

PIERRE MAYÉ

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

— 7^e édition

- Principes de fonctionnement
- Caractéristiques technologiques
- Domaines d'utilisation
- Applications concrètes

A
I
D
E
—
M
É
M
O
I
R
E

DUNOD

Direction et conception graphiques de la couverture :
Nicolas Wiel – Elizabeth Riba (Graphiste)
Mise en pages : Nord Compo

© Dunod, 2000, 2005, 2010, 2015, 2021, 2025
© Fréquences, Paris, 1989 pour la première édition

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff
www.dunod.com
9782100881949

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	28
3.1 Principe et propriétés	28
3.2 Caractéristiques technologiques	32
3.3 Domaines d'utilisation	38
4 . Condensateurs	45
4.1 Principe et propriétés	45
4.2 Caractéristiques technologiques	57
4.3 Domaines d'utilisation	68

5 . Bobines	84
5.1 Principe et propriétés	84
5.2 Caractéristiques technologiques	92
5.3 Domaines d'utilisation	96
6 . Transformateurs	101
6.1 Principe et propriétés	101
6.2 Caractéristiques technologiques	106
6.3 Domaines d'utilisation	109
7 . Quartz et résonateurs en céramique	115
7.1 Principe et propriétés	115
7.2 Caractéristiques technologiques	122
7.3 Domaines d'utilisation	128
8 . Varistances	135
8.1 Principe et propriétés	135
8.2 Caractéristiques technologiques	138
8.3 Domaines d'utilisation	144
9 . Thermistances	149
9.1 Principe et propriétés	149
9.2 Caractéristiques technologiques	152
9.3 Domaines d'application	153
10 . Diodes	159
10.1 Principe et propriétés	159
10.2 Caractéristiques technologiques	173
10.3 Domaines d'utilisation	181

11 . Transistors bipolaires	192
11.1 Principe et propriétés	192
11.2 Caractéristiques technologiques	210
11.3 Domaines d'utilisation	215
12 . Transistors à effet de champ	226
12.1 Principe et propriétés	226
12.2 Caractéristiques technologiques	238
12.3 Domaines d'utilisation	240
13 . Thyristors	242
13.1 Principe et propriétés	242
13.2 Caractéristiques technologiques	249
13.3 Domaines d'utilisation	252
14 . Triacs	255
14.1 Principe et propriétés	255
14.2 Caractéristiques technologiques	256
14.3 Domaines d'utilisation	258
15 . Composants optoélectroniques	269
15.1 Principe et propriétés	269
15.2 Caractéristiques technologiques	276
15.3 Domaines d'utilisation	283
16 . Circuits intégrés analogiques	296
16.1 Généralités	296
16.2 Amplificateur opérationnel	299
16.3 Régulateur de tension	306
16.4 Convertisseur à découpage	307
16.5 Temporisateur	309

17 . Convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique	311
17.1 Convertisseurs analogique-numérique	311
17.2 Convertisseurs numérique-analogique	315
18 . Circuits intégrés logiques	319
18.1 Généralités	319
18.2 Circuits combinatoires	322
18.3 Circuits séquentiels	324
18.4 Astables et monostables	327
19 . ASIC et circuits intégrés programmables	332
19.1 Circuits intégrés développés pour un client	332
19.2 Circuits intégrés programmables	333
20 . Microcontrôleurs	339
20.1 Généralités	339
20.2 Exemple	341
20.3 Programmation	344
21 . Interrupteurs et fusibles	346
21.1 Commutateurs et interrupteurs	346
21.2 Fusibles	349
22 . Piles et accumulateurs	354
22.1 Introduction	354
22.2 Piles	360
22.3 Accumulateurs	364

23 . Échauffement et dissipation thermique	370
23.1 Étude générale des échanges thermiques	370
23.2 Application aux composants électroniques	376
24 . Fiabilité des composants	385
24.1 Notions générales	385
24.2 Cas des composants électroniques	386
25 . Circuits imprimés	389
25.1 Présentation	389
25.2 Conception assistée par ordinateur	392
25.3 Fabrication	393
26 . Tests et mesures	395
26.1 Buts	395
26.2 Appareils utilisés	397
26.3 Résistances	399
26.4 Condensateurs	403
26.5 Bobines	407
26.6 Transformateurs	409
26.7 Quartz	409
26.8 Varistances	410
26.9 Thermistances	410
26.10 Diodes	410
26.11 Transistors bipolaires	413
26.12 Thyristors	415
26.13 Triacs	416
26.14 Diodes électroluminescentes	416
26.15 Interrupteurs	417



26.16 Fusibles 418

26.17 Piles et accumulateurs 418

Lexique anglais-français 422

Index 426

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*).

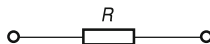


Figure 2.1 Symbole normalisé d'une résistance.

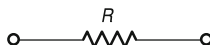


Figure 2.2 Autre symbole d'une résistance.

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) :

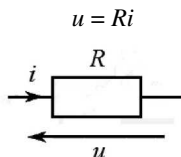


Figure 2.3 Résistance en convention récepteur.

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 Ω
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 :

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

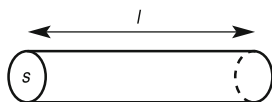


Figure 2.4 Résistance d'un fil conducteur.

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 $\Omega \cdot m$) 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 $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

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 % /°C ou en ppm/°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 :

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

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).

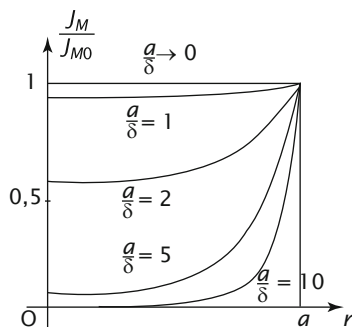


Figure 2.5 Courbes de l'amplitude de la densité de courant dans un fil en fonction de la distance à l'axe.

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).

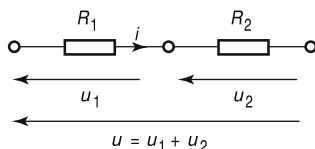


Figure 2.6 Association de deux résistances en série.

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).

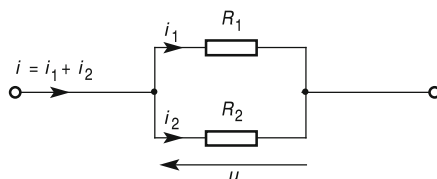


Figure 2.7 Association de deux résistances en parallèle.

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).

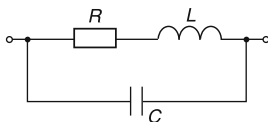


Figure 2.8 Modèle d'une résistance réelle.

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 $10\text{ k}\Omega$.