courant, à savoir :

$$p = \frac{dw}{dt} = vi$$

6. Selon la convention passive du signe, la puissance suppose un signe positif lorsque le courant pénètre par la polarité positive de la tension, considérée aux bornes d'un certain élément.

7. Une source idéale de tension produit une différence de potentiel spécifique à ses bornes, indépendamment de ce qui lui est raccordé. Une source idéale de courant produit un courant spécifique par le biais de ses bornes indépendamment de ce qui lui est relié.

8. Les sources de tension et de courant peuvent être dépendantes ou indépendantes. Une source dépendante présente à ses bornes un paramètre (tension ou courant) qui dépend d'autres variables du circuit.

9. Deux domaines d'application des concepts abordés dans ce chapitre sont le tube cathodique de la télévision et la facturation de la fourniture d'énergie électrique.

Questions récapitulatives

1.1 Un millivolt est un millionième de volt.

- (a) Vrai (b) Faux

1.2 Le préfix micro signifie :

- (a) 10^6 (b) 10^3 (c) 10^{-3} (d) 10^{-6}

1.3 Une différence de potentiel de 2 000 000 V peut être exprimée en puissances de 10 en tant que :

- (a) 2 mV (b) 2 kV (c) 2 MV (d) 2 GV

1.4 Une charge électrique de 2 C passant par un point donné à chaque seconde représente un courant de 2 A.

- (a) Vrai (b) Faux

1.5 L'unité de mesure du courant électrique est :

- (a) Coulomb (b) Ampère
(c) Volt (d) Joule

1.6 La différence de potentiel est mesurée en :

- (a) Watts (b) Ampère
(c) Volts (d) Joule par seconde

1.7 Un courant électrique d'une intensité de 4 A permettra l'accumulation d'une charge électrique de 24 C après 6 s.

- (a) Vrai (b) Faux

1.8 La différence de potentiel aux bornes d'un grille-pain d'une puissance de 1,1 kW, tirant un courant de 10 A est :

- (a) 11 kV (b) 1 100 V (c) 110 V (d) 11 V

1.9 Laquelle de ces grandeurs n'est pas une quantité d'électricité ?

- (a) Charge électrique (b) Temps
(c) Différence de potentiel (d) Curent
(d) Puissance

1.10 La source dépendante de la Fig. 1.22 est une :

- (a) source de courant commandée en tension
(b) source de tension commandée en tension
(c) source de tension commandée en courant
(d) source de courant commandée en courant

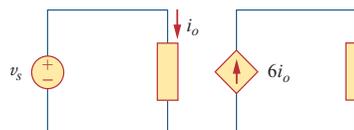


Figure 1.22

Pour la Question 1.10.

Réponses : 1.1b, 1.2d, 1.3c, 1.4a, 1.5b, 1.6c, 1.7a, 1.8c, 1.9b, 1.10d.

Problèmes à résoudre

Section 1.3 Charge et courant électrique

1.1 Quelle est la charge électrique, exprimée en coulombs, portée par le nombre suivant d'électrons ?

- (a) $6,482 \times 10^{17}$ (b) $1,24 \times 10^{18}$
(c) $2,46 \times 10^{19}$ (d) $1,628 \times 10^{20}$

1.2 Déterminer l'intensité du courant qui circule dans un conducteur en sachant que le débit de charge est donné par l'équation :

- (a) $q(t) = (3t + 8) \text{ mC}$ (b) $q(t) = (8t^2 + 4t - 2) \text{ C}$
(c) $q(t) = (3e^{-t} - 5e^{-2t}) \text{ nC}$ (d) $q(t) = 10 \sin 120\pi t \text{ pC}$
(e) $q(t) = 20e^{-4t} \cos 50t \text{ } \mu\text{C}$

1.3 Calculer la quantité de charge électrique pour :

- (a) $i(t) = 3 \text{ A}$; $q(0) = 1 \text{ C}$
(b) $i(t) = (2t + 5) \text{ mA}$; $q(0) = 0$
(c) $i(t) = 20 \cos(10t + \pi/6) \text{ } \mu\text{A}$; $q(0) = 2 \text{ } \mu\text{C}$
(d) $i(t) = 10 e^{-30t} \sin 40t \text{ A}$; $q(0) = 0$

1.4 Un courant de 3,2 A circule dans un conducteur. Calculer combien de charge traverse la section transversale du conducteur en 20 s.

1.5 Déterminer la quantité totale de charge transféré sur l'intervalle de temps de $0 \leq t \leq 10 \text{ s}$ si l'équation du courant est $i(t) + 0,5t \text{ A}$.

1.6 La charge électrique s'écoulant dans un fil est tracé à la Fig. 1.23. Calculer la valeur du courant pour :

- (a) $t = 1 \text{ ms}$ (b) $t = 6 \text{ ms}$ (c) $t = 10 \text{ ms}$

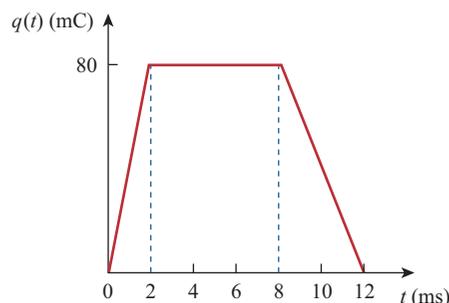


Figure 1.23

Pour le Problème 1.6.

1.7 La charge s'écoulant dans un fil en fonction du temps est tracée à la Fig. 1.24. Établir le diagramme du courant correspondant.

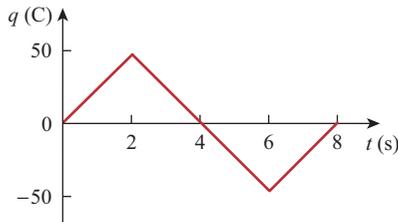


Figure 1.24
Pour le Problème 1.7.

1.8 Le courant passant par un point dans un certain appareil est indiqué à la Fig. 1.25. Calculer la charge totale s'écoulant par ce point.

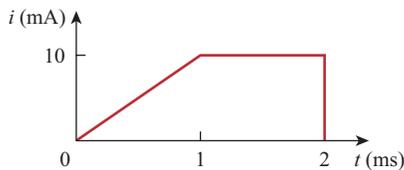


Figure 1.25
Pour le Problème 1.8.

1.9 Le courant à travers un certain élément est indiqué à la Fig. 1.26. Déterminer la charge totale qui est passée par l'élément si :

- (a) $t = 1$ s (b) $t = 3$ s (c) $t = 5$ s

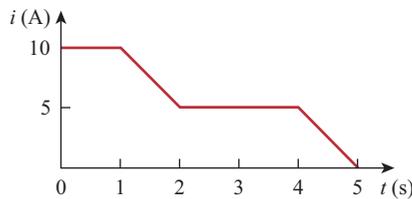


Figure 1.26
Pour le Problème 1.9.

Sections 1.3 et 1.5

1.10 Un éclair frappe avec 8 kA un objet pendant 15 μ s. Quelle quantité de charge a été transférée à l'objet ?

1.11 Une batterie rechargeable est capable de fournir 85 mA pendant 12 heures. Quelle est la quantité de charge transférée ? Si la différence de potentiel aux bornes est de 1,2 V, quelle est l'énergie fournie par la batterie ?

1.12 Si le courant traversant un élément de circuit est donné par l'équation $i(t) = :$

- (a) $3t$ A, (b) 18 A, (c) - 12A, (d) 0

Tracer le diagramme de la variation charge électrique pour l'intervalle de temps $0 < t < 20$ s.

1.13 La charge entrante par la borne positive d'un élément est donnée par l'équation :

$$q = 10 \sin 4\pi t \text{ mC}$$

tandis que la tension aux bornes de l'élément est :

$$v = 2 \cos 4\pi t \text{ V}$$

- (a) trouver la puissance fournie à l'élément pour $t = 0,3$ s ;
(b) calculer l'énergie fournie pendant l'intervalle de temps de 0 à 0,6 s.

1.14 La tension v aux bornes d'un appareil et le courant i , sont :

$$v(t) = 5 \cos 2t \text{ V}, \quad i(t) = 10(1 - e^{-0,5t}) \text{ A}$$

Calculer pour $t = 1$ s :

- (a) la charge totale qui traverse l'appareil ;
(b) l'énergie consommée par l'appareil.

1.15 Le courant entrant par la borne positive d'un élément est $i(t) = 3 e^{-2t}$ A et la tension aux bornes de l'élément est $v(t) = 5 di/dt$ V.

Trouver :

- (a) la charge fournie à l'élément entre $t = 0$ et $t = 2$ s ;
(b) l'énergie consommée par l'élément pendant ce temps ;
(c) l'énergie consommée en 3 s

1.16 La Fig. 1.27 montre le courant qui traverse et la tension aux bornes d'un appareil électrique.

- (a) Tracer le diagramme de la puissance délivrée à l'appareil pour $t > 0$.
(b) Calculer l'énergie consommée par l'appareil pendant l'intervalle $0 < t < 4$ s.

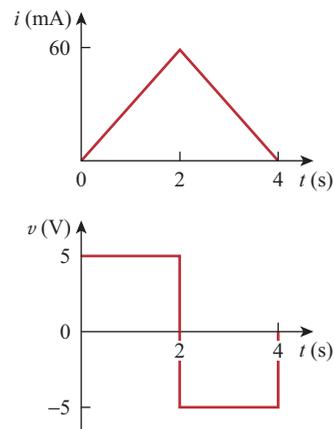


Figure 1.27
Pour le Problème 1.16.

Section 1.6 Éléments de circuit

1.17 La Fig. 1.28 montre un circuit avec cinq éléments. Si $p_1 = -205 \text{ W}$, $p_2 = 60 \text{ W}$, $p_4 = 45 \text{ W}$, $p_5 = 30 \text{ W}$, calculer la puissance reçue ou livrée par l'élément 3.

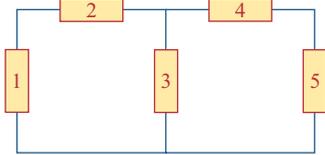


Figure 1.28

Pour le Problème 1.17.

1.18 Trouver la puissance de chaque élément de la Fig. 1.29.

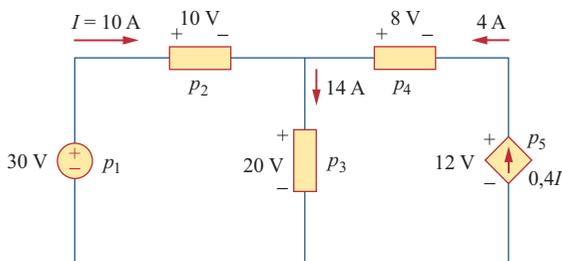


Figure 1.29

Pour le Problème 1.18.

1.19 Calculer la valeur du courant I pour le schéma de la Fig. 1.30.

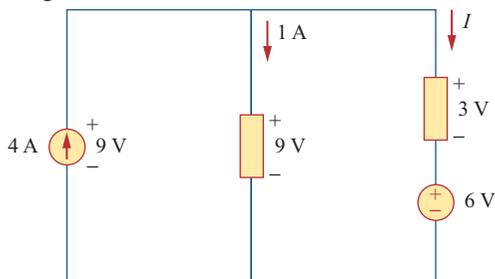


Figure 1.30

Pour le Problème 1.19.

1.20 Calculer la valeur de la différence de potentiel V_o pour le circuit de la Fig. 1.31.

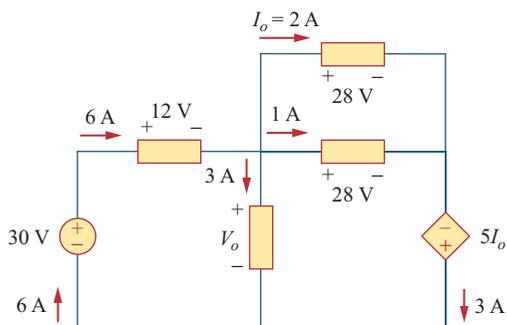


Figure 1.31

Pour le Problème 1.20.

Section 1.7 Applications

1.21 Une ampoule à incandescence de 60 W fonctionne à 120 V . Combien d'électrons et quelle est la charge électrique s'écoulant à travers l'ampoule, en un jour ?

1.22 Un éclair frappe un avion avec 30 kA pendant 2 ms . Quelle quantité de charge électrique est accumulée dans l'avion ?

1.23 Un chauffe-eau électrique de $1,8 \text{ kW}$ fonctionne pendant 15 min pour faire bouillir une certaine quantité d'eau. Si cela se fait une fois par jour et le coût de l'électricité est de 10 cents/kWh , quel est le coût de fonctionnement pendant 30 jours ?

1.24 Le tarif appliqué par une compagnie d'électricité est de $8,5 \text{ cents/kWh}$. Si un consommateur fait fonctionner une ampoule de 40 W en continu pendant une journée, combien sera facturé ce consommateur ?

1.25 Un grille-pain de $1,2 \text{ kW}$ prend environ 4 minutes pour réchauffer quatre tranches de pain. Calculer le coût de fonctionnement du grille-pain s'il est utilisé une fois par jour pendant 1 mois (30 jours). Supposer que le coût de l'énergie est de 9 cent/kWh .

1.26 Un accumulateur a une capacité de $0,8 \text{ ampères-heures (Ah)}$ et une durée de fonctionnement de 10 heures .

- Quel courant peut-il livrer ?
- Quelle est sa puissance si la tension aux bornes est de 6 V ?
- Quelle est l'énergie stockée par la batterie, en kWh ?

1.27 Pour charger la batterie d'un véhicule électrique un courant de 3 A est nécessaire pendant 4 heures . Si la tension aux bornes est V et l'unité du temps est l'heure :

- quelle est la quantité de charge électrique transférée pendant la recharge de la batterie ?
- quelle est l'énergie emmagasinée par la batterie ?
- combien coûte la recharge ? (supposons que le coût de l'énergie est de 9 cents/kWh .)

1.28 Une lampe à incandescence de 30 W est reliée à une source de 120 V et est laissée en fonctionnement continu dans un escalier sombre. Déterminer :

- l'intensité du courant traversant la lampe ;
- le coût de fonctionnement de l'éclairage pendant une année bissextile ($365j$) si le coût de l'électricité est de 12 cents/kWh .

1.29 Une cuisinière électrique avec quatre brûleurs et un four sont utilisés pour la préparation d'un repas comme suit :

- Brûleur 1 : 20 minutes
- Brûleur 2 : 40 minutes
- Brûleur 3 : 15 minutes
- Brûleur 4 : 45 minutes
- Four : 30 minutes

Si chaque brûleur a une puissance évaluée à 1,2 kW et le four à 1,8 kW et le coût de l'électricité étant de 12 cents/kWh, calculer le coût de l'électricité consommée dans la préparation des repas.

1.30 *Reliant Energy Company* (la compagnie d'électricité à Houston, Texas) applique à ses clients les tarifs suivants :

- frais mensuels fixes de 6 \$
- 250 premiers kWh à 0,02 \$/kWh
- tous les kWh supplémentaires à 0,07 \$/kWh

Si un client utilise 1.218 kWh en un mois, combien *Reliant Energy Co.*, charge ce client ?

1.31 Dans un ménage, un ordinateur personnel (PC) de 120 W est utilisé à raison de 4h/jour et une ampoule de 60 W fonctionne pendant 8h/jour. Si la compagnie d'électricité applique un tarif de 12 cents/kWh, calculer combien le ménage paie par an pour l'ordinateur et combien pour l'ampoule.

Problèmes récapitulatifs

1.32 Le fil d'un appareil téléphonique est parcouru par un courant de 20 μA . Combien de temps faut-il pour qu'une charge de 15 C passe à travers le fil ?

1.33 Un éclair provoque l'apparition d'un courant de 2kA pendant 3 ms. Quelle est la quantité de charge électrique contenue dans le coup de foudre ?

1.34 La Fig. 1.32 montre le diagramme de consommation d'énergie d'un ménage pendant une journée. Calculer :

- (a) l'énergie totale consommée en kWh ;
- (b) la puissance moyenne par heure.

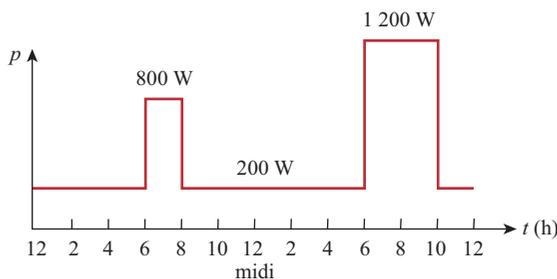


Figure 1.32
Pour le Problème 1.34.

1.35 Le graphe de la Fig. 1.33 représente la puissance absorbée par une installation industrielle entre 08h00 et 20h30. Calculer l'énergie totale en MWh consommée par l'usine.

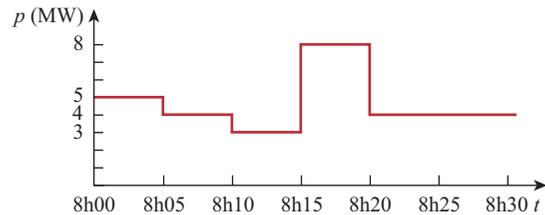


Figure 1.33
Pour le Problème 1.35.

1.36 Une batterie est caractérisée par sa capacité à fournir de l'énergie mesurée en ampère-heure (Ah). Une batterie acide à plomb est caractérisée par une capacité de 160 Ah.

- (a) Quel est le courant maximal qu'elle peut fournir pendant 40 h ?
- (b) Si la batterie se décharge sous un courant de 1 mA, en combien de jours la batterie serait-elle complètement déchargée ?

1.37 Une batterie de 12 V nécessite une charge totale de 40 Ah pendant sa recharge. Quelle est l'énergie demandée par l'opération de recharge (en joules) ?

1.38 Combien d'énergie (en joules) peut fournir un moteur de 10 CV pendant 30 minutes ? Supposez que 1 CV = 746 W.

1.39 Un poste TV de 600 W fonctionne sans que personne ne le regarde pendant 4 heures. Sachant que le coût de l'électricité est de 10 cents/kWh, combien d'argent est ainsi gaspillé ?

Lois fondamentales

2

Au plus profond de l'inconscient de l'homme existe un besoin généralisé d'un univers logique qui fait sens. Mais l'univers est toujours un pas au-delà de la logique.

—Frank Herbert

Améliorez vos compétences et préparez votre carrière

Les ingénieurs doivent être capables d'imaginer et de mener à bien des expériences, ainsi que d'analyser et d'interpréter les données s'y référant. La plupart des étudiants ont passé de nombreuses heures à réaliser des expériences à l'école secondaire et au collège. Pendant ce temps, ils ont été tenus d'analyser des données et à les interpréter. Par conséquent, ils se sont qualifiés pour ces deux types d'activités. Les auteurs de cet ouvrage recommandent que, dans le processus d'apprentissage, les étudiants s'efforcent de passer plus de temps à analyser et interpréter les données dans le contexte expérimental et pratique. Qu'est-ce que cela signifie ?

Si par exemple, vous êtes à la recherche d'un diagramme de la variation de la tension en fonction de la résistance ou du courant ou de la puissance par rapport à la résistance électrique d'un élément de circuit, que vous attendez-vous à obtenir ? Demandez-vous si la courbe tracée a du sens. Est-ce en accord avec la théorie ? Est-ce différent par rapport aux attentes et si oui, pourquoi ? De toute évidence, la pratique de l'analyse et de l'interprétation des données permettra à tout un chacun d'améliorer sa compétence.

Mais comment pouvez-vous développer et améliorer vos compétences par l'intermédiaire des expérimentations et travaux pratiques que vous devez réaliser en tant qu'étudiant ?

En fait, ce que vous devez faire, c'est analyser chaque expérience, la décomposer en ses éléments les plus simples et essayer de comprendre pourquoi chaque élément est là afin de déterminer ce que le concepteur de l'expérience tente de vous enseigner. Même si cela ne semble pas toujours évident, chaque expérience a été conçue par quelqu'un, dans le seul et unique but de vous faire apprendre quelque chose d'intéressant et d'utile pour l'avenir.



Photo © Charles Alexander

2.1 Introduction

Le premier chapitre a introduit les concepts de base tels que le courant, la tension et la puissance dans un circuit électrique. Déterminer réellement les valeurs de ces variables dans un circuit donné exige que nous comprenions certaines lois fondamentales qui régissent les circuits électriques. Ces lois, comme par exemple la loi d'Ohm et les lois de Kirchhoff, constituent le fondement sur lequel l'analyse des circuits électriques est construite.

Dans ce chapitre, en plus de ces lois, nous allons examiner certaines techniques couramment appliquées dans la conception des circuits. Ces techniques se réfèrent au groupement de résistances, aux diviseurs de tension, à la répartition de courants, à la transformation triangle-étoile ou étoile-triangle. Dans ce chapitre l'application de ces lois et techniques sera limitée à des circuits résistifs. Nous allons enfin appliquer ces lois et ces techniques à des situations de la vie réelle, comme par exemple dans un projet d'éclairage électrique ou l'utilisation et l'adaptation des instruments de mesure à courant continu.

2.2 La loi d'Ohm

Les différents matériaux présentent en général un comportement caractéristique à s'opposer à la circulation du courant électrique. Cette propriété physique, ou la capacité d'un matériel à s'opposer à la circulation d'un courant, est connue sous l'appellation de *résistance électrique* et est représenté par le symbole R . La résistance électrique d'un matériau dépend de sa section transversale A et de sa longueur l , comme le montre la Fig. 2.1(a). Mathématiquement la résistance électrique est exprimée par l'équation :

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

où ρ est la résistivité du matériau, en ohm-mètre. Il existe des bons conducteurs, tels que le cuivre, l'aluminium et les métaux en général, qui présentent des faibles valeurs de résistivité, au contraire, d'autres matériaux appelés isolateurs, tels que le mica et le papier, présentent des valeurs élevées de résistivité.

Le Tableau 2.1 présente les valeurs de ρ pour certains matériaux et reprend les matériaux utilisés pour les conducteurs, isolants et semi-conducteurs.

L'élément de circuit utilisé pour modéliser le comportement réel d'un matériau au passage d'un courant électrique est le *résistor*. Les résistors sont généralement fabriqués à partir d'alliages métalliques et de composés de carbone. Le symbole pour un résistor est indiqué à la Fig. 2.1(b), où R représente la valeur de la résistance. Le résistor est le plus simple élément passif d'un circuit électrique.

Georg Simon Ohm (1787-1854), physicien allemand, est crédité de la découverte de la relation entre le courant et la tension pour un résistor. Cette relation est connue sous le nom de la *loi d'Ohm*.

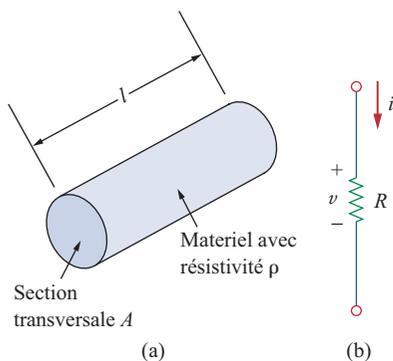


Figure 2.1

(a) Resistor, (b) Le symbole du resistor.

TABLEAU 2.1 La résistivité de certains matériaux

Matériel	Résistivité ($\Omega \cdot m$)	Utilisation
Argent	$1,64 \times 10^{-8}$	conducteur
Cuivre	$1,75 \times 10^{-8}$	conducteur
Aluminium	$2,80 \times 10^{-8}$	conducteur
Or	$2,45 \times 10^{-8}$	conducteur
Carbone	4×10^{-5}	sémi-conducteur
Gérmanium	47×10^{-2}	sémi-conducteur
Silicium	$6,4 \times 10^{-2}$	sémi-conducteur
Papier	10^{10}	isolant
Mica	5×10^{11}	isolant
Verre	10^{12}	isolant
Téflon	3×10^{12}	isolant

La loi d'Ohm est une loi physique permettant de relier l'intensité du courant électrique i traversant un résistor à la tension v à ses bornes.

Ceci s'exprime mathématiquement en tant que :

$$v \propto i \quad (2.2)$$

Ainsi Ohm définit la constante de proportionnalité pour un résistor comme étant la résistance R . (La résistance est une propriété du matériau qui peut changer si les conditions internes ou externes de l'élément sont modifiées, comme par exemple les changements de température.) Ainsi, l'équation (2.2) devient.

$$v = iR \quad (2.3)$$

qui est l'expression mathématique de la loi d'Ohm. R dans l'équation (2.3) est mesuré en ohms (Ω). Ainsi,

$$R = \frac{v}{i} \quad (2.4)$$

et par conséquent : $1\Omega = 1 \text{ V/A}$

Note historique

Georg Simon Ohm (1787 – 1854), physicien allemand, a déterminé expérimentalement en 1826 la loi fondamentale concernant la tension et le courant pour une résistance. Les travaux d'Ohm ont été initialement controversés et fortement critiqués.

Né de descendance humble à Erlangen, en Bavière, Ohm se dédia à la recherche dans le domaine de l'électricité. Ses efforts aboutirent à la fameuse loi portant son nom. Il a reçu la Médaille Copley en 1841, de la Société Royale de Londres. En 1849, il a été nommé Professeur de physique à l'Université de Munich. Pour lui rendre hommage, l'unité de la résistance a été nommée l'ohm.



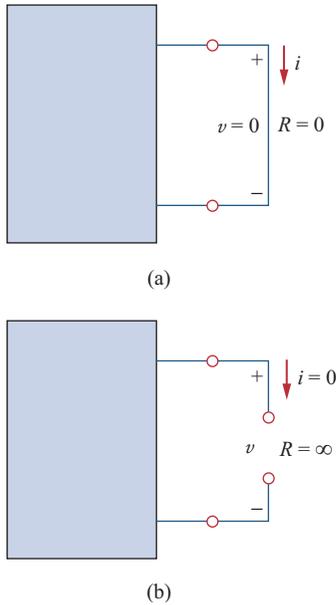


Figure 2.2
(a) Court circuit, (b) Circuit ouvert.

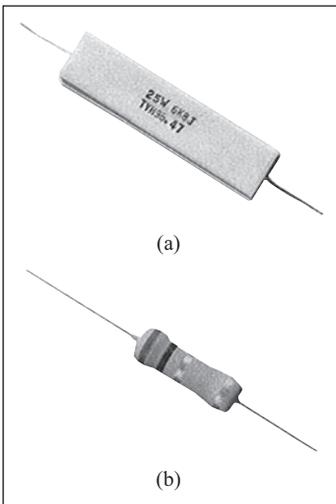


Figure 2.3
Résistors fixes : (a) de type bobiné,
(b) chimique (film de carbone).
Avec l'aimable autorisation de Tech
America.

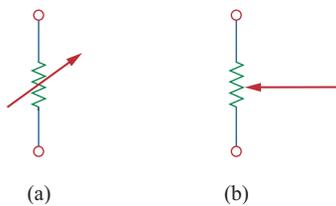


Figure 2.4
Symboles utilisés pour : (a) un resistor va-
riable en général, (b) un potentiomètre.

Pour appliquer la loi d'Ohm, comme indiqué par l'équation (2.3), nous devons être attentifs tout particulièrement à l'orientation du courant et à la polarité de la tension. La direction du courant i et la polarité de la tension v doivent être conformes à la convention du signe passif, comme le montre la Fig. 2.1(b). Cela implique que le courant circule à partir d'un potentiel supérieur vers un potentiel inférieur, tel que $v = iR$. Si le courant passe dans le sens opposé, c'est-à-dire d'un potentiel inférieur vers un potentiel plus élevé, alors $v = -iR$.

Puisque la valeur de R peut varier de zéro à l'infini, il est important que nous considérons les deux valeurs extrêmes possibles de R . Un élément pour lequel $R = 0$, est appelé un *court-circuit*, comme le montre la Fig. 2.2(a). Pour un court-circuit,

$$v = iR = 0 \tag{2.5}$$

montrant que la différence de potentiel aux bornes est nulle, mais le courant pourrait prendre n'importe quelle valeur. Dans la pratique, un court-circuit est généralement un fil supposé être un conducteur parfait. Ainsi,

Un **court-circuit** est un élément de circuit avec une résistance proche de zéro

De même, un élément avec un résistance infinie, $R = \infty$ est connu comme étant un circuit ouvert ou interrompu, comme le montre la Fig. 2.2 (b). Pour un circuit ouvert,

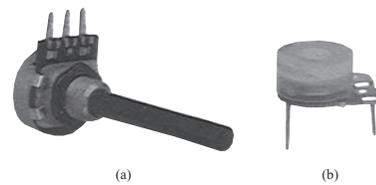
$$i = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{v}{R} = 0 \tag{2.6}$$

indiquant que le courant est nul et que la différence de potentiel aux bornes pourrait prendre n'importe quelle valeur. Ainsi,

Un **circuit ouvert** est un élément de circuit avec une valeur de résistance qui tend vers l'infini.

La plupart des résistors sont du type fixe, ce qui signifie que leur résistance est fixée. Les deux types usuels de résistors fixes (bobinés ou chimiques) sont présentés à la Fig. 2.3. Le symbole d'un tel résistor est illustré à la Fig. 2.1(b). Le symbole d'un résistor variable est représenté à la Fig. 2.4(a). Un résistor variable commun est connu sous le nom de *potentiomètre*, avec le symbole représenté à la Fig. 2.4(b). Le potentiomètre est un élément à trois bornes avec un contact glissant. En faisant glisser ce contact les résistances entre le terminal du contact mobile et les terminaux fixes varient. Bien que des résistors, comme ceux des Fig. 2.3 et Fig. 2.5 sont utilisés dans la réalisation de circuits classiques, aujourd'hui la plupart des circuits comportent des résistors miniaturisés montés en surface ou intégrés, comme illustré à la Fig. 2.6.

Figure 2.5
Potentiomètres (a) de type normal,
(b) de type miniature.
Avec l'aimable autorisation de
Tech America.



Il convient de souligner que tous les résistors obéissent à la loi d'Ohm. Un résistor qui obéit à la loi d'Ohm est connu comme un *résistor linéaire*. Il a une résistance constante et donc sa caractéristique courant-tension (le diagramme i - v) est une ligne droite passant par l'origine comme cela est illustré à la Fig. 2.7(a). Un *résistor non linéaire* n'obéit pas à la loi d'Ohm. Sa résistance varie en fonction de la valeur du courant le traversant et sa caractéristique i - v est généralement comme celle illustrée à la Fig. 2.7(b). Des exemples de dispositifs qui présentent une résistance électrique non linéaire sont les ampoules et la diode. Bien que tous les résistors usuels puissent présenter un comportement non linéaire, sous certaines conditions, nous supposons dans ce livre, que tous ces éléments se comportent effectivement comme résistors linéaires.

Une grandeur utile dans l'analyse des circuits est l'inverse de la résistance R , connue sous le nom de *conductance* et désignée par G ,

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{v} \quad (2.7)$$

La conductance est une mesure de la propension d'un matériau à laisser passer le courant électrique. L'unité de conductance est le *mho* (ohm épilé à l'envers) ou ohms réciproques, avec le symbole oméga inversé. Bien que les ingénieurs utilisent souvent le mho, dans ce livre, nous préférons utiliser le siemens (S), qui est l'unité SI de la conductance :

$$1 \text{ S} = 1 \text{ mho} = 1 \text{ A/V} \quad (2.8)$$

Ainsi :

La **conductance** est la capacité d'un élément à laisser passer un courant électrique ; elle est mesurée en mhos ou en Siemens (S).

Le même résistor peut être exprimé en ohms ou siemens. Par exemple, 10Ω est la même que $0,1 \text{ S}$. De l'équation (2.7), on peut écrire

$$i = Gv \quad (2.9)$$

La puissance dissipée par un résistor peut être exprimée à l'aide des équations (1.7) et (2.3) comme suit :

$$p = vi = i^2 R = \frac{v^2}{R} \quad (2.10)$$

De même, en faisant appel à la notion de conductance, on obtient :

$$p = vi = v^2 G = \frac{i^2}{G} \quad (2.11)$$

Il convient de noter deux choses importantes qui dérivent des équations (2.10) et (2.11), notamment :

1. La puissance dissipée par un résistor est une fonction non linéaire par rapport au courant ou de la tension aux bornes.
2. Comme R et G sont des quantités positives, la puissance dissipée par un résistor est toujours positive. Évidemment, un résistor absorbe toujours de la puissance. Cela confirme l'idée qu'un résistor est un élément passif, incapable de fournir de l'énergie.

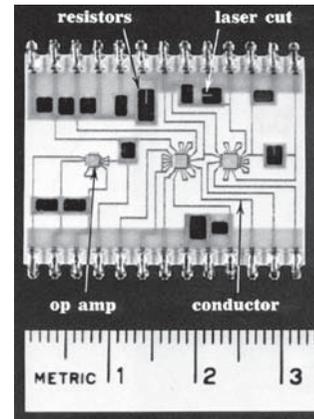
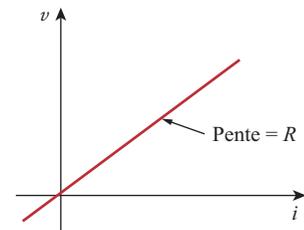
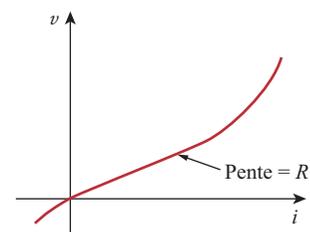


Figure 2.6
Résistors d'un circuit imprimé miniaturisé.
D'après : G. Daryanani, *Principles of Active Network Synthesis and Design* (New York : John Wiley, 1976), p. 461.



(a)



(b)

Figure 2.7
La caractéristique i - v pour : (a) un résistor linéaire, (b) un résistor non-linéaire.

Exemple 2.1

Un fer à repasser, alimenté sous 120 V, tire un courant de 2 A. Calculer sa résistance électrique.

Solution :

Selon la loi d'Ohm, $R = \frac{v}{i} = \frac{120}{2} = 60\Omega$

Exercice 2.1

Le composant principal d'un grille-pain est son résistor qui réalise la conversion de l'énergie électrique en chaleur. Quel est l'intensité du courant tiré du réseau à 110 V, si la résistance électrique du grille-pain est de 12 Ω ?

Réponse : 9,167 A.

Exemple 2.2

Pour le circuit de la Fig. 2.8 calculer la valeur du courant i , la conductance G et la puissance absorbée p .

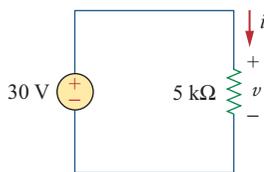


Figure 2.8

Pour l'Exemple 2.2.

Solution :

La différence de potentiel aux bornes du résistor est la même qu'aux bornes de la source d'alimentation 30V). Ainsi, le courant tiré est :

$$i = \frac{v}{R} = \frac{30}{5 \times 10^3} = 6 \text{ mA}$$

La valeur de la conductance est :

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{5 \times 10^3} = 0,2 \text{ mS}$$

La puissance consommée est calculée en utilisant les équations (1.7), (2.10) ou (2.11) :

$$p = vi = 30(6 \times 10^{-3}) = 180 \text{ mW}$$

ou

$$p = i^2R = (6 \times 10^{-3})^2 \times (5 \times 10^3) = 180 \text{ mW}$$

ou

$$p = v^2G = (30)^2 \times (0,2 \times 10^{-3}) = 180 \text{ mW}$$

Exercice 2.2

Pour le circuit de la Fig. 2.9 calculer la différence de potentiel v , la conductance G et la puissance p .

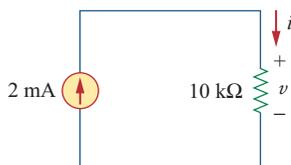


Figure 2.9

Pour l'Exercice 2.2.

Réponse : 20 V ; 100 μS ; 40 mW.

Exemple 2.3

Une source de tension délivre $20 \sin \pi t$ V et alimente un résistor de $5 \text{ k}\Omega$. Trouver le courant qui traverse le résistor et la puissance dissipée.

Solution : $i = \frac{v}{R} = \frac{20 \sin \pi t}{5 \times 10^3} = 4 \sin \pi t \text{ mA}$

D'où on obtient : $p = vi = 80 \sin^2 \pi t \text{ W}$

Exercice 2.3

Un résistor absorbe une puissance instantanée de $20 \cos 2t$ mW quand il est branché à une différence de potentiel $v = 10 \cos t$ V. Calculer i et R .

Réponse : $2 \cos t$ mA, $5 \text{ k}\Omega$.

2.3 † Nœuds, branches et boucles

Comme les éléments d'un circuit électrique peuvent être différemment interconnectés, nous allons préciser maintenant certains concepts de base de la topologie des réseaux. Pour faire la différence entre un circuit et un réseau, on peut considérer le réseau comme une interconnexion d'éléments ou d'appareils, alors qu'un circuit est composé d'un ou de plusieurs chemins en boucle. La convention adoptée par le monde des électriciens lorsqu'on aborde la topologie des réseaux est d'utiliser le mot réseau plutôt que circuit, quoi que les deux mots signifient la même chose dans le contexte de cet ouvrage. Concernant la topologie des réseaux, nous étudierons par la suite les propriétés relatives à la position réciproque des éléments du réseau et la configuration géométrique du réseau. Ces éléments comprennent les branches, les nœuds et les mailles.

Une **branche** est représentée par un seul élément de circuit, comme par exemple une source de tension ou un résistor.

En d'autres termes, une branche est constituée par n'importe quel élément de circuit qui dispose de deux bornes de connexion. Le circuit de la Fig. 2.10 a cinq branches, c'est-à-dire la source de 10V, la source de courant de 2 A et les trois résistors.

Un **nœud** est tout point d'un réseau où aboutissent deux ou plusieurs branches.

Dans un circuit, un nœud est généralement indiqué par un point. Si un fil de connexion relie deux nœuds, les deux nœuds constituent un seul nœud. Le circuit de la Fig. 2.10 dispose de trois nœuds, à savoir les nœuds a , b et c . Notez que les trois points qui forment le nœud b sont reliés par des fils conducteurs et constituent donc un seul point. La même chose est vraie pour les quatre points qui constituent le nœud c . En fait, le circuit de la Fig. 2.10 a seulement trois nœuds en re-dessinant le circuit comme nous l'avons fait à la Fig. 2.11. Les deux circuits

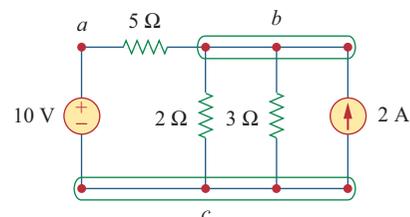


Figure 2.10
Nœuds, branches et boucles.

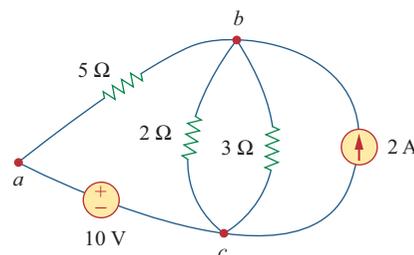


Figure 2.11
Présentation différente du circuit à trois nœuds de la Fig. 2.10.

sont pratiquement identiques.

Une **maille** est un ensemble de branches qui forment une boucle fermée.

Une maille ou boucle est donc un circuit fermé commençant par un nœud, en passant par un ensemble d'autres nœuds, et revenant vers le nœud de départ sans passer deux fois par un même nœud. Une boucle est dite *indépendante* si elle contient au moins une branche qui ne fait pas partie d'une autre boucle indépendante. Le nombre de boucles indépendantes permet d'établir autant d'équations indépendantes.

Pour un circuit complexe il est possible de constituer un ensemble de mailles ou de boucles indépendantes. Dans la Fig. 2,11, la boucle *abca* avec le résistor de 2Ω est une boucle indépendante. Une deuxième boucle indépendante est celle constituée par la source de courant et le résistor de 3Ω , tandis que la troisième boucle indépendante est celle qui est constituée par les deux résistors de 2Ω et de 3Ω en parallèle. Cela forme un ensemble de boucles indépendantes.

Un réseau avec b branches, n nœuds et l mailles ou boucles indépendantes satisfait toujours les conditions du théorème fondamental de la topologie du réseau, à savoir :

$$b = l + n - 1 \quad (2.12)$$

Comme le montrent les deux définitions suivantes, la topologie du circuit est d'une grande utilité pour l'étude des tensions et des courants dans un circuit électrique.

Deux ou plusieurs éléments sont **groupés en série** s'ils partagent un nœud unique et par conséquent ils sont parcourus par le même courant.

Deux ou plusieurs éléments sont **groupés en parallèle** s'ils sont connectés aux deux mêmes nœuds et par conséquent ont la même tension à leurs bornes.

On dit que les éléments sont en série quand ils sont connectés en chaîne ou de manière séquentielle de bout en bout. Par exemple, deux éléments sont en série s'ils partagent un point commun et aucun autre élément n'est relié à ce nœud commun. Les éléments sont en parallèle s'ils sont connectés à la même paire de bornes. Les éléments peuvent être connectés d'une manière quelconque : ni en série ni en parallèle. Dans le circuit représenté à la Fig. 2.10, la source de tension et le résistor de 5Ω sont en série car le courant qui les traverse est le même. Le résistor de 2Ω , celui de 3Ω et la source de courant sont en parallèle, car ils sont connectés aux deux mêmes nœuds b et c , et par conséquent ont la même différence de potentiel à leur bornes. Le résistor de 5Ω et celui de 2Ω ne sont ni en série ni en parallèle.

Exemple 2.4

Établir le nombre de mailles et de nœuds pour le circuit de la Fig. 2.12. Identifier quels éléments sont en série et lesquels sont groupés en parallèle.

Solution :

Comme le circuit comporte quatre éléments, il dispose de quatre

branches. Le circuit présente aussi trois nœuds qui sont identifiés à la Fig. 2.13. Le résistor de 5Ω est en série avec la source de tension de 10V car les deux éléments sont parcourus par le même courant de 2A . De plus, les éléments sont branchés tous les deux entre le nœud 2 et le nœud 3.

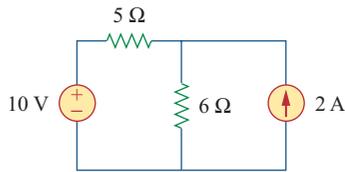


Figure 2.12
Pour l'Exemple 2.4.

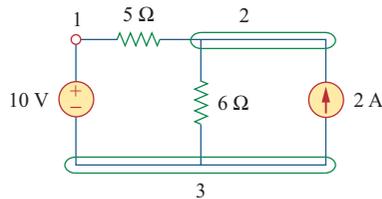


Figure 2.13
Le circuit à trois nœuds de la Fig. 2.12.

Exercice 2.4

Combien de branches et de nœuds existent-ils pour le circuit de la Fig. 2.14 ? Identifier les éléments groupés en série et en parallèle.

Réponse : Cinq branches et trois nœuds sont identifiés, comme le montre la Fig. 2.15 ; le résistor de 1Ω est en parallèle avec celui de 2Ω ; le résistor de 4Ω est aussi en parallèle avec la source de tension de 10V .

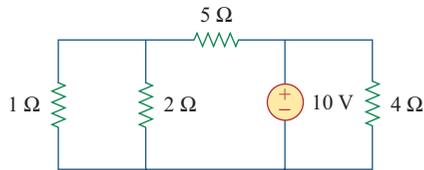


Figure 2.14
Pour l'Exercice 2.4.

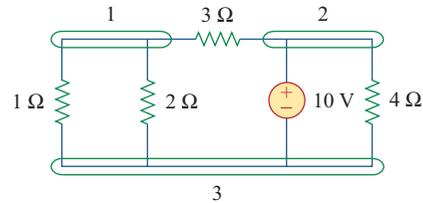


Figure 2.15
Réponse pour l'Exercice 2.4.

2.4 Les lois de Kirchhoff

Seule, la loi d'Ohm n'est pas suffisante pour analyser les circuits. Cependant, en association avec les deux lois de Kirchhoff, nous disposons d'un outil de travail puissant qui nous donne la possibilité d'analyser une grande variété de circuits électriques. Les lois de Kirchhoff ont été formulées vers 1847 par le physicien allemand Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887). Ces lois sont officiellement connues comme la loi des courants de Kirchhoff (KCL) et la loi des tensions de Kirchhoff (KVL).

La loi des courants de Kirchhoff (KCL) stipule que la somme des intensités des courants qui entrent par un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en sortent.

La première loi de Kirchhoff est basée sur la loi de conservation de la charge, qui exige que la somme algébrique des charges dans un système ne peut pas changer.

Note historique



Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) était un physicien allemand qui a formulé les deux lois relatives au courant électrique dans les circuits (loi des mailles et loi des nœuds dites lois de Kirchhoff). Ces lois associées à la loi d'Ohm constituent les fondements de la théorie des circuits électriques.

Né le 12 mars 1824 à Königsberg, Prussie (maintenant Kaliningrad, Russie), il entame ses études universitaires à l'âge de 18 ans à l'Université de Königsberg. Après un doctorat en physique obtenu en 1847, il enseigne à l'Université de Breslau de 1850 à 1854, puis à celle de Heidelberg et enfin à l'Université de Berlin, à partir de 1875. Avec Robert Bunsen, il découvre en 1860, grâce à l'analyse spectrale, le césium et le rubidium, ouvrant à l'anglais Crookes et à bien d'autres scientifiques, la voie de la recherche de corps simples encore inconnus.

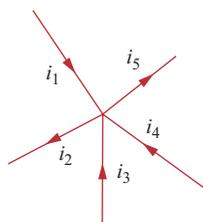


Figure 2.16

Un nœud avec ses courants afin d'illustrer la première loi de Kirchhoff (KCL).

Mathématiquement, la loi des courants (KCL) se traduit par :

$$\sum_{n=1}^N i_n = 0 \quad (2.13)$$

où N est le nombre de branches reliées au nœud et i_n est le n -ième courant qui entre (ou sort) par le nœud. Selon cette loi, les courants qui entrent par un nœud sont considérés positifs, tandis que les courants sortants par le nœud sont affectés du signe moins.

Pour démontrer cette première loi de Kirchhoff, imaginons un ensemble de courants associés à un nœud. La somme algébrique des courants au niveau du nœud est

$$i_T(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + \dots \quad (2.14)$$

Par intégration, nous obtenons l'équation (2.15), soit :

$$q_T(t) = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) + \dots \quad (2.15)$$

où $q_K(t) = \int i_K(t) dt$ et $q_T(t) = \int i_T(t) dt$. La loi de conservation de la charge électrique exige que la somme algébrique des charges électriques au niveau du nœud ne doit pas changer, autrement dit au niveau d'un nœud on ne peut pas emmagasiner de charges. Ainsi $q_T(t) = 0 \rightarrow i_T(t) = 0$, ce qui confirme la première loi de Kirchhoff.

Considérons maintenant le nœud de la Fig. 2.16. L'application de KCL nous donne :

$$i_1 + (-i_2) + i_3 + i_4 + (-i_5) = 0 \quad (2.16)$$

car les courants, i_1 , i_3 et i_4 entrent par le nœud, tandis que les courants i_2 et i_5 en sortent. En réarrangeant l'équation nous obtenons :

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5 \quad (2.17)$$

L'équation (2.17) est une forme alternative de la première loi de Kirchhoff (KCL).

La somme des courants entrant par un nœud est égale à la somme des courants sortant par le même nœud.

Notez que la première loi de Kirchhoff s'applique également aux boucles fermées. Celles-ci peuvent être considérées comme un cas

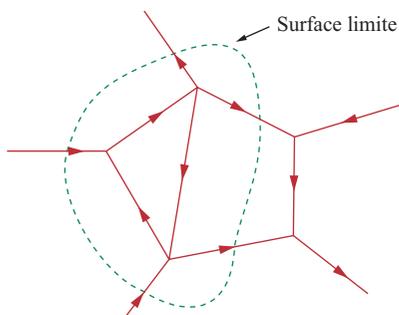


Figure 2.17

Application de la KCL pour une boucle fermée.

Deux sources (ou deux circuits en général) sont équivalentes si leurs caractéristiques i - v sont identiques par rapport aux mêmes bornes.

généralisé, car un nœud peut être considéré à la limite comme une surface fermée réduite à un point. En deux dimensions, la condition limite est la même que dans le circuit fermé. Comme pour le circuit de la Fig. 2.17, le courant total entrant dans la surface fermée est égal à la somme des courants qui quittent la surface.

Une application simple de KCL est celle représentée par le groupement en parallèle des sources de courant. Le courant total est la somme algébrique du courant fourni par les sources individuelles. Par exemple, les sources de courant de la Fig. 2.18(a) peuvent être remplacées, comme à la Fig. 2.18(b). La source équivalente de courant peut être définie en appliquant KCL au nœud a :

$$I_T + I_2 = I_1 + I_3$$

ou

$$I_T = I_1 - I_2 + I_3 \quad (2.18)$$

Un circuit en série ne peut pas admettre deux courants différents, I_1 et I_2 , à moins que $I_1 = I_2$, faute de quoi la première loi de Kirchhoff serait violée.

La deuxième loi de Kirchhoff est basée sur le principe de conservation de l'énergie :

La loi des tensions de Kirchhoff (KVL) stipule que la somme algébrique des tensions le long d'une maille est constamment nulle.

Mathématiquement, la deuxième loi de Kirchhoff s'exprime par l'équation suivante :

$$\sum_{m=1}^M v_m = 0 \quad (2.19)$$

où M est le nombre de tensions le long des branches d'une maille (ou le nombre de branches) et v_m sont les valeurs de ces tensions. Pour mieux illustrer la deuxième loi de Kirchhoff (KVL), considérons le circuit de la Fig. 2.19. Le signe de chaque tension est donné en fonction de la polarité de la borne rencontrée, en choisissant un sens pour parcourir la boucle (par exemple dans le sens horaire). On peut commencer par n'importe quelle branche et faire le tour de la boucle vers la droite ou vers la gauche. Supposons que nous commençons le parcours par la source de tension et continuons dans le sens horaire comme illustré à la Fig. 2.19. Selon la deuxième loi de Kirchhoff nous pouvons noter :

$$-v_1 + v_2 + v_3 - v_4 + v_5 = 0 \quad (2.20)$$

Par regroupement on obtient

$$v_2 + v_3 + v_5 = v_1 + v_4 \quad (2.21)$$

qui peut être interprétée comme suit :

En additionnant toutes les tensions d'une maille on obtient un résultat nul.

Il s'agit d'une forme alternative de la deuxième loi de Kirchhoff. Notez que si nous avons parcouru la boucle dans le sens contre-horaire, le résultat aurait été le même, sauf que les signes seraient inversés.

Lorsque les sources de tension sont groupées en série, la deuxième

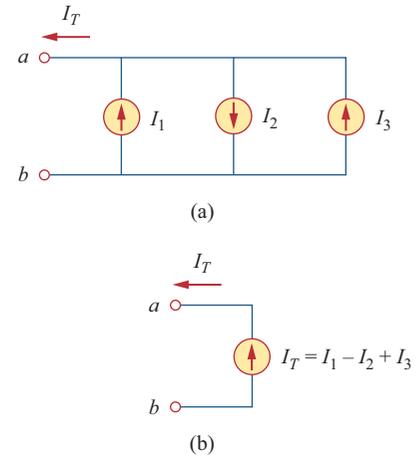


Figure 2.18

Sources de courant en parallèle : (a) le circuit d'origine, (b) le circuit équivalent.

La loi des boucles peut être appliquée indifféremment du sens de parcours de la boucle considérée. La somme algébrique des chutes de tension au long d'une boucle est toujours égale à zéro.

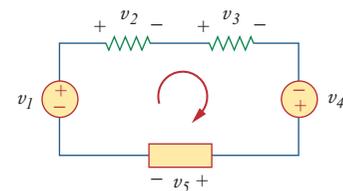


Figure 2.19

Circuit avec une seule boucle pour illustrer l'application de la loi des boucles (KVL).

loi de Kirchhoff (KVL) peut être appliquée pour obtenir la tension totale. La tension totale est donc la somme algébrique des tensions des sources individuelles. Par exemple, pour les sources de tension de la Fig. 2.20(a), la tension de la source équivalente à la Fig. 2.20(b) est obtenue en appliquant la deuxième loi de Kirchhoff :

$$-V_{ab} + V_1 + V_2 - V_3 = 0$$

ou

$$V_{ab} = V_1 + V_2 - V_3 \tag{2.23}$$

Pour éviter la violation de la deuxième loi de Kirchhoff, un circuit ne peut pas contenir deux sources de tension différentes groupées en parallèle.

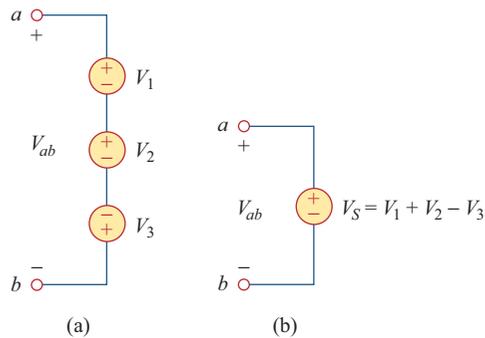


Figure 2.20
Sources de tension en série : (a) le circuit d'origine, (b) le circuit équivalent.

Exemple 2.5

Pour le circuit de la Fig. 2.21(a), trouver les deux différences de potentiel v_1 et v_2 .

Solution :

Pour trouver v_1 et v_2 on fait appel à la loi d'Ohm et à la loi de mailles de Kirchhoff. Supposons que le courant i circule suivant le sens de la Fig. 2.21(b). Selon la loi d'Ohm :

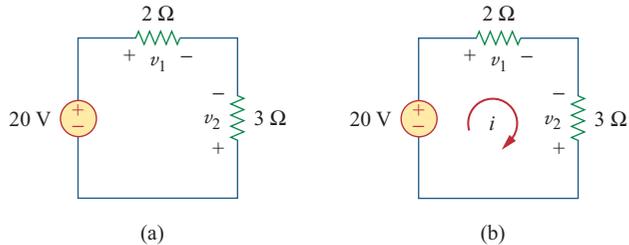


Figure 2.21
Pour l'Exemple 2.5.

$$v_1 = 2i, \quad v_2 = -3i \tag{2.5.1}$$

Appliquons la loi de maille et on obtient :

$$-20 + v_1 - v_2 = 0 \tag{2.5.2}$$

En substituant l'équation (2.5.1) dans l'équation (2.5.2) on obtient :

$$-20 + 2i + 3i = 0 \quad \text{mais} \quad 5i = 20 \quad \implies \quad i = 4A$$

En remplaçant cette valeur dans l'équation (2.5.1) nous conduit au résultat recherché :

$$v_1 = 8 \text{ V}, \quad v_2 = -12V$$

Bibliographie

- Aidala, J. B., and L. Katz. *Transients in Electric Circuits*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1980.
- Angerbaur, G. J. *Principles of DC and AC Circuits*. 3rd ed. Albany, NY: Delman Publishers, 1989.
- Attia, J. O. *Electronics and Circuit Analysis Using MATLAB*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.
- Balabanian, N. *Electric Circuits*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- Bartkowiak, R. A. *Electric Circuit Analysis*. New York: Harper & Row, 1985.
- Blackwell, W. A., and L. L. Grigsby. *Introductory Network Theory*. Boston, MA: PWS Engineering, 1985.
- Bobrow, L. S. *Elementary Linear Circuit Analysis*. 2nd ed. New York: Holt, Rinehart & Winston, 1987.
- Boctor, S. A. *Electric Circuit Analysis*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
- Boylestad, R. L. *Introduction to Circuit Analysis*. 10th ed. Columbus, OH: Merrill, 2000.
- Budak, A. *Circuit Theory Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987.
- Carlson, B. A. *Circuit: Engineering Concepts and Analysis of Linear Electric Circuits*. Boston, MA: PWS Publishing, 1999.
- Chattergy, R. *Spicey Circuits: Elements of Computer-Aided Circuit Analysis*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1992.
- Chen, W. K. *The Circuit and Filters Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.
- Choudhury, D. R. *Networks and Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- Ciletti, M. D. *Introduction to Circuit Analysis and Design*. New York: Oxford Univ. Press, 1995.
- Cogdeil, J. R. *Foundations of Electric Circuits*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- Cunningham, D. R., and J. A. Stuller. *Circuit Analysis*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- Davis, A., (ed.). *Circuit Analysis Exam File*. San Jose, CA: Engineering Press, 1986.
- Davis, A. M. *Linear Electric Circuit Analysis*. Washington, DC: Thomson Publishing, 1998.
- DeCarlo, R. A., and P. M. Lin. *Linear Circuit Analysis*. 2nd ed. New York: Oxford Univ. Press, 2001.
- Del Toro, V. *Engineering Circuits*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987.
- Dorf, R. C., and J. A. Svoboda. *Introduction to Electric Circuits*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- Edminister, J. *Schaum's Outline of Electric Circuits*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- Floyd, T. L. *Principles of Electric Circuits*. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- Franco, S. *Electric Circuits Fundamentals*. Fort Worth, FL: Saunders College Publishing, 1995.
- Goody, R. W. *Microsim PSpice for Windows*. Vol. 1. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- Harrison, C. A. *Transform Methods in Circuit Analysis*. Philadelphia, PA: Saunders, 1990.
- Harter, J. J., and P. Y. Lin. *Essentials of Electric Circuits*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1986.
- Hayt, W. H., and J. E. Kemmerly. *Engineering Circuit Analysis*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- Hazen, M. E. *Fundamentals of DC and AC Circuits*. Philadelphia, PA: Saunders, 1990.
- Hostetter, G. H. *Engineering Network Analysis*. New York: Harper & Row, 1984.
- Huelsman, L. P. *Basic Circuit Theory*. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- Irwin, J. D. *Basic Engineering Circuit Analysis*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- Jackson, H. W., and P. A. White. *Introduction to Electric Circuits*. 7th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1997.
- Johnson, D. E. et al. *Electric Circuit Analysis*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- Karni, S. *Applied Circuit Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- Kraus, A. D. *Circuit Analysis*. St. Paul, MN: West Publishing, 1991.
- Madhu, S. *Linear Circuit Analysis*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
- Mayergoyz, I. D., and W. Lawson. *Basic Electric Circuits Theory*. San Diego, CA: Academic Press, 1997.
- Mottershead, A. *Introduction to Electricity and Electronics: Conventional and Current Version*. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- Nasar, S. A. *3000 Solved Problems in Electric Circuits. (Schaum's Outline)* New York: McGraw-Hill, 1988.
- Neudorfer, P. O., and M. Hassul. *Introduction to Circuit Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- Nilsson, J. W., and S. A. Riedel. *Electric Circuits*. 5th ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1996.
- O'Malley, J. R. *Basic Circuit Analysis. (Schaum's Outline)* New York: McGraw-Hill, 2nd ed., 1992.
- Parrett, R. *DC-AC Circuits: Concepts and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- Paul, C. R. *Analysis of Linear Circuits*. New York: McGraw-Hill, 1989.

- Poularikas, A. D., (ed.). *The Transforms and Applications Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2nd ed., 1999.
- Ridsdale, R. E. *Electric Circuits*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1984.
- Sander, K. F. *Electric Circuit Analysis: Principles and Applications*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.
- Scott, D. *Introduction to Circuit Analysis: A Systems Approach*. New York: McGraw-Hill, 1987.
- Smith, K. C., and R. E. Alley. *Electrical Circuits: An Introduction*. New York: Cambridge Univ. Press, 1992.
- Stanley, W. D. *Transform Circuit Analysis for Engineering and Technology*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- Strum, R. D., and J. R. Ward. *Electric Circuits and Networks*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985.
- Su, K. L. *Fundamentals of Circuit Analysis*. Prospect Heights, IL: Waveland Press, 1993.
- Thomas, R. E., and A. J. Rosa. *The Analysis and Design of Linear Circuits*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- Tocci, R. J. *Introduction to Electric Circuit Analysis*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- Tuinenga, P. W. *SPICE: A Guide to Circuit Simulation*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.
- Whitehouse, J. E. *Principles of Network Analysis*. Chichester, U.K.: Ellis Horwood, 1991.
- Yorke, R. *Electric Circuit Theory*. 2nd ed. Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1986.

Index

(adapté à la version française)

A

Adaptation d'impédance 573, 591, 595
Admittance 384, 399, 724
Admittance de sortie 879
Admittance de transfert 613
Alternateur *Voir* Génératrice triphasée à courant alternatif
Amélioration du facteur de puissance 478
Amortissement 321
Amortissement critique 337, 355
Ampèremètre 61, 76, 175
Amplificateur à émetteur commun 879
Amplificateur à gain unitaire *Voir* Suiveur de tension
Amplificateur à transistor 174, 879
Amplificateur différentiel 186, 199
Amplificateur d'instrumentation 188, 196, 199
Amplificateur inverseur 181, 182, 198
Amplificateur non-inverseur 183, 184, 198, 437
Amplificateur opérationnel 176
Amplificateur sommateur 185, 198
Ampli op *Voir* Amplificateur opérationnel
Ampli op idéal 180, 198
Amplitude 369, 399
Analyse de Fourier 755, 796
Analyse de mailles 82, 92, 97, 103, 715
Analyse des circuits 720, 735
Analyse des circuits en c.a. 86
Analyse des circuits en c.c. 83
Analyse en courant alternatif 41
Analyse en courant continu 29
Analyse nodale 82, 103, 111, 412, 715
Analyse transitoire 286, 34
Analyseur de spectre 175, 791, 796
Argument 369, 371, 399
Atténuateur 173
Autotransformateur 595
Autotransformateur idéal 578

B

Bande latérale inférieure 835
Bande latérale supérieure 835
Bande limitée 791

Bande passante 629, 659
Bardeen, John 107
Base 108
Bel 615
Bell, Alexander Graham 615
Bit le moins significatif 195
Bit le plus significatif 195
Bobine *Voir* Inducteur
Bode, Hendrik W. 617
Boucle 35
Branche 35, 65
Brattain, Walter 107
Braun, Karl Ferdinand 18

C

c.a. *Voir* Courant alternatif
Calculateur analogique *Voir* Ordinateur analogique
Capacitance *Voir* Capacité
Capacité 215
Capacité équivalente 220
Capacité équivalente en parallèle 221
Capacité équivalente en série 222
Caractéristiques d'un transistor 108
Cascade d'amplis op 189
Cas d'amortissement critique 319
Cas sous-amorti 319
Cas sur-amorti 319
c.c. *Voir* Courant continu
Charge 139, 152
Charge électrique 6
Charge équilibrée 506, 540
Charge réactive 459
Charge résistive 459
Charge triphasée 505
Circuit à courant alternatif 232, 369, 412
Circuit à courant continu 232
Circuit à relais 294, 297
Circuit d'allumage d'automobile 295, 297
Circuit de déphasage 393
Circuit de lissage 351, 353, 355
Circuit de temporisation 290, 297
Circuit de type planaire 92, 111, 415
Circuit dual 631
Circuit du premier ordre 251, 252, 296

Circuit du second ordre 312, 336
 Circuit du type non-planaire 92, 111
 Circuit électrique 4
 Circuit en étoile 389
 Circuit en pont à courant alternatif 396
 Circuit en triangle 389
 Circuit équivalent 135, 139
 Circuit équivalent de Norton 146, 160, 424
 Circuit équivalent de Thévenin 139, 148, 160, 424, 574
 Circuit équivalent en T 569, 570, 595
 Circuit équivalent en Π 568, 595
 Circuit hétérodyne *Voir* Mélangeur de fréquences
 Circuit instable 735, 736
 Circuit intégrateur *Voir* Intégrateur
 Circuit libre de source 252
 Circuit linéaire 128, 129, 139
 Circuit oscillant 365
 Circuit ouvert 32
 Circuit parallèle RLC 631
 Circuit RC libre de source 252
 Circuit résonant 627, 654
 Circuit résonnant série 631
 Circuit RLC parallèle 324, 334
 Circuit RLC série 317, 329
 Circuit RL libre de source 257
 Circuits duales 348
 Circuits du transistor 878
 Circuit stable 735
 Coefficient de couplage 563, 564, 595
 Coefficients de Fourier 755, 761, 764, 795
 Cofacteur A-6
 Collecteur 108
 Complexe conjuguée 486
 Composante alternative 772
 Composante continue 772
 Compteur de kilowatts-heures 487
 Condensateur 214
 ajustable 216
 fixe 216
 linéaire 216
 non-linéaire 216
 variable 216 *Voir* Condensateur ajustable
 Condensateur équivalent 220
 Condensateur idéal 217
 Condensateur réel 218
 Condensateurs en parallèle 220
 Condensateurs en série 220
 Conditions de Dirichlet 755
 Conditions initiales *Voir* Facteur d'amortissement
 Conductance 33, 65, 385
 Conductance équivalente 45, 65
 Configuration en étoile 505
 Configuration en triangle 505
 Conjugué complexe A-13

Connexion
 étoile - étoile 506
 étoile - triangle 506
 triangle - étoile 506
 triangle - triangle 506
 Connexion en cascade 189
 Connexion en parallèle des quadripôles 870
 Connexion en série des quadripôles 869
 Connexion étoile *Voir* Configuration en étoile
 Connexion triangle *Voir* Configuration en triangle
 Conservation de l'énergie 475
 Consignes de sécurité 540
 Constante de temps 253, 258, 297, 309
 Convention du point de marquage 557, 561, 595
 Convention du signe passif 11, 12, 313, 776
 Convertisseur numérique-analogique 194, 199, 353
 Convolution 695, 819
 Correction du facteur de puissance *Voir* Amélioration du
 facteur de puissance
 Couplage magnétique 564, 565, 595
 Courant alternatif 7, 368
 Courant continu 7
 Courant de court-circuit 145, 146
 Courant de ligne 509, 541
 Courant de Norton *Voir* Courant de court-circuit
 Courant de phase 509, 541
 Courant électrique 6
 Courant sinusoïdal *Voir* Courant alternatif
 Court-circuit 32, 65
 Critère de Barkhausen 437, 438

D

Décade 648
 Décalage dans le temps 679
 Décalage en fréquence 679
 Décibel 615, 659
 Décomposition par fractions partielles 688
 Déplacement en fréquence *Voir* Décalage en fréquence
 Détecteur 657
 Déterminant A-2
 Deuxième loi de Kirchhoff 65, 82 *Voir* Loi des tensions
 de Kirchhoff
 Diagramme de Bode 615, 617, 659
 Diagramme de l'amplitude 619, 620
 Diagramme de phase 619, 620
 Diagramme phasorial 376, 377, 382
 Diélectrique 214
 Différence de potentiel 9
 Différenciateur 232, 234, 239, 309
 Différenciation 680
 Dirichlet, Johann Peter Gustav 755

Discriminateur des fréquences *Voir* Filtre
 Diviseur de courant 46
 Diviseur de tension 43, 60, 78, 140
 Domaine du temps *Voir* Domaine temporel
 Domaine fréquentiel *Voir* Domaine phasoriel
 Domaine phasoriel 379, 412, 429, 696, 705, 714, 715, 743
 Domaine temporel 379, 412, 696, 705, 715
 Dualité 818

E

Échantillonnage 265
 Échantillonnage des signaux 808, 833, 836
 Edison, Thomas Alva 59
 Effet de charge 156
 Électromagnétisme 553
 Élément actif 15, 176
 Élément du circuit électrique 4
 Élément passif 15, 65
 Émetteur 108
 Énergie 12
 Énergie emmagasinée par un condensateur 217, 239
 Énergie emmagasinée par une bobine *Voir* Énergie emmagasinée par une inductance
 Énergie emmagasinée par une inductance 239, 562
 Enroulement primaire 565
 Enroulement secondaire 565
 Entrée inverseuse 177
 Entrée non-inverseuse 177
 Équation caractéristique 318, 324
 Équation différentielle 235, 250, 365, 674, 714
 Équation différentielle du premier ordre 253, 296
 Équation différentielle du second ordre 317
 Équation intégro-différentielle 703, 705, 714
 Équation matricielle A-1
 Équation quadratique 318
 Équations simultanées A-1
 Équivalent de Norton *Voir* Circuit équivalent de Norton
 Équivalent de Thévenin *Voir* Circuit équivalent de Thévenin
 Équivalent Norton *Voir* Circuit équivalent de Norton
 Étage 189
 Excitation *Voir* Paramètre d'entrée

F

Facteur d'amortissement 318
 Facteur de puissance ($\cos\phi$) 468, 469, 486
 en avance 469
 en retard 469

Facteur de qualité 629, 632, 659
 Faraday, Michael 215
 f.é.m *Voir* Force électromotrice
 Filtre 232, 660, 796
 actif 634, 660
 passif 634, 660
 Filtre coupe-bande 634, 636, 660
 Filtre notch *Voir* Filtre coupe-bande
 Filtre passe-bande 634, 636, 660
 Filtre passe-bas 634, 635, 657, 660
 Filtre passe-haut 634, 635, 657, 660
 Flux magnétique 555, 595
 Fonction de commutation *Voir* Fonction singulière
 Fonction de transfert 612, 613, 659, 724, 743, 838
 Fonction échelon unité 263, 297
 Fonction impulsion unité 263, 264, 297
 Fonction périodique 370, 754, 794
 Fonction rampe unité 263, 265, 297, 811
 Fonction réseau *Voir* Fonction de transfert
 Fonction singulière 263, 297
 Fonction sinor 376
 Force électromotrice 9
 Forme cartésienne 374, A-10
 Forme exponentielle 374, A-11
 Forme polaire 374, A-10
 Forme standard 618
 Formule d'Euler A-15
 Fourier, Jean Baptiste Joseph 754
 Fréquence 371
 Fréquence angulaire 369, 399
 Fréquence cyclique *Voir* Fréquence
 Fréquence d'amortissement 320
 Fréquence d'amortissement naturel 320, 354
 Fréquence d'échantillonnage 836, 838
 Fréquence de coupure 619
 Fréquence de Nyquist 837, 838, 845
 Fréquence de résonance 318, 628, 632, 659
 Fréquence fondamentale 755, 795
 Fréquence naturelle 318
 Fréquence naturelle non amortie 320
 Fréquence naturelle non-amortie *Voir* Fréquence de résonance
 Fréquence néperienne *Voir* Facteur d'amortissement
 Fréquences à mi-puissance 628, 632, 659

G

Gain de tension en boucle ouverte 177
 Gain en boucle fermée 178
 Gain en courant 108, 613, 724, 878
 Gain en courant base-collecteur 879
 Gain en tension 197, 613, 724, 878

Galvanomètre 158
 Générateur de signal 250
 Générateur de signaux 175
 Génératrice triphasée à courant alternatif 503
 Génie informatique 251
 Gibbs, Josiah Willard 760
 Grandeur sinusoïdale 368, 399

H

Harmonique impaire 761
 Henry, Joseph 225
 Hertz, Heinrich Rudolf 370

I

Impédance 384, 399, 724
 Impédance de charge 462, 463
 Impédance de Norton 439
 Impédance d'entrée 197, 878, 879
 Impédance de sortie 878
 Impédance de Thévenin 462, 463, 486
 Impédance de transfert 613
 Impédance équivalente 388
 Impédance réfléchie 567, 573
 Impédance reportée *Voir* Impédance réfléchie
 Impulsion unité 743
 Inductance 224, 231
 Inductance équivalente 258
 Inductance équivalente en parallèle 229
 Inductance équivalente en série 228
 Inductance mutuelle 555, 556, 557
 Inductance propre 555
 Inducteur 224
 linéaire 225
 non linéaire 225
 Instrument analogique 61, 76
 Instrumentation électronique 175
 Instrument de mesure à c.c. 60
 Instruments de mesure analogiques à c.c. *Voir* Instrument analogique
 Intégrale de convolution 695, 705
 Intégrateur 232, 239, 309
 Intégration 681
 Interconnexion des quadripôles 869
 Intervalle d'échantillonnage 836
 Intervalle de Nyquist 837, 845
 Inverse de la transformée de Laplace 688
 Inverseur *Voir* Amplificateur inverseur
 Inversion 818

Inversion de matrice A-5
 Isolant 214

K

KCL *Voir* Loi des courants de Kirchhoff
 Kirchhoff, Gustav Robert 38
 KVL *Voir* Loi des tensions de Kirchhoff

L

Laplace, Pierre Simon 674
 Linéarité 128, 162, 678
 Logarithme 615
 en base décimale 617
 Logiciel PSpice 82, 104, 152, 193, 344, 430, 527, 584, 647, 785, 874, 22
 Loi de conservation de l'énergie *Voir* Loi de la conservation
 Loi de la conservation 6
 Loi de mailles *Voir* Deuxième loi de Kirchhoff
 Loi des courants de Kirchhoff 37, 38, 65, 82, 177
 Loi des nœuds *Voir* Première loi de Kirchhoff
 Loi des tensions de Kirchhoff 39
 Loi de tensions *Voir* Lois de Kirchhoff
 Loi d'Ohm 30
 Lois de Kirchhoff 37

M

Maillage 93
 Maille 36
 Masse 83
 Masse du châssis 83
 Matériau diélectrique *Voir* Diélectrique
 MATLAB 82, 627, 651, 730, A-22, A-75
 Matrice carrée A-1
 Matrice colonne A-1
 Matrice complémentaire A-6
 Matrice de correction en aval 730
 Matrice de couplage *Voir* Matrice d'entrée
 Matrice d'entrée 730
 Matrice de sortie 730
 Matrice d'identité A-5
 Matrice du système 730
 Maxwell, James Clerk 554
 Mélangeur de fréquences 655
 Mesure de la puissance en triphasé 533

Méthode algébrique 692
 Méthode des deux wattmètres 533, 541
 Méthode des résidus 691, 692
 Méthode des trois wattmètres 533, 541
 Mise à l'échelle 644, 660
 des grandeurs 645
 en fréquence 645
 Modèle 714
 Modèle hybride équivalent 879
 Modulation en amplitude 654, 808, 816, 833, 834
 Morse, Samuel F. B. 64
 Multimètre 61
 Multiplicateur de capacité 435, 439

N

Napier, John 318
 Néper 318
 Nœud 35, 65
 Nœud de départ 83
 Nœud généralisé *Voir* Super-nœud
 Nombres complexes 374, A-10
 Noyau ferromagnétique 571, 595

O

Octave 648
 Ohm, Georg Simon 31
 Ohmmètre 61, 63, 175
 Onde porteuse *Voir* Signal porteur
 Ordinateur analogique 232
 Oscillateur 436, 439
 Oscillateur à pont de Wien 437, 438
 Oscillateur Colpitts 452, 453
 Oscillateur Hartley 453
 Oscilloscope 175

P

Paire de bornes *Voir* Porte
 Paramètre d'entrée 128
 Paramètre de sortie 128
 Paramètres ABCD *Voir* Paramètres de transmission
 Paramètres d'admittance 853
 Paramètres de transmission 861
 Paramètres d'impédance 849
 Paramètres g *Voir* Paramètres hybrides inverses
 Paramètres h *Voir* Paramètres hybrides

Paramètres hybrides 856
 Paramètres hybrides inverses 857
 Paramètres inverses de chaîne 862
 Paramètres t *Voir* Paramètres inverses de chaîne
 Paramètres y *Voir* Paramètres d'admittance
 Paramètres z *Voir* Paramètres d'impédance
 Parseval Deschemes, Marc-Antoine 777
 Partie imaginaire A-10
 Partie réelle A-10
 Période 369
 Périodicité 682
 Perméabilité 571
 Permittivité 215
 Phase 371, 399
 Phaseur 374, 399
 Phénomène de Gibbs 760
 Pic de résonance 627
 Polarité de référence 558
 Pôle 613, 659
 Pôle complexe 690
 Pôle multiple 689
 Pôle/zéro à l'origine 618
 Pôle/zéro ordinaire 619
 Pôle/zéro quadratique 619
 Pondération binaire 194
 Pont de Maxwell 408
 Pont de résistances *Voir* Pont de Wheatstone
 Pont de Wheatstone 77, 158, 160, 172
 Pont de Wien 408, 452
 Porte 848
 Potentiomètre 32, 60, 63, 76
 Première loi de Kirchhoff *Voir* Loi des courants de Kirchhoff
 Principe de la division de tension *Voir* Diviseur de tension
 Principe de la division du courant *Voir* Diviseur de tension
 Principe de la dualité 347, 348
 Principe de superposition 130, 160, 162, 715
 Programmation en *MATLAB* A-80
 Propriété de linéarité *Voir* Linéarité
 Propriété de mise à l'échelle 678
 Propriétés de la dualité 632
 Puissance active *Voir aussi* Puissance moyenne
 Puissance active par phase 518
 Puissance apparente 468, 486
 Puissance apparente par phase 518
 Puissance complexe 471, 472, 486
 Puissance complexe par phase 518
 Puissance dans un système triphasé 517
 Puissance électrique 11
 Puissance instantanée 11, 456, 486
 Puissance momentanée *Voir* Puissance instantanée
 Puissance moyenne 456, 457, 480, 486, 776, 795
 Puissance réactive 472, 486
 Puissance réactive par phase 518

Q

Quadripôle 848, 886
 Quadripôle réciproque 850
 Quadripôles groupés en cascade 871

R

Rapport de transformation 571, 595
 Rapport du nombre de spires *Voir* Rapport de transformation
 Récepteur radio 654, 655, 660
 Redresseur 589
 Référence *Voir* Nœud de départ
 Régime de fonctionnement linéaire 178
 Régime de saturation négative 178
 Régime de saturation positive 178
 Règle de Cramer 82, A-1, A-3
 Règle de L'Hôpital 781
 Réponse *Voir* Paramètre de sortie
 Réponse à l'impulsion unité 725
 Réponse complète 272, 297, 337
 Réponse de régime permanent 337, 355, 439, 743
 Réponse d'état d'équilibre 272, 273, 297
 Réponse échelon 271, 277, 297, 329, 334
 Réponse en fréquence 612, 647, 659, 91
 Réponse forcée 272
 Réponse naturelle 253, 272, 296, 355
 Réponse oscillatoire 321
 Réponse permanente *Voir* Réponse d'état d'équilibre
 Réponse sous-amortie 337, 355
 Réponse sur-amortie 337, 355
 Réponse totale *Voir* Réponse complète
 Réponse transitoire 272, 273, 297, 337, 355, 743
 Représentation par phaseur 376
 Réseau de mixage 658
 Réseau linéaire 160
 Résistance additionnelle *Voir* Résistor additionnel
 Résistance de Thévenin 150, 160
 Résistance électrique 30
 Résistance équivalente 45, 146
 Résistance équivalente de Thévenin 177
 Résistor 30, 65
 fixe 32
 linéaire 33
 non linéaire 33, 365
 variable 32
 Résistor additionnel 62
 Résistors en série 43
 Résolution de problèmes 20
 Résonance 627

Rétroaction 437
 Rotor 503

S

Scaling *Voir* Mise à l'échelle
 Schéma de principe 879
 Schockley, William 107
 Self-inductance *Voir* Inductance propre
 Sens du courant 83
 Séparation électrique 589, 595
 Séquence abc 505, 540
 Séquence acb 505, 540
 Séquence de phase 505, 540
 Séquence négative *Voir* Séquence acb
 Séquence positive *Voir* Séquence abc
 Série de Fourier 754, 772, 808
 Série exponentielle de Fourier 779, 780
 Série trigonométrique de Fourier 754
 Shunt 63, 76
 Signal à bande limitée 836, 845
 Signal modulé 833
 Signal périodique 776
 Signal porteur 833
 Sommateur *Voir* Amplificateur sommateur
 Source contrôlée *Voir* Source dépendante idéale
 Source d'alimentation 63
 Source dépendante idéale 15
 Source indépendante idéale 15
 Soustracteur *Voir* Amplificateur différentiel
 Spectre complexe d'amplitude 780
 Spectre complexe de phase 780
 Spectre d'amplitude 757, 761, 810
 Spectre de fréquence 757, 796
 Spectre de lignes 782
 Spectre de phase 757, 761, 810
 Spectre de puissance 781
 Stabilité du réseau 735
 Stator 503
 Steinmetz, Charles Proteus 375
 Suiveur de tension 184, 198
 Super-maille 97, 111, 417
 Super-nœud 89, 111, 414
 Susceptance 385
 Symétrie 762
 en demi-onde 766
 impaire 764
 simple (paire) 762
 Synthèse de réseau 738, 744
 Synthèse des réseaux en cascade 878, 883
 Système d'allumage automobile 351
 Système d'éclairage 58, 75

Système de communication 807, 833
 Système de contrôle 611, 735
 Système d'unités de mesure 4
 Système énergétique 455
 Système équilibré Y-Y 507
 Système équilibré Y- Δ 510
 Système équilibré Δ -Y 514
 Système équilibré Δ - Δ 513
 Système polyphasé 502
 Système triphasé 502, 504
 Système triphasé asymétrique 523, 541
 Système triphasé déséquilibré *Voir* Système triphasé asymétrique
 Système triphasé équilibré 503

T

Tamisage 265
 Téléphone à clavier 656, 660
 Temps de réponse du relais 294
 Tension *Voir* Différence de potentiel
 Tension auto-induite 595
 Tension continue 10
 Tension de ligne 508, 541
 Tension de ligne à ligne *Voir* Tension de ligne
 Tension de phase 504, 541
 Tension en circuit ouvert 146
 Tension induite 555, 595
 Tension induite mutuelle 595
 Tension variable 10
 Terme constant 618
 Terre *Voir* Masse
 Tesla, Nikola 368, 503
 Théorème de Cauchy 723
 Théorème d'échantillonnage 791
 Théorème de Fourier 755
 Théorème de Heaviside 689
 Théorème de la puissance maximale 150
 Théorème de la valeur finale 684
 Théorème de Norton 145, 160
 Théorème de Parseval 777, 781, 796, 808, 829, 838
 Théorème de superposition 419, 439
 Théorème de Thévenin 139, 160
 Train d'impulsions périodiques 781
 Traitement du signal 735, 833
 Transfert en tension 879
 Transfert maximal de puissance 150, 152, 160, 462, 463, 486
 Transformateur 554, 565, 595
 abaisseur de tension 572
 élévateur de tension 572
 Transformateur d'adaptation 592

Transformateur d'isolement électrique 572
 Transformateur idéal 571, 595
 Transformateur linéaire 565, 595
 Transformateurs à noyau d'air *Voir* Transformateur linéaire
 Transformateur triphasé 581, 593
 Transformation de source 135, 136, 160, 164, 422, 439, 715
 Transformation étoile - triangle 52, 54, 66
 Transformation intégrale 808
 Transformation triangle - étoile 53, 66
 Transformée bilatérale de Laplace 676
 Transformée de Fourier 808, 810, 837
 Transformée de Fourier discrète 785
 Transformée de Fourier rapide 786
 Transformée de Laplace 674, 675, 703, 705, 713, 735
 Transformée inverse de Fourier 810, 837
 Transformée unilatérale de Laplace *Voir* Transformée de Laplace
 Transistor 106
 Transistor à effet de champ 107
 Transistor à jonction bipolaire 107
 Translation en fréquence *Voir* Décalage en fréquence
 Triangle des puissances 472
 Tube cathodique 17, 310

U

Unité flash photographique 292, 297
 Unités SI *Voir* Système d'unités de mesure

V

Valeur efficace 465, 466, 486, 776, 796
 Valeur en dB 617
 Valeur finale 313, 337, 354, 683
 Valeur initiale 313, 354, 683
 Valeur r.m.s *Voir* Valeur efficace
 Variable d'état 728, 729, 743
 Variable du circuit 313
 Volt 10
 Volta, Alessandro Antonio 10
 Volt-ampère réactif (VAR) 472
 Voltmètre 61, 175
 Volt-ohm mètre *Voir* Multimètre

W

Wattmètre 480, 481, 487
Westinghouse, George 368
Wheatstone, Charles 158

Z

Zéro 613, 659
Zworykin, Vladimir K. 18

- Alexander
- Sadiku

Analyse des circuits électriques

Véritable référence, *Analyse des circuits électriques* part des principes fondamentaux pour atteindre des concepts plus avancés.

L'objectif de cet ouvrage est de présenter l'analyse des circuits électriques de manière claire, intéressante et facile à comprendre, et d'accompagner l'étudiant tout au long de ses études en électricité et en électronique, jusqu'au master.

Structuré en trois parties - circuits à courant continu, circuits à courant alternatif et analyse approfondie des circuits - ce volume rassemble l'essentiel des connaissances sur les éléments fondamentaux et avancés de l'analyse des circuits électriques. Il aborde notamment la notion d'amplificateur opérationnel, en tant qu'élément de base des circuits électriques modernes, ainsi que les transformées de Fourier et de Laplace.

L'accent est mis sur la résolution de situations concrètes en guidant l'étudiant à travers les lois, théorèmes et outils de travail modernes tels les logiciels spécialisés *PSpice* et *MATLAB*. Une méthodologie en 6 étapes pour résoudre les problèmes de circuit, présentée au chapitre 1, est utilisée tout au long du livre, offrant ainsi aux étudiants un excellent outil de travail.

Chaque chapitre est introduit par une discussion sur la manière de résoudre les différents problèmes posés, et de nombreux exemples viennent illustrer la théorie. En fin de chapitre, après un résumé des points importants, des problèmes et questions récapitulatives permettent à l'étudiant de vérifier les connaissances acquises.

Les traducteurs

Marius Dancila est ingénieur civil électromécanicien. Sa carrière professionnelle a été partagée entre la recherche et l'enseignement. Il est spécialiste en modernisation énergétique.

Dragos Dancila est ingénieur civil électricien et possède un doctorat de l'Université catholique de Louvain. Il est spécialiste en micro-électronique et en ingénierie micro-onde.

