

# ELECTRICAL ENGINEERING

Principles and Applications



Allan R. Hambley

Seventh Edition

P Pearson

# Liste d'exemples

## Chapitre 1

- 1.1 Détermination du courant en fonction de la charge 9 
- 1.2 Calculs de puissance 14 
- 1.3 Calcul de l'énergie 15 
- 1.4 Loi de Kirchhoff sur le courant 18 
- 1.5 Loi de tension de Kirchhoff 22 
- 1.6 Calcul de la résistance 29 
- 1.7 Détermination de la résistance pour des valeurs nominales de puissance et de tension données 31 
- 1.8 Analyse de circuit à l'aide de références arbitraires 33 
- 1.9 Utilisation de KVL, KCL et de la loi d'Ohm pour résoudre un circuit 34 

## Chapitre 2

- 2.1 Combinaison de résistances en série et en parallèle 49 
- 2.2 Analyse de circuit utilisant des équivalents série/parallèle 52 
- 2.3 Application du principe de division de tension 56 
- 2.4 Application des principes de division du courant et de la tension 57 
- 2.5 Application du principe de répartition actuelle 58 
- 2.6 Analyse de la tension des nœuds 63 
- 2.7 Analyse de la tension des nœuds 66 
- 2.8 Analyse de la tension des nœuds 68 
- 2.9 Analyse de la tension des nœuds 70 
- 2.10 Analyse de la tension des nœuds avec une source dépendante 74 
- 2.11 Analyse de la tension des nœuds avec une source dépendante 75 
- 2.12 Analyse de la tension des nœuds 76 
- 2.13 Analyse du courant de maillage 82 
- 2.14 Analyse du courant de maillage 83 
- 2.15 Écriture d'équations de maillage directement sous forme de matrice 85 
- 2.16 Analyse du courant de maillage avec des sources contrôlées 88 
- 2.17 Analyse du courant de maillage 89 
- 2.18 Détermination du circuit équivalent de Thévenin 92 
- 2.19 Mise à zéro des sources pour trouver la résistance de Thévenin 94 
- 2.20 Equivalent Thévenin d'un circuit avec une source dépendante 95 
- 2.21 Circuit équivalent Norton 97 
- 2.22 Utilisation des transformations de source 99 
- 2.23 Détermination du transfert de puissance maximal 102 
- 2.24 Analyse de circuit à l'aide de la superposition 106 
- 2.25 Utilisation d'un pont de Wheatstone pour mesurer la résistance 108 

## Chapitre 3

- 3.1 Détermination du courant pour une capacité donnée par la tension 130 
- 3.2 Détermination de la tension pour une capacité donnée par le courant 132 
- 3.3 Courant, puissance et énergie pour une capacité 134 
- 3.4 Capacités en série et en parallèle 137 
- 3.5 Calcul de la capacité en fonction des paramètres physiques 139 
- 3.6 Qu'est-il arrivé à l'énergie manquante ? 141 
- 3.7 Tension, puissance et énergie pour une inductance 145 
- 3.8 Courant d'inducteur avec tension appliquée constante 146 
- 3.9 Inductances en série et en parallèle 148 
- 3.10 Intégration et différenciation à l'aide de la boîte à outils symbolique MATLAB 154 

## Chapitre 4

- 4.1 Décharge de capacité à travers une résistance 170 
- 4.2 Premier ordre  $RCC$  circuit 172 
- 4.3 Analyse CC en régime permanent 174 
- 4.4  $RL$  Analyse transitoire 176 
- 4.5  $RL$  Analyse transitoire 178 
- 4.6 Analyse transitoire d'un  $RCC$  circuit avec une source sinusoïdale 183 
- 4.7 Analyse d'un circuit du second ordre avec une source CC 190 
- 4.8 Résolution assistée par ordinateur d'un circuit du premier ordre 199 
- 4.9 Résolution assistée par ordinateur d'un circuit du second ordre 201 
- 4.10 Résolution assistée par ordinateur d'un système d'équations différentielles 203 

## Chapitre 5

- 5.1 Puissance délivrée à une résistance par une source sinusoïdale 219 
- 5.2 Valeur RMS d'une tension triangulaire 220 
- 5.3 Utilisation de phaseurs pour ajouter des sinusoïdes 225 
- 5.4 Combinaison d'impédances en série et en parallèle 231 
- 5.5 Analyse du courant alternatif en régime permanent d'un circuit série 233 
- 5.6 Combinaisons en série et en parallèle d'impédances complexes 235 
- 5.7 Analyse de la tension de nœud CA en régime permanent 237 
- 5.8 Analyse du courant de maille CA en régime permanent 238 
- 5.9 Calculs de puissance CA 247 
- 5.10 Utilisation des triangles de puissance 249 
- 5.11 Correction du facteur de puissance 251 
- 5.12 Equivalents de Thévenin et Norton 253 
- 5.13 Transfert de puissance maximal 256 
- 5.14 Analyse d'un système Wye-Wye 264 
- 5.15 Analyse d'un système delta-delta équilibré 267 
- 5.16 Analyse du courant de maillage de phase avec MATLAB 272 

## Chapitre 6

- 6.1 Utilisation de la fonction de transfert pour déterminer la sortie 291 
- 6.2 Utilisation de la fonction de transfert avec plusieurs composants d'entrée 293 
- 6.3 Calcul de l'RC Sortie passe-bas 299 
- 6.4 Décibels et échelles de fréquence logarithmiques 305 
- 6.5 Détermination de la fréquence de coupure d'un filtre passe-haut 312 
- 6.6 Circuit résonant en série 317 
- 6.7 Circuit résonant parallèle 320 
- 6.8 Filtres idéaux en cascade 322 
- 6.9 Conception du filtre 327 
- 6.10 Diagramme de Bode généré par ordinateur 328 
- 6.11 Réponse indicielle d'un filtre passe-bas numérique du premier ordre 334 

## Chapitre 7

- 7.1 Conversion d'un entier décimal en binaire 360 
- 7.2 Conversion d'une fraction décimale en binaire 360 
- 7.3 Conversion de valeurs décimales en valeurs binaires 361 
- 7.4 Conversion de nombres binaires en nombres décimaux 361 
- 7.5 Addition de nombres binaires 361 
- 7.6 Conversion de nombres octaux en nombres décimaux 362 
- 7.7 Conversion de nombres hexadécimaux en nombres décimaux 362 
- 7.8 Conversion de nombres octaux et hexadécimaux en binaires 362 
- 7.9 Conversion de nombres binaires en octal ou en hexadécimal 363 
- 7.10 Soustraction à l'aide de l'arithmétique du complément à deux 366 
- 7.11 Utilisation d'une table de vérité pour prouver une expression booléenne 370 
- 7.12 Application des lois de De Morgan 373 
- 7.13 Conception de circuits logiques combinatoires 377 
- 7.14 Recherche de la forme SOP minimale pour une fonction logique 384 
- 7.15 Recherche de la forme POS minimale pour une fonction logique 385 

## Chapitre 8

- 8.1 Un programme en langage assembleur 431 
- 8.2 Programme d'assemblage de valeurs absolues 431 
- 8.3 Conversion manuelle du code source en code machine 432 
- 8.4 Code source de la sous-routine 433 
- 8.5 Chargement du capteur 437 
- 8.6 Spécifications pour un système de mesure informatisé 449 

## Chapitre 9

- 9.1 Analyse de la ligne de charge 464 
- 9.2 Analyse de la ligne de charge 465 
- 9.3 Analyse de la ligne de charge d'un régulateur de tension à diode Zener 467 
- 9.4 Analyse d'un régulateur à diode Zener avec une charge 468 
- 9.5 Analyse par états de diodes supposés 471 
- 9.6 Modèle linéaire par morceaux pour une diode Zener 473 
- 9.7 Analyse à l'aide d'un modèle linéaire par morceaux 474 

## Chapitre 10

- 10.1 Calcul des performances de l'amplificateur 508 
- 10.2 Calcul des performances des amplificateurs en cascade 510 
- 10.3 Modèle simplifié pour une cascade d'amplificateurs 511 

# Ingénierie électrique

*Principes et applications*

# Ingénierie électrique

*Principes et applications*

Septième édition

**Allan R. Hambley**

Département de génie électrique et informatique Université technologique du Michigan

[arhamble@mtu.edu](mailto:arhamble@mtu.edu)



330 Hudson Street, New York NY 10013

Vice-présidente et directrice de la rédaction, ECS : Marcia J. Horton

Rédacteur en chef : Julian Partridge

Gestionnaire de portefeuille : Julie Bai

Gestionnaire de portefeuille adjointe : Michelle

Bayman Responsable marketing exécutif : Tim

Galligan Directrice du marketing : Christy Lesko

Responsable marketing terrain : Demetrius Hall

Assistant marketing : Jon Bryant

Responsable de la production de contenu : Scott Disanno

Directrice mondiale de l'approvisionnement et des achats des fournisseurs de HE : Diane Hynes

Directeur des opérations : Nick Sklitsis Spécialiste des

opérations : Maura Zaldivar-Garcia Directrice de la

création : Blair Brown

Conception de la couverture : Black Horse Designs Image de

couverte : Chesky/Shutterstock Responsable, droits et

autorisations : Ben Ferrini Imprimeur de la couverture :

Phoenix Color/Hagerstown

Composition/Gestion de projet à service complet : SPI Global/Shylaja Gattupalli

MATLAB est une marque déposée de The MathWorks, Inc. Les noms de sociétés et de produits mentionnés ici sont les marques commerciales ou les marques déposées de leurs propriétaires respectifs.

**Droits d'auteur © 2018, 2014, 2011, 2008 par Pearson Education, Inc., Hoboken, New Jersey 07030.** Tous droits réservés. Fabriqué aux États-Unis d'Amérique. Cette publication est protégée par le droit d'auteur et les autorisations doivent être obtenues auprès de l'éditeur avant toute reproduction, stockage dans un système de récupération ou transmission interdite sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, mécanique, photocopie, enregistrement ou autre. Pour plus d'informations concernant les autorisations, écrivez à : Rights and Permissions Department, 221 River Street, Hoboken, NJ 07030.

L'auteur et l'éditeur de ce livre ont fait de leur mieux pour préparer ce livre. Ces efforts comprennent le développement, la recherche et les tests des théories et des programmes pour déterminer leur efficacité. L'auteur et l'éditeur ne donnent aucune garantie d'aucune sorte, expresse ou implicite, concernant ces programmes ou la documentation contenue dans ce livre. L'auteur et l'éditeur ne seront en aucun cas responsables des dommages accessoires ou indirects liés à la fourniture, à l'exécution ou à l'utilisation de ces programmes.

**Données de catalogage avant publication de la Bibliothèque du Congrès**

Noms : Hambley, Allan R., auteur.

Titre : Génie électrique : principes et applications / Allan R. Hambley. Description : Septième édition. | Hoboken : Pearson Education, 2016. | Comprend un index. Identifiants : LCCN 2016020630 | ISBN 9780134484143 | ISBN 0134484142 Sujets : LCSH : Génie électrique — Manuels scolaires.

Classification : LCC TK146 .H22 2016 | DDC 621.3—dc23

Enregistrement LC disponible à <https://lccn.loc.gov/2016020630>

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1



ISBN-10: 0-13-448414-2

ISBN-13 : 978-0-13-448414-3

À ma famille Judy, Tony, Pam et Mason et à mon amie spéciale, Carol

# Applications pratiques des principes de génie électrique



1.1 Utilisation de la résistance pour mesurer la déformation 30	
2.1 Un problème d'ingénierie important : les systèmes de stockage d'énergie pour les véhicules électriques	102
<b>3.1 Flash photo électronique 150</b>	
<b>4.1 L'électronique et l'art de l'entretien automobile 198</b>	
<b>6.1 Annulation active du bruit 296</b>	
<b>7.1 Application de l'électronique à l'ingénierie biomédicale : stimulateur cardiaque</b>	394
<b>8.1 Du pain frais, quelqu'un ? 416</b>	
<b>8.2 La ligne de premier essai virtuelle 445</b>	
<b>10.1 DéTECTEUR de montants électronique 541</b>	
<b>11.1 Où A fait Ces truites partent ? 585</b>	
<b>12.1 Améliorez votre automobile en changeant son logiciel ? 610</b>	
<b>13.1 Application mécanique de la rétroaction négative : direction assistée</b>	657
<b>15.1 Débitmètres magnétiques, Faraday et la chasse à Octobre rouge</b>	758

# Contenu

Applications pratiques des principes du génie électrique vi 

Préface xi 

1 Présentation 1 

    1.1 Aperçu de l'ingénierie électrique 2 

    1.2 Circuits, courants et tensions 6 

    1.3 Puissance et énergie 13 

    1.4 Loi de Kirchhoff sur le courant 16 

    1.5 Loi de tension de Kirchhoff 20 

    1.6 Introduction aux éléments du circuit 23 

    1.7 Introduction aux circuits Résulté 31 

        Problèmes 36 

2 circuits résistifs 46 

    2.1 Résistances en série et en parallèle 47 

    2.2 Analyse de réseau à l'aide d'équivalents en série et en parallèle 51 

    2.3 Circuits diviseurs de tension et de courant 55 

    2.4 Analyse de la tension des nœuds 60 

    2.5 Analyse du courant de maillage 80 

    2.6 Circuits équivalents de Thévenin et Norton 90 

    2.7 Principe de superposition 103 

    2.8 Pont de Wheatstone 107 

        Résumé 110 

        Problèmes 111 

3 Inductance et capacité 127 

    3.1 Capacité 128 

    3.2 Capacités en série et en parallèle 135 

    3.3 Caractéristiques physiques des condensateurs 138 

    3.4 Inductance 142 

    3.5 Inductances en série et en parallèle 147 

    3.6 Inducteurs pratiques 149 

    3.7 Inductance mutuelle 152 

    3.8 Intégration et différenciation symboliques à l'aide de MATLAB 153 

        Résumé 157 

        Problèmes 158 

4 Transitoires 167 

    4.1 Premier ordre RCCircuits 168 

    4.2 Régime permanent CC 173 

<b>4.3 RLC Circuits</b>	<b>175</b>		
<b>4.4 RC et RLC Circuits avec sources générales</b>	<b>180</b>		
<b>4.5 Circuits du second ordre</b>	<b>186</b>		
<b>4.6 Analyse transitoire à l'aide de la boîte à outils symbolique MATLAB</b>	<b>199</b>		
Résumé	<b>205</b>		
Problèmes	<b>205</b>		
<b>5 Analyse sinusoïdale en régime permanent</b>	<b>215</b>		
<b>5.1 Courants et tensions sinusoïdaux</b>	<b>216</b>		
<b>5.2 Phaseurs</b>	<b>222</b>		
<b>5.3 Impédances complexes</b>	<b>228</b>		
<b>5.4 Analyse de circuit avec des phaseurs et des impédances complexes</b>	<b>233</b>		
5.5 Puissance dans les circuits à courant alternatif	<b>239</b>		
<b>5.6 Circuits équivalents de Thévenin et Norton</b>	<b>252</b>		
<b>5.7 Circuits triphasés équilibrés</b>	<b>258</b>		
<b>5.8 Analyse AC à l'aide de MATLAB</b>	<b>270</b>		
Résumé	<b>274</b>		
Problèmes	<b>275</b>		
<b>6 Réponse en fréquence, diagrammes de Bode et résonance</b>	<b>287</b>		
<b>6.1 Analyse de Fourier, filtres et fonctions de transfert</b>	<b>288</b>		
<b>6.2 Filtres passe-bas du premier ordre</b>	<b>296</b>		
<b>6.3 Décibels, connexion en cascade et échelles de fréquence logarithmiques</b>		<b>301</b>	
6.4 Diagrammes de Bode	<b>306</b>		
6.5 Filtres passe-haut du premier ordre	<b>309</b>		
<b>6.6 Résonance en série</b>	<b>313</b>		
<b>6.7 Résonance parallèle</b>	<b>318</b>		
<b>6.8 Filtres idéaux et du second ordre</b>	<b>321</b>		
6.9 Diagrammes de Bode avec Matlab	<b>328</b>		
6.10 Résumé du traitement du signal	<b>331</b>		
numérique	<b>340</b>		
Problèmes	<b>341</b>		
<b>7 Circuits logiques</b>	<b>355</b>		
<b>7.1 Concepts de base des circuits logiques</b>	<b>356</b>		
<b>7.2 Représentation des données numériques sous forme binaire</b>	<b>359</b>		
<b>7.3 Circuits logiques combinatoires</b>	<b>367</b>		
<b>7.4 Synthèse des circuits logiques</b>	<b>375</b>		
<b>7.5 Minimisation des circuits logiques</b>	<b>381</b>		
<b>7.6 Résumé des circuits logiques</b>	<b>386</b>		
séquentiels	<b>397</b>		
Problèmes	<b>398</b>		
<b>8 Ordinateurs, microcontrôleurs et systèmes d'instrumentation assistés par ordinateur</b>		<b>408</b>	

<b>8.1 Organisation de l'ordinateur</b>	<b>409</b>
<b>8.2 Types de mémoire</b>	<b>412</b>
<b>8.3 Contrôle numérique des processus</b>	<b>414</b>
<b>8.4 Modèle de programmation pour la famille HCS12/9S12</b>	<b>417</b>
<b>8.5 Le jeu d'instructions et les modes d'adressage du processeur</b>	<b>421</b>
<b>8.6 Programmation en langage assembleur</b>	<b>430</b>
<b>8.7 Concepts de mesure et capteurs</b>	<b>435</b>
<b>8.8 Conditionnement du signal</b>	<b>440</b>
<b>8.9 Résumé de la conversion analogique-numérique</b>	<b>447</b>
<b>Problèmes</b>	<b>452</b>
<b>9 diodes</b>	<b>459</b>
<b>9.1 Concepts de base sur les diodes</b>	<b>460</b>
<b>9.2 Analyse de la ligne de charge des circuits à diodes</b>	<b>463</b>
<b>9.3 Circuits régulateurs de tension à diode Zener</b>	<b>466</b>
<b>9.4 Modèle de diode idéale</b>	<b>470</b>
<b>9.5 Modèles de diodes linéaires par morceaux</b>	<b>472</b>
<b>9.6 Circuits redresseurs</b>	<b>475</b>
<b>9.7 Circuits de mise en forme des ondes</b>	<b>480</b>
<b>9.8 Circuits équivalents linéaires à faible signal</b>	<b>485</b>
<b>Résumé</b>	<b>491</b>
<b>Problèmes</b>	<b>491</b>
<b>10 Amplificateurs : spécifications et caractéristiques externes</b>	<b>503</b>
<b>10.1 Concepts de base de l'amplificateur</b>	<b>504</b>
<b>10.2 Amplificateurs en cascade</b>	<b>509</b>
<b>10.3 Alimentations et efficacité</b>	<b>512</b>
<b>10.4 Modèles d'amplificateurs supplémentaires</b>	<b>515</b>
<b>10.5 Importance des impédances des amplificateurs dans diverses applications</b>	<b>518</b>
<b>10.6 Amplificateurs idéaux</b>	<b>521</b>
<b>10.7 Réponse en fréquence</b>	<b>522</b>
<b>10.8 Distorsion de forme d'onde linéaire</b>	<b>527</b>
<b>10.9 Réponse d'impulsion</b>	<b>531</b>
<b>10.10 Caractéristiques de transfert et distorsion non linéaire</b>	<b>534</b>
<b>10.11 Amplificateurs différentiels</b>	<b>536</b>
<b>10.12 Tension de décalage, courant de polarisation et résumé du courant de décalage</b>	<b>540</b>
<b>Problèmes</b>	<b>546</b>
<b>11 Transistors à effet de champ</b>	<b>557</b>
<b>11.1 Transistors NMOS et PMOS</b>	<b>558</b>
<b>11.2 Analyse de la ligne de charge d'un amplificateur NMOS simple</b>	<b>566</b>

11.3 Circuits de polarisation	568	
11.4 Circuits équivalents à faible signal	572	
11.5 Amplificateurs à source commune	576	
11.6 Abonnés à la source	580	
11.7 Résumé des portes logiques CMOS	590	
Problèmes	591	
<b>12 Transistors à jonction bipolaire</b>	<b>599</b>	
12.1 Relations entre courant et tension	600	
12.2 Caractéristiques de l'émetteur commun	603	
12.3 Analyse de la ligne de charge d'un amplificateur à émetteur commun	604	
12.4 <i>pnp</i> Transistors à jonction bipolaire	610	
12.5 Modèles de circuits CC à signal élevé	612	
12.6 Analyse CC à signal large des circuits BJT	615	
12.7 Circuits équivalents à faible signal	622	
12.8 Amplificateurs à émetteur commun	625	
12.9 Emetteurs suivreurs	630	
Résumé	636	
Problèmes	637	
<b>13 Amplificateurs opérationnels</b>	<b>646</b>	
13.1 Amplificateurs opérationnels idéaux	647	
13.2 Amplificateurs inverseurs	648	
13.3 Amplificateurs non inverseurs	655	
13.4 Conception d'amplificateurs simples	658	
13.5 Imperfections de l'amplificateur opérationnel dans la plage de fonctionnement linéaire	663	
13.6 Limitations non linéaires	667	
13.7 Imperfections DC	672	
13.8 Amplificateurs différentiels et d'instrumentation	676	
13.9 Intégrateurs et Différenciateurs	678	
13.10 Filtres actifs	681	
Résumé	685	
Problèmes	686	
<b>14 circuits magnétiques et transformateurs</b>	<b>698</b>	
14.1 Champs magnétiques	699	
14.2 Circuits magnétiques	708	
14.3 Inductance et inductance mutuelle	713	
14.4 Matériaux magnétiques	717	
14.5 Transformateurs idéaux	720	
14.6 Transformateurs réels	728	
Sommaire	733	

**Problèmes 733** 

**15 machines DC 744** 

15.1 Présentation des moteurs 745 

15.2 Principes des machines à courant continu 754 

15.3 Machines tournantes à courant continu 759 

15.4 Moteurs à courant continu à connexion shunt et à excitation séparée 765 

15.5 Moteurs à courant continu connectés en série 770 

15.6 Contrôle de la vitesse des moteurs à courant continu 774 

15.7 Générateurs CC 778 

Résumé 783 

Problèmes 784 

**16 machines à courant alternatif 794** 

16.1 Moteurs à induction triphasés 795 

16.2 Calculs de circuits équivalents et de performances pour les moteurs à induction 803 

16.3 Machines synchrones 812 

16.4 Moteurs monophasés 824 

16.5 Moteurs pas à pas et moteurs à courant continu sans balais Résumé 829 

Problèmes 830 

**ANNEXES**

**Un nombre complexe 836** 

Résumé 843 

Problèmes 843 

**B Valeurs nominales et code couleur des résistances 845** 

**C Les fondamentaux de l'examen d'ingénierie 847** 

**Réponses D pour les tests pratiques 848** 

**E Ressources en ligne pour les étudiants 857** 

**Index 858** 

## Préface

Comme dans les éditions précédentes, ma philosophie de base pour l'écriture de ce livre repose sur trois éléments. Le premier élément est ma conviction qu'à long terme, les étudiants ont intérêt à apprendre les concepts de base dans un cadre général. Deuxièmement, je crois que les étudiants doivent être motivés en voyant comment les principes s'appliquent à des problèmes spécifiques et intéressants dans leurs propres domaines. Le troisième élément de ma philosophie est de saisir toutes les occasions pour que l'apprentissage soit exempt de frustration pour l'étudiant.

Ce livre couvre l'analyse des circuits, les systèmes numériques, l'électronique et l'électromécanique à un niveau adapté aux étudiants en génie électrique dans un cours d'introduction ou aux non-spécialistes dans un cours d'enquête. Les seuls prérequis essentiels sont la physique de base et le calcul à variable unique. Enseigner un cours en utilisant ce livre offre des opportunités de développer des compétences et des expériences théoriques et expérimentales dans les domaines suivants :

- Analyse et mesure de circuits de base Transitoires de
- premier et de second ordre Circuits à courant alternatif
- en régime permanent
- Résonance et réponse en fréquence Circuits
- logiques numériques
- Microcontrôleurs
- Instrumentation assistée par ordinateur
- Circuits à diodes
- Amplificateurs électroniques
- Transistors à effet de champ et à jonction bipolaire
- Amplificateurs opérationnels
- Transformateurs
- Machines à courant alternatif et continu
- Analyse de circuits assistée par ordinateur avec MATLAB

Bien que l'accent soit mis sur les concepts de base, l'ouvrage comporte également de courts articles disséminés dans le livre, qui montrent comment les concepts de génie électrique sont appliqués dans d'autres domaines. Les sujets de ces articles comprennent le traitement du signal antidétonant pour les moteurs à combustion interne, un stimulateur cardiaque, le contrôle actif du bruit et l'utilisation d'étiquettes RFID dans la recherche halieutique, entre autres.

J'apprécie les commentaires des utilisateurs de ce livre. Les informations sur la manière dont le livre pourrait être amélioré sont particulièrement précieuses et seront prises en compte lors des révisions futures. Mon adresse e-mail est [starhamble@mtu.edu](mailto:starhamble@mtu.edu)

# your work...

PART A

Given:

- $I_S = 51.0 \text{ mA}$
- $R_1 = 54.0 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 51.0 \text{ k}\Omega$
- $L = 51.0 \text{ mH}$

Find:  
Initial current  $i(0^+)$   
before break switch

Assume when circuit is in Steady state, inductor acts as a short  $\rightarrow i = 51.0 \text{ mA}$

Use Kirchhoff's current law

$$I_S = i + i_R \quad V = iR$$

$$I_S = i + \frac{V}{R} \quad V = \frac{U}{R}$$

$$I_S = i + \frac{iR}{R_2}$$

$$I_S = i \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$\frac{I_S}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} = i$$

$$i = \frac{51.0 \text{ mA}}{\left(1 + \frac{54.0 \text{ k}\Omega}{51.0 \text{ k}\Omega}\right)} = 24.77 \text{ mA}$$

# your answer **specific feedback**

Express your answer to three significant figures and include the appropriate units.

$\mu\text{A}$

$i(0^-) = i(0^+) =$   mA

---

**Submit** [Hints](#) [My Answers](#) [Give Up](#) [Review Part](#)

Express your answer to three significant figures and include the appropriate units.

Submit
[Hints](#)
[My Answers](#)
[Give Up](#)
[Review Part](#)

$i(0^-) = i(0^+) = =$  24.7 mA

[www.MasteringEngineering<sup>®</sup>.com](http://www.MasteringEngineering.com)

## Ressources en ligne pour les étudiants

- **Maîtrise de l'ingénierie.** Les problèmes de devoirs du tutoriel imitent l'environnement de bureau de l'instructeur, guidant les étudiants à travers les concepts d'ingénierie avec un coaching individualisé à leur rythme. Ces problèmes de devoirs approfondis sont conçus pour encadrer les étudiants avec des commentaires spécifiques à leurs erreurs et des conseils facultatifs qui décomposent les problèmes en étapes plus simples. Les solutions vidéo et les activités de coaching fournissent également des solutions complètes, étape par étape, de problèmes de devoirs représentatifs de chaque chapitre. L'accès peut être acheté avec le manuel ou en ligne sur [www.masteringengineering.com](http://www.masteringengineering.com).
- Pearson eText, qui est une version en ligne complète du livre comprenant des fonctionnalités de surlignage, de prise de notes et de recherche, est également disponible via MasteringEngineering.
- **Site Web de ressources.** Un site Web en accès libre est disponible à l'adresse [www.pearsonhighered.com/ressources-d-ingénierie](http://www.pearsonhighered.com/ressources-d-ing%C3%A9nierie). Les ressources comprennent :
  - Un manuel de solutions pour les étudiants. Un fichier PDF pour chaque chapitre comprend les solutions complètes des exercices du chapitre, les réponses aux problèmes de fin de chapitre marqués d'un astérisque et les solutions complètes des tests pratiques.
  - Un dossier MATLAB qui contient les fichiers m décrits dans le livre.

## Ressources pour les instructeurs

Les ressources pour les instructeurs comprennent :

- **Maîtrise de l'ingénierie.** Ce programme de devoirs en ligne vous permet d'intégrer des devoirs dynamiques avec une notation automatique et des commentaires personnalisés. MasteringEngineering vous permet de suivre facilement les performances de l'ensemble de votre classe, devoir par devoir, ou le travail détaillé d'un élève en particulier.
- Un manuel de solutions complet pour l'instructeur Diapositives
- PowerPoint avec toutes les figures du livre

Les ressources destinées aux enseignants sont disponibles en téléchargement pour les utilisateurs de ce livre sur le site Web de Pearson Higher Education : [www.pearsonhighered.com](http://www.pearsonhighered.com) Si vous avez besoin d'un identifiant et d'un mot de passe, veuillez contacter votre représentant Pearson local.

## Quoi de neuf dans cette édition

- Nous avons continué et ajouté des éléments aux tests pratiques populaires que les étudiants peuvent utiliser pour se préparer aux examens de cours à la fin de chaque chapitre. Les réponses aux tests pratiques apparaissent dans **Annexe D** et des solutions complètes sont incluses dans les fichiers du manuel de solutions pour étudiants en ligne. De nouveaux exemples ont été ajoutés
- dans **Chapitres 1** à travers **7** pour cette édition.
- Environ la moitié des problèmes de fin de chapitre ont été remplacés ou modifiés.
- La couverture des ordinateurs, des microcontrôleurs et de l'instrumentation informatique a été fusionnée à partir de deux chapitres en **Chapitre 8** pour cette édition.
- **Annexe C** a été modifié pour suivre les nouveaux développements dans les fondamentaux de Examen d'ingénierie.
- Nous avons mis à jour la couverture de MATLAB et de la boîte à outils symbolique pour l'analyse de réseau dans **Chapitres 2** à travers **6**.
- Des corrections et améliorations relativement mineures apparaissent tout au long du livre.

## Prérequis

Les prérequis essentiels pour un cours de ce livre sont la physique de base et le calcul à variable unique. Un cours préalable sur les équations différentielles serait utile mais n'est pas indispensable. Les équations différentielles sont rencontrées dans [Chapitre 4](#) sur l'analyse transitoire, mais les compétences nécessaires sont développées à partir des bases du calcul.

### Caractéristiques pédagogiques

Le livre comprend diverses fonctionnalités pédagogiques conçues dans le but de stimuler l'intérêt des étudiants, d'éliminer la frustration et de susciter une prise de conscience de la pertinence du matériel par rapport à la profession qu'ils ont choisie. Ces fonctionnalités sont les suivantes :

- Des énoncés d'objectifs d'apprentissage ouvrent chaque chapitre.
- Les commentaires dans les marges soulignent et résument les points importants ou indiquent les pièges courants que les étudiants doivent éviter.
- De courts articles encadrés montrent comment les principes de l'électrotechnique sont appliqués dans d'autres domaines de l'ingénierie. Par exemple, voir les articles sur la suppression active du bruit ([page 296](#)) et les stimulateurs cardiaques électroniques (à partir de la [page 394](#)).
- Procédures de résolution de problèmes étape par étape. Par exemple, voir le résumé étape par étape de l'analyse de la tension des nœuds (pages 76 à 80) ou le résumé des équivalents de Thévenin ([page 252](#)).
- Un test pratique à la fin de chaque chapitre donne aux étudiants la possibilité de tester leurs connaissances. Les réponses apparaissent dans [Annexe D](#).
- Les solutions complètes des exercices du chapitre et des tests pratiques, incluses sous forme de fichiers PDF en ligne, renforcent la confiance des étudiants et indiquent où des études supplémentaires sont nécessaires.
- Les résumés des points importants à la fin de chaque chapitre fournissent des références aux étudiants. Les équations clés sont mises en évidence dans le livre pour attirer l'attention sur les résultats importants.

## Résultats dirigés par Abet

Les cours basés sur ce livre offrent d'excellentes occasions d'atteindre de nombreux objectifs d'accréditation. Les critères d'accréditation des programmes d'ingénierie exigent que les diplômés des programmes accrédités aient « la capacité d'appliquer leurs connaissances en mathématiques, en sciences et en ingénierie » et « la capacité d'identifier, de formuler et de résoudre des problèmes d'ingénierie ». Ce livre, dans son intégralité, vise à développer ces capacités.

De plus, les critères exigent « une capacité à fonctionner dans des équipes multidisciplinaires » et « une capacité à communiquer efficacement ». Les cours basés sur ce livre contribuent à ces capacités en donnant aux non-spécialistes les connaissances et le vocabulaire nécessaires pour communiquer efficacement avec les ingénieurs électriques. Le livre aide également à informer les ingénieurs électriques sur les applications dans d'autres domaines de l'ingénierie. Pour aider aux compétences en communication, des problèmes de fin de chapitre qui demandent aux étudiants d'expliquer les concepts de génie électrique dans leurs propres mots sont inclus.

## Contenu et organisation

## Analyse de circuit de base

**Chapitre 1** définit le courant, la tension, la puissance et l'énergie. Les lois de Kirchhoff sont introduites. Tension les sources, les sources de courant et la résistance sont définies.

**Chapitre 2** traite les circuits résistifs. L'analyse par réduction de réseau, tensions de nœuds et courants de maillage est couverts. Les équivalents de Thévenin, la superposition et le pont de Wheatstone sont traités.

La capacité, l'inductance et l'inductance mutuelle sont traitées dans**Chapitre 3**.

Les transitoires dans les circuits électriques sont abordés dans**Chapitre 4** les premiers ordres  $R$  et  $RC$  circuits et temps abordées, suivies d'une discussion sur les circuits du second ordre.

**Chapitre 5** considère le comportement du circuit sinusoïdal à l'état stable. (Une révision de l'arithmétique complexe est inclus dans**Annexe A** les calculs de puissance, équivalents alternatifs Thévenin et Norton, et équilibrés triphasés sont traités.

**Chapitre 6** couvre la réponse en fréquence, les diagrammes de Bode, la résonance, les filtres et le traitement du signal numérique.

Le concept de base de la théorie de Fourier (selon lequel les signaux sont composés de composantes sinusoïdales ayant différentes amplitudes, phases et fréquences) est discuté qualitativement.

## Systèmes numériques

**Chapitre 7** introduit les portes logiques et la représentation des données numériques sous forme binaire. Il aborde ensuite la logique combinatoire et séquentielle. L'algèbre booléenne, les lois de De Morgan, les tables de vérité, les cartes de Karnaugh, les codeurs, les décodeurs, les bascules et les registres sont abordés.

**Chapitre 8** traite des micro-ordinateurs en mettant l'accent sur les systèmes embarqués utilisant Freescale Le semi-conducteur HCS12/9S12 est le principal exemple. L'organisation de l'ordinateur et les types de mémoire sont abordés. Le contrôle de processus numérique à l'aide de microcontrôleurs est décrit en termes généraux. Des instructions sélectionnées et des modes d'adressage pour le CPU12 sont décrits. La programmation en langage assembleur est traitée très brièvement. Enfin, les systèmes d'instrumentation basés sur ordinateur, y compris les concepts de mesure, les capteurs, le conditionnement du signal et la conversion analogique-numérique sont abordés.

## Appareils et circuits électroniques

**Chapitre 9** présente la diode, ses différents modèles, l'analyse de la ligne de charge et les circuits à diodes, tels que redresseurs, régulateurs à diode Zener et faiseurs d'ondes.

Dans**Chapitre 10**, les spécifications et les imperfections des amplificateurs qui doivent être prises en compte dans Les applications sont présentées du point de vue de l'utilisateur. Il s'agit notamment du gain, de l'impédance d'entrée, de l'impédance de sortie, des effets de charge, de la réponse en fréquence, de la réponse impulsionnelle, de la distorsion non linéaire, du rejet en mode commun et des décalages CC.

**Chapitre 11** couvre le transistor à effet de champ MOS, ses courbes caractéristiques, l'analyse de la ligne de charge, les grandes modèles de signaux et de petits signaux, circuits de polarisation, amplificateur à source commune et suiveur de source.

**Chapitre 12** donne un traitement similaire pour les transistors bipolaires. Si vous le souhaitez, l'ordre de**Chapitres 11** et **12** peut être inversé. Une autre possibilité est de sauter la plupart des deux chapitres afin de pouvoir consacrer plus de temps à d'autres sujets.

**Chapitre 13** traite de l'amplificateur opérationnel et de plusieurs de ses applications. Les non-spécialistes peuvent en apprendre suffisamment à partir de ce chapitre, ils concevront et utiliseront des circuits d'amplificateurs opérationnels pour des applications d'instrumentation dans leurs propres domaines.

## Électromécanique

**Chapitre 14**  passe en revue la théorie de base du champ magnétique, analyse les circuits magnétiques et présente les transformateurs.

Les machines à courant continu et les machines à courant alternatif sont traitées dans **Chapitres 15**  et **16** , respectivement. L'accent est mis sur moteurs plutôt que des générateurs, car l'ingénieur non électricien utilise des moteurs beaucoup plus souvent que des générateurs. **Chapitre 15** , une vue d'ensemble des moteurs en général est présentée avant de considérer le courant continu machines, leurs circuits équivalents et calculs de performances. Le moteur universel et ses applications sont abordés.

**Chapitre 16**  traite des moteurs à courant alternatif, en commençant par le moteur à induction triphasé. Moteurs synchrones et leurs avantages en termes de correction du facteur de puissance sont analysés. Les petits moteurs, notamment les moteurs à induction monophasés, sont également abordés. Une section sur les moteurs pas à pas et les moteurs à courant continu sans balais termine le chapitre.

## Remerciements

Je tiens à remercier mes collègues du département de génie électrique et informatique de l'Université technologique du Michigan, qui m'ont tous apporté aide et encouragements à un moment ou à un autre dans la rédaction de ce livre et dans mes autres projets.

J'ai reçu de nombreux et excellents conseils de la part de professeurs d'autres institutions qui ont révisé le manuscrit à différentes étapes au fil des ans. Ces conseils ont grandement amélioré le résultat final et je leur suis reconnaissant de leur aide.

Les évaluateurs actuels et passés incluent :

Ibrahim Abdel-Motaled, Université Northwestern

William Best, Université Lehigh

Steven Bibyk, Université d'État de l'Ohio

DB Brumm, Université technologique du Michigan

Karen Butler-Purry, Université Texas A&M

Robert Collin, Université Case Western

Joseph A. Coppola, Université de Syracuse

Norman R. Cox, Université du Missouri à Rolla

WT Easter, Université d'État de Caroline du Nord

Zoran Gajic, Université Rutgers

Edwin L. Gerber, Université Drexel

Victor Gerez, Université d'État du Montana

Walter Green, Université du Tennessee

Elmer Grubbs, Université des hautes terres du Nouveau-Mexique

Jasmine Henry, Université d'Australie occidentale

Ian Hutchinson, MIT

David Klemer, Université du Wisconsin, Milwaukee

Richard S. Marleau, Université du Wisconsin

Sunanda Mitra, Université technologique du Texas

Phil Noe, Université A&M du Texas

Edgar A. O'Hair, Université Texas Tech

John Pavlat, Université d'État de l'Iowa

Clifford Pollock, Université Cornell

Michael Reed, Université Carnegie Mellon

Gerald F. Reid, Institut polytechnique de Virginie

Selahattin Sayil, Université Lamar

William Sayle II, Institut de technologie de Géorgie

Len Trombetta, Université de Houston

John Tyler, Université Texas A&M

Belinda B. Wang, Université de Toronto

Carl Wells, Université de l'État de Washington

Al Wicks, Virginia Tech

Edward Yang, Université de Columbia

Subbaraya Yuvarajan, Université d'État du Dakota du Nord

Rodger E. Ziemer, Université du Colorado, Colorado Springs

Au fil des ans, de nombreux étudiants et professeurs utilisant mes livres à la Michigan Technological University et ailleurs ont fait d'excellentes suggestions pour améliorer les livres et corriger les erreurs. Je les remercie beaucoup.

Je suis redevable à Julie Bai, mon éditrice actuelle et passée chez Pearson, pour m'avoir guidé dans la bonne direction et pour de nombreuses suggestions excellentes qui ont considérablement amélioré mes livres. Je tiens également à remercier tout particulièrement Scott Disanno pour son excellent travail de gestion de la production de cette édition et des éditions précédentes de ce livre.

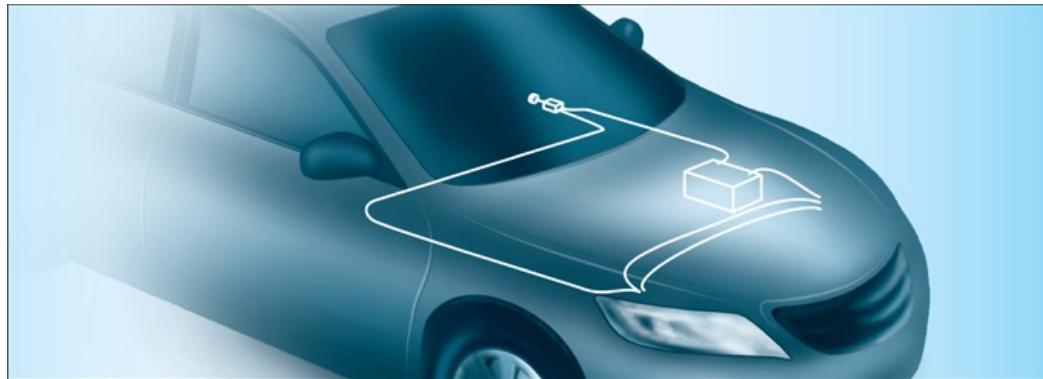
Je tiens également à remercier Tony, Pam et Mason pour leurs encouragements constants et leurs précieux conseils. Je remercie également Judy, ma défunte épouse, pour de nombreuses bonnes choses, bien trop longues à énumérer.

**Allan R. Hambley**

---

## Chapitre 1 Introduction

---



**L'étude de ce chapitre vous permettra de :**

- Reconnaître les interrelations entre le génie électrique et d'autres domaines de la science et de l'ingénierie.
- Énumérez les principaux sous-domaines du génie électrique.
- Énumérez plusieurs raisons importantes pour lesquelles il faut étudier l'électrotechnique.
- Définissez le courant, la tension et la puissance, ainsi que leurs unités.
- Calculez la puissance et l'énergie et déterminez si l'énergie est fournie ou absorbée par un élément du circuit.
- Énoncer et appliquer les lois de Kirchhoff sur le courant et la tension. Reconnaître les connexions série et parallèle.
- Identifier et décrire les caractéristiques des sources de tension et de courant.
- Énoncer et appliquer la loi d'Ohm.
- Résoudre les problèmes de courants, de tensions et de puissances dans des circuits simples.

### Introduction à ce chapitre :

*Dans ce chapitre, nous introduisons le génie électrique, définissons les variables du circuit (courant, tension, puissance et énergie), étudions les lois auxquelles ces variables du circuit obéissent et rencontrons plusieurs éléments du circuit (sources de courant, sources de tension et résistances).*

## 1.1 Aperçu de l'ingénierie électrique

Les ingénieurs électriciens conçoivent des systèmes qui ont deux objectifs principaux :

1. Rassembler, stocker, traiter, transporter et présenter *information*.
2. Distribuer, stocker et convertir *énergie* entre différentes formes.

Dans de nombreux systèmes électriques, la manipulation de l'énergie et la manipulation de l'information sont interdépendantes.

Par exemple, de nombreux aspects de l'électrotechnique liés à l'information sont appliqués aux prévisions météorologiques. Les données sur la nébulosité, les précipitations, la vitesse du vent, etc. sont recueillies électroniquement par des satellites météorologiques, des stations radar terrestres et des capteurs installés dans de nombreuses stations météorologiques. (Les capteurs sont des dispositifs qui convertissent les mesures physiques en signaux électriques.) Ces informations sont transportées par des systèmes de communication électroniques et traitées par des ordinateurs pour produire des prévisions qui sont diffusées et affichées électroniquement.

Dans les centrales électriques, l'énergie provenant de diverses sources est convertie en électricité. Les systèmes de distribution électrique transportent l'énergie vers pratiquement toutes les usines, maisons et entreprises du monde, où elle est convertie en une multitude de formes utiles, telles que l'énergie mécanique, la chaleur et la lumière.

Vous pouvez sans doute énumérer des dizaines d'applications de génie électrique dans votre vie quotidienne. De plus en plus de fonctionnalités électriques et électroniques sont intégrées dans de nouveaux produits. Les automobiles et les camions ne sont qu'un exemple de cette tendance. Le contenu électronique d'une automobile moyenne prend rapidement de la valeur. Les véhicules autonomes se développent rapidement et deviendront éventuellement la norme. Les concepteurs automobiles se rendent compte que la technologie électronique est un bon moyen d'offrir des fonctionnalités accrues à moindre coût. **Tableau 1.1** quelques applications de l'électrotechnique dans l'automobile.



**Tableau 1.1 Applications électroniques/électriques actuelles et émergentes dans les automobiles et les camions**

Sécurité
Freins antidérapants
Dispositifs de retenue gonflables
Avertissement et évitement de collision
Détection de véhicule dans les angles morts (en particulier pour les gros camions)
Systèmes de vision nocturne infrarouge
Affichage tête haute
Notification automatique d'accident
Caméras de recul
Communications et divertissement
Radio AM/FM
Diffusion audio numérique

Lecteur CD/DVD
Téléphone cellulaire
Ordinateur/e-mail
Radio par satellite
<b>Commodité</b>
Navigation GPS électronique
Réglages personnalisés du siège/rétroviseur/radio
Serrures de porte électroniques
Émissions, performances et économie de carburant
Instrumentation du véhicule
Allumage électronique
Capteurs de gonflage des pneus
Évaluation informatisée des performances et planification de la maintenance
Systèmes de suspension adaptables
Systèmes de propulsion alternatifs
Véhicules électriques
Batteries avancées
Véhicules hybrides

À titre d'exemple, nous notons que de nombreux appareils électroménagers courants contiennent des claviers ou des écrans tactiles pour le contrôle de l'opérateur, des capteurs, des écrans électroniques et des puces informatiques, ainsi que des commutateurs, des éléments chauffants et des moteurs plus conventionnels. L'électronique est devenue si intimement intégrée aux systèmes mécaniques que le nom **mécatronique** est utilisé pour la combinaison.

Vous trouverez peut-être intéressant de rechercher sur le Web des sites liés à la « mécatronique ».

## Subdivisions du génie électrique

Ensuite, nous vous donnons une vue d'ensemble de l'ingénierie électrique en énumérant et en discutant brièvement huit de ses principaux domaines.

Les ordinateurs qui font partie de produits tels que les appareils électroménagers et les automobiles sont appelés *ordinateurs embarqués*.

**1. Systèmes de communication** Les systèmes de communication permettent de transmettre des informations sous forme électrique. Le

téléphone portable, la radio, la télévision par satellite et Internet sont des exemples de systèmes de communication. Il est possible pour pratiquement deux personnes (ou ordinateurs) sur la planète de communiquer presque instantanément. Un alpiniste au sommet d'une montagne au Népal peut appeler ou envoyer des e-mails à ses amis, qu'ils soient en randonnée en Alaska ou assis dans un bureau à New York. Ce type de connectivité affecte notre façon de vivre, la façon dont nous menons nos affaires et la conception de tout ce que nous utilisons. Par exemple, les systèmes de communication vont modifier la conception des autoroutes, car les informations sur le trafic et l'état des routes collectées par des capteurs routiers peuvent être transmises à des emplacements centraux et utilisées pour orienter le trafic. En cas d'accident, un signal électrique peut être émis automatiquement lorsque les airbags se déploient, donnant l'emplacement exact du véhicule, appelant à l'aide et avertissant les ordinateurs de contrôle du trafic.

**2. Ordinateur** Traiter et stocker des informations sous forme numérique. Vous avez sans doute déjà rencontré des

applications informatiques dans votre domaine. Outre les ordinateurs que vous connaissez, il en existe de nombreux dans des domaines peu connus, comme les appareils électroménagers et les automobiles. Une automobile moderne typique contient plusieurs dizaines d'ordinateurs spécialisés. Les processus chimiques et les gares de triage ferroviaires sont couramment contrôlés par des ordinateurs.

**3. Systèmes de contrôle** Les capteurs recueillent des informations et utilisent l'énergie électrique pour contrôler un processus physique.

Le système de chauffage/refroidissement d'une résidence est un système de contrôle relativement simple. Un capteur (thermostat) compare la température à la valeur souhaitée. Des circuits de contrôle actionnent le four ou le climatiseur pour atteindre la température souhaitée. Dans le laminage de tôles d'acier, un système de contrôle électrique est utilisé pour obtenir l'épaisseur de tôle souhaitée. Si la tôle est trop épaisse (ou trop fine), une force plus (ou moins) est appliquée aux rouleaux. Les températures et les débits dans les processus chimiques sont contrôlés de manière similaire. Des systèmes de contrôle ont même été installés dans des immeubles de grande hauteur pour réduire leur mouvement dû au vent.

**4. Électromagnétisme** L'électromagnétron est l'étude et l'application des champs électriques et magnétiques. L'appareil (connu sous le nom de magnétron) utilisé pour produire de l'énergie micro-onde dans un four en est une application. Des appareils similaires, mais avec des

niveaux de puissance beaucoup plus élevés, sont utilisés dans la fabrication de feuilles de contreplaqué. Les champs électromagnétiques chauffent la colle entre les couches de bois pour qu'elle durcisse rapidement. Les antennes de téléphone portable et de télévision sont également des exemples d'appareils électromagnétiques.

**5. Electronique** L'électro-aimant est l'étude et l'application des matériaux, des dispositifs et des circuits utilisés pour amplifier et

commuter les signaux électriques. Les dispositifs électroniques les plus importants sont les transistors de divers types. Ils sont utilisés dans presque tous les endroits où l'information ou l'énergie électrique est utilisée. Par exemple, le stimulateur cardiaque est un circuit électronique qui détecte les battements du cœur et, si un battement ne se produit pas au moment où il le devrait, applique un stimulus électrique minuscule au cœur, forçant un battement. L'instrumentation électronique et les capteurs électriques se retrouvent dans tous les domaines de la science et de l'ingénierie. De nombreux aspects des amplificateurs électroniques étudiés plus loin dans ce livre ont une application directe à l'instrumentation utilisée dans votre domaine d'ingénierie.

Les appareils électroniques sont basés sur le contrôle des électrons. Les appareils photoniques remplissent des fonctions similaires en contrôlant les photons.

**6. Photonique** La photonique est un nouveau domaine passionnant de la science et de l'ingénierie qui promet de remplacer les

dispositifs conventionnels de calcul, de traitement du signal, de détection et de communication basés sur la manipulation d'électrons par des produits grandement améliorés basés sur la manipulation de photons. La photonique comprend la génération de lumière par des lasers et des diodes électroluminescentes, la transmission de lumière par des composants optiques, ainsi que la commutation, la modulation, l'amplification, la détection et le guidage de la lumière par des dispositifs électriques, acoustiques et à base de photons. Les applications actuelles comprennent les lecteurs de disques DVD, les hologrammes, les processeurs de signaux optiques et les systèmes de communication à fibre optique. Les applications futures comprennent les ordinateurs optiques, les mémoires holographiques et les appareils médicaux. La photonique offre d'énormes opportunités à presque tous les scientifiques et ingénieurs.

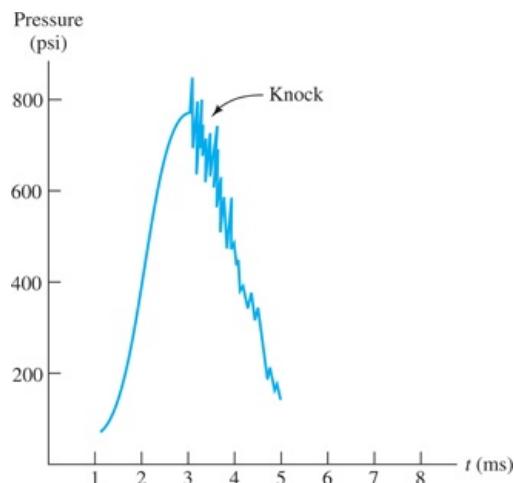
**7.Systèmes d'alimentation** Les moteurs électriques convertissent l'énergie en et depuis une forme électrique et transmettent l'énergie sur de longues distances. Ces systèmes sont composés de générateurs, de transformateurs, de lignes de distribution, de moteurs et d'autres éléments. Les ingénieurs mécaniciens utilisent souvent des moteurs électriques pour renforcer leurs conceptions. La sélection d'un moteur ayant la caractéristique de couple-vitesse appropriée pour une application mécanique donnée est un autre exemple de la façon dont vous pouvez appliquer les informations contenues dans ce livre.

**8.Traitement du signal** Le traitement du signal est lié aux signaux électriques porteurs d'informations. L'objectif est souvent d'extraire des informations utiles à partir de signaux électriques dérivés de capteurs. Une application est la vision artificielle pour les robots dans la fabrication. Une autre application du traitement du signal est le contrôle des systèmes d'allumage des moteurs à combustion interne. Le moment de l'étincelle d'allumage est essentiel pour obtenir de bonnes performances et de faibles niveaux de polluants. Le point d'allumage optimal par rapport à la rotation du vilebrequin dépend de la qualité du carburant, de la température de l'air, du réglage de l'accélérateur, du régime du moteur et d'autres facteurs.

Si le point d'allumage est légèrement avancé au-delà du point de performance optimale, *cognement du moteur* se produit. Le cognement peut être entendu comme un bruit métallique aigu qui est causé par des fluctuations rapides de pression pendant la libération spontanée d'énergie chimique dans la chambre de combustion. Une impulsion de pression de chambre de combustion affichant un cognement est représentée dans **Figure 1.1**

À des niveaux élevés, le cliquetis détruira un moteur dans un très court laps de temps.

Avant l'avènement de l'électronique de traitement de signal pratique pour cette application, le calage du moteur devait être ajusté pour des performances nettement inférieures à l'optimum afin d'éviter les cognements dans différentes combinaisons de conditions de fonctionnement.



**Figure 1.1**

Pression en fonction du temps pour un moteur à combustion interne qui subit des cognements. Les capteurs convertissent la pression en un signal électrique qui est traité pour ajuster le calage de l'allumage afin de minimiser la pollution et d'obtenir de bonnes performances.

En connectant un capteur à la chambre de combustion par l'intermédiaire d'un tube, on obtient un signal électrique proportionnel à la pression. Des circuits électroniques traitent ce signal pour déterminer si les fluctuations rapides de pression caractéristiques du cliquetis sont présentes. Les circuits électroniques ajustent ensuite en continu le calage de l'allumage pour des performances optimales tout en évitant le cliquetis.

## Pourquoi vous devez étudier le génie électrique

En tant que lecteur de ce livre, vous vous spécialisez peut-être dans un autre domaine de l'ingénierie ou des sciences et suivez un cours obligatoire en génie électrique. Votre objectif immédiat est probablement de satisfaire aux exigences du cours pour un diplôme dans le domaine que vous avez choisi. Cependant, il existe plusieurs autres bonnes raisons d'apprendre et de conserver certaines connaissances de base en génie électrique :

### **1. Réussir l'examen Fondamentaux de l'ingénierie (FE) comme première étape pour devenir un ingénieur professionnel agréé.**

Aux États-Unis, avant de fournir des services d'ingénierie au public, vous devrez vous inscrire en tant qu'ingénieur professionnel (PE). Ce livre vous donne les connaissances nécessaires pour répondre aux questions relatives à l'ingénierie électrique lors des examens d'inscription. Conservez ce livre et les notes de cours pour les réviser en vue de l'examen FE. (Voir [Annexe C](#))

 (pour en savoir plus sur l'examen FE.)

Conservez ce livre et les notes de cours pour les réviser en vue de l'examen FE.

### **2. Avoir une base de connaissances suffisamment large pour pouvoir mener des projets de conception dans votre propre domaine.**

De plus en plus, l'électrotechnique est étroitement liée à presque toutes les expériences scientifiques et projets de conception dans d'autres domaines de l'ingénierie. L'industrie a régulièrement fait appel à des ingénieurs capables de voir les choses dans leur ensemble et de travailler efficacement en équipe. Les ingénieurs ou les scientifiques qui se concentrent strictement sur leur propre domaine sont voués à être dirigés par d'autres. (Les ingénieurs électriciens ont un peu de chance à cet égard, car les bases des structures, des mécanismes et des processus chimiques leur sont familières dans la vie de tous les jours. En revanche, les concepts d'électrotechnique sont un peu plus abstraits et cachés à l'observateur occasionnel.)

### **3. Être capable d'exploiter et d'entretenir des systèmes électriques, tels que ceux que l'on retrouve dans les systèmes de contrôle des processus de fabrication.**

La grande majorité des dysfonctionnements des circuits électriques peuvent être facilement résolus par l'application des principes de base de l'électrotechnique. Vous serez un ingénieur ou un scientifique beaucoup plus polyvalent et précieux si vous pouvez appliquer les principes de l'électrotechnique dans des situations pratiques.

### **4. Être capable de communiquer avec des consultants en génie électrique.**

Il est fort probable que vous soyez amené à travailler en étroite collaboration avec des ingénieurs électriciens au cours de votre carrière. Ce livre vous donnera les connaissances de base nécessaires pour communiquer efficacement.

## Contenu de ce livre

L'ingénierie électrique est trop vaste pour être abordée en un ou deux cours. Notre objectif est de vous présenter les concepts sous-jacents dont vous aurez probablement le plus besoin. La théorie des circuits est l'outil fondamental de l'ingénieur électricien. C'est pourquoi les six premiers chapitres de ce livre sont consacrés aux circuits.

La théorie des circuits est l'outil fondamental de l'ingénieur électricien.

Les ordinateurs, capteurs et circuits électroniques intégrés constitueront une part de plus en plus importante des produits que vous concevez et de l'instrumentation que vous utilisez en tant qu'ingénieur ou scientifique. **Chapitres 7** traiter les systèmes  et  numériques en mettant l'accent sur les ordinateurs embarqués et l'instrumentation. **Chapitres 9 à 13**  à travers  s'occuper des appareils et des circuits électroniques.

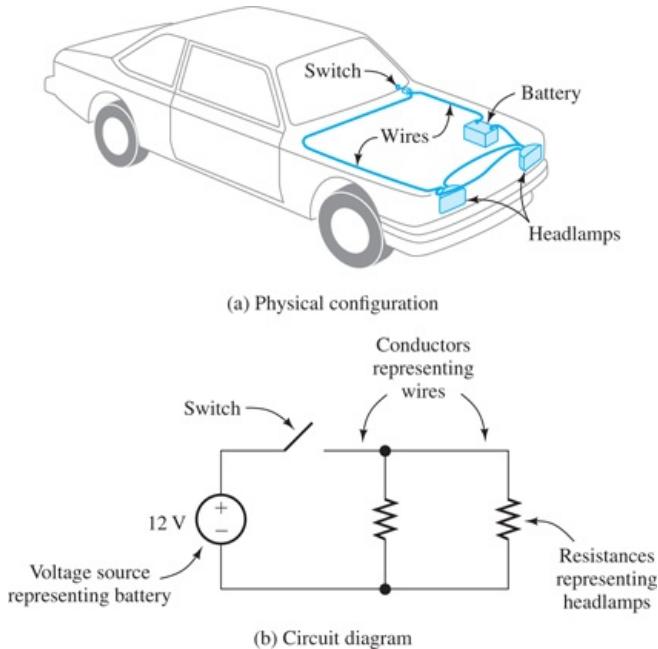
En tant qu'ingénieur mécanique, chimiste, civil, industriel ou autre, vous aurez très probablement besoin d'utiliser des dispositifs de conversion d'énergie. Les trois derniers chapitres concernent les systèmes d'énergie électrique traitant des transformateurs, des générateurs et des moteurs.

Comme ce livre couvre de nombreux concepts de base, il est également parfois utilisé dans les cours d'introduction destinés aux ingénieurs électriciens. Tout comme il est important pour les autres ingénieurs et scientifiques de voir comment l'ingénierie électrique peut être appliquée à leurs domaines, il est tout aussi important pour les ingénieurs électriciens de se familiariser avec ces applications.

## 1.2 Circuits, courants et tensions

### Aperçu d'un circuit électrique

Avant de définir soigneusement la terminologie des circuits électriques, acquérons quelques connaissances de base en considérant un exemple simple : le circuit des phares d'une automobile. Ce circuit se compose d'une batterie, d'un interrupteur, des phares et de fils les reliant dans un chemin fermé, comme illustré dans [Figure 1.2](#).



**Figure 1.2**

Le circuit des phares. (a) La disposition physique réelle du circuit. (b) Le schéma du circuit.

Les forces chimiques présentes dans la batterie provoquent la circulation d'une charge électrique (électrons) dans le circuit. La charge tire son énergie des produits chimiques présents dans la batterie et fournit de l'énergie aux phares. La tension de la batterie (nominale, 12 volts) est une mesure de l'énergie gagnée par une unité de charge lorsqu'elle se déplace dans la batterie.

La tension de la batterie est une mesure de l'énergie gagnée par une unité de charge lorsqu'elle se déplace dans la batterie.

Les fils sont constitués d'un excellent conducteur électrique (cuivre) et sont isolés les uns des autres (et de la carrosserie métallique) par un revêtement isolant électrique (plastique) recouvrant les fils. Les électrons se déplacent facilement à travers le cuivre mais pas à travers l'isolation en plastique. Ainsi, le flux de charge (courant électrique) est confiné aux fils jusqu'à ce qu'il atteigne les phares. L'air est également un isolant.

Les électrons se déplacent facilement à travers le cuivre, mais pas à travers l'isolation en plastique.

L'interrupteur est utilisé pour contrôler le flux de courant. Lorsque les parties métalliques conductrices de l'interrupteur entrent en contact, on dit que l'interrupteur est **fermé** commutateur et le courant circule à travers le circuit. D'autre part,

lorsque les parties conductrices de l'interrupteur n'entrent pas en contact, on dit que l'interrupteur est **ouvert** et le courant ne passe pas.

Les électrons entrent en collision avec les atomes des fils de tungstène, ce qui entraîne un échauffement du tungstène.

Les phares contiennent des fils de tungstène spéciaux qui peuvent supporter des températures élevées. Le tungstène n'est pas un aussi bon conducteur électrique que le cuivre, et les électrons entrent en collision avec les atomes des fils de tungstène, ce qui entraîne un échauffement du tungstène. On dit que les fils de tungstène ont une résistance électrique. Ainsi, l'énergie est transférée par l'action chimique de la batterie aux électrons puis au tungstène, où elle apparaît sous forme de chaleur. Le tungstène devient suffisamment chaud pour qu'une lumière abondante soit émise. Nous verrons que la puissance transférée est égale au produit du courant (taux de flux de charge) et de la tension (également appelée potentiel électrique) appliquée par la batterie.

L'énergie est transférée par l'action chimique de la batterie aux électrons puis au tungstène.

(En fait, la description simple du circuit des phares que nous avons donnée est plus appropriée pour les voitures plus anciennes. Dans les automobiles plus modernes, des diodes électroluminescentes (LED) sont utilisées à la place des filaments de tungstène. De plus, des capteurs fournissent des informations à un ordinateur intégré sur le niveau de lumière ambiante, si le contact est activé ou non et si la transmission est en position de stationnement ou de marche avant. Le commutateur du tableau de bord envoie simplement un niveau logique à l'ordinateur, indiquant l'intention de l'opérateur concernant les phares. En fonction de ces entrées, l'ordinateur contrôle l'état d'un commutateur électronique dans le circuit des phares. Lorsque le contact est coupé et s'il fait sombre, l'ordinateur garde les lumières allumées pendant quelques minutes pour que les passagers puissent voir pour sortir, puis les éteint pour économiser l'énergie de la batterie. Cela est typique de la tendance à utiliser une technologie électronique et informatique très sophistiquée pour améliorer les capacités des nouvelles conceptions dans tous les domaines de l'ingénierie.)

#### Analogie fluide-écoulement

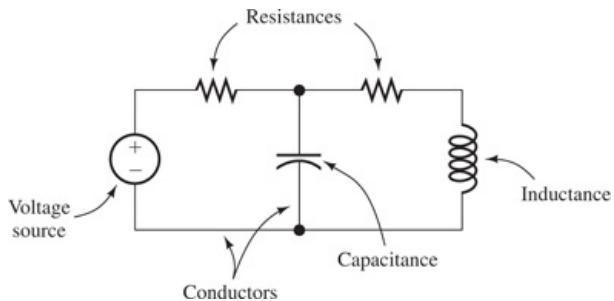
Les circuits électriques sont analogues aux systèmes à écoulement de fluides. La batterie est analogue à une pompe et la charge est analogue au fluide. Les conducteurs (généralement des fils de cuivre) correspondent à des tuyaux sans frottement à travers lesquels le fluide s'écoule. Le courant électrique est la contrepartie du débit du fluide. La tension correspond à la différence de pression entre les points du circuit de fluide. Les interrupteurs sont analogues aux valves. Enfin, la résistance électrique d'un phare au tungstène est analogue à une constriction dans un système de fluide qui entraîne des turbulences et une conversion d'énergie en chaleur. Notez que le courant est une mesure du flux de charge *à travers* la section transversale d'un élément de circuit, tandis que la tension est mesurée *à travers* les extrémités d'un élément de circuit ou *entre* deux autres points d'un circuit.

L'analogie de l'écoulement d'un fluide peut être très utile au départ pour comprendre les circuits électriques.

Maintenant que nous avons acquis une compréhension de base d'un circuit électrique simple, nous allons définir plus soigneusement les concepts et la terminologie.

## Circuits électriques

Un circuit électrique se compose de divers types d'éléments de circuit connectés en chemins fermés par des conducteurs. Un exemple est illustré dans **Figure 1.3**. Les éléments du circuit peuvent être des résistances, inductances, capacités et sources de tension, entre autres. Les symboles de certains de ces éléments sont illustrés dans la figure. Nous discuterons ensuite en détail des caractéristiques de chaque type d'élément.



**Figure 1.3**

Un circuit électrique est constitué d'éléments de circuit, tels que des sources de tension, des résistances, des inductances et des capacités, connectés en chemins fermés par des conducteurs.

Un circuit électrique est constitué de différents types d'éléments de circuit reliés en chemins fermés par des conducteurs.

La charge circule facilement à travers les conducteurs, représentés par des lignes reliant les éléments du circuit. Les conducteurs correspondent aux fils de connexion dans les circuits physiques. Les sources de tension créent des forces qui provoquent le passage de la charge à travers les conducteurs et les autres éléments du circuit. En conséquence, l'énergie est transférée entre les éléments du circuit, ce qui permet une fonction utile.

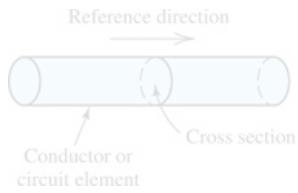
La charge circule facilement à travers les conducteurs.

## Courant électrique

Le courant électrique est le taux de flux de charge électrique à travers un conducteur ou un élément de circuit. Les unités sont les ampères (A), qui sont équivalents aux coulombs par seconde (C/s). (La charge d'un électron est  $-1,602 \times 10^{-19} C$ .)

Le courant est la vitesse à laquelle circule la charge électrique dans le temps. Son unité est l'ampère (A), qui équivaut au coulomb par seconde (C/s).

Conceptuellement, pour trouver le courant pour un élément de circuit donné, nous sélectionnons d'abord une section transversale de l'élément de circuit à peu près perpendiculaire au flux de courant. Ensuite, nous sélectionnons **undirection de référence** dans le sens de l'écoulement. Ainsi, la direction de référence pointe d'un côté à l'autre de la section transversale. Ceci est illustré dans **Figure 1.4**.



**Figure 1.4**

Le courant est la vitesse à laquelle une charge s'écoule à travers une section transversale d'un conducteur ou d'un élément de circuit.

Ensuite, supposons que nous gardions un enregistrement du flux de charge nette à travers la section transversale. Une charge positive traversant dans la direction de référence est comptée comme une contribution positive à la charge nette. Une charge positive traversant dans la direction opposée à la référence est comptée comme une contribution négative. De plus, une charge négative traversant dans la direction de référence est comptée comme une contribution négative, et une charge négative dans la direction opposée à la direction de référence est une contribution positive à la charge.

Ainsi, en théorie, nous obtenons un enregistrement de la charge nette en coulombs en fonction du temps en secondes, noté comme  $q(t)$ . Le courant électrique traversant l'élément dans la direction de référence est donné par

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

Des ombrages colorés sont utilisés pour indiquer les équations clés tout au long de ce livre.

Un courant constant d'un ampère signifie qu'un coulomb de charge traverse la section transversale chaque seconde.

Pour trouver la charge en fonction du courant, nous devons intégrer. Ainsi, nous avons

$$q(t) = \int_{t_0}^t j_e(t) dt + q(t_0) \quad (1.2)$$

dans lequel  $t_0$  est un instant initial auquel la charge est connue. (Tout au long de ce livre, nous supposons que le temps  $t$  est en secondes sauf indication contraire.)

Le flux de courant est le même pour toutes les sections transversales d'un élément de circuit. (Nous réexaminons cette affirmation lorsque nous introduisons le condensateur dans [Chapitre 3](#).) Le courant qui entre par une extrémité traverse l'élément et sort par l'autre extrémité.

### Exemple 1.1 Détermination du courant en fonction de la charge

Supposons que la charge en fonction du temps pour un élément de circuit donné soit donnée par

$$q(t) = 0 \text{ pour } t < 0$$

et

$$q(t) = 2 - 2e^{-100t} \text{ pour } t > 0$$

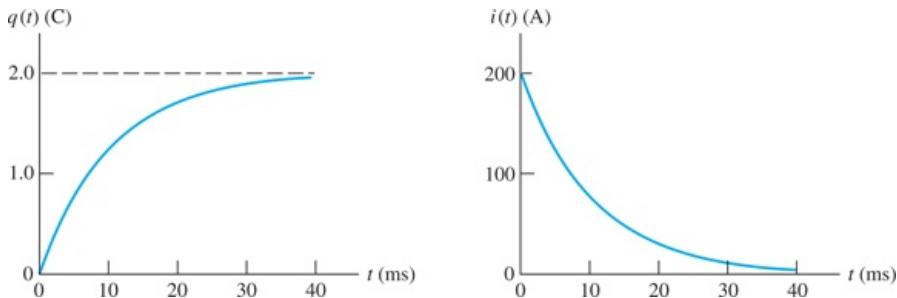
Esquisser  $q(t)$  et  $e(t)$  à l'échelle en fonction du temps.

Solution

Nous utilisons d'abord [Équation 1.1](#) pour trouver une expression pour le courant :

$$\begin{aligned} ie(t) &= \frac{dq(t)}{dt} \\ &= 0 \quad \text{pour } t < 0 \\ &= 200e^{-100t} \text{ A} \quad \text{pour } t > 0 \end{aligned}$$

Parcelles de  $q(t)$  et  $ie(t)$  sont affichés dans [Figure 1.5](#).



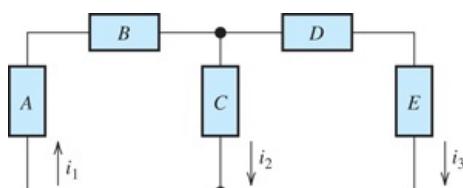
**Figure 1.5**

Graphiques de charge et de courant en fonction du temps pour [Exemple 1.1](#).

**Note:** L'échelle de temps est en millisecondes (ms). Une milliseconde équivaut à  $10^{-3}$  secondes.

Instructions de référence

Lors de l'analyse des circuits électriques, nous ne connaissons peut-être pas initialement la direction actuelle du flux de courant dans un élément de circuit particulier. Par conséquent, nous commençons par attribuer des variables de courant et en sélectionnant arbitrairement une direction de référence pour chaque courant d'intérêt. Il est d'usage d'utiliser la lettre  $i$  pour les courants et les indices pour distinguer les différents courants. Ceci est illustré par l'exemple de [Figure 1.6](#), dans lequel les cases étiquetées  $A, B, C, D, E$ , et ainsi de suite représentent les éléments du circuit. Après avoir résolu les valeurs de courant, nous pouvons constater que certains courants ont des valeurs négatives. Par exemple, supposons que  $i_1 = -2$  A dans le circuit de [Figure 1.6](#). Parce que  $i_1$  a une valeur négative, nous savons que le courant circule en réalité dans le sens opposé à la référence initialement sélectionnée pour  $i_1$ . Ainsi, le courant réel est de 2 A circulant vers le bas à travers l'élément  $A$ .



**Figure 1.6**

Lors de l'analyse des circuits, nous commençons souvent par attribuer des variables de courant  $i_1, i_2, i_3$ , et ainsi de suite.

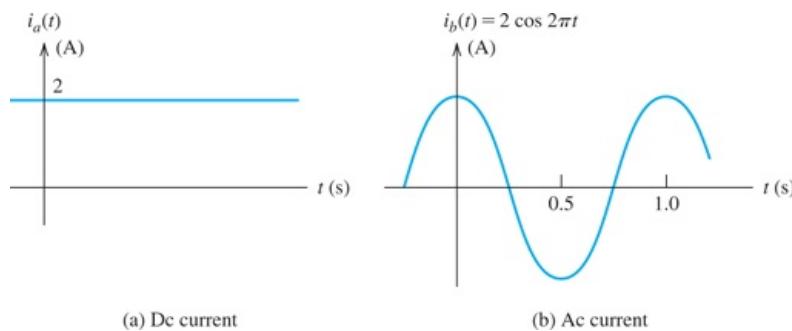
## Courant continu et courant alternatif

Les courants continus sont constants dans le temps, tandis que les courants alternatifs varient avec le temps.

Lorsqu'un courant est constant dans le temps, on dit que l'on a **courant continu**, abrégé en DC. D'autre part, un courant qui varie avec le temps, inversant périodiquement sa direction, est appelé **courant alternatif**, abrégé en ac.

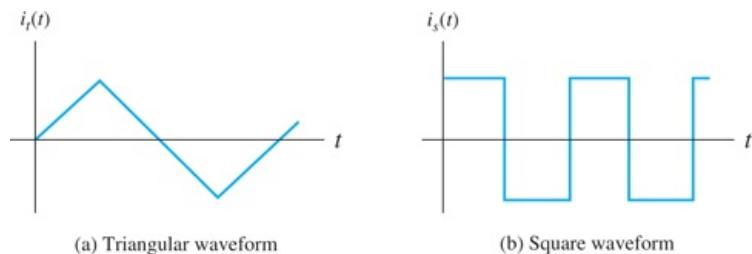
**Figure 1.7** montre les valeurs d'un courant continu et d'un courant alternatif sinusoïdal en fonction du temps.

Quand  $i_b(t)$  prend une valeur négative, la direction réelle du courant est opposée à la direction de référence pour  $i_b(t)$ . La désignation AC est utilisée pour d'autres types de courants variant dans le temps, tels que les formes d'onde triangulaires et carrées illustrées dans **Figure 1.8**.



**Figure 1.7**

Exemples de courants continus et alternatifs en fonction du temps.



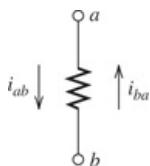
**Figure 1.8**

Les courants alternatifs peuvent avoir différentes formes d'onde.

## Notation à double indice pour les courants

Jusqu'à présent, nous avons utilisé des flèches à côté des éléments de circuit ou des conducteurs pour indiquer les directions de référence des courants. Une autre façon d'indiquer le courant et la direction de référence d'un élément de circuit consiste à étiqueter les extrémités de l'élément et à utiliser des indices doubles pour définir la direction de référence du courant. Par exemple, considérons la résistance de **Figure 1.9**. Le courant désigné par  $i_{un b}$  est le courant à travers le élément avec sa direction de référence pointant vers  $a$  à  $b$ . De la même manière,  $i_{ba}$  est le courant avec sa référence dirigée depuis  $b$  à  $a$ . Bien sûr,  $i_{un b}$  et  $i_{ba}$  sont de même grandeur et de signe opposé, car ils désignent le même courant mais avec des directions de référence opposées. Ainsi, nous avons

$$i_{un b} = -i_{ba}$$



**Figure 1.9**

Les directions de référence peuvent être indiquées en étiquetant les extrémités des éléments du circuit et en utilisant des indices doubles sur les variables de courant. La direction de référence pour  $i_{un b}$  points de  $un$  à  $b$ . D'autre part, la direction de référence pour  $i_{ba}$  points de  $b$  à  $un$ .

### Exercice 1.1

Un courant constant de 2 A traverse un élément du circuit. En 10 secondes (s), quelle est la quantité de charge nette qui traverse l'élément ?

**Répondre** 20 C.

### Exercice 1.2

La charge qui traverse un élément de circuit est donnée par  $q(t) = 0,01 \sin(200t)$ . L'angle est \_\_\_\_\_ C, dans lequel le en radians. Trouvez le courant en fonction du temps.

**Répondre**  $i(t) = 2 \cos(200t)$  UN .

### Exercice 1.3

Dans **Figure 1.6**, supposons que  $i_{e2} = 1$  Un et  $i_{e3} = -3$  Un. En supposant que le courant soit composé de positif charge, dans quelle direction (vers le haut ou vers le bas) la charge se déplace dans l'élément  $C$ ? Dans l'élément  $E$ ?

**Répondre** Vers le bas dans l'élément  $C$  et vers le haut dans l'élément  $E$ .

## Tensions

Lorsque la charge se déplace à travers les éléments du circuit, l'énergie peut être transférée. Dans le cas des phares d'automobile, l'énergie chimique stockée est fournie par la batterie et absorbée par les phares où elle apparaît sous forme de chaleur et de lumière.**tension** L'énergie transférée par unité de charge qui traverse un élément de circuit est associée à un élément de circuit. Les unités de tension sont les volts (V), qui sont équivalents aux joules par coulomb (J/C).

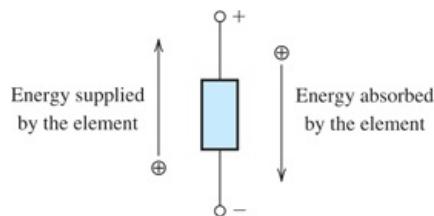
La tension est une mesure de l'énergie transférée par unité de charge lorsque la charge se déplace d'un point d'un circuit électrique à un deuxième point.

Prenons par exemple la batterie de stockage d'une automobile. La tension à ses bornes est (nominale) de 12 V. Cela signifie que 12 J sont transférés vers ou depuis la batterie pour chaque coulomb qui la traverse. Lorsque la charge circule dans une direction, l'énergie est fournie par la batterie, qui apparaît ailleurs dans le circuit sous forme de chaleur ou de lumière ou peut-être sous forme d'énergie mécanique au niveau du démarreur. Si la charge circule dans la batterie dans la direction opposée, l'énergie est absorbée par la batterie, où elle apparaît sous forme d'énergie chimique stockée.

Notez que la tension est mesurée aux extrémités d'un élément de circuit, tandis que le courant est une mesure du flux de charge à travers l'élément.

Les tensions sont affectées de polarités qui indiquent la direction du flux d'énergie. Si une charge positive se déplace de la polarité positive à travers l'élément vers la polarité négative, l'élément absorbe de l'énergie qui apparaît sous forme de chaleur, d'énergie mécanique, d'énergie chimique stockée ou sous une autre forme. En revanche, si une charge positive se déplace de la polarité négative vers la polarité positive, l'élément fournit de l'énergie. Ceci est illustré dans [Figure 1.10](#)

 Pour une charge négative, le sens du transfert d'énergie est inversé.

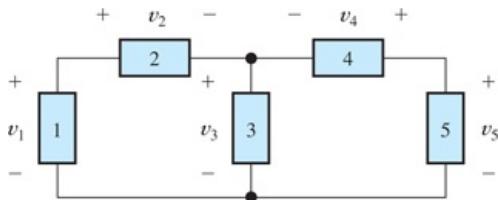


**Figure 1.10**

L'énergie est transférée lorsque la charge traverse un élément soumis à une tension.

## Polarités de référence

Lorsque nous commençons à analyser un circuit, nous ne connaissons souvent pas les polarités réelles de certaines des tensions d'intérêt dans le circuit. Ensuite, nous attribuons simplement des variables de tension en choisissant **référence** polarités arbitrairement. (Bien sûr, les réelles polarités ne sont pas arbitraires.) Ceci est illustré dans [Figure 1.11](#). Ensuite, nous appliquons le circuit principes (discutés plus tard), en obtenant des équations qui sont résolues pour les tensions. Si une tension donnée a une polarité réelle opposée à notre choix arbitraire pour la polarité de référence, nous obtenons une valeur négative pour la tension. Par exemple, si nous trouvons que  $v_3 = -5$  V dans [Figure 1.11](#), nous savons que la tension aux bornes L'élément 3 a une amplitude de 5 V et sa polarité réelle est opposée à celle indiquée sur la figure (c'est-à-dire que la polarité réelle est positive à l'extrême inférieure de l'élément 3 et négative en haut).



**Figure 1.11**

Si nous ne connaissons pas les valeurs de tension et les polarités d'un circuit, nous pouvons commencer par attribuer des variables de tension en choisissant arbitrairement les polarités de référence. (Les cases représentent des éléments de circuit non spécifiés.)

Dans l'analyse des circuits, nous attribuons souvent des polarités de référence aux tensions de manière arbitraire. Si nous constatons à la fin de l'analyse que la valeur d'une tension est négative, nous savons alors que la véritable polarité est opposée à la polarité sélectionnée initialement.

En général, nous ne nous efforçons pas d'attribuer des références « correctes » pour les directions de courant ou les polarités de tension. En cas de doute, nous faisons des choix arbitraires et utilisons l'analyse des circuits pour déterminer les véritables directions et polarités (ainsi que les valeurs des courants et des tensions).

Les tensions peuvent être constantes dans le temps ou varier. Les tensions constantes sont appelées **tensions continues**. D'autre part, les tensions qui changent d'amplitude et alternent en polarité avec le temps sont dites **tensions alternatives**. Par exemple,

$$v_1(t) = 10 \text{ V}$$

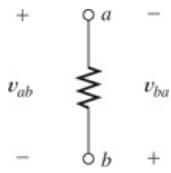
est une tension continue. Elle a la même amplitude et la même polarité à tout moment. D'autre part,

$$v_2(t) = 10 \cos(200\pi t) \text{ V}$$

est une tension alternative qui varie en amplitude et en polarité. Lorsque  $v_2(t)$  suppose une valeur négative, la polarité réelle est opposée à la polarité de référence. (Nous étudions les courants et tensions alternatifs sinusoïdaux dans [Chapitre 5](#).)

## Notation à double indice pour les tensions

Une autre façon d'indiquer la polarité de référence d'une tension consiste à utiliser des indices doubles sur la variable de tension. Nous utilisons des lettres ou des chiffres pour étiqueter les bornes entre lesquelles la tension apparaît, comme illustré dans [Figure 1.12](#). Pour la résistance indiquée sur la figure,  $v_{un}$  représente la tension entre points  $u$  et  $n$  avec la référence positive au point  $u$ . Les deux indices identifient les points entre lesquels la tension apparaît, et le premier indice est la référence positive. De même,  $v_{ba}$  est la tension entre  $u$  et  $b$  avec la référence positive au point  $b$ . Ainsi, nous pouvons écrire



**Figure 1.12**

La tension  $v_{un}$  a une polarité de référence qui est positive au point  $u$  et négatif au point  $b$ .

$$V_{un} = -V_{ba} \quad (1.3)$$

parce que  $v_{ba}$  a la même ampleur que  $v_{un}$  mais a une polarité opposée.

Une autre façon d'indiquer une tension et sa polarité de référence est d'utiliser une flèche, comme indiqué dans [Figure 1.13](#).

La référence positive correspond à la tête de la flèche.



**Figure 1.13**

La référence positive pour  $v$  est à la tête de la flèche.

## Interrupteurs

Les interrupteurs contrôlent les courants dans les circuits. Lorsqu'un interrupteur idéal est ouvert, le courant qui le traverse est nul et la tension qui le traverse est déterminée par le reste du circuit. Lorsqu'un interrupteur idéal est fermé, la tension qui le traverse est nulle et le courant qui le traverse est déterminé par le reste du circuit.

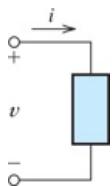
## Exercice 1.4

La tension aux bornes d'un élément de circuit donné est  $v_{un} = 20 \text{ V}$ . Une charge positive de  $2 \text{ C}$  se déplace à travers l'élément du circuit à partir du terminal  $b$  au terminal  $u$ . Quelle est la quantité d'énergie transférée ? L'énergie est-elle fournie par l'élément du circuit ou absorbée par celui-ci ?

**Répondre** 40 J sont fournis par l'élément de circuit.

## 1.3 Puissance et énergie

Considérez l'élément de circuit illustré dans [Figure 1.14](#). Parce que le courant  $i$  est le taux d'écoulement de la charge et la tension  $v$  est une mesure de l'énergie transférée par unité de charge, le produit du courant et de la tension est le taux de transfert d'énergie. En d'autres termes, le produit du courant et de la tension est la puissance :



**Figure 1.14**

Lorsque le courant traverse un élément et qu'une tension apparaît à travers l'élément, l'énergie est transférée. Le taux de transfert d'énergie est  $p = vi$

$$p = vi. \quad (1.4)$$

Les unités physiques des quantités du côté droit de cette équation sont

$$\begin{aligned} \text{volts} \times \text{ampères} &= \text{joules}/ \\ \text{coulomb} \times \text{coulombs/seconde} &= \\ \text{joules/seconde} &= \\ \text{watts} \end{aligned}$$

### Configuration de référence passive

Nous pouvons maintenant nous demander si la puissance calculée par  $p = vi$  représente l'énergie fournie par ou absorbé par l'élément. Se référer à [Figure 1.14](#) et remarquez que la référence actuelle entre dans le positif polarité de la tension. Nous appelons cet arrangement la **configuration de référence passive**. Si les références sont choisies de cette manière, un résultat positif pour le calcul de puissance implique que l'énergie est absorbée par l'élément. En revanche, un résultat négatif signifie que l'élément fournit de l'énergie à d'autres parties du circuit.

Si la référence de courant entre dans l'extrémité négative de la polarité de référence, nous calculons la puissance comme

$$p = -vi \quad (1.5)$$

Ensuite, comme précédemment, une valeur positive pour  $p$  indique que l'énergie est absorbée par l'élément, et une valeur négative montre que l'énergie est fournie par l'élément.

Si l'élément du circuit est une batterie électrochimique, une puissance positive signifie que la batterie est en cours de charge. En d'autres termes, l'énergie absorbée par la batterie est stockée sous forme d'énergie chimique. En revanche, une puissance négative indique que la batterie est en cours de décharge. L'énergie fournie par la batterie est alors transmise à un autre élément du circuit.

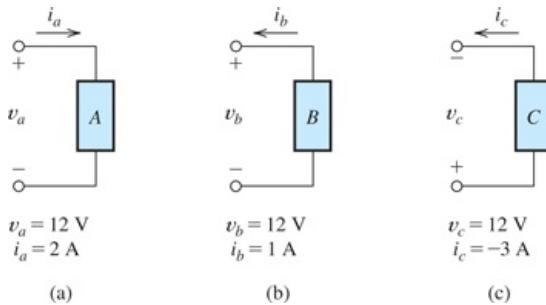
Parfois, les courants, les tensions et les puissances sont des fonctions du temps. Pour souligner ce fait, nous pouvons écrire

**Équation 1.4**  $p(t) = vi(t)$  comme

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1.6)$$

### *Exemple 1.2 Calculs de puissance*

Considérez les éléments du circuit illustrés dans **Figure 1.15**. Calculez la puissance de chaque élément. Si chaque élément est une batterie, est-elle en charge ou en décharge ?



## Figure 1.15

Éléments de circuit pour **Exemple 1.2**

### Solution

Dans l'élément  $UN$ , la référence de courant entre dans la polarité de référence positive. Il s'agit de la configuration de référence passive. Ainsi, la puissance est calculée comme

$$p_{un} = V_{un} \cdot I_{un} = 12 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 24 \text{ W}$$

Comme la puissance est positive, l'énergie est absorbée par l'appareil. S'il s'agit d'une batterie, elle est en charge.

Dans l'élément  $B$ , la référence de courant entre dans la polarité de référence négative. (Rappelons que le courant qui entre par une extrémité d'un élément de circuit doit sortir par l'autre extrémité, et vice versa.) Ceci est opposé à la configuration de référence passive. Par conséquent, la puissance est calculée comme

$$pb = -V_b j_{eb} = -(12 \text{ V}) \times 1 \text{ A} = -12 \text{ W}$$

Comme la puissance est négative, l'énergie est fournie par l'appareil. S'il s'agit d'une batterie, elle est en cours de décharge.

Dans l'élément C, la référence de courant entre dans la polarité de référence positive. Il s'agit de la configuration de référence passive. Ainsi, nous calculons la puissance comme

$$P_C = V_C I_C = 12 \text{ V} \times (-3 \text{ A}) = -36 \text{ W}$$

Puisque le résultat est négatif, l'énergie est fournie par l'élément. S'il s'agit d'une batterie, elle est en cours de décharge. (Remarquez que puisque/ $e$  prend une valeur négative, le courant circule en réalité vers le bas à travers l'élément C) ■

## Calculs d'énergie

Pour calculer l'énergie  $m$  délivré à un élément de circuit entre des instants de temps  $t_1$  et  $t_2$ , nous intégrons la puissance :

$$m = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (1.7)$$

Ici, nous avons explicitement indiqué que la puissance peut être une fonction du temps en utilisant la notation  $p(t)$ .

### Exemple 1.3 Calcul de l'énergie

Trouvez une expression pour la puissance de la source de tension indiquée dans [Figure 1.16](#) pour l'intervalle de  $t=0$  à  $t=\infty$ . □ Calculer l'énergie

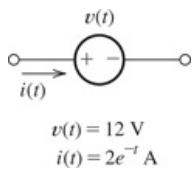


Figure 1.16

Élément de circuit pour [Exemple 1.3](#) □.

Solution

La référence de courant entre dans la polarité de référence positive. Ainsi, nous calculons la puissance comme

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= 12 \times 2e^{-t} \\ &= 24e^{-t} \text{ W} \end{aligned}$$

Par la suite, l'énergie transférée est donnée par

$$\begin{aligned} m &= \int_0^{\infty} p(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} 24e^{-t} dt \\ &= -24e^{-t} \Big|_0^{\infty} = -24e^{-\infty} - (-24e^0) = 24 \text{ J} \end{aligned}$$

Parce que l'énergie est positive, elle est absorbée par la source. ■

## Préfixes

En génie électrique, nous rencontrons une gamme énorme de valeurs pour les courants, les tensions, les puissances et d'autres quantités. Nous utilisons les préfixes indiqués dans [Tableau 1.2](#) □ lorsque vous travaillez avec de très grandes ou de très petites quantités. Par exemple, 1 milliampère (1 mA) équivaut à 10<sup>-3</sup> A, 1 kilovolt (1 kV) équivaut à 1 000 V, et ainsi de suite.

Tableau 1.2 Préfixes utilisés pour les grandes ou petites quantités physiques

Préfixe	Abréviation	Facteur d'échelle
giga-	G	$10^9$
méga- ou mégा-	M	$10^6$
kilo-	k	$10^3$
milli-	m	$10^{-3}$
micro-	$\mu$	$10^{-6}$
nano-		$10^{-9}$
pico-	p	$10^{-12}$
femto-	f	$10^{-15}$

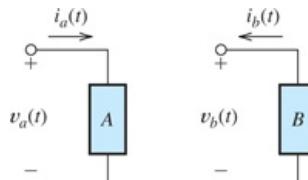
### Exercice 1.5

Les extrémités d'un élément de circuit sont étiquetées  $a$  et  $b$ , respectivement. Sont les références pour  $v_{ab}$  et  $i_{ab}$  liés par la configuration de référence passive ? Expliquez.

**Répondre** La direction de référence pour  $v_{ab}$  entre dans le terminal  $a$ , qui est également la référence positive pour  $v_{ab}$ . Par conséquent, la direction de référence actuelle entre dans la polarité de référence positive, nous avons donc la configuration de référence passive.

### Exercice 1.6

Calculez la puissance en fonction du temps pour chacun des éléments représentés dans **Figure 1.17**. Trouvez le sens de l'écoulement d'énergie transférée entre  $t=0$  et  $t=10$  s. Dans chaque cas, l'énergie est-elle fournie ou absorbée par l'élément ?



$$\begin{aligned} i_a(t) &= 2t \\ v_a(t) &= 10t \end{aligned}$$

(a)

$$\begin{aligned} i_b(t) &= 10 \\ v_b(t) &= 20 - 2t \end{aligned}$$

(b)

**Figure 1.17**

Voir **Exercice 1.6**.

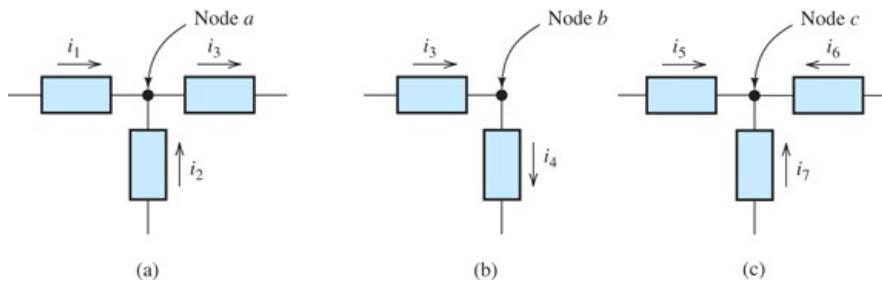
**Répondre**

**a.**  $p_a(t) = 20t^2 L, m_a = 6667 \text{ J}$ ; depuis  $m_a$  est positif, l'énergie est absorbée par l'élément  $A$ .

**b.**  $p_b(t) = 20t - 200 \text{ W}, m_b = -1000 \text{ J}$ ; depuis  $m_b$  est négatif, l'énergie est fournie par l'élément  $B$ .

## 1.4 Loi de Kirchhoff sur le courant

UN **nœud** dans un circuit électrique, il s'agit d'un point où deux ou plusieurs éléments du circuit sont reliés entre eux. Des exemples de nœuds sont présentés dans [Figure 1.18](#).



**Figure 1.18**

Circuits partiels montrant un nœud chacun pour illustrer la loi du courant de Kirchhoff.

La loi du courant de Kirchhoff stipule que le courant net entrant dans un nœud est nul.

Un principe important des circuits électriques est **Loi de Kirchhoff sur le courant**: *Le courant net entrant dans un nœud est nul.* Pour calculer le *fil* et *courant entrant* dans un nœud, nous additionnons les courants entrants et soustrayons les courants sortants. À titre d'illustration, considérons les nœuds de [Figure 1.18](#). On peut alors écrire :

$$\text{Nœud } a: j_{e1} + j_{e2} - j_{e3} = 0$$

$$\text{Nœud } b: j_{e3} - j_{e4} = 0$$

$$\text{Nœud } c: j_{e5} + j_{e6} + j_{e7} = 0$$

Notez que pour le nœud *b*, la loi actuelle de Kirchhoff exige que  $j_{e3} = j_{e4}$ . En général, si seulement deux éléments de circuit sont connectés à un nœud, leurs courants doivent être égaux. Le courant entre dans le nœud par l'intermédiaire d'un élément et sort par l'autre. En général, nous reconnaissons ce fait et attribuons une seule variable de courant aux deux éléments du circuit.

Pour le nœud *c*, soit tous les courants sont nuls, soit certains sont positifs tandis que d'autres sont négatifs.

Nous abrégeons la loi de Kirchhoff en KCL. Il existe deux autres manières équivalentes d'énoncer KCL. L'une d'elles est la suivante : *Le courant net quittant un nœud est nul.* Pour calculer le courant net quittant un nœud, nous additionnons les courants sortants et soustrayons les courants entrants. Pour les nœuds de [Figure 1.18](#), cela donne ce qui suit :

$$\text{Nœud } a: -j_{e1} - j_{e2} + j_{e3} = 0$$

$$\text{Nœud } b: -j_{e3} + j_{e4} = 0$$

$$\text{Nœud } c: -j_{e5} - j_{e6} - j_{e7} = 0$$

Bien entendu, ces équations sont équivalentes à celles obtenues précédemment.

Une autre façon d'énoncer KCL est : *La somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants sortant d'un nœud.* En appliquant cette déclaration à [Figure 1.18](#), nous obtenons l'ensemble d'équations suivant :

Une autre façon d'énoncer la loi du courant de Kirchhoff est de dire que la somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants sortant d'un nœud.

$$\text{Nœud } u: \quad j_{e1} + j_{e2} = j_{e3}$$

$$\text{Nœud } b: \quad j_{e3} = j_{e4}$$

$$\text{Nœud } c: \quad j_{e5} + j_{e6} + j_{e7} = 0$$

Là encore, ces équations sont équivalentes à celles obtenues précédemment.

Base physique de la loi de Kirchhoff sur les courants

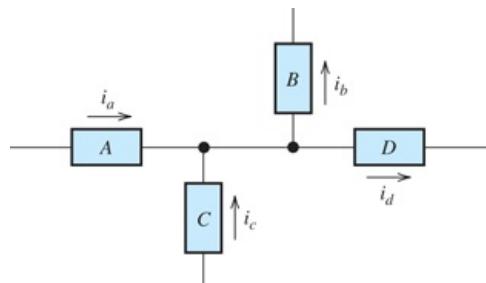
On peut comprendre pourquoi KCL est vrai en considérant ce qui se passerait si elle était violée. Supposons que nous puissions avoir la situation illustrée dans [Figure 1.18\(a\)](#), avec  $j_{e1} = 3 \text{ A}$ ,  $j_{e2} = 2 \text{ A}$ , et  $j_{e3} = 4 \text{ A}$ . Ensuite, le courant net entrant dans le nœud serait

$$j_{e1} + j_{e2} - j_{e3} = 1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

Dans ce cas, 1 C de charge s'accumulerait au nœud pendant chaque seconde. Après 1 s, nous aurions + 1 C de charge au nœud, et -1 C de charge ailleurs dans le circuit.

Supposons que ces charges soient séparées par une distance d'un mètre (m). Rappelons que les charges opposées subissent une force d'attraction. La force résultante s'avère être approximativement égale à  $8,99 \times 10^9 \text{ newtons (N)}$  (équivalent à  $2,02 \times 10^9 \text{ livres}$ ). Des forces très importantes sont générées lorsque des charges de cette ampleur sont séparées par des distances modérées. En effet, KCL stipule que de telles forces empêchent la charge de s'accumuler aux nœuds d'un circuit.

Tous les points d'un circuit qui sont reliés directement par des conducteurs peuvent être considérés comme un seul nœud. Par exemple, dans [Figure 1.19](#), éléments  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , et  $D$  sont connectés à un nœud commun. En appliquant KCL, nous pouvons écrire



**Figure 1.19**

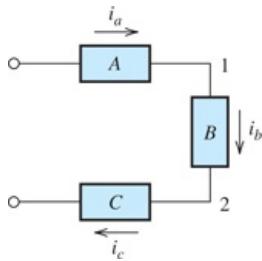
Éléments  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  peuvent être considérés comme étant connectés à un nœud commun, car tous les points d'un circuit qui sont connectés directement par des conducteurs sont électriquement équivalents à un seul point.

$$j_{eu} + j_{ec} = j_{eb} + j_{ed}$$

Tous les points d'un circuit qui sont reliés directement par des conducteurs peuvent être considérés comme un seul nœud.

Circuits en série

Nous utilisons fréquemment le KCL dans l'analyse des circuits. Par exemple, considérons les éléments  $U$ ,  $N$ ,  $B$ , et  $C$  montré dans [Figure 1.20](#). Lorsque les éléments sont connectés bout à bout, on dit qu'ils sont connectés en **série**. Pour que les éléments  $A$  et  $B$  soient en série, aucun autre chemin de courant ne peut être connecté au nœud reliant  $A$  et  $B$ . Ainsi, tous les éléments d'un circuit série ont des courants identiques. Par exemple, en écrivant la loi de Kirchhoff sur le courant au nœud 1 pour le circuit de [Figure 1.20](#), nous avons



**Figure 1.20**

Éléments  $U$ ,  $N$ ,  $B$ , et  $C$  sont connectés en série.

$$j_{euN} = j_{eB}$$

Au nœud 2, nous avons

$$j_{eB} = j_{eC}$$

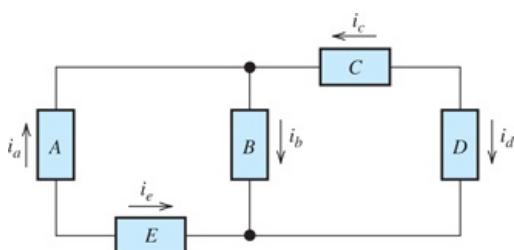
Ainsi, nous avons

$$j_{euN} = j_{eB} = j_{eC}$$

Le courant qui entre dans un circuit série doit traverser chaque élément du circuit.

#### *Exemple 1.4 Loi de Kirchhoff sur le courant*

Considérez le circuit illustré dans [Figure 1.21](#).



**Figure 1.21**

Circuit pour [Exemple 1.4](#).

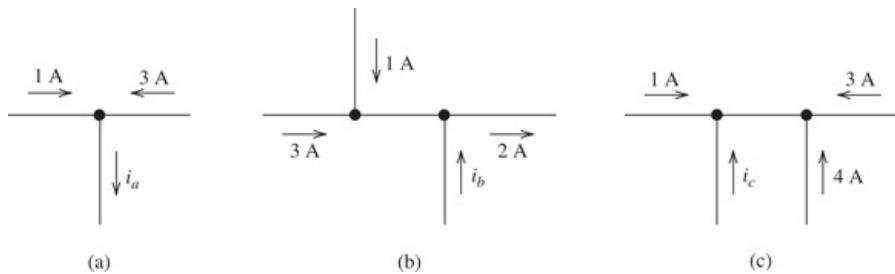
- Quels éléments sont en série ?
- Quelle est la relation entre  $j_{eD}$  et  $j_{eC}$  ?
- Étant donné que  $j_{euN} = 6$  A et  $j_{eD} = -2$  A, déterminer les valeurs de  $j_{eB}$  et  $j_{eA}$ .

Solution

- Éléments  $U$ ,  $N$  et  $E$  sont en série et les éléments  $C$  et  $D$  sont en série.
- Parce que les éléments  $C$  et  $D$  sont en série, les courants sont égaux en intensité. Cependant, comme les directions de référence sont opposées, les signes algébriques des valeurs de courant sont opposés. Ainsi, nous avons  $j_{eC} = -j_{eD}$ .
- Au nœud reliant les éléments  $A$ ,  $B$ , et  $C$ , nous pouvons écrire l'équation KCL  $j_{eB} = j_{euN} + j_{eC} = 6 - 2 = 4$  A. Nous avons également constaté plus tôt que  $j_{eD} = -j_{eC} = 2$  A.

### Exercice 1.7

Utilisez KCL pour déterminer les valeurs des courants inconnus indiqués dans [Figure 1.22](#).



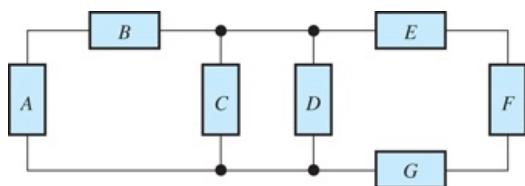
**Figure 1.22**

Voir [Exercice 1.7](#).

**Répondre**  $i_a = 4 \text{ A}$ ,  $i_b = -2 \text{ A}$ ,  $i_c = -8 \text{ A}$ .

### Exercice 1.8

Considérez le circuit de [Figure 1.23](#). Identifiez les groupes d'éléments de circuit qui sont connectés en série.



**Figure 1.23**

Circuit pour [Exercice 1.8](#).

**Répondre** Éléments  $A$  et  $B$  sont en série; éléments  $E$ ,  $F$ , et  $G$  forment une autre combinaison en série.

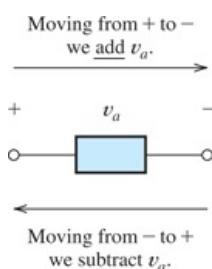
## 1.5 Loi de tension de Kirchhoff

La loi de tension de Kirchhoff (KVL) stipule que la somme algébrique des tensions est égale à zéro pour tout chemin fermé (boucle) dans un circuit électrique.

**UNboucle** Dans un circuit électrique, il s'agit d'un chemin fermé qui démarre à un nœud et passe par des éléments du circuit, pour finalement revenir au nœud de départ. Il est fréquent que plusieurs boucles puissent être identifiées pour un circuit donné. Par exemple, dans **Figure 1.23**, une boucle se compose du chemin commençant à l'extrémité supérieure de l'élément *U* et en procédant dans le sens des aiguilles d'une montre à travers les éléments *B* et *C*, revenant par *U* au point de départ. Une autre boucle démarre au sommet de l'élément *D* et se déroule dans le sens des aiguilles d'une montre à travers *E*, *F*, et *G*, revenant au début par *D*. Une autre boucle existe encore à travers les éléments *U*, *N*, *B*, *E*, *F*, et *G* sur le pourtour du circuit.

**Loi de tension de Kirchhoff** (KVL) déclare : *La somme algébrique des tensions est égale à zéro pour tout chemin fermé (boucle) dans un circuit électrique.* En parcourant une boucle, nous rencontrons différentes tensions, dont certaines portent un signe positif tandis que d'autres portent un signe négatif dans la somme algébrique. Une convention pratique consiste à utiliser la première marque de polarité rencontrée pour chaque tension pour décider si elle doit être ajoutée ou soustraite dans la somme algébrique. Si nous parcourons la tension de la référence de polarité positive à la référence négative, elle porte un signe plus. Si les marques de polarité sont rencontrées dans la direction opposée (du moins au plus), la tension porte un signe négatif. Ceci est illustré dans

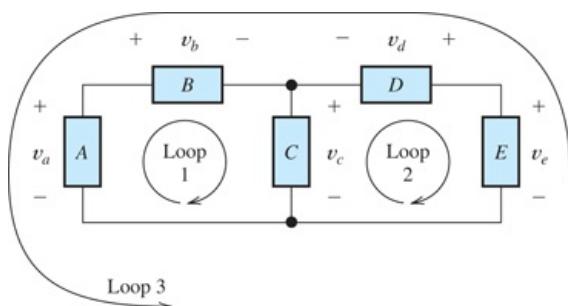
**Figure 1.24**



**Figure 1.24**

Lors de l'application de KVL à une boucle, les tensions sont ajoutées ou soustraites en fonction de leurs polarités de référence par rapport au sens de déplacement autour de la boucle.

Pour le circuit de **Figure 1.25**, on obtient les équations suivantes :



**Figure 1.25**

Circuit utilisé pour illustrer la loi de tension de Kirchhoff.

$$\text{Boucle 1 : } -V_{un} + V_b + V_c = 0$$

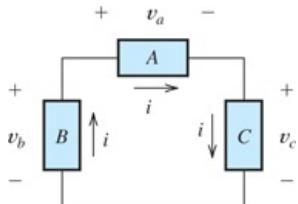
$$\text{Boucle 2 : } -V_c - V_d + V_e = 0 \quad V_{un} -$$

$$\text{Boucle 3 : } V_b + V_d - V_e = 0$$

Notez que  $v_{un}$  est soustrait pour la boucle 1, mais il est ajouté pour la boucle 3, car la direction du déplacement est différente pour les deux boucles. De même,  $v_c$  est ajouté pour la boucle 1 et soustrait pour la boucle 2.

### Loi de tension de Kirchhoff liée à la conservation de l'énergie

KVL est une conséquence de la loi de conservation de l'énergie. Considérez le circuit illustré dans [Figure 1.26](#). Ce circuit est constitué de trois éléments connectés en série. Ainsi, le même courant circule à travers les trois éléments. La puissance de chacun des éléments est donnée par



**Figure 1.26**

Dans ce circuit, la conservation de l'énergie nécessite que  $v_b = v_{un} + v_c$ .

$$\text{Élément } U: \quad p_{un} = v_{un}je$$

$$\text{Élément } B: \quad p_b = -v_{bj}je$$

$$\text{Élément } C: \quad p_c = v_{cj}je$$

Notez que les références de courant et de tension ont la configuration passive (la référence de courant entre dans la marque de polarité positive) pour les éléments  $U$  et  $C$ . Pour l'élément  $B$ , la relation est opposée à la configuration de référence passive. C'est pourquoi nous avons un signe négatif dans le calcul de  $p_b$ .

À un instant donné, la somme des puissances de tous les éléments d'un circuit doit être nulle. Sinon, pendant un incrément de temps pris à cet instant, plus d'énergie serait absorbée que celle fournie par les éléments du circuit (ou vice versa) :

$$p_{un} + p_b + p_c = 0$$

En remplacement des pouvoirs, nous avons

$$v_{unj}e - v_{bj}je + v_{cj}je = 0$$

Annulation du courant  $e$ , nous obtenons

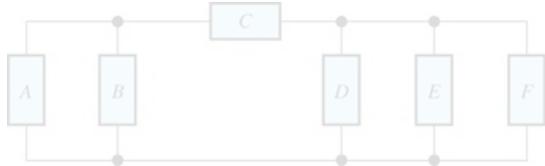
$$v_{un} - v_b + v_c = 0$$

Il s'agit exactement de la même équation qui est obtenue en additionnant les tensions autour de la boucle et en mettant la somme à zéro pour une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre dans le circuit de [Figure 1.26](#).

Une façon de vérifier nos résultats après avoir résolu les courants et les tensions dans un circuit est de vérifier que la somme des puissances est nulle pour tous les éléments.

### Circuits parallèles

Nous disons que deux éléments de circuit sont connectés en **parallèle** si les deux extrémités d'un élément sont connectées directement (c'est-à-dire par des conducteurs) aux extrémités correspondantes de l'autre. Par exemple, dans [Figure 1.27](#), les éléments  $U$  et  $B$  sont en parallèle. De même, nous disons que les trois éléments du circuit  $D$ ,  $E$ , et  $F$  sont en parallèle. Élément  $B$  est *pas* en parallèle avec  $D$  parce que l'extrémité supérieure de  $B$  n'est pas directement connecté à l'extrémité supérieure de  $D$ .

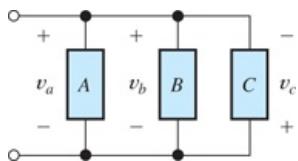


**Figure 1.27**

Dans ce circuit, les éléments  $U$  et  $B$  sont en parallèle. Éléments  $D$ ,  $E$ , et  $F$  forment une autre combinaison parallèle.

Deux éléments de circuit sont connectés en parallèle si les deux extrémités d'un élément sont connectées directement (c'est-à-dire par des conducteurs) aux extrémités correspondantes de l'autre.

Les tensions aux bornes des éléments parallèles sont égales en amplitude et ont la même polarité. À titre d'illustration, considérons le circuit partiel illustré dans [Figure 1.28](#). Ici les éléments  $U$ ,  $N$ ,  $B$ , et  $C$  sont connectés en parallèle. Considérez une boucle à partir de l'extrémité inférieure de  $U$  vers le haut puis vers le bas à travers l'élément  $B$  retour au bas de  $U$ . Pour cette boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, nous avons  $-v_{un} + v_b = 0$ . Ainsi, KVL exige que



**Figure 1.28**

Pour ce circuit, nous pouvons montrer que  $v_{un} = v_b = -v_c$ . Ainsi, les grandeurs et réelles les polarités des trois tensions sont les mêmes.

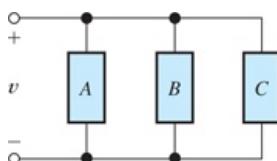
$$v_{un} = v_b$$

Ensuite, envisagez une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre à travers les éléments  $U$  et  $C$ . Pour cette boucle, KVL exige que

$$-v_{un} - v_c = 0$$

Cela implique que  $v_{un} = -v_c$ . Autrement dit,  $v_{un}$  et  $v_c$  ont des signes algébriques opposés. De plus, l'une ou l'autre des deux tensions doit être négative (à moins que les deux soient nulles). Par conséquent, l'une des tensions a une polarité réelle opposée à la polarité de référence indiquée sur la figure. Ainsi, les polarités réelles des tensions sont les mêmes (soit les deux sont positives en haut du circuit, soit les deux sont positives en bas).

Habituellement, lorsque nous avons un circuit parallèle, nous utilisons simplement la même variable de tension pour tous les éléments comme illustré dans [Figure 1.29](#).

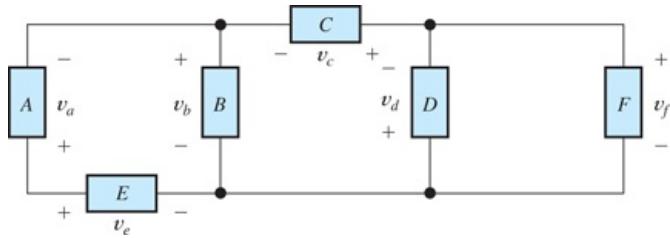


**Figure 1.29**

L'analyse est simplifiée en utilisant la même variable de tension et la même polarité de référence pour les éléments qui sont en parallèle.

### Exemple 1.5 Loi de tension de Kirchhoff

Considérez le circuit illustré dans **Figure 1.30**.



**Figure 1.30**

Circuit pour **Exemple 1.5**.

- Quels éléments sont en parallèle ?
- Quels éléments sont en série ?
- Quelle est la relation entre  $v_d$  et  $v_f$  ?
- Étant donné que  $v_{un} = 10$  V,  $v_c = 15$  V et  $v_{et} = 20$  V, déterminer les valeurs de  $v_b$  et  $v_f$ .

Solution

- Éléments  $D$  et  $F$  sont en parallèle.
- Éléments  $U$  et  $E$  sont en série.
- Parce que les éléments  $D$  et  $F$  sont en parallèle,  $v_d$  et  $v_f$  sont de même grandeur. Cependant, comme les directions de référence sont opposées, les signes algébriques de leurs valeurs sont opposés. Ainsi, nous avons  $v_d = -v_f$ .
- Application de KVL à la boucle formée par les éléments  $A$ ,  $B$  et  $E$ , nous avons:

$$V_{un} + V_b - V_{et} = 0$$

Résoudre pour  $v_b$  et en remplaçant les valeurs, nous constatons que  $v_b = 10$  V.

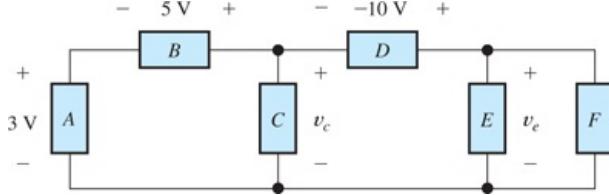
En appliquant KVL à la boucle autour du périmètre extérieur du circuit, nous avons :

$$V_{un} - V_c + V_f = 0$$

Résoudre pour  $v_f$  en remplaçant les valeurs, nous constatons que  $v_f = 5$  V. ■

### Exercice 1.9

Utilisez l'application répétée de KVL pour trouver les valeurs de  $v_c$  et  $v_e$  pour le circuit de **Figure 1.31**.



**Figure 1.31**

Circuit pour **Exercices 1.9** et **1.10**.

**Répondre**  $v_c = 8$  V,  $v_e = -2$  V.

### Exercice 1.10

Identifier les éléments qui sont en parallèle dans **Figure 1.31**. Identifier les éléments en série.

**Répondre** Éléments  $E$  et  $F$  sont en parallèle ; éléments  $U$  et  $B$  sont en série.



## 1.6 Introduction aux éléments du circuit

Dans cette section, nous définissons soigneusement plusieurs types d'éléments de circuit idéaux :

Chefs d'orchestre

Sources de tension

Sources actuelles

Résistances

Plus loin dans le livre, nous découvrirons d'autres éléments, notamment des inducteurs et des condensateurs. Nous pourrons ensuite utiliser ces éléments de circuit idéalisés pour décrire (modéliser) des dispositifs électriques complexes du monde réel.

Chefs d'orchestre

Nous avons déjà rencontré des conducteurs. Les conducteurs idéaux sont représentés dans les schémas de circuit par des lignes continues reliant les extrémités d'autres éléments du circuit. Nous définissons les éléments de circuit idéaux en fonction de la relation entre la tension aux bornes de l'élément et le courant qui le traverse.

La tension entre les extrémités d'un conducteur idéal est nulle quel que soit le courant circulant dans le conducteur.

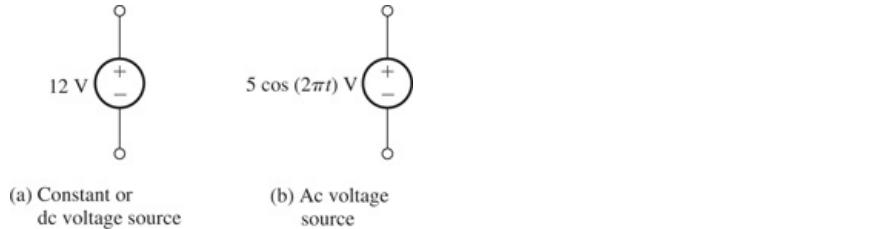
*La tension entre les extrémités d'un conducteur idéal est nulle quel que soit le courant circulant dans le conducteur.*  
Lorsque deux points d'un circuit sont reliés entre eux par un conducteur idéal, on dit que les points sont en **court-circuit** ensemble. Un autre terme pour un conducteur idéal est **court-circuit**. Tous les points d'un circuit qui sont reliés par des conducteurs idéaux peuvent être considérés comme un seul nœud.

Tous les points d'un circuit reliés par des conducteurs idéaux peuvent être considérés comme un seul nœud.

Si aucun conducteur ou autre élément de circuit n'est connecté entre deux parties d'un circuit, on dit qu'un **circuit ouvert** existe entre les deux parties du circuit. Aucun courant ne peut circuler dans un circuit ouvert idéal.

## Sources de tension indépendantes

Une **source de tension indépendante idéale** maintient une tension spécifiée entre ses bornes. La tension aux bornes de la source est indépendante des autres éléments qui lui sont connectés et du courant qui la traverse. Nous utilisons un cercle entourant les marques de polarité de référence pour représenter les sources de tension indépendantes. La valeur de la tension est indiquée à côté du symbole. La tension peut être constante ou être une fonction du temps. Plusieurs sources de tension sont présentées dans [Figure 1.32](#).



**Figure 1.32**

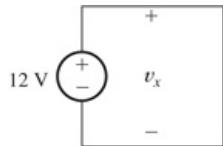
Sources de tension indépendantes.

Une source de tension indépendante idéale maintient une tension spécifiée entre ses bornes.

Dans [Figure 1.32\(a\)](#), la tension aux bornes de la source est constante. Nous avons donc une source de tension continue. D'autre part, la source indiquée dans [Figure 1.32\(b\)](#) est une source de tension alternative ayant une forme sinusoïdale variation avec le temps. Nous disons que ce sont *indépendants* sources car les tensions à leurs bornes sont indépendantes de toutes les autres tensions et courants du circuit.

## Éléments de circuit idéaux versus réalité

Nous donnons ici des définitions de *idéal*/éléments de circuit. Il est possible de dessiner des circuits idéaux dans lesquels les définitions des différents éléments de circuit sont en conflit. Par exemple, [Figure 1.33](#) montre une source de tension de 12 V avec un conducteur connecté à ses bornes. Dans ce cas, la définition de la source de tension exige que  $v_x = 12$  V. D'autre part, la définition d'un conducteur idéal exige que  $v_x = 0$ . Dans notre étude des circuits idéaux, nous évitons de tels conflits.



**Figure 1.33**

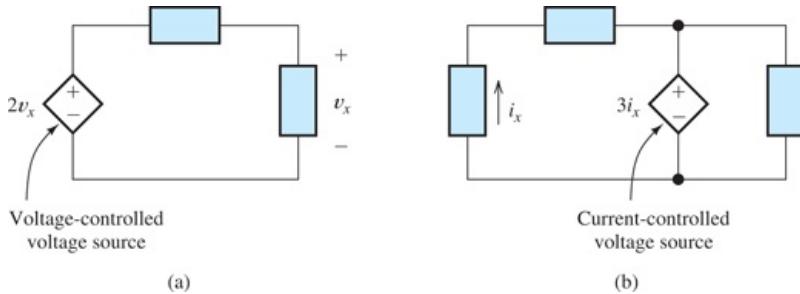
Nous évitons les schémas de circuits contradictoires comme celui-ci.

Dans le monde réel, une batterie d'automobile est une source de tension de 12 V presque idéale, et un petit morceau de fil de cuivre épais est un conducteur presque idéal. Si nous plaçons le fil entre les bornes de la batterie, un courant très important le traverse, l'énergie chimique stockée est convertie en chaleur dans le fil à un taux très élevé, et le fil va probablement fondre ou la batterie sera détruite.

Lorsque nous rencontrons un modèle de circuit idéalisé contradictoire, nous nous retrouvons souvent dans une situation indésirable (comme un incendie ou des composants détruits) dans la contrepartie réelle du modèle. Dans tous les cas, un modèle de circuit contradictoire implique que nous n'avons pas été suffisamment prudents dans le choix des modèles de circuit pour les éléments de circuit réels. Par exemple, une batterie d'automobile n'est pas exactement modélisée comme une source de tension idéale. Nous verrons qu'un meilleur modèle (en particulier si les courants sont très importants) est une source de tension idéale en série avec une résistance. (Nous discuterons de la résistance très bientôt.) Un petit morceau de fil de cuivre n'est pas bien modélisé comme un conducteur idéal, dans ce cas. Au lieu de cela, nous verrons qu'il est mieux modélisé comme une petite résistance. Si nous avons fait du bon travail dans le choix des modèles de circuit pour les circuits du monde réel, nous ne rencontrerons pas de circuits contradictoires et les résultats que nous calculons à l'aide du modèle correspondront très bien à la réalité.

## Sources de tension dépendantes

UN **dépendant ou source de tension contrôlée** est similaire à une source indépendante, sauf que la tension aux bornes de la source est une fonction d'autres tensions ou courants dans le circuit. Au lieu d'un cercle, il est courant d'utiliser un losange pour représenter les sources contrôlées dans les schémas de circuit. Deux exemples de sources dépendantes sont présentés dans [Figure 1.34](#).



**Figure 1.34**

Les sources de tension dépendantes (également appelées sources de tension contrôlées) sont représentées par des symboles en forme de losange. La tension aux bornes d'une source de tension contrôlée dépend d'un courant ou d'une tension qui apparaît ailleurs dans le circuit.

Une source de tension contrôlée maintient une tension à ses bornes égale à une constante multipliée par une tension ailleurs dans le circuit.

UN **source de tension à tension contrôlée** est une source de tension dont la tension est égale à une constante multipliée par la tension aux bornes d'une paire de terminaux ailleurs dans le réseau. Un exemple est illustré dans [Figure 1.34\(a\)](#).

La source de tension dépendante est le symbole du losange. La polarité de référence de la source est indiquée par les marques à l'intérieur du losange. La tension  $v_x$  détermine la valeur de la tension produite par la source. Par exemple, si l'on suppose que  $v_x = 3$  V, la tension source est  $2v_x = 6$  V. Si  $v_x$  devrait être égal à  $-7$  V, la source produit  $2v_x = -14$  V (dans ce cas, la polarité positive réelle de la source se trouve à l'extrême inférieure).

Une source de tension à courant contrôlé maintient une tension à ses bornes égale à une constante multipliée par un courant circulant à travers un autre élément du circuit.

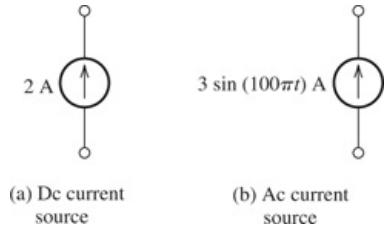
UN **source de tension à courant contrôlé** est une source de tension dont la tension est égale à une constante multipliée par le courant traversant un autre élément du circuit. Un exemple est illustré dans [Figure 1.34\(b\)](#). Dans ce cas, la tension de la source est trois fois supérieure à la valeur du courant  $i_x$ . Le facteur qui multiplie le courant est appelé le **paramètre de gain**. Nous supposons que la tension est exprimée en volts et que le courant est exprimé en ampères. Ainsi, le paramètre de gain [qui est de 3 en [Figure 1.34\(b\)](#)] a pour unités les volts par ampère (V/A). (Nous verrons bientôt que les unités V/A sont les unités de résistance et sont appelées ohms.)

En ramenant notre attention sur la source de tension contrôlée en tension dans [Figure 1.34\(a\)](#) le, on note que le gain paramètre est 2 et est sans unité (ou nous pourrions dire que les unités sont V/V).

Plus loin dans le livre, nous verrons que les sources contrôlées sont très utiles dans la modélisation de transistors, d'amplificateurs et de générateurs électriques, entre autres.

## Sources de courant indépendantes

Un idéale **source de courant indépendante** force un courant spécifié à circuler à travers elle-même. Le symbole d'une source de courant indépendante est un cercle entourant une flèche qui donne la direction de référence du courant. Le courant traversant une source de courant indépendante est indépendant des éléments qui lui sont connectés et de la tension qui la traverse. **Figure 1.35** montre les symboles pour une source de courant continu et pour un courant alternatif source.



**Figure 1.35**

Sources de courant indépendantes.

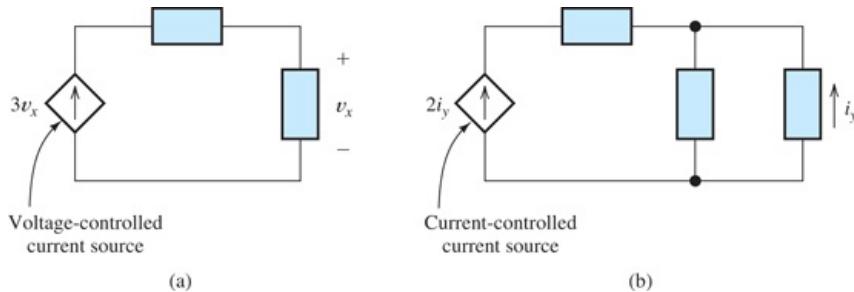
Une source de courant indépendante idéale force un courant spécifié à circuler à travers elle.

Si un circuit ouvert existe entre les bornes d'une source de courant, nous avons un circuit contradictoire. Par exemple, considérons la source de courant continu de 2 A illustrée dans **Figure 1.35(a)**. Cette source de courant est affichée avec un circuit ouvert entre ses bornes. Par définition, le courant circulant dans le nœud supérieur de la source est de 2 A. Par définition également, aucun courant ne peut circuler dans le circuit ouvert. Ainsi, KCL n'est pas satisfait à ce nœud. Dans de bons modèles de circuits réels, cette situation ne se produit pas. Ainsi, nous éviterons les sources de courant avec des bornes en circuit ouvert dans notre discussion sur les réseaux idéaux.

Une batterie est un bon exemple de source de tension, mais il n'existe pas d'exemple aussi connu de source de courant. Cependant, les sources de courant sont utiles pour construire des modèles théoriques. Nous verrons plus tard qu'une bonne approximation d'une source de courant idéale peut être obtenue avec des amplificateurs électroniques.

## Sources de courant dépendantes

Le courant qui traverse **un source de courant dépendante** est déterminé par un courant ou une tension ailleurs dans le circuit. Le symbole est un losange entourant une flèche qui indique la direction de référence. Deux types de sources de courant contrôlées sont représentés dans [Figure 1.36](#).



**Figure 1.36**

Sources de courant dépendantes. Le courant traversant une source de courant dépend d'un courant ou d'une tension qui apparaît ailleurs dans le circuit.

Le courant circulant dans une source de courant dépendante est déterminé par un courant ou une tension ailleurs dans le circuit.

Dans [Figure 1.36\(a\)](#), nous avons **un source de courant à tension contrôlée**. Le courant à travers la source est trois fois la tension  $v_x$ . Le paramètre de gain de la source (3 dans ce cas) a des unités A/V (qui, nous le verrons bientôt, sont équivalentes à des siemens ou à des ohms inverses). S'il s'avère que  $v_x$  a une valeur de 5 V, le courant à travers la source de courant contrôlée est  $3v_x = 15$  A.

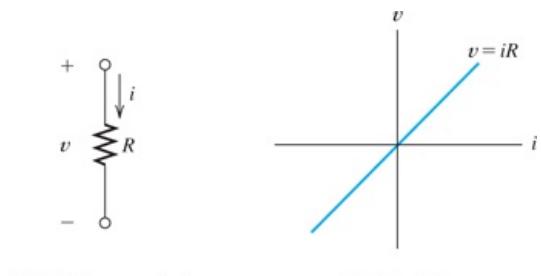
**Figure 1.36(b)** illustre **un source de courant à courant contrôlé**. Dans ce cas, le courant à travers le source est deux fois la valeur de  $i_x$ . Le paramètre de gain, qui a une valeur de 2 dans ce cas, a des unités de A/A (c'est-à-dire qu'il est sans unité).

Tout comme les sources de tension contrôlées, les sources de courant contrôlées sont utiles pour construire des modèles de circuits pour de nombreux types d'appareils du monde réel, tels que les amplificateurs électroniques, les transistors, les transformateurs et les machines électriques. Si une source contrôlée est nécessaire pour une application donnée, elle peut être mise en œuvre en utilisant des amplificateurs électroniques. En résumé, voici les quatre types de sources contrôlées :

1. Sources de tension à tension contrôlée
2. Sources de tension à courant contrôlé
3. Sources de courant à tension contrôlée
4. Sources de courant à courant contrôlé

## Résistances et loi d'Ohm

La tension  $v$  à travers un idéal **résistance** est proportionnel au courant  $i$  à travers la résistance. La constante de proportionnalité est la résistance  $R$ . Le symbole utilisé pour une résistance est représenté par [Figure 1.37\(a\)](#). Avis que la référence de courant et la référence de polarité de tension sont conformes à la configuration de référence passive. En d'autres termes, la direction de référence du courant est vers le repère de polarité positive et vers le repère de polarité négative. Sous forme d'équation, la tension et le courant sont liés par **Loi d'Ohm**:



(a) Resistance symbol

(b) Ohm's law

**Figure 1.37**

La tension est proportionnelle au courant dans une résistance idéale. Notez que les références pour  $v$  et  $i$  se conformer à la configuration de référence passive.

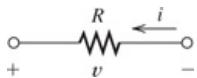
$$v=je\ suis$$

Les unités de résistance sont V/A, qui sont appelées ohms. La lettre grecque majuscule oméga ( $\Omega$ ) représente les ohms. Dans les circuits pratiques, nous rencontrons des résistances allant de milliohms ( $m\Omega$ ) en mégohms ( $(\Omega)$ ).

Sauf dans des situations plutôt inhabituelles, la résistance  $R$  suppose des valeurs positives. (Dans certains types de circuits électroniques, nous pouvons rencontrer une résistance négative, mais pour l'instant nous supposons que  $R$  est positif.) Dans les situations pour lesquelles la direction de référence actuelle entre dans la négatif référence de la tension, la loi d'Ohm devient

$$v= -je\ suis$$

Ceci est illustré dans **Figure 1.38**



**Figure 1.38**

Si les références pour  $v$  et  $i$  sont opposés à la configuration passive, nous avons  $v= -Ri$ .

La relation entre la direction du courant et la polarité de la tension peut être clairement incluse dans l'équation de la loi d'Ohm si la notation à double indice est utilisée. (Rappelons que pour utiliser des indices doubles, nous étiquetons les extrémités de l'élément considéré, qui est une résistance dans ce cas.) Si l'ordre des indices est le même pour le courant que pour la tension (*jeun bet v un b*, par exemple), la direction de référence du courant entre dans la première borne et la référence de tension positive est à la première borne. Ainsi, nous pouvons écrire

$$v_{un\ b}=jeun\ bR$$

En revanche, si l'ordre des indices n'est pas le même, on a

$$v_{un\ b}= -jebaR$$

## Conductance

En résolvant la loi d'Ohm pour le courant, nous avons

$$je = \frac{1}{R} V$$

Nous appelons la quantité  $1/R$  la **conductance**. Il est d'usage de désigner les conductances par la lettre  $G$ .

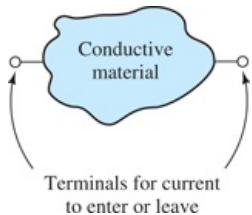
$$G = \frac{1}{R} \quad (1.8)$$

Les conductances ont pour unités l'inverse des ohms, nous pouvons écrire la loi d'Ohm comme suit

$$je = GV \quad (1.9)$$

## Résistances

Il s'avère que nous pouvons construire des résistances presque idéales en attachant des bornes à de nombreux types de matériaux conducteurs. Ceci est illustré dans [Figure 1.39](#). Matériaux conducteurs pouvant être utilisés pour construire des résistances comprennent la plupart des métaux, leurs alliages et le carbone.



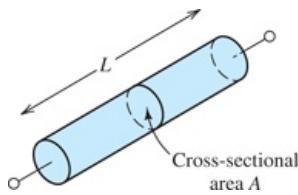
**Figure 1.39**

Nous construisons des résistances en attachant des bornes à un morceau de matériau conducteur.

Au niveau microscopique, le courant dans les métaux est constitué d'électrons se déplaçant à travers le matériau. (En revanche, dans les solutions de composés ioniques, le courant est en partie transporté par des ions positifs.) La tension appliquée crée un champ électrique qui accélère les électrons. Les électrons entrent en collision de manière répétée avec les atomes du matériau et perdent leur élan. Ils sont ensuite à nouveau accélérés. L'effet net est une vitesse moyenne constante pour les électrons. Au niveau macroscopique, nous observons un courant proportionnel à la tension appliquée.

## Résistance liée aux paramètres physiques

Les dimensions et la géométrie de la résistance ainsi que le matériau particulier utilisé pour la construire influencent sa résistance. Nous ne considérons que les résistances qui prennent la forme d'un long cylindre ou d'une barre avec des bornes fixées aux extrémités, comme illustré dans [Figure 1.40](#). La section transversale  $U$  est constante sur toute la longueur du cylindre ou de la barre. Si la longueur  $L$  de la résistance est bien supérieure aux dimensions de sa section transversale, la résistance est approximativement donnée par



**Figure 1.40**

Les résistances prennent souvent la forme d'un long cylindre (ou d'une barre) dans lequel le courant entre par une extrémité et circule sur toute la longueur.

$$R = \frac{\rho L}{UN} \quad (1.10)$$

dans lequel  $\rho$  est la résistivité du matériau utilisé pour construire la résistance. Les unités de résistivité sont les ohmmètres ( $\Omega\text{m}$ ) .

Les matériaux peuvent être classés comme conducteurs, semi-conducteurs ou isolants, en fonction de leur résistivité. **Chefs d'orchestre** ont la plus faible résistivité et conduisent facilement le courant électrique. **Isolateurs** ont une résistivité très élevée et conduisent très peu de courant (au moins pour des tensions modérées). **Semi-conducteurs** se situent entre les conducteurs et les isolants. Nous verrons dans [Chapitres 9](#) très utile dans la construction d'appareils électriques. [Tableau 1.3](#) plusieurs sont matériaux.

[Tableau 1.3](#) donne des valeurs approximatives de résistivité pour

**Tableau 1.3 Valeurs de résistivité ( $\Omega\text{m}$ ) pour matériaux sélectionnés à 300 K**

Chefs d'orchestre	
Aluminium	$2,73 \times 10^{-8}$
Carbone (amorphe)	$3,5 \times 10^{-5}$
Cuivre	$1,72 \times 10^{-8}$
Or	$2,27 \times 10^{-8}$
Nichrome	$1,12 \times 10^{-6}$
Argent	$1,63 \times 10^{-8}$
Tungstène	$5,44 \times 10^{-8}$
Semi-conducteurs	
Le silicium (de qualité appareil) dépend de la concentration en impuretés	$10^{-5}$ à 1
Isolateurs	
Quartz fondu	$> 10^{21}$
Verre (typique)	$1 \times 10^{12}$
Téflon	$1 \times 10^{19}$

### **Exemple 1.6 Calcul de résistance**

Calculer la résistance d'un fil de cuivre ayant un diamètre de 2,05 mm et une longueur de 10 m.

Solution

Tout d'abord, nous calculons la section transversale du fil :

$$UN = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 2,05 \times 10^{-3}}{4}^2 = 3,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Alors, la résistance est donnée par

$$R = \frac{\rho L}{UN} = \frac{1,72 \times 10^{-8} \times 10}{3,3 \times 10^{-6}} = 0,052 \Omega$$

Voici les dimensions approximatives d'un morceau de fil de cuivre de calibre 12 que l'on peut trouver pour relier une prise électrique au boîtier de distribution d'une résidence. Bien entendu, deux fils sont nécessaires pour un circuit complet. ■

Calculs de puissance pour les résistances

Rappelons que nous calculons la puissance d'un élément de circuit comme le produit du courant et de la tension :

$$P = VI \quad (1.11)$$

S'il y a une configuration de référence passive, un signe positif pour la puissance signifie que l'énergie est absorbée par l'appareil. De plus, un signe négatif signifie que l'énergie est fournie par l'appareil.

Si nous utilisons la loi d'Ohm pour remplacer  $V$  dans **Équation 1.11** , nous obtenons

$$P = R I^2 \quad (1.12)$$

D'autre part, si nous résolvons la loi d'Ohm pour  $I$  et remplacé par **Équation 1.11** , nous obtenons

$$P = V^2 \frac{I}{R} \quad (1.13)$$

Notez que la puissance d'une résistance est positive quel que soit le signe de  $V$  (en supposant que  $R$  est positif, ce qui est généralement le cas). Ainsi, la puissance est absorbée par les résistances. Si la résistance résulte de collisions d'électrons avec les atomes du matériau composant une résistance, cette puissance se manifeste sous forme de chaleur.

Certaines applications de conversion de l'énergie électrique en chaleur sont les éléments chauffants pour fours, chauffe-eau, tables de cuisson et radiateurs d'appoint. Dans un radiateur d'appoint classique, l'élément chauffant est constitué d'un fil en nichrome qui devient rouge vif pendant le fonctionnement. (Le nichrome est un alliage de nickel, de chrome et de fer.) Pour adapter la longueur de fil requise dans un petit espace, il est enroulé un peu comme un ressort.



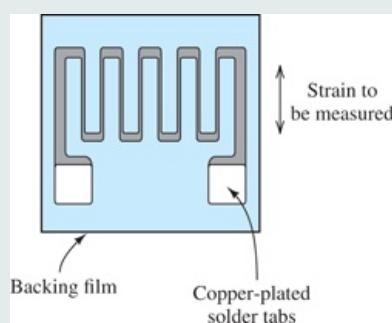
## APPLICATION PRATIQUE

### 1.1 Utilisation de la résistance pour mesurer la déformation

Les ingénieurs civils et mécaniques utilisent couramment la dépendance de la résistance aux dimensions physiques d'un conducteur pour mesurer la déformation. Ces mesures sont importantes dans l'analyse expérimentale des contraintes et des déformations des mécanismes et des structures. (La déformation est définie comme une variation fractionnaire de la longueur, donnée par  $\epsilon = \Delta L/L$ .)

Une jauge de contrainte résistive typique est constituée d'une feuille d'alliage nickel-cuivre qui est photogravée pour obtenir plusieurs conducteurs alignés avec la direction de la contrainte à mesurer. Ceci est illustré dans [Figure PA1.1](#).

En règle générale, les conducteurs sont collés sur un support mince en polyimide (un plastique flexible et résistant), qui à son tour est fixé à la structure testée par un adhésif approprié, tel que du ciment cyanoacrylate.



## CHIFFRE

### PA1.1

La résistance d'un conducteur est donnée par

$$R = \frac{\rho L}{UN}$$

Lorsque la contrainte est appliquée, la longueur et la surface changent, ce qui entraîne des variations de résistance. La contrainte et la variation de résistance sont liées par le facteur de jauge :

$$G = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon}$$

dans lequel  $R_0$  est la résistance de la jauge avant déformation. Une jauge typique a  $R_0 = 350 \Omega$  et  $G = 2,0$ . Ainsi, pour une déformation de 1%, la variation de résistance est  $\Delta R = 7 \Omega$ . Habituellement, un pont de Wheatstone (discuté dans [Chapitre 2](#)) est utilisé pour mesurer les petits changements de résistance associés avec une détermination précise de la contrainte.

Les capteurs de force, de couple et de pression sont construits à l'aide de jauge de contrainte résistives.

## Résistances contre résistances

En passant, nous mentionnons que la résistance est souvent utile dans la modélisation de dispositifs dans lesquels l'énergie électrique est convertie en d'autres formes que la chaleur. Par exemple, un haut-parleur semble avoir une résistance de  $8\ \Omega$ . Une partie de la puissance délivrée au haut-parleur est convertie en puissance acoustique. Un autre exemple est une antenne émettrice ayant une résistance de  $50\ \Omega$ . L'énergie délivrée à une antenne est rayonnée et se propage sous forme d'onde électromagnétique.

Il existe une légère distinction entre les termes *résistance* et *résistance*. Une résistance est un dispositif à deux bornes composé d'un matériau conducteur. La résistance est une propriété du circuit pour laquelle la tension est proportionnelle au courant. Ainsi, les résistances ont la propriété de résistance. Cependant, la résistance est également utile dans la modélisation des antennes et des haut-parleurs, qui sont assez différents des résistances. Souvent, nous ne faisons pas attention à cette distinction lorsque nous utilisons ces termes.

### *Exemple 1.7 Détermination de la résistance pour des valeurs nominales de puissance et de tension données*

Un certain radiateur électrique est évalué à  $1\ 500\ W$  lorsqu'il fonctionne à  $120\ V$ . Trouvez la résistance de l'élément chauffant et le courant de fonctionnement. (La résistance dépend de la température, et nous trouverons la résistance à la température de fonctionnement du radiateur.)

Solution

Résoudre **Équation 1.13** pour la résistance, on obtient

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{120^2}{1500} = 9,6\ \Omega$$

Ensuite, nous utilisons la loi d'Ohm pour trouver le courant :

$$j_e = \frac{V}{R} = \frac{120}{9,6} = 12,5\ A$$

### *Exercice 1.11*

Le  $9,6 - \Omega$  résistance de **Exemple 1.7** se présente sous la forme d'un fil de nichrome d'un diamètre de  $1,6\ mm$ . Trouvez la longueur du fil. *Indice:* La résistivité du nichrome est donnée en **Tableau 1.3** .

**Répondre**  $L = 17,2\ m$  .

### *Exercice 1.12*

Supposons que nous ayons une ampoule électrique à incandescence typique évaluée à  $100\ W$  et  $120\ V$ . Trouvez sa résistance (à la température de fonctionnement) et son courant de fonctionnement.

**Répondre**  $R = 144\ \Omega$ ,  $j_e = 0,833\ A$  .

### *Exercice 1.13*

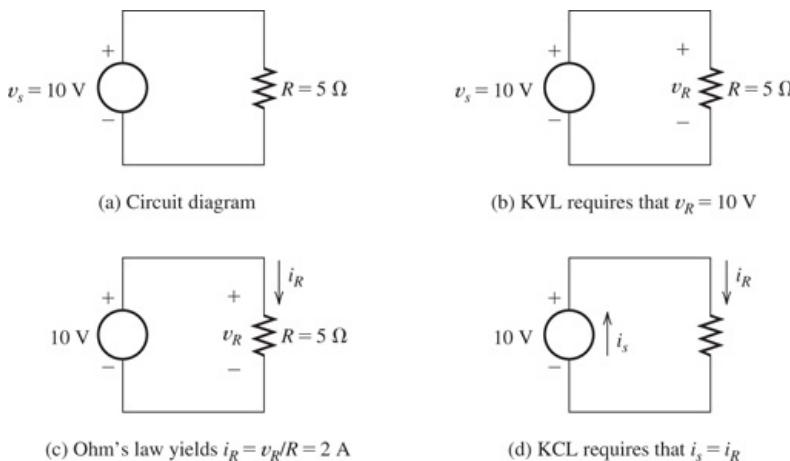
UN  $1-k\Omega$  La résistance utilisée dans un récepteur de télévision est évaluée pour une puissance maximale de  $1/4\ W$ . Trouvez le courant et la tension lorsque la résistance fonctionne à puissance maximale.

**Répondre**  $V_{max} = 15,8\ V$ ,  $j_{e,max} = 15,8\ mA$  .

## 1.7 Introduction aux circuits

Dans ce chapitre, nous avons défini le courant et la tension électriques, discuté des lois de Kirchhoff et présenté plusieurs éléments de circuit idéaux : les sources de tension, les sources de courant et les résistances. Nous allons maintenant illustrer ces concepts en considérant quelques circuits relativement simples. Dans le chapitre suivant, nous examinerons des circuits plus complexes et des techniques d'analyse.

Considérez le circuit illustré dans [Figure 1.41\(a\)](#) Supposons que nous voulons connaître le courant, la tension et puissance de chaque élément. Pour obtenir ces résultats, nous appliquons les principes de base introduits dans ce chapitre. Dans un premier temps, nous procédons par petites étapes méthodiques. De plus, pour faciliter la compréhension, nous sélectionnons d'abord des polarités et des directions de référence qui correspondent aux polarités et aux directions réelles du courant.



**Figure 1.41**

Un circuit composé d'une source de tension et d'une résistance.

KVL exige que la somme des tensions autour du circuit indiqué dans [Figure 1.41](#) doit être égal à zéro. Ainsi, en parcourant le circuit dans le sens des aiguilles d'une montre, nous avons  $v_R - v_m = 0$ . Par conséquent,  $v_R = v_m$ , et la tension aux bornes de la résistance  $v_R$  doit avoir une polarité réelle qui est positive à l'extrémité supérieure et une amplitude de 10 V.

Une autre façon d'observer les tensions dans ce circuit est de remarquer que la source de tension et la résistance sont en parallèle. (Les extrémités supérieures de la source de tension et de la résistance sont connectées, et les extrémités inférieures sont également connectées.) Rappelons que lorsque les éléments sont en parallèle, l'amplitude de la tension et la polarité sont les mêmes pour tous les éléments.

Considérons maintenant la loi d'Ohm. Comme 10 V apparaissent aux bornes de la 5-Ω résistance, le courant est  $i_R = 10/5 = 2 \text{ A}$ . Ce courant traverse la résistance de la polarité positive à la polarité négative. Ainsi,  $i_R = 2 \text{ A}$  s'écoule vers le bas à travers la résistance, comme indiqué dans [Figure 1.41\(c\)](#) .

Selon KCL, la somme des courants entrant dans un nœud donné doit être égale à la somme des courants sortant. Il y a deux nœuds pour le circuit de [Figure 1.41](#) : un en haut et un en bas. actuel  $i_s$  quitte le nœud supérieur à travers la résistance. Ainsi, un courant égal doit entrer dans le nœud supérieur à travers la source de tension. La direction réelle du flux de courant est vers le haut à travers la source de tension, comme indiqué dans [Figure 1.41\(d\)](#) .

Une autre façon de voir les courants  $i_s$  et  $i_R$  sont égales, c'est remarquer que la source de tension et la résistance sont en série. Dans un circuit en série, le courant qui circule dans un élément doit continuer à travers l'autre élément. (Remarquez que pour ce circuit, la source de tension et la résistance sont en parallèle et elles sont également en série. Un circuit à deux éléments est le seul cas pour lequel cela se produit. Si plus de deux éléments sont interconnectés, une paire d'éléments qui sont en parallèle ne peut pas également être en série, et vice versa.)

Notez que dans **Figure 1.41**, le courant dans la source de tension circule de la polarité négative vers la polarité positive. C'est seulement pour les résistances que le courant doit circuler du plus vers le moins. Pour une source de tension, le courant peut circuler dans les deux sens, selon le circuit auquel la source est connectée.

C'est uniquement pour les résistances que le courant doit circuler du plus vers le moins. Le courant peut circuler dans les deux sens pour une source de tension en fonction des autres éléments du circuit.

Calculons maintenant la puissance de chaque élément. Pour la résistance, nous avons plusieurs façons de calculer la puissance :

$$p_R = v_R j_R = 10 \times 2 = 20 \text{ W}$$

$$p_R = j_R^2 R = 2^2 \times 5 = 20 \text{ W}$$

$$p_R = \frac{V_R^2}{R} = \frac{10^2}{5} = 20 \text{ W}$$

Bien entendu, tous les calculs donnent le même résultat : l'énergie est délivrée à la résistance à raison de 20 J/s.

Pour trouver la puissance de la source de tension, nous avons

$$p_m = -v_m j_m$$

où le signe moins est utilisé car le sens de référence du courant entre dans la référence de tension négative (opposée à la configuration de référence passive). En remplaçant les valeurs, nous obtenons

$$p_m = -v_m j_m = -10 \times 2 = -20 \text{ W}$$

Parce que  $p_m$  est négatif, nous comprenons que l'énergie est délivrée par la source de tension.

Pour vérifier, si nous additionnons les puissances de tous les éléments du circuit, le résultat devrait être nul, car l'énergie n'est ni créée ni détruite dans un circuit électrique. Au contraire, elle est transportée et modifiée en forme. Ainsi, nous pouvons écrire

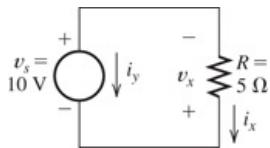
$$p_m + p_R = -20 + 20 = 0$$

Utilisation de références arbitraires

Dans la discussion précédente, nous avons sélectionné des références qui correspondent aux polarités et aux directions réelles du courant. Cela n'est pas toujours possible au début de l'analyse de circuits plus complexes. Heureusement, ce n'est pas nécessaire. Nous pouvons choisir les références de manière arbitraire. L'application des lois des circuits nous indiquera non seulement les valeurs des courants et des tensions, mais également les véritables polarités et directions du courant.

### Exemple 1.8 Analyse de circuit à l'aide de références arbitraires

Analyser le circuit de **Figure 1.41** en utilisant les références de courant et de tension indiquées dans **Chiffre 1.42**. Vérifiez que les résultats sont en accord avec ceux trouvés précédemment.



**Figure 1.42**  
Circuit pour **Exemple 1.8**.

Solution

En voyageant dans le sens des aiguilles d'une montre et en appliquant KVL, nous avons

$$-V_m - V_x = 0$$

Cela donne  $V_x = -V_m = -10 \text{ V}$ . Depuis  $V_x$  suppose une valeur négative, la polarité réelle est opposée à la référence. Ainsi, comme précédemment, nous concluons que la tension aux bornes de la résistance est en fait positive à l'extrémité supérieure.

Selon la loi d'Ohm,

$$j_{ex} = -x \frac{V}{R}$$

où le signe moins apparaît car  $V_x$  et  $j_{ex}$  sont des références opposées à la configuration de référence passive. En remplaçant les valeurs, nous obtenons

$$j_{ex} = -\frac{-10}{5} = 2 \text{ A}$$

Depuis  $j_{ex}$  suppose une valeur positive, la direction réelle du courant est vers le bas à travers la résistance.

Ensuite, en appliquant KCL au nœud inférieur du circuit, nous avons

$$\text{courant total entrant} = \text{courant total sortant} j_{et} + j_{ex} = 0$$

Ainsi,  $j_{et} = -j_{ex} = -2 \text{ A}$ , et nous concluons qu'un courant de 2 A circule en réalité vers le haut à travers la source de tension.

La puissance de la source de tension est

$$P_m = V_m j_{et} = 10 \times (-2) = -20 \text{ W}$$

Finalement, la puissance de la résistance est donnée par

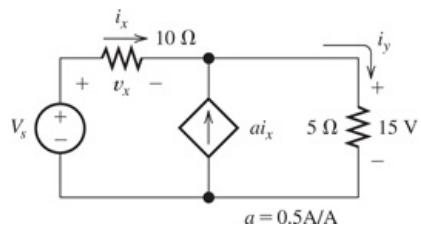
$$P_R = -V_x j_{ex}$$

où le signe moins apparaît car les références pour  $V_x$  et  $j_{ex}$  sont opposés à la configuration de référence passive. En remplaçant, nous trouvons que  $P_R = -(-10) \times (2) = 20 \text{ W}$ . Parce que  $P_R$  a une valeur positive, nous concluons que de l'énergie est délivrée à la résistance. ■

Il est parfois possible de résoudre des circuits en appliquant à plusieurs reprises les lois de Kirchhoff et d'Ohm. Nous illustrons cela avec un exemple.

### Exemple 1.9 Utilisation de KVL, KCL et de la loi d'Ohm pour résoudre un circuit

Résolvez la tension source dans le circuit de [Figure 1.43](#) dans lequel nous avons un courant contrôlé source de courant et on nous donne que la tension aux bornes de la  $5\Omega$  la résistance est de  $15\text{ V}$ .



**Figure 1.43**  
Circuit pour [Exemple 1.9](#).

Solution

Tout d'abord, nous utilisons la loi d'Ohm pour déterminer la valeur de  $j_{ext}$ :

$$j_{ext} = \frac{15\text{ V}}{5\Omega} = 3\text{ A}$$

Ensuite, nous appliquons du KCL à l'extrémité supérieure de la source contrôlée :

$$j_{ex} + 0,5j_{ex} = j_{ext}$$

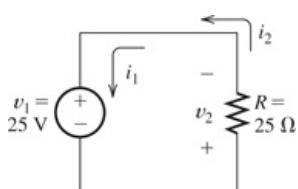
En remplaçant la valeur trouvée par  $j_{ext}$  en résolvant, nous déterminons que  $j_{ex} = 2\text{ A}$ . Alors la loi d'Ohm donne  $v_x = 10/j_{ex} = 20\text{ V}$ . L'application de KCL autour de la périphérie du circuit donne

$$V_m = v_x + 15$$

Enfin, en remplaçant la valeur trouvée par  $v_x$  rendements  $V_m = 35\text{ V}$ . ■

### Exercice 1.14

Analysez le circuit illustré dans [Figure 1.44](#) pour trouver les valeurs de  $j_{e1}, j_{e2}$ , et  $v_2$ . Utilisez les valeurs trouvées pour calculer la puissance de chaque élément.

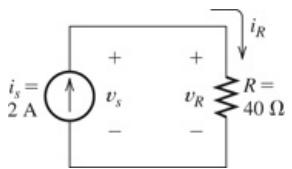


**Figure 1.44**  
Circuit pour [Exercice 1.14](#).

**Répondre**  $j_{e1} = j_{e2} = -1\text{ A}$ ,  $v_2 = -25\text{ V}$ ,  $p_R = 25\text{ W}$ ,  $p_m = -25\text{ W}$ .

*Exercice 1.15*

**Figure 1.45** montre une source de courant indépendante connectée à travers une résistance. Analysez pour trouver la valeurs de  $e_R$ ,  $v_R$ ,  $v_m$ , et la puissance de chaque élément.



**Figure 1.45**

Circuit pour **Exercice 1.15**.

**Répondre**  $e_R = 2 \text{ A}$ ,  $v_m = v_R = 80 \text{ V}$ ,  $p_m = -160 \text{ W}$ ,  $p_R = 160 \text{ W}$ .

## Résumé

1. Les fonctions électriques et électroniques sont de plus en plus intégrées dans les produits et systèmes conçus par les ingénieurs d'autres domaines. De plus, l'instrumentation dans tous les domaines de l'ingénierie et des sciences repose sur l'utilisation de capteurs électriques, d'électronique et d'ordinateurs.
2. Certains des principaux domaines de l'ingénierie électrique sont les systèmes de communication, les systèmes informatiques, les systèmes de contrôle, l'electromagnétisme, la photonique, l'électronique, les systèmes d'alimentation et le traitement du signal.
3. Certaines raisons importantes pour lesquelles il faut apprendre les principes de base de l'ingénierie électrique sont de réussir l'examen des principes fondamentaux de l'ingénierie, d'avoir une base de connaissances suffisamment large pour diriger des projets de conception dans votre propre domaine, d'être capable d'identifier et de corriger des dysfonctionnements simples dans les systèmes électriques et d'être capable de communiquer efficacement avec les consultants en génie électrique.
4. Le courant est la vitesse de circulation de la charge électrique dans le temps. Son unité est l'ampère (A), qui est équivalent au coulomb par seconde (C/s).
5. La tension associée à un élément de circuit est l'énergie transférée par unité de charge qui traverse l'élément. Les unités de tension sont les volts (V), qui sont équivalents aux joules par coulomb (J/C). Si la charge positive se déplace de la référence positive vers la référence négative, l'énergie est absorbée par l'élément de circuit. Si la charge se déplace dans la direction opposée, l'énergie est délivrée par l'élément.
6. Dans la configuration de référence passive, la direction de référence actuelle entre dans la polarité de référence positive.
7. Si les références ont la configuration passive, la puissance d'un élément de circuit est calculée comme produit du courant traversant l'élément et de la tension à ses bornes :  
$$P=VI$$

Si les références sont opposées à la configuration passive, on a

$$P=-VI$$

Dans les deux cas, si  $P$  est positif, l'énergie est absorbée par l'élément.

8. Un nœud dans un circuit électrique est un point où deux ou plusieurs éléments du circuit sont reliés entre eux. Tous les points reliés par des conducteurs idéaux sont électriquement équivalents et constituent un seul nœud.
9. La loi du courant de Kirchhoff (KCL) stipule que la somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme des courants sortant.
10. On dit que les éléments connectés bout à bout sont en série. Pour que deux éléments soient en série, aucun autre chemin de courant ne peut être connecté à leur nœud commun. Le courant est identique pour tous les éléments connectés en série.
11. Une boucle dans un circuit électrique est un chemin fermé commençant à un nœud et passant par des éléments du circuit pour finalement revenir au point de départ.
12. La loi de tension de Kirchhoff (KVL) stipule que la somme algébrique des tensions dans une boucle doit être égale à zéro. Si la polarité positive d'une tension est rencontrée en premier lors du tour de la boucle, la tension porte un signe plus dans la somme. En revanche, si la polarité négative est rencontrée en premier, la tension porte un signe moins.
13. Deux éléments sont en parallèle si les deux extrémités d'un élément sont directement connectées aux extrémités correspondantes de l'autre élément. Les tensions des éléments parallèles sont identiques.
14. La tension entre les extrémités d'un conducteur idéal est nulle, quel que soit le courant qui le traverse. Tous les points d'un circuit reliés par des conducteurs idéaux peuvent être considérés comme un seul point.
15. Une source de tension indépendante idéale maintient une tension spécifiée à travers ses bornes indépendamment des autres éléments qui lui sont connectés et du courant qui la traverse.
16. Pour une source de tension contrôlée, la tension aux bornes de la source dépend d'autres tensions ou courants dans le circuit. Une source de tension contrôlée en tension est une source de tension ayant une tension

égale à une constante multipliée par la tension aux bornes d'une paire de bornes ailleurs dans le réseau. Une source de tension contrôlée par le courant est une source de tension dont la tension est égale à une constante multipliée par le courant traversant un autre élément du circuit.

17. Une source de courant indépendante idéale force un courant spécifié à circuler à travers elle, indépendamment des autres éléments qui lui sont connectés et de la tension qui la traverse.
18. Dans le cas d'une source de courant contrôlée, le courant dépend d'autres tensions ou courants dans le circuit. Une source de courant contrôlée en tension produit un courant égal à une constante multipliée par la tension aux bornes d'une paire de bornes ailleurs dans le réseau. Une source de courant contrôlée en courant produit un courant égal à une constante multipliée par le courant traversant un autre élément du circuit.
19. Pour des résistances constantes, la tension est proportionnelle au courant. Si les références de courant et de tension ont la configuration passive, la loi d'Ohm stipule que  $v = Ri$ . Pour les références opposées à la configuration passive,  $v = -Ri$ .

## Problèmes

### Section 1.1 : Aperçu du génie électrique

- P1.1.**D'une manière générale, quels sont les deux principaux objectifs des systèmes électriques ?
- P1.2.**Énumérez quatre raisons pour lesquelles d'autres étudiants en ingénierie doivent apprendre les principes fondamentaux du génie électrique.
- P1.3.**Énumérez huit subdivisions du génie électrique.
- P1.4.**Rédigez quelques paragraphes décrivant une application intéressante de l'ingénierie électrique dans votre domaine. Consultez des revues d'ingénierie et des magazines spécialisés tels que *Spectre IEEE*, *ingénierie automobile*, *ingénierie chimique*, ou *Génie civil* pour des idées.

### Section 1.2 : Circuits, courants et tensions

**P1.5.**Définissez ou expliquez soigneusement les termes suivants dans vos propres mots (indiquez les unités le cas échéant) :

- Courant électrique.
- Tension.
- Un interrupteur ouvert.
- Un interrupteur fermé.
- Courant continu.
- Courant alternatif.

**P1.6.**Dans l'analogie de l'écoulement des fluides pour les circuits électriques, à quoi ressemble un fluide ?

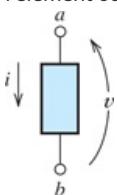
- un chef d'orchestre;
- un interrupteur ouvert;
- une résistance;
- une batterie ?

**P1.7.**La charge d'un électron est  $-1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ . Un courant de 1 A circule dans un fil électrique transporté par des électrons. Combien d'électrons traversent une section transversale du fil électrique chaque seconde ?

**\*P1.8.**Les extrémités d'une longueur de fil sont étiquetées *a* et *b*. Si le courant dans le fil est  $i = -5 \text{ A}$ , les électrons se déplacent vers *a*. Quelle quantité de charge traverse une section transversale du fil en 3 secondes ?

\*Indique que les réponses sont contenues dans les fichiers de solutions des étudiants. Voir [Annexe E](#) pour plus d'informations sur l'accès aux solutions étudiantes.

**P1.9.**L'élément de circuit représenté dans [Figure P1.9](#) a  $v = 12 \text{ V}$  et  $i = -2 \text{ A}$ . Qu'est-ce que la valeur de  $v_{ba}$ ? Assurez-vous de donner le signe algébrique correct. Quelle est la valeur de  $v_e$ ? L'énergie est-elle délivrée à l'élément ou prélevée de celui-ci ?



**Figure P1.9**

**P1.10.**Pour empêcher le courant de circuler dans le circuit des phares**Figure 1.2** sur la page7, devrait

L'interrupteur doit-il être ouvert ou fermé ? Dans l'analogie de l'écoulement du fluide pour le circuit, la vanne correspondant à l'interrupteur serait-elle ouverte ou fermée ? Quel état d'une vanne, ouverte ou fermée, est analogue à un interrupteur ouvert ?

\***P1.11.**La charge nette à travers une section transversale d'un élément de circuit est donnée par  $q(t) = 2+3tC$ .

Trouvez le courant à travers l'élément.

**P1.12.**Le courant traversant un élément de circuit particulier est donné par  $j_e(t) = 10 \sin(200\pi t)$  UNdans lequel l'angle est en radians.

a. Esquissez à l'échelle en fonction du temps.

b. Déterminer la charge nette qui traverse l'élément entre  $t= 0$  et  $t= 5$  ms.

c. Répétez l'opération pour l'intervalle de  $t= 0$  à  $t= 10$  ms.

\***P1.13.**Le courant traversant un élément de circuit donné est donné par

$$j_e(t) = 2et - tUN$$

Trouvez la charge nette qui traverse l'élément dans l'intervalle de  $t= 0$  à  $t= \infty$ . [Indice: Le courant est le taux de flux de charge. Ainsi, pour trouver la charge, nous devons intégrer le courant par rapport au temps.]

**P1.14.**La charge nette à travers une section transversale d'un certain élément de circuit est donnée par

$$q(t) = 3-3et-2tC$$

Déterminer le courant traversant l'élément.

**P1.15.**Un fil de cuivre a un diamètre de 2,05 mm et transporte un courant de 15 A dû uniquement aux électrons. (Ces valeurs sont courantes dans le câblage résidentiel.) Chaque électron a une charge de  $-1,60 \times 10^{-19} C$ . Supposons que la concentration en électrons libres (ce sont les électrons capables de se déplacer à travers le cuivre) dans le cuivre est  $10^{29}$  électrons/m<sup>3</sup>. Trouvez la vitesse moyenne des électrons dans le fil.

\***P1.16.**Une batterie au plomb a une masse de 30 kg. À partir d'un état de charge complète, elle peut fournir 5 ampères pendant 24 heures avec une tension aux bornes de 12 V avant d'être totalement déchargée.

a. Si l'énergie stockée dans la batterie complètement chargée est utilisée pour soulever la batterie avec une efficacité de 100 %, quelle hauteur est atteinte ? Supposons que l'accélération due à la gravité soit 9,8 m/s<sup>2</sup> et est constante avec la hauteur.

b. Si l'énergie stockée est utilisée pour accélérer la batterie avec une efficacité de 100 %, quelle vitesse est atteinte ?

c. L'essence contient environ  $4,5 \times 10^7 J/kg$ . Comparez cela avec le contenu énergétique par unité de masse de la batterie complètement chargée.

**P1.17.**Un élément de circuit ayant des bornes  $a$  et  $b$  = 10 V et  $j_{eba} = 2$  A. En 20 secondes, quelle est la quantité de charge qui se déplace dans l'élément ? Si les électrons portent la charge, dans quelle borne pénètrent-ils ? Quelle est la quantité d'énergie transférée ? Est-elle délivrée à l'élément ou prélevée de celui-ci ?

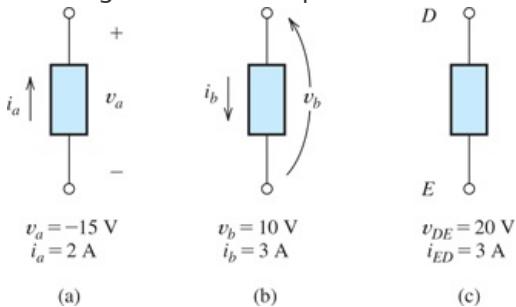
**P1.18.**Un électron se déplace sous une tension de 9 V de la polarité positive à la polarité négative. Quelle quantité d'énergie est transférée ? L'électron gagne-t-il ou perd-il de l'énergie ? Chaque électron subit un changement de  $-1,60 \times 10^{-19} C$ .

\***P1.19.**Une batterie à décharge profonde typique (utilisée pour les moteurs électriques de pêche à la traîne) est capable de fournir 12 V et 5 A pendant une période de 10 heures. Quelle quantité de charge traverse la batterie pendant cet intervalle ? Quelle quantité d'énergie est délivrée par la batterie ?

### Section 1.3 : Électricité et énergie

**P1.20.**Définir le terme *configuration de référence passive*. Quand avons-nous cette configuration lors de l'utilisation de la notation à double indice ?

\*P1.21. Calculez la puissance de chaque élément indiqué dans **Figure P1.21**. Pour chaque élément, indiquez si l'énergie est absorbée par l'élément ou fournie par lui.



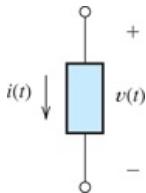
**Figure P1.21**

P1.22. Les bornes d'un appareil électrique sont étiquetées *a* et *b*. Si  $v_{un b} = -10 \text{ V}$ , quelle quantité d'énergie est échangée lorsqu'une charge de 3 C se déplace à travers l'appareil *a* à *b*? L'énergie est-elle délivrée à l'appareil ou prélevée sur l'appareil ?

\*P1.23. Les bornes d'une certaine batterie sont étiquetées *a* et *b*. La tension de la batterie est  $v_{un b} = 12 \text{ V}$ . Pour augmenter de 600 J l'énergie chimique stockée dans la batterie, quelle quantité de charge doit se déplacer à travers la batterie ? Les électrons doivent-ils se déplacer de *a* à *b* ou de *b* à *a*? P1.24. L'élément montré dans

**Figure P1.24** a  $v(t) = 10 \text{ V}$  et  $i(t) = 2e^{-t/UN}$ . Calculer

la puissance de l'élément du circuit. Trouvez l'énergie transférée entre  $t = 0$  et  $t = \infty$ . Cette énergie est-elle absorbée par l'élément ou fournie par lui ?



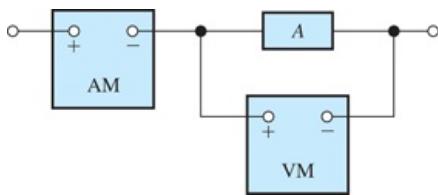
**Figure P1.24**

P1.25. Le courant et la tension d'un appareil électrique sont  $j_{en b}(t) = 5 \text{ A}$  et  $v_{un b}(t) = 10 \sin(200\pi t) \text{ V}$  dans lequel l'angle est en radians.

- Trouvez la puissance délivrée à l'appareil et dessinez-la à l'échelle en fonction du temps.
- Déterminer l'énergie délivrée à l'appareil pendant l'intervalle  $t = 0$  à  $t = 5 \text{ ms}$ .
- Répétez l'opération pour l'intervalle de  $t = 0$  à  $t = 10 \text{ ms}$ .

\*P1.26. Supposons que le coût de l'énergie électrique soit de 0,12 \$ par kilowattheure et que votre facture d'électricité pour 30 jours soit de 60 \$. Supposons que la puissance délivrée soit constante pendant toute la durée des 30 jours. Quelle est la puissance en watts ? Si cette puissance est fournie par une tension de 120 V, quel courant circule ? Une partie de votre charge électrique est constituée d'une lampe de 60 W qui est allumée en permanence. De quel pourcentage votre consommation d'énergie peut-elle être réduite en éteignant cette lampe ?

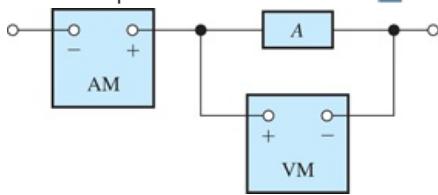
P1.27. **Figure P1.27** montre un ampèremètre (AM) et un voltmètre (VM) connectés pour mesurer la courant et tension, respectivement, pour l'élément de circuit *UN*. Lorsque le courant entre réellement le + terminal de l'ampèremètre, la lecture est positive, et lorsque le courant sort de + terminal, la lecture est négative. Si la polarité de la tension réelle est positive à + terminal de la VM, la lecture est positive ; sinon, elle est négative. (En fait, pour la connexion montrée, l'ampèremètre lit la somme du courant dans l'élément *UN* et le très petit courant absorbé par le voltmètre. Pour les besoins de ce problème, supposons que le courant absorbé par le voltmètre est négligeable.) Trouvez la puissance de l'élément *UN* et indiquez si l'énergie est délivrée à l'élément *UN* ou en être extrait si



**Figure P1.27**

- a. la lecture de l'ampèremètre est + 2 Unet la lecture du voltmètre est + 30 V;
- b. la lecture de l'ampèremètre est - 2 Unet la lecture du voltmètre est - 30 V.
- c. la lecture de l'ampèremètre est - 2 Unet la lecture du voltmètre est + 30 V;

\*P1.28.Répéter **Problème P1.27** avec les compteurs connectés comme indiqué dans **Figure P1.28** .



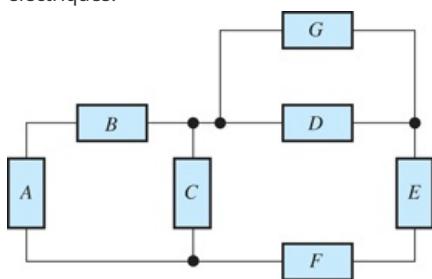
**Figure P1.28**

**P1.29.**Un certain type de pile D qui coûte 0,50 \$ est capable de produire 1,2 V et un courant de 0,1 A pendant une période de 75 heures. Déterminez le coût de l'énergie fournie par cette pile par kilowattheure. (À titre de comparaison, le coût approximatif de l'énergie achetée auprès des services publics d'électricité aux États-Unis est de 0,12 \$ par kilowattheure.)

**P1.30.**L'électronique à bord d'un certain voilier consomme 50 W lorsqu'elle fonctionne à partir d'une source de 12,6 V. Si une certaine batterie de stockage au plomb-acide à décharge profonde entièrement chargée est évaluée à 12,6 V et 100 ampères-heures, pendant combien d'heures l'électronique peut-elle fonctionner à partir de la batterie sans être rechargeée ? (L'ampérage-heure de la batterie correspond au temps de fonctionnement nécessaire pour décharger la batterie multiplié par le courant.) Quelle quantité d'énergie en kilowattheures est initialement stockée dans la batterie ? Si la batterie coûte 75 \$ et a une durée de vie de 300 cycles de charge-décharge, quel est le coût de l'énergie en dollars par kilowattheure ? Ne tenez pas compte du coût de recharge de la batterie.

#### Section 1.4 : Loi de Kirchhoff sur le courant

**P1.31.**Qu'est-ce qu'un *nœud* dans un circuit électrique ? Identifiez les nœuds dans le circuit de **Figure P1.31** Gardez à l'esprit que tous les points reliés par des conducteurs idéaux sont considérés comme un seul nœud dans les circuits électriques.



**Figure P1.31**

**P1.32.**Etat de la loi actuelle de Kirchhoff.

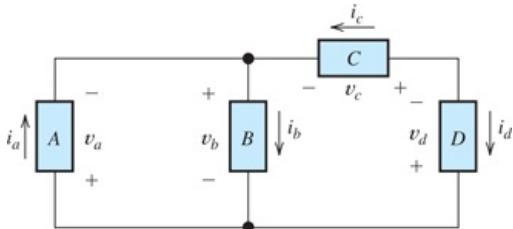
**P1.33.**Deux éléments électriques sont connectés en série. Que pouvez-vous dire des courants qui traversent les éléments ?

**P1.34.**Supposons que dans l'analogie de l'écoulement d'un fluide pour un circuit électrique soit le débit volumétrique avec des unités  $\text{dm}^3/\text{s}$ .Pour une analogie appropriée avec les circuits électriques, le fluide doit-il être compressible ou incompressible ? Les parois des tuyaux doivent-elles être élastiques ou inélastiques ? Expliquez vos réponses.

**\*P1.35.**Identifier les éléments qui sont en série dans le circuit de**Figure P1.31** .

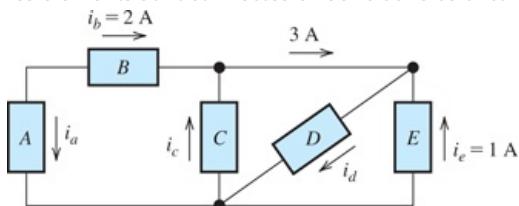
**P1.36.**Considérez le circuit illustré dans**Figure P1.36** .

- Quels éléments sont en série ?
- Quelle est la relation entre  $i_a$  et  $i_c$ ?
- Étant donné que  $v_a = 3 \text{ A}$  et  $i_c = 1 \text{ A}$ ,déterminer les valeurs de  $i_b$  et  $i_d$ .



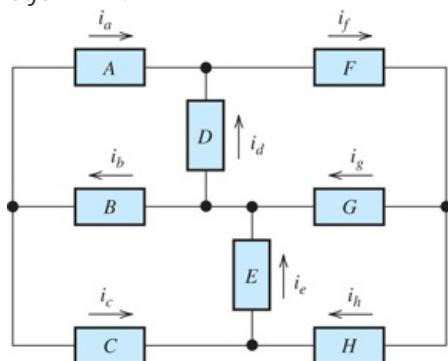
**Figure P1.36**

**\*P1.37.**Utilisez KCL pour trouver les valeurs de  $i_a$ ,  $i_c$ , et  $i_e$ pour le circuit de**Figure P1.37** . Lequel les éléments sont connectés en série dans ce circuit ?



**Figure P1.37**

**\*P1.38.**Trouver les valeurs des autres courants dans**Figure P1.38**  si  $i_{en} = 2 \text{ A}$ ,  $i_{eb} = 3 \text{ A}$ ,  $i_{ed} = -5 \text{ A}$ , et  $i_{eh} = 4 \text{ A}$ .



**Figure P1.38**

**P1.39.**Trouver les valeurs des autres courants dans**Figure P1.38**  si  $i_{en} = -1 \text{ A}$ ,  $i_{ec} = 3 \text{ A}$ ,  $i_{eg} = 5 \text{ A}$ , et  $i_{eh} = 1 \text{ A}$ .

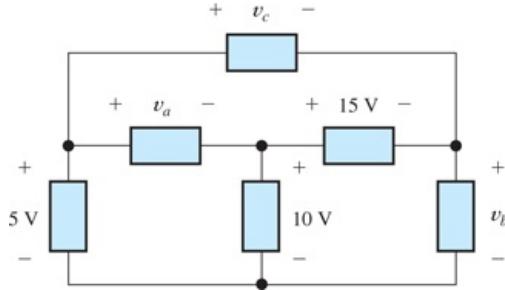
## Section 1.5 : Loi de tension de Kirchhoff

**P1.40.**Énoncez la loi de tension de Kirchhoff.

**P1.41.**Considérez le circuit illustré dans**Figure P1.36** .

- Quels éléments sont en parallèle ?
- Quelle est la relation entre  $v_{un}$  et  $v_b$  ?
- Étant donné que  $v_{un} = 2$  V et  $v_d = -5$  V, déterminer les valeurs de  $v_b$  et  $v_c$ .

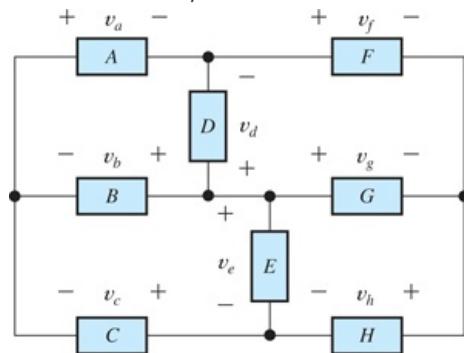
\*P1.42. Utilisez KVL pour résoudre les tensions  $v_{un}$ ,  $v_b$ , et  $v_c$  dans **Figure P1.42**



**Figure P1.42**

P1.43. Résolvez les autres tensions indiquées dans **Figure P1.43** étant donné que  $v_{un} = 5$  V,  $v_b = 7$  V,

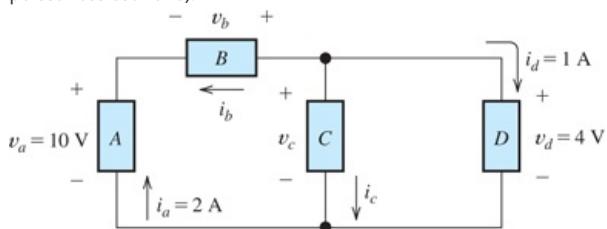
P1.43  $v_f = -10$  V, et  $v_h = 6$  V.



**Figure P1.43**

\*P1.44. Utilisez KVL et KCL pour résoudre les courants et tensions étiquetés dans **Figure P1.44** .

Calculez la puissance de chaque élément et montrez que la puissance est conservée (c'est-à-dire que la somme algébrique des puissances est nulle).



**Figure P1.44**

P1.45. Identifier les éléments qui sont en parallèle

- dans **Figure P1.37** ,
- dans **Figure P1.43** ,
- dans **Figure P1.44** .

P1.46. Points  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , et  $d$  apparaissent dans un certain circuit. Nous savons que  $v_{un} = 5$  V,  $v_{cb} = 15$  V, et  $v_d = -10$  V. Déterminer les valeurs de  $v_{un}$ ,  $v_a$ ,  $v_c$ , et  $v_{cd}$ .

## Section 1.6 : Introduction aux éléments du circuit

**P1.47.**Avec vos propres mots, définissez

- un conducteur idéal;
- une source de tension idéale ;
- une source de courant idéale.

**P1.48.**Nommez quatre types de sources dépendantes et donnez les unités du paramètre de gain pour chaque type.

**P1.49.**Énoncez la loi d'Ohm, y compris les références.

**\*P1.50.**Dessinez un circuit contenant un  $5 - \Omega$  résistance, une source de tension indépendante de 10 V et une source de courant indépendante de 2 A. Connectez les trois éléments en série. Étant donné que la polarité de la source de tension et le sens de référence de la source de courant ne sont pas spécifiés, plusieurs réponses correctes sont possibles.

**P1.51.**Répéter **Problème P1.50** , en plaçant les trois éléments en parallèle.

**P1.52.**La résistance d'un certain fil de cuivre est  $0,5 \Omega$ . Déterminer la résistance d'un fil de tungstène ayant les mêmes dimensions que le fil de cuivre.

**P1.53.**Dessinez un circuit contenant un  $5 - \Omega$  une résistance, une source de tension de 10 V et une source de tension contrôlée ayant une constante de gain de 0,5. Supposons que la tension aux bornes de la résistance soit la tension de commande de la source contrôlée. Placez les trois éléments en série.

**P1.54.**Dessinez un circuit contenant un  $5 - \Omega$  résistance, une source de tension de 10 V et une source de tension à courant contrôlé ayant une constante de gain de  $2 \Omega$ . Supposons que le courant traversant la résistance soit le courant de commande de la source contrôlée. Placez les trois éléments en série.

**\*P1.55.**Une puissance de 100 W est délivrée à une certaine résistance lorsque la tension appliquée est de 100 V. Trouvez la résistance. Supposons que la tension soit réduite de 10 pour cent (à 90 V). De quel pourcentage la puissance est-elle réduite ? Supposons que la résistance reste constante.

**P1.56.**La tension aux bornes d'un  $10 - \Omega$  la résistance est donnée par  $v(t) = 5e^{-2t}V$ . Déterminer l'énergie délivrée à la résistance entre  $t= 0$  et  $t= \infty$ .

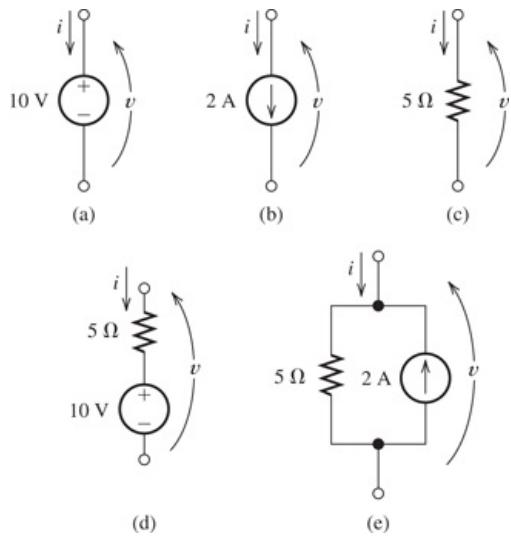
**P1.57.**La tension aux bornes d'un  $10 - \Omega$  la résistance est donnée par  $v(t) = 5 \sin(2\pi t) V$ . Déterminer l'énergie délivrée à la résistance entre  $t= 0$  et  $t= 10 s$ .

**P1.58.**Un certain fil a une résistance de  $0,5 \Omega$ . Trouvez la nouvelle résistance

- si la longueur du fil est doublée,
- si le diamètre du fil est doublé.

## Section 1.7 : Introduction aux circuits

**P1.59.**Parcallez contre  $\sqrt{2}$  l'échelle pour chacune des parties de **Figure P1.59** .

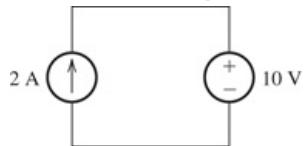


**Figure P1.59**

\***P1.60.** Laquelle des combinaisons suivantes d'éléments de circuit est contradictoire ?

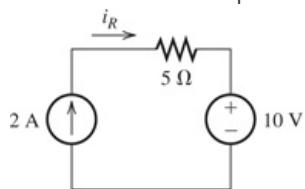
- a. Une source de tension de 12 V en parallèle avec une source de courant de 2 A.
- b. Une source de courant de 2 A en série avec une source de courant de 3 A.
- c. Une source de courant de 2 A en parallèle avec un court-circuit.
- d. Une source de courant de 2 A en série avec un circuit ouvert.
- e. Une source de tension de 5 V en parallèle avec un court-circuit.

**P1.61.** Considérez le circuit illustré dans **Figure P1.61**. Trouvez la puissance de la source de tension et de la source actuelle. Quelle source absorbe l'énergie ?



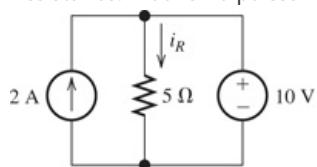
**Figure P1.61**

\***P1.62.** Considérez le circuit illustré dans **Figure P1.62**. Trouver le courant qui coule à travers le Résistance. Trouvez la puissance de chaque élément du circuit. Quels éléments absorbent de l'énergie ?



**Figure P1.62**

**P1.63.** Considérez le circuit illustré dans **Figure P1.63**. Trouver le courant qui coule à travers le Résistance. Trouvez la puissance de chaque élément du circuit. Quels éléments reçoivent de l'énergie ?



**Figure P1.63**

\*P1.64.Considérez le circuit illustré dansFigure P1.64 Utilisez la loi d'Ohm, KVL et KCL pour trouver  $V_x$ .

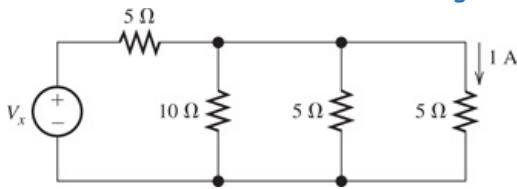


Figure P1.64

P1.65.Déterminer la valeur de  $I_x$  dans le circuit montré dansFigure P1.65.

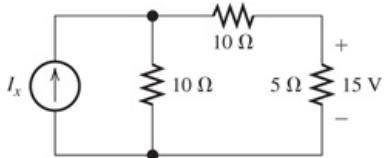


Figure P1.65

P1.66.Considérez le circuit illustré dansFigure P1.66.

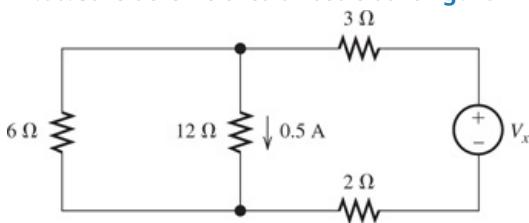


Figure P1.66

- Quels éléments sont en série ?
- Quels éléments sont en parallèle ?
- Appliquez les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour résoudre  $V_x$ .

P1.67.Le circuit montré dansFigure P1.67 est le modèle électrique d'un mégaphone électronique, en lequel le  $8 - \Omega$ modèle de résistance d'un haut-parleur, la source  $V_x$ et le  $5 - \text{k}\Omega$ résistance représente un microphone, et les éléments restants modélisent un amplificateur. Étant donné que la puissance délivrée au  $8 - \Omega$ la résistance est de  $8 \text{ W}$ , déterminez le courant circulant dans la boucle droite du circuit. Déterminez également la valeur de la tension du microphone  $V_x$ .

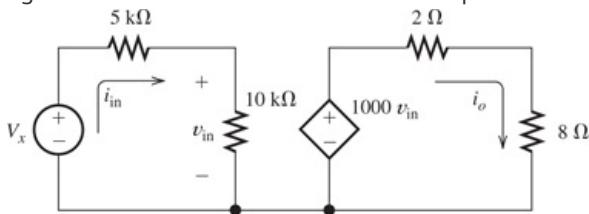
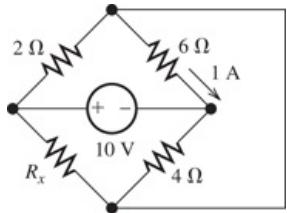


Figure P1.67

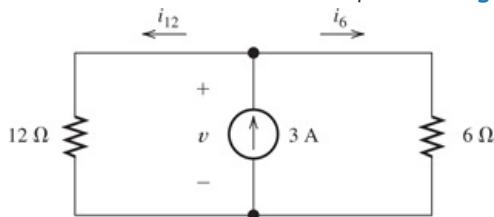
P1.68.Considérez le circuit illustré dansFigure P1.68.



**Figure P1.68**

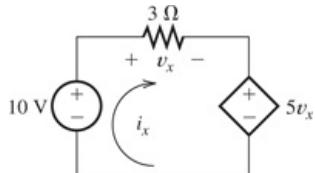
- Quels éléments sont en série ?
- Quels éléments sont en parallèle ?
- Appliquez les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour résoudre  $R_x$ .

**P1.69.** Résolvez les courants indiqués dans **Figure P1.69** □.



**Figure P1.69**

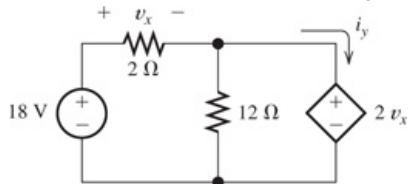
**\*P1.70.** Le circuit montré dans **Figure P1.70** □ contient une source de tension à tension contrôlée.



**Figure P1.70**

- Utilisez KVL pour écrire une équation reliant les tensions et résolvez pour  $v_x$ .
- Utilisez la loi d'Ohm pour trouver le courant  $i_x$ .
- Trouvez la puissance de chaque élément du circuit et vérifiez que la puissance est conservée.

**P1.71.** Déterminer la valeur de  $v_x$  et  $i_y$  dans le circuit montré dans **Figure P1.71** □.

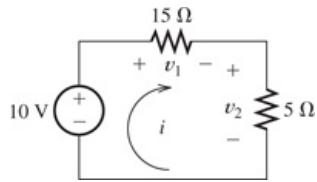


**Figure P1.71**

**P1.72.** Une source de tension indépendante de 10 V est connectée en série avec une source de courant indépendante de 2 A. Quelle source unique est équivalente à cette combinaison en série ? Donnez le type et la valeur de la source équivalente.

**P1.73.** Une source de tension indépendante de 10 V est connectée en parallèle avec une source de courant indépendante de 2 A. Quelle source unique est équivalente à cette combinaison parallèle ? Donnez le type et la valeur de la source équivalente.

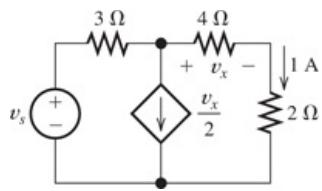
**P1.74.** Considérez le circuit illustré dans **Figure P1.74** □.



**Figure P1.74**

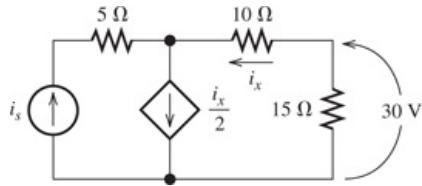
- Utilisez KVL pour écrire une équation reliant les tensions.
- Utilisez la loi d'Ohm pour écrire des équations reliant  $v_1$  et  $v_2$  au courant  $i$ .
- Remplacez les équations de la partie (b) dans l'équation de la partie (a) et résolvez pour  $i$ .
- Trouvez la puissance de chaque élément du circuit et vérifiez que la puissance est conservée.

\*P1.75. Le circuit montré dans **Figure P1.75** contient une source de courant à tension contrôlée. Résolvez pour  $V_m$ .



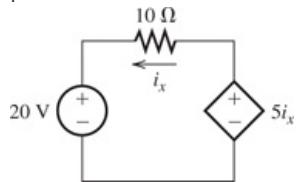
**Figure P1.75**

P1.76. Pour le circuit montré dans **Figure P1.76**, résoudre pour  $i_m$ . Quels types de sources sont présentes dans ce circuit ?



**Figure P1.76**

P1.77. Pour le circuit montré dans **Figure P1.77**, résoudre pour le courant  $i_x$ . Quels types de sources sont présent dans ce circuit ?



**Figure P1.77**

## Test pratique

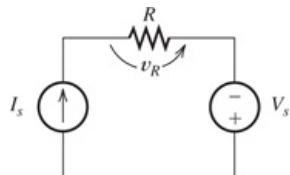
Voici un test pratique que vous pouvez utiliser pour vérifier votre compréhension des concepts les plus importants de ce chapitre. Les réponses peuvent être trouvées dans [Annexe D](#) et des solutions complètes sont incluses dans l'étudiant Fichiers de solutions. Voir [Annexe E](#) pour plus d'informations sur les solutions étudiantes.

**T1.1.**Faites correspondre chaque entrée dans [Tableau T1.1\(a\)](#) avec le meilleur choix de la liste donnée dans [Tableau T1.1\(b\)](#). [Articles dans [Tableau T1.1\(b\)](#) peut être utilisé plus d'une fois ou pas du tout.]

Tableau T1.1

Article	Meilleure correspondance
(un)	<ul style="list-style-type: none"><li>a. Nœud</li><li>b. Boucle</li><li>c. KVL</li><li>d. KCL</li><li>e. Loi d'Ohm</li><li>f. Configuration de référence passive</li><li>g. Conducteur idéal</li><li>h. Circuit ouvert</li><li>i. Source actuelle</li><li>j. Éléments connectés en parallèle</li><li>k. Source contrôlée</li><li>l. Unités de tension</li><li>m. Unités de courant</li><li>n. Unités de résistance</li><li>o. Éléments connectés en série</li></ul>
(b)	<p>UN. <math>v_{un} = R_i v_{un}</math></p> <ul style="list-style-type: none"><li>B. La référence de courant pour un élément entre dans la référence de tension positive</li><li>C. Un chemin à travers lequel aucun courant ne peut circuler</li><li>D. Points reliés par des conducteurs idéaux</li><li>E. Un élément qui transporte un courant spécifié</li><li>F. Un élément dont le courant ou la tension dépend d'un courant ou d'une tension ailleurs dans le circuit</li><li>G. Un chemin commençant à un nœud et allant d'un nœud à l'autre pour revenir au nœud de départ</li><li>H. Un élément pour lequel la tension est nulle</li><li>I. A/V</li><li>J. V/A</li><li>K. J/C</li><li>L. C/V</li><li>M. C/s</li><li>N. Éléments connectés de sorte que leurs courants doivent être égaux</li><li>O. Éléments connectés de sorte que leurs tensions doivent être égales</li><li>P. La somme algébrique des tensions pour une boucle fermée est nulle</li><li>Q. La somme algébrique des tensions des éléments connectés à un nœud est nulle</li><li>R. La somme des courants entrant dans un nœud est égale à la somme de ceux sortant</li></ul>

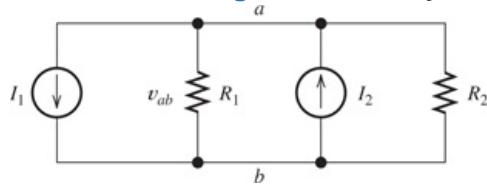
T1.2. Considérez le circuit de **Figure T1.2** avec  $i_m = 3 \text{ A}$ ,  $R = 2 \Omega$ , et  $V_m = 10 \text{ V}$ .



**Figure T1.2**

- Déterminer la valeur de  $v_R$ .
- Déterminez l'amplitude de la puissance de la source de tension et indiquez si la source de tension absorbe de l'énergie ou la fournit.
- Combien de nœuds ce circuit possède-t-il ?
- Déterminez l'amplitude de la puissance de la source de courant et indiquez si la source de courant absorbe de l'énergie ou la fournit.

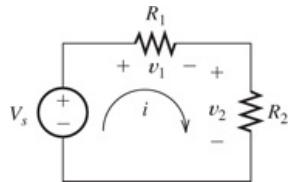
**T1.3.** Le circuit de [Figure T1.3](#) a  $i_1 = 3 \text{ A}$ ,  $i_2 = 1 \text{ A}$ ,  $R_1 = 12 \Omega$ , et  $R_2 = 6 \Omega$ .



**Figure T1.3**

- Déterminer la valeur de  $v_{un b}$ .
- Déterminez la puissance de chaque source de courant et indiquez si elle absorbe de l'énergie ou la fournit.
- Calculer la puissance absorbée par  $R_1$  et par  $R_2$ .

**T1.4.** Le circuit montré dans [Figure T1.4](#) a  $V_m = 12 \text{ V}$ ,  $v_2 = 4 \text{ V}$ , et  $R_1 = 4 \Omega$ .

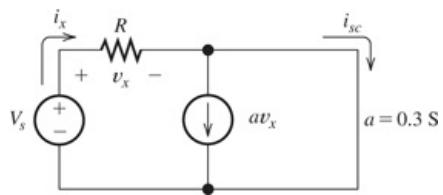


**Figure T1.4**

- Trouvez les valeurs de :
- un.  $v_1$ ;
- $i$ ;
- $R_2$ .

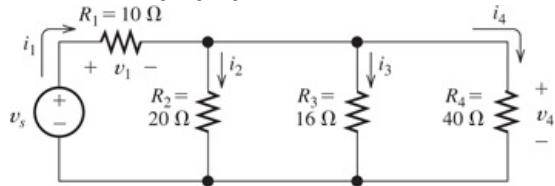
**T1.5.** On nous donne  $V_m = 15 \text{ V}$ ,  $R = 10 \Omega$ , et  $v_{un} = 0,3 \text{ Spour le circuit de } \langle\langle$  [Figure T1.5](#) la valeur du courant  $i_{sc}$  circulant à travers le court-circuit.

[Figure T1.5](#). Trouver



**Figure T1.5**

**T1.6.** On nous donne  $i_{e4} = 2\text{A}$  pour le circuit de [Figure T1.6](#). Utilisez la loi d'Ohm, KCL et KVL pour trouver les valeurs de  $i_{e1}, i_{e2}, i_{e3}$  et  $v_m$



**Figure T1.6**