

Albert Paul MALVINO • David BATES

PRINCIPES D'ÉLECTRONIQUE

9^e édition

Cours de référence

850 exercices et problèmes

650 QCM d'auto-évaluation

+ de 350 modèles de circuits à télécharger

DUNOD

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée par McGraw-Hill Education sous le titre :
Electronic Principles, 9^e édition
© 2021, McGraw-Hill Education. Tous droits réservés.

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Maquette de couverture : Julie Coinus
Mise en page : Lumina Datamatics

© Dunod, 2002, 2008, 2016, 2021 pour l'édition française
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-082297-3

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

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

	Avant-propos	IX		
1	Introduction	1		
1.1	Approximations	2		
1.2	Sources de tension	3		
1.3	Sources de courant	6		
1.4	Le théorème de Thévenin	8		
1.5	Le théorème de Norton	12		
1.6	Dépannage	15		
1.7	Débogage des circuits AC	18		
	Réviser	21		
	S'entraîner	22		
2	Les semi-conducteurs	27		
2.1	Les conducteurs	28		
2.2	Les semi-conducteurs	29		
2.3	Le cristal de silicium	30		
2.4	Les semi-conducteurs intrinsèques	32		
2.5	Les deux types de flux de porteurs	32		
2.6	Doper un semi-conducteur	33		
2.7	Les deux types de semi-conducteurs extrinsèques	34		
2.8	La diode non polarisée	35		
2.9	La polarisation directe	36		
2.10	La polarisation inverse	37		
2.11	Le claquage	39		
2.12	Niveaux d'énergie	41		
2.13	Barrière de potentiel et température	43		
2.14	La diode en polarisation inverse	44		
	Réviser	46		
	S'entraîner	47		
3	La théorie de la diode	53		
3.1	Concepts fondamentaux	54		
3.2	La diode idéale	57		
3.3	Deuxième approximation	59		
3.4	Troisième approximation	61		
			3.5	Dépannage 64
			3.6	Lecture d'une fiche technique 66
			3.7	Comment calculer la résistance série ? 70
			3.8	La résistance statique d'une diode 71
			3.9	La droite de charge 71
			3.10	Diodes montées en surface 73
			3.11	Introduction aux systèmes électroniques 74
			Réviser	75
			S'entraîner	77
			4	Les circuits à diodes 81
			4.1	Le redresseur simple alternance 82
			4.2	Le transformateur 85
			4.3	Le redresseur double alternance 87
			4.4	Le redresseur en pont 91
			4.5	Le filtre LC à inductance en tête 95
			4.6	Le filtre à condensateur en tête 98
			4.7	Tension inverse de crête et courant de surcharge 104
			4.8	Autres remarques sur les alimentations 106
			4.9	Dépannage 111
			4.10	Écrêteurs et limiteurs 113
			4.11	Circuits de régénération de niveau DC 118
			4.12	Multiplicateurs de tension 120
			Réviser	123
			S'entraîner	126
			5	Les diodes particulières 133
			5.1	La diode Zener 134
			5.2	Le régulateur Zener chargé 137
			5.3	La diode Zener en deuxième approximation 142
			5.4	Limites de la régulation 145
			5.5	Lecture d'une fiche technique 147
			5.6	Dépannage 151
			5.7	Droites de charge 154
			5.8	Diodes électroluminescentes (LED) 154

5.9	Autres composants optoélectroniques	162	8.4	Le bêta AC	284
5.10	La diode Schottky	164	8.5	La résistance AC de la diode émetteur	285
5.11	La diode à capacité variable	167	8.6	Deux modèles pour le transistor	289
5.12	Autres diodes particulières	170	8.7	Étude d'un amplificateur	290
Réviser		174	8.8	Lecture d'une fiche technique	295
S'entraîner		175	8.9	Gain en tension	297
6	Le transistor bipolaire	181	8.10	Influence de l'impédance d'entrée	301
6.1	Le transistor non polarisé	182	8.11	Amplificateurs stabilisés	303
6.2	Le transistor polarisé	183	8.12	Dépannage	307
6.3	Courants du transistor	185	Réviser		309
6.4	Le montage émetteur commun	187	S'entraîner		312
6.5	Caractéristique I(V) de la base	189	9	Les amplificateurs à plusieurs étages, collecteur et commun	317
6.6	Caractéristique I(V) du collecteur	190	9.1	Amplificateurs à plusieurs étages	318
6.7	Approximations du transistor	195	9.2	La réaction à deux étages	322
6.8	Lecture d'une fiche technique	199	9.3	L'amplificateur émetteur-suiveur	324
6.9	Transistors montés en surface	204	9.4	L'impédance de sortie	329
6.10	Variations du gain en courant	206	9.5	Mise en cascade d'amplis EC et CC	333
6.11	La droite de charge	207	9.6	Le montage Darlington	335
6.12	Le point de fonctionnement	213	9.7	Régulation de tension	338
6.13	Identification de la saturation	215	9.8	L'amplificateur base commune	341
6.14	Le transistor en commutation	218	9.9	Débogage d'amplificateurs à plusieurs étages	345
6.15	Dépannage	219	Réviser		347
Réviser		224	S'entraîner		348
S'entraîner		226	10	Les amplificateurs de puissance	357
7	Le transistor : principes fondamentaux	233	10.1	Nomenclature des amplificateurs	358
7.1	Polarisation par l'émetteur	234	10.2	Les deux droites de charge	360
7.2	Commandes de LED	237	10.3	Fonctionnement en classe A	365
7.3	Dépannage	240	10.4	Fonctionnement en classe B	373
7.4	Autres composants optoélectroniques	242	10.5	Amplificateur push-pull classe B	374
7.5	Polarisation par diviseur de tension	245	10.6	Polarisation des amplificateurs classe AB	379
7.6	Étude détaillée de la PDT	248	10.7	Commande des classes AB	382
7.7	Droite de charge et point Q d'une PDT	250	10.8	Fonctionnement en classe C	384
7.8	Polarisation émetteur à deux sources	253	10.9	Formules de la classe C	387
7.9	Autres polarisations	257	10.10	Puissance maximale admissible du transistor	393
7.10	Dépannage	260	Réviser		396
7.11	Transistors <i>npn</i>	261	S'entraîner		399
Réviser		263	11	Les transistors JFET	405
S'entraîner		265	11.1	Concept fondamental	406
8	Les amplificateurs bipolaires de base	273	11.2	Caractéristiques du courant drain	408
8.1	Amplificateur polarisé par la base	274	11.3	La caractéristique de transfert	410
8.2	Amplificateur polarisé par l'émetteur	279	11.4	Polarisation en région ohmique	412
8.3	Fonctionnement petit signal	282			

11.5	Polarisation en région active	414	14.6	Diagrammes de Bode	577
11.6	La transconductance	424	14.7	Autres diagrammes de Bode	581
11.7	Amplificateurs à JFET	427	14.8	L'effet Miller	588
11.8	Le JFET en commutation analogique	433	14.9	Relation entre temps de montée et bande passante	591
11.9	Autres applications du JFET	437	14.10	Réponse en fréquence des étages à transistors bipolaires	594
11.10	Lecture d'une fiche technique	445	14.11	Réponse en fréquence des étages à transistors à effet de champ	602
11.11	Test d'un JFET	448	Réviser	608	
Réviser	449		S'entraîner	610	
S'entraîner	451				
12	Les transistors MOSFET	459	15	Les amplificateurs différentiels	617
12.1	Le MOSFET à appauvrissement	460	15.1	L'amplificateur différentiel	618
12.2	Caractéristiques du transistor D-MOSFET	460	15.2	Étude DC de l'ampli différentiel	621
12.3	Amplificateurs à transistors D-MOSFET	461	15.3	Étude AC de l'ampli différentiel	626
12.4	Le MOSFET à enrichissement	463	15.4	Les grandeurs d'entrée de l'ampli opérationnel	633
12.5	La région ohmique	466	15.5	Gain mode commun	640
12.6	Commutation numérique	473	15.6	Circuits intégrés	643
12.7	Le MOS complémentaire (CMOS)	477	15.7	Le miroir de courant	647
12.8	Les MOS de puissance	478	15.8	L'ampli différentiel chargé	649
12.9	Commutateurs de charge MOSFET haut potentiel	487	Réviser	651	
12.10	Pont en H MOSFET	491	S'entraîner	653	
12.11	Amplificateur à transistor E-MOSFET	497			
12.12	MOSFETs à large bande (WBG)	501	16	Les amplificateurs opérationnels	659
12.13	Test du transistor MOSFET	505	16.1	Introduction	660
Réviser	507		16.2	L'ampli op 741	661
S'entraîner	509		16.3	Le montage amplificateur inverseur	672
13	Les thyristors	517	16.4	L'amplificateur non inverseur	679
13.1	La diode à quatre couches	518	16.5	Deux autres applications de l'ampli op	684
13.2	Le redresseur au silicium commandé	522	16.6	Circuits intégrés linéaires	690
13.3	Protection contre les surtensions par SCR	531	16.7	Les amplis op en composant de surface	694
13.4	SCR commandé par la phase	534	Réviser	695	
13.5	Les thyristors bidirectionnels	538	S'entraîner	697	
13.6	Le transistor IGBT	544			
13.7	Autres thyristors	549	17	La contre-réaction	703
13.8	Dépannage	553	17.1	Les quatre types de contre-réactions	704
Réviser	553		17.2	Gain en tension d'un amplificateur SVCV	706
S'entraîner	555		17.3	Autres propriétés des amplis SVCV	709
14	Effets de la fréquence	561	17.4	L'amplificateur SVCI	714
14.1	Réponse en fréquence d'un amplificateur	562	17.5	L'amplificateur SICV	716
14.2	Gain en puissance en décibels	567	17.6	L'amplificateur SICI	718
14.3	Gain en tension en décibels	571	17.7	La bande passante	720
14.4	L'adaptation d'impédance	573	Réviser	724	
14.5	Décibels au-dessus d'un niveau de référence	575	S'entraîner	726	

18 Les circuits linéaires à amplificateurs opérationnels 733

- 18.1 Les amplificateurs inverseurs 734
- 18.2 Les amplificateurs non inverseurs 736
- 18.3 Les circuits inverseur / non inverseur 740
- 18.4 Les amplificateurs différentiels 745
- 18.5 Les amplificateurs d'instrumentation 751
- 18.6 Les amplificateurs sommateurs 756
- 18.7 Les amplificateurs de courant 761
- 18.8 Les sources de courant commandées en tension 763
- 18.9 Le contrôle automatique de gain 767
- 18.10 Fonctionnement à alimentation unique 770

Réviser 772
S'entraîner 774

19 Les filtres actifs 781

- 19.1 Réponses idéales 782
- 19.2 Caractéristiques de réponse 786
- 19.3 Filtres passifs 797
- 19.4 Étages du premier ordre 801
- 19.5 Filtre passe-bas du deuxième ordre à gain unité SVCV 806
- 19.6 Filtres d'ordre supérieur 812
- 19.7 Filtres passe-bas à composants identiques SVCV 815
- 19.8 Filtres passe-haut SVCV 819
- 19.9 Filtres passe-bande à réactions multiples 822
- 19.10 Filtres coupe-bande 826
- 19.11 Filtres passe-tout 828
- 19.12 Filtres biquadratiques et filtres à variables d'état 833

Réviser 837
S'entraîner 839

20 Les circuits non linéaires à amplificateurs opérationnels 843

- 20.1 Les comparateurs à zéro 844
- 20.2 Les comparateurs à valeurs non nulle 851
- 20.3 Les comparateurs à hystérésis 856
- 20.4 Les comparateurs à fenêtre 862
- 20.5 L'intégrateur 863
- 20.6 Conversion de la forme des signaux 866
- 20.7 Génération de signaux 870
- 20.8 Autre générateur de signal triangulaire 873
- 20.9 Circuits actifs à diodes 875
- 20.10 Les différentiateurs 878
- 20.11 L'amplificateur classe D 880

Réviser 886
S'entraîner 888

21 Les oscillateurs 895

- 21.1 Théorie de l'oscillation sinusoïdale 896
- 21.2 L'oscillateur à pont de Wien 897
- 21.3 Autres oscillateurs RC 903
- 21.4 L'oscillateur Colpitts 904
- 21.5 Autres oscillateurs LC 910
- 21.6 Le cristal de quartz 913
- 21.7 Le temporisateur 555 919
- 21.8 Fonctionnement du temporisateur 555 en astable 925
- 21.9 Montages à base du temporisateur 555 930
- 21.10 La boucle à verrouillage de phase 938
- 21.11 Générateur de fonction monolithique 941

Réviser 947
S'entraîner 949

22 Les alimentations régulées 955

- 22.1 Caractéristiques des alimentations 956
- 22.2 Les régulateurs shunts 958
- 22.3 Les régulateurs séries 965
- 22.4 Les régulateurs intégrés 975
- 22.5 Les élévateurs de courant 983
- 22.6 Les convertisseurs DC-DC 984
- 22.7 Les régulateurs à découpage 986

Réviser 1001
S'entraîner 1003

23 Industrie 4.0 1009

- 23.1 Industrie 4.0 : une vue d'ensemble 1010
- 23.2 Capteurs intelligents 1012
- 23.3 Différents types de capteurs 1013
- 23.4 Capteurs passifs 1014
- 23.5 Capteurs actifs 1023
- 23.6 Conversion des données 1030
- 23.7 Transfert de données 1033

Réviser 1037
S'entraîner 1038

 Annexes 1045

 Réponses aux exercices impairs 1051

 Index 1057

Avant-propos

La neuvième édition de *Principes électroniques* poursuit sa tradition en fournissant une introduction approfondie et clairement expliquée aux dispositifs et circuits électroniques à semi-conducteurs et à leur utilisation dans des applications système. Ce manuel est destiné aux étudiants qui suivent leur premier cours d'électronique linéaire mais, avec sa couverture thématique complète, il peut également être utilisé dans les cours d'électronique à semi-conducteurs du deuxième et du troisième semestre. Les prérequis sont une connaissance de base des circuits DC/AC, de l'algèbre et un peu de trigonométrie. *Principes d'électronique*, neuvième édition, peut servir d'excellent manuel complémentaire à l'ouvrage de Mitchel Schultz, *Basic Electronics*, chez Grob.

Principes d'électronique fournit une compréhension approfondie des caractéristiques des semi-conducteurs, des tests et des circuits dans lesquels on les trouve. Le texte présente des concepts clairement expliqués – rédigés dans un style argumenté facile à lire – établissant les bases nécessaires pour comprendre le fonctionnement et le débogage des systèmes électroniques. Des exemples de circuits, des applications et des exercices de débogage de pannes sont présentés tout au long des chapitres. Des fichiers de simulation de circuit Multisim sont utilisés dans le manuel pour « donner vie aux circuits » et aider à développer les compétences de débogage.

Ces fichiers de simulation peuvent être trouvés et téléchargés sur la page de l'ouvrage sur le site dunod.com.

Le chapitre 1, « Introduction », définit le plan du reste du manuel. Si certains sujets sont des révisions, ce chapitre sert à s'assurer que tous les étudiants comprennent les bases des sources de tension, des sources de courant, du théorème de Thévenin et du théorème de Norton. Il introduit l'utilisation des approximations appliquées à l'électronique. Les concepts de débogage de pannes sont passés en revue et développés, et les techniques de débogage en courant DC et AC sont examinées.

Les chapitres 2 à 10 couvrent les bases de la structure des semi-conducteurs, la théorie des diodes, les circuits à diodes avec leurs utilisations pour les alimentations électriques, les diodes à usage spécial dont la diode zener, les dispositifs optoélectroniques, l'introduction du transistor à jonction bipolaire (BJT), la polarisation du BJT et les amplificateurs BJT, ainsi que les amplificateurs de puissance multi-étages et BJT.

Les chapitres 11 à 13 traitent des transistors à effet de champ (FET) et des thyristors. Cela comprend les caractéristiques des dispositifs, les circuits et les applications des transistors à effet de champ à jonction (JFET) et des MOSFET, ainsi qu'une introduction aux transistors de puissance à large bande (WBG) utilisant le nitrure de gallium (GaN) et le carbure de silicium (SiC). Les concepts de circuits de puissance en demi-pont et en pont en H sont également expliqués. Les sujets relatifs aux thyristors comprennent les SCR, les diacs, les triacs, les UJT et les IGBT.

Dédicace

Cette neuvième édition de *Principes d'électronique* est dédiée à tous les étudiants qui font l'effort de comprendre et d'apprendre les bases de l'électronique.

Les chapitres 14 à 17 traitent de la réponse en fréquence des amplificateurs, des diagrammes de Bode, de la largeur de bande, des concepts de base des amplificateurs différentiels, des caractéristiques électriques et du comportement des amplificateurs opérationnels (amplis op), et des concepts de rétroaction négative.

Les chapitres 18 à 22 explorent les applications de l'ampli-op. On y trouve des applications d'ampli-op linéaire, des filtres actifs, des applications d'ampli-op non linéaire, des oscillateurs et des alimentations électriques régulées. Nous entrons dans la quatrième révolution industrielle qui s'appelle « Industrie 4.0 ».

Le chapitre 23, écrit par Pat Hoppe, est tout nouveau dans ce manuel. Il donne un aperçu de l'Industrie 4.0, ainsi qu'un aperçu de la technologie associée qui rend cette prochaine révolution possible : capteurs intelligents, capteurs passifs, capteurs actifs, conversion et échange de données. Les exemples utilisés dans ce chapitre relient les concepts de l'ensemble du manuel, proposant des applications pratiques pour les composants et circuits semi-conducteurs précédemment traités.

Nouveau dans cette édition

- Des fiches sur les **Pionniers de l'électronique** ont été ajoutées en marge de plusieurs chapitres pour donner aux étudiants une idée de l'évolution et des découvertes importantes en électronique.
- Des items **Bon à savoir** élargis présentent des faits supplémentaires et intéressants sur les dispositifs et les applications des semi-conducteurs. Utilisation accrue des photos de dispositifs électroniques. Liste des expériences de laboratoire associées à la fin de chaque chapitre. Beaucoup d'efforts ont été déployés pour que le manuel et les expériences fonctionnent comme un ensemble unifié de connaissances et de compétences.
- Nouvelle section 1.7, « Débogage de circuits AC » avec présentation des techniques de traçage des signaux d'oscilloscopes et des méthodes de débogage par dichotomie. Cette section reflète les nouvelles procédures de débogage dans le manuel d'expériences associé.
- Exemple d'un système de détection et de télémétrie par la lumière (LiDAR) dans la section optoélectronique du chapitre 5.
- Le manuel Multisim, qui figurait auparavant dans l'annexe C, a été déplacé vers le centre de formation en ligne (OLC) associé.
- Introduction aux semi-conducteurs à large bande en carbure de silicium (SiC) et en nitrure de gallium (GaN).
- Développements sur l'amplificateur multi-étages.
- Débogage à l'aide des techniques de traçage des signaux et de débogage par dichotomie.
- Débogage approfondi des amplificateurs de puissance de classe AB.
- Nouvelle section 7.12, « MOSFETs à large bande (WBG) », comprenant les caractéristiques des matériaux, les structures et le fonctionnement des transistors à haute mobilité d'électrons (HEMT) en GaN et SiC.
- Le nouveau chapitre 23, « Industrie 4.0 », introduit les concepts de la quatrième révolution industrielle. La présentation détaillée des capteurs et de la conversion des données, avec des exemples reliant les dispositifs à semi-conducteurs et les circuits couverts dans les chapitres précédents, fait office de chapitre principal synthétisant l'ensemble du manuel.

Mode d'emploi de l'ouvrage

Cet ouvrage contient plusieurs rubriques qui accompagnent le lecteur dans son apprentissage. Pédagogiques, elles permettent à l'étudiant d'apprendre, de comprendre, de retenir et de valider les compétences acquises.

Objectifs

Une liste concise d'objectifs présente les compétences qui seront acquises au cours du chapitre.

Vocabulaire

Les mots-clés de la thématique abordée dans le chapitre sont listés, et sont ensuite identifiés en gras dans le texte.

En quelques mots

Le sujet du chapitre est introduit en quelques lignes.

Les oscillateurs

21

Objectifs

- Expliquer le gain de boucle et la phase ainsi que leur rapport avec les oscillateurs sinusoïdaux.
- Décrire le fonctionnement de plusieurs oscillateurs RC sinusoïdaux.
- Décrire le fonctionnement de plusieurs oscillateurs LC sinusoïdaux.
- Expliquer le fonctionnement des oscillateurs à quartz.
- Présenter le temporisateur 555, ses modes de fonctionnement et son utilisation en oscillateur.
- Expliquer le fonctionnement des boucles à verrouillage de phase.
- Décrire le fonctionnement du générateur de signaux XR-2206.

Vocabulaire

Astable	Fréquence de résonance	Monostable	Oscillateur commandé en tension (VCO)
Boucle à verrouillage de phase (PLL)	Fréquence fondamentale	Multivibrateur	Oscillateur d'Armstrong
Capacité des armatures	Logarithme naturel	Multivibrateur bistable	Oscillateur de Hartley
Circuit d'avance-retard	Modulation de fréquence (FM)	Oscillateur à cristal de quartz	Oscillateur Pierce à cristal
Convertisseur tension-fréquence	Modulation de fréquence (FSK)	Oscillateur à déphasage	Plage de capture
Démodulateur FM	Modulation d'impulsions en largeur	Oscillateur à double T	Plage de verrouillage
Détecteur de phase	Modulation d'impulsions en position	Oscillateur à pont de Wien	Porteuse
Effet piézoélectrique		Oscillateur Clapp	Signal de modulation
Filtre réjecteur		Oscillateur Colpitts	

En quelques mots

Aux fréquences inférieures à 1 MHz, on utilise les oscillateurs RC pour produire des signaux sinusoïdaux presque parfaits. Ces oscillateurs basses fréquences sont réalisés avec des amplis op et des circuits RC pour fixer la fréquence des oscillations. Au-dessus de 1 MHz, on prend les oscillateurs LC ; ils utilisent des transistors et des circuits LC. Ce chapitre présente aussi un circuit très courant appelé *temporisateur 555*. On le trouve dans beaucoup d'applications qui donnent des retards, dans des oscillateurs contrôlés en tension et dans des générateurs de signaux à sortie modulée. Le chapitre se termine par un montage très important en télécommunications appelé *boucle à verrouillage de phase (PLL)* et conclut par une présentation du générateur de signaux XR-2206.

940 ● Chapitre 21 Les oscillateurs

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONT'D)

Parameters	XR-2206MP			XR-2206CPD			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
Amplitude Modulation								
Input Impedance	50	100		50	100		kΩ	
Modulation Range							%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	For 95% modulation
Square-Wave Output								
Amplitude		12			12		Vp-p	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		ns	$C_L = 10pF$
Fall Time		50			50		ns	$C_L = 10pF$
Saturation Voltage		0.2	0.4		0.2	0.6	V	$I_L = 2mA$
Leakage Current		0.1	20		0.1	100	μA	$V_{CC} = 20V$
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	2.4	0.8	1.4	2.4	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	3.3	2.5	3	3.5	V	Measured at Pin 10.

Figure 21.52

b) Fiche technique du XR-2206 (Générateur monolithique de fonctions XR-2206. Exar Corporation, 2008).

Fiche technique

Des fiches techniques sont présentées, elles permettent à l'étudiant de se familiariser avec leur contenu et leur usage.

Questions

Chaque chapitre comporte des exercices d'entraînement. Présentés sous forme de questions-réponses, ils comportent à chaque fois la solution et le raisonnement ayant permis de l'atteindre.

Avez-vous compris ?

À la suite d'une *Question*, ces sujets complémentaires permettent de vérifier que l'exercice est compris. Les réponses sont fournies à chaque fin de chapitre.

Question 21.13

Sur la figure 21.50, fixer $R = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$. Si l'interrupteur S_1 est fermé, quelles sont les formes et les fréquences des signaux de sortie sur les broches 2 et 11 ?

Réponse Comme l'interrupteur S_1 est fermé, le signal de sortie sur la broche 2 est sinusoïdal. Il est carré sur la broche 11. Les deux signaux ont la même fréquence, qui est égale à :

$$f_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{(10 \text{ k}\Omega)(0,01 \text{ }\mu\text{F})} = 10 \text{ kHz}$$

21.13 Avez-vous compris ? Refaire l'exercice 21.13 en prenant $R = 20 \text{ k}\Omega$ et $C = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$, et lorsque l'interrupteur S_1 est ouvert.

Question 21.14

Sur la figure 21.51, fixer $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ et $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$. Déterminer la fréquence du signal carré en sortie et le coefficient de remplissage.

Réponse En utilisant la relation (21.32), la fréquence du signal de sortie est égale à :

$$f = \frac{2}{0,01 \text{ }\mu\text{F}} = \left[\frac{1}{1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} \right] = 6,67 \text{ kHz}$$

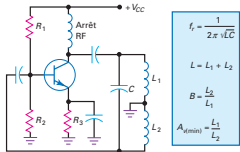
À retenir

Ces encarts font ressortir les valeurs ou notions clés qu'il faut mémoriser.

Recommandations

Des explications et des recommandations sur l'utilisation du matériel électronique sont données.

Comme d'habitude, on a négligé l'effet de charge de la résistance de base. Pour le démarrage des oscillations, le gain en tension doit être supérieur à 1/B.



$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 L_2}}$
 $L = L_1 + L_2$
 $B = \frac{L_2}{L_1}$
 $A_{d(min)} = \frac{L_1}{L_2}$

Figure 21.22 Oscillateur Hartley.

Bon à Savoir

Dans l'oscillateur Colpitts, l'inductance est ajustée pour faire varier la fréquence des oscillations, alors que dans un oscillateur Hartley, le condensateur est ajusté pour faire varier la fréquence des oscillations.

Bon à Savoir

Ces encarts, situés dans la marge, sont destinés à préciser une information ou à l'illustrer.

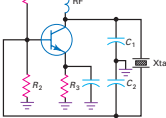


Figure 21.24 Oscillateur à cristal.

Question 21.4

Si, dans la figure 21.20, 50 pF sont ajoutés en série avec l'inductance 15 µH, le circuit devient un oscillateur Clapp. Quelle est la fréquence des oscillations ?

Réponse On calcule la capacité équivalente avec la relation (21.17) :

$$C = \frac{1}{\frac{1}{1/0,001 \mu F + 1/0,01 \mu F + 1/50 \text{ pF}}} = 50 \text{ pF}$$

Remarque : comme la grandeur 1/50 pF balaye les autres valeurs, car 50 pF c'est beaucoup plus petit que les autres capacités. La fréquence des oscillations est :

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{(15 \mu H)(50 \text{ pF})}} = 5,81 \text{ MHz}$$

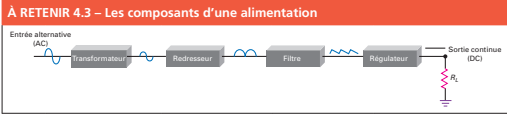
21.4 Avez-vous compris ? Refaire l'exercice 21.4 en remplaçant la capacité de 50 pF par une capacité de 120 pF.

Multisim

Ce logo indique qu'il existe un fichier numérique réalisé avec le logiciel NI Multisim et qu'une mise en pratique est possible. Plus de 350 fichiers sont proposés afin que le lecteur puisse s'exercer en conditions « réelles », mesurer les variables, détecter les erreurs, dépanner les circuits...

4.9 Dépannage ● 111

À RETENIR 4.3 – Les composants d'une alimentation



Rôle	Types
Fournit la tension alternative appropriée et une isolation par rapport à la masse	Abaisseur ou éleveur de tension, isolateur (1/1)
Change la tension alternative en une tension continue redressée	Simple ou double alternance, en pont
Lisse la tension continue redressée	LC, RC
Délivre une tension continue quasi constante sur la résistance de charge	À composants discrets, à circuit intégré

4.9 Dépannage

La plupart des parties d'un équipement électronique ont une alimentation, généralement un redresseur alimentant un filtre à condensateur en tête suivi d'un régulateur de tension (envisagé plus tard). Cette alimentation produit la tension continue nécessaire aux transistors et aux autres composants. Si une partie d'un appareillage électronique ne fonctionne pas correctement, commencez le dépannage par l'alimentation. Le plus souvent, la défaillance est provoquée par des problèmes d'alimentation. Lors du débogage d'une alimentation électrique, n'oubliez pas de décomposer le circuit en blocs fonctionnels, comme indiqué dans le tableau récapitulatif 4.3. Vous pouvez alors mesurer les entrées et les sorties, et utiliser des techniques de débogage par dichotomie pour trouver le défaut.

4.9.1 Procédure

Supposons que vous dépanniez le circuit représenté par la figure 4.22. On mesure d'abord la tension continue sur la charge. Elle doit être approximativement la même que la tension crête au secondaire ; si ce n'est pas le cas, il y a deux procédures possibles.

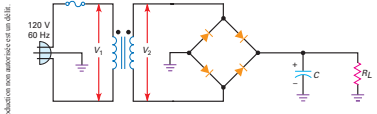


Figure 4.22 Dépannage

Première procédure. En l'absence de tension sur la charge, on prend un multimètre sans masse pour mesurer la tension sur le secondaire (gamme AC). La mesure donne la tension efficace apparaissant sur l'enroulement secondaire. On la convertit en valeur crête en l'augmentant d'environ 40 %. Si elle est correcte, les diodes sont défectueuses. S'il n'y a pas de tension au secondaire, soit le fusible est fondu, soit le transformateur est défectueux.

Photos et schémas

L'ouvrage présente plus de 1 000 illustrations et schémas en couleur.

5.6 Dépannage ● 153

court-circuitée (symbole D_{sc}) ou ouverte (D_{oc}). De même pour la résistance de charge : en court-circuit (R_{sc}) ou coupée (R_{oc}). Pour finir, le fil de connexion entre B et C peut être coupé (BC_{oc}).

Dans le tableau, la deuxième ligne donne les tensions mesurées pour la résistance en série court-circuitée R_{sc} . Dans ces conditions, 18 V apparaissent en B et C, cela détruit la diode Zener et probablement la résistance de charge. Pour cette panne, un voltmètre mesure 18 V en A, B et C.

Si la résistance en série est coupée dans la figure 5.16, la tension ne peut atteindre le point B ; donc B et C ont une tension nulle, comme l'indique l'encart *À retenir* 5.2. En continuant de cette manière, vous pouvez terminer les lignes restantes.

Dans l'encart, nous avons en remarque les défauts qui peuvent être occasionnés par le court-circuit initial. Par exemple, une résistance en série R_s en court-circuit peut entraîner la destruction de la diode Zener et aussi la mise en circuit ouvert de la résistance de charge. Cela dépend de la gamme de puissance de cette résistance. R_s en court-circuit donne 18 V sur la résistance 1 kΩ, soit la puissance 0,324 W ; si la gamme de puissance de la résistance est 0,25 W, elle peut être en circuit ouvert.

Certains problèmes de l'encart 5.2 donnent des tensions uniques et d'autres des tensions ambiguës. Par exemple, les séries de tension pour R_{sc} , D_{sc} , BC_{oc} et l'absence d'alimentation sont uniques. Si vous les mesurez, vous identifiez le défaut sans démonter le circuit pour faire les tests à l'ohmmètre.

Tous les autres défauts de l'encart 5.2 donnent des tensions ambiguës, deux problèmes ou plus ont la même série de tensions. Dans ce cas, il faut démonter le circuit et mesurer les résistances ou les composants suspects. Par exemple, supposons que les mesures soient 18 V en A, 0 V en B et C ; les défauts possibles sont R_{sc} , D_{sc} et R_{Lsc} .

Les diodes Zener peuvent être testées de différentes façons. Avec un multimètre numérique on peut effectuer diverses mesures sur une diode, en mode normal, en court-circuit ou coupée. En mode normal la tension directe est d'environ 0,7 V. En inverse, il est difficile de déterminer si la tension de Zener V_Z a une valeur appropriée ou non. Avec un oscilloscope traceur de courbe, comme celui de la figure 5.17, on peut afficher directement à l'écran la courbe caractéristique de la diode, faisant apparaître ses caractéristiques directes et inverses dont il est possible de lire les valeurs. Si l'on ne dispose pas d'un tel oscilloscope, une simple mesure de tension aux bornes de la diode lorsqu'elle est en fonctionnement peut suffire.



Figure 5.17 Un oscilloscope traceur de courbe (© Tektronix®, reproduite avec autorisation. Tous droits réservés)

Réviser

Ces résumés sont utiles pour réviser ses examens ou pour s'assurer que l'on a bien assimilé les principales notions. Les définitions importantes sont rappelées pour consolider ses connaissances.

Réviser

Résumé

21.1 Théorie de l'oscillation sinusoïdale

Pour réaliser un oscillateur, il faut utiliser un amplificateur avec une réaction positive. Pour le départ des oscillations, le gain de boucle doit être supérieur à un et le déphasage de la boucle doit être nul.

21.2 L'oscillateur à pont de Wien

C'est l'oscillateur standard pour les basses et moyennes fréquences dans la gamme de 5 Hz à 1 MHz. Il donne un signal sinusoïdal presque parfait. Une lampe au tungstène ou toute autre résistance non linéaire fait décroître le gain

et 500 MHz. Cette gamme de fréquence est au-delà de la fréquence f_T de la plupart des amplis op, ce qui explique que ce soit généralement un transistor bipolaire ou un transistor JFET qui amplifie dans ce type d'oscillateurs. L'oscillateur Colpitts est un des oscillateurs LC les plus utilisés.

21.5 Autres oscillateurs LC

Les oscillateurs Armstrong utilisent un transformateur pour produire le signal de réaction. Dans le même but, l'oscillateur Hartley emploie un diviseur de tension inductif. L'oscillateur Clapp possède un condensateur de faible capacité en série dans la branche inductive du circuit résonant. Cela diminue l'effet des capacités parasites sur la fréquence de résonance.

S'entraîner

Auto-évaluation

- Un oscillateur nécessite toujours un amplificateur avec :
 - ☐ a) une réaction positive
 - ☐ b) une réaction négative
 - ☐ c) les deux types de réaction
 - ☐ d) un circuit LC parallèle
- La tension qui amorce les oscillations est causée par :
 - ☐ a) l'ondulation résiduelle de l'alimentation
 - ☐ b) la tension de bruit sur les résistances
 - ☐ c) le signal d'entrée venant d'un générateur
 - ☐ d) la réaction positive

- Un circuit d'avance possède un déphasage :
 - ☐ a) compris entre 0 et 90°
 - ☐ b) supérieur à 90°
 - ☐ c) compris entre 0 et -90°
 - ☐ d) le même que la tension d'entrée
- Un oscillateur à pont de Wien utilise :
 - ☐ a) une réaction positive
 - ☐ b) une réaction négative
 - ☐ c) les deux types de réaction
 - ☐ d) un circuit LC parallèle
- Au départ, le gain de boucle d'un pont de Wien est :
 - ☐ a) 0
 - ☐ b) faible

S'entraîner

Des exercices et des problèmes corrigés, de difficulté progressive et regroupés par sujet, viennent compléter des questionnaires à choix multiples (QCM). Des questions, qui pourraient être posées lors d'un entretien d'embauche, permettent à l'étudiant de parfaire sa préparation.

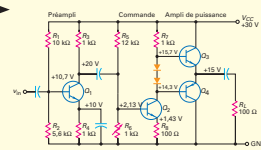


Figure 10.43

- Que vaut le courant collecteur au repos dans la figure 10.43 ?
- Quel est le gain en tension total de l'amplificateur à trois étages de la figure 10.43 ?
- 10.8 Fonctionnement en classe C**
- 10.34 Multisim** Si la tension d'entrée de la figure 10.44 vaut 5 V_{eff}, quelle est la tension d'entrée crête à crête ? Si on mesure la tension continue entre la base et la masse, quelle est la valeur trouvée ?

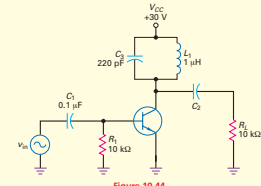


Figure 10.44

- 10.35 Multisim** Quelle est la fréquence de résonance de la figure 10.44 ?
- 10.36 Multisim** Si l'inductance de la figure 10.44 est

- Quelle est la puissance AC maximale de sortie de la figure 10.44 ?
- Si le courant d'alimentation de la figure 10.44 est 0,5 mA, quelle est la puissance DC d'entrée ?
- Quel est le rendement de la figure 10.44 si le courant d'alimentation est de 0,4 mA et la tension de sortie 30 V_{eff} ?
- D'après la figure 10.44, quelle est la bande passante de l'amplificateur si le coefficient Q de l'inductance est 125 ?
- Quelle est la dissipation de puissance du transistor la plus défavorable d'après la figure 10.44 (Q = 125) ?
- 10.10 Puissance maximale admissible du transistor**
- On utilise un transistor 2N3904 dans la figure 10.44. Si le circuit fonctionne dans une plage de températures allant de 0 à 100 °C, quelle est la puissance maximale admissible dans les cas les plus défavorables ?
- Un transistor a la courbe de réduction représentée par la figure 10.34. Quelle est la puissance maximale admissible pour la température ambiante 100 °C ?
- La fiche technique du transistor 2N3055 indique la puissance maximale admissible 115 W pour la température de boîtier 25 °C. Si le facteur de réduction est 0,657 W/°C, que vaut P_{boîtier} quand la température du boîtier est 90 °C ?

Approfondissement

- Le signal de sortie d'un amplificateur est un signal rectangulaire même lorsque l'entrée est sinusoïdale. Quelle est l'explication ?
- On utilise dans un amplificateur un transistor de puissance comme celui de la figure 10.36. Quelqu'un vous dit que puisque le boîtier est à la masse, on peut le toucher sans danger. Qu'en pensez-vous ?
- Vous êtes dans une librairie, et dans un livre d'électronique vous lisez ceci : « Certains amplificateurs peuvent avoir un rendement de 125 % ».

Dépannage

Trois sections *Dépannage*, *Grille de dépannage* et *Questions de débogage avec Multisim* entraînent l'étudiant sur une approche plus pratique et moins théorique, grâce à l'identification d'erreurs et à la résolution de problèmes techniques modélisés.

5.6 Dépannage

La figure 5.16 représente un régulateur Zener. Quand le circuit fonctionne normalement, la tension entre A et la masse est +18 V, la tension entre B et la masse +10 V et la tension entre C et la masse +10 V.

5.6.1 Symptômes uniques

Maintenant discutons de ce qui ne va pas. Quand un circuit ne fait pas ce qu'il doit, le dépanneur commence par mesurer les tensions. Ces mesures lui donnent des indices qui l'aident à isoler le problème. Par exemple, supposons les tensions suivantes :

$$V_A = +18 \text{ V} ; V_B = +10 \text{ V} ; V_C = 0$$

Voici ce qui se passe dans la tête du dépanneur après avoir fait ces mesures :

« Est-ce que la résistance de charge est coupée ? Non, la tension de sortie est encore 10 V. Est-ce que la résistance de charge est court-circuitée ? Non, cela voudrait dire que B et C sont à la masse avec 0 V. Bon, est-ce que la connexion entre B et C est coupée ? Oui, cela se pourrait bien. »

Ce défaut donne un symptôme unique. La seule raison d'obtenir cette série de tensions est un circuit ouvert entre B et C.

5.6.2 Symptômes ambigus

Tous les défauts ne donnent pas un symptôme unique, parfois deux ou trois incidents donnent la même série de tensions. En voici un exemple, soient les tensions suivantes :

$$V_A = +18 \text{ V} ; V_B = 0 ; V_C = 0$$

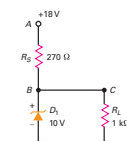


Figure 5.16
Dépannage d'un régulateur Zener.

5.8 Composants optoélectroniques

- 5.25 Multisim** Quel est le courant dans la LED de la figure 5.47 ?
- Si la tension de l'alimentation de la figure 5.46 augmente jusqu'à 40 V, quel est le courant dans la LED ?
- Si la résistance de la figure 5.47 décroît jusqu'à 1 kΩ, quel est le courant dans la LED ?
- La résistance de la figure 5.47 décroît jusqu'à ce que le courant dans la LED soit de 13 mA, quelle est alors sa valeur ?

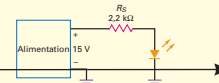


Figure 5.47

courant Zener de 21,7 mA. Le condensateur de filtrage a une tolérance de ±20 %. Quelle est la valeur crête à crête maximale de l'ondulation ?

- La figure 5.48 montre le schéma d'un éclairage de bicyclette. Les diodes sont des diodes Schottky. En utilisant la deuxième approximation, calculez la tension sur le condensateur de filtrage.

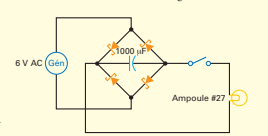


Figure 5.48

Approfondissement

- La diode Zener de la figure 5.45 présente une résistance Zener 14 kΩ. Quelle est la tension sur la charge en tenant compte de R_Z dans les calculs ?
- La diode Zener de la figure 5.45 est une 1N4744A. Si la résistance de charge varie entre 1 kΩ et 10 kΩ, quelle est la tension minimale sur la charge ? La tension maximale (utilisez la deuxième approximation) ?
- Faites un régulateur Zener pour obtenir les spécifications suivantes. Tension sur la charge : 6,8 V ; tension source : 20 V ; courant dans la charge : 30 mA.
- Le TL312 est un afficheur sept segments dont chaque segment a une chute de tension directe comprise entre 1,5 V et 2 V à 20 mA. La tension d'alimentation est +5 V. Concevez un indicateur contrôlé par des interrupteurs présentant un courant d'arrêt maximal de 140 mA.
- D'après la figure 5.46, la tension secondaire est 12,6 V_{eff} quand la tension secteur est 115 V_{eff}. Pendant la journée, la puissance délivrée varie de ±10 %, les résistances sont à ±5 %. La diode 1N4733A a une tolérance de ±5 % et une résistance Zener 7 Ω. Si R_Z vaut 500 Ω, quelle est la valeur maximale possible du courant Zener à tout moment de la journée ?
- D'après la figure 5.46, la tension secondaire est 12,6 V_{eff}, et la chute de tension directe 0,7 V pour chaque diode. La 1N5314 est une diode à courant constant de 4,7 mA. Le courant de la LED est de 15,6 mA et le

Grille de dépannage

La grille de dépannage de la figure 5.49 indique les valeurs des tensions à chaque point A, B, C et D du circuit et les conditions de fonctionnement de la diode D1 pour les divers pannes T1 à T8. La première ligne donne les valeurs à chacun des points du circuit en fonctionnement normal.

- Trouver d'où proviennent les pannes 1 à 4 dans la figure 5.49.
- Trouver d'où proviennent les pannes 5 à 8 dans la figure 5.49.

Questions de débogage avec Multisim

Pour ce chapitre, les fichiers sont intitulés **MTC08-38** à **MTC08-42** et correspondent au circuit de la figure 5.49. Ouvrez-les et effectuez les débogages avec chaque fichier. Mesurez pour déterminer s'il y a une faute et, si c'est le cas, quel est le circuit fautif.

- Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC08-38**.
- Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC08-39**.
- Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC08-40**.

Précisions sur les ressources numériques

Conçus pour une mise en pratique efficace, plus de **350 fichiers sont téléchargeables**. Réalisés avec le logiciel de conception **NI Multisim**, vous pourrez, selon le cas de figure, simuler, tester ou dépanner les circuits électroniques.

Le logiciel **Multisim** est téléchargeable sur le site de National Instrument (<http://www.ni.com/fr-fr.html>), il existe une version d'évaluation disponible gratuitement en anglais.

Un guide pour la prise en main de NI Multisim est fourni (pdf en anglais) lors du téléchargement des fichiers d'exemples sur le site des éditions Dunod.

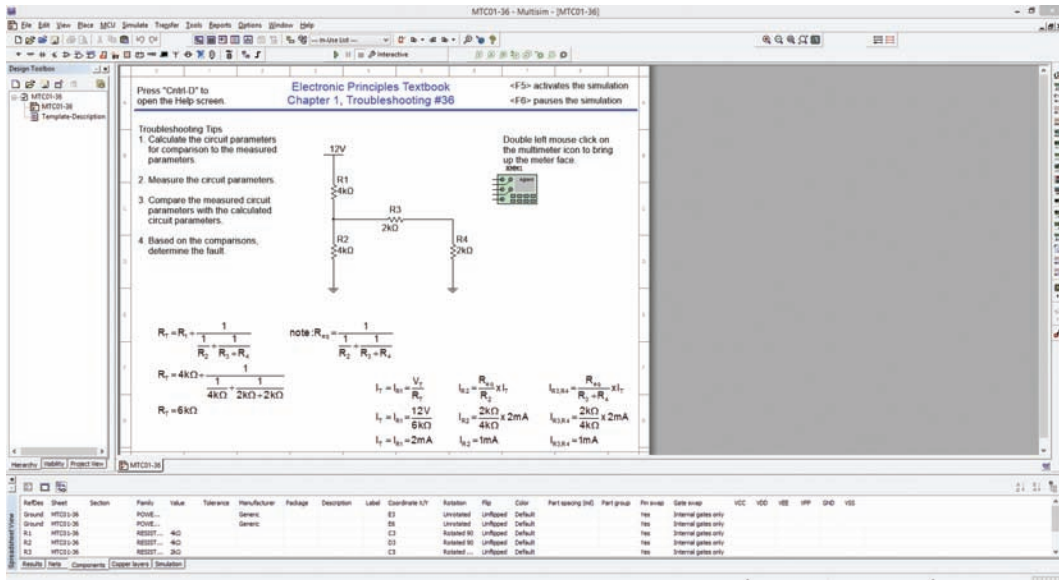


Figure A.1
Exemple de fichier téléchargeable



Toutes les ressources numériques de cet ouvrage sont téléchargeables sur le site des éditions Dunod, www.dunod.com, sur la page dédiée à l'ouvrage.

Remerciements

Merci à tous nos relecteurs, c'est grâce à eux que cette édition a pu atteindre un tel niveau de qualité : Vahe Caliskan (University of Illinois, Chicago), Allen Dickenson (Michigan Technical Education Center), Larry Flatt (Motlow State Community College), Byron Garry (South Dakota State University), David Hartle (SUNY Canton College).

Introduction

Objectifs

- Dire pourquoi les approximations sont souvent utilisées à la place de la formule exacte.
- Définir une source de tension et une source de courant idéales.
- Montrer comment identifier une source constante de tension ou de courant.
- Énoncer le théorème de Thévenin et l'appliquer à un circuit.
- Énoncer le théorème de Norton et l'appliquer à un circuit.
- Donner deux propriétés d'un court-circuit et d'un circuit ouvert.
- Appliquer les techniques de débogage en DC.
- Appliquer les techniques de traçage des signaux AC.

Vocabulaire

Approximation	Deuxième approximation	Résistance de Thévenin	Tension de Thévenin
Cas idéal	Formule	Soudure froide	Théorème
Courant de Norton	Pont de soudure	Source de courant	Traçage des signaux
Débogage par dichotomie	Principe de dualité	constant	Troisième approximation
Dépannage	Relation	Source de tension	
	Résistance de Norton	constante	

En quelques mots

Principes d'électronique est l'étude de base des dispositifs, circuits et systèmes à semi-conducteurs utilisés dans de nombreuses applications mondialement. Ce chapitre important sert de cadre pour le reste du manuel. Les sujets abordés comprennent les formules, les sources de tension, les sources de courant, les deux théorèmes de circuit, le débogage des circuits DC et des circuits AC. Bien qu'en partie ce soit une révision, plusieurs nouveautés, comme les approximations de circuit, vous permettront de mieux comprendre les composants semi-conducteurs et vous serviront de base pour une bonne compréhension de la suite de l'ouvrage.

1.1 Approximations

Nous utilisons toujours les **approximations** dans la vie courante. Si quelqu'un vous demande votre âge, vous pouvez répondre 21 (cas idéal). Vous pouvez dire plus près de 22 que de 21 (deuxième approximation) ou, pourquoi pas, 21 ans et 9 mois (troisième approximation). Enfin, pour être plus précis, vous pouvez dire 21 ans, 9 mois, 2 jours, 6 heures, 23 minutes et 42 secondes (exact).

Ceci illustre les différents niveaux d'approximation : un cas idéal, une deuxième approximation, une troisième approximation et la réponse exacte. Le niveau d'approximation à utiliser dépend du contexte. C'est vrai aussi en électronique. Dans l'étude des circuits, on doit choisir l'approximation qui convient le mieux au contexte.

1.1.1 Le cas idéal

Saviez-vous que 30 cm de fil AWG 22 à 2,5 cm d'un châssis présentent une résistance de $0,016\ \Omega$, une inductance de $0,24\ \mu\text{H}$ et une capacité de $3,3\ \text{pF}$? Tenir compte de ces données dans les calculs ferait perdre trop de temps. C'est pour cela que dans la plupart des cas on néglige la résistance, l'inductance et la capacité des fils de liaisons.

Le **cas idéal**, parfois nommé *approximation du premier ordre* ou **première approximation**, est le circuit équivalent le plus simple du montage. Par exemple, l'approximation idéale d'un morceau de fil est un conducteur de résistance nulle. Cette simplification convient pour les problèmes d'électronique usuels.

L'exception survient aux hautes fréquences, où l'inductance et la capacité du fil interviennent. Supposons une longueur de fil présentant une inductance de $0,24\ \mu\text{H}$ et une capacité de $3,3\ \text{pF}$. À 10 MHz, la réactance selfique est égale à $15,1\ \Omega$ et la réactance capacitive à $4,82\ \text{k}\Omega$. À ce stade, un concepteur de circuit ne peut plus idéaliser une longueur de fil. En fonction du reste du circuit, l'impédance d'un fil de liaison peut être importante.

En règle courante, on idéalise un conducteur aux fréquences inférieures à 1 MHz. Mais le soin du câblage reste important. En pratique, il faut réaliser des connexions aussi courtes que possible pour éviter les problèmes aux hautes fréquences.

Pour un dépanneur, la première approximation est en général suffisante car il recherche de grands écarts de courants et de tensions. Dans ce livre, nous idéaliserons les composants semi-conducteurs par des circuits équivalents simples, ce qui rendra plus facile l'analyse et la compréhension du fonctionnement des montages à semi-conducteurs.

1.1.2 La deuxième approximation

Le modèle idéal d'une pile de flash est une source de tension de 1,5 V. La **deuxième approximation** ajoute un ou plusieurs composants à la première approximation. Par exemple, une pile de flash est une source de tension de 1,5 V en série avec une résistance de $1\ \Omega$. Celle-ci est appelée la *résistance interne* ou *résistance de source*. Si la charge est inférieure à $10\ \Omega$, la tension appliquée peut être nettement inférieure à 1,5 V à cause de la chute de tension dans la résistance

interne de la source. Dans ce cas, des calculs plus précis doivent inclure la valeur de cette résistance.

1.1.3 La troisième approximation et au-delà

La **troisième approximation** rajoute d'autres composants dans le circuit équivalent du dispositif. Au chapitre 3, il y a un exemple d'approximation du troisième ordre dans l'étude des diodes semi-conductrices.

Pour beaucoup de composants, on peut faire des approximations encore plus fines. Mais les calculs deviennent très difficiles, à tel point qu'il faut utiliser des programmes de simulation sur ordinateur pour les réaliser. C'est le cas par exemple des programmes MultiSim de National Instruments (NI), ou PSpice de Cadence/Orcad. Ces deux simulateurs sont disponibles sur le marché. La plupart des circuits et exemples présentés dans cet ouvrage ont été analysés et démontrés au moyen de programmes de ce genre.

1.1.4 Conclusion

L'approximation à utiliser dépend de ce que l'on veut faire. Pour le dépannage, la première approximation est généralement suffisante. Dans beaucoup de cas, la deuxième approximation est le meilleur choix car elle est facile d'emploi et ne nécessite pas l'usage d'un ordinateur. Pour les calculs précis, on doit employer l'ordinateur avec un logiciel du genre *Multisim*.

1.2 Sources de tension

Comme vous l'avez appris dans des cours précédents, une formule est une règle qui met en relation des quantités. La règle peut être une équation, une inégalité ou une autre formulation mathématique. Les formules peuvent être classées dans l'une de ces trois catégories :

- **Définition** : une formule inventée pour un nouveau concept.
- **Loi** : une formule pour une relation dans la nature.
- **Dérivation** : une formule élaborée à partir de mathématiques.

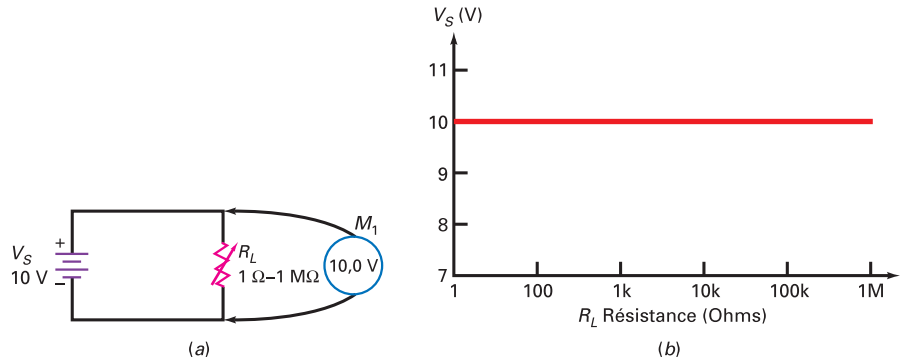
Ces catégories seront utilisées pour les domaines traités dans l'ensemble du manuel.

Une *source de tension idéale* donne une tension de sortie constante. L'exemple le plus simple d'une source de tension idéale est une batterie parfaite dont la résistance interne est nulle. La figure 1.1a représente une source de tension idéale reliée à une résistance de charge variable de $1\ \Omega$ à $10\ \text{M}\Omega$. Le voltmètre indique $10\ \text{V}$, exactement la valeur de la tension de la source.

La figure 1.1b montre la tension de sortie en fonction de la résistance de charge. La tension de sortie reste à $10\ \text{V}$ lorsque la résistance de charge varie de $1\ \Omega$ à $1\ \text{M}\Omega$. En d'autres termes, un générateur de tension idéale donne une tension de sortie constante quelles que soient les variations de la résistance de charge, seul le courant de sortie change.

Figure 1.1

(a) Source de tension idéale chargée par une résistance variable ;
 (b) la tension de sortie est indépendante de la résistance de charge.



1.2.1 Deuxième approximation

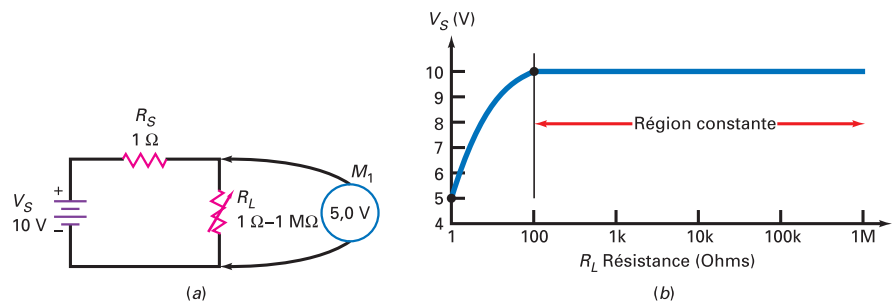
Une source de tension idéale est un composant théorique, elle n'existe pas en pratique. Pourquoi ? Quand la résistance de charge tend vers zéro, le courant de sortie tend vers l'infini. Aucune source de tension réelle ne peut donner un courant infini car elle possède une résistance interne. La deuxième approximation tient compte de cette résistance.

La figure 1.2a illustre cette remarque. Une résistance interne $R_S = 1 \Omega$ se trouve en série avec la batterie idéale. Le voltmètre indique 5 V. Pourquoi ? Parce que le courant de sortie est 10 V divisé par 2Ω , soit 5 A. Quand 5 A traversent la résistance interne de 1Ω cela produit une chute de tension interne de 5 V. C'est pourquoi la tension de sortie est seulement la moitié de sa valeur idéale, l'autre moitié se trouvant sur la résistance interne.

La figure 1.2b montre la courbe de la tension de sortie en fonction de la résistance de charge. Dans ce cas, la tension de sortie est proche de la valeur idéale si la résistance de charge est beaucoup plus grande que la résistance interne. Mais que veut dire *beaucoup plus grande* ? Quand peut-on négliger la résistance interne de la source ?

Figure 1.2

(a) Deuxième approximation : présence de la résistance de source ;
 (b) tension de sortie constante pour les grandes résistances de charge.



Bon à Savoir

Une tension d'alimentation bien régulée est un bon exemple de source de tension constante.

1.2.2 Source de tension constante

Une nouvelle définition va maintenant nous être utile : inventons-la. On peut négliger la résistance interne de la source quand elle est 100 fois plus petite que la résistance de charge R_L . Toute source qui satisfait à cette condition est une **source de tension constante** :

$$R_S < 0,01 R_L \quad (1.1)$$

Cette relation définit ce que veut dire une **source de tension constante**. La frontière de l'inégalité (là où $<$ se transforme en $=$) donne l'équation suivante :

$$R_s = 0,01 R_L$$

Elle donne la résistance de charge minimale utilisable pour obtenir une source de tension constante :

$$R_{L(\min)} = 100 R_s \quad (1.2)$$

La résistance de charge minimale est égale à 100 fois la résistance interne de la source.

L'équation (1.2) est une relation. On part de la définition d'une source de tension constante et on la transforme pour obtenir la charge minimale donnant une tension constante. Tant que la valeur de la résistance de charge est supérieure à la limite $100 R_s$, la source est à tension constante. Si cette limite est atteinte, l'erreur de calcul faite en négligeant la résistance interne de la source est de 1 %. La tension calculée est alors supérieure de 1 % à la tension évaluée avec la deuxième approximation.

La figure 1.3 visualise grossièrement une source à tension constante. La résistance de charge doit être supérieure à $100 R_s$ pour que la tension ne change pas.

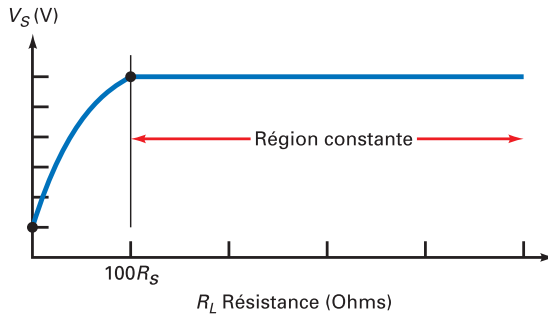


Figure 1.3

La zone de tension constante est obtenue pour des résistances de charge suffisantes.

Question 1.1

La définition de source à tension constante s'applique aussi bien aux sources continues (sources DC) qu'aux sources alternatives (sources AC). Soit une source de tension AC de résistance interne 50Ω . Pour quelle charge est-elle une source idéale ?

Réponse Pour obtenir la valeur minimale, on multiplie par 100 :

$$R_L = 100 R_s = 100(50 \Omega) = 5 \text{ k}\Omega$$

Tant que la résistance de charge est supérieure à $5 \text{ k}\Omega$, on peut négliger la résistance interne de la source qui est alors considérée comme idéale.

Un dernier point : ceci est valable uniquement aux basses fréquences. Les hautes fréquences introduisent des effets supplémentaires tels que les inductances des conducteurs et les capacités parasites. Ces phénomènes seront envisagés dans les chapitres ultérieurs.

1.1 Avez-vous compris ? Si la source de tension de la question précédente était de 600Ω , pour quelle valeur de la résistance de charge la tension serait-elle constante ?

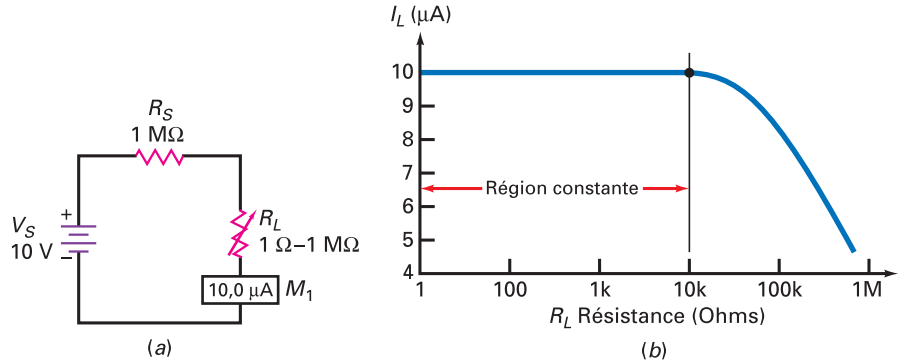
1.3 Sources de courant

Une source de tension DC fournit la même tension continue pour différentes valeurs de la charge. Une *source de courant DC* donne le même courant continu pour différentes valeurs de la charge. Un exemple est une batterie avec une grande résistance interne (figure 1.4a). Dans ce circuit, la résistance de source est $1\text{ M}\Omega$ et le courant dans la charge est :

$$I_L = \frac{V_S}{R_S + R_L}$$

Figure 1.4

(a) Simulation d'une source de courant avec une source de tension continue et une grande résistance ;
(b) le courant de sortie est constant pour de faibles résistances de charge.



Comme R_L vaut $1\text{ }\Omega$ dans l'exemple, le courant de sortie est :

$$I_L = \frac{10\text{ V}}{1\text{ M}\Omega + 1\text{ }\Omega} = 10\text{ }\mu\text{A}$$

Dans ce calcul, la faible résistance de charge a un effet négligeable sur le courant de sortie.

La figure 1.4b illustre l'effet d'une variation de la résistance de charge entre $1\text{ }\Omega$ et $1\text{ M}\Omega$. Le courant de sortie reste égal à $10\text{ }\mu\text{A}$ sur une grande gamme de valeurs, c'est seulement quand la résistance de charge est supérieure à $10\text{ k}\Omega$ qu'une diminution du courant intervient.

1.3.1 Source de courant constant

Voici une autre définition qui sera utile, spécialement pour les circuits à semi-conducteurs. Nous négligerons la résistance interne de la source quand elle sera au moins 100 fois plus grande que la résistance de charge. Toute source qui vérifie la condition suivante est une **source de courant constant** :

$$R_S > 100\text{ } R_L \quad (1.3)$$

La valeur supérieure est la plus défavorable. Dans ce cas :

$$R_S = 100\text{ } R_L$$

En résolvant pour obtenir la résistance de charge, on a une source de courant constant pour :

$$R_{L(\text{max})} = 0,01\text{ } R_S \quad (1.4)$$

Bon à Savoir

Aux sorties d'une source de courant constant, la tension de charge V_L augmente de manière directement proportionnelle à la résistance de charge.

La résistance de charge maximale est égale au centième de la résistance de source.

L'équation (1.4) est une relation, car en partant de la définition de la source de courant constant, on en a déduit la valeur maximale de la résistance de charge. Quand la charge est égale à cette limite, l'erreur est de 1 %, suffisamment faible pour être admise en deuxième approximation.

La figure 1.5 montre la zone de courant constant tant que la charge est inférieure à $0,01 R_S$.

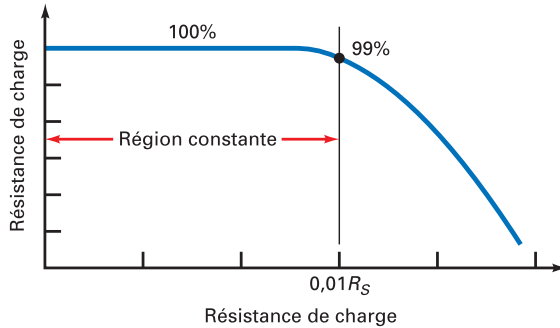


Figure 1.5

Zone de courant constant pour une résistance suffisamment faible.

1.3.2 Symboles graphiques

La figure 1.6a donne le symbole d'une source de courant idéale. Elle n'existe pas concrètement, mais seulement mathématiquement. Cependant, on peut l'utiliser pour l'analyse rapide des circuits et pour le dépannage.

La figure 1.6a est une définition visuelle : c'est le symbole d'une source de courant. Ce symbole signifie que le composant produit un courant constant I_S . On peut imaginer qu'une source de courant est comme une pompe qui enverrait un nombre fixe de coulombs par seconde. C'est pourquoi on entend souvent l'expression « la source de courant injecte 5 mA dans la résistance de charge de 1 k Ω ».

La figure 1.6b illustre la deuxième approximation. La résistance interne est en parallèle avec la source de courant idéale et non en série avec la source comme c'était le cas pour la source de tension. Nous verrons plus loin dans ce chapitre le théorème de Norton. On découvrira que la résistance interne doit être en parallèle avec la source.

L'encart *À retenir* 1.1 va nous aider à comprendre les différences entre source de tension et source de courant.

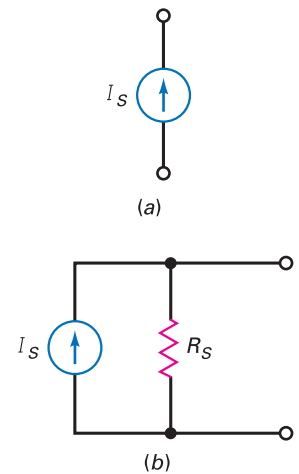


Figure 1.6

(a) Symbole d'une source de courant ;
(b) source de courant en deuxième approximation.

À RETENIR 1.1 – Propriétés de la source de tension et de la source de courant

Quantité	Source de tension	Source de courant
R_S	Typiquement faible	Typiquement grande
R_L	Plus grande que $100 R_S$	Plus petite que $0,01 R_S$
V_L	Constante	Dépend de R_L
I_L	Dépend de R_L	Constant

Question 1.2

Une source de courant de 2 mA a une résistance interne de 10 MΩ. Dans quelle gamme de résistance de charge le courant est-il constant ?

Réponse C'est une source de courant, la résistance de charge doit être petite devant la résistance interne de la source. En appliquant la règle du rapport 100/1, la plus grande résistance possible est :

$$R_{L(\max)} = 0,01(10 \text{ M}\Omega) = 100 \text{ k}\Omega$$

Le domaine de validité de l'approximation de la source de courant constant va de 0 à 100 kΩ (la source est constante dans cette gamme).

La figure 1.7 résume cette réponse. En 1.7a, la source de courant idéal est en parallèle avec 10 MΩ et 1 Ω. L'ampèremètre indique un courant de 2 mA. Quand la charge passe de 1 Ω à 1 MΩ comme en 1.7b, la source reste stable jusqu'à 100 kΩ. À cette valeur, le courant de sortie est inférieur de 1 % à sa valeur nominale. Autrement dit, 99 % du courant de la source passe dans la charge. Le 1 % restant traverse la résistance de la source. Si la résistance de charge continue à augmenter, le courant de sortie continue à diminuer.

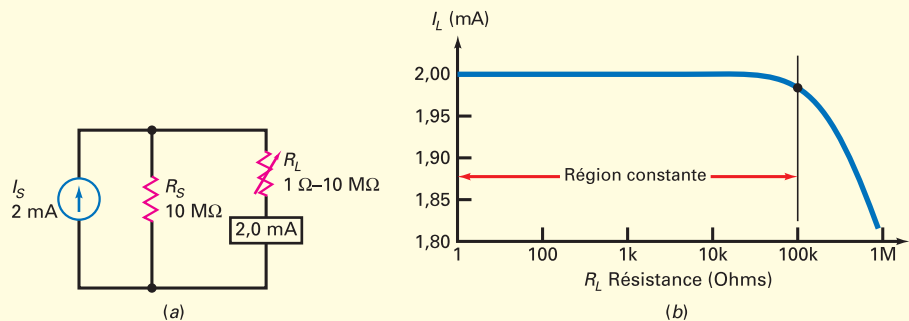


Figure 1.7

1.2 Avez-vous compris ? D'après la figure 1.7a, quelle est la tension de sortie lorsque la résistance de charge vaut 10 kΩ ?

Question 1.3

Quand nous étudierons les montages à transistors, nous assimilerons un transistor à une source de courant. Dans un circuit bien conçu, le transistor se comportera comme une source constante ; nous pourrions négliger sa résistance interne et calculer la tension sur la charge. Par exemple, si un transistor injecte 2 mA à travers une résistance de charge de 10 kΩ, la tension de sortie est 20 V.

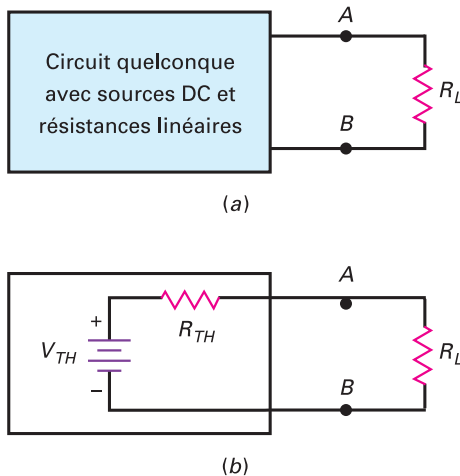
1.4 Le théorème de Thévenin

De temps en temps, quelqu'un effectue une percée technologique et fait progresser tout le monde. L.C. Thévenin, ingénieur français, a effectué l'un de ces sauts qualitatifs quand il a démontré le théorème sur les circuits qui porte son nom : le *théorème de Thévenin*.

1.4.1 Définitions de la tension et de la résistance de Thévenin

Un **théorème** est une affirmation que l'on peut démontrer mathématiquement, ce n'est ni une définition, ni une loi. Nous dirons qu'il s'agit d'une relation. Rappelons les principes acquis dans les cours précédents. Sur la figure 1.8a, la **tension de Thévenin** V_{TH} est la tension sur les bornes de sortie lorsqu'on enlève la charge. Pour cela, la tension de Thévenin est parfois appelée la *tension circuit ouvert* :

$$V_{TH} = V_{CO} \quad (1.5)$$



La **résistance de Thévenin** est la résistance mesurée par un ohmmètre branché sur la sortie quand toutes les sources sont annulées et la résistance de charge enlevée. Sa définition est :

$$R_{TH} = R_{CO} \quad (1.6)$$

Avec ces définitions, Thévenin a pu démontrer son fameux théorème.

Il y a une astuce pour déterminer la résistance de Thévenin. Réduire une source à zéro se fait de façon différente pour une source de tension ou de courant. Pour annuler une source de tension, on la remplace par un court-circuit car c'est la seule façon de garantir une tension nulle quand un courant traverse la source. Pour annuler une source de courant, on la remplace par un circuit ouvert car c'est la seule manière de garantir un courant nul quand on place une tension sur la source. En résumé :

Annuler une source de tension, c'est la remplacer par un court-circuit.
Annuler une source de courant, c'est la remplacer par un circuit ouvert.

1.4.2 Conséquences

Que dit le théorème de Thévenin ? Observons la figure 1.8a. La boîte noire contient un circuit quelconque comprenant des sources continues et des résistances linéaires (une *résistance linéaire* ne varie pas avec la tension appliquée). Thévenin a prouvé



Historic Images/Alamy Stock Photo

Pionniers de l'électronique

S'appuyant sur les fondements de la loi d'Ohm et des lois de Kirchhoff qui s'appliquaient à l'origine aux circuits DC résistifs, **Leon Charles Thévenin** (1857-1926), ingénieur français en électricité des télécommunications, a mis au point une méthode pour réduire les circuits complexes à un simple équivalent de Thévenin.

Figure 1.8

(a) Boîte noire contenant un circuit linéaire ;
(b) circuit de Thévenin.

qu'en dépit de la complexité du circuit dans la boîte noire, le courant de sortie est le même que celui obtenu avec le circuit simple représenté figure 1.8b.

Par conséquent :

$$I_L = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L} \quad (1.7)$$

Laissons l'idée s'assimiler. Le théorème de Thévenin est un outil puissant, les ingénieurs et les techniciens l'utilisent constamment. L'électronique ne serait pas ce qu'elle est actuellement sans ce théorème. Non seulement il simplifie les calculs, mais il nous permet d'expliquer le fonctionnement des circuits alors que ce serait impossible avec les seules équations de Kirchhoff.

Multisim

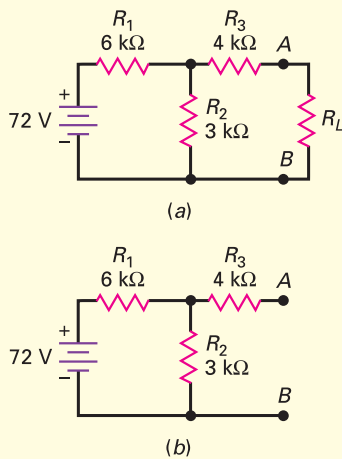


Figure 1.9

(a) Circuit de départ ;
(b) circuit ouvert pour trouver V_{TH} ;

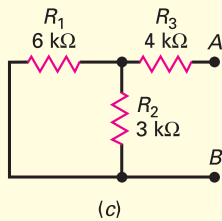


Figure 1.9

(c) annuler la source
donne R_{TH} .

Question 1.4

Quelles sont la tension et la résistance de Thévenin du circuit de la figure 1.9a ?

Réponse D'abord, calculons la tension de Thévenin. Pour cela il faut enlever la résistance de charge du circuit comme le montre la figure 1.9b. Dans ces conditions, 8 mA traversent les résistances de 6 kΩ et 3 kΩ placées en série ; donc une tension de 24 V apparaît aux bornes de la résistance de 3 kΩ. Comme aucun courant ne passe dans la résistance de 4 kΩ, une tension de 24 V existe entre A et B. De ce fait :

$$V_{TH} = 24 \text{ V}$$

Ensuite, trouvons la résistance de Thévenin. Annuler la source revient à la remplacer par un court-circuit (figure 1.9c). Un ohmmètre connecté entre A et B mesure dans ces conditions la résistance de 4 kΩ en série avec les résistances de 3 kΩ et 6 kΩ en parallèle. On peut écrire :

$$R_{TH} = 4 \text{ k}\Omega + \frac{3 \text{ k}\Omega \times 6 \text{ k}\Omega}{3 \text{ k}\Omega + 6 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ k}\Omega$$

Une nouvelle définition est nécessaire, les connexions en parallèle sont tellement fréquentes en électronique que presque tout le monde emploie une notation raccourcie. À partir de maintenant, nous utiliserons la notation suivante :

||: « en parallèle avec »

Chaque fois que deux barres verticales apparaissent dans une équation, cela signifie *en parallèle avec*. Dans la pratique, vous pouvez écrire l'équation précédente de la façon suivante :

$$R_{TH} = 4 \text{ k}\Omega + (3 \text{ k}\Omega \parallel 6 \text{ k}\Omega) = 6 \text{ k}\Omega$$

La plupart des ingénieurs et techniciens savent que les barres verticales veulent dire *en parallèle avec*. Donc, ils effectuent automatiquement le produit sur la somme pour calculer la résistance équivalente aux résistances de 3 kΩ et 6 kΩ.

La figure 1.10 illustre le circuit de Thévenin avec la résistance de charge. Il est beaucoup plus simple que le circuit original (figure 1.9a). Vous rendez-vous compte comme il est plus facile de calculer le courant de sortie pour différentes valeurs de la charge ? Sinon, la question suivante va vous convaincre.

1.4 Avez-vous compris ? Quels sont les courants dans la charge pour les valeurs suivantes de R_L : $2\text{ k}\Omega$; $6\text{ k}\Omega$; $18\text{ k}\Omega$?

Question 1.5

Une *maquette* est un circuit, réalisé généralement sans soudure et sans implémentation définitive, ayant pour but de prouver la faisabilité d'un projet. Soit le circuit de la figure 1.11a, comment allez-vous mesurer la tension et la résistance de Thévenin ?

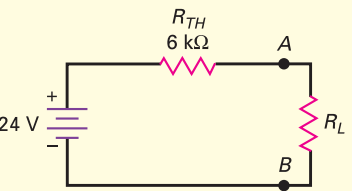
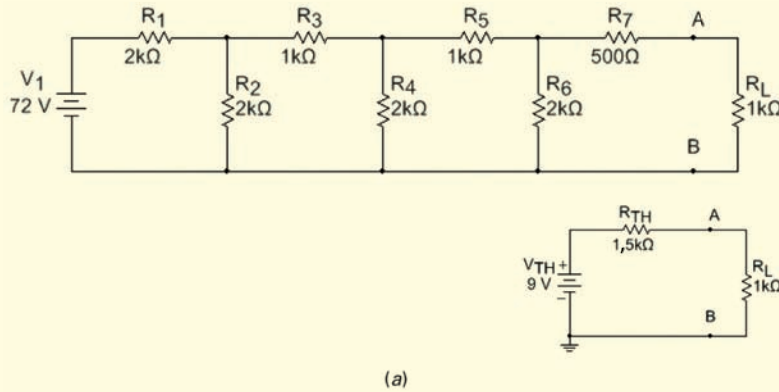


Figure 1.10
Le circuit de Thévenin pour le montage de la fig. 1.9a.

Multisim

Figure 1.11
(a) Circuit réel.

Réponse Commencez par remplacer la résistance de charge par un multimètre comme l'indique la figure 1.11b. Sur la position « mesure de tension », il indique 9 V, c'est la tension de Thévenin. Ensuite, remplacez la source par un court-circuit (figure 1.11c). Le multimètre en position ohmmètre indique $1,5\text{ k}\Omega$, c'est la résistance de Thévenin.

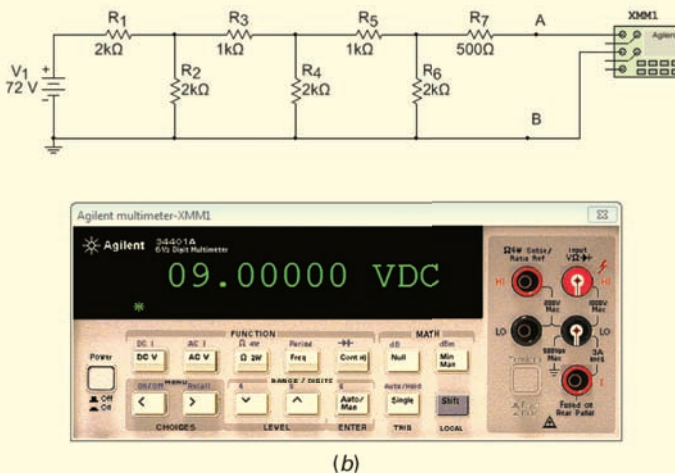
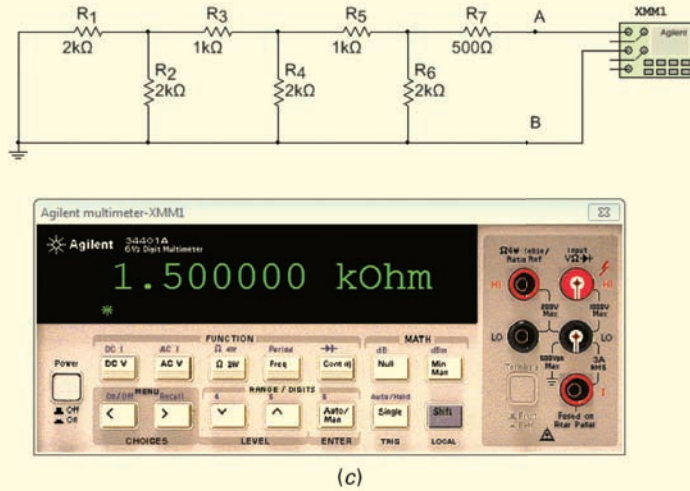


Figure 1.11
(b) Mesure de la tension de Thévenin.

**Figure 1.11**

(c) Mesure de la résistance de Thévenin.

Peut-on faire des erreurs expérimentales lors de la mesure précédente ? Oui, il faut absolument vérifier l'impédance d'entrée du voltmètre utilisé pour la mesure de la tension. En effet, cette impédance se retrouve branchée sur la sortie du montage, un faible courant traverse l'appareil de mesure. Par exemple, si on utilise un multimètre à cadran, la valeur classique de sa sensibilité est de 20 kΩ par volt. Sur l'échelle 10 V, l'appareil présente une résistance d'entrée de 200 kΩ. C'est un peu faible et sa présence fait baisser la tension de sortie de 9 V à 8,93 V.

L'impédance du voltmètre doit être au moins 100 fois plus grande que la résistance de Thévenin. Dans ce cas l'erreur de mesure est inférieure à 1 %. *Pour éliminer cette erreur, il faut utiliser un multimètre numérique à transistors à effet de champ au lieu d'un multimètre à cadran.* L'impédance d'entrée de cet appareil est au moins 10 MΩ, ce qui élimine l'erreur précédente. Une erreur de charge peut aussi se produire quand on fait des mesures avec un oscilloscope. C'est pourquoi une sonde $\times 10$ doit être utilisée pour les circuits haute impédance.

Bon à Savoir

Les théorèmes de Thévenin et de Norton s'appliquent également aux circuits comportant des inductances, des capacités et des résistances, alimentés par des sources de tension ou de courant alternatif. La résistance de Thévenin R_{TH} devient alors une impédance de Thévenin Z_{TH} et la résistance de Norton R_N une impédance de Norton Z_N . Ces impédances sont exprimées sous la forme de nombres complexes.

1.5 Le théorème de Norton

Rappelons les principes suivants au sujet du théorème de Norton. Sur la figure 1.12a, le courant de Norton I_N est le courant de sortie quand la charge est court-circuitée. Par conséquent, le **courant de Norton** est parfois nommé le *courant de court-circuit* I_{CC} :

$$I_N = I_{CC} \quad (1.8)$$

La **résistance de Norton** est la résistance mesurée par un ohmmètre branché à la sortie quand toutes les sources sont annulées et que la résistance de charge est débranchée :

$$R_N = R_{CO} \quad (1.9)$$

Comme la résistance de Thévenin est aussi égale à R_{CO} , on peut écrire :

$$R_N = R_{TH} \quad (1.10)$$

Cette relation montre que la résistance de Thévenin est égale à la résistance de Norton. Si on a trouvé une résistance de Thévenin de $10\text{ k}\Omega$, on peut immédiatement savoir que la résistance de Norton est égale à $10\text{ k}\Omega$.

1.5.1 Concept fondamental

Qu'est-ce que le théorème de Norton ? Observons la figure 1.12a. La boîte noire peut contenir un circuit quelconque avec des sources DC et des résistances linéaires. Norton a montré que le circuit contenu dans la boîte noire donne la même tension de sortie que le circuit élémentaire de la figure 1.12b. Par conséquent, le théorème de Norton s'écrit :

$$V_L = I_N (R_N \parallel R_L) \quad (1.11)$$

La tension de sortie est égale au courant de Norton multiplié par la résistance de Norton en parallèle avec la résistance de charge.

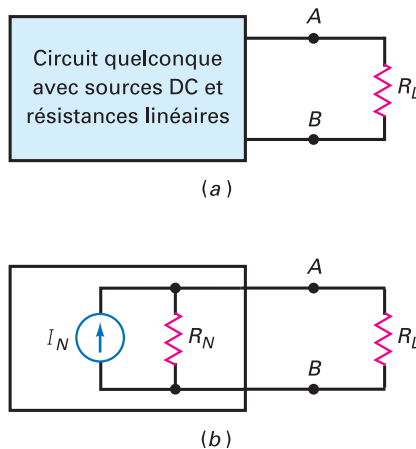


Figure 1.12
(a) Boîte noire contenant un circuit linéaire ;
(b) circuit équivalent de Norton.

Précédemment, nous avons vu que la résistance de Norton est égale à la résistance de Thévenin. Mais notons la différence de position des résistances : la résistance de Thévenin est toujours en série avec la source de tension, la résistance de Norton est toujours en parallèle avec la source de courant.

Remarque : si nous utilisons un flux d'électrons, n'oublions pas ceci. Dans l'industrie, la flèche à l'intérieur du générateur de courant est presque toujours dans la direction du courant conventionnel. Une source de courant dessinée avec une flèche en pointillé constitue l'exception. Dans ce cas, la source pousse les électrons dans la direction de la flèche discontinue.

1.5.2 Conséquences

Le théorème de Norton peut être trouvé à l'aide du **principe de dualité**. Celui-ci stipule que chaque théorème sur les circuits électriques possède son *dual* (opposé) dans lequel on remplace les grandeurs originelles par les quantités duales. Voici une brève liste de quantités duales :

Tension	$\longleftrightarrow$	Courant
Source de tension	$\longleftrightarrow$	Source de courant

Série

↔

Parallèle

Résistance série

↔

Résistance parallèle

La figure 1.13 résume le principe de dualité appliqué aux circuits de Thévenin et Norton. Cela signifie que l’on peut utiliser l’un ou l’autre dans les calculs. Comme nous le verrons plus tard, les deux circuits équivalents sont utiles. Parfois il est plus simple d’utiliser Thévenin, d’autres fois Norton. Cela dépend de la spécificité du problème.

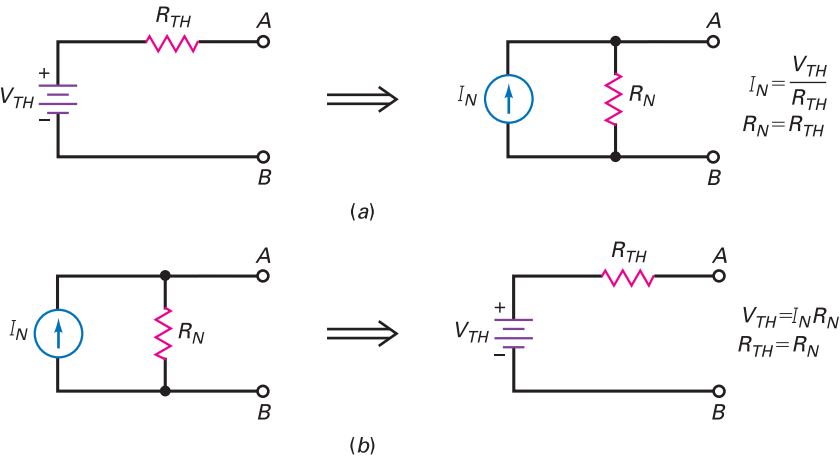


Figure 1.13
Principe de dualité : le théorème de Thévenin sous-entend le théorème de Norton et réciproquement.
(a) Conversion Thévenin → Norton ;
(b) Conversion Norton → Thévenin.

L’encart *À retenir* 1.2 résume les étapes nécessaires pour déterminer les grandeurs de Thévenin et de Norton.

À RETENIR 1.2 – Méthode de Thévenin et méthode de Norton		
Processus	Thévenin	Norton
Étape 1	Ouvrir la résistance de charge	Court-circuiter la résistance de charge
Étape 2	Calculer ou mesurer la tension du circuit ouvert. C’est la tension de Thévenin.	Calculer ou mesurer le courant de court-circuit. C’est le courant de Norton.
Étape 3	Court-circuiter les sources de tension et ouvrir les sources de courant.	Court-circuiter, les sources de tension, ouvrir les sources de courant et ouvrir la résistance de charge.
Étape 4	Calculer ou mesurer la résistance du circuit ouvert. C’est la résistance de Thévenin	Calculer ou mesurer la résistance du circuit ouvert. C’est la résistance de Norton.

1.5.3 Rapports entre les circuits de Thévenin et de Norton

Nous savons déjà que les résistances de Thévenin et de Norton ont des valeurs égales, mais des positions différentes.

Nous pouvons en déduire deux autres relations. La figure 1.13a montre la conversion d’un circuit de Thévenin quelconque en circuit de Norton. C’est facile : en court-circuitant la sortie du circuit de Thévenin, nous obtenons le courant de Norton :

$$I_N = \frac{V_{TH}}{R_{TH}}$$

(1.12)

Cette relation montre que le courant de Norton est égal à la tension de Thévenin divisée par la résistance de Thévenin.

De même, nous pouvons transformer n'importe quel circuit de Norton en circuit de Thévenin.

Sur la figure 1.13b, la tension de circuit ouvert est :

$$V_{TH} = I_N R_N \quad (1.13)$$

Cette relation montre que la tension de Thévenin est égale au courant de Norton multiplié par la résistance de Norton.

La figure 1.13 résume les équations de conversion de chaque circuit.

Question 1.6

Supposons que nous ayons réduit un circuit complexe en un circuit équivalent de Thévenin (figure 1.14a). Comment le convertir en un circuit de Norton ?

Réponse L'équation (1.12) donne :

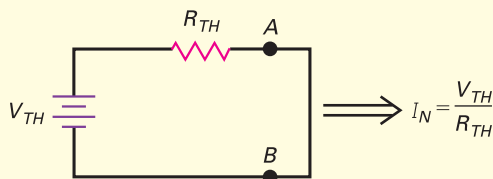
$$I_N = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

La figure 1.14c représente le circuit équivalent de Norton.

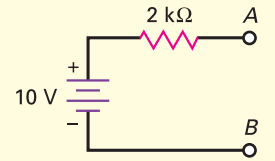
La plupart des ingénieurs et techniciens oublient l'équation (1.12) après leurs études. Mais ils se souviennent toujours de la loi d'Ohm. Voici comment ils font : imaginons un court-circuit placé en sortie du circuit de la figure 1.14a, le courant qui le traverse est égal au courant de Norton :

$$I_N = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

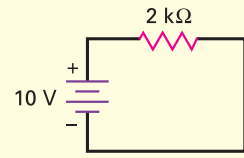
La loi d'Ohm appliquée au circuit équivalent de Thévenin donne le même résultat (figure 1.15). Cette astuce permet de calculer le courant de Norton donné par un circuit de Thévenin.



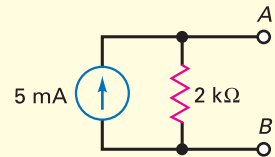
1.6 Avez-vous compris ? Déterminer le courant de Norton si la résistance de Thévenin de la figure 1.14a est de 5 kV.



(a)



(b)



(c)

Figure 1.14
Calcul du courant de Norton.

Figure 1.15
Aide pour la mémorisation
du courant de Norton.

1.6 Dépannage

Dépanner signifie trouver pourquoi un circuit ne réalise pas ce qu'il doit faire. Les problèmes les plus courants viennent des courts-circuits et des circuits ouverts. Les composants tels que les transistors deviennent souvent des courts-circuits ou des circuits ouverts. Une cause de destruction d'un transistor est l'excès de puissance dissipée.

Les résistances peuvent devenir des circuits ouverts par dissipation excessive de puissance. Mais on peut court-circuiter une résistance de la façon suivante. Pendant la réalisation finale d'un circuit imprimé, une goutte de soudure indésirable peut relier deux pistes conductrices voisines. Connu sous le nom de **pont de soudure**, cela court-circuite tous les composants reliant les deux lignes. D'autre part, une mauvaise soudure ne fait aucune connexion. C'est une **soudure froide**, elle met le composant en circuit ouvert.

Entre le circuit ouvert et le court-circuit, tout est possible. Par exemple, l'application temporaire d'un excès de chaleur sur une résistance peut modifier définitivement sa valeur de quelques pour cent. Si sa valeur est critique, le circuit peut ne plus fonctionner correctement après ce choc thermique.

Et maintenant voici le cauchemar du dépanneur : le défaut intermittent. Cette sorte de défaut est très difficile à isoler car il apparaît et disparaît. Il peut provenir d'une soudure froide qui alternativement réalise et coupe le contact, d'un mauvais câble de liaison, ou de tout autre défaut similaire qui entraîne un fonctionnement aléatoire.

1.6.1 Le circuit ouvert

Il faut retenir les deux propriétés suivantes :

Le courant qui traverse un circuit ouvert est toujours nul.
La tension aux bornes d'un circuit ouvert est indéterminée.

La première affirmation est vraie car la résistance d'un circuit ouvert est infinie. La loi d'Ohm vérifie la seconde affirmation :

$$V = IR = (0)(\infty)$$

Dans cette équation, « zéro fois l'infini » est indéterminé. La tension est imposée par le reste du circuit.

1.6.2 Le court-circuit

Un court-circuit est exactement l'inverse. Il faut retenir les deux propriétés suivantes :

La tension aux bornes d'un court-circuit est toujours nulle.
Le courant qui traverse un court-circuit est indéterminé.

La première affirmation est vraie car la résistance d'un court-circuit est nulle. La loi d'Ohm donne la preuve de la seconde affirmation :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0}{0}$$

« Zéro divisé par zéro » est mathématiquement sans signification. Le courant est donc imposé par le reste du circuit.

1.6.3 Mode opératoire

Normalement, on mesure les tensions par rapport à la masse. À partir des mesures et de la connaissance des bases de l'électricité, on doit détecter les défauts. Après avoir isolé le composant le plus suspect, on le dessoude ou le débranche et on utilise l'ohmmètre ou tout autre appareil pour confirmer.

1.6.4 Les valeurs nominales

La figure 1.16 illustre un diviseur de tension constitué par les deux résistances R_1 et R_2 et chargé par R_3 en série avec R_4 . Avant de dépanner ce circuit, on doit déterminer les valeurs normales des tensions. La première chose à faire est de déterminer V_A (tension entre A et la masse) et V_B (tension entre B et la masse). R_1 et R_2 étant beaucoup plus faibles que R_3 et R_4 ($10\ \Omega$ devant $100\ \text{k}\Omega$), la tension en A est approximativement +6 V. De plus, R_3 étant égale à R_4 , la tension en B est de l'ordre de +3 V. Si le circuit est sans problème, on doit mesurer +6 V entre A et la masse et +3 V entre B et la masse. Ce sont les données d'entrée de l'encart *À retenir* 1.3.

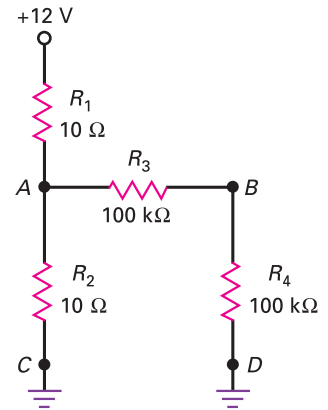


Figure 1.16
Diviseur de tension chargé
utilisé dans la description
du dépannage.

À RETENIR 1.3 – Défauts et indications

Défauts	V_A	V_B
Circuit OK	6 V	3 V
R_1 coupée	0 V	0 V
R_2 coupée	12 V	6 V
R_3 coupée	6 V	0
R_4 coupée	6 V	6 V
C débranché	12 V	6 V
D débranché	6 V	6 V
R_1 en court-circuit	12 V	6 V
R_2 en court-circuit	0 V	0 V
R_3 en court-circuit	6 V	6 V
R_4 en court-circuit	6 V	0

1.6.5 R_1 coupée

Quand R_1 est en circuit ouvert, qu'arrive-t-il aux tensions ? Aucun courant ne peut traverser R_1 , aucun courant ne passe à travers R_2 . La loi d'Ohm indique que la tension aux bornes de R_2 est nulle. De ce fait, $V_A = 0$ et $V_B = 0$ comme l'indique l'encart *À retenir* 1.3 pour la ligne R_1 coupée.

1.6.6 R_2 coupée

Quand R_2 est en circuit ouvert, qu'arrive-t-il aux tensions ? Aucun courant ne peut traverser R_2 , la tension en A atteint celle de l'alimentation. Puisque R_1 est beaucoup plus faible que R_3 et R_4 , la tension en A est environ 12 V. R_3 et R_4 sont égales et la tension en B est 6 V. C'est pourquoi $V_A = 12\ \text{V}$ et $V_B = 6\ \text{V}$, comme le montre l'encart *À retenir* 1.3 pour une résistance R_2 coupée.

1.6.7 Autres défauts

Si C est ouvert, il n'y a pas de courant dans R_2 . Cela est équivalent à la résistance R_2 coupée et entraîne $V_A = 12\ \text{V}$ et $V_B = 6\ \text{V}$. Vous pouvez faire les calculs pour toutes les lignes l'encart *À retenir* 1.3 en vous efforçant de bien comprendre pourquoi chaque tension existe pour un défaut donné.

Question 1.7

Sur la figure 1.16, on a $V_A = 0$ et $V_B = 0$. Quel est le défaut ?

Réponse Comme on peut le voir dans l'encart *À retenir* 1.3, deux défauts sont possibles : R_1 coupée ou R_2 court-circuitée. Tous deux entraînent une tension nulle en A et B. Pour isoler le défaut, on peut débrancher R_1 et la mesurer. Si elle est en circuit ouvert, le problème vient de R_1 , sinon il vient de R_2 .

1.7 Avez-vous compris ? Quel est le défaut quand on mesure $V_A = 12$ V et $V_B = 6$ V dans le montage de la figure 1.16 ?

1.7 Débogage des circuits AC

Lors du débogage des circuits AC, un oscilloscope peut être utilisé pour suivre ou tracer le signal AC passant dans le circuit. Cette méthode de débogage est appelée **suivi du signal**. La source de tension d'entrée est généralement une tension AC existante ou fournie par un générateur de signaux.

Avec un oscilloscope à double trace, connectez le canal 1 à la source de tension d'entrée. Cela permet de voir que la source de tension d'entrée est correcte et reste constante. En utilisant le canal 1 comme source de déclenchement de l'oscilloscope, le canal 2 peut maintenant être connecté à divers points de test dans le circuit pour vérifier son bon fonctionnement. Toutes les mesures sont prises par rapport au point de masse du circuit. Pour réduire la charge du circuit par l'oscilloscope, une sonde $10\times$ doit être utilisée si nécessaire. Dans cet exemple de débogage, la voie 2 de l'oscilloscope est déplacée successivement du point B au point C puis au point D, à la recherche de valeurs incorrectes.

1.7.1 Valeurs normales

Dans la figure 1.17, une source de tension d'entrée de 2 Vp ou 4 Vp-p attaque les résistances $R_1 - R_4$ 1 k Ω en série, avec un condensateur C_1 en parallèle sur R_4 . Quel est l'effet de C_1 sur le fonctionnement du circuit ? Comme la fréquence d'entrée du courant AC est de 1 kHz, on peut trouver X_C par :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1 \text{ kHz})(0,001 \mu\text{F})} = 159 \text{ k}\Omega$$

En utilisant Thévenin sur le circuit vu de C_1 ,

$$\begin{aligned} R_{TH} &= R_4 \parallel (R_1 + R_2 + R_3) \\ R_{TH} &= 1 \text{ k}\Omega \parallel 3 \text{ k}\Omega = 0,75 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Comme X_C est beaucoup plus grand que R_{TH} ($159 \text{ k}\Omega > 0,75 \text{ k}\Omega$), C_1 peut être considérée comme un circuit ouvert pour trouver les valeurs normales.

De plus, R_1 à R_4 étant des résistances de 1 k Ω , une simple technique de diviseur de tension peut être utilisée pour trouver la tension AC en chaque point. Ainsi, $V_A = 4$ Vp-p, $V_B = 3$ Vp-p, $V_C = 2$ Vp-p, et la tension de sortie au point D = 1 Vp-p. Avec l'oscilloscope, connectez le canal 1 à la source de tension d'entrée au point TP A et utilisez le canal 2 pour mesurer les valeurs de tension aux points de test respectifs. Le tableau récapitulatif 1-4 montre les tensions normales trouvées lorsque le circuit est correct.

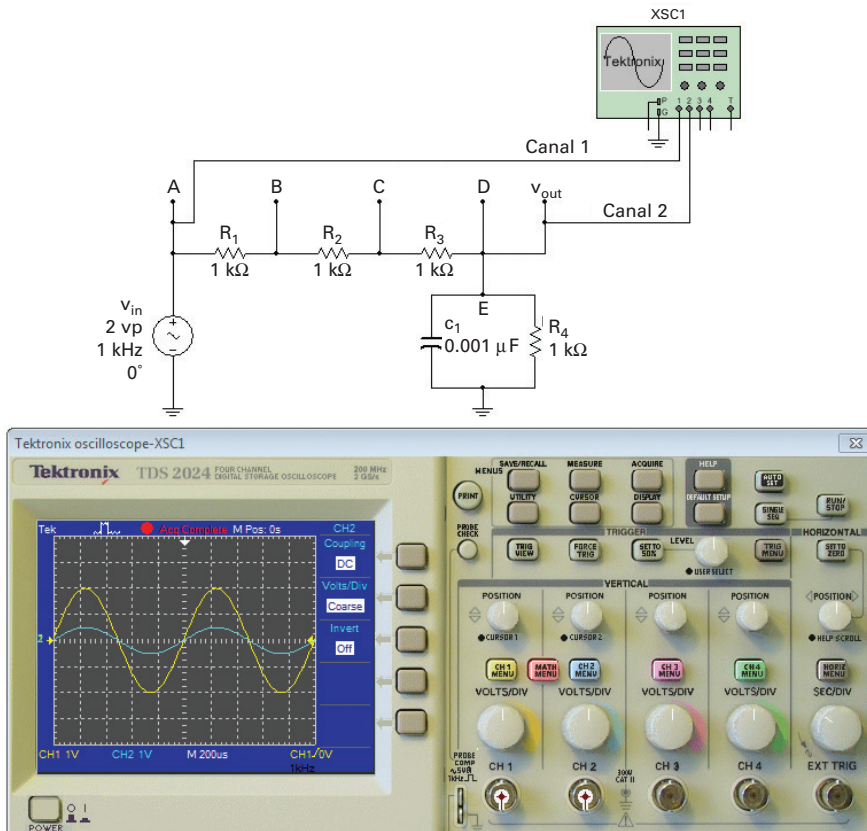


Figure 1.17
Débogage d'un circuit AC.
© National Instruments

1.7.2 R2 en circuit ouvert

Si R_2 est en circuit ouvert, peut-être à cause d'une mauvaise connexion de soudure, aucun courant AC ne circule dans ce circuit en série. Il n'y aura pas de chute de tension aux bornes de R_1 , ce qui donne $V_A = 4$ Vp-p, $V_B = 4$ Vp-p, $V_C = 0$ Vp-p et $v_{out} = 0$ Vp-p. Cela est indiqué dans le tableau récapitulatif 1-4. Là encore, utilisez le canal 1 de l'oscilloscope pour mesurer la tension d'entrée, et le canal 2 pour mesurer les tensions aux autres points de test.

1.7.3 R2 = 10 kΩ

À la réalisation du circuit, quelles seraient les tensions du circuit si R_2 avait une résistance 10 kΩ au lieu d'une résistance 1 kΩ ? L'action du diviseur de tension serait alors fortement affectée, la majorité des tensions chutant aux bornes de R_2 . Les résultats sont présentés dans le tableau récapitulatif 1-4.

À RETENIR 1.4 – Défauts et effets AC (Vp-p)

Défaut	VA	VB	VC	VD (vout)
Circuit correct	4 V	3 V	2 V	1 V
R1 coupée	4 V	0 V	0 V	0 V
R2 coupée	4 V	4 V	0 V	0 V

À RETENIR 1.4 – Défauts et effets AC (Vp-p) (suite)

R3 coupée	4 V	4 V	4 V	0 V
R4 coupée	4 V	4 V	4 V	4 V
C1 court-circuit	4 V	2,67 V	1,33 V	0 V
R2 10K	4 V	3,69 V	0,09 V	0,31 V
D-E ouvert	4 V	4 V	4 V	4 V

1.7.4 C1 court-circuité

En cas de court-circuit du condensateur C_1 , soit en interne, soit à cause d'une projection de soudure, la tension de sortie est tirée vers la masse. Il en résulte que $V_A = 4$ Vp-p, $V_B = 2,67$ Vp-p, $V_C = 1,33$ Vp-p et $V_D = 0$ Vp-p.

1.7.5 Défauts restants

Trouvez les défauts restants indiqués dans le tableau récapitulatif 1-4. Si vous avez un logiciel de simulation de circuit, tel Multisim, implantez ce circuit et introduisez chaque défaut un par un.

1.7.6 Dernières remarques

Les techniques de débogage de panne AC présentées ici impliquent le traçage du signal du point B au point C jusqu'à la sortie. Avec une chaîne du signal beaucoup plus longue, est-ce la méthode la plus efficace ?

Une autre méthode de traçage du signal utilise ce que l'on appelle la technique de **débogage par dichotomie**. Au lieu de commencer par le canal 2 au point B, la sonde est placée au milieu de l'ensemble du circuit. Si la mesure est correcte au point médian, alors le défaut se situe entre ce point et la sortie. Déterminez maintenant le point médian suivant vers la sortie et mesurez le signal à cet endroit. Si la première mesure du point médian n'était pas correcte, déterminez le point médian suivant vers l'entrée. La technique de débogage par dichotomie permet de réduire le nombre de mesures nécessaires pour trouver le défaut du circuit.

Pendant le processus de débogage, que faire pour prendre une mesure par oscilloscope sur un composant dont aucun côté n'est à la masse ? Le fait de connecter la sonde de l'oscilloscope à un côté du composant et l'autre côté au fil de masse de l'oscilloscope peut endommager le circuit ou l'oscilloscope. Dans ce cas, les deux canaux de l'oscilloscope doivent être utilisés. Par exemple, si vous devez mesurer la tension AC à travers R_2 dans la figure 1.17, placez le canal 1 à TP B, le canal 2 à TP C, et les deux masses de la sonde au point de masse du circuit. Ensuite, changez le commutateur d'entrée vertical en mode mathématique ou en mode d'addition, le mode fonction étant réglé sur soustraction. Le résultat sera un signal affiché montrant le canal 1 moins le canal 2 et une lecture précise de la tension est obtenue.

Enfin, le circuit de la figure 1.17 est représenté comme une simple série de résistances. Mais que se passerait-il si chaque résistance était son propre circuit, chaque sortie attaquant l'entrée du circuit suivant ? La même technique de traçage des signaux pourrait-elle être utilisée ?

Réviser

Résumé

1.1 Approximations

Les approximations sont largement utilisées dans l'industrie. La première approximation est très utile pour le dépannage. L'approximation du deuxième ordre est employée pour les calculs préliminaires d'un circuit. Les approximations plus fines nécessitent l'emploi d'ordinateurs.

1.2 Sources de tension

Une source de tension idéale n'a pas de résistance interne. En deuxième approximation, elle possède une résistance en série avec la source. Une source de tension constante est celle qui présente une résistance interne inférieure au centième de la résistance de charge.

1.3 Sources de courant

Une source de courant idéale a une résistance interne infinie. En deuxième approximation, elle possède une résistance importante en parallèle avec la source. Une *source de courant constant* présente une résistance interne qui est au moins 100 fois plus grande que la résistance de charge.

1.4 Le théorème de Thévenin

La *tension de Thévenin* est la tension en circuit ouvert. La *résistance de Thévenin* est la résistance mesurée sur la sortie ouverte quand toutes les sources ont été annulées. Thévenin a démontré que pour un circuit quelconque constitué de sources et de résistances linéaires, le courant délivré sur la charge est le même que celui du circuit équivalent.

1.5 Le théorème de Norton

La résistance de Norton est égale à la résistance de Thévenin. Le courant de Norton est le courant délivré quand la charge est court-circuitée. Norton a prouvé que pour un circuit constitué de sources et de résistances linéaires, la tension sur la charge est la même que celle fournie par le circuit équivalent. Le courant de Norton est égal à la tension de Thévenin divisée par la résistance de Thévenin.

1.6 Dépannage

Les défauts les plus fréquents sont le court-circuit, le circuit ouvert et les défauts intermittents. Un court-circuit présente toujours une tension nulle à ses bornes et le courant qui le traverse dépend du reste du circuit. Aucun courant ne passe dans un circuit ouvert et la tension à ses bornes est

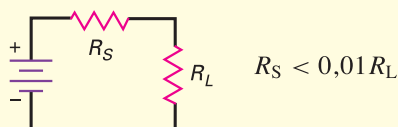
déterminée par le reste du circuit. Un défaut intermittent est un problème transitoire et répétitif qui demande une analyse patiente et logique pour être isolé.

1.7 Débogage des circuits AC

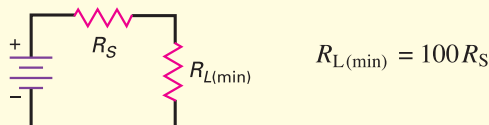
Pour déboguer efficacement de nombreux circuits AC, une technique appelée « traçage du signal » est couramment utilisée. Placez le canal 1 sur la source du signal d'entrée, et utilisez le canal 2 pour mesurer les formes d'onde de tension à d'autres points de test. Comparez ces mesures aux valeurs correctes connues.

Formules importantes

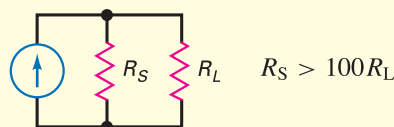
(1.1) Source de tension constante :



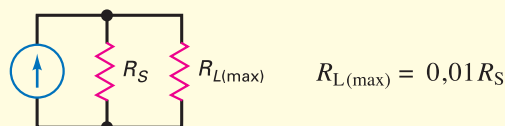
(1.2) Source de tension constante :



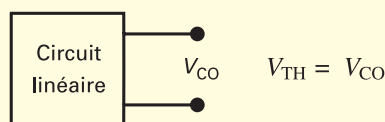
(1.3) Source de courant constant :



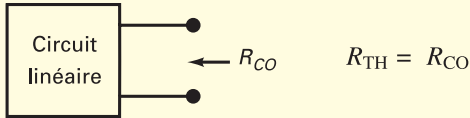
(1.4) Source de courant constant :



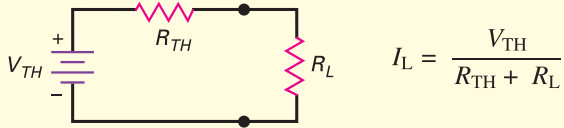
(1.5) Tension de Thévenin :



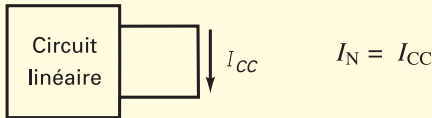
(1.6) Résistance de Thévenin :



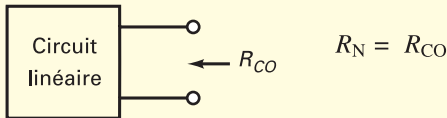
(1.7) Théorème de Thévenin :



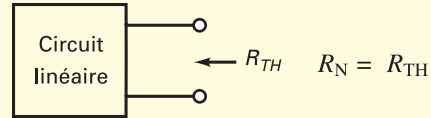
(1.8) Courant de Norton :



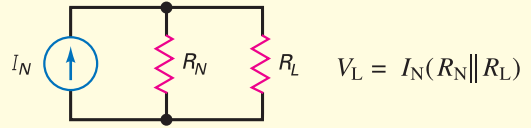
(1.9) Résistance de Norton :



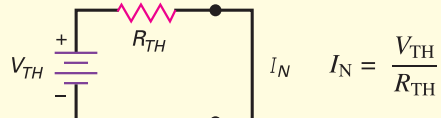
(1.10) Résistance de Norton :



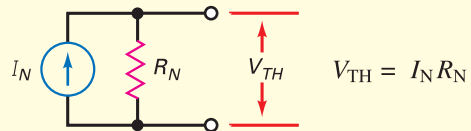
(1.11) Théorème de Norton :



(1.12) Courant de Norton :



(1.13) Tension de Thévenin :



S'entraîner

Auto-évaluation

- Une source de tension idéale a :
 - ☐ a) une résistance interne nulle
 - ☐ b) une résistance interne infinie
 - ☐ c) une tension qui dépend de la charge
 - ☐ d) un courant qui dépend de la charge
- Une source de tension réelle a :
 - ☐ a) une résistance interne nulle
 - ☐ b) une résistance interne infinie
 - ☐ c) une faible résistance interne
 - ☐ d) une grande résistance interne
- Si la résistance de charge est $100\ \Omega$, la résistance interne de la source de tension constante est égale à :
 - ☐ a) moins de $1\ \Omega$
 - ☐ b) au moins $10\ \Omega$
 - ☐ c) plus de $10\ \text{k}\Omega$
 - ☐ d) moins de $10\ \text{k}\Omega$
- Une source de courant idéale a :
 - ☐ a) une résistance interne nulle
 - ☐ b) une résistance interne infinie
 - ☐ c) une tension de sortie fonction de la charge
 - ☐ d) un courant fonction de la charge
- Une source de courant réelle a :
 - ☐ a) une résistance interne nulle
 - ☐ b) une résistance interne infinie
 - ☐ c) une petite résistance interne
 - ☐ d) une grande résistance interne
- Si la résistance de charge est $100\ \Omega$, la source de courant réelle a une résistance interne égale à :
 - ☐ a) moins de $1\ \Omega$
 - ☐ b) au moins $1\ \Omega$
 - ☐ c) moins de $10\ \text{k}\Omega$
 - ☐ d) plus de $10\ \text{k}\Omega$
- La tension de Thévenin est la même que :
 - ☐ a) la tension sortie court-circuitée
 - ☐ b) la tension circuit ouvert
 - ☐ c) la tension de source idéale
 - ☐ d) la tension de Norton
- La résistance de Thévenin a pour valeur :
 - ☐ a) la résistance de charge
 - ☐ b) la moitié de la résistance de charge
 - ☐ c) la résistance interne du circuit de Norton
 - ☐ d) la résistance circuit ouvert

9. Pour obtenir la tension de Thévenin, on doit :
- ☐ a) court-circuiter la résistance de charge
 - ☐ b) ouvrir la résistance de charge
 - ☐ c) court-circuiter la source de tension
 - ☐ d) enlever la source de tension
10. Pour obtenir le courant de Norton, on doit :
- ☐ a) court-circuiter la résistance de charge
 - ☐ b) ouvrir la résistance de charge
 - ☐ c) court-circuiter la source de tension
 - ☐ d) enlever la source de courant
11. Le courant de Norton est parfois nommé :
- ☐ a) courant sortie court-circuitée
 - ☐ b) courant sortie ouverte
 - ☐ c) courant de Thévenin
 - ☐ d) tension de Thévenin
12. Un pont de soudure :
- ☐ a) peut produire un court-circuit
 - ☐ b) entraîne un circuit ouvert
 - ☐ c) est utile dans certains circuits
 - ☐ d) possède toujours une grande résistance
13. Une soudure froide :
- ☐ a) montre une bonne technique de soudure
 - ☐ b) provoque généralement un circuit ouvert
 - ☐ c) peut causer un problème intermittent
 - ☐ d) présente toujours une faible résistance
14. Une résistance coupée a :
- ☐ a) un courant infini qui la traverse
 - ☐ b) une tension nulle à ses bornes
 - ☐ c) une tension infinie à ses bornes
 - ☐ d) un courant nul qui la traverse
15. Une résistance court-circuitée a :
- ☐ a) un courant infini qui la traverse
 - ☐ b) une tension nulle à ses bornes
 - ☐ c) une tension infinie à ses bornes
 - ☐ d) un courant nul qui la traverse
16. Une source de tension idéale associée à une résistance interne est :
- ☐ a) un cas idéal
 - ☐ b) une approximation du deuxième ordre
 - ☐ c) une approximation d'ordre supérieur
 - ☐ d) un modèle exact
17. Assimiler un fil de connexion à une résistance nulle est :
- ☐ a) un cas idéal
 - ☐ b) une approximation du deuxième ordre
 - ☐ c) une approximation d'ordre supérieur
 - ☐ d) un modèle exact
18. La tension de sortie d'une source de tension idéale :
- ☐ a) est nulle
 - ☐ b) est constante
 - ☐ c) dépend de la valeur de la résistance de charge
 - ☐ d) dépend de la résistance interne
19. Le courant de sortie d'une source de tension idéale :
- ☐ a) est nul
 - ☐ b) est constant
 - ☐ c) dépend de la valeur de la résistance de charge
 - ☐ d) dépend de la résistance interne
20. Le théorème de Thévenin remplace le circuit complexe devant la charge par une :
- ☐ a) source de tension idéale en parallèle avec une résistance
 - ☐ b) source de courant idéale en parallèle avec une résistance
 - ☐ c) source de tension idéale en série avec une résistance
 - ☐ d) source de courant idéale en série avec une résistance
21. Le théorème de Norton remplace le circuit complexe devant la charge par une :
- ☐ a) source de tension idéale en parallèle avec une résistance
 - ☐ b) source de courant idéale en parallèle avec une résistance
 - ☐ c) source de tension idéale en série avec une résistance
 - ☐ d) source de courant idéale en série avec une résistance
22. Pour court-circuiter un composant on peut :
- ☐ a) faire une soudure froide
 - ☐ b) faire un pont de soudure
 - ☐ c) le déconnecter
 - ☐ d) le couper
23. Une méthode de débogage AC par d'oscilloscope est appelée :
- ☐ a) substitution
 - ☐ b) mesure de l'impédance
 - ☐ c) traçage des signaux
 - ☐ d) dérivation des mesures

Exercices

1.2 Sources de tension

- 1.1 Soit une source de tension idéale de 12 V et une résistance interne de 0,1 Ω . Pour quelles valeurs de la résistance de charge la source sera-t-elle à tension constante ?
- 1.2 Une résistance de charge peut varier entre 270 Ω et 100 k Ω . Quelle peut être la plus grande résistance interne d'une source de tension constante ?
- 1.3 La résistance interne d'un générateur de tension est de 50 Ω . Pour quelles valeurs de résistance de charge la tension de sortie du générateur est-elle constante ?
- 1.4 Une batterie de voiture possède une résistance interne de 0,04 Ω . Pour quelle résistance de charge, la batterie est-elle à tension constante ?

- 1.5** La résistance interne d'une source de tension est de $0,05\ \Omega$. Quelle est la chute de tension à ses bornes si le courant qui la traverse est de $2\ \text{A}$?
- 1.6** Sur la figure 1.18, la tension de source idéale est égale à $9\ \text{V}$ et la résistance interne est égale à $0,4\ \Omega$. Si la charge est nulle, que vaut le courant de sortie ?

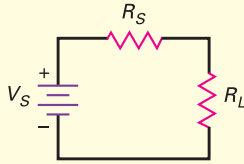


Figure 1.18

1.3 Sources de courant

- 1.7** Soit une source de courant idéale de $10\ \text{mA}$ et une résistance interne de $10\ \text{M}\Omega$. Pour quelles valeurs de la résistance de charge la source est-elle à courant constant ?
- 1.8** Une résistance de charge peut varier de $270\ \Omega$ à $100\ \Omega$. Quelle est la résistance interne de la source à courant constant qui l'alimente ?
- 1.9** Une source de courant a une résistance interne de $100\ \Omega$. Quelle est la plus grande valeur possible de la résistance de charge pour que la source soit à courant constant ?
- 1.10** Sur la figure 1.19, la source de courant idéale est égale à $20\ \text{mA}$ et la résistance interne à $200\ \text{k}\Omega$. Si la résistance de charge est nulle, quel est le courant qui la traverse ?
- 1.11** Sur la figure 1.19, le courant idéal est $5\ \text{mA}$ et la résistance interne est $250\ \Omega$. Si la résistance de charge est $10\ \text{k}\Omega$, quel est le courant de sortie ? La source est-elle à courant constant ?

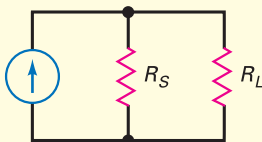


Figure 1.19

1.4 Le théorème de Thévenin

- 1.12** D'après la figure 1.20, quelle est la tension de Thévenin ? La résistance de Thévenin ?

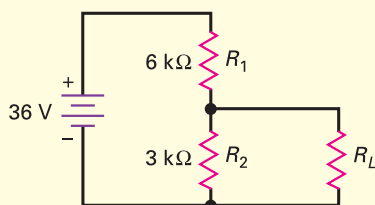


Figure 1.20

- 1.13** D'après la figure 1.20, en utilisant le théorème de Thévenin, calculer le courant de sortie pour chacune des résistances de charge suivantes : $0,1\ \text{k}\Omega$; $2\ \text{k}\Omega$; $3\ \text{k}\Omega$; $4\ \text{k}\Omega$; $5\ \text{k}\Omega$; $6\ \text{k}\Omega$.
- 1.14** D'après la figure 1.20, la tension de la source est devenue $18\ \text{V}$. Que deviennent la tension et la résistance de Thévenin ?
- 1.15** Sur la figure 1.20, toutes les résistances sont doublées. Que deviennent la tension et la résistance de Thévenin ?

1.5 Le théorème de Norton

- 1.16** Un circuit a une tension de Thévenin égale à $12\ \text{V}$ et une résistance de Thévenin égale à $3\ \text{k}\Omega$. Quel est le circuit de Norton associé ?
- 1.17** Un circuit a un courant de Norton d'intensité $10\ \text{mA}$ et une résistance de Norton égale à $10\ \text{k}\Omega$. Quel est le circuit de Thévenin associé ?
- 1.18** Quel est le circuit de Norton que l'on peut déduire de la figure 1.19 ?

1.6 Dépannage

- 1.19** Sur la figure 1.20, on suppose une tension de sortie de $36\ \text{V}$. Quel est le défaut de R_1 ?
- 1.20** Sur la figure 1.20, la tension de sortie est nulle, la pile et les résistances sont bonnes. Donnez deux défauts possibles.
- 1.21** Sur la figure 1.20, la tension de sortie est nulle, toutes les résistances sont bonnes. Où se trouve le défaut ?
- 1.22** Sur la figure 1.20, R_L est remplacée par un voltmètre pour mesurer la tension à travers R_2 . Quelle valeur la résistance en entrée doit-elle avoir pour éviter une surcharge ?

Approfondissement

- 1.23** Soit une source temporairement court-circuitée. Sa tension de sortie idéale est $12\ \text{V}$ et le courant de court-circuit $150\ \text{A}$. Quelle est sa résistance interne ?
- 1.24** D'après la figure 1.18, la tension idéale est $10\ \text{V}$ et la résistance de charge $75\ \Omega$. Si la tension de sortie est $9\ \text{V}$, quelle est la valeur de la résistance interne ?
- 1.25** Quelqu'un vous donne une boîte noire avec une résistance de $2\ \text{k}\Omega$ connectée à ses bornes de sortie. Comment pouvez-vous mesurer la tension de Thévenin ?
- 1.26** La boîte noire de l'exercice 1.25 possède un bouton qui permet d'annuler toutes les sources internes

de courant et de tension. Comment pouvez-vous mesurer la résistance de Thévenin ?

- 1.27** Faites l'exercice 1.13 puis trouvez la solution sans utiliser le théorème de Thévenin. Ensuite commentez ce que vous avez appris sur le théorème de Thévenin.
- 1.28** Dans un laboratoire vous regardez un circuit identique à celui de la figure 1.21. Quelqu'un vous met au défi de trouver la tension et la résistance du circuit de Thévenin associé à la résistance de charge R_L . Décrivez la procédure expérimentale pour déterminer ces deux grandeurs.

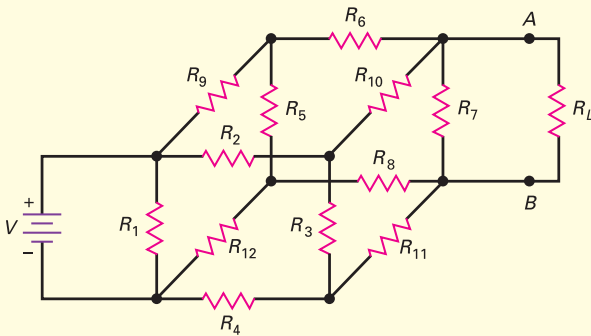


Figure 1.21

- 1.29** Concevez une source de courant hypothétique réalisée avec une pile et une résistance. Le courant de sortie doit être égal à 1 mA pour une résistance de charge variant de 0 à 1 k Ω .
- 1.30** Concevez un diviseur de tension (semblable à celui de la figure 1.20) possédant les spécifications suivantes : source de tension idéale 30 V, tension de sortie ouverte 15 V et résistance de Thévenin égale ou inférieure à 2 k Ω .
- 1.31** Concevez un diviseur de tension (semblable à celui de la figure 1.20) donnant une tension constante de 10 V pour toutes les résistances de charge supérieures à 1 M Ω . On utilisera une source de tension idéale de 30 V.
- 1.32** On vous procure une pile de flash et un multimètre (volt-ohm-milliampère). Décrivez une méthode expérimentale pour trouver la tension et la résistance de Thévenin sans autre matériel supplémentaire.
- 1.33** Vous avez une pile de flash, un multimètre et une boîte de résistances. Décrivez une méthode qui utilise une résistance pour déterminer la résistance de Thévenin de la pile.
- 1.34** Calculez (figure 1.22) le courant de sortie pour chacune des résistances de charge : 0,1 k Ω ; 2 k Ω ; 3 k Ω ; 4 k Ω ; 5 k Ω ; 6 k Ω .

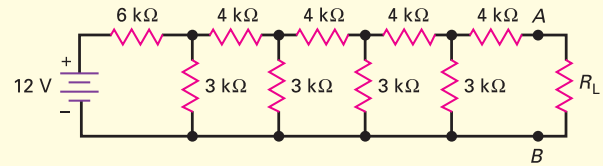


Figure 1.22

Dépannage

- 1.35** On utilisera le tableau de la figure 1.23 pour ce dernier exercice. Les défauts sont une des résistances coupée, une des résistances court-circuitée, la masse déconnectée ou pas d'alimentation de tension. Quelle est la cause des défauts 1 à 8 ?

Défaut	V_A	V_B	V_E	Défaut	V_A	V_B	V_E
Sans	4 V	2 V	12 V	Défaut 5	6 V	3 V	12 V
Défaut 1	12 V	6 V	12 V	Défaut 6	6 V	6 V	12 V
Défaut 2	0 V	0 V	12 V	Défaut 7	0 V	0 V	0 V
Défaut 3	6 V	0 V	12 V	Défaut 8	3 V	0 V	12 V
Défaut 4	3 V	3 V	12 V				

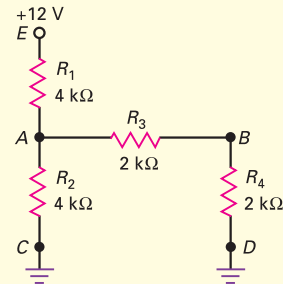


Figure 1.23 Dépannage.

Questions de débogage avec Multisim



Les fichiers de débogage Multisim sont téléchargeables sur www.dunod.com, sur la page dédiée à l'ouvrage.

Pour ce chapitre, les fichiers sont intitulés **MTC01-36** à **MTC01-40** et correspondent au circuit de la figure 1.23.

Ouvrez-les et effectuez le débogage avec chaque fichier. Mesurez pour déterminer s'il y a une faute et, si c'est le cas, quel est le circuit fautif.

- 1.36** Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC01-36**.
- 1.37** Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC01-37**.

- 1.38** Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC01-38**.
- 1.39** Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC01-39**.
- 1.40** Ouvrez et effectuez le débogage avec le fichier **MTC01-40**.

Questions d'un recruteur

Un recruteur peut rapidement dire si votre connaissance de l'électronique est superficielle ou réellement approfondie. Les questions qu'il pose ne sont pas ordonnées et progressives. Parfois, il omet des données pour voir comment vous maîtrisez le sujet. Lors d'un entretien, le recruteur peut vous poser des questions semblables à celles qui suivent. Vous pouvez répondre après avoir résolu quelques-uns des exercices.

- Quelle est la différence entre une source de tension et une source de courant ?
- Quand devez-vous inclure la résistance de la source dans le calcul du courant de sortie ?
- Si un composant est assimilé à une source de courant, que pouvez-vous dire de la résistance de charge ?
- Qu'est-ce que « source de tension constante » signifie pour vous ?
- J'ai une maquette sur mon poste de travail. Dites-moi les mesures que je dois faire pour déterminer la tension et la résistance de Thévenin.
- Quel serait l'avantage d'une source de courant de 50 V par rapport à une source de 600 V.
- Comment sont reliés la résistance de Thévenin et le « CCA »¹ d'une batterie de voiture ?
- Quelqu'un vous dit que cette source de tension est lourdement chargée. Que pensez-vous que cela veut dire ?
- Quelle approximation utilise normalement un technicien quand il débute les procédures de dépannage ? Pourquoi ?
- Au cours du dépannage d'un système électronique, vous mesurez une tension continue de 9,5 V à un point test où le schéma indique 10 V. Que pouvez-vous déduire de cette lecture ? Pourquoi ?
- Quelles sont les raisons d'utiliser les circuits de Thévenin et de Norton ?
- Quelle est la valeur des théorèmes de Thévenin et de Norton dans les tests pratiques ?
- Expliquez l'avantage du débogage par dichotomie par rapport au traçage normal du signal.

1. Le CCA (*Cold Cranking Ampere*) est le courant maximal que peut donner une batterie à -18°C avant que sa tension ne tombe à 7,2 V.

Réponses

Auto-évaluation

- | | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| 1. a) | 7. b) | 13. c) | 19. b) |
| 2. c) | 8. c) | 14. d) | 20. c) |
| 3. a) | 9. b) | 15. b) | 21. b) |
| 4. b) | 10. a) | 16. b) | 22. b) |
| 5. d) | 11. a) | 17. a) | 23. c) |
| 6. d) | 12. a) | 18. b) | |

Avez-vous compris ? (réponses)

- 1.1** 60 k Ω .
- 1.2** 20 V.
- 1.4** Plutôt que d'utiliser le circuit original (figure 1.9a), on se sert du circuit équivalent de Thévenin (figure 1.10). Quand la résistance de charge vaut 2 k Ω :

$$I_L = \frac{24 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

Avec un calcul similaire :

$$I_L = 2 \text{ mA} \text{ pour } R_L = 6 \text{ k}\Omega$$

$$I_L = 1 \text{ mA} \text{ pour } R_L = 18 \text{ k}\Omega$$

Pour apprécier la puissance du théorème de Thévenin, essayez de calculer les courants précédents en utilisant le circuit de départ de la figure 1.9a avec n'importe quelle autre méthode.

- 1.6** $I_N = 2 \text{ mA}$.
- 1.7** Le tableau 1.1 indique trois possibilités : R_2 coupée, C débranchée ou R_1 en court-circuit. Pour identifier le défaut, on peut débrancher R_2 et la mesurer. Si elle est en circuit ouvert, le problème est résolu R_2 sinon on mesure R_1 . Si elle est en court-circuit, elle est la cause de la panne, sinon C est coupée.

Les semi-conducteurs

2

Objectifs

- Reconnaître, à l'échelle atomique, les caractéristiques d'un bon conducteur et d'un semi-conducteur.
- Décrire la structure du cristal de silicium.
- Identifier les deux types de porteurs et indiquer les impuretés qui les font devenir porteurs majoritaires.
- Comprendre ce qui se passe à la jonction pn d'une diode : non polarisée, polarisée en direct et polarisée en inverse.
- Déterminer les types de courants de claquage venant d'une tension inverse excessive sur une diode.

Vocabulaire

Bande de conduction	Électron libre	Recombinaison	Semi-conducteur
Barrière de potentiel	Énergie thermique	Semi-conducteur	intrinsèque
Courant de fuite superficiel	Jonction pn	Semi-conducteur de type n	Silicium
Courant de saturation	Liaison de covalence	Semi-conducteur de type p	Température ambiante
Diode	Phénomène d'avalanche	Semi-conducteur extrinsèque	Température de jonction
Diode à jonction	Polarisation directe		Tension de claquage
Dopage	Polarisation inverse		Trou
	Porteurs de charge		Zone déplétée

En quelques mots

Pour comprendre comment les diodes, transistors et circuits intégrés fonctionnent, il faut d'abord étudier les semi-conducteurs : matériaux qui ne sont ni conducteurs ni isolants. Ils contiennent des électrons libres mais aussi des trous, ce qui les rend particuliers. Ce chapitre est consacré aux semi-conducteurs, trous et autres thèmes relatifs au sujet.

2.1 Les conducteurs

Le cuivre est un bon conducteur ; la raison est évidente quand on observe sa structure atomique (figure 2.1). Le noyau de l'atome contient 29 protons (charges positives). Lorsque le cuivre est neutre, 29 électrons (charges négatives) gravitent autour du noyau comme des planètes autour du Soleil. Les électrons occupent diverses *orbites*, 2 électrons la première, 8 électrons la deuxième, 18 la troisième, et un électron unique occupe la dernière.

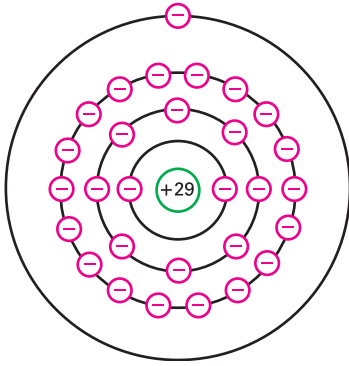


Figure 2.1
Atome de cuivre.

2.1.1 Orbites stables

Le noyau positif (figure 2.1) attire les électrons planétaires. La force centrifuge engendrée par leur mouvement circulaire les empêche d'atteindre le noyau. La force d'attraction et la force de répulsion étant strictement identiques, l'orbite est stable. C'est la même chose pour les satellites autour de la Terre. À la bonne vitesse et à la bonne hauteur, un satellite reste sur son orbite.

Plus grande est l'orbite, plus faible est l'attraction du noyau. Sur les grandes orbites, les électrons se déplacent plus lentement donc possèdent moins d'énergie centrifuge. Sur la figure 2.1, l'électron le plus extérieur se déplace lentement et ressent très peu l'attraction du noyau.

2.1.2 Le cœur

En électronique, tout se passe sur l'orbite extérieure appelée *orbite de valence*. Elle détermine les propriétés électriques de l'atome. Pour souligner son importance, on rassemble le noyau et les orbites internes de l'atome dans le *cœur*. Pour un atome de cuivre, le cœur est le noyau (+29) et les trois premières orbites (-28).

La figure 2.2 aide à visualiser le cœur du cuivre (29 protons et 28 électrons) et l'orbite de valence. L'électron sur cette grande orbite tourne autour d'une charge de seulement +1, il ressent une faible attraction.

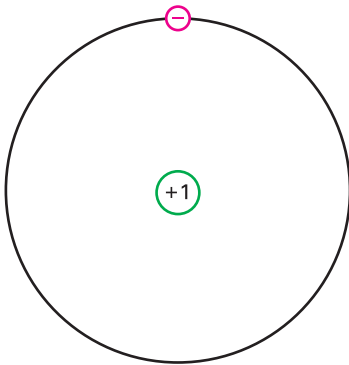


Figure 2.2
Cœur d'un atome de cuivre.

2.1.3 L'électron libre

Lorsque l'attraction entre l'électron et le reste de l'atome de cuivre est très faible, une force extérieure peut très facilement l'arracher. C'est pour cela que l'on appelle cet électron de valence un **électron libre**. Ceci explique pourquoi le cuivre est un bon conducteur, la moindre tension fait voyager l'électron libre d'un atome à l'autre. L'argent, le cuivre et l'or sont de bons conducteurs, ils ont tous cette structure (figure 2.2).

Question 2.1

On suppose qu'une force extérieure arrache l'électron de valence (figure 2.2) d'un atome de cuivre. Quelle est la charge de l'atome ? Que devient cette charge si un électron extérieur vient se mettre sur l'orbite de valence ?

Réponse Quand l'électron de valence quitte l'atome, ce dernier possède une charge +1. Dès qu'un atome perd un de ses électrons, il se charge positivement : c'est un *ion positif*.

Si un électron extérieur s'installe sur l'orbite de valence (figure 2.2), la charge totale de l'atome devient -1 , l'atome est devenu un *ion négatif*.

2.2 Les semi-conducteurs

Les meilleurs conducteurs (argent, cuivre, or) ont un électron de valence, tandis que les meilleurs isolants en ont huit. Un **semi-conducteur** est un élément dont les propriétés électriques sont à mi-chemin entre les conducteurs et les isolants. Comme on peut le prévoir, les meilleurs semi-conducteurs ont quatre électrons de valence (figure 2.3).

2.2.1 Le germanium

Le *germanium* est un exemple de semi-conducteur, il possède quatre électrons de valence. Il y a plusieurs années, c'était le seul matériau utilisable pour réaliser des composants. Cependant, ils avaient un grave défaut qui n'a pas été surmonté (leur courant inverse était trop important : voir les chapitres suivants).

Par la suite, un autre semi-conducteur, le silicium, est devenu très courant, et maintenant il supplante le germanium dans la plupart des applications.

2.2.2 Le silicium

Après l'oxygène, le **silicium** est l'élément le plus abondant sur Terre. Au début, son usage a été retardé par des problèmes de purification. Une fois ces difficultés surmontées, les avantages du silicium (étudiés dans la suite) en ont fait un semi-conducteur de choix. Sans lui, l'électronique moderne n'existerait pas.

Bon à Savoir

Autre élément semi-conducteur très courant : le carbone (C). Il est principalement utilisé dans la fabrication de résistances.

Un atome isolé de silicium possède 14 protons et 14 électrons. La première orbite contient deux électrons, la deuxième 8 (figure 2.3a). Les quatre électrons restants occupent l'orbite de valence. La charge du cœur est $+4$ car il contient 14 protons et seulement 10 électrons sur les deux premières orbites.

La figure 2.3b représente le cœur d'un atome de silicium. Les quatre électrons de valence nous indiquent que le silicium est un semi-conducteur.

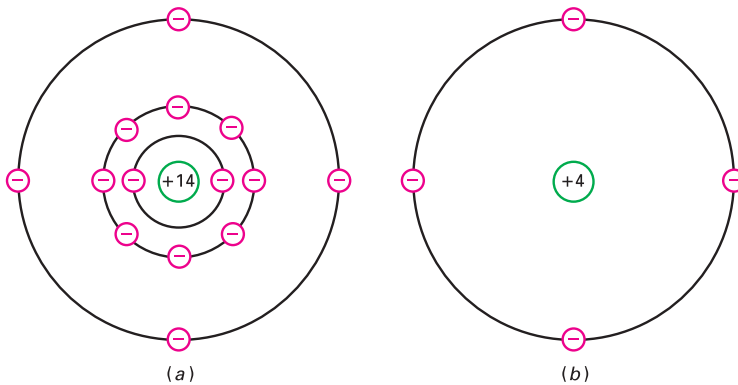
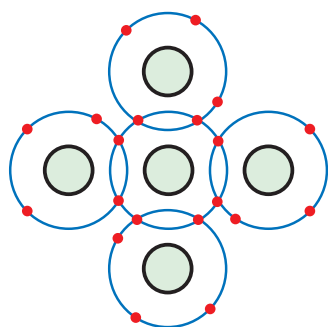


Figure 2.3
(a) Atome de silicium ;
(b) cœur.

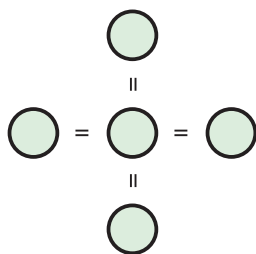
Question 2.2

Quelle est la charge nette d'un atome de silicium quand il a perdu un de ses électrons de valence ? Quand il a gagné un électron supplémentaire ?

Réponse La perte d'un électron le transforme en ion positif (charge $+1$). Le gain d'un électron supplémentaire le transforme en ion négatif (charge -1).



(a)



(b)

Figure 2.4

(a) Atome dans un cristal et ses quatre voisins ;
(b) liaisons de covalence.

2.3 Le cristal de silicium

Quand les atomes de silicium s'assemblent pour faire un solide, ils s'ordonnent selon un motif régulier appelé *cristal*. Chaque atome partage ses électrons périphériques avec quatre voisins pour obtenir huit électrons sur son orbite de valence. La figure 2.4a montre un atome central avec quatre voisins. Les cercles ombrés représentent les cœurs des atomes. L'atome central avait initialement quatre électrons sur son orbite périphérique, maintenant il en possède huit.

2.3.1 Liaisons de covalence

Chaque atome proche partage un électron avec l'atome central. De ce fait, celui-ci a quatre électrons supplémentaires et une orbite de valence avec huit électrons. Chaque atome central et ses voisins partagent leurs électrons, et ceci est vrai pour tous les autres atomes.

Sur la figure 2.4a, chaque cœur présente une charge +4. Observons celui du centre et celui de droite ; ils attirent la paire d'électrons située entre eux d'une même force mais de sens opposé. Cette traction dans des sens opposés lie les atomes les uns aux autres de la même manière que deux équipes de tir à la corde sont réunies tant qu'elles exercent la même traction.

Puisque chaque électron est attiré dans deux sens différents, il exerce une liaison entre deux atomes voisins. On nomme ce type de liaison chimique une **liaison de covalence** et la figure 2.4b illustre une façon simple de la représenter. Dans un cristal de silicium, il y a des milliards d'atomes de silicium, chacun avec ses huit électrons de valence formant les liaisons de covalence ; c'est ce qui confère à ce matériau sa solidité.

2.3.2 L'orbite saturée

Chaque atome dans un cristal de silicium possède une orbite de valence avec huit électrons. La solidité d'un morceau de silicium découle de la stabilité chimique de ce modèle. Personne n'est parfaitement certain que tous les éléments chimiques aient une prédisposition à posséder huit électrons périphériques. Cependant, il semble que tout élément ne possédant pas ses huit électrons a tendance à s'associer avec d'autres atomes pour les obtenir.

Il existe des équations fondamentales en physique donnant une explication partielle de la stabilité chimique de ce modèle, mais personne ne sait pourquoi ce nombre huit est si particulier. C'est une loi, comme la loi de gravité, la loi de Coulomb et certaines autres, que l'on observe mais que l'on n'explique pas complètement.

Quand une orbite de valence possède huit électrons, elle est *saturée* car aucun autre électron ne viendra s'y placer. D'où la loi de saturation d'une orbite de valence :

$$n = 8 \quad (2.1)$$

Une orbite de valence ne peut contenir plus de huit électrons. De plus, ce sont des *électrons de liaison* car ils sont fortement attachés aux atomes. Grâce à eux, un cristal de silicium est un isolant presque parfait à la température ambiante, environ 25 °C.

2.3.3 Le trou

La **température ambiante** est la température de l'air environnant. Quand elle se situe au-dessus du zéro absolu (−273 °C), l'énergie thermique force les atomes du

cristal de silicium à vibrer. Plus la température est haute, plus le mécanisme de vibration est important. Lorsqu'on touche un objet chaud, la chaleur ressentie est l'effet de la vibration des atomes.

Dans un cristal de silicium, les vibrations des atomes peuvent occasionnellement enlever un électron de son orbite de valence. Quand cela se produit, l'électron libéré possède assez d'énergie pour occuper une orbite plus grande (figure 2.5a), c'est un *électron libre*.

Ce n'est pas tout ; le départ de l'électron crée un vide dans l'orbite de valence appelé **trou** (figure 2.5a). Ce dernier se comporte comme une charge positive car la perte d'un électron entraîne l'apparition d'un ion positif. Le trou attire et capture tout électron dans son voisinage immédiat. L'existence de ces trous est une différence fondamentale entre les conducteurs et les semi-conducteurs. Ils permettent aux semi-conducteurs de faire toutes sortes de choses impossibles aux conducteurs.

À la température ambiante, l'énergie thermique produit peu de trous et d'électrons libres. Pour augmenter leur nombre, il est nécessaire de *doper* le cristal ; nous en parlerons dans la suite.

2.3.4 Recombinaison et durée de vie

Dans un cristal pur de silicium, l'**énergie thermique** engendre un nombre égal d'électrons libres et de trous. L'électron libre se déplace de façon aléatoire dans le cristal. Parfois, il s'approche d'un trou, ressent son attraction et tombe dedans. La **recombinaison** est la fusion d'un électron libre et d'un trou (figure 2.5b).

La durée entre la création et la disparition d'un électron libre est appelée *durée de vie*. Elle varie de quelques nanosecondes à plusieurs microsecondes selon la pureté du cristal et d'autres facteurs.

2.3.5 Ce qu'il faut retenir

Dans un cristal de silicium, à chaque instant :

- L'énergie thermique crée des électrons libres et des trous.
- Des électrons libres et des trous se recombinent.
- D'autres existent temporairement en attendant de se recombiner.

Bon à Savoir

Un trou et un électron ont la même charge de $0,16 \times 10^{-18} \text{ C}$, mais de polarités opposées.

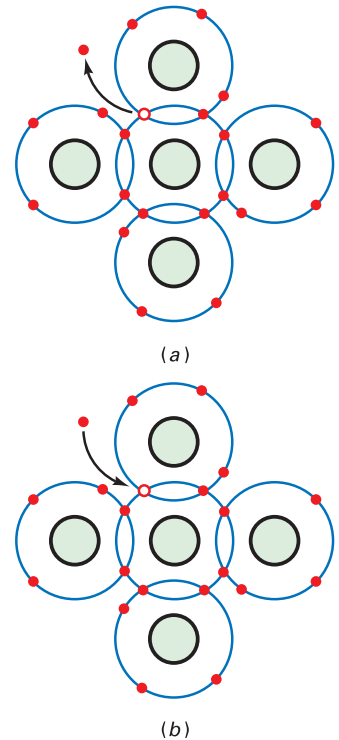


Figure 2.5

(a) Création d'une paire électron-trou par l'énergie thermique ;
(b) recombinaison d'un électron libre et d'un trou.

Question 2.3

Dans un cristal de silicium pur, il existe un million d'électrons libres ; combien existe-t-il de trous ? Que devient le nombre d'électrons libres et de trous lorsque la température ambiante augmente ?

Réponse Selon la figure 2.5a, lorsque l'énergie thermique crée un électron libre, un trou apparaît simultanément. Donc, dans un cristal de silicium pur, il y a toujours autant d'électrons libres que de trous : pour un million d'électrons libres, il y a un million de trous.

L'augmentation de température amplifie l'agitation thermique, ce qui entraîne une génération plus importante de paires électron-trou. Mais quelle que soit la température, un cristal de silicium pur possède le même nombre d'électrons libres que de trous.

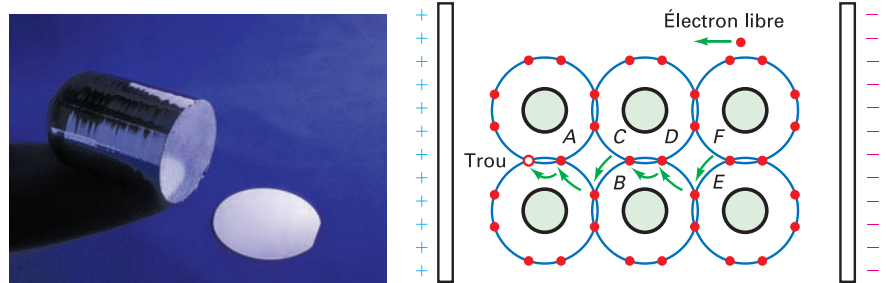
2.4 Les semi-conducteurs intrinsèques

Un **semi-conducteur intrinsèque** est un semi-conducteur pur. Un cristal de silicium est intrinsèque si tous les atomes qui le composent sont des atomes de silicium. À la température ambiante, un cristal de silicium se comporte comme un isolant car il y a peu d'électrons libres et de trous créés par l'agitation thermique. La figure 2.6a montre un lingot de cristal de silicium et une tranche de wafer.

2.4.1 Déplacement des électrons libres

La figure 2.6b représente un morceau de cristal de silicium situé entre deux plaques métalliques chargées avec un électron libre et un trou produits par l'agitation thermique. L'électron libre est sur une grande orbite au bord droit du cristal. Les charges négatives de l'électrode le repoussent vers la gauche, il va se déplacer d'une grande orbite à l'autre jusqu'à ce qu'il atteigne l'électrode positive.

Figure 2.6
Semi-conducteurs intrinsèques.
(a) Lingot de silicium de 4 pouces
et tranche de 4 pouces ;
(b) trou traversant un semi-
conducteur.



2.4.2 Déplacement des trous

Le trou à gauche sur la figure 2.6 attire l'électron de valence situé au point A pour se recombiner.

Quand l'électron de valence se déplace vers la gauche, il crée un nouveau trou au point A. L'effet est identique à celui du déplacement du trou initial en A. Un autre électron de valence peut être attiré et capturé par ce nouveau trou. De cette manière, les électrons de valence se déplacent le long du chemin marqué par les flèches. Cela signifie que le trou évolue dans le sens opposé le long du chemin A-B-C-D-E-F comme une charge positive.

2.5 Les deux types de flux de porteurs

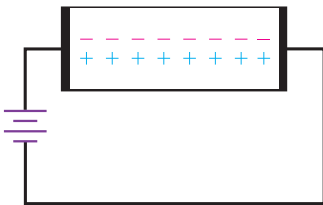


Figure 2.7
Un semi-conducteur intrinsèque
possède le même nombre
d'électrons libres et de trous.

L'échantillon de semi-conducteur représenté figure 2.7 possède le même nombre d'électrons libres que de trous. *L'agitation thermique produit les électrons libres et les trous par paires.* La tension appliquée entraîne les électrons vers la gauche et les trous vers la droite. Quand les électrons libres atteignent l'électrode de gauche, ils pénètrent dans le conducteur extérieur et s'écoulent vers le pôle positif de la pile.

D'autre part, les électrons du pôle négatif de la source s'écoulent vers le bord droit du cristal. À cet endroit, ils entrent dans le cristal et se recombinaient avec les trous qui arrivent à l'extrémité droite du cristal. De ce fait, un flux constant d'électrons et de trous existe à l'intérieur du cristal alors qu'à l'extérieur il n'existe pas de flux de trous.

Sur la figure 2.7, les électrons libres et les trous se déplacent dans des sens opposés. Dans la suite, on conçoit le courant dans un semi-conducteur comme la somme de deux flux : celui des électrons dans un sens et celui des trous dans l'autre sens. On appelle souvent **porteurs de charge** les électrons libres et les trous, car ils transportent une charge d'un endroit à un autre.

2.6 Doper un semi-conducteur

Le **dopage** est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. Un semi-conducteur dopé est appelé **semi-conducteur extrinsèque**.

2.6.1 Augmenter le nombre d'électrons libres

Comment un constructeur dope-t-il un cristal de silicium ? La première manière consiste à fondre un cristal de silicium pur. Cela brise les liaisons de valence et le liquéfie. Pour augmenter le nombre d'électrons libres, on ajoute au silicium fondu des *atomes pentavalents* tels que l'arsenic, l'antimoine et le phosphore. Ils possèdent cinq électrons périphériques et *donnent l'électron excédentaire* au cristal de silicium, ce sont des *impuretés donneuses*.

La figure 2.8a représente le silicium dopé après refroidissement et reconstitution de la structure cristalline. Un atome pentavalent est au centre, entouré de quatre atomes de silicium. Comme précédemment, les atomes voisins mettent en commun un électron avec l'atome central, et il reste un électron en trop (atome pentavalent : cinq électrons périphériques). Comme il y a huit places sur l'orbite de valence, l'électron excédentaire devient un électron libre.

Chaque atome pentavalent introduit dans le silicium donne un électron libre. Voici comment un constructeur contrôle la conductivité d'un semi-conducteur dopé. Plus il introduit d'impuretés, plus la conductivité est importante. Un semi-conducteur peu dopé a une grande résistance, tandis que fortement dopé il présente une faible résistance.

2.6.2 Augmenter le nombre de trous

Comment doper le silicium pour avoir un excès de trous ? En utilisant une *impureté trivalente* (dont l'atome a seulement trois électrons de valence) : par exemple l'aluminium, le bore, le gallium.

La figure 2.8b illustre un atome trivalent entouré par quatre atomes de silicium. Comme l'atome trivalent a seulement trois électrons de valence et que chaque voisin en donne un, il y en a seulement sept sur l'orbite de valence, cela veut dire qu'un trou s'est formé. On donne le nom d'*atome accepteur* à un atome trivalent parce que le trou ainsi créé peut accepter un électron libre pour effectuer une recombinaison.

2.6.3 Ce qu'il faut retenir

Avant de réaliser un dopage, les constructeurs doivent produire un cristal pur. Ensuite, en contrôlant le taux d'impuretés, ils peuvent déterminer avec précision les propriétés du semi-conducteur. Historiquement, le germanium pur était plus facile à produire que

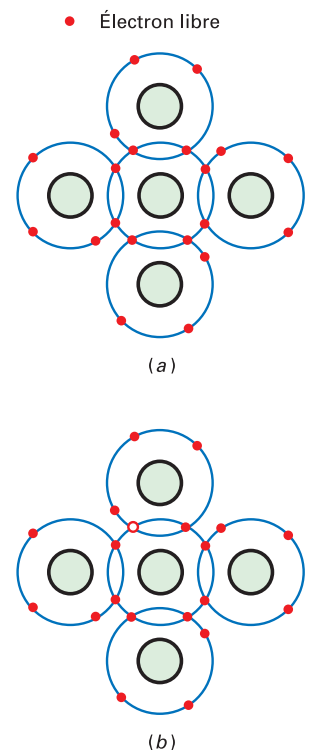


Figure 2.8
(a) Dopage pour augmenter le nombre d'électrons libres ;
(b) dopage pour augmenter le nombre de trous.

le silicium pur, c'est pour cela que les premiers composants utilisaient du germanium. Ensuite, les techniques se sont améliorées et on a pu obtenir du silicium pur. Grâce à ses qualités, le silicium est devenu le semi-conducteur le plus utilisé.

Question 2.4

Un silicium est dopé à 10 milliards d'atomes et 15 millions d'atomes pentavalents. Si la température ambiante est 25 °C, combien y a-t-il d'électrons libres et de trous ?

Réponse Chaque atome pentavalent donne un électron libre, donc le semi-conducteur possède 15 millions d'électrons libres venant du dopage. En comparaison, il n'y a presque pas de trous car ils ne peuvent venir que de l'agitation thermique.

2.4 Avez-vous compris ? En reprenant la question 2.4, si l'on ajoute 5 millions d'atomes trivalents à la place des atomes pentavalents, combien y a-t-il de trous dans le semi-conducteur ?

2.7 Les deux types de semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur dopé peut avoir un excès d'électrons libres ou un excès de trous, c'est pour cela qu'il y a deux types de semi-conducteurs dopés.

2.7.1 Le semi-conducteur de type *n*

Le silicium dopé avec une impureté pentavalente est appelé **semi-conducteur de type *n*** (*n* pour négatif). La figure 2.9 illustre un semi-conducteur de type *n* où les électrons sont beaucoup plus nombreux (*porteurs majoritaires*) que les trous (*porteurs minoritaires*).

Sous l'effet de la tension appliquée, *les électrons libres se dirigent vers la gauche et les trous vers la droite*. Quand un trou atteint le bord droit du cristal, un des électrons libres du circuit extérieur entre et se recombine avec le trou. Les électrons libres sur la figure 2.9 se dirigent vers le côté gauche du cristal où ils entrent dans le circuit extérieur pour rejoindre la borne positive de la pile.

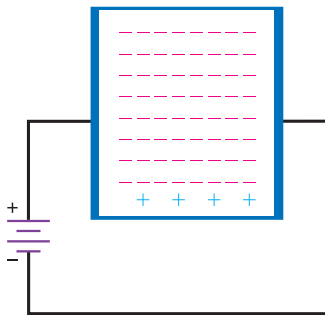


Figure 2.9
Le semi-conducteur de type *n* possède beaucoup d'électrons libres.

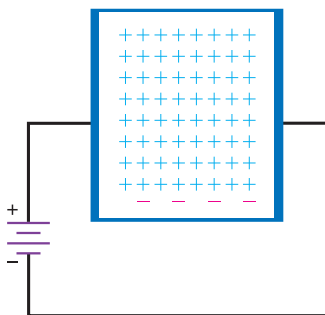


Figure 2.10
Le semi-conducteur de type *p* possède beaucoup de trous.

2.7.2 Le semi-conducteur de type *p*

Le silicium dopé par une impureté trivalente est appelé **semi-conducteur de type *p*** (*p* pour positif). La figure 2.10 montre un semi-conducteur de type *p* où les trous beaucoup plus nombreux sont les porteurs majoritaires et les électrons libres les porteurs minoritaires.

La tension appliquée entraîne *les électrons libres vers la gauche et les trous vers la droite*. Lorsque ces derniers arrivent au bord droit du cristal, ils se combinent avec les électrons libres du circuit extérieur.

Sur la figure 2.10, il existe aussi un flux de porteurs minoritaires, ce sont les électrons libres qui se déplacent de la droite vers la gauche. Ils sont si peu nombreux que leur effet est insignifiant.

2.8 La diode non polarisée

Par lui-même, un morceau de semi-conducteur n a autant d'utilité qu'une résistance au carbone, de même pour le semi-conducteur de type p . Mais quand un constructeur dope p sur la moitié du cristal et n sur l'autre moitié, quelque chose de nouveau apparaît.

La frontière entre le type p et le type n est appelée jonction pn . Elle a entraîné beaucoup d'inventions, en particulier les diodes, transistors et circuits intégrés. Comprendre la jonction pn permet de comprendre toutes sortes de composants semi-conducteurs.

2.8.1 La diode non polarisée

La figure 2.11 représente à gauche un morceau de semi-conducteur p où chaque atome trivalent (cercle avec un signe $-$) génère un trou sur son orbite de valence (repéré par un $+$).

Symétriquement, à droite il y a un morceau de semi-conducteur n où chaque cercle avec un $+$ représente un atome pentavalent et le signe $-$ son électron libre.

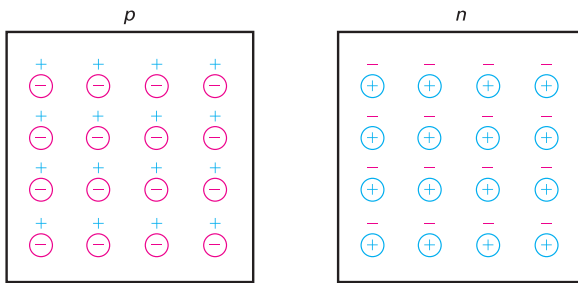


Figure 2.11
Deux types de semi-conducteurs.

Chaque partie est électriquement neutre car le nombre de $+$ est égal au nombre de $-$.

On sait faire un cristal unique avec un côté p et un côté n , comme le montre la figure 2.12. La jonction est la frontière où le type p voisine le type n . La **diode à jonction** est un autre nom donné au cristal pn . Le mot **diode** est la contraction de *di* (deux) et *électrodes*.

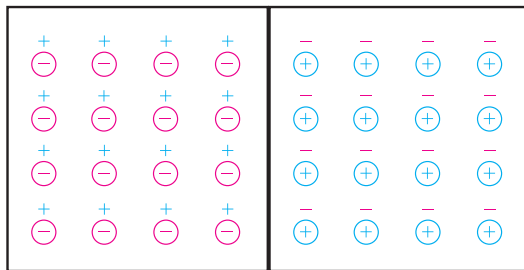


Figure 2.12
La jonction pn .

2.8.2 La zone déplétée

À cause de leur répulsion les uns envers les autres, les électrons libres du côté n (figure 2.12) ont tendance à diffuser (se disperser) dans toutes les directions. Quelques-uns traversent la jonction et entrent dans la région p où

ils sont minoritaires. Avec énormément de trous autour d'eux, leur durée de vie est très courte et très rapidement l'électron libre se recombine avec un trou. Ceci entraîne la *disparition du trou* et l'électron libre devient un *électron de valence*.

Chaque fois qu'un électron diffuse à travers la jonction, il crée une paire d'ions. Lorsqu'il quitte la région *n*, il laisse derrière lui un atome pentavalent qui a perdu son cinquième électron, donc qui est devenu positif, et il produit un ion négatif avec l'atome trivalent qui le capture.

La figure 2.13a montre les ions positifs (cercle +) et négatifs (cercle -) de part et d'autre de la jonction. Ils ne peuvent bouger dans le cristal comme les électrons libres et les trous à cause des liaisons de covalence.

Chaque paire d'ions positif et négatif est un *dipôle* qui vient de la disparition d'un électron libre et d'un trou. Au fur et à mesure que le nombre de dipôles augmente, la région près de la jonction se vide de porteurs ; on l'appelle la **zone déplétée** (figure 2.13b).

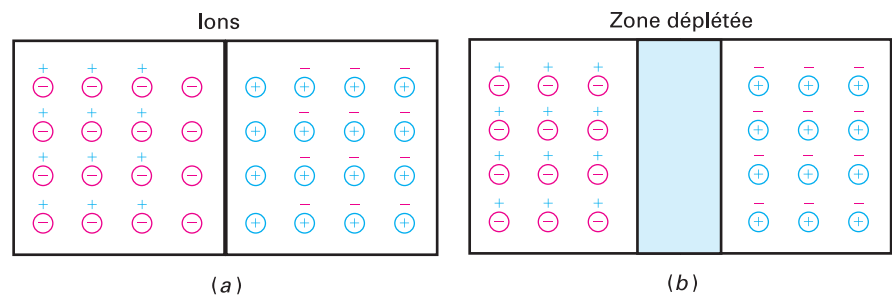


Figure 2.13
(a) Création des ions
à la jonction ;
(b) zone déplétée.

2.8.3 La barrière de potentiel

Chaque dipôle crée un champ électrique entre l'ion positif et l'ion négatif. Si un électron supplémentaire entre dans la zone déplétée, ce champ le repousse vers la région *n*. La force du champ électrique s'accroît à chaque électron traversant la zone jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Cela veut dire, en première approximation, que ce champ électrique arrête la diffusion des électrons à travers la jonction.

Sur la figure 2.13a, le champ électrique entre les ions est équivalent à une différence de potentiel appelée **barrière de potentiel**. À 25 °C, elle est égale à 0,3 V pour le germanium et 0,7 V pour le silicium.

2.9 La polarisation directe

On applique une source de tension continue sur la diode, la borne négative sur le côté *n* et la borne positive sur le côté *p* (figure 2.14). Cette connexion est une **polarisation directe**.

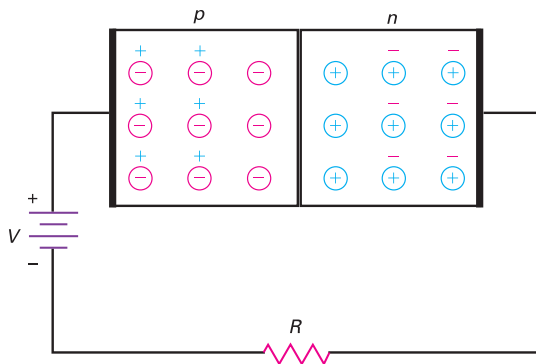
2.9.1 Flux des électrons libres

La source de tension continue de la figure 2.14 pousse les électrons et les trous vers la jonction. Si sa tension est plus faible que la barrière de potentiel, les électrons n'ont pas assez d'énergie pour traverser la zone déplétée. Les ions les repoussent du côté *n*, et de ce fait il n'y a pas de courant à travers la diode.

Si la tension de la source est supérieure à la barrière de potentiel, les électrons libres ont une énergie suffisante pour traverser la zone déplétée et aller se recombiner avec les trous du côté p . En imaginant les trous se déplaçant vers la droite et les électrons vers la gauche, on se fait l'idée du phénomène de base. Quelque part près de la jonction s'effectue la recombinaison des charges opposées. Le courant continu à travers la diode provient de l'entrée continue d'électrons libres à la droite de la diode et de la création incessante de trous à l'extrémité gauche.

2.9.2 Le parcours d'un électron

Suivons un électron libre dans la totalité du circuit. Après avoir quitté la borne négative de la source, il entre dans la diode par le contact de droite. Il traverse toute la région n pour atteindre la jonction. Si la pile présente une tension supérieure à 0,7 V, il possède assez d'énergie pour traverser la zone déplétée et à son entrée dans la zone p , il se combine avec un trou.



||| Multisim

Figure 2.14
Polarisation directe.

En d'autres termes, il est devenu un électron de valence et il continue son voyage en passant de trou en trou pour finalement atteindre le contact gauche de la diode. Quand il quitte cet endroit, un nouveau trou apparaît et le processus recommence. Les milliards d'électrons libres faisant le même parcours engendrent le courant continu à travers la diode. Une résistance en série limite le courant direct.

2.9.3 Ce qu'il faut retenir

Le courant traverse facilement une diode polarisée en direct. Aussi long-temps que la tension appliquée sera supérieure à la tension de barrière, il y aura un courant continu dans le circuit. Pour une diode au silicium, une tension de source supérieure à 0,7 V donne un courant direct.

2.10 La polarisation inverse

Inversons la source continue pour obtenir le schéma représenté par la figure 2.15. Maintenant le côté p est relié au pôle négatif et le côté n au pôle positif. Ce type de connexion est une **polarisation inverse**.

III Multisim

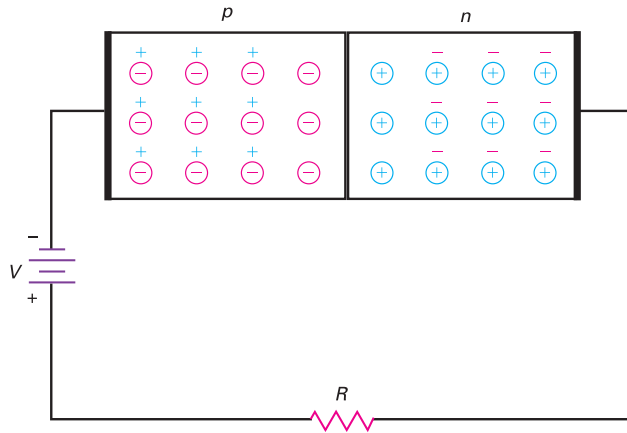


Figure 2.15
Polarisation inverse.

2.10.1 Élargissement de la zone déplétée

Les trous et les électrons libres s'éloignent de la jonction car le pôle + attire les électrons et le pôle – les trous. La zone déplétée s'élargit.

Quelle est la largeur de la zone déplétée sur la figure 2.16a ? Le départ des électrons et des trous crée des ions supplémentaires qui font augmenter la différence de potentiel sur la zone déplétée. Cette augmentation se termine lorsque la tension de barrière est égale à la tension appliquée ; à ce moment, le départ des porteurs s'arrête.

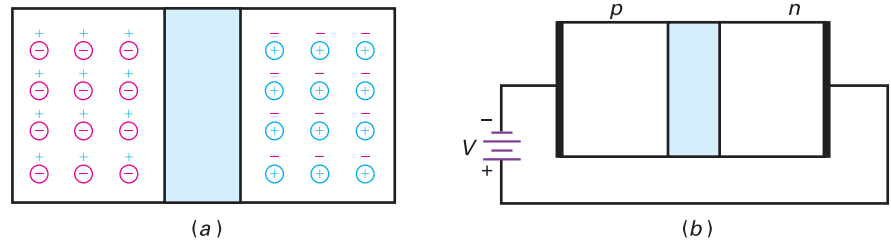


Figure 2.16
(a) Zone déplétée ;
(b) l'augmentation de la polarisation inverse élargit la zone déplétée.

On représente parfois la zone déplétée par une région grisée de largeur proportionnelle à la tension inverse, comme sur la figure 2.16b. *Quand la tension inverse augmente, la zone déplétée s'élargit.*

2.10.2 Courant de porteurs minoritaires

Y a-t-il un courant lorsque la zone déplétée est stabilisée ? Un faible courant existe en polarisation inverse. On a vu que l'agitation thermique fabrique continuellement des paires électron-trou ; quelques porteurs minoritaires existent donc de part et d'autre de la jonction. La plupart se recombinaient avec les porteurs majoritaires ; mais ceux apparus dans la zone déplétée existent suffisamment longtemps pour traverser la jonction, et un faible courant circule dans le circuit extérieur. La figure 2.17 illustre cette idée.

Supposons que l'énergie thermique crée un électron libre et un trou dans la zone déplétée. Le premier est poussé en dehors vers la droite, forçant un autre à quitter le contact droit. Le second est poussé vers la gauche, il permet alors à un électron