

AIDE-MÉMOIRE
**Composants
électroniques**

Pierre **Mayé**

Aide-mémoire
**Composants
électroniques**

6^e édition

DUNOD

Photo de couverture : luchschenF - Shutterstock.com

Mise en pages : Nord Compo

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, 2000, 2005, 2010, 2015, 2021

© Fréquences, Paris, 1989 pour la première édition

978-2-10-082891-3

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

www.dunod.com

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

1 . Notions générales	1
1.1 Définitions	1
1.2 Classifications	1
2 . Résistances	6
2.1 Principe et propriétés	6
2.2 Caractéristiques technologiques	14
2.3 Domaines d'utilisation	23
3 . Potentiomètres	29
3.1 Principe et propriétés	29
3.2 Caractéristiques technologiques	33
3.3 Domaines d'utilisation	39
4 . Condensateurs	46
4.1 Principe et propriétés	46
4.2 Caractéristiques technologiques	58
4.3 Domaines d'utilisation	67

5 . Bobines	76
5.1 Principe et propriétés	76
5.2 Caractéristiques technologiques	84
5.3 Domaines d'utilisation	88
6 . Transformateurs	93
6.1 Principe et propriétés	93
6.2 Caractéristiques technologiques	98
6.3 Domaines d'utilisation	101
7 . Quartz et résonateurs en céramique	108
7.1 Principe et propriétés	108
7.2 Caractéristiques technologiques	115
7.3 Domaines d'utilisation	121
8 . Varistances	128
8.1 Principe et propriétés	128
8.2 Caractéristiques technologiques	131
8.3 Domaines d'utilisation	137
9 . Thermistances	142
9.1 Principe et propriétés	142
9.2 Caractéristiques technologiques	145
9.3 Domaines d'application	146
10 . Diodes	152
10.1 Principe et propriétés	152
10.2 Caractéristiques technologiques	166
10.3 Domaines d'utilisation	172

11 . Transistors bipolaires	183
11.1 Principe et propriétés	183
11.2 Caractéristiques technologiques	201
11.3 Domaines d'utilisation	205
12 . Transistors à effet de champ	211
12.1 Principe et propriétés	211
12.2 Caractéristiques technologiques	220
12.3 Domaines d'utilisation	222
13 . Thyristors	225
13.1 Principe et propriétés	225
13.2 Caractéristiques technologiques	232
13.3 Domaines d'utilisation	234
14 . Triacs	236
14.1 Principe et propriétés	236
14.2 Caractéristiques technologiques	237
14.3 Domaines d'utilisation	239
15 . Composants optoélectroniques	248
15.1 Principe et propriétés	248
15.2 Caractéristiques technologiques	252
15.3 Domaines d'utilisation	253
16 . Circuits intégrés	257
16.1 Généralités	257
16.2 Amplificateur opérationnel	260
16.3 Régulateur de tension	267
16.4 Convertisseur à découpage	268
16.5 Temporisateur	270

17 . Convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique	272
17.1 Convertisseurs analogique-numérique	272
17.2 Convertisseurs numérique-analogique	276
18 . Circuits intégrés logiques	280
18.1 Généralités	280
18.2 Circuits combinatoires	283
18.3 Circuits séquentiels	285
18.4 Astables et monostables	288
19 . ASIC et circuits intégrés programmables	293
19.1 Circuits intégrés développés pour un client	293
19.2 Circuits intégrés programmables	294
20 . Microcontrôleurs	300
20.1 Généralités	300
20.2 Exemple	302
20.3 Programmation	305
21 . Interrupteurs et fusibles	307
21.1 Commutateurs et interrupteurs	307
21.2 Fusibles	310
22 . Piles et accumulateurs	316
22.1 Introduction	316
22.2 Piles	322
22.3 Accumulateurs	326

23 . Échauffement et dissipation thermique	332
23.1 Étude générale des échanges thermiques	332
23.2 Application aux composants électroniques	339
24 . Fiabilité des composants	346
24.1 Notions générales	346
24.2 Cas des composants électroniques	347
25 . Circuits imprimés	350
25.1 Présentation	350
25.2 Conception assistée par ordinateur	353
25.3 Fabrication	354
26 . Documentation sur les composants	356
26.1 Diverses formes de documents	356
26.2 Types de documents	359
26.3 Contenu d'une notice technique	359
27 . Test et mesures	361
27.1 Buts	361
27.2 Appareils utilisés	363
27.3 Résistances	365
27.4 Condensateurs	369
27.5 Bobines	373
27.6 Transformateurs	375
27.7 Quartz	375
27.8 Varistances	376
27.9 Thermistances	376
27.10 Diodes	376
27.11 Transistors bipolaires	379
27.12 Thyristors	381



27.13	Triacs	382
27.14	Diodes électroluminescentes	382
27.15	Interrupteurs	383
27.16	Fusibles	384
27.17	Piles et accumulateurs	384
Lexique		388
Index		392

1

Notions générales

1.1 Définitions

- ▶ Un composant électronique est un élément destiné à être assemblé avec d'autres afin de réaliser un circuit électronique.
- ▶ Le boîtier est l'enveloppe protégeant un ou plusieurs composants et comportant des traversées pour le raccordement à l'extérieur.
- ▶ Une broche de raccordement est une pièce métallique solidaire d'un boîtier, destinée à assurer une connexion électrique et éventuellement la fixation. On l'appelle plus familièrement patte.

1.2 Classifications

1.2.1 Composant discret et circuit intégré

- ▶ Un composant discret est un composant électronique élémentaire seul dans un boîtier. Citons comme exemples une résistance, une diode ou un transistor.
- ▶ Un composant intégré ou circuit intégré (CI) est un composant électronique comportant plusieurs composants élémentaires réalisés sur une pastille de semi-conducteur et placés dans un même boîtier. Citons comme exemples un amplificateur opérationnel, un régulateur ou un microprocesseur.

1.2.2 Nombre de broches

Les composants électroniques peuvent posséder différents nombres de broches. Des termes particuliers sont utilisés en électrocinétique selon le nombre de bornes d'accès d'un circuit ; ils s'appliquent entre autres aux composants électroniques.

- ▶ Un dipôle est un dispositif électrique accessible par deux bornes. Parmi les composants, citons comme exemples une résistance, une diode ou un condensateur.

Remarque

De façon générale, un dipôle n'est pas forcément un simple composant. Cela peut être un circuit compliqué constitué de nombreux composants, du moment qu'il est accessible par deux bornes.

- ▶ Un tripôle est un dispositif électrique accessible par trois bornes. Parmi les composants, citons comme exemples un transistor, un thyristor ou un triac.
- ▶ Un quadripôle est un dispositif électrique accessible par deux paires de bornes (deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie). Parmi les composants, citons comme exemples un transformateur ou un photocoupleur.

Remarque

De façon générale, un tétrapôle (avec le préfixe *tetra* d'origine grecque) est un dispositif électrique accessible par quatre bornes. Le mot quadripôle (avec le préfixe *quadri* d'origine latine) est réservé au cas particulier de tétrapôle pour lequel les quatre bornes sont groupées par paires.

1.2.3 Composant passif et composant actif

Les adjectifs « passif » et « actif » sont largement utilisés pour qualifier un composant électronique. Fait très rare pour un terme scientifique ou technique, aucune définition rigoureuse ne peut être trouvée dans les dictionnaires, encyclopédies ou cours d'électronique.

Pourtant, tout le monde est à peu près d'accord sur le caractère passif ou actif d'un composant. Résistances, bobines, condensateurs, quartz, diodes, diodes Zener, diodes électroluminescentes, transformateurs sont des composants passifs et piles, accumulateurs, transistors, thyristors, triacs, circuits intégrés sont des composants actifs. Cependant, force est de constater qu'aucune définition générale ne peut permettre de justifier cette classification. Nous allons donc aborder la question progressivement.

Les choses sont bien claires pour les dipôles. Un dipôle est passif s'il est toujours récepteur ou s'il n'échange aucune puissance avec l'extérieur (stockage d'énergie) alors qu'un dipôle est actif s'il peut être générateur. Parmi les composants, citons comme exemples de dipôles passifs une résistance, une diode ou un condensateur et comme exemples de dipôles actifs une pile, un accumulateur ou une photodiode.

Dans les dipôles passifs, la puissance ne peut être perdue que par effet Joule alors que dans les dipôles actifs, l'énergie provient d'une conversion d'une autre forme (réaction chimique, rayonnement).

Bien que ce ne soient pas des dipôles, les composants dérivés de dipôles passifs par l'ajout d'une ou plusieurs bornes (potentiomètre, bobine à prises intermédiaires) ou formés d'un assemblage d'éléments passifs (réseau de résistances) sont également des composants passifs.

Des définitions peuvent également être données pour les quadripôles. Un quadripôle est passif si la puissance de sortie est toujours inférieure ou égale à la puissance d'entrée. Parmi les composants, citons comme exemples le transformateur, le pont de diodes ou le filtre antiparasite. Un quadripôle est actif si la puissance de sortie peut être supérieure à la puissance d'entrée. C'est possible pour un circuit électrique comportant une source d'énergie comme une pile ou un accumulateur, mais il n'existe pas de composant qui soit un quadripôle actif.

Les définitions précédentes nous ont permis de classer de nombreux composants. En revanche, il en reste un certain nombre, et non des moindres (transistors, circuits intégrés...) que nous n'avons pas encore pris en compte. Nous pouvons régler le cas des circuits intégrés en disant qu'un assemblage comportant au moins un composant élémentaire actif est lui-même actif.

Le problème apparaît pour les tripôles actifs : transistors, thyristors et triacs. Aucune des définitions rencontrées dans la littérature technique n'est satisfaisante. Nous allons devoir admettre que ces composants sont actifs, mais sans pouvoir donner une définition rigoureuse. Tout au plus pouvons-nous fournir quelques indications sur les raisons de cette appellation. Au début de l'électronique, la triode, tube électronique à trois électrodes, a été le premier élément permettant de réaliser un amplificateur qui pouvait délivrer une puissance de sortie supérieure à la puissance d'entrée, le complément nécessaire provenant d'une alimentation continue. L'ensemble de l'amplificateur muni de son alimentation est donc un quadripôle actif. Par extension, la triode a été qualifiée de composant actif. Lors de l'apparition des semi-conducteurs, le transistor a remplacé la triode et a lui aussi été qualifié de composant actif. Même si aujourd'hui beaucoup de transistors fonctionnent en commutation et non en amplification, l'appellation a été conservée.

1.2.4 Composant linéaire et composant non-linéaire

Un dipôle est linéaire si sa caractéristique (statique ou dynamique) est un segment de droite. Parmi les composants, citons comme exemples de dipôles linéaires une résistance ou un condensateur et comme exemples de dipôles non-linéaires une varistance ou une diode.

Le cas des bobines est un peu plus compliqué. Une bobine sans noyau ferromagnétique est un composant linéaire alors qu'une bobine à noyau ferromagnétique est un composant non-linéaire à cause de la saturation du matériau.

Un quadripôle est linéaire si toutes ses caractéristiques (entrée, transfert, sortie) sont des segments de droite. Parmi les composants, citons comme exemple de quadripôle linéaire un transformateur sans noyau ferromagnétique et comme exemple de quadripôle non-linéaire un photocoupleur.

1.2.5 Composant traversant et composant monté en surface

Un composant traversant est placé sur une face de la carte électronique et ses broches traversent le circuit imprimé préalablement percé pour être brasées de l'autre côté de la carte afin de les relier électriquement et mécaniquement.

Cette technique est bien adaptée à une réalisation manuelle des cartes électroniques, mais permet aussi une certaine automatisation de la fabrication.

Un **composant monté en surface** (CMS ou SMD en anglais pour *Surface-Mounted Device*) est brasé directement à la surface de la carte électronique.

Le principal avantage est l'encombrement très réduit. Cette technique est également bien adaptée à l'automatisation poussée de la fabrication.

Avec la miniaturisation des appareils électroniques, les composants montés en surface supplantent aujourd'hui les composants traversants.

2

Résistances

Malgré leur comportement extrêmement simple, les résistances restent les éléments les plus répandus de l'électronique. Sur pratiquement toutes les cartes électroniques n'utilisant pas les composants montés en surface, on les remarque tout de suite grâce à leurs anneaux de différentes couleurs.

2.1 Principe et propriétés

2.1.1 Définition

Un conducteur ohmique, appelé couramment **résistance**, est un dipôle dont la caractéristique statique est un segment de droite passant par l'origine.

2.1.2 Symboles

Sur les schémas, les résistances sont représentées par leur symbole normalisé (*figure 2.1*) ou parfois par un autre symbole plus ancien (*figure 2.2*).



Figure 2.1 Symbole normalisé d'une résistance.



Figure 2.2 Autre symbole d'une résistance.

2.1.3 Loi d'Ohm

La tension u aux bornes d'une résistance idéale est proportionnelle à l'intensité i du courant qui la traverse. En convention récepteur (figure 2.3), cette relation s'écrit (loi d'Ohm) :

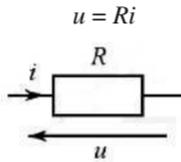


Figure 2.3 Résistance en convention récepteur.

Le coefficient de proportionnalité R est appelé **résistance du dipôle**. Une ambiguïté existe en français puisque l'on désigne par le même mot l'objet et un nombre R qui le caractérise. La langue anglaise évite ce problème en désignant l'élément par *resistor* et le nombre par *resistance*. Ce coefficient R chiffre la plus ou moins grande difficulté que rencontre le courant électrique pour traverser le dipôle.

Dans le système international, l'unité de résistance est l'ohm (symbole Ω) du nom du physicien allemand Georg-Simon Ohm qui a étudié les lois des circuits électriques. Dans la loi d'Ohm, la tension doit alors être exprimée en volts (V) et l'intensité du courant en ampères (A).

Devant la diversité des valeurs des résistances, on emploie les multiples et éventuellement les sous-multiples de l'ohm. Les correspondances sont données dans le *tableau 2.1*.

Tableau 2.1 Multiples et sous-multiples de l'ohm.

Nom	Symbole	Valeur en
milliohm	$m\Omega$	10^{-3}
kilo-ohm	$k\Omega$	10^3
mégohm	$M\Omega$	10^6

Pour les composants électroniques, on utilise surtout le kilo-ohm et le mégohm. Le milliohm apparaît seulement pour chiffrer des résistances parasites comme les résistances de contact. Les fils de liaison dans les

montages électroniques sont des conducteurs de très faible résistance. On peut en général considérer que la tension à leurs bornes est négligeable quel que soit le courant qui les traverse : tout se passe comme si la résistance était nulle, on dit qu'il s'agit d'un court-circuit.

On utilise parfois aussi la **conductance** G , inverse de la résistance R :

$$G = \frac{1}{R}$$

L'unité de conductance est le siemens (symbole S) du nom de l'inventeur et industriel allemand Werner von Siemens.

2.1.4 Résistivité

La résistance dépend à la fois des dimensions du conducteur et de la nature du matériau utilisé. Par exemple, la résistance R d'un fil (*figure 2.4*) est proportionnelle à sa longueur l et inversement proportionnelle à sa section s :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

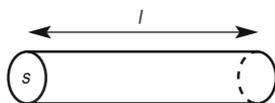


Figure 2.4 Résistance d'un fil conducteur.

Le coefficient ρ est caractéristique d'un matériau donné dans des conditions fixées et se nomme **résistivité**. L'unité de résistivité est l'ohmmètre (symbole $\Omega \cdot \text{m}$) puisque l s'exprime en mètres (m) et s en mètres carrés (m^2). Par exemple, la résistivité du cuivre à la température de 25 °C est $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

On utilise parfois aussi la **conductivité** σ , inverse de la résistivité ρ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

L'unité de conductivité est le siemens par mètre (symbole S/m).

2.1.5 Influence de la température

Dans une plage de température limitée, une résistance R dépend de la température θ (en degrés Celsius, °C) selon la loi :

$$R = R_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)]$$

R_0 est la valeur de R à une température de référence θ_0 et α le coefficient de température qui dépend essentiellement du matériau conducteur utilisé et un peu de la plage de température considérée. Par exemple, pour le cuivre, $\alpha = 3,9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ au voisinage de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (la valeur dépend un peu de la pureté du métal). Le coefficient de température est souvent donné en $\% / ^\circ\text{C}$ ou en $\text{ppm}/^\circ\text{C}$.

Remarque

Plus précisément, c'est la résistivité qui suit la loi qui vient d'être citée. Pour la résistance, il faut théoriquement tenir compte également de la dilatation, mais son influence est très limitée.

2.1.6 Effet de peau

La résistance d'un conducteur augmente lorsque les variations du courant sont rapides. Cela est dû à l'effet de peau (appelé aussi effet pelliculaire ou effet Kelvin) : l'amplitude de la densité de courant décroît quand on s'éloigne de la surface du matériau.

Pour un conducteur cylindrique de rayon a parcouru par un courant sinusoïdal, le rapport de l'amplitude J_M de la densité de courant à la distance r de son axe à l'amplitude J_{M0} de la densité de courant à sa surface s'exprime par :

$$\frac{J_M}{J_{M0}} = \frac{\sqrt{\text{ber}^2 \frac{\sqrt{2r}}{\delta} + \text{bei}^2 \frac{\sqrt{2r}}{\delta}}}{\sqrt{\text{ber}^2 \frac{\sqrt{2a}}{\delta} + \text{bei}^2 \frac{\sqrt{2a}}{\delta}}}$$

où δ est la profondeur de pénétration, appelée aussi épaisseur de peau, qui s'exprime en fonction de la résistivité ρ du matériau, de sa perméabilité

magnétique μ et de la fréquence f du courant par :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

Les valeurs des fonctions de Kelvin ber et bei sont disponibles dans des tables. Il est alors possible de tracer la courbe de $\frac{J_M}{J_{M0}}$ en fonction de r , avec

$\frac{a}{\delta}$ en paramètre (figure 2.5).

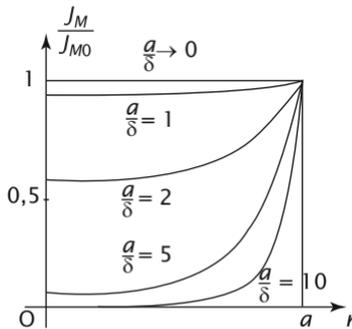


Figure 2.5 Courbes de l'amplitude de la densité de courant dans un fil en fonction de la distance à l'axe.

L'effet de peau est néfaste car il augmente les pertes. Une façon de le diminuer consiste à remplacer un fil par plusieurs conducteurs en parallèle isolés entre eux. C'est ce qui est fait dans un fil de litz (traduction servile de l'allemand *Litzendraht* qui signifie fil à brins isolés) utilisé dans certains câblages en haute fréquence.

2.1.7 Effet Joule

Un phénomène important dans une résistance est l'effet Joule (du nom du physicien anglais James-Prescott Joule qui a étudié les lois de la chaleur). Une résistance parcourue par un courant reçoit un travail électrique et le transforme en transfert thermique. Quand le courant est périodique, la puissance électrique P reçue (on parle de puissance dissipée par effet Joule) s'exprime en fonction de la tension efficace U , de l'intensité efficace

I du courant et de la résistance R par l'une des trois formules, équivalentes grâce à la loi d'Ohm :

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

L'unité de puissance est le watt (symbole W), du nom de l'ingénieur écossais James Watt. On emploie assez souvent en électronique son sous-multiple, le milliwatt (mW) qui vaut 10^{-3} W.

Dans tous les cas, même si le courant n'est pas périodique, le travail électrique W_e reçu entre deux instants t_1 et t_2 par un conducteur ohmique de résistance R traversé par un courant d'intensité i s'écrit :

$$W = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt$$

L'unité de travail électrique est le joule (J).

La puissance dissipée par effet Joule dans un composant est un problème important en électronique. Tout d'abord, il s'agit d'une puissance perdue pour le circuit électrique et qui doit donc lui être fournie (en général par une source de tension continue), et ensuite, il se pose souvent un problème d'évacuation de la chaleur créée car les petites dimensions des montages compliquent les échanges thermiques. Ces questions se posent essentiellement d'une part, pour les montages qui traitent des courants assez élevés comme les amplificateurs de puissance ou les alimentations et d'autre part, pour les circuits de taille très réduite.

2.1.8 Bruit

Même lorsqu'elle n'est parcourue par aucun courant, une résistance est le siège d'un bruit thermique, ou bruit de Johnson, dû à l'agitation thermique des électrons. La densité spectrale de bruit V_b s'exprime en fonction de la constante de Boltzmann $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K, de la température thermodynamique T , de la résistance R et de la bande de fréquence Δf par la formule de Nyquist :

$$V_b = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

L'unité de V_b est le volt par racine carrée de hertz ($V/\sqrt{\text{Hz}}$).

Remarque

Dans l'étude du bruit, on définit de façon générale une densité spectrale de puissance (DSP) qui correspond à V_b^2 (le terme puissance est pris ici au sens de la théorie du signal) et dont l'unité est le volt au carré par hertz (V^2/Hz). Dans le cas particulier de l'électronique, on préfère prendre sa racine carrée.

Le bruit thermique est associé aux noms de Johnson et de Nyquist car il a été mesuré pour la première fois en 1927 par l'ingénieur américain d'origine suédoise John-Bertrand Johnson (1887-1970) des laboratoires Bell puis formalisé par Harry Nyquist (1889-1976), son collègue des mêmes laboratoires, également américain d'origine suédoise.

2.1.9 Associations

■ Association en série

On peut brancher deux résistances R_1 et R_2 en série (figure 2.6).

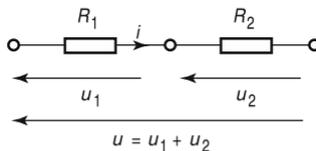


Figure 2.6 Association de deux résistances en série.

Le courant est le même dans les deux éléments, mais les tensions à leurs bornes s'ajoutent. Le dipôle résultant se comporte comme un conducteur ohmique dont la résistance est :

$$R = R_1 + R_2$$

Cette loi peut se généraliser à n conducteurs ohmiques en série :

$$R = \sum_{k=1}^n R_k$$

■ Association en parallèle

Le deuxième mode d'association de résistances est le branchement en parallèle (figure 2.7).

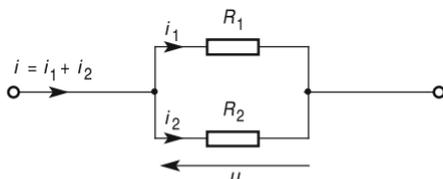


Figure 2.7 Association de deux résistances en parallèle.

La tension est la même pour les deux éléments, mais les courants qui les traversent s'ajoutent. Le dipôle résultant se comporte comme un conducteur ohmique dont la conductance est :

$$G = G_1 + G_2$$

soit, avec les résistances :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Pour plusieurs résistances, on a de même :

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

Dans le cas de deux résistances, on peut facilement obtenir R par la formule :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Cette dernière formule ne se généralise pas pour un nombre quelconque de résistances.

■ Cas des résistances de même valeur

Un cas particulier intéressant est celui où les valeurs des résistances sont identiques : deux résistances en série donnent une résistance de valeur

double et deux résistances en parallèle équivalent à une résistance de valeur moitié.

2.1.10 Modèle d'une résistance réelle

Une résistance réelle présente des effets inductifs et capacitifs qui ont une influence non négligeable aux fréquences élevées (figure 2.8).

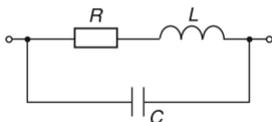


Figure 2.8 Modèle d'une résistance réelle.

2.2 Caractéristiques technologiques

2.2.1 Précision

Le nombre indiqué sur le composant est la valeur nominale de la résistance. Du fait des tolérances de fabrication, la résistance réelle est un peu différente. Les constructeurs donnent une fourchette dans laquelle peut se trouver cette valeur. L'intervalle est défini par un pourcentage de la résistance nominale qui indique l'écart maximal, en plus ou en moins, qu'il peut y avoir entre la valeur réelle et la valeur nominale.

Par exemple, un composant marqué $10\text{ k}\Omega$, 5 % peut avoir une résistance réelle comprise entre $9,5\text{ k}\Omega$ et $10,5\text{ k}\Omega$ puisque 5 % de $10\text{ k}\Omega$ correspond à un écart possible de $0,5\text{ k}\Omega$.

2.2.2 Valeurs normalisées

Du fait de la tolérance qui existe sur les valeurs de résistances, il est inutile de disposer d'un trop grand nombre de composants différents. En effet, avec l'exemple précédent, on voit que la valeur nominale $10,5\text{ k}\Omega$ ne servirait à rien puisqu'une résistance réelle de ce type pourrait être identique à un élément marqué $10\text{ k}\Omega$.

Ainsi, on ne fabrique que des résistances dont les valeurs appartiennent à des séries normalisées conçues de telle façon qu'il y ait tout juste recouvrement des intervalles possibles pour les valeurs réelles correspondant à des valeurs nominales consécutives.

Par exemple, dans la série de précision 5 %, la valeur qui suit 10 k Ω est 11 k Ω . La résistance minimale que peut atteindre le composant marqué 11 k Ω est 10,45 k Ω (l'écart par rapport à la valeur nominale est 5 % de 11 k Ω , soit 0,55 k Ω). Le recouvrement n'intervient qu'entre 10,45 k Ω et 10,5 k Ω , ce qui est pratiquement négligeable. À chaque tolérance correspond une série normalisée. La norme CEI 60063, intitulée *Séries de valeurs normales pour résistances et condensateurs*, précise les valeurs correspondantes. Le *tableau 2.2* donne les différentes progressions utilisées. Les séries sont désignées par E6, E12... Les chiffres suivant la lettre E indiquent ainsi le nombre de valeurs dans une décade (par exemple entre 10 et 100, 100 non compris). Le tableau fournit les valeurs comprises entre 10 et 100, mais il suffit de multiplier par une puissance de 10 pour obtenir toutes les résistances possibles.

Tableau 2.2 Valeurs normalisées.

Progressions	Tolérances	Séries normalisées
E3		10 22 47
E6	$\pm 20 \%$	10 15 22 33 47 68
E12	$\pm 10 \%$	10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82
E24	$\pm 5 \%$	10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82 91
E48	$\pm 2 \%$	100 105 110 115 121 127 133 140 147 154 162 169 178 187 196 205 215 226 237 249 261 274 287 301 316 332 348 365 383 402 422 442 464 487 511 536 562 590 619 649 681 715 750 787 825 866 909 953
E96	$\pm 1 \%$	100 102 105 107 110 113 115 118 121 124 127 130 133 137 140 143 147 150 154 158 162 165 169 174 178 182 187 191 196 200 205 210 215 221 226 232 237 243 249 255 261 267 274 280 287 294 301 309 316 324 332 340 348 357 365 374 383 392 402 412 422 432 442 453 464 475 487 499 511 523 536 549 562 576 590 604 619 634 649 665 681 698 715 732 750 768 787 806 825 845 866 887 909 931 953 976

Les conducteurs ohmiques courants ont une tolérance de 5 %. On fait parfois appel à des résistances de précision, en général à 1 % ou à 2 %. Pour des applications spécifiques (étalonnages), on trouve des éléments très précis : 0,1 % par exemple.

Les résistances sont normalement disponibles entre quelques dixièmes d'ohm et quelques dizaines de mégohms, mais les valeurs courantes ne descendent pas en dessous de quelques ohms et ne vont pas au-delà de quelques mégohms.

2.2.3 Marquage

Les résistances sont souvent identifiées par différents anneaux de couleur tracés sur le corps du composant qui indiquent la valeur nominale et la tolérance. La norme CEI 60757, intitulée *Code de désignation de couleurs*, définit le marquage utilisé pour les composants électroniques. Les éléments ordinaires (5 % ou 10 %) comportent quatre anneaux (*figure 2.9*) tandis que les éléments de précision (1 % ou 2 %) en ont cinq (*figure 2.10*).

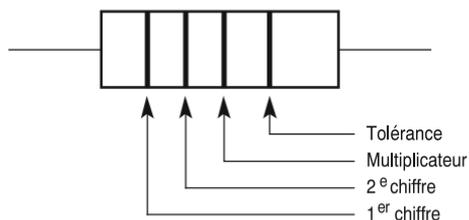


Figure 2.9 Marquage d'une résistance à 5 % ou 10 %.

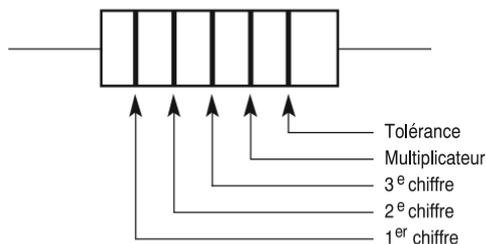


Figure 2.10 Marquage d'une résistance à 1 % ou 2 %.

Chaque couleur correspond à un chiffre, ainsi qu'il est indiqué dans le *tableau 2.3*. Il faut faire attention au sens de lecture : le dernier anneau est un peu séparé des autres.

Tableau 2.3 Code des couleurs pour le marquage des résistances.

Couleur	1 ^{er} chiffre	2 ^e chiffre	3 ^e chiffre (éventuel)	Multiplicateur	Tolérance
Argent				$\times 0,01 \Omega$	10 %
Or				$\times 0,1 \Omega$	5 %
Noir		0	0	$\times 1 \Omega$	20 %
Marron	1	1	1	$\times 10 \Omega$	1 %
Rouge	2	2	2	$\times 100 \Omega$	2 %
Orange	3	3	3	$\times 1 \text{ k}\Omega$	
Jaune	4	4	4	$\times 10 \text{ k}\Omega$	
Vert	5	5	5	$\times 100 \text{ k}\Omega$	
Bleu	6	6	6	$\times 1 \text{ M}\Omega$	
Violet	7	7	7		
Gris	8	8	8		
Blanc	9	9	9		

Considérons un premier exemple (*figure 2.11*). Les deux premiers anneaux indiquent les chiffres significatifs de la valeur nominale de la résistance : jaune correspond à 4 et violet à 7. Le troisième anneau définit le multiplicateur : orange signifie $\times 1 \text{ k}\Omega$. La résistance nominale est donc $47 \text{ k}\Omega$. La précision est donnée par le quatrième anneau : or correspond à 5 %.

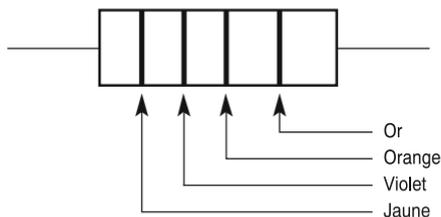


Figure 2.11 Exemple de marquage : résistance $47 \text{ k}\Omega$, 5 %.

Prenons un autre exemple (*figure 2.12*). Il s'agit d'une résistance de précision puisque son marquage comporte cinq bandes. Les trois premières indiquent les chiffres significatifs de la valeur nominale : blanc, orange et marron, soit 931. La quatrième bande donne le multiplicateur : noir signifie $\times 1 \Omega$. La résistance nominale est donc 931 Ω . La tolérance est indiquée par le dernier anneau : marron pour 1 %.

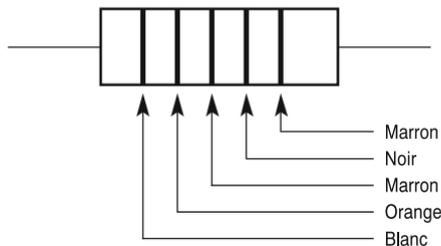


Figure 2.12 Exemple de marquage : résistance 931 Ω , 1 %.

2.2.4 Puissance maximale

Comme on l'a dit plus haut, une résistance dissipe une certaine puissance sous forme thermique : c'est l'effet Joule. Pour un composant donné, il existe une limite technologique de dissipation. Si l'on dépasse cette puissance maximale autorisée, l'élément risque de se dégrader : sa résistance est modifiée sans forcément que cela change l'aspect du composant. Si la limite est fortement dépassée, la résistance noircit et peut même se détruire. Les résistances ordinaires ont une puissance maximale de 1/4 W. On utilise également des résistances de puissance supérieure lorsque c'est nécessaire : 1/2 W, 1 W, 2 W, 5 W... Les éléments de puissance sont nettement plus encombrants sur les circuits imprimés et évidemment plus chers. Il importe donc de chiffrer correctement la puissance nécessaire afin d'utiliser ces composants à bon escient. On peut employer une des trois formules citées plus haut. Par exemple, on branche une résistance de 4,7 k Ω sous une tension continue de 12 V. La puissance dissipée par effet Joule est alors :

$$P = \frac{12^2}{4700} = 0,03 \text{ W}$$

Une résistance 1/4 W convient parfaitement. Sous la même tension de 12 V, on connecte un élément de 470 Ω . La puissance est dans ce cas :

$$P = \frac{12^2}{470} = 0,3 \text{ W}$$

Une dissipation de 1/4 W est insuffisante, il faut au moins 1/2 W. On voit que pour les éléments soumis à une tension fixée, on a intérêt à choisir des résistances de valeurs élevées lorsque c'est possible : les puissances dissipées restent alors faibles.

2.2.5 Technologies

De nombreuses technologies existent pour la fabrication des résistances, mais seules quelques-unes apparaissent fréquemment.

■ Résistances à couche de carbone

Les résistances à couche de carbone ont longtemps été les plus répandues, mais elles sont actuellement supplantées par les résistances à couche métallique. Elles sont destinées à tous les usages courants. Leurs performances sont correctes et leur prix est faible. On les rencontre dans des gammes de précision moyenne : 5 % par exemple. La dissipation maximale peut aller jusqu'à 2 W (on trouve essentiellement 1/4 W, 1/2 W, 1 W et 2 W). Ces résistances sont toujours marquées par le code des couleurs (*figure 2.13*).



Figure 2.13 Résistance à couche de carbone.

■ Résistances à couche métallique

Les résistances à couche métallique ont des caractéristiques supérieures, mais leur prix est un peu plus élevé. Elles sont destinées aux applications professionnelles et elles occupent une grande part du marché. Leur précision est bonne : parfois 5 %, mais aussi 2 % ou 1 %. Ces résistances ont une bonne stabilité (c'est-à-dire que leur valeur ne se modifie pas beaucoup au cours du temps). Certaines fabrications de ce type sont même à haute stabilité. La dissipation maximale peut aller jusqu'à 1 W ou 2 W. Le marquage est souvent effectué avec le code des couleurs, mais les séries de précision sont parfois marquées en clair : la valeur et la tolérance sont indiquées en chiffres sur le corps du composant (par exemple $1 \text{ k}\Omega \pm 1 \%$). En l'absence d'indication contraire, les résistances rencontrées sur les schémas sont à couche métallique.

■ Résistances bobinées

Pour des puissances plus élevées, on dispose de résistances bobinées (figure 2.14). On rencontre différentes présentations suivant les puissances et les performances : résistances moulées, vitrifiées... Les dissipations sont de quelques watts, quelques dizaines de watts ou plus. Le marquage est en clair. Les tolérances sont assez moyennes (10 %, 5 %...) bien qu'il existe des séries de bonne précision, mais à des prix élevés. Les résistances bobinées d'usage courant ne sont pas utilisables aux hautes fréquences car elles sont inductives.



Figure 2.14 Résistance bobinée vitrifiée.