EXERCICES ET PROBLÈMES D'ÉLECTRONIQUE

- Rappels de cours
- Méthodes
- Exercices et problèmes avec corrigés détaillés

Yves Granjon
Professeur et directeur de l'École Nationale Supérieure d'Électricité et de Mécanique de Nancy (ENSEM)

DUNOD

Illustration de couverture : © *DigitalVision*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010
ISBN 978-2-10-055594-9

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

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS ix

NOTATIONS ET CONVENTIONS xi

MÉMENTO D'ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE xiii

FORMULAIRE xix

CHAPITRE 1 • **LA JONCTION PN ET LES DIODES À SEMI-CONDUCTEURS**

Rappels de cours 1

1.1 La conduction électrique intrinsèque 1.2 Semi-conducteurs dopés
1.3 La diode à jonction 1.4 Polarisation de la diode
1.5 Puissance dissipée dans une diode 1.6 Diodes Zener

Énoncés des exercices 7

Énoncés des problèmes 11

Du mal à démarrer ? 12

Corrigés des exercices 14

Corrigés des problèmes 21

CHAPITRE 2 • **LA POLARISATIONDU TRANSISTOR BIPOLAIRE**

Rappels de cours 25

2.1 Le transistor bipolaire 2.2 Les grandeurs électriques associées au transistor
2.3 Caractéristiques du transistor NPN 2.4 Polarisation du transistor NPN
2.5 Approche physique de la polarisation 2.6 Polarisation du transistor PNP

Énoncés des exercices 30

Énoncés des problèmes 34

Du mal à démarrer ? 36

Corrigés des exercices 38

Corrigés des problèmes 45

CHAPITRE 3 • **LE FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE DU TRANSISTOR BIPOLAIRE**

Rappels de cours 50

3.1 Le régime de petits signaux 3.2 Les paramètres hybrides du transistor NPN

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit

3.3 Le schéma équivalent du transistor NPN 3.4 Construction des schémas équivalents
3.5 Amplificateurs 3.6 Condensateurs de découplage
Énoncés des exercices 56
Énoncés des problèmes 60
Du mal à démarrer ? 63
Corrigés des exercices 65
Corrigés des problèmes 76

CHAPTRE 4 • **L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN RÉGIME LINÉAIRE**

Rappels de cours 85
4.1 L'amplificateur opérationnel 4.2 Caractéristique de l'amplificateur opérationnel
4.3 Schéma équivalent 4.4 Fonctionnement linéaire
4.5 Montages à amplificateurs opérationnels 4.6 Correction d'offset
Énoncés des exercices 90
Énoncés des problèmes 95
Du mal à démarrer ? 97
Corrigés des exercices 98
Corrigés des problèmes 108

CHAPITRE 5 • **LES FILTRES FRÉQUENTIELS**

Rappels de cours 113
5.1 Comportement fréquentiel des systèmes 5.2 Diagrammes de Bode 5.3 Les filtres
5.4 Filtres réels et filtres idéaux 5.5 Filtrage de signaux périodiques
Énoncés des exercices 119
Énoncés des problèmes 122
Du mal à démarrer ? 124
Corrigés des exercices 125
Corrigés des problèmes 137

CHAPITRE 6 • **L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN RÉGIME NON LINÉAIRE**

Rappels de cours 141
6.1 Fonctionnement en comparateur 6.2 Comparateur à collecteur ouvert
6.3 Étude approfondie du basculement d'un comparateur 6.4 Astables et monostables
Énoncés des exercices 144
Énoncés des problèmes 149

Du mal à démarrer ? 150
Corrigés des exercices 151
Corrigés des problèmes 170

CHAPITRE 7 • **LES TRANSISTORS À EFFET DE CHAMP**

Rappels de cours 175

7.1 Le transistor à effet de champ à jonction (JFET) 7.2 Caractéristiques des transistors à effet de champ 7.3 Polarisation d'un transistor à effet de champ 7.4 Schéma équivalent en régime linéaire 7.5 Phénomène de distorsion quadratique 7.6 Transistor MOS 7.7 Transistors à effet de champ en commutation

Énoncés des exercices 180
Énoncés des problèmes 184
Du mal à démarrer ? 185
Corrigés des exercices 187
Corrigés des problèmes 195

CHAPITRE 8 • **LES CIRCUITS LOGIQUES COMBINATOIRES**

Rappels de cours 198

8.1 Les lois de l'algèbre de Boole 8.2 Propriétés fondamentales 8.3 Fonctions et systèmes logiques combinatoires 8.4 Circuits logiques électroniques 8.5 Simplification des fonctions logiques 8.6 Temps de commutation des portes logiques

Énoncés des exercices 204
Énoncés des problèmes 207
Du mal à démarrer ? 209
Corrigés des exercices 210
Corrigés des problèmes 219

CHAPITRE 9 • **LES CIRCUITS LOGIQUES SÉQUENTIELS**

Rappels de cours 226

9.1 Définition 9.2 La bascule R/S 9.3 La mémoire par automaintien 9.4 La bascule J/K 9.5 Les compteurs synchrones

Énoncés des exercices 233
Du mal à démarrer ? 235
Corrigés des exercices 235

INDEX **239**

AVANT-PROPOS

L'électronique est la discipline qui s'intéresse aux dispositifs électriques construits autour de la technologie des semi-conducteurs. La plupart du temps, les courants et les tensions mis en œuvre restent de faible amplitude, excepté en électronique de puissance.

Le traitement du signal, les automatismes, l'informatique et d'une manière plus générale, une grande partie des appareils que nous utilisons quotidiennement possèdent des systèmes électroniques. Que ce soit pour la commande des processus, le traitement de l'information, le contrôle ou la mesure des phénomènes, l'électronique apporte des solutions simples, fiables et souples à un grand nombre de problèmes techniques.

Cet ouvrage rassemble toutes les notions de base de l'électronique : de la diode à jonction jusqu'aux systèmes logiques combinatoires et séquentiels, en passant par les montages à transistors et à amplificateurs opérationnels. Il est structuré en neuf chapitres développant chacun un thème particulier, avec des rappels de cours, des exercices d'entraînement et des problèmes entièrement corrigés. Les solutions sont présentées dans leurs moindres détails en insistant systématiquement sur les méthodes à assimiler et sur le savoir-faire à acquérir absolument pour être capable de résoudre n'importe quel problème d'électronique.

Chaque chapitre propose des exercices de difficultés variées. Il est conseillé de les aborder dans l'ordre, sans chercher à brûler les étapes en négligeant tel ou tel qui paraît trop facile et sans succomber à la tentation de lire trop rapidement la solution.

Certains de ces exercices sont de grands classiques ; d'autres sont plus originaux. Ils ont tous vocation de guider l'étudiant vers la maîtrise des composants de l'électronique et des fonctions qu'ils permettent de réaliser et de l'aider à acquérir suffisamment d'aisance pour aborder avec succès des problèmes de plus en plus sophistiqués.

L'électronique n'est pas une discipline extrêmement compliquée pour qui l'aborde avec rigueur et méthode. Elle nécessite toutefois que le lecteur soit familiarisé avec les lois fondamentales de l'électrocinétique, que ce soit en régime continu, sinusoïdal ou transitoire. Ces notions sont supposées acquises mais il pourra, si besoin, se référer à l'aide-mémoire d'électrocinétique qui est proposé dans les pages qui suivent et qui rappelle les principaux résultats et théorèmes qu'il est indispensable de connaître.

Les pré-requis de mathématiques de l'électronique ne sont pas nombreux : ils concernent l'analyse des fonctions réelles, le calcul différentiel et intégral et les nombres complexes. Le formulaire situé au début de l'ouvrage regroupe toutes les formules de mathématiques utiles à l'électronicien.

Il est recommandé au lecteur de respecter scrupuleusement les notations et les conventions, notamment celles qui concernent les signes et les sens des flèches des courants et des tensions et d'utiliser systématiquement les unités du système international. La plupart des erreurs proviennent du non respect de ces règles élémentaires.

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

Yves Granjon

NOTATIONS ET CONVENTIONS

GRANDEURS ÉLECTRIQUES CONTINUES OU VARIABLES

En électronique comme en électricité, les grandeurs électriques, notamment les courants et les tensions, sont continues (constantes dans le temps) ou variables. Cet ouvrage utilise la convention universellement adoptée en ce qui concerne la différentiation de la notation de ces grandeurs :

- Les grandeurs constantes seront systématiquement notées à l'aide de lettres majuscules.
  Exemple : U_1, V, I_B, V_{BE}, V_{max}.
- Les grandeurs variables au cours du temps seront systématiquement notées à l'aide de lettres minuscules.
  Exemple : v_2, u, i_B, v_{BE}, v_+.
  Lorsqu'on écrit i_B, cela signifie donc toujours $i_B(t)$.

GRANDEURS VECTORIELLES ET SCALAIRES

Les grandeurs notées en caractères maigres seront considérées comme scalaire (par exemple : U_1, v_{BE}, v_+). Les grandeurs vectorielles seront notées en caractères gras (par exemple : **E**).

REPRÉSENTATION COMPLEXE

La représentation complexe est associée (**uniquement**) aux circuits électriques fonctionnant en régime sinusoïdal :

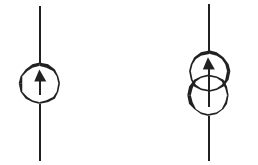
$$v(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi) \Leftrightarrow \underline{V} = V_0 e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Remarque

Le nombre i des mathématiciens est en général noté j par les électriciens. Nous adopterons donc cette notation.

SOURCES DE TENSION ET SOURCES DE COURANT

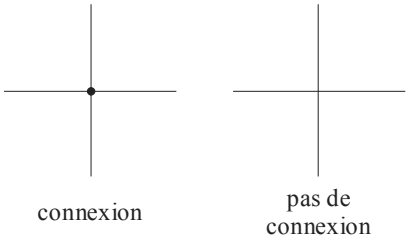
Plusieurs normes coexistent à propos de la représentation symbolique des sources de courant et de tension. Nous adopterons, dans cet ouvrage, la représentation proposée dans la figure ci-contre.



source de tension — source de courant

SCHÉMAS

Dans les schémas des montages électroniques, les connexions électriques sont matérialisées par des traits. Lorsqu'une connexion est effectuée en un nœud du circuit, ce nœud sera matérialisé par un point. Si deux fils se croisent sans être connectés l'un à l'autre, aucun point n'apparaîtra sur le schéma.

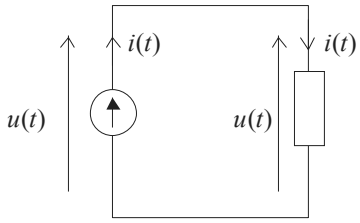


CONVENTION GÉNÉRATEUR ET CONVENTION RÉCEPTEUR

Il s'agit là des conventions les plus fondamentales des circuits électriques. Leur méconnaissance ou leur incompréhension est à l'origine de bon nombre d'erreurs grossières dans l'étude des problèmes d'électricité, donc d'électronique.

Lorsqu'un générateur alimente un dipôle récepteur, la présence d'un seul et même courant dans le circuit impose, de fait, la règle suivante :

Lorsqu'un dipôle récepteur présente à ses bornes une différence de potentiels $u(t)$ représentée par une flèche dirigée vers le potentiel le plus élevé, il est parcouru par un courant que l'on représente positivement par une flèche dirigée en sens contraire.



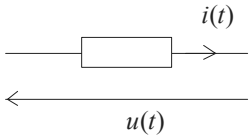
MÉMENTO D'ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE

LOIS DE FONCTIONNEMENT DES DIPÔLES ÉLÉMENTAIRES

L'électronique utilise abondamment les trois dipôles passifs linéaires élémentaires à savoir :

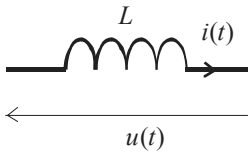
- La résistance dont la loi de fonctionnement s'appelle la loi d'Ohm :

$$u = RI$$



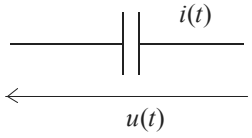
- La bobine d'auto-inductance L

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$



- Le condensateur de capacité C :

$$u = \frac{1}{C}\int i\,\mathrm{d}t \Leftrightarrow i = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$



Remarque

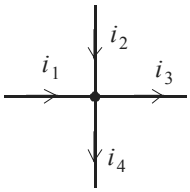
Ces lois ne sont valables qu'en respectant la convention récepteur, c'est-à-dire avec un courant $i(t)$ orienté en sens inverse de la tension $u(t)$. Elles sont vraies quel que soit le régime de fonctionnement du circuit.

Lois de Kirchhoff

Loi des nœuds

La somme algébrique des courants circulant en direction d'un nœud d'un circuit est nulle. Ou encore : la somme des courants dirigés vers un nœud du circuit est égale à la somme des courants issus de ce même nœud.

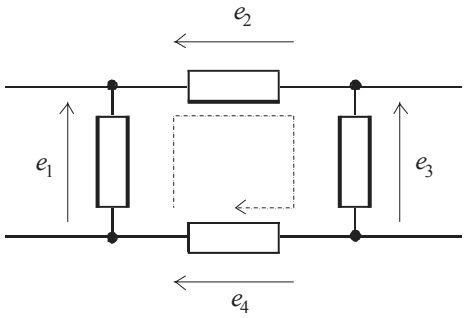
Exemple : $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$.



Loi des mailles

La somme algébrique des tensions relevées le long d'une maille est nulle. Les tensions orientées dans le sens de parcours de la maille sont comptées positivement. Les tensions orientées en sens contraire sont comptées négativement.

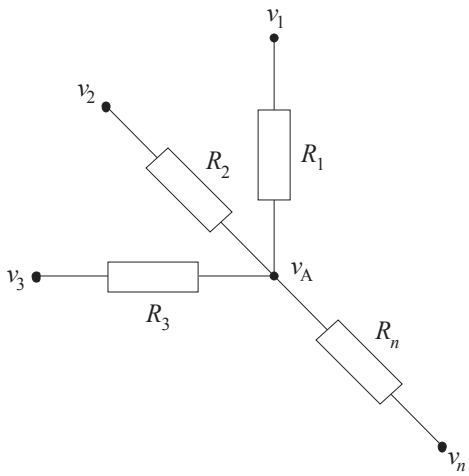
Exemple : $e_1 - e_2 - e_3 + i_4 = 0$.



Théorème de Millman

Le potentiel en un nœud quelconque d'un circuit est égal à la moyenne des potentiels des nœuds voisins, pondérée par les valeurs des conductances (inverses des résistances) des différentes branches.

$$v_A = \frac{\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} + \ldots + \frac{v_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}}$$



Théorèmes de Thévenin et de Norton

Théorème de Thévenin

Tout circuit linéaire placé sous la forme d'un dipôle est équivalent à un dipôle de Thévenin formé d'un générateur de tension parfait E et d'une résistance R associés en série. La valeur de E est égale à la tension à vide aux bornes du dipôle et R est la résistance équivalente à l'ensemble du circuit lorsque toutes ses sources de tension ont été court-circuitées et ses sources de courant remplacées par des circuits ouverts.

Théorème de Norton

Tout circuit linéaire placé sous la forme d'un dipôle est équivalent à un dipôle de Norton formé d'un générateur de courant parfait I et d'une résistance R associés en parallèle. La valeur de I est égale au courant entre les deux bornes court-circuitées du dipôle (encore appelé courant de court-circuit) et R est la résistance équivalente à l'ensemble du circuit lorsque toutes ses sources de tension ont été court-circuitées et ses sources de courant remplacées par des circuits ouverts.

Equivalence Thévenin-Norton

Tout générateur de tension parfait E associé en série avec une résistance R est équivalent à un générateur de courant E/R associé en parallèle avec cette même résistance R.

Principe du diviseur de tension

Lorsqu'un ensemble de deux résistances R_1 et R_2 associées en série et parcourues par le même courant est soumis à une différence de potentiels V_0, le point commun aux deux résistances se

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit