

TOUT EN FICHES

EXERCICES ET MÉTHODES D'

ÉLECTRONIQUE

YVES GRANJON

Professeur à l'université de Lorraine

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



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 :

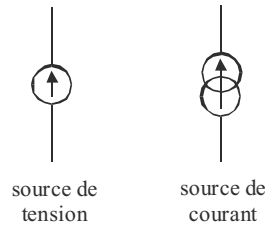
$$v(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi) \Leftrightarrow \underline{V} = V_0 e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Remarque

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

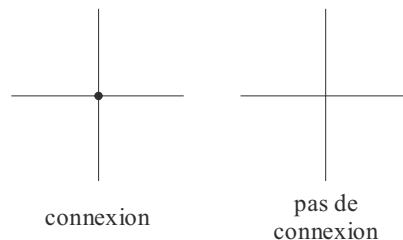
Sources de tension et sources de courant

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.

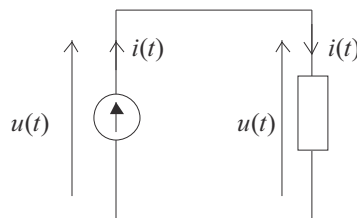


Convention générateur et convention récepteur

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.



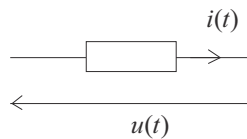
Mémento d'électricité générale

Lois de fonctionnement des dipôles élémentaires

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

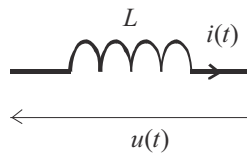
- La résistance dont la loi de fonctionnement s'appelle la loi d'Ohm :

$$u = RI$$



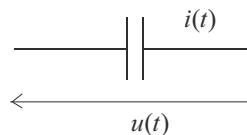
- La bobine d'auto-inductance L

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



- Le condensateur de capacité C :

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



Remarque

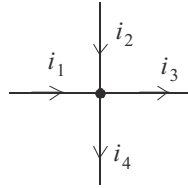
Ces lois ne sont valables qu'en respectant la convention récepteur, c'est-à-dire avec un courant $i(t)$ orienté en sens inverse de la tension $u(t)$. Elles sont vraies quel que soit le régime de fonctionnement du circuit.

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.

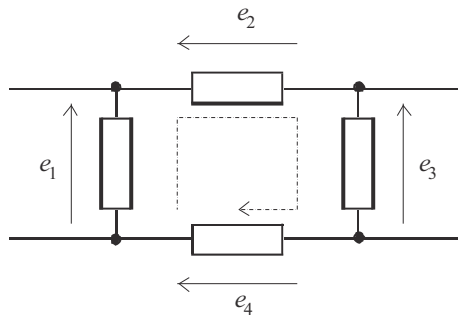
Exemple : $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$.



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.

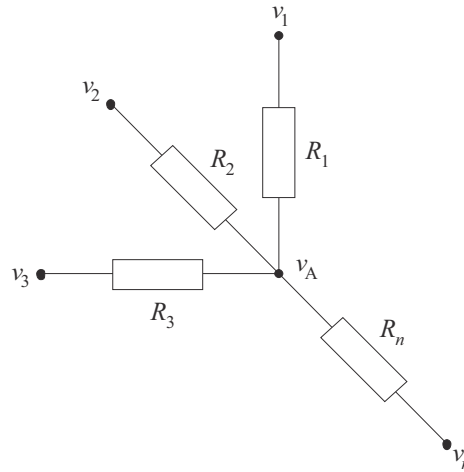
Exemple : $e_1 - e_2 - e_3 + i_4 = 0$.



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.

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



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.

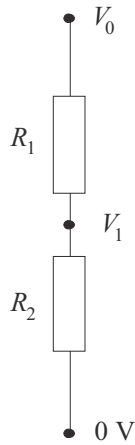
Equivalence Thévenin-Norton

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

- Théorème de Millman : $\underline{V}_A = \frac{\frac{V_1}{\underline{Z}_1} + \frac{V_2}{\underline{Z}_2} + \frac{V_3}{\underline{Z}_3} + \dots + \frac{V_n}{\underline{Z}_n}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_n}}$.

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) : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

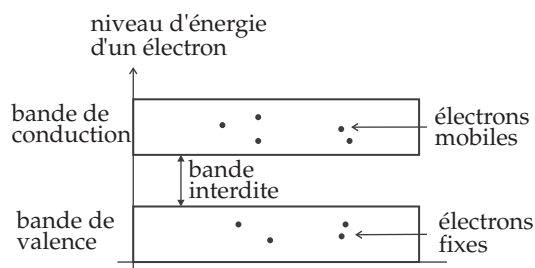


Figure 1.1

En fonction de la disposition de ces bandes, et surtout de la largeur de la bande interdite, les matériaux peuvent être isolants, conducteurs ou semi-conducteurs (figure 1.2).

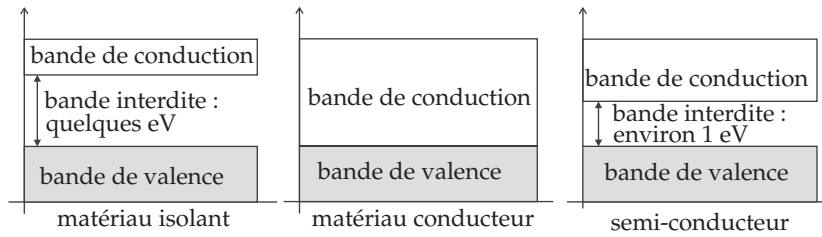


Figure 1.2

La principale différence entre un conducteur et un semi-conducteur réside dans le fait que dans le premier, il n'y a pas ou peu de bande interdite, voire même chevauchement des bandes de valence et de conduction. Les électrons sont donc *a priori* mobiles et l'application d'un faible champ électrique génère une circulation de nombreux électrons. Dans un semi-conducteur, il y a beaucoup moins d'électrons mobiles. Le matériau est donc moins conducteur.

Quel que soit le cas, la conduction est dite intrinsèque lorsqu'il existe autant d'électrons libres que de trous par unité de volume : soit n et p les nombres respectifs de porteurs négatifs (électrons) et de porteurs positifs (trous) par unité de volume (concentrations) ; on montre que :

$$n^2 = p^2 = n_i^2 = AT^3 e^{-\frac{\Delta B_i}{kT}}$$

avec :

A : constante dépendant du matériau,

T : température absolue en kelvins,

ΔB_i : largeur de la bande interdite en eV,

$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$: constante de Boltzmann.

Ces concentrations n et p (notée parfois n_i ou p_i) sont appelées concentrations en porteurs intrinsèques.

Pour le Silicium qui est le semi-conducteur le plus utilisé on a :

$$\Delta B_i = 1,2 \text{ eV}$$

$$n_i = 1,5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \text{ à } T = 300 \text{ K.}$$

Fiche 2

Semi-conducteurs dopés

Si on remplace dans un cristal de Silicium très pur, certains atomes par des atomes d'un autre corps simple, on dit que l'on dope le cristal avec des impuretés. Le Silicium étant tétravalent, on peut choisir d'effectuer ce dopage avec des atomes trivalents (Bore, Aluminium ou Gallium) ou pentavalents (Phosphore, Arsenic ou Antimoine). Dans le

premier cas on créera un déficit en électrons ou plutôt un apport de trous. On dit que le semi-conducteur est dopé P et que les impuretés introduites sont accepteuses d'électrons. Dans le second cas, on crée au contraire un apport d'électrons mobiles. Le semi-conducteur est dopé N et les impuretés sont dites donneuses d'électrons.

La concentration en impureté dopante reste toujours très faible quel que soit le cas : de l'ordre de 1 atome d'impureté pour 10^7 atomes de silicium.

Si le semi-conducteur est dopé N, il y a beaucoup plus d'électrons libres que de trous. On dit que les électrons sont les porteurs de charge majoritaires. Dans le cas d'un dopage P, ce sont les trous qui sont les porteurs majoritaires. Dans les deux cas on a : $n \neq p$.

En revanche, on a toujours : $np = n_i^2$.

Pour un semi-conducteur dopé N, soit n_D la concentration en impureté donneuse d'électrons (nombre d'atomes d'impureté par unité de volume). On a alors : $n \approx n_D$ et $p \approx 0$.

Pour un semi-conducteur dopé P, soit n_A la concentration en impuretés accepteuses d'électrons (nombre d'atomes d'impureté par unité de volume). On a alors : $p \approx n_A$ et $n \approx 0$.

Quel que soit le cas, les phénomènes de conduction s'en trouvent très largement modifiés. La conduction est alors dite extrinsèque car ne dépendant plus uniquement du cristal de départ.

Fiche 3

La diode à jonction

En dopant respectivement N et P deux parties d'un même cristal semi-conducteur, on forme un dipôle appelé diode à jonction (figure 1.3). La jonction est la surface de contact située entre les deux parties du cristal dopées différemment.

Bien qu'au départ chacune des deux zones soit électriquement neutre, la mise en contact des deux parties induit un phénomène de migration de porteurs majoritaires de part et d'autre de la jonction : certains trous de la zone P se déplacent vers la zone N qui contient des donneurs d'électrons, tandis que certains électrons de la zone N migrent vers la zone P qui contient des accepteurs d'électrons.

Un équilibre s'instaure autour de la jonction, créant ainsi un champ électrique interne \vec{E}_i . La zone située autour de la jonction correspondant à ce champ électrique est appelée zone de déplétion (figure 1.4). La présence de ce champ électrique se traduit

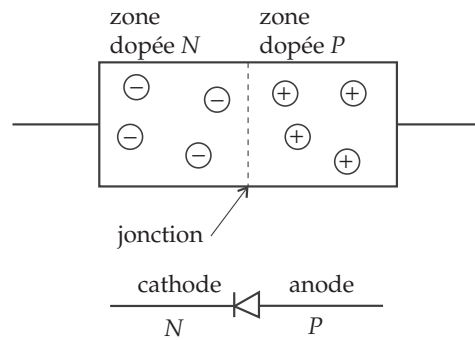


Figure 1.3

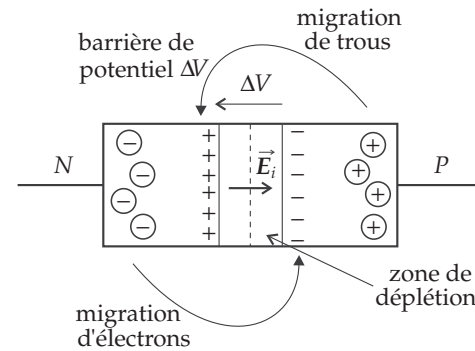


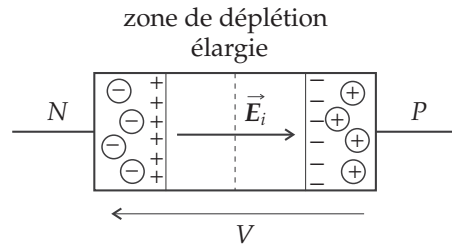
Figure 1.4

également par la présence d'une différence de potentiel de part et d'autre de la zone de déplétion. Cette différence de potentiel est appelée barrière de potentiel. La zone de déplétion se comporte a priori comme un isolant et il devient très difficile pour un électron libre, de franchir cette zone.

Fiche 4

Caractéristiques électrique des diodes à jonction

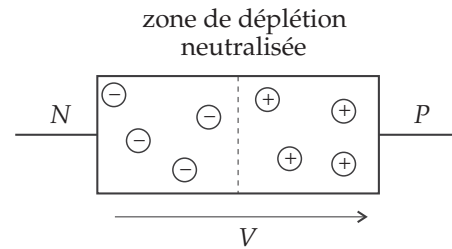
L'application d'une tension V dirigée comme indiqué sur la figure 1.5 crée un champ électrique qui s'ajoute au champ électrique interne (dans le même sens) poussant ainsi les électrons de la zone N à s'éloigner de la jonction, tandis que les trous de la zone P subissent le même phénomène : la zone de déplétion s'élargit ; la jonction devient pratiquement isolante. On dit que la diode est bloquée.



diode bloquée

Figure 1.5

Si au contraire on applique une tension V orientée comme indiqué sur la figure 1.6, le champ électrique externe ainsi créé s'oppose au champ interne. La barrière de potentiel est ainsi diminuée : des électrons peuvent franchir la zone de déplétion (de la zone N vers la zone P compte tenu de l'orientation de V) qui devient donc conductrice ; la diode est dite passante. La propriété essentielle de cette diode réside donc dans le fait que la circulation des électrons au travers de la jonction ne peut s'effectuer que dans un sens : de la zone N vers la zone P (de la cathode vers l'anode).



diode passante

Figure 1.6

Soit V la tension aux bornes de la diode et I le courant qui la traverse. Comme le courant circule de l'anode vers la cathode (sens inverse des électrons), on représentera tension et courant comme cela est indiqué sur la figure 1.7 (convention récepteur).

Si V est effectivement positif, on dit que la diode est polarisée en sens direct. Un courant I peut effectivement circuler dans la diode. Si V est négatif, la diode est polarisée en sens inverse et aucun courant ne peut y circuler. La figure 1.8 montre la caractéristique $I = f(V)$ d'une diode courante.

En sens direct, on admet que :

$$I = I_s e^{\frac{V}{V_0}} = I_s e^{\frac{V}{kT/e}} \text{ avec } V_0 = \frac{kT}{e} = 25 \text{ mV à température ambiante.}$$

I_s étant de l'ordre du mA, $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$. Sauf pour de très faibles valeurs de I , et sauf pour des valeurs très importantes, la tension V varie peu et est

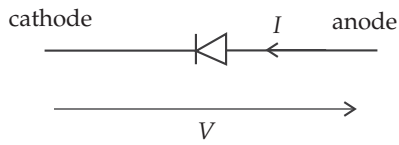


Figure 1.7

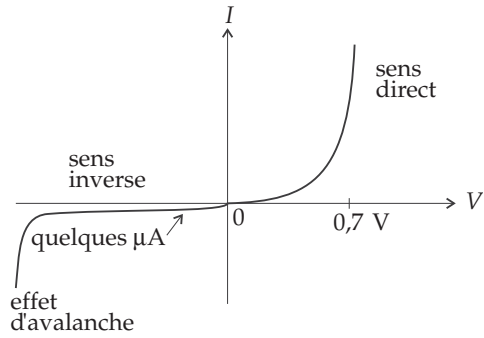


Figure 1.8

de l'ordre de 0,6 à 0,7 V pour des diodes au silicium. Cette tension est appelée tension de seuil et se note souvent V_s . En sens inverse, on admet que le courant est nul (en réalité quelques mA subsistent). Pour des tensions inverses importantes (quelques dizaines de volts en valeur absolue), on observe un effet de conduction forcée au travers de la jonction, effet immédiat et en général destructeur : l'effet d'avalanche.

Macroscopiquement parlant et hormis certaines applications particulières, on admet en général le fonctionnement suivant :

- diode polarisée en sens direct : $V = 0,7 \text{ V}$, $\forall I$; la diode est dite passante ;
- diode polarisée en sens inverse : $I = 0$, $\forall V$; la diode est dite bloquée.

Ce modèle de diode dite parfaite est représenté sur la figure 1.9 (a).

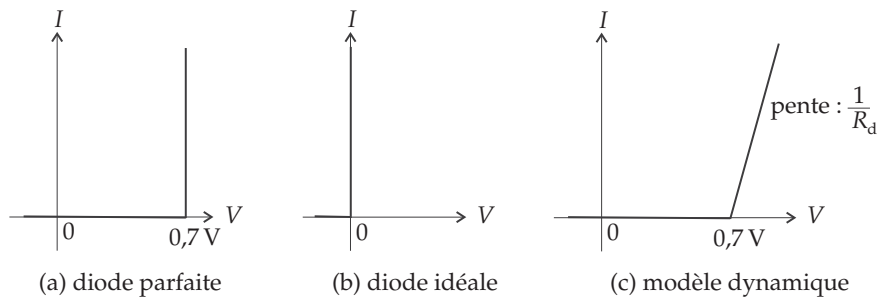


Figure 1.9

On peut encore simplifier le modèle en considérant que la tension de 0,7 V est négligeable devant les autres tensions du circuit. On obtient alors le modèle de diode dite idéale dont la caractéristique est schématisée sur la figure 1.9 (b). Si au contraire on souhaite un modèle plus fin et plus proche de la caractéristique de la diode réelle, on peut adopter le modèle représenté sur la figure 1.9 (c) : on considère que cette caractéristique est formée de deux segments de droites :

$$V < 0,7 \text{ V} \Leftrightarrow I = 0 \text{ (diode bloquée)}$$

$$V > 0,7 \text{ V} \Leftrightarrow I = \frac{V - 0,7 \text{ V}}{R_d} \text{ avec } R_d \text{ résistance dynamique de la diode passante.}$$

Polarisation de la diode

On polarise une diode en sens direct en l'incluant dans un circuit de sorte qu'elle soit parcourue par un courant I . Sur le schéma de la figure 1.10, un générateur parfait de tension E continue alimente un dipôle formé d'une résistance R et d'une diode en série.

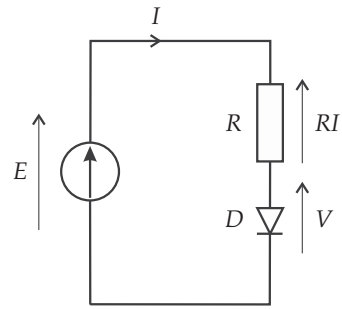


Figure 1.10

On a évidemment : $I = I_s e^{\frac{V}{V_0}}$ et $E = RI + V$

soit encore :

$$\begin{cases} I = I_s e^{\frac{V}{V_0}} \rightarrow \text{caractéristique de la diode} \\ I = \frac{E - V}{R} \rightarrow \text{droite de charge} \end{cases}$$

Le point d'intersection de ces deux courbes donne le point de fonctionnement du circuit (figure 1.11). On voit bien que pour diverses valeurs de R , la tension V varie peu.

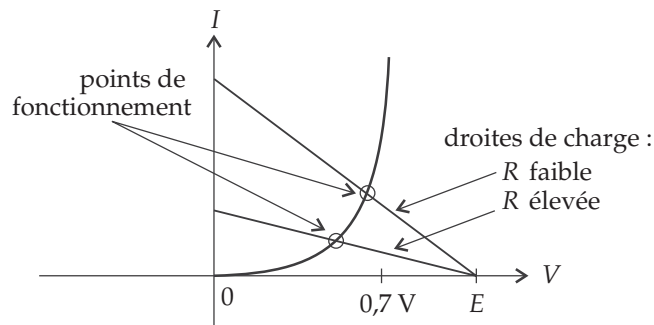


Figure 1.11

Puissance dissipée dans une diode

En sens direct, la diode parcourue par un courant I et présentant à ses bornes une différence de potentiel V , dissipe (en général sous forme d'énergie calorifique) la puissance $P = VI$. Toute diode possède une puissance limite admissible P_{\max} . Graphiquement, cette puissance définit une zone de fonctionnement possible pour la diode (figure 1.12).

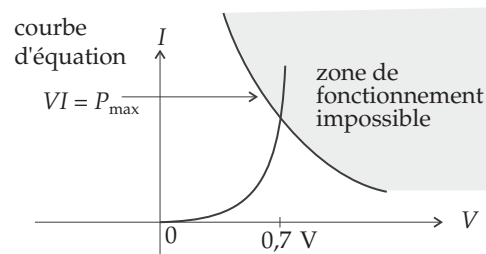


Figure 1.12

Diodes Zener

Certaines diodes sont conçues de manière à ce que l'effet d'avalanche ne soit pas destructeur, mais soit au contraire maîtrisé et même utile. Dans ce cas, on parle d'effet Zener et de telles diodes sont appelées diodes Zener (figure 1.13).

Une diode Zener se polarise en sens inverse (figure 1.14), et présente à ses bornes, quel que soit le courant qui la traverse, une tension quasiment constante appelée tension Zener et notée V_Z (figure 1.13). Les tensions Zener des diodes Zener couramment utilisées vont de quelques dixièmes de volts à plusieurs dizaines de volts (en valeur absolue).

Cette propriété est très utilisée dans des montages régulateurs de tension où l'on exploite comme référence de tension la valeur quasiment constante de la tension Zener V_Z .

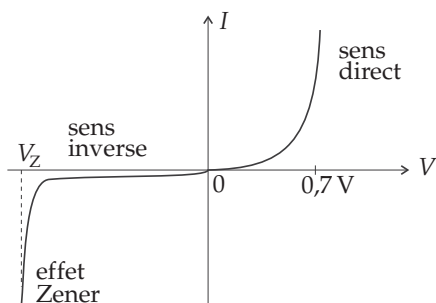


Figure 1.13

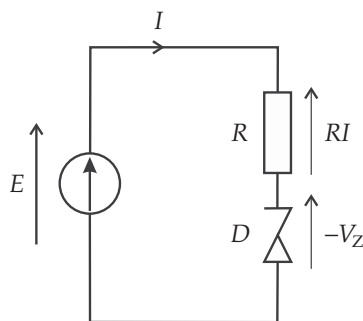


Figure 1.14

Entraînement

QCM

Pour chaque question, plusieurs réponses peuvent être exactes

1. La cathode d'une diode :

- a. est la borne par laquelle entre le courant en sens direct.
- b. correspond à la zone dopée N.
- c. est la borne de potentiel le plus bas lorsque la diode est polarisée en sens direct.
- d. est la borne de potentiel le plus élevé lorsque la diode est polarisée en sens direct.

2. Lorsqu'une diode est bloquée :

- a. elle se comporte comme un circuit ouvert.
- b. elle se comporte comme un condensateur.
- c. elle se comporte comme une résistance infinie.
- d. elle se comporte comme un circuit fermé.

3. Une diode de tension de seuil $V_s = 0,7 \text{ V}$ est placée en série avec une résistance $R = 40 \Omega$. L'ensemble est alimenté par un générateur de tension parfait $E = 12 \text{ V}$. La diode est polarisée en sens direct. Quelle est la valeur du courant I qui circule dans le circuit ?

- a. $I = 0,28 \text{ A}$.
- b. $I = 17 \text{ mA}$.
- c. $I = 100 \text{ mA}$.
- d. $I = 0,32 \text{ A}$.

4. Une diode de tension de seuil $V_s = 0,7 \text{ V}$ est placée en série avec une résistance $R = 10 \Omega$. L'ensemble est alimenté par un générateur de tension parfait $E = 5 \text{ V}$. La diode est polarisée en sens inverse. Quelle est la valeur de la tension U aux bornes de la résistance ?

- a. $U = 5 \text{ V}$.
- b. $U = 0 \text{ V}$.
- c. $U = 0,7 \text{ V}$.
- d. $U = -0,7 \text{ V}$.

5. Une diode idéale est placée en série avec une résistance $R = 100 \Omega$. L'ensemble est alimenté par un générateur de tension parfait $E = 5 \text{ V}$. La diode est polarisée en sens direct. Soit U la tension aux bornes de la diode et I le courant qui la traverse. Quel est le point de fonctionnement (U, I) de la diode ?

- a. $U = 0,7 \text{ V}$, $I = 43 \text{ mA}$.
- b. $U = 0 \text{ V}$, $I = 50 \text{ mA}$.
- c. $U = 5 \text{ V}$, $I = 50 \text{ mA}$.
- d. $U = 0,7 \text{ V}$, $I = -43 \text{ mA}$.

6. Quand on applique directement une tension $E = 5 \text{ V}$ aux bornes d'une diode :

- a. Si la cathode est reliée à la borne positive du générateur, il ne se passe rien.
- b. Si l'anode est reliée à la borne positive du générateur, la diode est détruite.
- c. La diode est détruite dans tous les cas.
- d. Il ne se passe rien, dans tous les cas.

7. Quand une diode est polarisée en sens inverse :

- a. un effet d'avalanche apparaît si la tension appliquée dépasse un certain seuil.
- b. un courant de quelques micro-ampères circule malgré tout dans la diode.
- c. une forte chaleur est dissipée par la diode.
- d. la diode est bloquée si aucun effet d'avalanche ne se produit.

8. Une diode de tension de seuil $V_s = 0,7 \text{ V}$ est placée en série avec une résistance R . L'ensemble est alimenté par un générateur de tension parfait $E = 10 \text{ V}$. La diode est polarisée en sens direct. Quelle est la valeur de R permettant d'obtenir un courant $I = 100 \text{ mA}$ dans le circuit ?

- a. $R = 100 \Omega$.
- b. $R = 7 \Omega$.
- c. $R = 93 \Omega$.
- d. $R = 10 \Omega$.

9. Une diode de tension de seuil $V_s = 0,7 \text{ V}$ est placée en série avec une résistance R . L'ensemble est alimenté par un générateur de tension parfait $E = 12 \text{ V}$. La diode est polarisée en sens direct. La puissance maximale admissible par la diode est égale à $P_{\max} = 280 \text{ mW}$. Quelle condition doit remplir la résistance R pour que la diode reste dans son domaine de fonctionnement ?

- a. $R > 1,75 \Omega$.
- b. $R < 1,75 \Omega$.
- c. $R < 28,25 \Omega$.
- d. $R > 28,25 \Omega$.

10. Une diode idéale (tension de seuil $V_s = 0 \text{ V}$) est placée en série avec une résistance R et l'ensemble est alimenté par un générateur de tension sinusoïdale parfait $e(t) = E_0 \cos \omega t$. Laquelle de ces affirmations est fautive ?

- a. La puissance moyenne consommée par la diode est nulle.
- b. Le courant dans la diode est nul pour chaque demi-période correspondant à $e(t) < 0$.
- c. La tension aux bornes de la résistance est égale à $e(t)$ lorsque $e(t) > 0$.
- d. Le générateur ne délivre de la puissance que pendant sa demi-alternance positive.

10. La résistance dynamique d'une diode :

- a. est en général très élevée.
- b. permet de considérer que la diode est équivalente à cette résistance lorsqu'elle est passante.
- c. s'exprime en Siemens
- d. est en général très faible.

12. Une diode Zener de tension Zener $V_Z = 5 \text{ V}$ est placée en série avec une résistance $R = 10 \Omega$. Le tout est placé aux bornes d'un générateur de tension parfait $E = 12 \text{ V}$ de sorte que la diode Zener soit polarisée en sens inverse. Quelle est la puissance P consommée par la diode Zener ?

- a. $P = 8,4 \text{ W}$.
- b. $P = 3,5 \text{ W}$.
- c. $P = 6 \text{ W}$.
- d. $P = 1,6 \text{ W}$.

Réponses

- 1. b et c.** En sens direct, le courant entre par l'anode. La cathode (qui est bien la zone dopée N) est donc dans ce cas à un potentiel plus bas.
- 2. a, b et c.** Lorsque la diode est bloquée, la zone de déplétion se comporte comme un isolant ; les trois réponses sont donc acceptables. Une résistance infinie s'apparente en effet à un circuit ouvert. Il est intéressant de s'attarder sur la réponse b : si on appelle e l'épaisseur de la zone de déplétion, S sa section et ϵ_r , la permittivité diélectrique relative du silicium, la zone de déplétion peut être considérée comme un condensateur plan dont la capacité a pour expression : $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e}$. Comme e dépend de la tension inverse appliquée, la capacité de la diode varie, de surcroît, en fonction de cette tension.
- 3. a.** C'est la loi d'Ohm aux bornes de la résistance qui permet de déterminer le courant. Comme la diode est polarisée en sens direct, elle présente à ses bornes une tension $U = 0,7 \text{ V}$. La tension aux bornes de la résistance est donc égale à $U_R = 11,3 \text{ V}$ puisque l'ensemble est soumis à une tension $E = 12 \text{ V}$. Le courant se détermine donc immédiatement : $I = \frac{11,3}{40} = 0,28 \text{ A}$.
- 4. b.** Comme la diode est polarisée en sens inverse, aucun courant ne circule ni dans la diode, ni dans la résistance. Cette dernière présente donc à ses bornes une tension nulle.
- 5. b.** La diode idéale est caractérisée par une tension nulle à ses bornes lorsqu'elle est polarisée en sens direct. On a donc $U = 0 \text{ V}$. La tension aux bornes de la résistance est donc égale à $E = 5 \text{ V}$ et c'est elle qui va déterminer l'intensité du courant : $I = \frac{E}{R} = \frac{5}{100} = 50 \text{ mA}$.
- 6. a et b.** Si la cathode est reliée au potentiel le plus élevé, elle est polarisée en sens inverse. Il y a peu de risque qu'un effet d'avalanche apparaisse pour une tension de 5 V donc la diode sera bloquée. Si c'est l'anode qui est reliée au potentiel le plus élevé, la diode est polarisée en sens direct avec une tension de 5 V à ses bornes. Un courant très intense va la parcourir et risque de causer sa destruction.
- 7. a, b et d.** L'effet d'avalanche apparaît effectivement dès qu'on dépasse un certain seuil de tension inverse. Sinon, un très faible courant circule dans la jonction PN. Cela dit, la puissance dissipée dans la diode sera donc très faible et il y a peu de risque qu'elle dégage de la chaleur. C'est bien dans ces conditions que la diode est bloquée.
- 8. c.** La tension aux bornes de la résistance est égale à $U = 10 - 0,7 = 9,3 \text{ V}$. Il suffit d'appliquer la loi d'Ohm avec la valeur du courant souhaitée : $U = RI$, soit $R = \frac{U}{I} = \frac{9,3}{0,1} = 93 \Omega$.
- 9. d.** Il s'agit ici de limiter le courant dans la diode pour que la limite de puissance ne soit pas atteinte. La tension aux bornes de la résistance est égale à $U_R = E - V_s$. En appelant I_{\max} le courant maximal dans la résistance, il faut donc que la résistance soit supérieure à une valeur R_{\min} telle que $I_{\max} = \frac{E - V_s}{R_{\min}}$. Or $P_{\max} = V_s I_{\max}$. D'où $R_{\min} = \frac{E - V_s}{I_{\max}} = \frac{V_s (E - V_s)}{P_{\max}} = \frac{0,7 \times 11,3}{280 \times 10^{-3}} = 28,25 \Omega$.
- 10. a.** La diode est polarisée en sens direct au cours de chaque demi-alternance positive du signal d'alimentation. La diode est alors parcourue par un courant non nul. Mais en théorie, comme la