

Les résistances électriques fixes

—Fiche technique—

I. Présentation

La résistance est le composant le plus usité de l'électricité. Ce document reprend la majeure partie des caractéristiques concernant la technologie des résistances électriques fixes. Quelques éléments de physique sont rappelés afin de comprendre les critères qui dirigent leur fonctionnement et leur fabrication.

I.1. Influence des dimensions et des matériaux

La résistance d'un corps dépend de sa nature par sa résistivité (qui n'est autre que sa faculté à s'opposer au passage des électrons) et de ses dimensions (longueur et section). La relation donnant la résistance R d'un cylindre de section constante (mais de forme quelconque) est la suivante :

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ où } \begin{cases} R \text{ est la résistance (en Ohms, } \Omega \text{)}. \\ \rho \text{ est la résistivité du matériau en } \Omega \cdot \text{m}. \\ l \text{ est la longueur du conducteur en m.} \\ S \text{ est la section transversale du conducteur en m}^2 \text{.} \end{cases}$$

Matériau	Symbole chimique	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
Aluminium	Al	$2,78 \cdot 10^{-8}$
Argent	Ag	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Cuivre	Cu	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Etain	Sn	$1,2 \cdot 10^{-8}$
Laiton	60% Cu, 40% Zn	$5 \cdot 10^{-8}$
Nickel	Ni	$8,7 \cdot 10^{-8}$
Tungstène	W	$5,9 \cdot 10^{-8}$
Zinc	Zn	$6,1 \cdot 10^{-8}$

Tableau 1 : quelques exemples de valeurs de résistivité à 20°C pour les principaux conducteurs.

I.2. Influence de la température

La résistivité dépend elle-même de la température (T) du matériau. La relation limitée au premier ordre fournit une relation linéaire de la température.

$$\rho = \rho_0 (1 + aT) \text{ où } \begin{cases} \rho \text{ est la résistivité du matériau en } \Omega \cdot \text{m}, \\ \rho_0 \text{ est la résistivité à } T = 0^\circ \text{C}, \\ a \text{ est le coefficient de température en } ^\circ \text{C}^{-1}, \\ T \text{ est la température du matériau en } ^\circ \text{C}. \end{cases}$$

Matériau	a ($^\circ \text{C}^{-1}$)	Matériau	a ($^\circ \text{C}^{-1}$)
Aluminium	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Nickel	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Argent	$3,8 \cdot 10^{-3}$	Graphite	$-2,0 \cdot 10^{-4}$
Cuivre	$3,8 \cdot 10^{-3}$	Zinc	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Etain	$4,2 \cdot 10^{-3}$	Constantan	
Laiton	$1,5 \cdot 10^{-3}$	(Cu + Ni)	$-3,0 \cdot 10^{-5}$

Tableau 2 : quelques exemples de coefficients de température pour les principaux conducteurs.

I.3. Influence de la fréquence : effet pelliculaire

En plus des matériaux et de la température, on remarque qu'une résistance électrique ne conserve pas une valeur stable dans un domaine de fréquences variables. Cet effet est dénommé effet pelliculaire ou effet de peau. Ceci provient du fait que lorsque la fréquence augmente, le courant a tendance à circuler à la périphérie du conducteur (la surface « utile » est plus faible, donc la résistance résultante plus élevée).

Résistance	Illustration schématique	Fréquences	Commentaires
$R = \rho \frac{l}{S}$ $S = \pi r^2$		Basses	<p>On considère un conducteur cylindrique de longueur l et de section S traversé par un courant alternatif de valeur efficace I.</p> <p>En « basse fréquence » la densité de courant J est uniforme :</p> $J = J_0 = \frac{I}{S}$
$R_0 = ?$ $R_0 = \rho \frac{l}{S'}$ $S' = \pi \delta (2r - \delta)$ quand $f \nearrow$ alors $R_0 \nearrow$		Elevées	<p>En « haute fréquence » la densité de courant n'est plus uniforme, le courant a tendance à circuler à la périphérie du conducteur. C'est la manifestation de l'effet pelliculaire.</p> <p>Pour les calculs, on fait l'hypothèse que la densité de courant est uniforme sur une couronne d'épaisseur δ appelée épaisseur de peau.</p> <p>En conséquence, on peut supposer que le courant ne circule que dans la couronne d'épaisseur δ et de surface S'.</p>

Tableau 3 : effet pelliculaire.

L'épaisseur de peau est donnée par la relation suivante :

$$\delta = \sqrt{\pi \mu \frac{f}{\rho}} \text{ où } \begin{cases} f \text{ est la fréquence en Hz,} \\ \rho \text{ est la résistivité en } \Omega \cdot \text{m,} \\ \mu \text{ est la perméabilité magnétique du matériau : } \mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \\ \text{avec } \begin{cases} \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m est la perméabilité magnétique du vide,} \\ \mu_r \text{ est la perméabilité relative, } \mu_r \approx 1 \text{ pour le cuivre.} \end{cases} \end{cases}$$

Remarque : pour un conducteur en cuivre à $f = 50\text{Hz}$, $\delta = 9,28 \text{ mm}$.

I.4. Effets de l'insertion d'une résistance dans un circuit

Une résistance placée dans un circuit électrique provoque une chute de tension à ses bornes proportionnelle au courant qui la traverse. Ce phénomène est connu sous le nom de **loi d'Ohm** et s'exprime par la relation suivante (valeurs instantanées ou continues) :

$$U = R.I \text{ où } \begin{cases} R \text{ est la résistance (en Ohms, } \Omega), \\ U \text{ est la tension aux bornes de la résistance (en V), \\ I \text{ est le courant parcourant la résistance (en A).} \end{cases}$$

On exprime aussi cette loi d'Ohm sous la forme : $I = G.U$ où G est la conductance en Siemens (S), c'est à dire l'inverse de la résistance.

II. Caractéristiques technologiques des résistances

II.1. La valeur nominale

C'est la valeur de référence qui figure sous forme codée sur le composant.

II.2. La tolérance

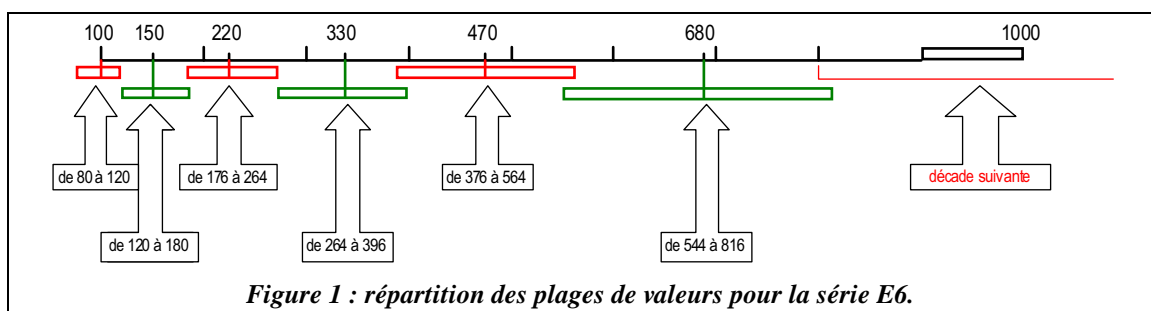
C'est la plage de valeurs entre lesquelles se situe la valeur réelle de la résistance. Cette tolérance est exprimée en % de la valeur nominale.

Exemple : $100 \text{ k}\Omega \pm 5\%$ ($95 \text{ k}\Omega \leq R \leq 105 \text{ k}\Omega$).

II.3. Les valeurs normalisées

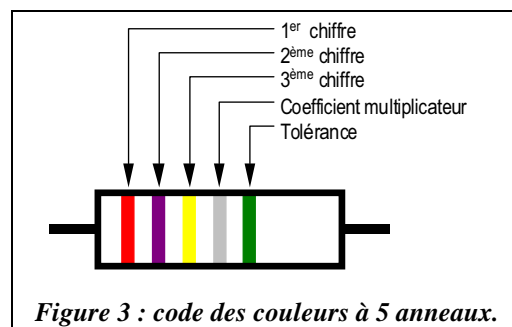
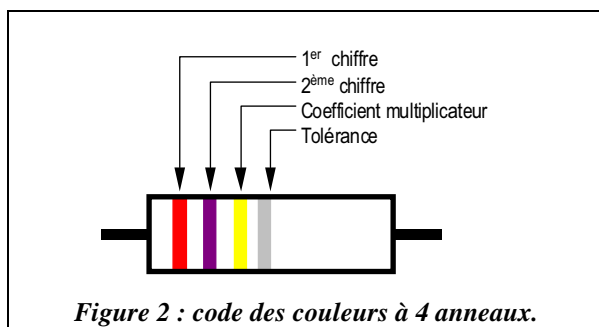
Toutes les valeurs de résistances n'existent pas et de manière générale, on ne les fabrique pas à la demande. Les valeurs proposées par les constructeurs apparaissent dans diverses listes normalisées (Le chiffre indique le nombre de valeurs dans la série) :

- série E3 tolérance $\pm 40\%$,
- série E6 tolérance $\pm 20\%$,
- série E12 tolérance $\pm 10\%$,
- série E24 tolérance $\pm 5\%$,
- série E48 tolérance $\pm 2\%$,
- série E96 tolérance $\pm 1\%$,
- série E192 tolérance $\pm 0,5\%$.



II.4. Le marquage des valeurs

La valeur normalisée et la tolérance sont notées sur la résistance à l'aide de bagues de couleur (tolérance jusqu'à 1% et puissance jusqu'à 1 watt). A partir de 2 watts et 0,5% de tolérance, ces valeurs sont reproduites en chiffres.



atto	a	10^{-18}
femto	f	10^{-15}
pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
micro	μ	10^{-6}
milli	m	10^{-3}
kilo	k	10^3
méga	M	10^6
giga	G	10^9
téra	T	10^{12}

Couleur	Chiffres significatifs	Coefficient multiplicateur	Tolérance
Argent			$\pm 10\%$
Or		0,1	$\pm 5\%$
Noir	0	1	
Brun	1	10	$\pm 1\%$
Rouge	2	100	$\pm 2\%$
Orange	3	10^3	
Jaune	4	10^4	
Vert	5	10^5	
Bleu	6	10^6	
Violet	7	0,01	
Gris	8	10^8	
Blanc	9	10^9	

Tableau 4

Le **Tableau 5** de la page suivante donne les valeurs des résistances dans les cinq séries de E6 à E96.

E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%	E48 ±2%	E96 ±1%
100	100	100	100	100
				102
			105	105
				107
		110	110	110
				113
			115	115
				118
	120	120	121	121
				124
			127	127
		130		130
			133	133
				137
			140	140
				143
			147	147
150	150	150		150
			154	154
				158
		160	162	162
				165
			169	169
				174
	180	180	178	178
				182
			187	187
				191
			196	196
		200		200
			205	205
				210
			215	215
220	220	220		221
			226	226
				232
		240	237	237
				243
			249	249
				255
			261	261
	270	270		267
			274	274
				280
			287	287
				294
		300	301	301
				309

E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%	E48 ±2%	E96 ±1%
			316	316
				324
330	330	330	332	332
				340
			348	348
				357
		360	365	365
				374
			383	383
	390	390		392
			402	402
				412
			422	422
		430		432
			442	442
				453
			464	464
470	470	470		475
			487	487
				499
		510	511	511
				523
			536	536
				549
	560	560	562	562
				576
			590	590
				604
		620	619	619
				634
			649	649
				665
680	680	680	681	681
				698
			715	715
				732
		750	750	750
				768
			787	787
				806
	820	820	825	825
				845
			866	866
				887
		910	909	909
				931
			953	953
				976

Tableau 5 : valeurs normalisées dans les séries E6 à E96.

II.5. Puissance dissipée

La puissance maximale que peut dissiper une résistance est une information essentielle. Si la valeur maximale est dépassée, deux phénomènes peuvent apparaître :

- soit elle s'échauffe trop et sa destruction est complète ;
- soit sa valeur change fortement et sort de la plage de tolérance sans pour autant que son aspect extérieur ne soit modifié.

Il est donc très important de **dimensionner la résistance en terme de puissance**. Pour cela, après avoir déterminé la résistance, il faut calculer la tension à ses bornes ou le courant qui la traverse. La puissance dissipée s'exprime par l'une des relations suivantes :

$$P = U.I = R.I^2 = \frac{U^2}{R} \text{ où } \begin{cases} P \text{ est la puissance dissipée en watts (W),} \\ U \text{ est la tension aux bornes de la résistance en volts (V),} \\ R \text{ est la résistance en ohms } (\Omega), \\ I \text{ est le courant parcourant la résistance en ampères (A).} \end{cases}$$

III. Technologies de fabrication

III.1. Les résistances agglomérées

Cette technologie n'est citée que pour mémoire puisque plus aucune résistance n'est construite avec ce procédé.

La fabrication consiste, dans un premier temps, à réduire en poudre un mélange de silice (isolant), de bakélite (liant) et de composés carbonés de résistivité donnée pour obtenir la résistance voulue (*Figure 4*). On additionne ensuite le mélange à un solvant pour obtenir une pâte. On remplit un tube isolant (en bakélite) avec le mélange et on moule à une température de 200 °C.

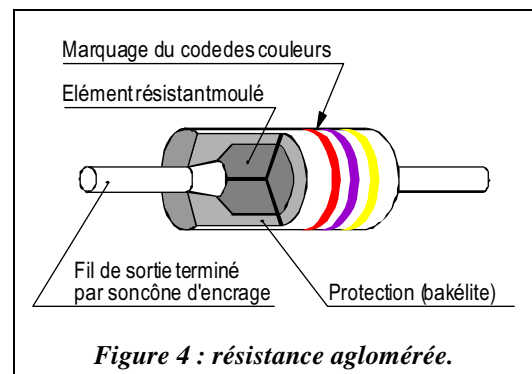


Figure 4 : résistance agglomérée.

Caractéristiques essentielles des résistances agglomérées

- Gamme de valeurs de 4,7 Ω à 100 M Ω ,
- tolérances de $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ (impossible d'avoir de précision meilleure) en série E6 et E12,
- puissances de 0,5 W, 1 W et 2 W,
- résistances très robustes, mais les caractéristiques telles que la tenue en température, la stabilité, etc. sont médiocres.

III.2. Résistances à couche de carbone

Ces résistances sont composées d'un noyau de céramique isolant et parfaitement poli. On dépose sur celui-ci une couche de carbone par pyrolyse (c'est à dire que le carbone est issu d'un mélange gazeux porté à une température d'environ 1000 °C puis se dépose sur les noyaux). La valeur de la résistance est contrôlée par l'épaisseur de la couche de carbone et par conséquent du temps de dépôt dans le four.

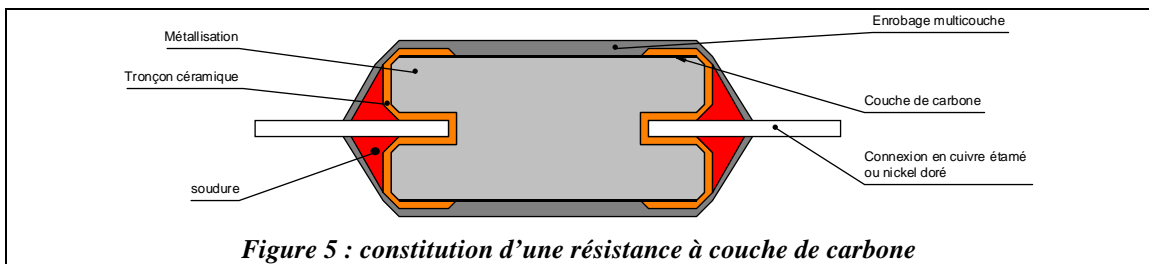


Figure 5 : constitution d'une résistance à couche de carbone

On constate que les épaisseurs trop faibles de la couche de carbone ($1/1000^{\text{ème}}$ de mm) sont instables en raison de la forte variation de la résistance avec la température. Les constructeurs préfèrent donc augmenter l'épaisseur de carbone et compenser la baisse de la résistance en spiralant la partie conductrice pour augmenter la longueur (*Figure 4*).

Les embouts portant les fils de liaison sont de deux types : sertis aux extrémités du bâtonnet puis soudés ou les embouts sont métallisés et les fils ancrés dans le bâtonnet de céramique puis soudés (encombrement plus faible).

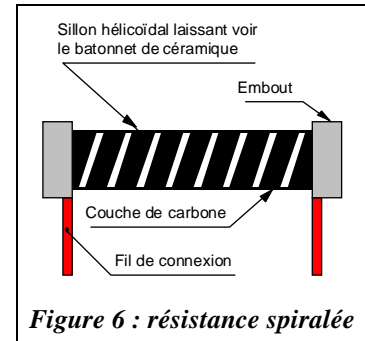


Figure 6 : résistance spiralée

Caractéristiques essentielles des résistances à couche de carbone

- Résistances d'usage courant dans les séries E12 et E24 avec marquage par bagues colorées,
- existent aussi en séries spéciales à haute stabilité (E48 et E96) avec marquage en clair,
- valeurs de quelques ohms à $10\text{ M}\Omega$,
- bonne tenue en température (peu de dérive),
- tenue en fréquence correcte jusqu'à 100 MHz (1 MHz pour $10\text{ M}\Omega$),
- il existe des modèles jusqu'à $10\text{ G}\Omega$ et même haute tension (jusqu'à 5000 V),
- puissance de $1/8^{\text{ème}}$ de watt à 3 W dans les séries courantes,
- de moins en moins utilisées au profit des résistances à couche métallique.

III.3. Résistances à couche métallique

Le procédé de fabrication consiste à métalliser les deux extrémités d'un bâtonnet de céramique poli puis d'y déposer par évaporation un film métallique (d'or –Au–, de platine –Pt–, de palladium –Pd–, de rhodium –Rh– ou de nickel-chrome –NiCr–) de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres. La valeur de la résistance est contrôlée par le temps de dépôt sur l'isolant qui conditionne donc l'épaisseur du conducteur. Les connexions sont soudées ou emmanchées à force sur les parties métallisées. Toute la résistance est ensuite enrobée de laque pour la soustraire aux éléments extérieurs (oxydation, corrosion,...).

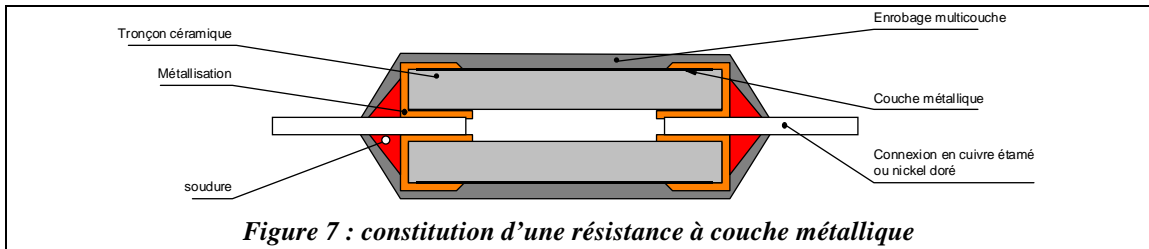


Figure 7 : constitution d'une résistance à couche métallique

Caractéristiques essentielles des résistances à couche métallique

- Tolérances de $\pm 5\%$ à $\pm 0,05\%$,
- valeurs de $1\ \Omega$ à $3\text{ M}\Omega$,
- puissance de $1/4$ de Watt à 2 W ,
- prix faibles,
- bonne stabilité et bonne précision,
- bonne tenue quelque soit la valeur jusqu'à la fréquence de 100 MHz ,
- existent aussi en modèles de puissance jusqu'à 6000 W (longueur : $1,80\text{ m}$),
- c'est ce modèle domine le marché. Il résoud la plupart des cas de figure (applications professionnelles, militaires ou spatiales).

III.4. Les résistances bobinées

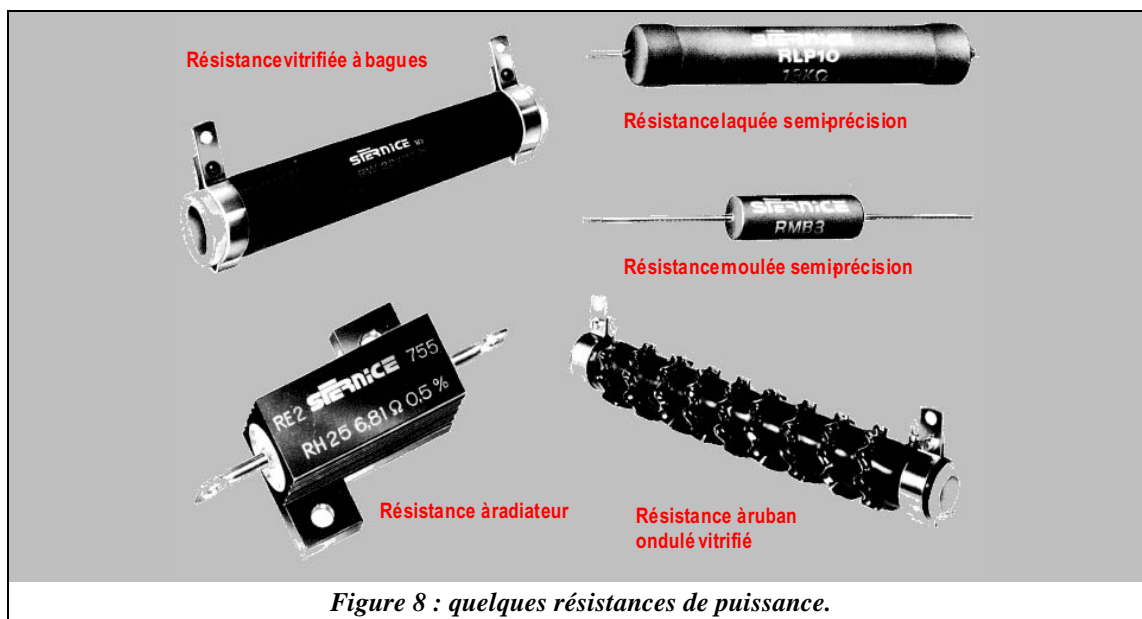
Pour les puissances à dissiper supérieures à $4,5\text{ W}$, il est préférable d'employer des résistances constituées d'un fil métallique résistif enroulé sur un noyau isolant et réfractaire.

Les résistances se présentent alors sous diverses formes :

- moulées : les plus faibles puissances dans ce type (de $0,75$ à 2 W). Série E24,
- laquées,
- vitrifiées : très résistantes. Puissances de 13 à 320 W en série normale et de 180 W à 600 W (traction électrique). Série E24.

Elles peuvent parfois être habillées d'un radiateur pour les puissances comprises entre 10 et 50 W.

Pour les puissances élevées (de 16 à 1000 W), le mandrin qui supporte le fil est creux pour faciliter la dissipation thermique.



Caractéristiques essentielles des résistances bobinées

- Séries E12 et E24 de préférence,
- tolérances faibles possibles,
- très fortes puissances,
- peu stables à haute dissipation thermique ($P \geq 0,5 \times P_{nom}$)
- tolérances : de $\pm 1\%$ à $\pm 20\%$.