

1. Les résistances

1.1. Généralités

On pourrait dire qu'une résistance est un composant qui fonctionne précisément comme son nom l'indique c'est-à-dire qu'elle offre une "résistance" (suivant le dictionnaire : "*qualité d'un corps qui réagit contre l'action d'un autre corps*") au passage du courant électrique.

On pourrait aussi considérer qu'une résistance est un composant qui a un comportement entre celui du conducteur parfait et celui de l'isolant parfait.

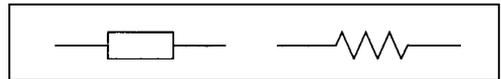
L'unité de mesure de résistance est l' **ohm**, symbolisé par la lettre grecque oméga Ω .

Un ohm représente une résistance qui, lorsqu'on lui applique 1 volt, est traversée par un courant de 1 ampère.

Mais on utilise aussi fréquemment les unités dérivées suivantes :

- le milliohm, symbolisé par **m Ω** , $1 \text{ m}\Omega = 10^{-3} \text{ ohm}$,
- le kilohm, symbolisé par **k Ω** , $1 \text{ k}\Omega = 10^3 \text{ ohms}$, et
- le mégohm, symbolisé par **M Ω** , $1 \text{ M}\Omega = 10^6 \text{ ohms}$.

Il existe deux symboles pour représenter une résistance. Le rectangle avec les deux fils de connexions est officiellement reconnu chez nous.



La valeur d'une résistance peut se mesurer l'aide d'un multimètre (encore appelé Volt-Ohmmètre ou VOM) en position **ohmmètre**.

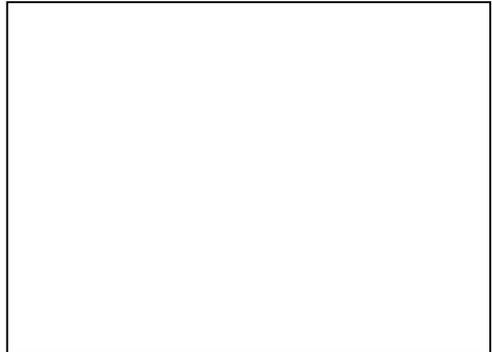
1. Avec un multimètre à aiguille, il faut faire attention à l'échelle qui n'est pas linéaire. La résistance infinie est à gauche et la résistance nulle est à droite. On doit commencer par faire le calibrage de l'ohmmètre,, en court-circuitant les deux fils et en réglant le potentiomètre de réglage pour indiquez "zéro Ω ". En suite, pour faire une mesure relativement précise, il faut choisir une échelle qui donne une lecture comprise dans la seconde moitié du cadran
2. Avec un multimètre numérique, il y a moins de problèmes, puisqu'il suffit de choisir la bonne gamme de mesure.



Pour les mesures de très faibles résistances, il ne faut oublier que les cordons et les résistances de contacts s'élèvent à $0,3 \Omega$ environ. Il faut donc tenir compte de cette erreur de mesure lorsqu'on mesure des résistances de moins de 10Ω . D'autre part la résistance des mains de l'opérateur est de l'ordre de $0,1$ à $1 M\Omega$ (selon la peau, le degré de transpiration, etc.) . Il faut donc éviter de tenir les doigts sur les résistances de plus de $10 k\Omega$ sous peine de faire des erreurs de mesures.

On peut aussi mesurer les résistances avec un pont de de mesure. Le plus célèbre est le pont de Wheatstone représenté ci-contre. Lorsque le pont est à l'équilibre, c.-à-d. lorsque le galvanomètre indique "zéro", on a

mais ceci devrait en fait être classé dans le chapitre 12 où on traitera les mesures.



1.2. Les facteurs qui déterminent la résistance

La relation de base (loi de Pouillet) qui régit les résistances est

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

où ρ est la résistance spécifique du matériau en $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$,
 l est sa longueur en m
 s est sa section en mm^2

Pour information, le ρ de quelques matériaux :

cuivre	0,0179 $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
or	0,0244
argent	0,0146
aluminium	0,029
fer	0,139
carbone	35

La **résistance spécifique** ρ d'un matériau est souvent exprimée en $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, parce qu'on mesure le diamètre du fil avec un pied à coulisse en mm, qu'on en déduit la section en mm^2 et que la longueur se mesure généralement en m. Toutefois, certains ouvrages utilisent des $\mu\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$ ou des $\mu\Omega \text{ cm}$, dans ce cas on doit exprimer la section en cm^2 et la longueur en cm. Ceci est un système plus "homogène", les physiciens aiment bien des "dimensions homogènes", mais c'est moins pratique car on va travailler avec des nombres où il y a beaucoup de zéro derrière la virgule Si on donne la résistivité en $\mu\Omega \text{ cm}$ il faut diviser cette valeur par 100 pour obtenir la résistivité en $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, ainsi, la résistivité du Cu est de $0,0179 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ou $1,79 \mu\Omega \text{ cm}$.

résistance spécifique du cuivre = $0,0179 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ou $1,79 \mu\Omega \text{ cm}$

Pour une résistance donnée, plus la tension appliquée à ses bornes est grande, plus le courant qui y circule est important et plus la puissance qui y sera dissipée sera élevée, et plus elle va chauffer (loi de Joule).

La quantité de chaleur (évaluée en calories) dégagée par une résistance est

$$Q_{\text{th}} = 0,24 R I^2$$

et la différence entre la chaleur produite et la chaleur évacuée détermine un accroissement de la température de l'élément.

Rappelons qu' une **calorie** permet d'augmenter la température de 1 gramme d'eau de 1°C .
 une **kilocalorie** permet d'augmenter la température de 1 litre d'eau de 1°C .

Pour rappel aussi, une résistance cède sa chaleur au monde extérieur

- par **conduction** : c'est un processus physique qui met en jeu des échanges d'énergies au niveau des atomes. Par exemple : si on met une barre de fer dans le feu, au bout d'un certain temps, la partie que vous tenez en main va chauffer, ceci est typiquement un échange par conduction.
- par **convection** : ce processus requiert le passage d'un fluide (un gaz ou un liquide) qui passe au-dessus de la source de chaleur. Par exemple : lorsque l'air passe sur un radiateur (ce mot est très mal choisi) de chauffage central, il chauffe cet air par convection, et,
- par **rayonnement** : dans ce processus, il ne requiert pas de substance pour transporter la chaleur. Par exemple lorsque vous êtes devant un feu ouvert, l'échange de chaleur se fait principalement par rayonnement.

Application :

Le calorimètre HF : Pour mesurer des fortes puissances (c-à-d. des puissances > 1 kW), on branche l'émetteur sur une résistance de charge (50 Ω) autour de laquelle on fait circuler de l'eau. Le système est isolé thermiquement. Connaissant le débit, les températures d'entrée et de sortie, on peut en déduire la puissance HF : .

Par définition : 1 W/s = 1 Joule = 0,24 cal d'où 1 W/min = 0,24 x60 = 14,4 cal

comme kilocalorie élève la température de 1 litre d'eau de 1°C

1 W/min élève la température de 0,0144 litre d'eau de 1°C

d'où $P_{(Watt)} = (t' - t) \times D_{(l/min)} \times 1 / 0,0144$

Donc si, par exemple, au bout de 15 minutes on a débité 276,9 litres d'eau et que la différence de t° est de 10°C, alors $P = 10 \times (276,9/15) \times 1/0,0144 = 12810 \text{ Watts}$

Si la puissance dissipée dans une résistance est trop forte par rapport à la dissipation maximale admise, la température de la résistance va augmenter de façon excessive, et elle pourrait même devenir rouge, fondre, et se détruire !

Il faut donc non seulement spécifier la valeur de la résistance (en calculant le circuit) mais aussi déterminer la **puissance dissipée**, et il faudra utiliser une résistance dont la dissipation maximum est bien supérieure à la valeur calculée. Quant on dit que la dissipation admissible doit être supérieure à la puissance dissipée, cela sous-entend un facteur de sécurité compris entre 2 x et 5 x. Si par exemple dans votre calcul vous arrivez à une dissipation de 0,0834 W, une résistance de 0,1 W chauffera très fort, tandis qu'une résistance de 0,25 W assurera une très longue vie à votre montage !

Les dissipations sont normalisées, et pour l'usage courant, on trouve des valeurs de

1/10 , 1/8 , 1/4 , 1/2 , 1 et 2 watts

mais pour des applications particulières il n'est pas rare de rencontrer des résistances dont la dissipation maximum est de l'ordre de 5, 10, 25, 50,100, voire 250 Watts

Rappelons qu'une résistance peut apparaître sous différentes formes, et n'oublions pas qu'elle peut aussi apparaître sous des formes plus subtiles telles que la résistance d'un fil, la résistance de contact, la résistance de connexion, une résistance intégrée sur un support en céramique (film épais), une résistance intégrée sur une puce électronique ("chip"),...

Si la température de la résistance varie, on observera alors une variation de la valeur de la résistance, on dit qu'à une résistance possède un **coefficient de température**.

Le coefficient de température traduit la variation relative de la valeur de la résistance en fonction de la température.

Le coefficient de température des métaux est positif, c'est-à-dire que la résistance augmente lorsque la température augmente.

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

α est le coefficient de température. Cette loi est encore connue sous le nom de loi de Matthiessen. On peut encore la transformer en

$$t - t_0 = ((R_0 / R) - 1) (1/\alpha) + T$$

Voici quelques valeurs types de α :

cuivre	+ 0,004 /°C
or	+ 0,0037
argent	+ 0,004
aluminium	+ 0,004
fer	+ 0,004
carbone	

Pour quelques matériaux, le coefficient de température est négatif, c'est-à-dire que la résistance diminue lorsque la température augmente, par exemple, le carbone a un coefficient de température négatif qui se situe entre $-25 \cdot 10^{-6}$ et $-200 \cdot 10^{-6}$ par °C .

Ainsi, si une résistance mesure 3000 ohms à 25°C, et que son coefficient de température est de $-80 \cdot 10^{-6}$ /°C, alors pour une température de 75 °C, sa valeur sera de $3000 (1 - 50 \times 80 \cdot 10^{-6}) = 3000 (1 - 4 \cdot 10^{-3}) = 2988$ ohms.

Exercices :

Cachez la colonne avec les solutions et faites les exercices, puis comparez.

- | | |
|--|---|
| <p><u>Problème :</u></p> <p>1) L'induit d'un moteur est bobiné avec du fil de Cu et possède à 20°C une résistance de 0,2 Ω. Pendant le fonctionnement cette résistance est portée à 0,25 Ω. calculez la température ?</p> | <p><u>solution :</u></p> <p>$t - 20 = ((0,25/0,2)-1) ((1/0,004) + 20)$
 $t - 20 = 0,25 \times 270 = 67,5$
 donc $t = 67,5 + 20 = 87,5$ °C</p> |
| <p>2) Fabrication d'une résistance de 12 Ω à 20°C, avec du fil de maillechort d'un diamètre de 2 mm et dont $\rho = 0,3 \mu\Omega/m$ à 0°C et $\alpha = 0,0004$. Quelle est la longueur du fil ?</p> | <p>$s = 3,14 \text{ mm}^2$
 $\rho = 0,3 (1 + 0,0004 \times 20) = 0,3024 \mu\Omega/m$
 $l = 12 \times 3,14 \times 10^{-6} / 0,3024 \cdot 10^{-6} = 124 \text{ m}$</p> |
| <p>3) Un réseau est construit avec du fil de cuivre de 25 mm². Quel est la section du fil d'aluminium qui aurait la même résistance ?</p> | <p>$0,0179 \times l / 25 = 0,029 \times l' / S$
 donc $S = 0,029 \times 25 / 0,0179 = 40,5 \text{ mm}^2$</p> |
| <p>4) Deux bobines ont la même résistance, mais l'une a 1 mm de diamètre, l'autre en a 2. Si la première bobine mesure 10 m, quelle est la longueur de la deuxième ?</p> | <p>$l / s = l' / 4 s$
 donc $l' = 4 l = 4 \times 10 = 40 \text{ m}$</p> |
| <p>5) Deux bobines ont la même résistance, mais l'une a un fil de 1 mm², l'autre de 2mm². Si la première bobine mesure 10 m, quelle est la longueur de la deuxième ?</p> | <p>$l / s = l' / 2 s$
 donc $l' = 2 l = 2 \times 10 = 20 \text{ m}$</p> |
| <p>6) Une génératrice a une ddp de 110 V et débite 275 A qui doivent être transporté sur une distance de 200 m par des câbles en Cu ($\rho=0,0154$ et $\alpha 0,0004$) . On veut que la charge soit alimentée par 100 V. Quelle est la section des câbles à utiliser ?</p> | <p>$r = (110 - 100) / 275 = 0,036 \Omega$
 $s = 0,0154 \times 200 / 0,036 = 85,5 \text{ mm}^2$</p> |

En fonction du temps, sous l'effet de l'humidité ou d'agents chimiques et atmosphériques, la valeur nominale d'une résistance peut varier, on définit ainsi la stabilité, d'une résistance dans le temps.

Certaines résistances portent un nom qui désigne spécifiquement leur application, par exemple on parlera

- d'une **résistance chutrice** si la fonction principale est de créer une chute de tension (par exemple pour pouvoir utiliser un relais 6 V dans un montage alimenté en 12 V)
- d'une **résistance de saignée** ("bleeder") si elle a pour but de décharger un condensateur après la coupure de la tension d'alimentation.

- d'un **shunt**, si la résistance est en parallèle sur un ampèremètre pour en diminuer la sensibilité,
- d'une **résistance additionnelle** si elle sert à augmenter le calibre d'un voltmètre... etc.

Sur ce monde rien n'est parfait et une résistance n'échappe pas à cette loi, elle possède malheureusement de l'inductance parasite (fil de connexion et le bobinage même d'une résistance bobinée), et de la capacité parasite (capacité entre chacune des spires de la résistance, entre les fils de connexions,...). **L'inductance parasite et la capacité parasite** limite généralement la plage de fréquence d'utilisation d'une résistance.

1.3. Codes de marquage

Il n'est pas aisé de mesurer chaque résistance que l'on devra utiliser pour réaliser un montage, il n'est pas aisé de sortir chaque fois le multimètre pour connaître la valeur de la résistance. C'est pourquoi les fabricants de résistances ont décidé de "marquer" leurs résistances avec un code.

Toutefois lors d'un dépannage, ou lorsqu'il y a un doute (lisibilité des couleurs) on n'hésitera pas à reprendre l'ohmmètre pour contrôler ...

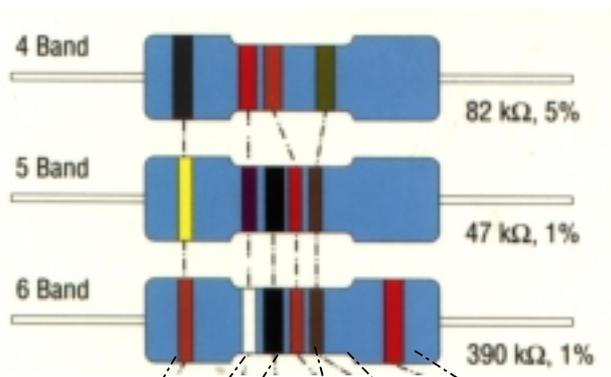
1.3.1. Code des couleurs

On distingue des résistances avec 4 , 5 ou 6 bandes de couleurs.

On commence par tenir la résistance horizontalement devant soi, et s'il y a un plus grand espace non marqué, on le met à droite ; c'est le cas des résistances à 4 ou 5 bandes.

Pour les résistances à 6 bandes, il est un peu plus difficile de trouver quel est le bon côté, mais on remarquera que l'espace entre les bandes n'est pas identique.

- si la résistance comporte 6 anneaux de couleurs, alors l'anneau le plus à droite indique le coefficient de température,
- l'anneau suivant indique la tolérance,
- l'anneau qui précède indique un multiplicateur (sous forme de 10 exposants quelque chose)
- les 2 ou 3 anneaux à gauche indique la valeur



	valeur	multiplicateur	tolérance	coeff. de t°
(rien)			± 20%	
argent		x 0,01	± 10%	
or		x 0,1	± 5 %	
noir	0	x 1		200 10 ⁻⁶
brun	1	x 10	± 1 %	100 10 ⁻⁶
rouge	2	x 100	± 2 %	50 10 ⁻⁶
orange	3	x 1 k		15 10 ⁻⁶
jaune	4	x 10 k		25 10 ⁻⁶
vert	5	x 100 k	± 0,5%	
bleu	6	x 1 M	± 0,25%	
violet	7	x 10 M	± 0,1%	
gris	8			
blanc	9			

COURS DE PREPARATION A L'EXAMEN DE RADIOAMATEUR (HAREC+)

La partie grisée de ce tableau doit être connue par cœur, non seulement pour les besoins habituels, mais aussi pour l'examen de radioamateur.

Voici un moyen mnémotechnique pour retenir les couleurs :

Ne	Mangez	Rien	Ou	Jeûnez	Voilà	Bien	Votre	Grande	Bêtise
Noir	Marron	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Exercices:

Cachez la colonne avec les solutions et faites les exercices, puis comparez.

Quelle est la valeur de la résistance marquée...

						<u>Solution :</u>	
orange	orange	jaune	or			330 k	5%
brun	noir	rouge	or			1 k	5%
brun	noir	jaune	or			100 k	5%
orange	blanc	brun	or			390	5%
brun	noir	bleu	or			10 M	5%
jaune	violet	rouge	or			4,7 k	5%
rouge	rouge	or	or			2,2	5%
orange	orange	rouge	argent	brun		3,32	1%
bleu	gris	rouge	or			6,8 k	5%
rouge	violet	rouge	or			3,7 k	5%
brun	noir	noir	or			10	5%
brun	gris	rouge	or			1,8 k	5%
brun	vert	brun	or			150	5%
brun	noir	noir	brun	brun		1 k	1%
brun	noir	rouge	or			1 k	5%

Quelles sont les couleurs d'une résistance de ...

		<u>Solution :</u>					
330 k	5%	orange	orange	jaune	or		
2,2 k	5%	rouge	rouge	rouge	or		
3,9 k	5%	rouge	blanc	rouge	or		
10 k	5%	brun	noir	orange	or		
180	5%	brun	gris	brun	or		
1 M	5%	brun	noir	vert	or		
22	5%	rouge	rouge	noir	or		
5,6 k	5%	vert	bleu	rouge	or		
3,32	1%	orange	orange	rouge	argent	brun	
100	5%	brun	noir	brun	or		
18 k	5%	brun	gris	orange	or		
47 k	5%	jaune	violet	orange	or		
1100	1%	brun	brun	noir	brun	brun	

1.3.2. Code à chiffres

Pour les résistances de puissance, de précision et pour les résistances CMS, le marquage se fait en clair.

Mais notons aussi qu'un code d'origine japonaise tend à s'imposer maintenant, principalement sur les schémas, mais aussi sur les composants, il consiste en 3 chiffres, les deux premiers donnent la valeur, le dernier donne le multiplicateur exprimé en 10^x ;

exemples : **223** représente 22×10^3 soit 22×1000 ohms soit 22 kilohms
 470 représente 47×10^0 soit 47 ohms (il y a 0 zéro !)
 685 représente 6 800 000 ohms soit 6,8 Mohms

Sur les schémas européens on utilise un code assez semblable : une lettre représente un multiplicateur :

E = unité	K = kilo	M = méga
------------------	-----------------	-----------------

la lettre est placée comme point décimal

exemples : **22K** représente 22 000 ohms soit 22 kilohms
 47E représente 47 ohms
 0E1 représente 0,1 ohms
 5K6 représente 5 600 ohms ou 5,6 kilohms
 6M8 représente 6 800 000 ohms ou 6,8 Mohms...

1.4. Tolérance et valeurs normalisées

Supposons que dans un montage donné, le calcul du circuit nous conduit une valeur de 4634,91 ohms, il est inconcevable de commander une résistance de 4634,91 ohms au marchand de composants, non seulement parce que les stocks de composants seraient gigantesques, mais aussi parce que dans la plupart des cas une telle précision n'est pas requise.

C'est ainsi que l'on a décidé de normaliser des séries de résistances, et de définir des classes de tolérances telles que

20% , 10% , 5% , 2% , 1% , etc..

Cela veut dire qu'une résistance marquée 4700 ohms $\pm 10\%$ aura une valeur réelle comprise entre 4230 ohms c.-à-d. $4700 - 10\% = 4700 - 470$, et, 5170 ohms c.-à-d. $4700 + 10\% = 4700 + 470$, et probablement que dans un lot (d'un million d'exemplaires peut être ?) il y en aura une qui vaudra précisément 4634,91 ohms !

D'autre part, pour le fabricant il faut que toutes les résistances sortant de la chaîne de fabrication puissent entrer dans "la fourchette" d'une valeur normalisée, sinon il aurait un "surplus" invendable !

En termes mathématiques, si **t** est la tolérance, il faut donc que chaque valeur normalisée dans la série, soit égale à la précédente multipliée par $(1+t)$. Par exemple, si on veut faire une série à 10%, en partant de la valeur 10 ohms, nous aurons donc

- 10 Ω
- puis $10 (1 + 2 \times 0.01) = 10 \times 1.2 = 12 \Omega$
- puis $12 (1 + 2 \times 0.01) = 12 \times 1.2 = 14,4 \Omega$
- puis $14 \times 1,2 = 17,28 \Omega$
- puis $17,28 \times 1,2 = 20,7 \Omega$
- etc.

Si on arrondit ces valeurs, on obtient les valeurs normalisées dans la série à 10% :

10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68 , 82
--

et multiples et sous-multiples, cette série est encore appelée E12**Erreur! Signet non défini.** parce qu'il y a 12 valeurs par décade.

Pour la série à 5% nous avons :

**10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30,
33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91**

et multiples et sous-multiples, cette série est encore appelée E24 parce qu'il y a 24 valeurs par décade.

Et enfin pour la série à 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, 655,
681, 698, 715, 732, 750, 768, 787, 806, 825, 845,
866, 887, 909, 931, 953, 976

et multiples et sous-multiples et encore appelée série E96.

Ne mémorisez pas la série E96, mais nous vous conseillons d'essayer de connaître la série E24, c.-à-d. celle à 5 % , car vous l'utiliserez très fréquemment ! C'est pour cette raison que nous avons mis la série E24 en gras !

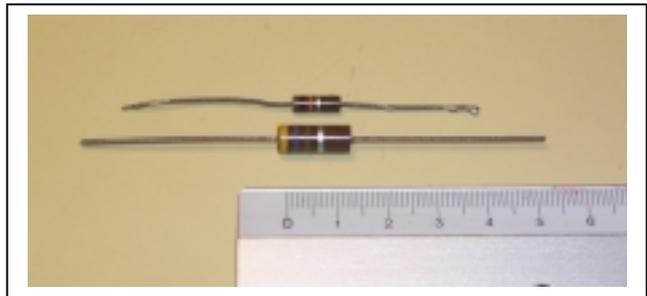
1.5. Technologie des résistances

La technologie est une science qui étudie les différents matériaux, les composants, leurs méthodes de fabrication et leurs mises en œuvre. Nous n'allons pas décrire en détails tous les processus de fabrication industrielle, mais nous nous limiterons à analyser les différentes formes, les aspects, les caractéristiques et les utilisations particulières des résistances utilisées dans les domaines de l'électronique, de la radio et des ordinateurs.

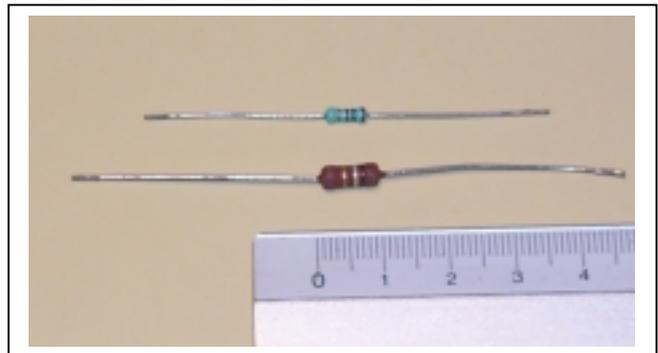
1.5.1. Les résistances fixes

- **Résistances agglomérées** : Elles sont constituées de bâtonnets de matière résistante moulée, à base de carbone. Ces résistances ont un souffle relativement élevé, une stabilité médiocre, et un coefficient de température fort variable.

Si ce type de résistance fut fortement utilisé par le passé, actuellement il n'est pratiquement plus utilisé. Nous le mentionnons simplement "pour mémoire".



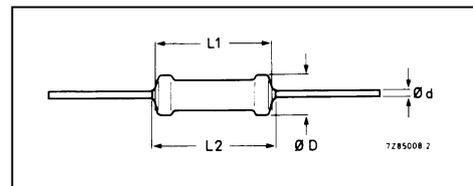
- **Résistances à couche métallique** : Sur un cylindre en matière céramique on dépose une mince couche de métal (alliages de chrome et de nickel) par vaporisation. Cette couche résistante est recouverte d'une peinture protectrice. Le contact est réalisé soit au moyen de capsules métalliques, soit directement par les fils de connexions qui pénètrent dans le cylindre de céramique. Pour des valeurs élevées de résistance, la couche est déposée sous forme de spirale. Les fils de connexions peuvent parfois être repliés pour un montage vertical.



Les valeurs courantes vont de 1 ohm à 22 Mohms. La dissipation varie de 1/8 Watt à 3 Watts. Le coefficient de température est positif ($0,1 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$).

Mais, même si la puissance n'est pas dépassée, ces résistances ont une tension limite. Soit une résistance de 1 Mohms et d'une dissipation de 1/2 Watts, on pourrait en déduire qu'on peut appliquer une tension maximale de 707 V.

Ceci n'est en fait pas le cas car il y aura claquage du diélectrique (le support en céramique, la couche de peinture de protection, etc ...) pour une tension plus faible. En général la tension maximum est de 200 à 350 V.



Les résistances à couche métallique sont certainement les résistances les plus utilisées.

- **Résistances de précision** : Dans les appareils de mesures, on utilise habituellement des résistances de hautes précisions (0,01% à 1%).
- **Résistances spéciales pour haute tension** : Il existe des résistances à film métallique spécialement construites pour supporter les hautes tensions. Entre autre, la rigidité diélectrique du support, la peinture de protection, etc. ont été prises en considération. Les valeurs courantes vont de 0,1 Mohms à 100 Mohms et les dissipations de 0,5 à 2 Watts.
- **Résistances bobinées** : Elles sont constituées par un fil résistant enroulé sur un tube en céramique, l'enroulement est ensuite recouvert d'un ciment réfractaire ou d'un vernis vitrifié qui la protège. Parmi les alliages résistants qui peuvent être utilisés citons

- le nickel-chrome (NiCr)
- le nickel-fer,
- le manganin (86%Cu-12%Mn-2%Ni) dont la résistivité est de $43 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
- le constantan (54%Cu-45%Ni-1%Mn) dont la résistivité est de $50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
- le zéranin (88% Cu - 6% Mn - 6% Ge) dont la résistivité est de $43 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
- le maillechort dont la résistivité est de $0,344 \cdot \mu\Omega \cdot \text{cm}$

Comparez ces résistivités à celle du cuivre qui est de $0,0179 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ou $1,79 \mu\Omega \text{ cm}$. Ces résistances sont principalement utilisées lorsqu'il faut dissiper une puissance importante, par exemple pour les circuits électroniques de forte puissance, dans les alimentations, etc.

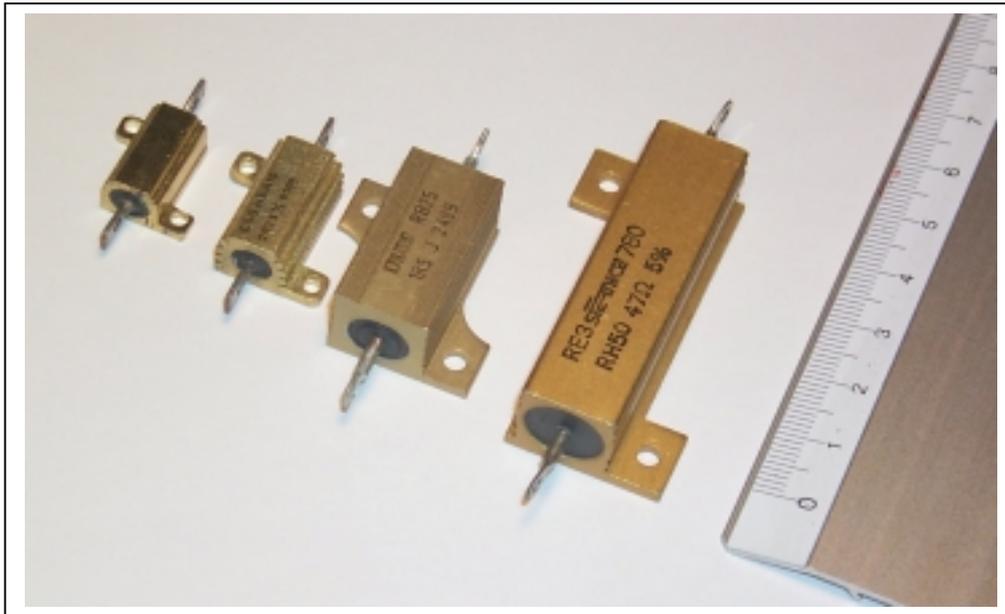
Certaines techniques de bobinage permettent d'annuler ou de réduire l'effet inductif, citons le bobinage bifilaire, le bobinage croisé, le bobinage en méandre.

Les valeurs courantes vont de 0,1 à 22 kohms, la dissipation va de 1 à 250 Watts. Il existe aussi différents types de connexions : par fils à souder, par cosses à souder ou par cosses à visser. Sur certains modèles, le fil résistif est rendu visible et on peut utiliser un collier afin d'ajuster la résistance.

Les résistances bobinées sont , après les résistances à couche métallique, les plus utilisées.



- **Résistances bobinées isolées à boîtier métallique** : Il s'agit d'une résistance bobinée qui est placée dans un boîtier métallique et noyée dans celui-ci à l'aide d'un ciment réfractaire. Le corps en métal peut être fixé sur un refroidisseur ou simplement sur le châssis de l'équipement. Cela permet de dissiper la puissance par l'intermédiaire du châssis ou d'un refroidisseur. Sur la photo ci-dessous il y a des résistances de 5, 10, 25 et 50 Watts Valeurs courantes de 0,1 à 100 kohms, dissipation de 1 à 100 Watts.

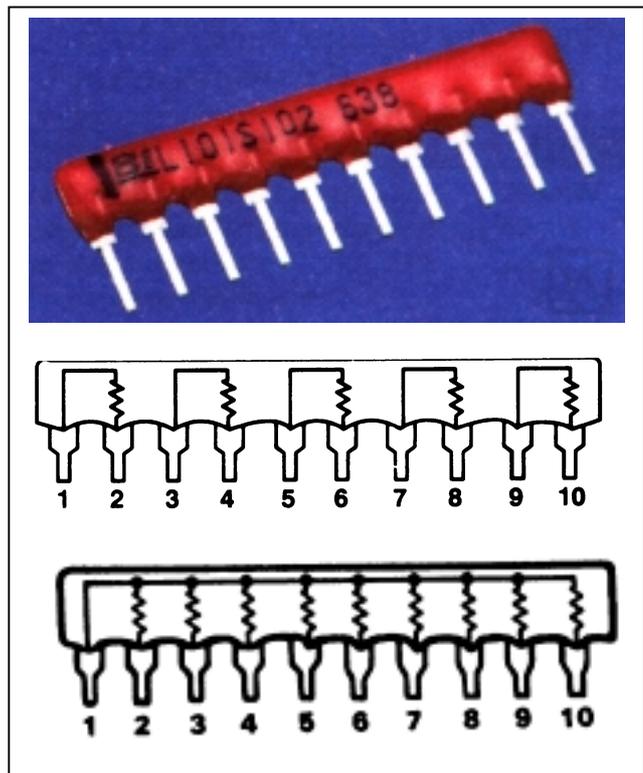


- **Résistances en film épais** : Sur de la céramique on peut déposer par métallisation une couche de nickel-chrome pour former des résistances.

La technologie des films épais offre une solution élégante pour faire des réseaux de résistance en boîtier SIL ("Single In Line package") au pas de 2,54 mm.

Ces résistances, sous forme de SIL, peuvent soit comporter des "n" résistances isolées les unes des autres, soit comporter "n" résistances ayant un point commun. Le nombre de résistances varie de 4 à 9 par SIL, par conséquent le nombre de "pattes" est aussi variable. Les valeurs vont de 10 ohms à 1 Mohms.

Ces résistances en boîtier SIL sont très intéressantes pour réaliser un convertisseur analogique/digital ou digital/analogique. D'autre part en informatique on utilise souvent des résistances de polarisations encore appelées "pull-up" qui servent à porter les lignes d'un bus vers un potentiel (souvent le +5 V).



Avec cette technologie on peut aussi réaliser des modules atténuateurs qui se présenteront sous forme d'une petite plaquette avec 3 ou 4 fils, la valeur de l'atténuation (0,1 à 25 dB), l'impédance nominale (50, 75, 150, 300 ou 600 ohms). L'avantage est que ces atténuateurs ont une très grande précision.

- **Résistances de 0 ohm** : Lorsqu'on fabrique des circuits imprimés (et notamment des circuits imprimés simple face) on est parfois obligé de mettre un petit bout de fil pour rejoindre deux points. Ce petit bout de fil est encore appelé "strap". Ceci est fort ennuyeux dans les chaînes de montages automatiques. Au lieu de mettre un "strap" on préfère donc mettre une résistance de très très faible valeur, voisine de 0 ohms.

- **Résistances CMS** : Au fait on devrait parler de technologie des CMS c.-à-d. des Composants à Montages de Surface (Surface Mounted Components ou SMC).

Depuis la glorieuse époque de l'avènement de la TSF (les années 1930) jusqu'en 1980 on a essentiellement utilisé des composants avec des fils. La technologie du circuit imprimé a perpétué cette habitude, jusqu'au moment où, d'une part à cause de la faible consommation des circuits, d'autre part à cause de la demande de réaliser des circuits de plus en plus denses (plus de composants / cm²) on est arrivé au concept des CMS qui pourrait se traduire en une phrase "**au lieu de faire des trous et de souder, soudons directement le composant sur les pistes**".

Les avantages des CMS sont les suivants:

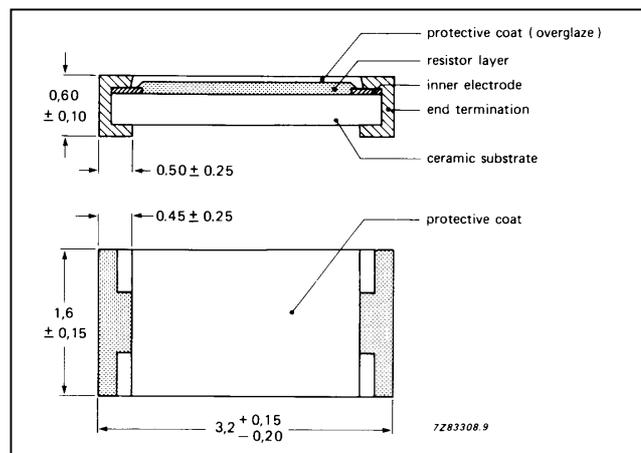
- plus de trous dans les circuits imprimés (un trou coûte environ 1 F, il y a en général un millier de trous sur une circuit imprimé de 100 x 160 mm !),
- plus besoin de plier fils,
- plus de déchet de fil (un déchet d'environ 3 cm par résistance !),
- moins de soudure (les surfaces à souder sont plus petites).
- grande densité de composants possible

Un inconvénient est que le montage pour des amateurs (entendez par là des amateurs d'électroniques et les radioamateurs qui bricolent ...) est moins facile. Le dépannage est aussi moins facile, mais l'expérience montre que ce ne sont en général pas les montages à CMS sont 10 x plus fiables que les autres ! Un autre inconvénient est qu'il faut quelques outils spéciaux (fer à souder; pincettes, grattoir, loupe ...), de la colle pour maintenir le CMS et une soudure spéciale.

En fait il existe non seulement des résistances CMS, mais aussi des condensateurs CMS, des selfs CMS, des diodes CMS, des transistors CMS, des circuits intégrés CMS, des circuits imprimés dessinés pour recevoir des composants CMS, etc ... c'est pourquoi on parle de "technologie des CMS".

Pour faire une résistance CMS on part d'un support en céramique, sur lequel on dépose un film métallique. Ce film est connecté à deux terminaisons.

Une résistance CMS est capable de dissiper 0,1 W et mesure 1,5 mm x 3 mm, parfois un peu moins. On trouve les valeurs de 1 ohm à 10 Mohm et aussi des jumpers ("0 ohm"). La série standard est la E24 (5%).



Les résistances CMS sont livrées

- sur un rouleau qui comporte une petite bulle de plastic, chaque "bulle" contient une résistance CMS. Cette présentation convient pour les chaînes de montage automatique.
- dans des boîtes de rangement en plastic, cette présentation convient pour les laboratoires de développement ou de dépannage.



Lors de l'assemblage automatique des circuits imprimés, les CMS reçoivent une toute petite goutte de colle en dessous du composant et deux petites gouttes de soudure en pâte sur les faces à souder. La machine spéciale met tous les composants en place. Le circuit imprimé garni de tous ses composants est légèrement chauffé (x °C). A ce stade la colle devient dure et maintient les composants en place. Il est encore possible à ce stade de modifier certaines petites erreurs. Ensuite on applique de l'air plus chaud (x °C) ce qui fait fondre la soudure.

1.5.2. Les résistances réglables

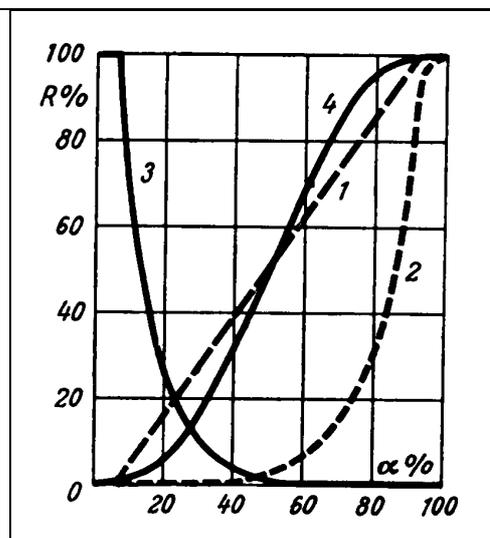
- **Potentiomètres au graphite** : La piste du potentiomètre peut être peinte ou moulée. L'épaisseur, la largeur ou la composition de la piste peut varier et modifier donc la loi de variation en fonction de l'angle.



La figure ci-contre montre les types de variations. On trouve des variations

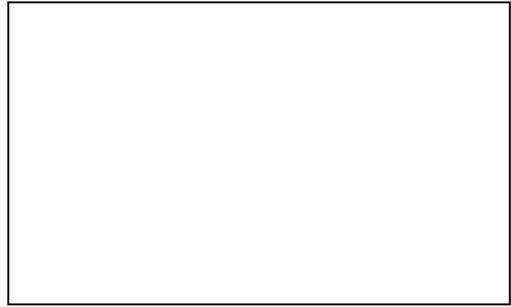
- **linéaire** (courbe 1), souvent repéré par une lettre **A**
- **logarithmique droite** (courbe 2) (c.-à-d. les plus utilisés), souvent repéré par une lettre **B**
- **logarithmique gauche** (courbe 3),
- **en S** (courbe 4).

On trouve des modèles normaux ronds (angle de rotation env. 300°) ou des modèles à glissière (principalement utilisés dans les pupitres de mixage audio), des boîtiers étanches ou non, des modèles simples ou doubles (pour la stéréo), des modèles avec ou sans interrupteur, différents types de connexions (à souder normales, pour circuit imprimé, à wire-wrap, ...). Les valeurs standards vont de 100 ohms à 4,7 Mohms.

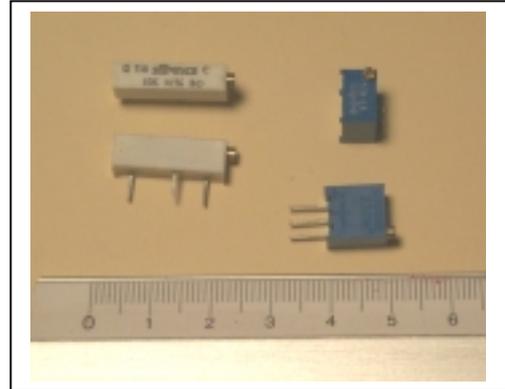


- **Potentiomètres hélicoïdaux multitours** : Dans certains cas un potentiomètre normal n'est pas assez précis pour faire le réglage souhaité. On utilise alors des potentiomètres avec une piste hélicoïdale, ce qui permet de faire 10 tours. Les potentiomètres hélicoïdaux sont principalement utilisés dans des appareils de mesures (oscilloscope, générateurs, alimentations, ...) ou pour fournir une tension à une varicap. Ils peuvent être équipés d'un vernier afin de repérer le réglage avec précision. La variation est toujours linéaire et une caractéristique supplémentaire est l'erreur maximum sur cette linéarité. Valeurs de 100 ohms à 100 kohms.

- **Potentiomètres d'ajustage à piste de carbone:** Ils sont principalement utilisés pour le réglage d'un montage en usine, en principe ils ne sont pas accessibles à l'utilisateur de l'équipement. Il existe différents modèles, ils sont destinés soit pour montage horizontal ou pour un montage vertical, et les connexions sont généralement au pas de 2,54 mm. Valeurs de 100 ohms à 2,2 Mohms, dissipation de 0,1 à 0,5 Watt.



- **Potentiomètre d'ajustage multitours (10 à 20 tours) :** Ils sont utilisés lorsque la précision de la position du curseur d'un potentiomètre d'ajustage normal (300° ou "1 tour") n'est plus suffisante. Ils sont également disponibles sous différents modèles : rectangulaire ou carré, pour montage vertical ou horizontal, les connexions généralement au pas de 2,54 mm. Les valeurs vont de 10 ohms à 2 Mohms, la dissipation va de 0,1 à 0,5 Watt.



- **Potentiomètres bobinés :** S'utilisent pour des dissipations variant de 2 à 500 Watts. Valeurs de 1 ohm à 200 kohms.
- **Rhéostats :** Ce sont des résistances bobinées ajustables principalement utilisées en "courant fort" pour contrôler les courants dans les inducteurs des machines électriques. Valeur de 0,1 ohm à 10 kohms, dissipation jusque 1kW.



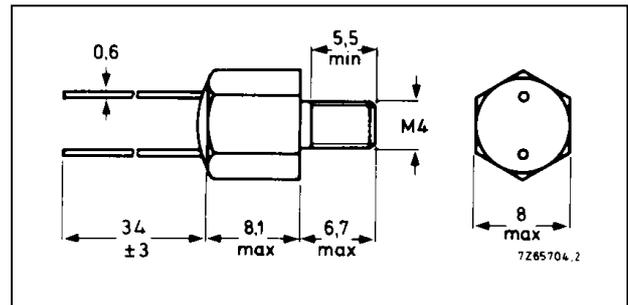
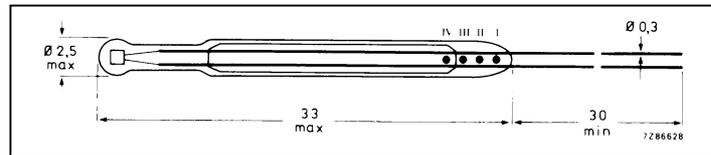
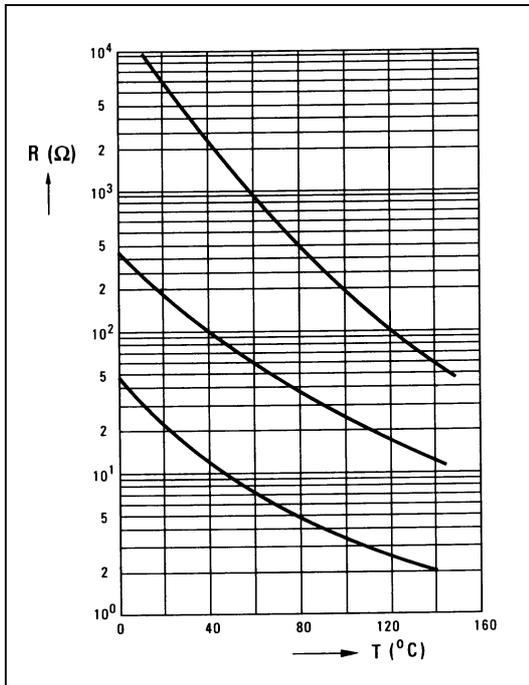
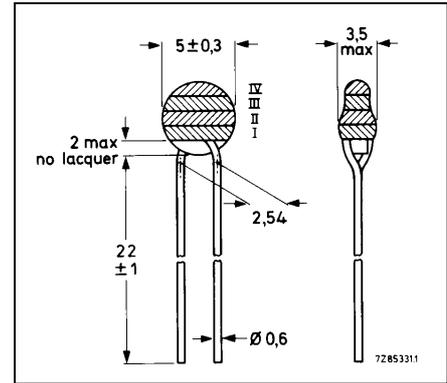
1.5.3. Les résistances spéciales

- **Thermistances ou résistances à coefficient de température négatif ou CTN** : Elles sont fabriquées avec des oxydes semi-conducteurs tels que Fe₂O₄, Fe₂O₃, NiO ou CoO. La relation entre la résistance d'une CTN et la température de la résistance CTN est approximativement $R = A e^{(B/T)}$ où A et B sont des constantes caractéristiques (voir figure) . On trouve des CTN sous différentes formes :

- disques,
- perles montées sous vide,
- perle isolée et montée sur boulon.

Les applications principales des CTN sont :

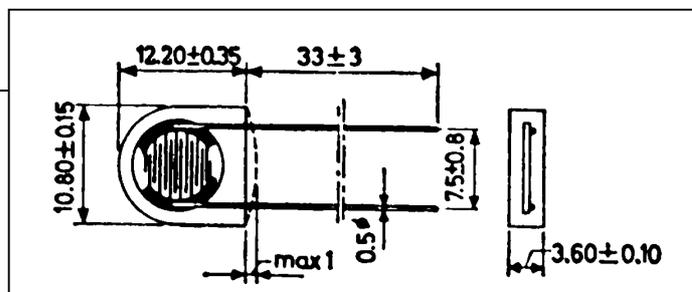
- limitations du courant de pointe pour une alimentation
- stabilisation de tension
- sonde thermométrique



- **Varistances ou VDR** : Ce sont des résistances pour lesquelles il existe une non-linéarité entre la résistance électrique et la tension appliquée. La relation entre le courant et la tension est de la forme $U = C I^B$. Les applications principales sont
 - protection contre les surtensions
 - stabilisation de tension
 - dilatation de l'échelle de lecture des appareils de mesure
- **Résistances à coefficient de température positif ou PTC** : Elles sont caractérisées par une variation très brutale de leur résistance à une température donnée. Elles peuvent être utilisées pour
 - dispositifs de protections contre les échauffements
 - varistances ou résistances VDR (Voltage Dependent Resistor) :

Elles se composent d'un agglomérats de cristaux de carbure de silicium. C'est une résistance dont la valeur dépend de la valeur de la tension électrique appliquée. La relation entre la tension et le courant est de la forme $V = C I \exp \alpha$. Elles se présentent sous formes de bâtonnets ou de disques.

- **Les photo résistances ou LDR** (Light Depending Resistors) : Ce sont des



résistances à base de sulfure de cadmium dont qui présentent une petite fenêtre transparente et dont la valeur varie en fonction de l'éclairement habituellement de 75 à 300 Ω pour 1000 lux à quelques 10 M Ω dans l'obscurité. Elles sont utilisées pour réaliser des automates d'éclairage. Les deux types les plus connus sont LDR03 et LDR05 qui ne diffèrent que par leurs fils de connexions.

- **Les ampoules d'éclairage en tant que résistance** : Dans certains cas on peut employer des ampoules d'éclairage comme résistances, par exemple pour tester une alimentation ou pour décharger une batterie. Il ne faut toutefois pas oublier que les ampoules à filament métallique ont un très fort coefficient de température et que l'appel de courant à la mise sous tension peut atteindre jusqu' à 10 x la valeur nominale du courant. Il peut dès lors être impossible de "charger" une alimentation en test au courant maximum, puisque l'enclenchement de la lampe provoque une pointe de courant que l'alimentation détecte et qui la met en position de sécurité. Par contre, si on utilise des ampoules à filament de carbone (ces ampoules se trouvent assez difficilement !), le coefficient de température est négatif et le phénomène est juste l'inverse !

- **Antennes fictives, charges et atténuateurs** : Pendant que l'on effectue des tests sur des émetteurs, il n'est pas souhaitable que la puissance HF soit envoyée "on the air". C'est pourquoi on remplace l'antenne par une résistance de 50 ohms appelée antenne fictive ou "charge" ("dummy load").

Comme il s'agit de "résistance", nous avons classé les antennes fictives et les atténuateurs dans cette partie du cours.

Ces charges peuvent supporter de 5 à 1000 Watts (voire beaucoup plus pour d'autres applications). Elles sont constituées d'une résistance à faible inductance et à faible capacité parasite, elles sont terminées par une fiche coaxiale normalisée (fiche UHF, type M ou type N) et sont munies d'un refroidisseur à ailettes afin d'évacuer la chaleur dégagée dans l'air ambiant. Pour faciliter l'évacuation de la chaleur, la résistance est parfois mise dans un bain d'huile, mais on peut aussi utiliser un ventilateur ou des moyens plus sophistiqués pour évacuer la chaleur. Sur la photo ci-contre il y a une charge de 1000 watts, avec wattmètre incorporé, et pouvant être utilisé jusqu'à 30 MHz et une autre charge pour 150 watts maximum. (La latte est de 30 cm)

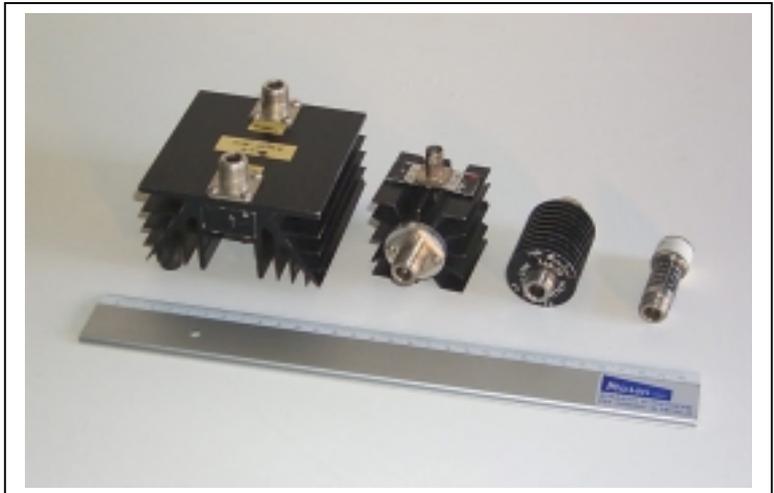


Enfin une variante de la charge est l'**atténuateur**, selon la même technique, on réalise un atténuateur (10 à 40 dB), ceci permet de récupérer une faible partie du signal pour le transmettre à un appareil de mesure (par exemple un fréquencemètre ou un analyseur de spectre).

Un atténuateur possède donc deux fiches coaxiales, alors qu'une simple charge n'en possède qu'une.

Sur la photo ci-contre

- un atténuateur 20 dB, qui peut dissiper au maximum 100 Watts et qui est prévu pour une plage de fréquences de 0 à 2 GHz
- un atténuateur de 20 dB, 12 watts , 2,5 GHz
- un atténuateur 10 dB, 20 Watts , 8 GHz
- un atténuateur 10 dB, 1 Watts, 13 GHz



1.6. Les résistances en alternatif - Effet de pelliculaire.

Enfin, lorsqu'une résistance est utilisée en haute fréquence, la distribution du courant à l'intérieur du conducteur n'est plus uniforme comme elle l'était en courant continu. La densité de courant (représenté par la lettre J) diminue de l'extérieur vers l'intérieur du conducteur, et la résistance du conducteur augmente c'est l' **effet pelliculaire** ("skin effect").

On peut déterminer une profondeur de pénétration qui serait l'épaisseur dans laquelle passerait la majorité (63 %) du courant. Pour un conducteur en cuivre, on peut calculer la profondeur de pénétration par la formule

$$\delta_{(\text{mm})} = 67 \sqrt{1 / f(\text{Hz})}$$

Calculons la profondeur de pénétration δ pour quelques fréquences...

fréquence	$\delta =$
50 Hz	9,5 mm
1 kHz	2,1 mm
100 kHz	0,21 mm
1 MHz	0,067 mm
10 MHz	0,0212 mm
30 MHz	0,0122 mm
144 MHz	$5,6 \cdot 10^{-3}$ mm
432 MHz	$3,2 \cdot 10^{-3}$ mm
1296 MHz	$1,8 \cdot 10^{-3}$ mm
2304 MHz	$1,4 \cdot 10^{-3}$ mm

pour rappel : 10^{-3} mm = 1 micron !

Pour le courant industriel à 50 Hz, l'effet de peau ne se manifestera que pour des diamètres de l'ordre de 2 x 9,5 mm. Donc en pratique l'effet de peau ne joue pas.

Donc si on mesure la valeur d'une résistance avec un ohmmètre en courant continu, cette valeur sera encore valable en 50 Hz, elle sera encore valable à 1 kHz et même à 100 kHz, mais au delà la résistance sera beaucoup plus grande.

Si on travaille dans les gammes des ondes moyennes aux ondes courtes (100 kHz à 30 MHz) et que l'on a des diamètres de conducteurs important (en d'autres termes si on travaille avec des puissances importantes c.-à-d. > 100 Watts), on peut enlever la partie intérieure de ces conducteurs puisqu'il n'y passe (presque) pas de courant. On travaille donc avec des tubes en cuivre !

Si on travaille en VHF-UHF-SHF, on peut diminuer la résistance des conducteurs, en déposant une couche d'argent de quelque 5 à 20 microns.

On peut réaliser des résistances qui peuvent couvrir le domaine des EHF.

1.7. Que faut-il connaître pour l'examen HAREC ?

Le programme HAREC prévoit les points suivants :

- l'unité : l'ohm
- résistance
- caractéristique courant/tension
- dissipation de puissance
- coefficient de température positif et négatif (PTC et CTN)

