

TOUT EN FICHES

EXERCICES ET MÉTHODES D'

ÉLECTRONIQUE

YVES GRANJON

Professeur à l'université de Lorraine

DUNOD



Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté, des ressources complémentaires sont disponibles sur le site www.dunod.com.

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil). Sur la page de l'ouvrage, sous la couverture, cliquez sur le lien « LES + EN LIGNE ».

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 1^{er} 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, 2010, 2018

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

ISBN 978-2-10-077078-6

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	xi
Notations et conventions	xi
Mémento d'électricité générale	xi
1 La jonction PN et les diodes à semi-conducteurs	1
Fiche 1 La conduction électrique intrinsèque	2
Fiche 2 Semi-conducteurs dopés	3
Fiche 3 La diode à jonction	4
Fiche 4 Caractéristiques électrique des diodes à jonction	5
Fiche 5 Polarisation de la diode	7
Fiche 6 Puissance dissipée dans une diode	7
Fiche 7 Diodes Zener	8
QCM	9
Vrai ou faux?	14
Exercices	16
2 La polarisation du transistor bipolaire	31
Fiche 1 Le transistor bipolaire	32
Fiche 2 Les grandeurs électriques associées au transistor	32
Fiche 3 Caractéristiques du transistor NPN	33
Fiche 4 Polarisation du transistor NPN	33
Fiche 5 Approche physique de la polarisation	34
Fiche 6 Polarisation du transistor PNP	36
QCM	37
Vrai ou faux?	40
Exercices	42
3 Le fonctionnement dynamique du transistor bipolaire	59
Fiche 1 Le régime de petits signaux	60
Fiche 2 Les paramètres hybrides du transistor NPN	60
Fiche 3 Le schéma équivalent du transistor NPN	62
Fiche 4 Construction des schémas équivalents	62
Fiche 5 Amplificateurs	63
Fiche 6 Condensateurs de découplage	65
QCM	66
Vrai ou faux?	69
Exercices	71
4 L'amplificateur opérationnel en régime linéaire	95
Fiche 1 L'amplificateur opérationnel	96
Fiche 2 Caractéristique de l'amplificateur opérationnel	96
Fiche 3 Schéma équivalent	97
Fiche 4 Fonctionnement linéaire	97
Fiche 5 Montage suiveur	98

Fiche 6	Amplificateur de tension	99
Fiche 7	Correction d'offset	100
QCM		101
Vrai ou faux?		104
Exercices		106
5	Les filtres fréquentiels	127
Fiche 1	Comportement fréquentiel des systèmes	128
Fiche 2	Diagrammes de Bode	129
Fiche 3	Les filtres	131
Fiche 4	Filtres réels et filtres idéaux	132
Fiche 5	Filtrage de signaux périodiques	132
QCM		134
Vrai ou faux?		137
Exercices		139
6	L'amplificateur opérationnel en régime non linéaire	157
Fiche 1	Fonctionnement en comparateur	158
Fiche 2	Comparateur à collecteur ouvert	158
Fiche 3	Étude approfondie du basculement d'un comparateur	159
Fiche 4	Astables et monostables	160
QCM		162
Vrai ou faux?		165
Exercices		167
7	Les transistors à effet de champ	193
Fiche 1	Le transistor à effet de champ à jonction (jfet)	194
Fiche 2	Caractéristiques des transistors à effet de champ	194
Fiche 3	Polarisation d'un transistor à effet de champ	195
Fiche 4	Schéma équivalent en régime linéaire	196
Fiche 5	Phénomène de distorsion quadratique	197
Fiche 6	Transistor MOS	198
Fiche 7	Transistors à effet de champ en commutation	198
QCM		200
Vrai ou faux?		203
Exercices		205
8	Les circuits logiques combinatoires	221
Fiche 1	Les lois de l'algèbre de Boole	222
Fiche 2	Propriétés fondamentales	222
Fiche 3	Fonctions et systèmes logiques combinatoires	223
Fiche 4	Circuits logiques électroniques	224
Fiche 5	Simplification des fonctions logiques	226
Fiche 6	Temps de commutation des portes logiques	227
QCM		229
Vrai ou faux?		232
Exercices		234
9	Les circuits logiques séquentiels	253
Fiche 1	Définition	254
Fiche 2	La bascule R/S	254
Fiche 3	La mémoire par automaintien	256
Fiche 4	La bascule J/K	258
Fiche 5	Les compteurs synchrones	259
QCM		261
Vrai ou faux?		264
Exercices		266
	Formulaire	271
	Index	274

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 fourni dans cet 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 différenciation 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 : $\mathbf{E}$).

Représentation complexe

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

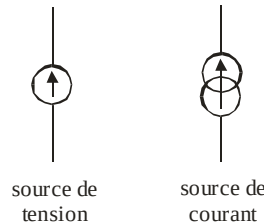
$$v(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi) \Leftrightarrow \underline{V} = V_0 e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Remarque

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

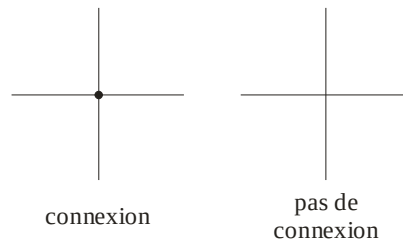
Sources de tension et sources de courant

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.



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.

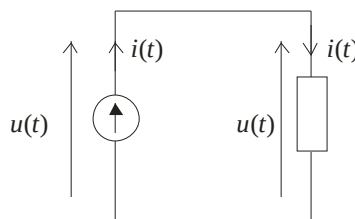


Convention générateur et convention récepteur

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.



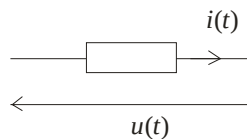
Mémento d'électricité générale

Lois de fonctionnement des dipôles élémentaires

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

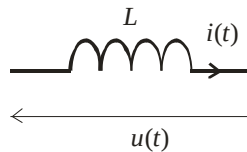
- La résistance dont la loi de fonctionnement s'appelle la loi d'Ohm :

$$u = RI$$



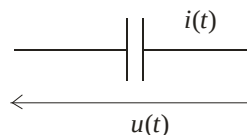
- La bobine d'auto-inductance L

$$u = L \frac{di}{dt}$$



- Le condensateur de capacité C :

$$u = \frac{1}{C} \int i dt \Leftrightarrow i = C \frac{du}{dt}$$



Remarque

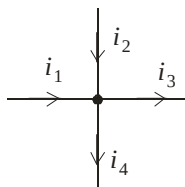
Ces lois ne sont valables qu'en respectant la convention récepteur, c'est-à-dire avec un courant $i(t)$ orienté en sens inverse de la tension $u(t)$. Elles sont vraies quel que soit le régime de fonctionnement du circuit.

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.

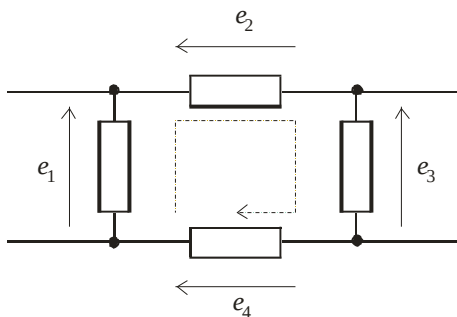
Exemple : $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$.



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.

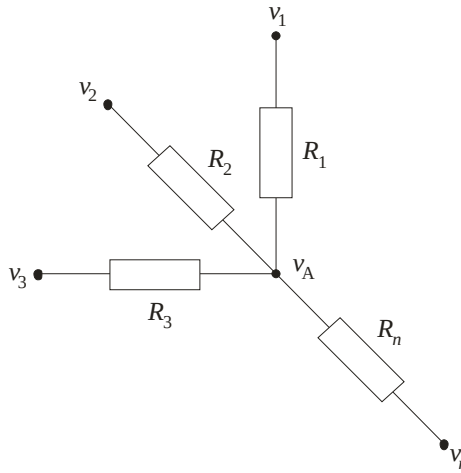
Exemple : $e_1 - e_2 - e_3 + e_4 = 0$.



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.

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



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.

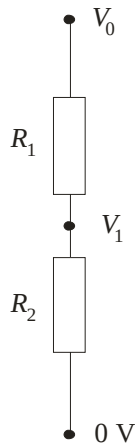
Equivalence Thévenin-Norton

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 trouve au potentiel V_1 défini par :

$$V_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0$$



Régime sinusoïdal

Dans un circuit électrique linéaire (composé uniquement d'éléments fonctionnant linéairement) alimenté par un générateur sinusoïdal, tous les courants et tensions en tout point du circuit sont sinusoïdaux, de même pulsation que la source d'alimentation.

La représentation complexe d'un circuit en régime sinusoïdal consiste à associer aux grandeurs électriques, un modèle complexe :

- $v(t) = V_0 \cos \omega t \Leftrightarrow \underline{V} = V_0 e^{j\omega t}$,
- $u(t) = U_0 \cos (\omega t + \varphi) \Leftrightarrow \underline{U} = U_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$,
- Condensateur C : impédance complexe $\underline{Z} = \frac{1}{jC\omega}$,
- Auto-inductance L : impédance complexe $\underline{Z} = jL\omega$.

En régime sinusoïdal, toutes les lois de l'électricité s'appliquent aux modèles complexes des circuits en remplaçant les éléments passifs par leurs impédances complexes et les courants et tensions par leurs représentations complexes.

- Association de dipôles en série : $\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$,
- Association de dipôles en parallèle : $\frac{1}{\underline{Z}_{eq}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2}$,
- Lois de Kirchhoff : $\sum \underline{I} = 0$ et $\sum \underline{V} = 0$,

- Théorème de Millman : $\underline{V}_A = \frac{\frac{\underline{V}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{V}_2}{\underline{Z}_2} + \frac{\underline{V}_3}{\underline{Z}_3} + \dots + \frac{\underline{V}_n}{\underline{Z}_n}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_n}}$.

Les théorèmes de Thévenin et de Norton restent également valables en régime sinusoïdal si on les applique dans leur représentation complexe.

La jonction PN et les diodes à semi-conducteurs

MOTS-CLÉS

Conduction électrique intrinsèque ■ Semi-conducteurs ■ Jonction PN ■ Diode à jonction ■ Anode ■ Cathode ■ Effet d'avalanche ■ Diode parfaite ■ Diode idéale ■ Polarisation ■ Puissance dissipée dans une diode ■ Diode Zener ■ Écrêtage ■ Redressement

Le dispositif à semi-conducteurs le plus élémentaire est la diode à jonction. À la différence des dipôles passifs élémentaires comme la résistance, la bobine ou le condensateur, la caractéristique de la diode n'est pas linéaire. Autrement dit, la relation qui lie le courant qui la traverse à la tension présente à ses bornes n'est pas régie par une équation différentielle linéaire. Cela lui confère des propriétés bien spécifiques qui la rendent utile dans des montages particulièrement intéressants dès lors que l'on souhaite transformer la forme des signaux électriques. On a ainsi l'habitude de dire communément, que la diode laisse passer le courant dans un sens et pas dans l'autre. Par ailleurs, la diode est la brique de base de toute l'électronique moderne, autrement dit la branche de l'électricité basée sur les composants à semi-conducteurs et dont l'intérêt n'est plus à démontrer dans les domaines du traitement du signal et de l'information.

La conduction électrique intrinsèque

Dans un matériau à structure cristalline, les atomes sont liés entre eux par des liaisons dites covalentes qui consistent en des combinaisons d'électrons entre atomes voisins. Ces liaisons peuvent être plus ou moins fortes. Dans le cas d'une liaison très forte, les électrons participant à cette liaison seront difficilement mobilisables. En revanche, si cette liaison est plus faible, un apport d'énergie extérieur, par exemple un champ électrique, peut être suffisant pour mobiliser ces électrons : ces électrons sont dits « libres », libres de se déplacer dans la structure cristalline : c'est le phénomène de la conduction électrique intrinsèque. En quittant sa position initiale, un électron devenu libre laisse derrière lui un « trou » correspondant à une vacance d'électron. L'atome étant initialement neutre, un trou est donc chargé positivement. Ce trou peut bien sûr être comblé par un autre électron libre venu d'un atome voisin. Dans ce cas, le trou « se déplace » en sens contraire du déplacement de l'électron. La conduction électrique peut tout aussi bien être interprétée comme un déplacement de trous que comme un déplacement d'électrons.

Les électrons libres sont appelés porteurs de charge négatifs. Les trous sont les porteurs de charge positifs.

On modélise la faculté des électrons à se mobiliser pour participer à un phénomène de conduction par des bandes d'énergies (figure 1.1) :

- bande de valence : tant qu'un électron se trouve dans cette bande, il participe à une liaison covalente au sein du cristal ;
- bande de conduction : un électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se trouver dans cette bande ; il est alors mobile et peut participer à un phénomène de conduction ;
- bande interdite : la mécanique quantique a montré que les électrons ne peuvent pas prendre des niveaux d'énergie quelconques, mais que ceux-ci sont quantifiés ; entre la bande de valence et la bande de conduction peut donc exister une bande interdite. Pour rendre un électron mobile, il faut donc impérativement apporter de l'énergie en quantité suffisante pour franchir ce véritable fossé (*gap* en anglais).

L'énergie d'un électron se mesure en électron-volts (eV) : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

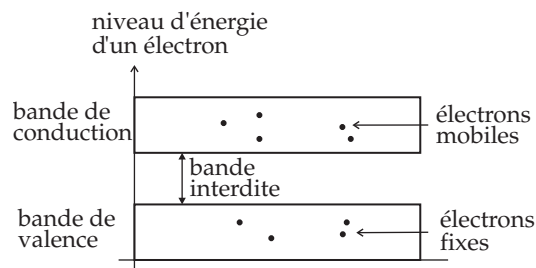


Figure 1.1