

# LES RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES DE CHAUFFAGE

Par R. GAUTHERET

RÉSISTANCES MÉTALLIQUES  
ÉLÉMENTS PROTÉGÉS  
RÉSISTANCES NON MÉTALLIQUES

---

ÉDITÉ PAR  
LA SOCIÉTÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT  
DES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ APEL

# Les Résistances électriques de chauffage

Par R. GAUTHERET

---

Résistances métalliques  
Éléments protégés  
Résistances non métalliques

---

## SOMMAIRE

---

	Pages
Principes du chauffage par résistance .....	3
Qualités optima des résistances .....	7
Classification des résistances .....	19
<b>A. Résistances métalliques</b>	
<i>a)</i> Alliages « Nickel-Chrome » .....	11
1° Eléments nus .....	16
2° Eléments protégés .....	22
<i>b)</i> Alliages « Fer-Chrome-Aluminium ».....	44
<i>c)</i> Métaux spéciaux .....	50
<b>B. Résistances non métalliques</b>	
<i>a)</i> Carbone, graphite .....	54
<i>b)</i> Carbure de silicium .....	64
<b>Conclusion</b>	
	80



LES progrès essentiels qui ont rendu possible, maintenu, puis accru le développement du chauffage électrique par résistance dans l'industrie sont les suivants :

1° Elaboration des alliages de la famille des « nickel-chrome » et notamment des alliages binaires à 80 p. 100 de nickel et 20 p. 100 de chrome ;

2° Elaboration et mise au point des alliages ternaires « fer-chrome-aluminium » ;

3° Création et mise au point des éléments protégés et particulièrement des éléments blindés ;

4° Mise au point des résistances non métalliques en graphite ou en carbure de silicium.

### Principes sur lesquels repose le chauffage électrique par résistance.

Les appareils électrothermiques « à résistances » sont basés sur la *loi de Joule*. Celle-ci peut être considérée, d'une certaine façon, comme dérivée de la *loi d'Ohm*. Ces deux lois de l'électricité sont élémentaires, simples, très connues. Ce double caractère de simplicité et d'universalité a une conséquence presque inévitable : les lois précédentes sont souvent très mal appliquées. Il est donc nécessaire de les rappeler.

#### Loi d'Ohm.

Il existe plusieurs façons de la présenter. Retenons les suivantes, utiles pour les usagers des appareils électrothermiques :

Si l'on applique aux extrémités d'un conducteur AB (fig. 1-a) de résistance R, une tension U, ce conducteur sera parcouru par un courant d'intensité I et l'on aura la relation :

$$U = RI$$

volts ohms ampères

Si un conducteur de résistance R est parcouru par un courant I, la différence de potentiel entre ses extrémités A et B sera égale à :  $U = RI$ .

La chute de tension U dans un conducteur AB parcouru par un courant I a pour valeur :  $U = RI$ .

Ces formes différentes d'une même loi supposent toutefois qu'il n'y a aucun générateur de force électromotrice ou contre-électromotrice (dynamo, moteur, etc.), dans le circuit AB.



### Résistance et résistivité.

La résistance  $R$  du conducteur  $AB$ , de longueur  $l$  et de section uniforme  $s$ , est donnée par la relation :

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

les unités étant par exemple les suivantes :

$R$  en ohms ;

$l$  en centimètres ;

$s$  en centimètres carrés ;

$\rho$  en ohms par centimètre et centimètre carré ;

$\rho$  n'est autre que la résistance d'un conducteur de même nature que  $AB$ , mais de longueur et de section égales respectivement à l'unité de longueur et à l'unité de section adoptées. Cette grandeur  $\rho$  est appelée « *résistivité* ». Elle dépend de la nature du conducteur, supposé d'ailleurs homogène.

### Variation de la résistance en fonction de la température.

Pratiquement, la loi de variation de la résistance — ou plutôt de la résistivité (résistance spécifique) — en fonction de la température, est la suivante :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t) \text{ avec } \begin{cases} \rho_t = \text{résistivité à la température } t \\ \rho_0 = \text{résistivité à la température } 0 \end{cases}$$

Le coefficient de température  $\alpha$  peut être positif (résistances métalliques ordinaires employées dans les fours électriques), nul (constantan par ex.) ou négatif (carbone par ex.).

### Lois des circuits dérivés (lois de Kirchhoff).

Dans les cas de deux conducteurs (fig. 1-b), on a :

$$I = i_1 + i_2$$

$$U = r_1 i_1 = r_2 i_2$$

Dans le cas de plusieurs conducteurs (fig. 1-b), on a :

$$I = i_1 + i_2 + i_3 + \dots$$

$$U = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3 = \dots$$

Si on désigne par  $R$  la résistance équivalente de l'ensemble des résistances,  $r_1, r_2, r_3, \dots$ , c'est-à-dire telle que l'on ait :  $U = RI$ , on trouve facilement que :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots ;$$

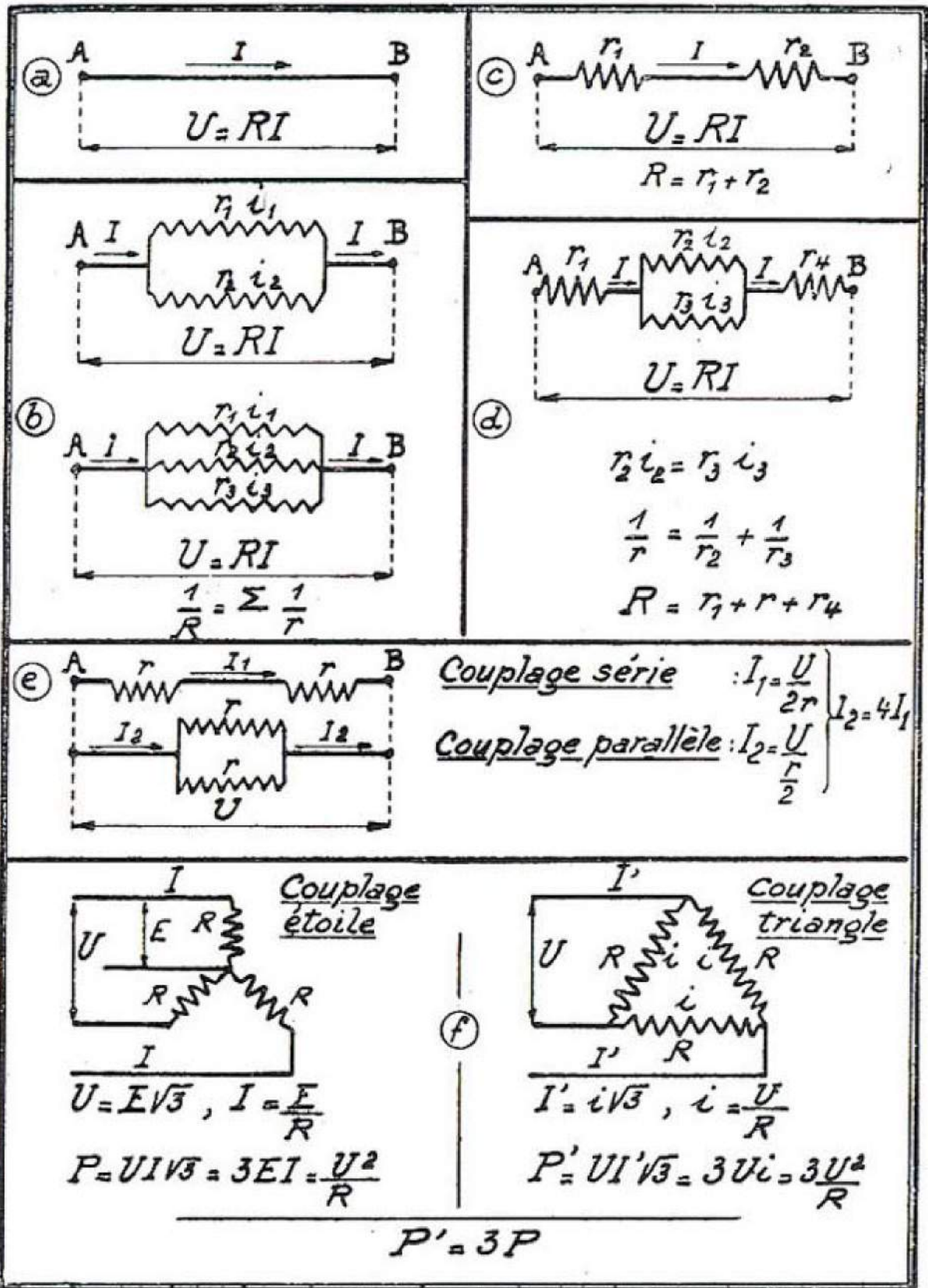


Fig. 1.



donc la *conductance* (inverse de la résistance) du conducteur unique équivalant à un groupe de conducteurs dérivés, est égale à la somme des conductances de chacun des conducteurs.

En particulier, si toutes les résistances  $r_1, r_2, \dots, r_n$  des  $n$  conducteurs sont égales à  $r$ , on a :

$$R = \frac{r}{n}$$

la résistance de l'ensemble est  $n$  fois plus petite que celle d'une résistance.

#### Groupements des conducteurs.

**Couplage en tension ou en série.** — La résistance  $R$  du conducteur AB est égale à la somme des résistances  $r_1, r_2, \dots$  des conducteurs partiels (fig. 1-c).

$$R = r_1 + r_2 + \dots \text{ et } I = \frac{U}{R}$$

**Couplage en dérivation ou en parallèle.** — L'inverse de la résistance équivalente est égale à la somme des inverses des résistances composantes (fig. 1-b).

**Couplage mixte.** — Combinaison des deux couplages précédents (exemple fig. 1-d).

**Couplage série-parallèle.** — Dans les appareils électrothermiques on utilise souvent le couplage série-parallèle qui, par la manœuvre d'un commutateur approprié, permet de faire varier la puissance en jeu dans le rapport de 1 à 4 (fig. 1-e).

**Couplage étoile-triangle.** — Dans les appareils destinés à être alimentés en courant alternatif triphasé, on réalise fréquemment le couplage étoile-triangle, un commutateur convenable permettant de passer du couplage étoile au couplage triangle, et par suite de faire varier la puissance dans le rapport de 1 à 3 (fig. 1-f).

#### Loi de Joule.

Cette loi est relative à la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique.

La puissance est donnée par la relation suivante :

$$P = U \cdot I$$

watts    volts    ampères

L'énergie électrique mise en jeu pendant le temps  $t$  dans un conducteur AB parcouru par un courant constant  $I$ , la tension entre A et B étant  $U$ , a pour valeur :

$$W = Pt = UI t$$



Or, si R est constant, on a :  $U = RI$  (loi d'Ohm).  
D'où

$$P = RI^2$$

watts      ohms ampères

et

$$W = R I^2 t$$

joules      ohms      ampères      secondes

Cette énergie  $W$  se transforme (évitons de dire « se dégrade », car il s'agit ici d'une transformation *voulue, utile*) en chaleur qui échauffe le conducteur AB. La quantité de chaleur ainsi dégagée a pour valeur :

$$Q = 0,24 W = 0,24 R I^2 t$$

petites calories      joules      ohms ampères secondes

Les formules précédentes peuvent en définitive se mettre sous plusieurs formes qu'il est utile de connaître :

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

$$\text{Energie} = W = Pt = UI t = RI^2 t = \frac{U^2}{R} t$$

Remarquons que l'énergie électrique est enregistrée par des compteurs et évaluée en watts-heures ou en multiples de cette unité.

$$W = U I t$$

watts-heures      volts ampères heures

En particulier, on a l'équivalence suivante :

1 kilowatt-heure (kWh) donne 3 600 joules ou 862 grandes calories

C'est sur cet « effet Joule » que sont précisément basés les appareils de chauffage électrique dits « à résistances ».

La fig. 2 donne la valeur de la puissance  $P$  pour les cas d'alimentation les plus courants.

### Qualités optima des résistances.

Pour pouvoir être utilisée comme élément chauffant, une substance donnée doit satisfaire à plusieurs conditions plus ou moins importantes, conditions d'ordre physique, d'ordre chimique, d'ordre économique :

La *résistivité*  $\rho$  doit être relativement élevée afin de limiter l'intensité à une valeur raisonnable et de réduire les dimensions du corps de chauffe.

Le *coefficient de température*  $\alpha$  doit être faible, positif si possible et sensiblement constant pour toute l'échelle d'utilisation du four, notamment afin de supprimer ou d'atténuer les variations importantes d'intensité et de faciliter le réglage.

La *température de ramollissement*, et *a fortiori*, la *température de fusion*, doivent être très supérieures à la température maximum atteinte lors de la marche normale du four afin d'éviter la destruction des éléments par fusion ou court-circuit (cas des boudins métalliques par exemple).

La *résistance mécanique* de l'élément chauffant doit être suffisante, non seulement au moment de la pose, mais encore en tous temps, notamment après une assez longue durée de service, et lorsque l'élément atteint sa température maximum. Il ne doit pas y avoir de déformation sensible, même en fonctionnement discontinu avec variations plus ou moins rapides de température (dilatations et contractions successives). L'élément doit résister aux chocs et aux vibrations.

La substance doit être *homogène*, facile à obtenir, toujours identique à elle-même et à travailler (formes diverses permettant d'épouser les surfaces les plus variées et d'obtenir la répartition voulue de la chaleur ; éventuellement, soudabilité facile). Sa structure doit être permanente, jusqu'à la température d'utilisation (pas de désagrégation).

Le *coefficient de dilatation* doit être faible.

La *conductibilité thermique* doit être faible, pour éviter les pertes de chaleur aux extrémités et faciliter l'établissement des entrées et des sorties de courant. Il doit en être de même de la *capacité calorifique*.

La substance doit résister aux *agents extérieurs* (en particulier, résistance à l'oxydation), gaz formant l'atmosphère naturelle ou artificielle d'un four ou provenant des corps en traitement, matière constituant les supports du corps de chauffe, etc.

Les éléments doivent avoir une *longue durée de service*.

Ils doivent être d'un *prix raisonnable*.

Les qualités précédentes ne sont pas limitatives. Le choix du matériau à employer nécessite une *grande expérience de la part des constructeurs* ; il en est d'ailleurs de même du choix des réfractaires, de la disposition des éléments chauffants, etc.





Valeur de la puissance d'un appareil électrothermique


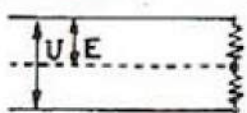
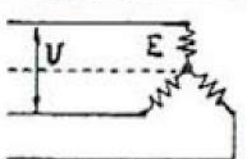
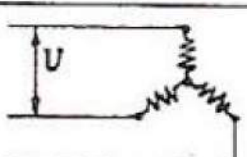
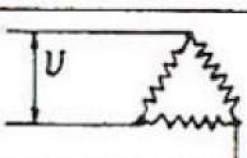
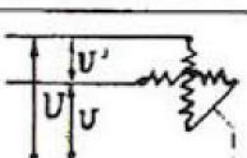
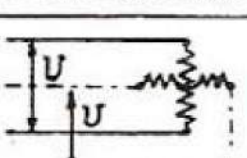
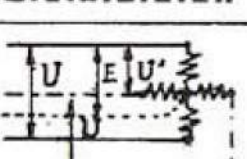
Designation	Nbre de fils	Schema d'alimentation	Tension	Puissance
Courant continu ou courant alternatif monophasé	2		$U$	$P = UI$
Courant continu ou courant alternatif monophasé	3		$U = 2E$	$P = UI = 2EI$
Courant alternatif triphasé avec neutre (étoile)	4		$U = E\sqrt{3}$	$P = UI\sqrt{3} = 3EI$
Courant alternatif triphasé sans neutre (étoile)	3		$U = E\sqrt{3}$	$P = UI\sqrt{3}$
Courant alternatif triphasé (triangle)	3		$U$	$P = UI\sqrt{3}$
Courant alternatif diphasé (3 fils)	3		$U = U'\sqrt{2}$	$P = 2U'I$
Courant alternatif diphasé (4 fils) sans neutre	4		$U$	$P = 2UI$
Courant alternatif diphasé (5 fils) avec neutre	5		$U = 2E$ $U' = E\sqrt{2}$	$P = 2UI = 4EI$
$U, E, U' =$ Tension		$I =$ Intensité	$P =$ Puissance	

Fig. 2.



*En résumé* : les qualités essentielles que l'on demande aux matières destinées à la fabrication des éléments chauffants sont les suivantes :

- Résistivité relativement élevée;
- Coefficient de température faible et sensiblement constant;
- Inoxydabilité;
- Points de ramollissement et de fusion élevés;
- Travail facile, grande souplesse d'emploi.

### **Classification des résistances.**

On peut distinguer : les *résistances métalliques* (nues ou protégées) et les *résistances non métalliques* (1).

#### **A. RÉSISTANCES MÉTALLIQUES**

On a employé autrefois et on continue à employer dans des cas exceptionnels :

soit des métaux communs (fer, fonte, cuivre) pour les faibles températures ;

soit des alliages à base de fer et de nickel (éventuellement avec addition de chrome ; ex. : chromin) ou de cuivre et de nickel (alliages à très faible coefficient de température, donc à résistivité considérée comme de valeur sensiblement constante; ex. : constantan, etc...) pour des températures pouvant atteindre en général 500° C au maximum.

Pratiquement, on emploie surtout :

1° Pour les températures atteignant au maximum 1 000 à 1 100° C des alliages à base de nickel et de chrome ;

2° Pour les températures de l'ordre de 1 000 à 1 280-1 300° C, des alliages à base de fer, de chrome et d'aluminium ;

3° Pour des températures plus élevées (et également à partir de 1 000° C) des métaux spéciaux (ex. : tungstène, molybdène, platine).

**Remarque.** — Deux températures ou plus exactement deux plages de température délimitent les diverses catégories de fours électriques à résistances :

Jusqu'à 500° C et même 540° C, on peut construire des moufles métalliques, car il n'y a pas lieu en principe de craindre l'oxydation à ces températures ou à des températures inférieures.

(1) Nous laisserons de côté le cas où la substance à traiter constitue elle-même la résistance traversée par le courant (four à bain de sels à électrodes, four de graphitisation, etc.).

A partir de 500-540° C. il faut construire les parois intérieures en matières réfractaires.

Au-dessus de 1 000-1 300° C. on a recours soit à des résistances non métalliques (cas le plus fréquent jusqu'à maintenant), soit à des résistances métalliques spéciales (tungstène, molybdène), soit à des fours à bain de sels à chauffage direct (fours à électrodes).

### a) **Alliages « nickel-chrome »**

#### **Nature.**

Ces alliages sont obtenus au four électrique : élaboration au four à arc ou au four à induction à haute fréquence, traitements thermiques au four à résistance en atmosphère spéciale. Ils sont de beaucoup les plus utilisés.

On distingue :

1° Les *alliages à faible teneur* ou *alliages ternaires de fer, nickel et chrome*, pour lesquels la proportion des constituants peut être très variable, par exemple de 30 à 60 p. 100 pour Ni, 30 à 50 p. 100 pour Fe, 10 à 20 p. 100 pour Cr et jusqu'à 2 p. 100 pour Mn.

Pratiquement, ces alliages sont utilisés pour des températures inférieures à 900° C. généralement même sensiblement inférieures à cette valeur.

2° Les *alliages à forte teneur* ou *alliages binaires de nickel et de chrome* qui contiennent sensiblement 80 p. 100 de Ni et 20 p. 100 de Cr, métaux auxquels il y a lieu d'ajouter quelques autres corps (2 p. 100 au maximum) : Mn et Mg (qui, en faible proportion, facilitent le laminage et le tréfilage), Si, C, Fe.

Ces alliages peuvent être utilisés jusqu'à 1 100° C, voire même 1 150° C ou 1 200° C (à l'abri de l'air et sur des supports convenables) : mais généralement on en limite l'emploi aux environs de 950-1 000° C. A vrai dire, la température d'utilisation dépend de la section et les résistances de fortes sections, alimentées sous des tensions peu élevées, tiennent parfaitement à 1 100° C.

**Remarque I.** -- Quand il est chauffé à l'air, l'alliage Ni-Cr se recouvre d'une pellicule d'oxyde qui assure une certaine auto-protection de l'alliage contre l'oxydation ultérieure et qui a sensiblement le même coefficient de dilatation que l'alliage : cette pellicule très adhérente est solide et durable. La protection contre l'oxydation est d'autant plus grande que l'alliage contient plus de chrome. (Des essais ont montré que, pour être protectrice, la pellicule d'oxyde devait contenir au moins 50 p. 100 d'oxyde de chrome). L'oxydation étant d'autant plus active que la température est plus élevée, l'alliage devra donc contenir



davantage de chrome si la température d'emploi est plus grande. Pratiquement, on limite le pourcentage de chrome à 20, pour des raisons de facilité de travail de l'alliage et de prix et parce que l'alliage à 80/20 répond parfaitement aux besoins de la pratique industrielle pour des températures de traitement jusqu'à 1 000° C.

La résistance à l'oxydation des alliages ternaires qui contiennent du fer est moins grande parce que la couche d'oxyde est moins adhérente que pour les alliages binaires Ni-Cr et que, de plus, la présence d'oxyde de fer dans la pellicule protectrice la rend moins imperméable à l'oxygène.

La nature du support peut jouer un rôle important : c'est ainsi que des réfractaires contenant des alcalis peuvent donner naissance à des chromates, d'où attaque de la pellicule d'oxyde.

**Remarque II.** — L'addition de fer conduit en principe à un prix de revient plus bas, une résistivité et un coefficient de température plus élevés, et, comme il vient d'être dit, une moindre résistance à l'oxydation.

**Remarque III.** — Par suite de la pénurie de certains métaux et notamment du nickel pendant la guerre, des règles particulières ont été édictées concernant l'emploi des « nickel-chrome ». Ces alliages ont été groupés en cinq classes et les applications en ont été rigoureusement précisées.

Ces règles sont encore en vigueur, mais il semble certain qu'on abandonnera la fabrication de certaines nuances d'alliages et que l'on reviendra à la plupart des alliages d'avant guerre dès que les circonstances le permettront. Il nous paraît donc inutile d'insister sur ces « alliages de remplacement », dont quelques-uns se sont cependant révélés intéressants à l'usage.

### Caractéristiques.

Le tableau I donne les caractéristiques d'un certain nombre de métaux et des alliages ou autres substances utilisés comme « résistances ».

Il est complété par les tableaux II et III et par les courbes de la fig. 3, tableaux et courbes figurant à titre d'exemples.

Les données essentielles pour les « nickel-chrome » à 80/20 sont les suivantes :

Densité de l'ordre de 8 à 8,5 ;

Résistivité (résistance spécifique  $\rho$ ) élevée, de l'ordre de 1 à 1,1 ohm par mètre linéaire et par millimètre carré de section, soit 100 à 110  $\Omega \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^2$  ;

Coefficient de température  $\alpha$  moyen positif et de faible valeur : de l'ordre de 0,0001 (ou moindre) pour la zone habituelle d'utilisation (0 à 1 000° C) ; la variation de  $\rho$  avec la tempéra-



Tableau I

Designation	Composition de l'alliage p. 100	Résistivité $\rho$ au voisinage de 0-20° C $\Omega \cdot m \cdot m^2/m$	Densité	Température de fusion °C	Coefficient de temp. moyen $\alpha$ entre 0 et les val. usuelles de la temp.
Argent .....		0,01561	10,50	960	4,0 $10^{-3}$
Cuivre .....		0,01468	8,92	1 080	4,2 —
Aluminium ....		0,0256	2,56	650	4,2 —
Zinc .....		0,0575	7,10	412	4,0 —
Fer .....		0,0907	7,84	1 575	6,2 —
Nickel .....		0,1232	8,90	1 452	6,0 —
Platine .....		0,1092	21,50	1 755	3,67 —
Tungstène ....		0,055	18,70	2 974	4,5 —
Molybdène ....		0,057	19,01	2 550	3,3 —
Laiton .....	60 Cu + 5-10 Ni Zn	0,0697	6,40-7,30		
Maillechort ...	env. 82-84 Cu + 4 Ni + 12 Mn	0,30 (1)	8,30-8,60	1 000	2,7 $10^{-4}$
Manganin ....	env. 30 Ni + 5 Cr + 65 Fe	0,40-0,42	8,15	960	0,2 — (2)
Chromin .....	env. 35 Ni + 10 Cr + Fe	0,95	7,96	1 415	6,2 —
RNC 1 .....	env. 45 Ni + 23 Cr + Fe	1,00	8,05	1 450	3,2 —
NYO .....	env. 60 Ni + 11 Cr Fe	1,09			1,8 —
RNC 2 .....	env. 60 Ni + 15 Cr + 25 Fe	1,11	8,25	1 450	1,2 —
Tophet C .....	env. 60 Ni + 16 Cr + 23 Fe	1,12	8,20	1 350	1,3 —
Chromel C .....	env. 65 Ni + 15 Cr + 20 Fe	1,12	8,24	1 405	1,5 —
Glowray .....	env. 60 Ni + 15 Cr + Fe	1,06	8,27	1 400	1,4 —
Nichrome .....	env. 70 Ni + 20 Cr + 8 Fe	1,12	8,25	1 350	1,7 —
BS Cr/Ni/Fe ..	env. 75 Ni + 23 Cr	1,11	8,27	1 395	1,1 —
NYS .....	env. 77 Ni + 20 Cr + 2 Mn	1,12			0,75 —
BS Cr/Ni .....	env. 80 Ni + 20 Cr	1,10	8,39	1 405	0,9 —
Nichrome V ..	env. 80 Ni + 18 Cr	1,08	8,41	1 400	1,3 —
RNC 3 .....	env. 82 Ni + 14 Cr	1,02	8,45	1 475	0,6 —
Uranus 1 .....	env. 80 Ni + 20 Cr	1,00	8,50	1 450	1,9 —
Trophet A .....	env. 80 Ni + 20 Cr	1,08	8,42	1 390	1,0 —
Chromel A ..	env. 80 Ni + 20 Cr	1,08	8,40	1 405	0,8 —
Brightray ....	sans fer	1,03	8,35	1 375	0,5 —
Cekas II .....	Fe + Cr + Al	1,00	8,45	1 400	0,6 —
RCA 33 .....	Fe + Cr + Al	1,38	7,20	1 500	0,5 —
RCA 44 .....	68-69 Fe + 23-24 Cr	1,40	7,10	1 500	0,6 —
Kanthal A <sub>1</sub> ...	5,5-6 Al + 1,5 Co + divers				
	70-71 Fe + 22-23 Cr	1,45	7,10	1 530-	0,62 —
Kanthal A ...	+ 4,5 Al + 1 Co + divers			1 540	
	72-73 Fe + 21-22 Cr	1,39	7,15	1 530-	0,46 —
Kanthal D ...	+ 4 Al + 0,7 Co + divers			1 540	
	env. 65 Fe + 30 Cr + 5 Al	1,35	7,25	1 530-	0,46 —
	Fe + Cr + Al			1 540	
Mégapyr .....		1,44	7,10		0,3 —
Cekas-extra ..		1,40	7,00		0,3 —
Charbon lamp. incandescence		39			
Carbone amorp.		70 à 80	80 à 2,25		- 2 à - - 4
Graphite ....		10 à 11	densité réelle)		
Carbure de silicium ....		900 à 1 000	2,2		

N. B. — Certaines grandeurs qui figurent dans ce tableau, ne sont pas connues avec précision. Nous les donnons cependant à titre indicatif. D'une manière générale, les nombres donnés sont des valeurs moyennes.

Se reporter à la note annexe, page 80, pour les alliages de remplacement.

(1)  $\rho = Ni \% + 12$ ;  $\rho = 16$  à 42 pour les maillechorts courants; ( $\rho_0$ ) est sensiblement constant (= 0,0092-0,0097).

(2) Très faible; peut devenir négatif pour certains états.

Tableau II

Diam- mètre mm	Section mm <sup>2</sup>	Poids par mètre g	Long. par kg m	Résistance en ohms pour 100 m			
				0° C	300° C	600° C	1 000° C
<i>Alliage = env. 35 Ni + 10 Cr + 55 Fe</i> (température limite 700°)							
1,10	0,007854	0,0632	15 822	12 700	14 240	15 310	
0,50	0,1963	1,5802	632	510	570	615	
1	0,7854	6,322	158	126	140	152	
1,5	1,7671	14,225	70,3	56,4	63,6	68,8	
2	3,1416	25,289	30,5	31,7	35,6	38,5	
2,5	4,9087	39,525	25,3	20,2	22,6	24,6	
3	7,0686	56,913	17,5	14	15,8	17,2	
4	12,5664	101,228	9,83	7,9	8,9	9,6	
5	19,6349	158,021	6,32	5,10	5,7	6,15	
<i>Alliage = env. 60 Ni + 11 Cr + 29 Fe</i> (température limite 1 000°)							
0,10	0,007854	0,06479	15 434	14 130	14 830	15 368	15 760
0,50	0,1963	1,6194	617	565	594	615	631
1	0,7854	6,479	154,34	141	148	153	157
1,5	1,7671	14,578	68,63	62,8	65,9	68,3	70
2	3,1416	25,918	38,59	35,3	37,07	38,4	39,4
2,5	4,9087	40,507	24,69	22,6	23,7	24,6	25,2
3	7,0686	58,327	17,14	15,7	16,4	17	17,5
4	12,5664	103,70	9,64	8,82	9,26	9,5	9,85
5	19,6349	161,94	6,17	5,65	5,94	6,13	6,31
<i>Alliage = env. 80 Ni + 18 Cr</i> (température limite 1 100°)							
0,10	0,007854	0,06636	15 069	12 987	13 398	13 643	13 916
0,50	0,1963	1,8591	603	519	536	546	553
1	0,7854	6,637	151	130	134	136	133
1,5	1,7671	14,932	67	57,7	59,5	60,6	61,5
2	3,1416	26,546	37,7	32,5	33,5	34,1	34,6
2,5	4,9087	41,478	24,1	20,8	21,4	21,8	22,1
3	7,0636	59,730	16,74	14,4	14,9	15,2	15,4
4	12,5664	106,186	9,42	8,12	8,37	8,53	8,64
5	19,6349	165,915	6,03	5,19	5,36	5,46	5,53



ture étant faible, on peut utiliser les « nickel-chrome » à tension constante, sans être astreint à recourir à un dispositif de régulation (démarrreur) comme ce serait le cas avec l'alliage / de la fig. 3 par exemple.

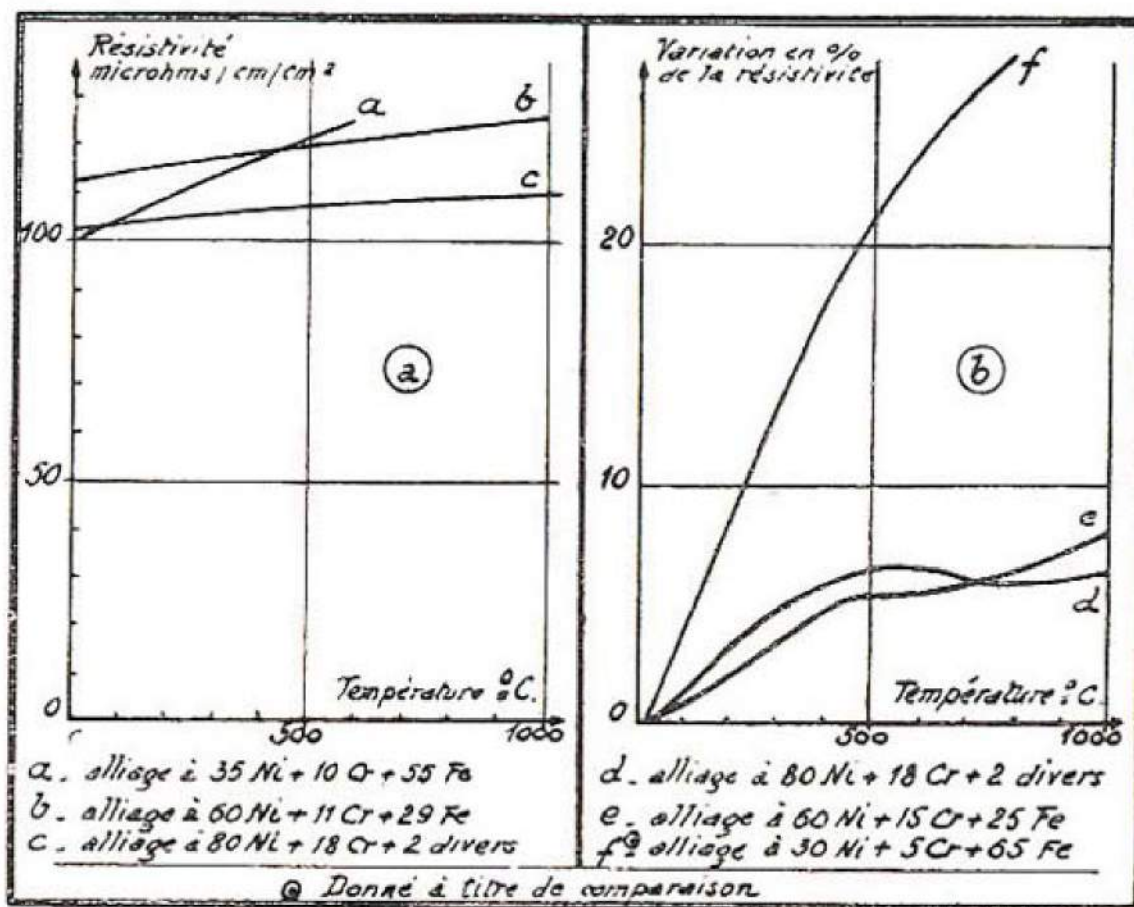


Fig. 3.

Température de ramollissement vers 1 300° C ;

Température de fusion de 1 350 à 1 450° C ;

Température maximum d'utilisation (pour les nickel-chrome à 80/20) de 1 000°, voire 1 100° C.

Les autres caractéristiques (en particulier le coefficient de dilatation) intéressent surtout les constructeurs.

#### Forme.

On emploie le plus souvent des fils ronds, des rubans ou des bandes.

Le choix du constructeur dépend d'un grand nombre de considérations d'ordre technique ou économique qui, bien souvent, sont multiples, complexes et parfois contradictoires. Il importe donc de faire un compromis entre les diverses conditions en présence.



Tableau III

Propriété	Alliage		
	35 Ni+10 Cr+55 Fe	50 Ni+11 Cr+29 Fe	80 Ni+20 Cr
Résistivité à 15° C .....	100 $\mu\Omega$ : cm : cm <sup>2</sup>	111 $\mu\Omega$ : cm : cm <sup>2</sup>	102 $\mu\Omega$ : cm : cm <sup>2</sup>
Coefficient de température (valeur moyenne de $\alpha$ entre 0 et 800° C) .....	0,30-0,35.10 <sup>-3</sup>	0,10-0,15.10 <sup>-3</sup>	0,05-0,08.10 <sup>-3</sup>
Point de Curie (disparition du magnétisme) .....	150° C	100° C	amagnétique
Densité .....	8,05	8,25	8,45
Coefficient de dilatation (valeur moyenne de 0 à 800° C) .....	15.10 <sup>-6</sup>	15,5.10 <sup>-6</sup>	17.10 <sup>-6</sup>
Charge de rupture .....	65-70 kg : mm <sup>2</sup>	70-75 kg : mm <sup>2</sup>	70-75 kg : mm <sup>2</sup>
Limite élastique .....	35-40 kg : mm <sup>2</sup>	40-45 kg : mm <sup>2</sup>	40-45 kg : mm <sup>2</sup>
Allongement .....	35-40 p. 100	32-35 p. 100	35-40 p. 100
Module d'élasticité :			
{ à la traction .....	18 500 kg : mm <sup>2</sup>	20 000 kg : mm <sup>2</sup>	21 500 kg : mm <sup>2</sup>
} à la torsion .....	7 000 kg : mm <sup>2</sup>	7 600 kg : mm <sup>2</sup>	8 000 kg : mm <sup>2</sup>
Point de fusion .....	1 450° C	1 450° C	1 475° C
Température limite d'emploi .....	600-700° C	900-1 000° C	1 100-1 200° C

Pour fixer les idées, les principaux facteurs à considérer sont les suivants :

puissance électrique nécessaire ;

volume de la chambre de chauffe ;

volume ou surface disponible pour loger les éléments chauffants (facilité d'installation et de remplacement ; position : sole, voûte, piédroit, portes) ;

nature du courant d'alimentation (continu ou alternatif : mono, tri ou diphasé) avec obligation ou non d'équilibrer les charges ;

tension d'alimentation ;

puissance maximum fournie par le Secteur (en particulier, horaire d'utilisation permettant d'obtenir un prix de courant plus favorable) ;

nature du traitement à effectuer : protection des éléments contre les chocs ou contre les gaz ou vapeurs, répartition de la chaleur dans la chambre de chauffe ;

température : valeur, précision demandée, variation pendant la durée du traitement (choix du mode de transmission de la chaleur : radiation, convection naturelle ou forcée ; choix du mode de réglage : répartition, division et couplage des éléments) ;

résistance mécanique des fils et rubans ;

remplacement éventuel des éléments ;

prix de revient des éléments ;

tous facteurs qui, par suite de leur interdépendance, échappent à une classification raisonnée et facile.

Un fil rond (à section égale), offre à l'oxydation une surface extérieure minimum.

Le ruban de la bande présente une surface d'autant plus grande (à section égale) que son épaisseur est plus petite et que sa largeur est plus grande. Toutefois, l'oxydation est peu importante ou négligeable aux températures usuelles et pour les atmosphères habituelles (surtout s'il n'y a pas de modification d'atmosphère).

Pour les rubans minces, la résistance mécanique est moindre ; mais les irrégularités d'épaisseur peuvent provoquer des points chauds réduisant la longévité des résistances.

La chaleur utile émise par un élément chauffant dépend non seulement de la forme de cet élément (fil ou ruban) et de sa surface d'échange thermique, mais encore de sa disposition (par exemple les différentes spires d'un élément boudiné rayonnent les unes sur les autres et le constructeur de fours doit tenir compte de ce genre d'interférences).



## Modes d'emploi.

Les fils peuvent être employés (fig. A : 1), soit tendus, soit tissés (faibles températures, trame d'amiante), soit boudinés (cas le plus fréquent des fours). Ils peuvent être montés en éléments nus ou en éléments protégés.

Les bandes, barres et rubans de section rectangulaire et à bords généralement arrondis sont employés nus. Les rubans sont aussi utilisés en éléments protégés.

### 1° Eléments nus

Les éléments en fils boudinés sont le plus souvent placés dans des briques qui les enveloppent plus ou moins ou dans des pièces isolantes de formes appropriées ou montés sur des supports convenables. Dans certains cas, si le fil a une grosse section, il est disposé sous forme de tiges rectilignes ou d'épingles à cheveux.

Les rubans, bandes et barres s'emploient soit à plat, soit montés de champ sur des supports appropriés.

On a utilisé parfois des résistances moulées (en Ni-Cr à 80/20).

Les Ni-Cr sont peu fragiles, aussi bien à chaud qu'à froid, même après un chauffage prolongé à haute température. Ils peuvent être enroulés à froid sur des mandrins.

Le soudage peut être fait soit par soudure autogène (notamment pour les réparations des parties chauffantes), soit par soudure à l'étain et le brasage se fait à l'or, au maillechort ou au laiton.

Le grand domaine d'application des éléments nus est le four.

A ce sujet, il paraît nécessaire d'insister sur le point suivant :

La théorie des fours à résistances est extrêmement simple, en apparence tout au moins, mais la construction en est beaucoup plus délicate que d'aucuns le croient.

### Dimensions des éléments.

Les dimensions des résistances sont en principe les suivantes :

Fils :

Diamètre maximum : 8 mm.

Diamètre minimum : 0,08 mm.



Bandes (section rectangulaire) :

Largeur : de 5 à 80 mm.

Épaisseur : de 0,10 à 1 mm.

Les longueurs maxima dépendent des autres dimensions et peuvent varier de quelques m à quelques centaines de m.

Rubans (forme méplate à bords arrondis) :

Largeur courante : de 0,35 à 3,40 mm.

Épaisseur courante : de 0,05 à 0,90 mm.

Longueur correspondante : quelques centaines de m.

Section min. correspondante : 0,0314 mm<sup>2</sup>.

Section max. correspondante : 1,0410 mm<sup>2</sup>.

### **Durée des résistances.**

La longévité des éléments est une donnée capitale. L'incidence des frais d'entretien sur le bilan économique d'un appareil électro-thermique est, en général, négligeable. Encore faut-il que les résistances, qui en constituent une partie plus ou moins coûteuse, aient une longue durée.

Une résistance peut être détruite ou détériorée : soit par usure lente, soit par accident.

#### **1) Usure normale.**

Le nickel-chrome se recouvre, nous l'avons vu, d'une couche d'oxyde non poreuse, isolante et adhérente.

Toutefois, l'oxydation se fait peu à peu et elle est accélérée soit (surtout à haute température) par la présence du fer pour les alliages qui contiennent ce métal, soit par les trépidations ou les chocs auxquels l'appareil peut être soumis, soit par l'action mécanique due à la succession des chauffages et refroidissements, soit enfin par la nature de l'atmosphère du four.

L'effet de cette oxydation lente est de diminuer la section du fil ou de la bande ou du ruban constituant l'élément chauffant, donc d'augmenter la résistance électrique  $R$ , et par suite de réduire la puissance  $P$  que l'élément peut dissiper. En cas de rupture ou de détérioration partielle de l'élément, on peut d'ailleurs le reconstituer dans certains cas en réunissant les parties saines par une réparation simple que les constructeurs peuvent facilement exécuter (en général, il en résulte une légère réduction de la valeur de la résistance  $R$ ).

#### **2) Détérioration accidentelle.**

Une telle détérioration peut provenir soit d'un défaut de fabrication ou de construction, soit d'un défaut dans l'utilisation de l'appareil.

**α) Défaut de fabrication ou de construction.** - - Le défaut visé peut être :

Soit le manque d'homogénéité du métal ; ce défaut, d'ailleurs exceptionnel, peut être d'origine métallurgique (soufflure, paillette, impureté) ou mécanique (section irrégulière : résistance  $R$  plus élevée aux points faibles, donc augmentation de  $RI^2$  et par suite de la température en ces points) ;

soit la disposition défectueuse des éléments entraînant une surchauffe locale (points chauds) par accumulation de chaleur : interférences de chaleur provenant des spires ou des éléments voisins ou des supports réfractaires, inégale conductibilité thermique de la masse environnante créant une trop grande dyssymétrie dans la répartition du flux de chaleur émis par les éléments ;

soit l'aplatissement de spires entraînant par place des courts-circuits électriques totaux ou partiels ;

soit l'isolement incorrect des entrées et sorties de courant et des soudures ou brasures ;

soit enfin le conditionnement défectueux des différentes parties du four.

Bien que les Ni-Cr aient une limite élastique relativement élevée, ils sont sujets à des déformations lentes aux hautes températures auxquelles on les utilise s'ils sont soumis à des efforts mécaniques mêmes faibles. D'où la nécessité de les soutenir (emploi de briques de forme, de supports convenablement dessinés et disposés, etc., tous dispositifs que les constructeurs ont mis parfaitement au point depuis longtemps).

**β) Défaut d'utilisation.** — Signalons, en particulier :

La valeur trop élevée de la tension d'alimentation entraînant d'une part un échauffement trop rapide des éléments et surtout des réfractaires voisins pendant la période de mise en température (double action calorique et mécanique sur la couche protectrice d'oxyde), et d'autre part une surchauffe exagérée bien que, pratiquement, il y ait en général une légère autocompensation due à l'augmentation de  $R$  avec la température ;

le manque de régulateur (cas de régulation manuelle avec une main-d'œuvre inattentive) entraînant une élévation exagérée de la température ;

le choix défectueux de l'emplacement des thermo-couples et en particulier de leurs soudures chaudes (par ex. : influence sur la soudure chaude, d'une pièce froide introduite dans un four), ou la trop grande inertie thermique de ces appareils ;

la marche défectueuse d'un régulateur automatique (rare



avec les bons appareils ; on cherche parfois à pallier cette éventuelle défectuosité — avec un résultat plus ou moins sûr — par l'emploi de fusibles caloriques judicieusement placés) :

la nature de l'atmosphère : gaz échappés de la matière en traitement ou provenant d'une réaction chimique, vapeurs. Ces gaz sont rarement néfastes. Signalons toutefois l'action des vapeurs de soufre ( $\text{SO}^2$ ,  $\text{SH}^2$ ,  $\text{SO}^3$ ,  $\text{SO}^4\text{H}^2$ ) et d'huile et aussi d'aluminium et des gaz de cémentation et de cyanuration. On peut y remédier, si nécessaire, par des dispositions simples et appropriées que les constructeurs indiquent. Le four électrique — c'est un *avantage capital* — permet de réaliser dans la chambre de chauffe une *atmosphère quelconque* (oxydante, neutre ou réductrice), voire même le vide pour certains appareils spécialement conçus ;

le choc de pièces, introduites maladroitement dans le four, contre les éléments chauffants : des dispositions simples permettent d'éviter ce genre d'incident.

Les Ni-Cr s'accommodent des réfractaires courants à base de silice ou d'alumine, ainsi que des ciments ordinaires.

Pratiquement, il faut attacher une grosse importance à la quantité de chaleur dissipée par unité de surface de l'élément chauffant, quantité exprimée sous le nom de puissance spécifique.

Pour éviter que la résistance soit portée à une température exagérée, on peut : soit la disposer de telle manière que la chaleur produite puisse être facilement dissipée dans l'ambiance (dispositions particulières de la construction, convection forcée, etc.), soit adopter une puissance spécifique relativement faible. Généralement, cette puissance est prise de l'ordre de 0,5 à 2 W :  $\text{cm}^2$ , tout au moins pour les fours usuels (par ex. 0,4 à 0,6 W :  $\text{cm}^2$  pour 1 100° C ; 0,6 à 0,8 W :  $\text{cm}^2$  pour 1 000° C ; 1 W :  $\text{cm}^2$  pour 900° C ; 2 W :  $\text{cm}^2$  pour 700-800° C ; ces nombres, toutefois, ne sont donnés qu'à titre indicatif : ils ne sont pas absolus).

### 3) Durée pratique.

La garantie habituellement donnée par les constructeurs est d'une année. Elle est bien souvent étendue à plusieurs milliers d'heures, selon le cas d'espèce.

Mais, dans la pratique et sauf cas exceptionnels, les résistances ont une très longue durée d'emploi, surtout pour les fours à marche continue. Par exemple des fours de cémentation ou de traitements thermiques ont fonctionné à 900-925° C d'une manière presque continue, pendant dix ans sans que les résistances aient fait l'objet d'aucun incident.

*Pratiquement, l'entretien des résistances pour les fours usuels de construction correcte jusqu'à 950-1 000° C est négligeable.*

## 2° Eléments protégés

Les éléments protégés sont de plus en plus employés, notamment pour l'équipement des petits appareils et le chauffage des liquides.

### Descriptions.

Un tel élément comporte, en principe, les principales parties constitutives suivantes :

- une résistance électrique R en fil ou en ruban (fig. 4).
- un isolant électrique D.
- une enveloppe E assurant la protection (mécanique, chimique ou électrique) de l'élément.

L'isolant formant support de la résistance est constitué par une matière appropriée assurant un isolement électrique satis-

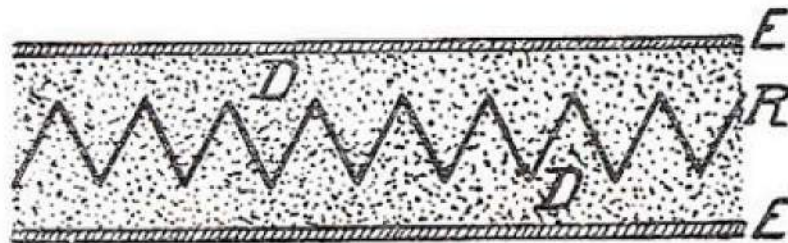


Fig. 4.

faisant à toutes les températures d'emploi : mica, porcelaine, stéatite, ciment spécial, produit silico-alumineux ou magnésien en poudre, etc...

L'enveloppe, généralement métallique, doit être choisie de façon à ne pas être attaquée chimiquement, voire électrochimiquement, par l'ambiance et inversement à ne pas attaquer cette dernière. Elle est quelquefois constituée par un simple ciment.

Les bornes d'amenée de courant doivent, dans certains cas, être particulièrement soignées.

Certains éléments, dits blindés, sont étanches, tout au moins dans la partie en contact avec la substance à chauffer.

### Conditions auxquelles les éléments protégés doivent satisfaire.

Les éléments protégés doivent satisfaire aux conditions essentielles suivantes :

Au point de vue technique : contact aussi intime que possible entre l'élément et la matière à chauffer ; longue durée de vie ; facilité de la mise en forme ; résistance convenable aux attaques chimiques ou mécaniques (vibrations par ex.).



Au point de vue économique : prix de revient aussi réduit que possible (grâce à : choix des matières premières, normalisation de certains types).

### Forme.

Pour assurer un contact aussi intime que possible entre l'élément et la matière à chauffer, on a été amené à réaliser des éléments de forme très diverses : cylindrique, plate, annulaire, etc... (fig. A : 2-3-4). Certains éléments protégés ou blindés peuvent être construits ou façonnés très facilement, suivant un dessin quelconque et par suite épouser les formes les plus diverses et assurer ainsi la transmission de chaleur optimum avec un rendement thermique souvent égal à l'unité.

### Durée des éléments.

La longévité d'un élément protégé est essentiellement fonction :

1° De la qualité de sa fabrication :

Nature et propriétés physiques (électriques et thermiques en particulier) et chimiques des matières constitutives (résistance, isolant, enveloppe, bornes).

Disposition des diverses parties et forme de l'ensemble de l'élément (éviter les interférences de chaleur, l'accumulation des calories pouvant donner naissance à des points chauds entraînant la rupture de la résistance par fusion ; soigner les amenées de courant, etc.) ;

2° Des conditions chimiques de l'ambiance : oxydation, attaques chimiques par la substance (liquide, gaz, solide) constituant l'ambiance ;

3° De la charge ou puissance spécifique évaluée en calories ou en watts dissipés par  $\text{cm}^2$  de la surface d'échange thermique (par exemple, surface immergée dans un liquide) ou par cm de longueur (pour un élément de section uniforme tel qu'un tube) ; si cette puissance est trop élevée, la température de la résistance peut devenir exagérée et les causes de destruction de l'élément (fusion, cristallisation, oxydation) peuvent être dangereusement augmentées.

Cette puissance est également fonction des autres conditions d'emploi : éléments surchargés par surtension (effet Joule proportionnel au carré de la tension), par disposition défectueuse (partie chauffante d'un élément d'immersion se trouvant en dehors du bain par exemple), etc.

En somme, la durée d'un élément dépend :

*Des conditions de fabrication, donc du constructeur ;*

*Des conditions d'emploi, donc surtout de l'utilisateur.*

### Classification (suivant la nature de l'isolant).

La qualité de l'élément est primordiale et c'est elle qui conditionne tout le problème des éléments protégés. L'isolant doit satisfaire à un certain nombre de conditions dont les deux principales sont souvent contradictoires :

Il doit avant tout assurer un excellent isolement électrique à toutes les températures d'emploi ;

Il doit également assurer correctement la transmission de la chaleur depuis la résistance (où l'effet Joule est produit) jusqu'à l'enveloppe, c'est-à-dire qu'il doit être un excellent conducteur thermique.

Or on sait que, en principe, les matières mauvaises conductrices de l'électricité sont également mauvaises conductrices de la chaleur. Toutefois la magnésite a la propriété très intéressante d'être relativement bonne conductrice de la chaleur tout en conservant aux basses et même aux moyennes températures des propriétés diélectriques suffisantes. Elle partage d'ailleurs cette remarquable propriété avec quelques silicates d'alumine naturels ou synthétiques. En particulier, il existe trois silicates naturels de même formule :  $Al^2 O^3$ ,  $SiO^2$ , qui cristallisent dans des systèmes distincts et ont des propriétés physiques différentes, à savoir : la sillimanite, l'andalousite et le disthène, dont les poids spécifiques sont voisins (3,1 à 3,7) et qui, à haute température (valeurs respectives de l'ordre de 1 550, 1 400 et 1 380° C) se transforment également en mullite de formule :  $3 Al^2 O^3$ ,  $2 SiO^2$  et en une masse vitreuse.

Les produits magnésiens ou silico-alumineux sont employés couramment, comme isolants électriques, sous forme pulvérulente, dans la fabrication des éléments blindés.

A cause de leur complexité, il est assez difficile de donner, des produits silico-alumineux et magnésiens, une classification indiscutable et cependant utile aux usagers. Aussi n'hésiterons-nous pas à donner une classification simple qui, si elle n'est peut-être pas absolument orthodoxe au point de vue chimique, aura du moins l'avantage de mieux correspondre au point de vue de l'utilisateur.

On peut considérer :

Les éléments à l'amiante ;

Les éléments au mica ;

Les éléments à base de produits réfractaires ;

Les éléments à la magnésite ;

Les câbles et conducteurs chauffants.

Les éléments à l'amiante tendent à être utilisés de moins en moins et nous les laisserons de côté. Nous ne rappellerons de même que pour mémoire les éléments imaginés par des chercheurs dès la fin du siècle dernier : emploi de sable, de quartz ou de verre comme isolant électrique.



### 1) Élément au mica.

Le mica (nom donné à différents produits silico-alumineux de potasse, fer et magnésie) de bonne qualité a un pouvoir diélectrique satisfaisant (par ex., pour des épaisseurs inférieures à 25/100, la rigidité diélectrique et de 1 000 V/0,01 mm pour certains micas durs et transparents et de 850 V/0,01 mm pour certains micas tendres de couleur ambrée. Il perd ses propriétés isolantes à des températures inférieures à celles de l'utilisation maximum du nickel-chrome. La déshydratation du mica pur ou naturel, c'est-à-dire obtenu par découpage et clivage des blocs extraits de la mine, se produit à des températures relativement basses, par ex. : 700-1 000° C pour des micas durs (muscovites) et 1 000-1 200° C pour des micas tendres (phlogopites). Le mica supporte assez mal les variations de chaleur qui peuvent entraîner, dans certains cas et plus ou moins rapidement, la séparation des clivages et l'émiettement du mica. Pratiquement, on

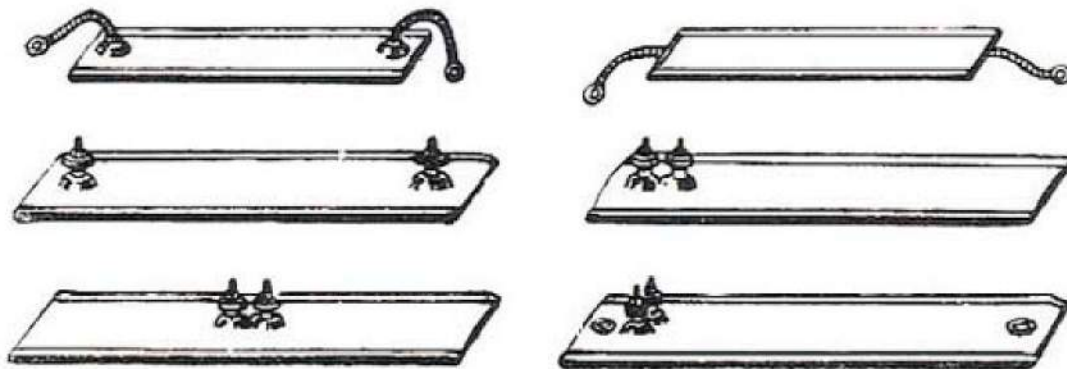


Fig. 5.

emploie surtout du mica reconstitué, obtenu par collage, au moyen d'agglomérants appropriés (gomme laque ou résine synthétique), de paillettes minces ou de clivures convenablement comprimées par passage à la presse et cuites.

La transmission de la chaleur se fait dans des conditions qui, évidemment, ne sont pas très favorables, puisque le mica est un isolant thermique.

Le mica est fréquemment employé pour la constitution d'éléments chauffants (fig. 5), en particulier pour des températures égales ou inférieures à 400-500° C et aussi pour des températures maxima de 700-800° C. On a pu fabriquer également (et seul le mica a pu permettre de telles réalisations) des éléments chauffants travaillant normalement à 1 500 V (et essayés à 15 000 V) et à 110-120° C (température extérieure de l'enveloppe) pour des radiateurs de voitures de chemins de fer.

A titre d'exemple d'application courante, un élément plat pour l'équipement de plateaux de presse pour matière plastique peut être réalisé au moyen d'une résistance métallique, fil fin ou ruban, enroulée sur des feuilles de mica ou de micanite (mica aggloméré ou reconstitué), isolée par d'autres feuilles de mica ou de micanite, l'ensemble étant comprimé dans une enveloppe en tôle d'acier pliée, agrafée ou soudée.

Il semble que le mica doive conserver une place privilégiée dans la fabrication des éléments de chauffage à haute tension (qui, peut-être, est le chauffage de l'avenir pour les grandes masses d'air ; par ex., chauffage des locaux par convection) et pour l'équipement des éléments de très faible épaisseur.

## 2) Eléments de base de produits réfractaires.

On peut distinguer :

1° Les produits réfractaires préparés en forme (produits céramiques à base d'argile, de kaolin, de feldspath ; porcelaine et surtout stéatite et produits à base de stéatite), usinés (coulés ou tournés par ex.) et cuits à une température variable et relativement élevée ;

2° Les produits réfractaires utilisés à l'état pulvérulent, cuits ou crus, formant ciment dans certains cas.

### a) Produits réfractaires en poudre.

Les produits en forme servent de supports mécaniques et isolants aux résistances métalliques de chauffage. Leurs formes sont très diverses.

Suivant le cas, les fils chauffants, généralement boudinés, sont placés dans les auges ou les rainures des pièces de forme, ou bien ils sont bobinés sur ces pièces ou encore ils sont glissés dans les cannelures prévues à cet effet dans les pièces. Souvent les pièces de forme sont emboîtées les unes dans les autres, soit sur une tige rigide, soit sans cet axe (ce qui permet d'avoir des éléments relativement flexibles, faciles à monter et dont les dimensions peuvent varier à l'infini). De même, la puissance électrique (fonction de la résistance totale, donc en particulier de la longueur et de la section des fils) peut varier également, dans certaines limites tout au moins.

A titre d'ex., en employant des petites pièces de forme à 9 trous, on peut monter un élément avec une seule entrée et une seule sortie en utilisant autant de trous que l'on veut ; avec un grand nombre pair de trous, on pourra réaliser des couplages divers (série-parallèle par ex., qui donne des puissances variant dans le rapport de 1 à 4) ; avec un nombre de trous multiple de 3, on pourra recourir au couplage étoile-triangle (puissances variant dans le rapport de 1 à 3).

L'ensemble ainsi constitué peut être placé dans un tube





métallique par ex., de dimensions et de nature appropriées pour former un élément protégé, étanche si nécessaire.

Dans ce type d'éléments, l'isolement électrique est assuré à la fois par le support réfractaire et par l'air ; la chaleur est généralement transmise de la résistance chauffante à l'enveloppe, simultanément par conduction (par le support, d'ailleurs mauvais conducteur thermique), par convection (par l'air contenu dans l'enveloppe) et aussi par rayonnement (du support). La transmission de la chaleur n'est donc pas très favorable, ce qui limite sensiblement la température maximum d'emploi.

Un élément tubulaire, formant radiateur de chauffage direct pour étuve ou chambre-étuve, pourra être constitué par un support cylindrique en terre réfractaire dans les cannelures longitudinales duquel sera emprisonné du fil boudiné en nickel-chrome. L'ensemble sera placé et convenablement fixé dans un tube en fonte ou en acier garni d'ailettes. Le tableau ci-dessous donne, à titre d'ex., les caractéristiques fournies par un constructeur, pour de tels éléments standards.

Nature du tube	Longueur totale de l'élément (tube unique avec ailettes)	Diamètre des ailettes	Puissance (1) pour une température au bord des ailettes de	
			180° C	120° C
	cm	cm	W	W
Fonte ..	51	13.1	1 000	500
Acier ..	125	9	1 500	800
Acier ..	185	9	2 200	1 200

(1) Répartie éventuellement en plusieurs circuits permettant d'obtenir plusieurs allures de chauffe.

Un élément tubulaire à immersion pourra comporter un certain nombre de pièces en réfractaire empilées sur un axe en métal inoxydable ; le fil boudiné en nickel-chrome sera enfermé dans les cannelures, les extrémités du fil aboutiront à des bornes portées par une pièce isolante en porcelaine ; un capot de protection recouvrira la tête de l'élément. Le tableau suivant donne, à titre d'ex., les caractéristiques des éléments de fabrication courante d'un constructeur, tant pour le chauffage d'eau (gaine de cuivre) que pour celui des huiles (gaines d'acier), les tensions nominales étant les suivantes : 110-115, 125, 200, 200-230 V.

Un élément d'immersion pour bain d'électrolyse pourra être constitué par du fil de nickel-chrome boudiné et monté sur un support en porcelaine ou en stéatite, l'ensemble étant ensuite fixé dans une gaine en fer, en acier, en cuivre, en plomb, en métal inoxydable, en verre spécial ou en quartz.

Les éléments les plus courants pour bains d'électrolyse ont une puissance de 2 kW.

Il ne s'agit, dans ce qui précède, que de données susceptibles de fournir à nos lecteurs des ordres de grandeur. Bien entendu,

Chauffage de l'eau		Chauffage de l'huile	
Longueur de l'élément (sans le capot)	Puissance	Longueur de l'élément (sans le capot)	Puissance
mm	W	mm	W
210	200-300-600	250	200-400-600
290	800-1 000	290	800
330	1 200	330	1 000
410	1 500	410	1 200
495	1 800	495	1 500
		575	1 800
370	2 000	370	2 000
420	2 500	540	2 500
460	3 000	650	3 000
640	4 000	770	4 000
780	5 000	900	5 000
920	6 000	1 100	6 000
1 250	8 000	1 400	8 000
1 500	10 000	1 720	10 000

les éléments comportant des supports de forme sont très divers et les puissances peuvent être, pour certaines applications, plus faibles ou plus élevées que ne l'indiquent les tableaux précédents.

Plus récemment, sont apparus des éléments comportant une résistance constituée par un ruban cisailé suivant des fentes disposées alternativement de part et d'autre du ruban, ce dernier étant monté dans des logements réservés dans des pièces réfractaires de forme et l'ensemble enfermé dans un tube. Ces nouveaux éléments se font normalement en huit longueurs : de 150 mm (250 W) à 1 450 mm (3 150 W).

Quelquefois, le fil monté sur le support réfractaire et isolant, placé ou non dans une gaine métallique, est recouvert



d'un ciment approprié qui le protège mécaniquement et surtout chimiquement (contre l'oxydation) et le maintient contre le support. A titre d'ex., les éléments standard Cléba (fig. A-2), prévus pour des tensions usuelles de 110 et 220 V, comportent un tube en stéatite sur lequel est enroulé un fil en nickel-chrome recouvert d'un ciment silico-alumineux et d'un enduits vitrifié à 1 000° C environ par traitement dans un four électrique, les connexions sont établies par colliers, bagues ou simplement par fils souples. Les dimensions courantes sont les suivantes : longueur totale (y compris les colliers) : 255-370 mm ; diamètre de la partie chauffante : 32-42 mm ; puissance max. absorbée (pour une température de 500° C environ à la surface, en atmosphère calme) : 450 à 700 W. La puissance varie évidemment suivant les caractéristiques du fil chauffant.

Les supports céramiques ont, en général, le défaut d'être rigides et de ne pouvoir se prêter aux applications qui nécessitent des formes complexes d'éléments. Cependant, ils sont parfois constitués de pièces de forme enfilées les unes au bout des autres, ce qui permet une certaine flexibilité. De plus, ils résistent mal aux variations de température, surtout lorsque cette dernière est élevée.

### β) Ciments.

Les produits céramiques (silico-alumineux, alumineux ou magnésiens) sont employés à l'état pulvérulent, soit sous forme de ciments, soit secs.

Les ciments sont obtenus en partant de produits silico-alumineux (donc à base d'alumine  $Al^3 O^3$ , de silice  $SiO^2$  et d'eau  $H^2$ ), convenablement mélangés avec de la chaux et de l'eau (gâchage). Ils ne peuvent être utilisés que pour des températures relativement basses (350-450° C), sans quoi les qualités isolantes disparaissent vite (les variations de la conductibilité électrique proviennent de la transformation de la silice à partir de 375° C en trydinite et en cristoballite), en même temps que le ciment devient friable (d'où destruction des propriétés de résistance mécanique). Leur conductibilité thermique, en général, est faible et le coefficient de variation de cette conductibilité en fonction de la température est négatif, ce qui revient à dire que la conductibilité thermique diminue quand la température augmente.

Certains carreaux chauffants sont constitués par une résistance en nickel-chrome enrobée dans une matière céramique (produits multiples) cuite (puissance spécifique de 8 W :  $cm^2$  par ex., avec utilisation jusqu'à 800° C).

### γ) Produits réfractaires en poudre.

A titre d'exemples, nous signalerons les éléments suivants :

Les **éléments néocal** se présentent sous la forme originelle d'un tube auquel le fabricant peut donner la forme voulue. Ils comportent :

un fil résistant, en principe en nickel-chrome à 80/20 ;

un isolant spécial dont nous ignorons la composition exacte, mais qui est vraisemblablement un corps mullitique, bon conducteur de la chaleur, mais mauvais conducteur de l'électricité ; le fil est noyé dans l'isolant où, par suite du procédé spécial de fabrication, il se trouve rigoureusement centré ;

une première enveloppe métallique (tôle d'acier de 0,3 mm) fendue longitudinalement, formant gaine pour le fil résistant et l'isolant ; l'ensemble est passé au banc à étirer, puis séché à 800° C environ (l'eau peut être entièrement évaporée grâce à la fente indiquée ci-dessus) ;

une deuxième enveloppe métallique de forme tubulaire, d'une épaisseur minimum de 1 mm, de nature appropriée à l'emploi prévu (fer, acier inoxydable, cuivre rouge, etc.) formant enveloppe de protection extérieure.

Ces éléments pourraient travailler jusqu'à une température superficielle de 850° C à 900° C. Ils se font actuellement en un diamètre unique de 10,8 mm et avec une longueur maximum de 5 m. A titre indicatif, la puissance spécifique maximum pour chauffage d'eau est de 6 W : cm<sup>2</sup> de surface d'échange de la chaleur, soit environ 22 W : cm de longueur de tube ou 2,24 kW:m.

Les **éléments métanic**, sous la forme de cartouches, comportent un support en stéatite, muni de rainures qui maintiennent le fil boudiné ou non ; l'isolant est constitué par de la sillimanite ; le retour du courant se fait par une tige filetée centrale en monel ou en acier inoxydable.

### 3) Eléments à la magnésic.

On distingue actuellement plusieurs sortes d'éléments (blindés ou semi-blindés), qui portent les noms suivants (classés par ordre de présentation sur le marché français) :

Calrod, backer, chromalox et tubalox, métanic, spyrox, rubanox.

Tous ces éléments sont de fabrication courante.

La magnésic a comme principal avantage celui de conserver un bon pouvoir diélectrique même à des températures relativement élevées.



## Eléments calrod.

Ils ont été mis au point en Amérique vers 1919.

Un élément calrod (fig. 6 et A-2) est constitué par un fil boudiné, en principe en nickel-chrome à 80/20, contenu tout entier dans un tube métallique approprié, rempli de magnésie en poudre.

Le fil résistant est enroulé en forme d'hélice très régulière et de diamètre sensiblement inférieur à celui du tube extérieur. Les extrémités sont fixées à une tige d'amenée de courant de faible résistance électrique (laiton, monel, nickel, suivant la température d'utilisation).

L'isolant est obtenu en partant de la magnésie ou carbonate de magnésium impur. La magnésie est fondue ( $2\,700^{\circ}\text{C}$ ) au four à arc et ultérieurement réduite en poudre fine et homogène dont on élimine le fer, introduit lors du broyage, au moyen de séparateurs magnétiques.

Pour obtenir une bonne qualité, on sélectionne la magnésie calcinée. La densité réelle en est de l'ordre de 3,6.

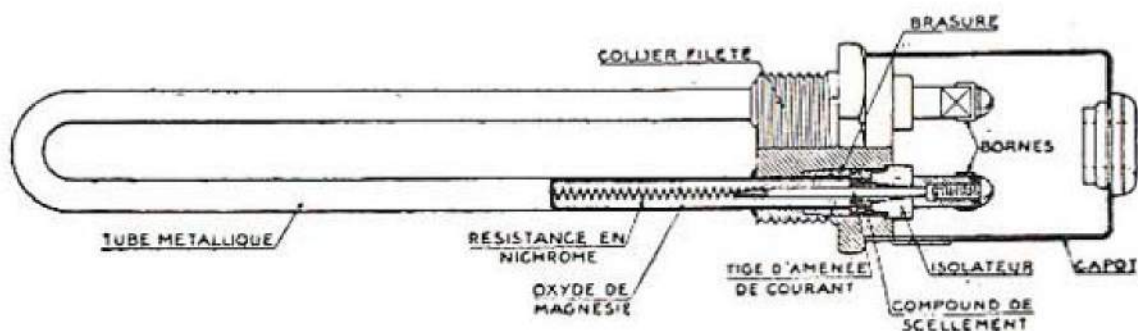


Fig. 6.

La fabrication des tubes calrod bien que délicate (comme celle des autres éléments analogues), est parfaitement au point. Il faut en particulier :

assurer et maintenir la régularité de l'espacement entre les spires successives de la résistance, réaliser le centrage rigoureux de cette résistance et conserver ce centrage même si les tubes sont ultérieurement cintrés pour leur donner des formes appropriées :

obtenir un tassement convenable de la poudre de magnésie pour la rendre dure et compacte.

Nous n'insisterons pas sur les détails de fabrication qui n'intéressent à vrai dire que le constructeur. Nous noterons seulement que le remplissage et le tassement de l'isolant dans le tube, dans lequel on a préalablement introduit le fil résistant, se font à l'aide de machines à vibrations et de machines spéciales.

à resreindre (passes successives avec recuit pour rendre au métal sa ductibilité initiale).

Les éléments calrod se présentent toujours sous forme de tubes dont la longueur maximum est de l'ordre de 2,50 m. Ils peuvent être : soit rectilignes, avec ou sans ailettes de refroidissement, soit de formes diverses. Ils sont fabriqués normalement pour les tensions suivantes : 110-115, 120-125, 190-200, 220-230 V.

A titre d'exemple, les éléments à immersion de la fabrication courante d'un constructeur, prévus en général pour toutes les tensions précitées (sauf pour certaines puissances élevées pour lesquelles on ne les construit que pour 200-230 V), sont constitués par un, deux ou trois tubes repliés en épingles à cheveux : les extrémités sont montées sur une même tige filetée ; l'enveloppe est soit en cuivre étamé (chauffage de l'eau), soit en acier (chauffage de l'huile) ; les caractéristiques en sont données dans le tableau suivant :

Nombre de circuits	Chauffage de l'eau		Chauffage de l'huile	
	Longueur	Puissance	Longueur	Puissance
	mm	W	mm	W
1	375	400	375	400
1	265	600	305	600
1	265	800	375	800
1	305	1 000	470	1 000
2	375	800	375	800
2	320	1 000	340	1 000
2	265	1 200	305	1 200
2	265	1 500	360	1 500
2	305	2 000	470	2 000
2	330	2 400	560	2 400
2	390	3 000	505	3 000
2	420	4 000	550	4 000
2	450	5 000	580	5 000
3	275	3 000	365	3 000
3	365	4 000	475	4 000
3	390	5 000	505	5 000
3	420	6 000	550	6 000
3	560	8 000	730	8 000
3	580	10 000	755	10 000



Un autre type d'éléments calrod (non utilisé en France jusqu'à présent, tout au moins à notre connaissance) est constitué par une résistance en spirale placée dans une enveloppe plate et isolée par de la magnésie compacte ; cette résistance fait plusieurs fois la longueur de l'élément et est répartie de cette façon sur toute la surface ; la compacité est obtenue par l'action d'une presse.

Les éléments « calrex » sont obtenus en coulant, dans un moule de forme quelconque contenant un tube calrod, un métal tel que la fonte (l'enrobage se faisant alors vers 1300° C). Ces éléments présentent les avantages suivants : résistance mécanique élevée, grande surface chauffante, distribution uniforme de la chaleur sur une grande surface. Ils sont peu répandus en France, mais il n'en est pas ainsi en Amérique.

Les cartouches « calrod » sont constituées de la façon suivante : le fil résistant est boudiné sur une tige ronde de substance réfractaire (lave) percée d'un trou longitudinal pour le fil de retour ; l'ensemble précédent est centré dans un tube métallique et l'isolement est assuré, ici encore, par de l'oxyde de magnésium en poudre ; ces cartouches sont toujours rectilignes. Les deux amenées de courant peuvent être voisines et réunies dans la même borne. On peut également prévoir des éléments à 2 circuits permettant de faire varier la puissance (un seul circuit ou deux circuits en série ou en parallèle).

#### Eléments backer.

Ils apparurent au Canada et en Angleterre vers 1921.

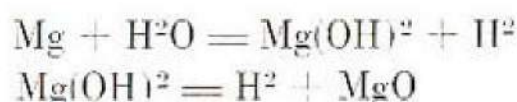
Un élément backer (fig. 7 et A-3) comporte un fil boudiné en nickel-chrome placé dans un tube métallique convenable



Fig. 7.

rempli d'une masse de magnésie. Cette magnésie est obtenue en partant, non pas d'un minerai de magnésium, mais de magnésium chimiquement pur que l'on traite par oxydation en présence d'eau, à haute pression (supérieure à 70 Hpz) et à une température de 250° C.

La transformation du métal en oxyde s'opère suivant les formules :



Au cours de ces réactions, il se produit théoriquement une augmentation importante de volume, mais qui se trouve limitée par l'espace dans lequel elle se produit, d'où une certaine compression du produit final.

Les éléments backer sont obtenus en tubes rectilignes avec les diamètres courants suivants : 6,5-8-9-10,75-16 mm (de 2,30 m de longueur au maximum pour un tube de 9 mm de diamètre) que l'on peut garnir d'ailettes (normalement pour les tubes de 9 et 16 mm) et auxquels on peut donner par pliage ou cintrage toutes formes désirées. Ils sont fabriqués pour les tensions usuelles de 100 à 380 V. Le tableau des longueurs et puissances, donné pour les éléments à immersion calrod, s'applique sensiblement aux éléments backer.

A titre indicatif, la température en °C atteinte par les ailettes pour une longueur de tube de 1 m, dans le cas de chauffage d'air par simple convection, suivant la puissance mise en jeu par mètre linéaire, est donnée par le tableau suivant :

Modèle	Tube diam. mm	Ailettes		Temp. en °C suivant la charge			
		diam. mm	écartement mm	500 W	1000 W	2000 W	3000 W
Tube droit	16,5	45	4	110	180	275	350
Tube droit ou cintré	9	25	4	150	222	318	—
Tube en U	9	50×25	4	150	235	335	—

Bien entendu la fabrication est ici encore assez particulière et elle doit être l'objet de soins attentifs. Le magnésium est placé dans l'enveloppe sous forme d'un tube (pratiquement représenté souvent par 3 segments) ; à l'intérieur de ce tube de magnésium, on place le fil résistant boudiné et quelquefois, dans l'axe de celui-ci, on glisse un fil de magnésium ; ainsi se trouve réalisé le centrage de la spirale chauffante, centrage qui se maintiendra ensuite tant au cours des opérations chimiques précédemment indiquées qu'au cours des pliages ou cintrages ultérieurs.

Les éléments backer peuvent être enrobés dans un métal approprié pour former des éléments analogues aux « calrex ».



## Eléments chromalox et tubalox.

Les éléments chromalox apparurent en Angleterre vers 1928.

Un tel élément (fig. A-4) est constitué par un fil spiralé de nickel-chrome noyé dans une masse compacte et dense de magnésie, plus exactement d'un mélange à base de magnésie : l'ensemble est enfermé dans une gaine en acier chromé à 20 p. 100 ou en fer électrolytique suivant la température que l'on veut atteindre ; le fil résistant fait plusieurs fois la longueur de l'élément, ce qui permet d'obtenir une répartition convenable de la chaleur sur toute la surface.

Les points délicats de la fabrication sont les suivants : compacité de la magnésie (obtenue au moyen d'une pression élevée), imperméabilité de la magnésie à l'humidité (obtenue par cuisson), bobinage régulier du fil résistant, épaisseur convenable de l'isolant, fixation du fil aux bornes d'amenée de courant (par fortes pressions sans soudure).

Les éléments chromalox se présentent sous forme de lames ou d'anneaux.

Les lames ont une largeur normale de 38 mm (limites actuelles de 25 mm et de 75 mm) et une épaisseur de 7 à 9 mm. La longueur peut varier de 203 à 1 083 mm. Le tableau qui suit donne la valeur des puissances minima et maxima usuelles. Le montage du fil résistant permet de disposer à volonté les bornes d'amenée de courant (en acier chromé ou en monel) soit aux deux extrémités de la lame, soit à une seule extrémité, soit au centre, ou d'avoir trois bornes pour obtenir plusieurs allures de chauffe. Les tensions normales sont de 110 et 230 V (limites de fabrication : 75 et 500 V).

Caractéristiques	Longueur totale	Longueur utile (chauffée)	Puissance				
			110 V		230 V		
			Min.	Max.	Min.	Max.	
	mm	mm	W	W	W	W	
1 borne à chaque extrémité	Min.	203	102	50	225	175	200
	Max.	1 083	981	10	2 300	50	2 300
2 bornes à une seule extrémité.	Min.	203	102	35	225	150	200
	Max.	1 083	931	10	1 800	50	2 300
3 bornes à une extrémité (3 allures de marche).	Min.	267	168	100	300	—	—
	Max.	603	505	75	900	275	800
Modèle spécial à 2 bornes à une seule extrémité.	Min.	140	57	75	150	—	—
	Max.	305	222	25	500	100	500

Les anneaux se présentent sous deux formes, suivant qu'ils sont complètement blindés (sur deux faces) ou semi-blindés (sur une seule face) ; leur diamètre extérieur varie de 89 à 219 mm et la puissance de 25 à 1 400 W. Le tableau suivant en donne les caractéristiques essentielles.

Caractéristiques	Dia- mètre inté- rieur	Dia- mètre exté- rieur	Puissance				
			110 V		230 V		
			Min.	Max.	Min.	Max.	
	mm	mm	W	W	W	W	
Anneau blindé, gaine en fer électrolyti- que ( $e = 8$ mm).	Min.	157	64	75	125	—	—
	Max.	22	213	25	500	75	750
Anneau blindé, gaine en acier chromé ( $e = 8$ mm).	Min.	157	64	75	150	—	—
	Max.	22	213	25	500	75	950
Anneau semi-blindé, ( $e = 5,5$ mm).	Min.	57	89	25	350	125	350
	Max.	152	219	25	1 300	50	1 400

Les cartouches « chromalox » (fig. A-4) comportent un noyau en matière réfractaire sur lequel est enroulé une résistance de nickel-chrome boudiné ; l'ensemble ainsi constitué est enrobé dans une matière réfractaire et le tout est introduit dans un tube en cuivre chromé.

Les éléments tubalox (fig. A-3), plus récents et fabriqués par la même firme, sont tubulaires et se font normalement en deux diamètres (6,35 et 7,94 mm). Ils sont constitués par un fil boudiné enrobé dans l'isolant, l'ensemble se trouvant dans un tube de nature appropriée.

#### Eléments métanic.

Les bandes métanic (fig. A-2) comportent un fil boudiné sur faible diamètre, réparti sur toute la surface de la bande, englobé dans un mélange de magnésie et d'argile et enfermé dans une enveloppe en inconel (alliage nickel-chrome-fer).

La fabrication se fait en trois temps : obtention d'une couche assez dure d'isolant sur la bande en forme de gouttière ; réalisation d'une deuxième couche, moins fortement pressée, qui reçoit et maintient le fil boudiné ; obtention d'une troisième couche, fortement comprimée, à la partie supérieure.

Les bandes se font en deux largeurs : 25 et 40 mm, l'épaisseur étant de 9 mm et la longueur de 230 à 937 mm. La température maximum d'emploi est de l'ordre de 500° C.



### Eléments spyrox.

Les éléments de fabrication récente se présentent sous forme de tubes obtenus sans rétreints, mais généralement avec un méplat sur une face.

### Eléments rubanox.

Ils ont été mis au point en France en 1943-1944.

Contrairement aux éléments précédemment décrits, ils comportent non pas un fil boudiné mais un ruban de nickel-chrome, d'une certaine largeur (normalement 15 mm), parfaitement laminée à l'épaisseur voulue, puis cisailée ou découpée suivant des fentes situées alternativement d'un côté ou de l'autre du ruban. Le nombre des fentes est déterminé d'après la longueur du circuit que le courant doit parcourir afin d'obtenir la valeur désirée pour la résistance électrique. Les découpages ne commencent qu'à une certaine distance des extrémités du ruban, de sorte que ces dernières ont une résistance électrique négligeable et sont normalement froides ; elles servent de moyens de bornage et évitent le recours à des fixations telles que la soudure. (Fig. 8 et A-4.)

L'isolant est constitué par de la magnésie électrofondue et convenablement sélectionnée, tamisée et séchée. Toutes dispositions de fabrication sont prises pour assurer un centrage parfait de la résistance et un bourrage convenable de la magnésie.

Le tube extérieur est constitué par un métal inoxydable (inconel ou monel) fermé par soudure continue au chalumeau oxyacétylénique en atmosphère réductrice.

Il existe deux types d'éléments rubanox à la magnésie : l'élément plat et l'élément de section en forme de tonneau.

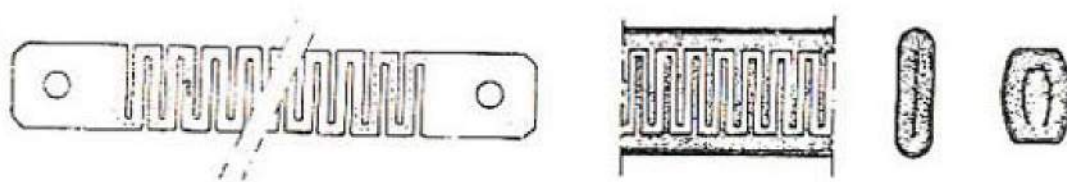


Fig. 8.

L'élément courant de forme plate, à bords arrondis, a les dimensions suivantes : largeur de 22 mm, épaisseur de 6 mm. La résistance est un ruban plan découpé en zig-zag. Il existe plusieurs types de bornages : ruban nu avec trou ou fente, fil torsadé de raccordement, borne perpendiculaire au plan du ruban, ou embout réfractaire prolongé par une borne. L'étanchéité est assurée aux extrémités du tube par une pièce spéciale en réfractaire et cimentée. Les éléments plats peuvent être droits ou présentés sous une autre forme, qu'ils soient courbés de champ en U ou en J ou réunis par des chapeaux étanches pour



former des éléments entièrement plats en U, en N ou en M. La longueur normale de fabrication des tubes est de 2,50 m. A titre indicatif, les longueurs usuelles des éléments plats, droits pour les tensions courantes (110-220-380 V) varient de 290 à 2 040 mm, les puissances s'échelonnant de 100 à 2 500 W. On peut admettre en première approximation que la puissance linéaire est généralement de l'ordre de 1 000 à 1 500 W : m et la puissance spécifique de 5 à 6 W : cm<sup>2</sup> pour chauffage à l'air libre (éléments domestiques par ex.) et de 2 à 3 W : cm<sup>2</sup> pour les éléments industriels.

Les éléments plats peuvent être munis d'ailettes. Les éléments droits avec ailettes de construction courante ont des longueurs et des puissances respectivement échelonnées entre 290 et 2 040 mm et entre 100 et 6 300 W.

Par simple passage à la presse, on peut donner à un élément plat une forme cintrée suivant un arc de cercle dans le sens de la largeur, en vue du chauffage de gros tubes par ex.

Les éléments ayant une section en forme de tonneau comportent une résistance constituée par un ruban découpé et plié en forme de gouttière sur sa longueur. La forme particulière de la section est obtenue par pression ; elle se prête à une déperdition minimum de calories pour certains chauffages. De tels éléments sont notamment employés pour les foyers à feu vif des appareils de cuisine et pour les thermoplongeurs, en forme d'épingle à cheveux simple ou double.

#### **Remarques sur les éléments blindés et en particulier sur les éléments tubulaires.**

##### **1) Fabrication.**

Une des principales difficultés de la fabrication des éléments à la magnésic est d'obtenir une compression correcte de la magnésic pure ou mélangée à un liant convenable tout en maintenant la correction du centrage.

On y parvient par divers procédés : compression préalable du mélange et pression ultérieure sur le tube, martelage ou laminage du tube, traitement thermique approprié, etc.

##### **2) Puissance.**

La puissance que l'on peut réaliser par construction dans un tube, pour une tension donnée, dépend de la longueur utile (longueur chauffée) et du diamètre du tube.

La puissance minimum correspond à la résistance maximum du fil résistant ( $P = \frac{U^2}{R}$  et  $R = \rho \frac{l}{s}$ ,  $\rho$  = résistivité,

$l$  == longueur,  $s$  = section) : on est donc limité par la plus faible section du fil résistant que l'on puisse admettre et par la longueur du fil, donc du tube.





Pour obtenir une faible puissance, on aura avantage à prendre un tube relativement long et une tension plus basse, de façon à avoir une section plus élevée du fil, qui présentera ainsi une plus grande résistance à l'usure (on a généralement le choix entre l'alimentation à 120 V environ et l'alimentation à 210 V environ ou entre la tension étoilée et la tension composée en courant triphasé, la tension simple et la tension double en courant diphasé à 4 ou 5 fils).

En ce qui concerne la tension, c'est par l'épaisseur de l'isolant et surtout par les conditions d'isolement aux bornes que l'on sera limité ; on a cependant fabriqué des éléments jusqu'à 650 V.

En général, la longueur normale usuelle des tubes de diamètre courant est de l'ordre de 2 m-2,50 m ; elle peut atteindre 5 m dans certains cas.

On peut grouper plusieurs tubes dans un appareil pour obtenir la puissance voulue, si cela est nécessaire.

A titre indicatif, la puissance maximum réalisée dans les tubes de fabrication courante est de l'ordre de 3 kW : m pour des tubes à la magnésie de 16,5 mm de diamètre et de 10 kW : m pour des cartouches de 65 mm de diamètre.

En pratique, la puissance acceptable dans de bonnes conditions de durée de l'élément dépend essentiellement des conditions d'utilisation de cet élément et en particulier de sa température d'emploi et des conditions de transmission de la chaleur.

### 3) Température.

La température réalisable dans un milieu chauffé avec des tubes dépend en particulier :

de la température de ramollissement du fil résistant, pratiquement cette température étant de l'ordre de 1 100° C, ce n'est pas elle qui, en général, limite l'emploi des tubes, d'autant plus que la chute de température dans la magnésie (gradient de température entre le fil chauffant et l'enveloppe) est relativement faible (par ex., le gradient sera de 120° C pour une température de 750° C de la surface radiante de l'enveloppe) ;

de la température maximum que peut supporter l'enveloppe, compte tenu de l'ambiance dans laquelle elle plonge ; par ex., l'oxydation à l'air libre augmente rapidement avec la température lorsque cette dernière est élevée ;

du taux de transmission de la chaleur, lequel dépend de la différence de température entre l'élément et le milieu ambiant et des conditions de la transmission, celle-ci se faisant par conduction, par rayonnement ou par convection (ex. : tube placé dans un gaz immobile ou en mouvement, ou dans un liquide

agité ou non, ou encore dans un solide) ; ce taux de transmission est d'ailleurs fonction de la forme du tube ;

de la forme du tube (tube rectiligne ou en épingle à cheveux ou de forme complexe, tube avec ou sans ailettes).

#### 4) Charge ou puissance spécifique.

Pour une application donnée, on peut calculer facilement la puissance nécessaire pour le ou les éléments chauffants. Les dimensions de l'élément (lesquelles entrent essentiellement en ligne de compte pour la détermination du prix) dépendent du taux de la transmission de la chaleur que l'on pourra accepter. Ce taux (puissance spécifique par  $\text{cm}^2$  de surface d'échange) sera limité :

par la température maximum à laquelle l'élément peut travailler, donc :

par la température maximum acceptable pour l'enveloppe (par ex. dans l'air, oxydation rapide à partir de certaines valeurs de la température, fonction d'ailleurs de la nature de l'enveloppe et des conditions du chauffage : température constante ou chauffage discontinu) ;

par la température de fusion du nickel-chrome (mais celle-ci étant élevée, ce facteur n'entre pratiquement pas en considération) ;

par la température à laquelle l'isolant perd ses qualités diélectriques.

Bien entendu, les conditions de l'ambiance sont capitales : nature (ex. : huile ou compound), mouvement (ex. : convection forcée d'un gaz ou agitation d'un liquide).

C'est l'expérience qui, généralement, a permis aux constructeurs de fixer les taux de transmission à adopter dans les différents cas de la pratique courante.

Pour fixer les idées, on admet souvent les puissances spécifiques suivantes pour les tubes en cuivre (temp. max. de  $250^\circ\text{C}$ ) à la magnésie :

Ambiance	Puissance spécifique	
	W : cm	W : $\text{cm}^2$
Air calme .....	2 — 6	1 — 2
Air en mouvement .....	4 — 10	1,5 — 3,5
Eau .....	max. 15	5 — 8
Huile .....	max. 5	2
Lait .....	max. 3	1

Cette puissance peut être augmentée si le tube est en un autre métal : acier (temp. max. de  $450^\circ\text{C}$ ), nickel ( $650^\circ\text{C}$ ), aciers au



chrome (650° C) ou au nickel-chrome (750° C). Ne pas dépasser 3 W : cm<sup>2</sup> pour l'huile et choisir la forme de l'élément pour rester en dessous du point éclair.

### 5) Nature de l'enveloppe.

Les métaux usuels sont les suivants :

Métal	Tempér. max. us. (° C)	Principales applicat.
Cuivre (ordinaire, nickelé ou étamé), laiton .....	200	Chauffage des liquides en général et de l'eau en particulier.
Acier .....	400	Chauffage de l'air et de l'huile
Acier protégé, bronze d'aluminium .....	600-680	Chauffage de l'air
Nickel, alliages inoxydables, inconel .....	780-800	Chauffage de l'air Cuisine

Pour les bains chimiques, on peut avoir recours par exemple aux métaux suivants :

Nature du bain	Nature du métal
Acide sulfurique étendu ....	Plomb
Acide sulfurique concentré ..	Fer
Acide azotique étendu .....	Acier inoxydable
Acides organiques .....	Aluminium
Bains de nickelage .....	Plomb, acier inoxydable
Bains de chromage .....	Fer, acier
Bains de cuivrage .....	Plomb (bain acide), acier (bain alcalin)
Bains de phosphatation ....	Acier
Bains de soude ou de potasse	Nickel, acier
Bains photographiques ....	Métal, acier inoxydable

Nous ne donnons les indications précédentes qu'à titre indicatif et non limitatif. Il s'agit en l'espèce de métaux qui ont été adoptés avec succès dans un certain nombre de cas.

On peut aussi utiliser des tubes extérieurs en quartz dans tous les cas précédents, sauf pour les bains de soude et de potasse.



### Câbles chauffants.

Les câbles chauffants constituent une solution très particulière du problème des éléments chauffants et qui a jusqu'ici été surtout adoptée dans le domaine agricole pour le chauffage des couches. Ces câbles peuvent cependant rendre des services dans l'industrie pour des puissances superficielles assez faibles et des températures peu élevées (80° C au maximum à la surface du câble), en particulier, lorsque l'on veut obtenir une répartition aussi uniforme que possible de la chaleur.

Il existe actuellement trois sortes de câbles chauffants (fig. 9) que nous indiquons ci-après par ordre alphabétique :

a) Le câble *alsthom* comporte, en partant du centre vers la périphérie, un fil résistant en nickel-chrome, deux guipages de coton imprégné, une triple tresse d'amiante, un guipage de papier imprégné, une enveloppe de plomb pur et en plus, dans certains cas, soit une gaine supplémentaire en zinc électrolytique strié (pour éviter les phénomènes d'électrolyse dus aux courants vagabonds), soit des feuillards. Le diamètre du câble sous plomb nu est de 6 mm environ et la résistivité peut varier de 0,5 à 2  $\Omega : m$  (en général, elle est choisie égale à 1  $\Omega : m$ ). La puissance spécifique maximum est de 30  $W : m$  (soit environ 33 m de longueur par kW) ;

b) Le câble *câblerie de Lyon* est constitué par un fil résistant isolé par des couches d'amiante et de papier goudronné et essoré, le tout étant enrobé dans une gaine de plomb protégé contre les corrosions chimiques par un traitement spécial (sulfuration) et recouvert de papier imprégné et d'une armure de feuillard mis à recouvrement ; la puissance spécifique varie de 25 à 40  $W : m$  en général ;

c) Le câble *draka* (fabrication hollandaise) comporte normalement un fil de nickel-chrome boudiné sur une âme en asbeste (produit à base d'amiante) et entouré d'un mélange dont nous ignorons la composition et qui forme isolant électrique et conducteur thermique ; l'ensemble est recouvert d'une couche de plomb pur. Dans certains cas, le câble est armé, l'enveloppe de plomb étant asphaltée, enveloppée dans du papier imprégné, armée ensuite de 2 couches de feuillard, asphaltée à nouveau et enveloppée enfin de papier imprégné. Le diamètre extérieur du câble sous plomb non armé est de 4,15 à 6,5 mm. La puissance spécifique est prévue en général à raison de 30  $W : m$ .

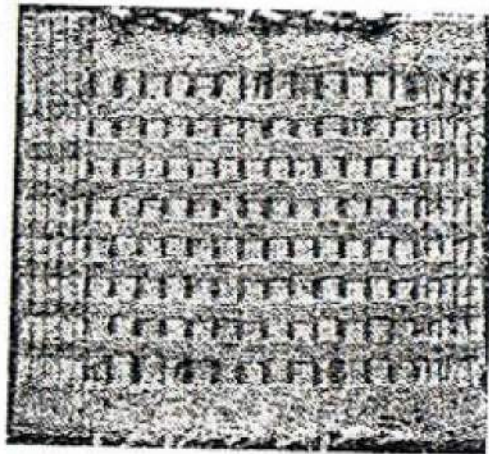
Les câbles chauffants présentent en particulier trois avantages intéressants :

facilité d'emploi ;

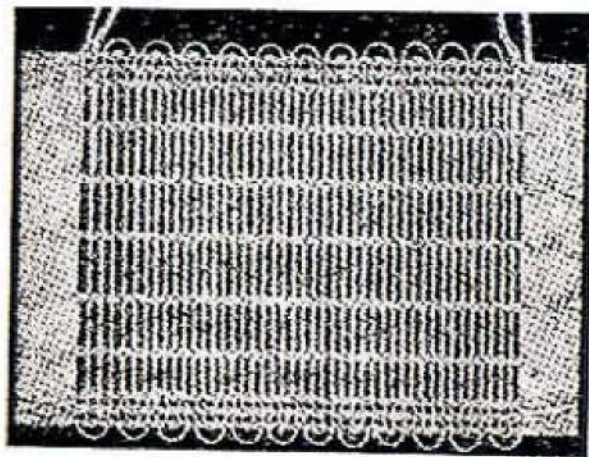
résistance à certains agents chimiques (gaine de plomb pur) ;





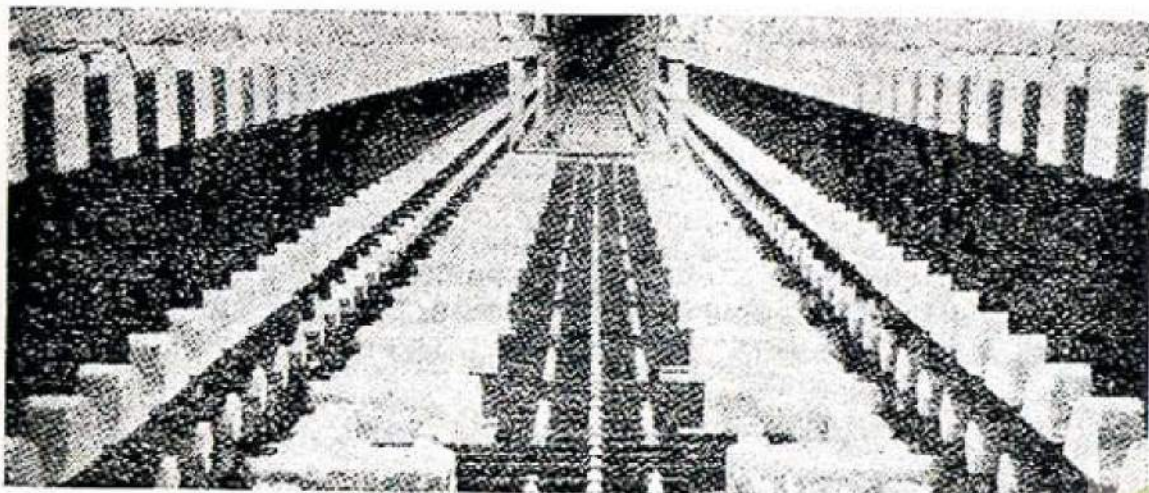


a

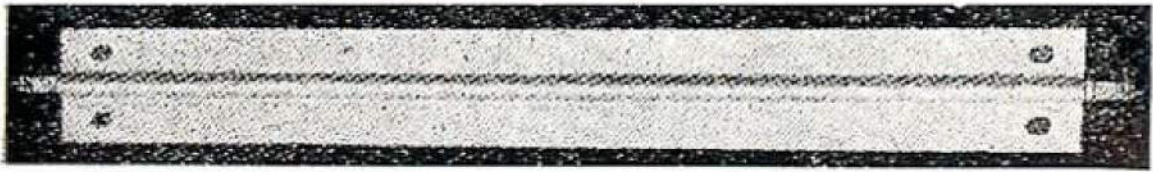


b

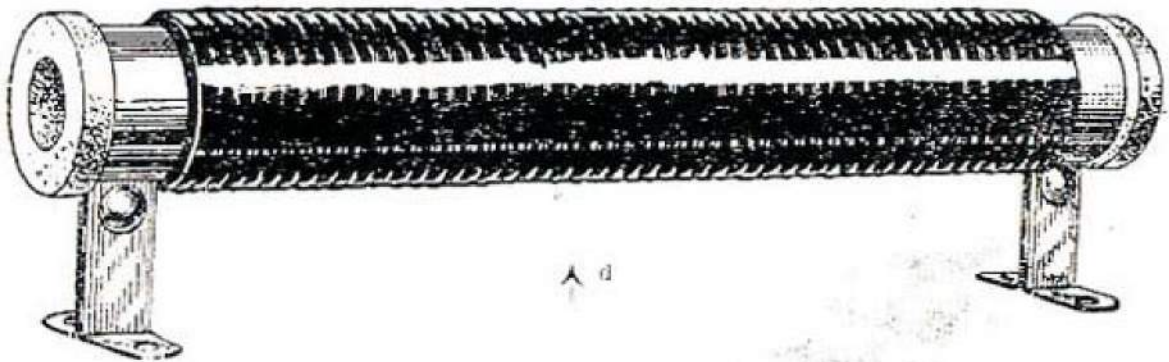
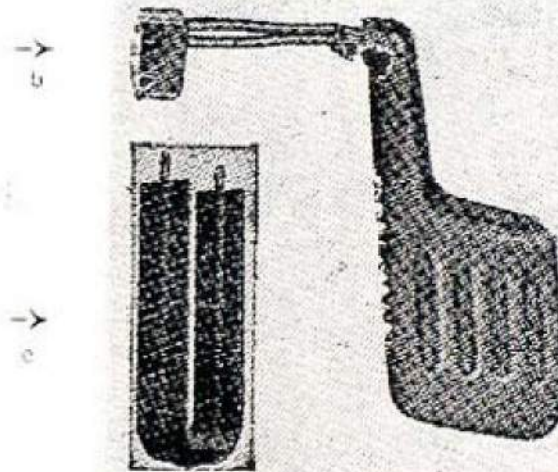
a et b. Toiles chauffantes (petites étuves, appareils divers).



c. Vue intérieure d'un four de traitement thermique en construction.

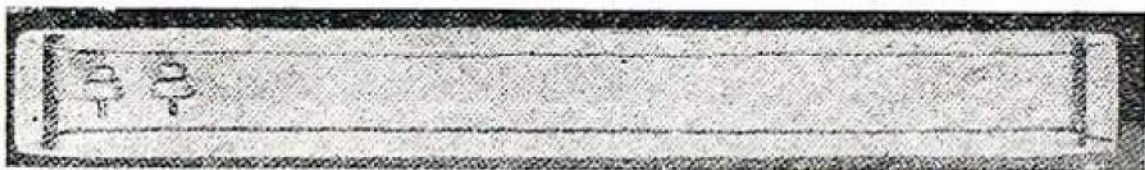


a



d

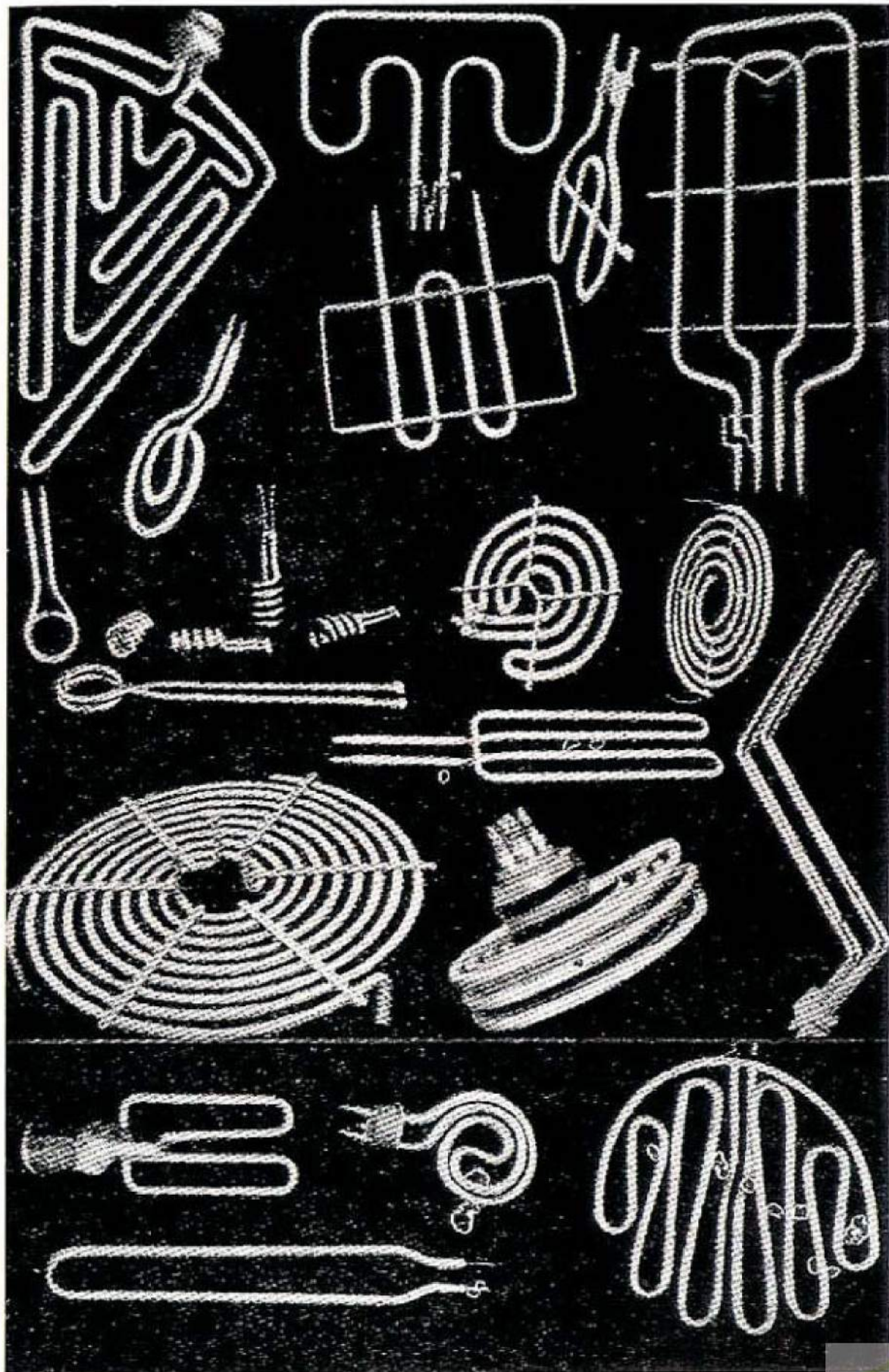
e



a. Élément calorod à ailettes. — b. Élément calorod d'immersion. — c. Élément calorod à ailettes. — d. Élément céba. — e. Élément métanique.







Élément baker et éléments tubalox.



vénient utiliser ces conducteurs à des températures supérieures, sans que le courant de fuite soit exagéré et peut-être sous réserve d'augmenter (ce qui est facile à faire) l'épaisseur de l'isolant.

#### Températures d'emploi des éléments protégés.

Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur des températures usuelles d'emploi de ces éléments dans l'industrie. Il ne faut le considérer que comme un *document approximatif* car, nous l'avons vu, la température d'emploi dépend d'un assez grand nombre de facteurs ; ce n'est pas un invariant.

Par ex., dans des essais de laboratoire, on a pu réaliser, avec des éléments blindés à la magnésie, des températures de l'ordre de 1 000° C avec une durée relativement satisfaisante ; toutefois, pratiquement, on n'utilise ces éléments qu'au-dessous de 750-800° C.

Il est toujours préférable d'adopter, surtout aux hautes températures et chaque fois que cela est possible (question de volume ou de surface) une charge spécifique peu élevée, de façon à augmenter la durée des éléments.

Nature de l'isolant	Températures d'emploi de l'élément (1) (° C)	
	usuelle	maximum
Mica . . . . .	jusqu'à 500	700-800
Produit réfractaire en forme (stéatite) . . . . .	jusqu'à 100	300
Ciment . . . . .	jusqu'à 100	500
Produit silico-alumineux en poudre . . . . .	jusqu'à 550	550
Magnésie en poudre . . . . .	jusq. 500-800	750-800
Câbles chauffants . . . . .	infér. à 80	80
Conducteurs chauffants . . . . .	jusq. 300-400	300-400

(1) Se reporter au texte qui précède.

#### b) Alliages « fer-chrome-aluminium ».

Nature.

Ces alliages contiennent environ 20 à 30 p. 100 de chrome, 2 à 5 p. 100 d'aluminium, le reste étant constitué par du fer (et également d'autres métaux en faible proportion, par ex. du cobalt).



Leur élaboration est délicate, mais maintenant courante. Leur traitement et leur façonnage font l'objet de soins particuliers.

*Remarque.* — Par suite du manque de certains métaux (Ni, Cr, Co) et surtout de nickel pendant la guerre, les règles restrictives imposées quant à l'emploi des Ni-Cr ont affirmé le développement des Fe-Cr-Al. Ces alliages (tout au moins ceux qui étaient de fabrication française) ont été groupés en 4 classes.

Ces règles sont encore en vigueur, mais il apparaît que certains aciéristes ont l'intention d'abandonner, dès que les circonstances le permettront, leurs fabrications de guerre de Fe-Cr-Al ou tout au moins de certaines nuances de ces alliages, pour se consacrer de nouveau à leurs fabrications normales d'avant guerre. Nous laisserons donc de côté les « alliages de remplacement », du type Fe-Cr-Al élaborés ou imposés pendant la guerre

### Caractéristiques.

Les propriétés de ces alliages sont fonction du pourcentage de leurs constituants. Ils sont caractérisés essentiellement par une résistivité élevée (tableau I, page 13), et une grande résistance à l'oxydation et à l'action du soufre et de ses composés aux températures élevées. Ils ne sont pas amagnétiques.

Leur résistivité est de l'ordre de 135-145 ohms : cm : cm<sup>2</sup> contre 100-110 pour le nickel-chrome à 80/20.

Le coefficient de temp.  $\alpha$  est positif et de très faible valeur moyenne : de 0,3 à  $0,5 \times 10^{-4}$  entre 0 et 1100° C.

Le tableau IV relatif aux alliages RCA et les courbes de la fig. 10 relative aux alliages Kanthal, complètent les indications précédentes.

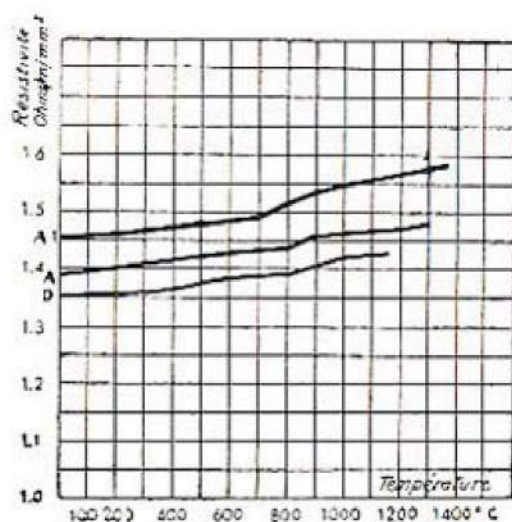


Fig. 10.

La densité est relativement faible : de 7 à 7,2 contre 8-8,5 pour le nickel-chrome à 80/20 (soit en moyenne 15 p. 100 en moins), facteur intéressant de comparaison pour le prix de revient d'un corps de chauffe ou d'un élément chauffant. La densité est d'autant plus faible que le pourcentage d'aluminium dans l'alliage est plus grand.

Le coefficient de dilatation est relativement élevé. L'alliage ne possède pas de point critique : de sorte que l'accroissement des cristaux se maintient après chauffage prolongé à haute température. Il est nécessaire de tenir compte de cette particularité d'une part dans l'emploi des fer-chrome-aluminium (soutenir convenablement l'élément chauffant) et d'autre part dans leur façonnage (à froid pour les fils ne dépassant pas un certain diamètre, par ex. 4 mm pour le Kanthal ; à chaud, par chauffage électrique obtenu par courant passant directement dans le métal, pour les fils de grosse section ou les rubans).

L'alliage se recouvre d'un oxyde superficiel qui assure une auto-protection intéressante du métal contre l'attaque de l'ambiance. On peut ainsi augmenter sensiblement la charge superficielle des éléments et les utiliser à plus haute température dans les appareils industriels, avec une durée cependant satisfaisante.

La température d'emploi dépend de la nature de l'alliage : les fabricants agissant surtout soit sur la teneur en aluminium et sur la teneur en cobalt, soit sur la teneur en chrome. Dans la pratique courante, les Fe-Cr-Al sont surtout employés pour l'équipement des fours ou portions de fours où la température de travail doit atteindre de 1 000 à 1 300° C.

#### Forme.

Au début, on employait uniquement des bandes, barres ou rubans, généralement ondulés. Depuis de longues années, on utilise également et couramment des fils, boudinés le plus souvent.

À titre indicatif, les RCA sont en principe livrés :

en fils : de 5,5 à 0,1 mm, exceptionnellement jusqu'à 0,05 mm de diamètre,

en bandes : pour des largeurs inférieures ou égales à 25 mm, pour des épaisseurs inférieures ou égales à 2,5 mm, avec des longueurs variables suivant les sections,

en rubans : pour des largeurs variant de 0,4 à 5 mm, pour des épaisseurs de 0,05 à 1 mm.



Tableau IV

Diamètre mm	Section mm <sup>2</sup>	Poids par mètre g	Résistance en ohms par 100 m.				pour R C A 22 pour R C A 33 pour R C A 44
			0° C	600° C	800° C	1 000° C	
			0° C	700° C	900° C	1 000° C	
			0° C	800° C	1 000° C	1 200° C	
<i>Alliage R C A - 22 (température limite 1 000° C)</i>							
0,10	0,007854	0,0570	15 915	17 050	17 300	17 550	
0,50	0,1963	1,42	636,7	682	693	703	
1	0,7854	5,70	159,1	170,5	173	175,5	
1,5	0,7671	12,9	70,7	75,8	77	78,2	
2	3,1416	22,8	39,8	42,6	43,3	44	
2,5	4,9037	35,6	25,5	27,3	27,6	28,1	
3	7,0686	51,2	17,7	19	19,2	19,5	
4	12,5664	91,1	9,94	10,7	10,82	10,98	
5	10,6350	142,2	6,37	6,82	6,93	7,03	
<i>Alliage R C A - 33 (température limite 1-100° C)</i>							
0,10	0,007854	0,0570	17 550	18 200	18 320	18 440	
0,50	0,1963	1,42	703	729	734	739	
1	0,7854	5,70	175,5	182	183,2	184,4	
1,5	1,7671	12,9	78,2	81	81,6	82,1	
2	3,1416	22,8	44	45,5	45,8	46,2	
2,5	4,9087	35,6	28,1	29,1	29,4	29,6	
3	7,0686	51,2	19,5	20,2	20,4	20,5	
4	12,5664	91,1	10,98	11,38	11,45	11,52	
5	19,6350	142,2	7,03	7,29	7,34	7,39	
<i>Alliage R C A - 44 (température limite 1 200° C)</i>							
0,10	0,007854	0,0562	17 810	18 320	18 830	19 460	
0,50	0,1963	1,40	713	734	754	780	
1	0,7854	5,62	178,1	183,2	188,3	194,6	
1,5	1,7671	12,7	79,3	81,6	83,9	86,7	
2	3,1416	22,5	44,6	45,8	47,2	48,8	
2,5	4,9087	35,1	28,5	29,4	30,1	31,2	
3	7,0686	50,5	19,8	20,4	20,9	21,8	
4	12,5664	89,9	11,12	11,45	11,77	12,17	
5	19,6350	140,32	7,13	7,34	7,54	7,80	

Les kanthal sont les plus anciens des alliages « fer-chrome-aluminium ».

Normalement, le kanthal A<sub>1</sub> se fabrique en bandes laminées à froid pour des sections variant de  $50 \times 2,8$  à  $5 \times 0,315$  mm ;

le kanthal A en fils tréfilés de diamètre variant de 6,7 à 0,05 mm ou en rubans de sections variant de  $4 \times 1,25$  à  $0,2 \times 0,1$  mm ;

le kanthal D en fils tréfilés ou en rubans de mêmes dimensions que le précédent et également en barres rondes laminées à chaud de 50 à 7,1 mm de diamètre ou en bandes laminées à froid de mêmes sections que pour le kanthal A<sub>1</sub>.

Dans l'industrie, les alliages considérés sont surtout employés nus. Toutefois, on les utilise également dans la fabrication de certains appareils domestiques à régime rapide et de petits appareils industriels à éléments chauffants poussés.

#### Durée des éléments.

Les données générales que nous avons indiquées pour les alliages Ni-Cr sont valables pour les alliages Fe-Cr-Al, sauf pour les points suivants :

#### Ambiance.

Les alliages Fe-Cr-Al résistent beaucoup mieux que les Ni-Cr non seulement à l'oxydation, mais encore à l'action des gaz sulfureux ( $H_2S$  et  $SO_2$ ). Ils doivent travailler en atmosphère oxydante ou neutre. Ils sont attaqués aux hautes températures par les atmosphères réductrices contenant une haute teneur en hydrogène en même temps qu'une forte proportion d'oxyde de carbone.

D'une manière générale, ils sont attaqués par les halogènes et leurs combinaisons. Il faut éviter de les mettre en contact avec certaines substances (amiante, cyanogène, cyanures ; projections ou vapeurs de certains métaux fondus tels que zinc, cuivre, plomb, aluminium).

Le choix des réfractaires qui doivent leur servir de support est capital : en principe et tout au moins aux hautes températures, les briques supports ne doivent pas contenir de la silice libre et la teneur en oxyde ferrique doit être aussi réduite que possible. On doit donc recourir à des réfractaires contenant de l'alumine ou de la magnésie. Jusqu'à 800-900° C, l'argile réfractaire est de bonne qualité, exempte de silice libre, convient. De 1 000 à 1 100° C, on peut employer de la sillimanite ou du corindon fondu. Mêmes réserves pour les ciments d'enrobage.



### Fragilité.

Les Fe-Cr-Al cristallisent à chaud, comme nous l'avons vu : d'où leur fragilité après chauffage. Conséquence : adopter une construction appropriée ; en pratique, les constructeurs de fours scutiennent convenablement les résistances et prennent toutes dispositions pour laisser le libre jeu de la dilatation.

### Soudage.

Le soudage, soit lors de l'équipement des fours, soit lors de la réparation des éléments chauffants, peut être fait au moyen de l'arc électrique ou du chalumeau oxy-acétylénique.

### Durée pratique.

A température égale, leur durée est en principe plus élevée que celle des Ni-Cr. La fig. 11 donne les résultats d'essais comparatifs de ces deux sortes de résistances au moyen d'une méthode dérivée de la méthode *Bash and Harsch* préconisée par l'*American Society for Testing Materials*. (Les alliages essayés sont les suivants : 1, kanthal A<sub>1</sub> ; 2, kanthal A ; 3, kanthal D ; 4, nickel-chrome à 80/20 ; 5, nickel-chrome à 65/15).

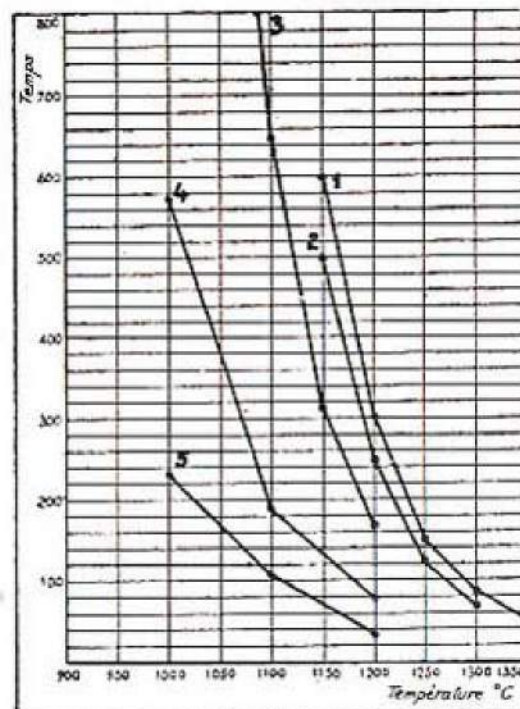


Fig. 11.

Les taux de transmission calorifique généralement adoptés sont fixés dans les deux tableaux V et VI.

A titre indicatif, la durée des Fe-Cr-Al peut être de plusieurs années pour une marche continue à une temp. max. de 1 250° C, pour des conditions normales d'utilisation.

Tableau V

Alliages	Puissance maximum admissible en W : cm <sup>2</sup> à :					
	700° C	800° C	900° C	1 000° C	1 100° C	1 200° C
RCA-22	3	2,3	1,9	1,3	—	—
RCA-33	—	3	2,5	1,9	1,3	1,3
RCA-44	—	—	3	2,5	1,9	—

Tableau VI

Alliages	Puissance (1) admissible en W : cm <sup>2</sup> à :								
	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C	1 000°C	1 100°C	1 200°C	1 300°C
Kanthal D { bande . { fil ....	2,6	2,2	1,9	1,6	1,4	1,3	1,0	—	—
	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	—	—
Kanthal A (fil) ....	—	—	—	—	—	1,4	1,3	1,0	—
Kanthal A <sup>1</sup> (bande)	—	—	—	—	—	—	1,4	1,2	0,9

(1) Puissance souhaitable pour les fours électriques et non pas puissance maximum.

### c) Métaux spéciaux.

Pour obtenir des températures élevées, on a utilisé des métaux tels que le nickel (température de fusion : 1 452° C), le chrome, le platine-rhodium, l'iridium (température de fusion : 2 360° C), ou le platine (température de fusion : 1 775° C). Mais ces métaux sont coûteux et délicats et leur emploi a été limité à la fabrication des fours de laboratoire.

Pratiquement, on a recours au molybdène (point de fusion : 2 550° C) et au tungstène (point de fusion : 2 974° C), utilisés sous forme de fils boudinés (par exemple : fils bobinés sur un moufle en alundum pour les petits fours, fils placés dans des réfractaires de forme adéquate pour des fours importants), de tiges ou baguettes, de bandes, de plaques ou de feuilles (par exemple : feuilles enroulées pour les petits fours). Ces métaux ont un coefficient de température  $\alpha$  très élevé (voir tableau I, page 13) : les fours correspondants sont, par suite, munis d'un



démarrateur (grande variation de la résistivité  $\rho$  en fonction de la température). Aux températures élevées auxquelles on les emploie, ils sont très sensibles à l'oxydation, ainsi qu'à la volatilisation aux très basses pressions ; aussi les protège-t-on par une atmosphère spéciale : gaz inerte ou gaz réducteur soigneusement épuré (azote ou de préférence hydrogène). Le molybdène est plus facile à travailler que le tungstène. On peut, avec ces métaux réfractaires, atteindre des températures de 1 700° à 2 000° C.

### Remarques.

#### Répartition des éléments chauffants et souplesse du chauffage électrique.

L'effet Joule se manifeste en tout point des éléments chauffants. Or ceux-ci peuvent épouser la forme de la chambre de chauffe et être répartis au gré du constructeur. Il s'ensuit que l'on peut fournir en un point quelconque une quantité de chaleur déterminée *a priori* et même variable dans le temps. En particulier, on peut diviser un four en plusieurs zones de températures différentes et réglables à volonté. Cette double souplesse due à la répartition dans l'espace et dans le temps des calories à fournir, constitue un des principaux avantages du chauffage électrique.

#### Importance de la tension.

1) *Tension nominale.* — La puissance  $P = UI = \frac{U^2}{R}$  est une donnée constructive que l'on peut facilement déterminer si l'on connaît les conditions exactes du traitement à effectuer.  $I$  et  $R$  s'en déduisent aisément, si l'on connaît la valeur de la tension  $U$ . Il importe donc de fixer celle-ci aussi exactement que possible. Remarquons que  $U$  est la valeur de la tension au point de raccordement du four, lorsque celui-ci absorbe la puissance  $P$  (fig. 12-a ;  $r$  = résistance de la ligne, supposée à 2 fils, par conducteur et par unité de longueur ; longueur de la ligne =  $l$  ; chute de tension =  $2 rl I$ , perte en ligne :  $2 rl I^2$ ).

2) *Tension de service.* — La tension appliquée peut avoir une valeur différente de la tension nominale. Deux cas à examiner, suivant que celle-là est inférieure ou supérieure à celle-ci :

a) Dans le premier cas, la puissance  $P$  et par suite la quantité de chaleur  $Q$  dégagée dans l'unité de temps par les éléments chauffants seront inférieurs aux prévisions du constructeur. La durée de la mise en température sera allongée, le rendement moyen du four pourra diminuer ; dans certains cas particuliers, on n'atteindra pas la température désirée et le traitement ne pourra pas être réalisé ;

6) S'il y a surtension, les phénomènes seront plus graves :  
 1. — *Période de mise en température.* — La résistance  $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$  varie avec la température  $t$ . La chaleur  $Q = 0.24 RI^2 t = 0.24 \frac{U^2}{R} t$ , développée au début pendant un intervalle de temps  $t$  suffisamment petit pour que  $R$  puisse être considéré comme constante, servira uniquement à échauffer le conducteur que, pour fixer les idées, nous supposons être un

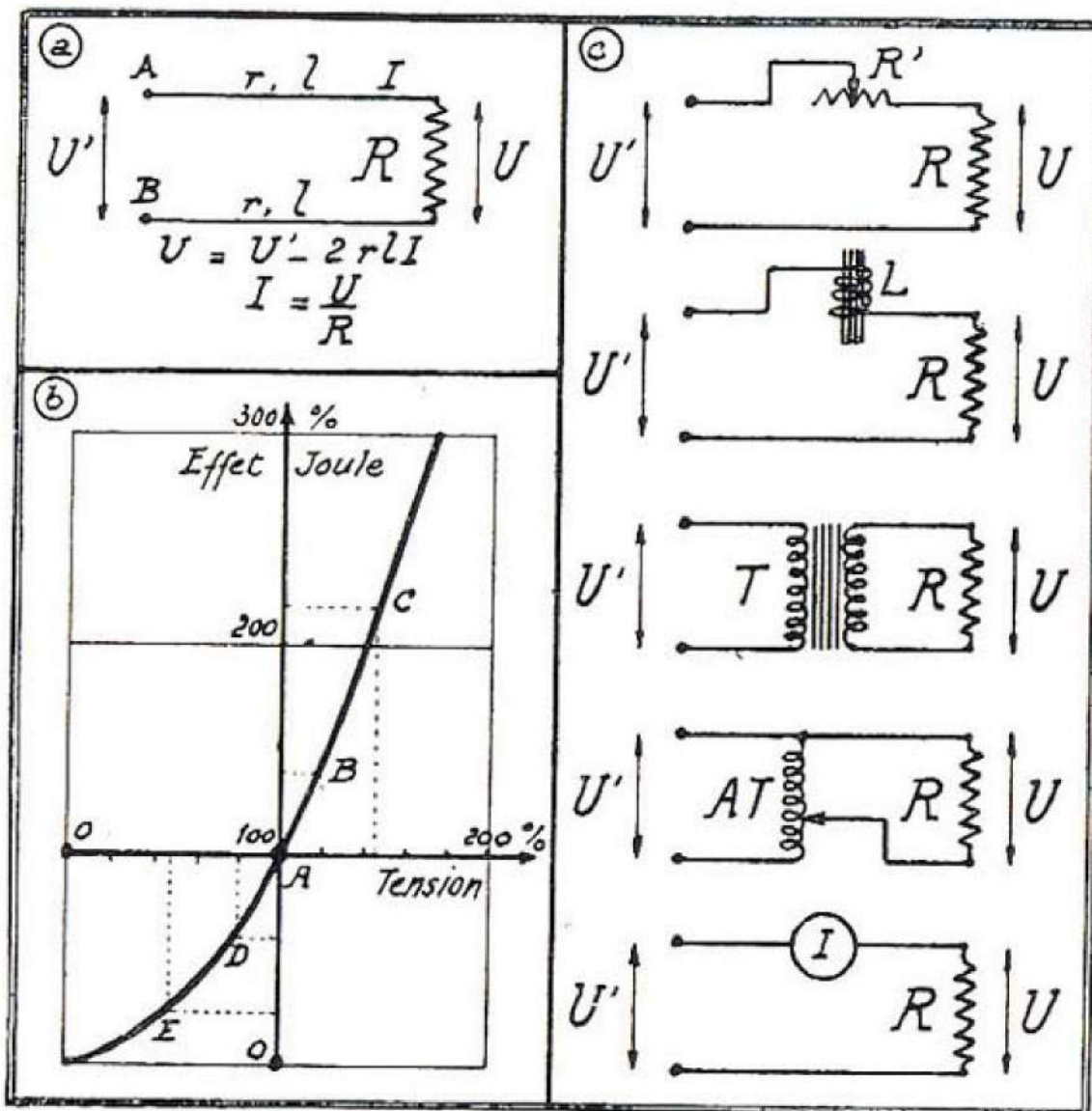


Fig. 12.

fil de longueur  $l$ , de section  $s$ , de densité  $d$  et de chaleur spécifique  $c$ .

$$0.24 \frac{U^2}{R} t = l s d c \theta$$

$\theta$  étant l'élévation de température. D'où :



$$0 = 0,21 \frac{t}{Rlsc} U^2 \text{ qui montre que l'élévation de température}$$

est proportionnelle au carré de la tension. Il peut s'ensuivre des dilatations brusques pouvant entraîner la destruction des éléments chauffants (tout au moins dans le cas d'éléments non métalliques) ou des effets néfastes sur les supports des résistances ou les réfractaires.

A vrai dire, il se produit en général rapidement une certaine autocompensation due à la transmission de la chaleur aux autres éléments constitutifs du four et à la petite variation de  $R$  ( $\alpha > 0$ ), donc de  $P$ , avec la température ;

2. — *Période de marche normale.* — Une surtension permanente sera d'autant plus à craindre, toutes choses égales d'ailleurs, que le coefficient de température  $\alpha$  des résistances sera plus faible.

*En pratique, la théorie précédente ne s'applique qu'à des cas extrêmes dus à l'inattention d'un constructeur ou d'un usager.* Les constructeurs sérieux évitent l'effet d'une tension insuffisante ou d'une tension exagérée par le choix de la puissance (plus élevée qu'il n'est nécessaire) et des réfractaires et par des dispositifs appropriés de réglage de la température et de la puissance.

La figure 12-b, illustration du tableau ci-dessous, montre comment varie l'effet Joule en fonction de la tension :

Valeur de la tension	Point de la courbe	Valeur de la puissance
0,50 U	E	0,25 P
0,80 U	D	0,64 P
U	A	P
1,20 U	B	1,44 P
1,50 U	C	2,25 P

#### Réglage de la puissance.

La formule  $P = \frac{U^2}{R}$  donne des moyens immédiats de faire varier la puissance débitée dans un four.

1) **Action sur U.** — On peut faire varier la valeur de la tension appliquée (fig. 12-c) soit au moyen d'un rhéostat, soit au moyen d'une self, soit au moyen d'un transformateur, soit au moyen d'un auto-transformateur, soit enfin au moyen d'un régulateur de tension.



*α) Rhéostat.* — Soient  $R'$  la résistance (variable) du rhéostat et  $R$  celle du four.

$$I = \frac{U'}{R + R'} \quad U' = RI + R'I \quad U = RI$$

La puissance totale  $P_t$  absorbée a pour valeur :

$$P_t = P + P' = RI^2 + R'I^2$$

la puissance  $P$  étant seule utilisée dans le four et la puissance  $P'$  étant dissipée sous forme de chaleur dans le rhéostat (analogie avec le rhéostat de démarrage d'un moteur).

Si l'emploi d'un rhéostat de réglage peut être intéressant dans le cas des fours de laboratoire ou exceptionnellement de certains fours industriels à courant continu, il ne le sera généralement pas pour les fours industriels alimentés en courant alternatif ;

*β) Inductance.* — Exceptionnellement, on peut employer une self pour le réglage de la tension, donc de la puissance, et par suite de la température d'un four alimenté en courant alternatif, mais l'amélioration du rendement se fait au détriment du facteur de puissance ;

*γ) Transformateur et auto-transformateur.* — Cette solution est adoptée pour certains fours à courant alternatif (en particulier surtout pour les fours à éléments chauffants non métalliques).

*δ) Régulateur d'induction.* — Emploi moins fréquent.

2) **Action sur R.** — Emploi des différents couplages indiqués précédemment : mise sous tension ou hors tension (réglage « par tout ou rien ») de tout ou partie des éléments chauffants, couplage série-parallèle (rapport des puissances : 1 à 4), couplage étoile-triangle (rapport : 1 à 3).

C'est généralement à ces dernière solutions que l'on a recours.

## B. RÉSISTANCES NON MÉTALLIQUES.

Ces résistances sont généralement : soit en carbone, soit en carbure de silicium.

### a) Carbone.

**Nature.**

On emploie le carbone sous deux variétés allotropiques :

1° Le carbone amorphe ;

2° Le graphite artificiel.

Pratiquement, ces substances ne sont pas pures, tout au moins



absolument pures (le graphite synthétique peut être obtenu actuellement avec 95,5 p. 100 de carbone au minimum).

Les pièces ou objets de carbone amorphe sont réalisés soit par usinage, soit par moulage sous pression d'une pâte convenable (coke de pétrole ou de gaz ou anthracite pulvérisé mélangé à du goudron servant d'agglomérant) et calcination à haute température.

Le graphite résulte du traitement à haute température (four électrique) du carbone amorphe.

Ce dernier passe plus ou moins complètement à l'état graphique lorsqu'il est porté et maintenu pendant un certain temps à très haute température. La résistance électrique varie alors sensiblement.

Il s'ensuit que c'est surtout sous la forme de graphite artificiel que l'on emploie le carbone pour la constitution des corps de chauffe : résistivité constante, plus grande résistance à l'oxydation, plus grande pureté (les impuretés — oxydes tels que silice, alumine et oxyde de fer — contenues dans le carbone de départ s'éliminent au cours de la graphitisation qui a lieu au four électrique ; par exemple, la silice sera d'abord réduite par le carbone pour donner du carbure de silicium qui cristallisera à plus haute température et finalement sera dissocié vers 2 200° C), travail facile (par ex., on peut préparer au tour des tubes spiralés).

### Propriétés.

Les principales propriétés du carbone, en ce qui concerne son emploi comme résistance électrique de chauffage, sont les suivantes :

Densité réelle de 1,80 (carbone amorphe) à 2,25 (graphite) :

Densité apparente (c'est-à-dire y compris les pores) évidemment moindre (par exemple 1,56 en moyenne pour le graphite Savoie-Acheson) :

Chaleur spécifique de l'ordre de 0,17 à 0,20 de la température ambiante et de 0,30 à 0,50 entre 1 000 et 2 000° C ;

Conductibilité calorifique faible (le charbon, surtout réduit en poudre, est un isolant thermique). Coefficient de dilatation également peu élevé (par ex.  $7,86 \cdot 10^{-6}$  pour le graphite Savoie-Acheson de qualité courante) :

Résistivité très grande, mais assez variable évidemment suivant la composition (en particulier, impuretés) et les conditions de fabrication (pression, durée et température de cuisson) : de l'ordre de 7 000 à 8 000 microhms:cm:cm<sup>2</sup> pour le carbone amorphe, de l'ordre de 1 000 à 1 1000 microhms:cm:cm<sup>2</sup> pour le graphite artificiel habituellement employé pour la fabrication des corps de chauffe. A titre de comparaison, la valeur de la



résistivité pour le nickel-chrome à 80/20 est d'environ 110 microhms:cm:cm<sup>2</sup> ; soit dix fois moins.

Coefficient de température  $\alpha$  négatif, ce qui facilite la répartition de la chaleur dans les petits fours de laboratoire à tube de carbone (la résistivité aux points chauds, donc en particulier au milieu du tube, étant faible, l'effet Joule  $qI^2$  est moindre en ces points, ce qui a tendance à réduire l'élévation de température et réalise une certaine autorégulation de la température) ;  $\alpha$  peut toutefois devenir positif (c'est le cas par exemple du graphite Savoie-Acheson à partir de 500° C environ : la résistance diminue de 20 p. 100 de 0 à 500° C, puis augmente pour atteindre la valeur initiale vers 1 200° C ; elle croît ensuite moins rapidement et l'augmentation est de 9 p. 100 à 1 800° C).

Le carbone est un des corps les plus réfractaires que l'on connaisse. Il commence à s'oxyder vers 500° C (carbone), 700° C (graphite). La température d'ébullition sous la pression atmosphérique est supérieure à 3 600° C. Mais le carbone distille rapidement à une température qui est de l'ordre de 2 200 à 2 800° C. Dans le vide, en particulier, cette distillation est plus intense. Aussi, l'emploi pratique des fours à carbone est-il limité vers 2 200-2 300° C. On a cependant réalisé des fours à argon jusque vers 2 800° C.

#### Remarques.

1° Pratiquement, les fours à corps de chauffe au carbone sont utilisés exclusivement pour l'obtention de hautes, voire de très hautes températures. Il s'ensuit que les puissances électriques mises en jeu sont relativement importantes, eu égard aux dimensions de la chambre de chauffe. La puissance est donnée par la loi de Joule. Or, la résistance  $R$  des corps de chauffe est faible : pour fixer les idées, un tube de graphite de 20 cm de longueur et de 1 cm<sup>2</sup> de section (section forcément grande, ne serait-ce que pour des raisons de fabrication et de résistance mécanique) aura une résistance électrique de l'ordre de  $1\,000 \times 20 = 20\,000$  microhms, soit 0,2 ohms. D'où la nécessité d'employer des courants d'intensité très élevée dont on réduit cependant la valeur par l'emploi de basses tensions (à partir de 10 V par exemple) obtenues généralement au moyen de transformateurs statiques.

2° La nécessité d'avoir recours à des courants importants pose également des problèmes de construction parfois assez délicats à résoudre pour la réalisation des amenées de courant et le refroidissement de ces dernières. En particulier, les contacts doivent être particulièrement étudiés (cônes par ex.).

3° De même, les constructeurs doivent prendre certaines précautions soit pour éviter la détérioration ou la destruction rapi-





de des corps de chauffe par l'oxydation, soit, dans certains cas, pour éviter l'action du carbone sur la substance à traiter dans le four ou sur les réfractaires et réciproquement.

### Formes.

Les corps de chauffe en carbone se présentent habituellement sous une des formes suivantes :

- 1° Simples morceaux de charbon ;
- 2° Grains de charbon ;
- 3° Plaques ou briques ;
- 4° Barres ;
- 5° Tiges ;
- 6° Tubes simples ou découpés ;
- 7° Creusets.

1) **Simple morceaux de charbon** (coke de pétrole, charbon de cornue) ou de graphite convenablement disposés dans une auge en carborundum (fig. 13-a) avec amenées de courant en graphite : cas du four américain Baily qui, à notre connaissance, n'est pas employé en France et qui tend d'ailleurs à disparaître ; nous ne le citons donc qu'à titre documentaire ; il a été utilisé en particulier pour certains traitements thermiques ;

2) **Charbon granuleux** constitué par des grains ou petits morceaux de charbon (graphite ou coke par ex., grosscur des grains : de 1 à 6 mm, densité apparente de 0,9 par ex.), mélangés éventuellement à d'autres substances (carborundum en poudre ou silicates par ex.) qui deviennent progressivement conducteurs aux températures élevées (mélanges connus généralement sous le nom de « Kryptol ». Ces grains de charbon entourent la chambre de chauffe : moufle, tube, creuset (fig. 13-b). Le courant est amené au moyen de deux électrodes de graphite qui s'enfoncent dans la masse (fig. 14) où la densité de courant peut être par ex. de 5 A:cm<sup>2</sup>.

Les avantages des fours à grains de charbon sont les suivants : construction simple, prix d'achat peu élevé, frais d'entretien très réduits, non obligation en général de disposer d'un rhéostat ou de tout autre dispositif de réglage. Ce dernier avantage provient de ce que le charbon granuleux a une résistance électrique élevée, due surtout à la résistance de contact des grains ; cette dernière résistance dépend d'ailleurs de la compression plus ou moins grande du mélange ; à la mise en route, l'intensité du courant est faible ; au fur et à mesure que la température s'élève, la résistance décroît et par suite le courant augmente ; la montée en température est ainsi en quelque sorte progressive et automatique.

Par contre les fours de ce type ont un grave inconvénient ; ils ne permettent guère d'obtenir une température uniforme et constante. Pour uniformiser la température, les constructeurs ont eu recours à différentes dispositions : répartition du charbon granuleux le long de la chambre de chauffe suivant un dessin préétabli ou empirique, compression convenable du mélange d'ailleurs judicieusement choisi, disposition appropriée des matériaux réfractaires constituant l'enveloppe du four.

Quelles que soient les précautions prises, il est bien difficile de réaliser et de maintenir une compression uniforme et une homogénéité suffisante des grains du mélange et, par suite, la résistivité du corps de chauffe n'est constante ni dans l'espace ni dans le temps : c'est pourquoi le four à charbon granuleux est peu répandu. Il ne répond pas en effet aux exigences habituelles

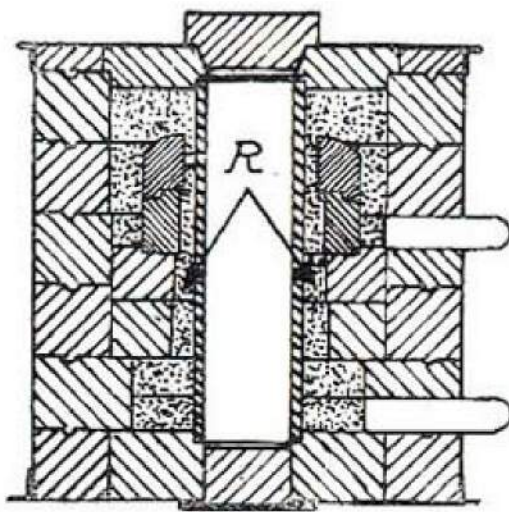


Fig. 14.

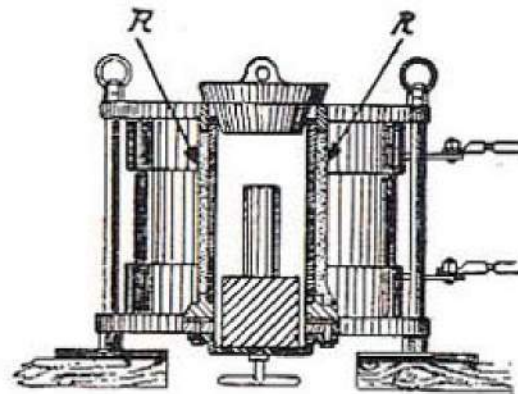


Fig. 15.

des usagers en ce qui concerne la constance de la température dans l'espace utile de la chambre de chauffe. Toutefois, on y a souvent recours pour certaines opérations ne demandant pas une très grande précision de la température ou pour des applications particulières où un autre genre de four ne peut être réalisé facilement (ex. : essais des réfractaires).

A titre d'exemple, la figure 15 se rapporte à un four pour essais de matériaux réfractaires ou autres applications.

Un auto-transformateur ou un rhéostat permet de faire varier la tension de 60 à 90 V. Température maximum de 1 400-1 500° C pour les grands fours, 1 700-1 800° C pour les petits fours.

La figure 14 est relative à un four de trempe pour forets et mèches. Un transformateur permet de faire varier la tension (donc également la puissance) de 10 en 10 V :



Principaux types de fours industriels et semi-industriels à carbone classés suivant la nature du corps de chauffe.

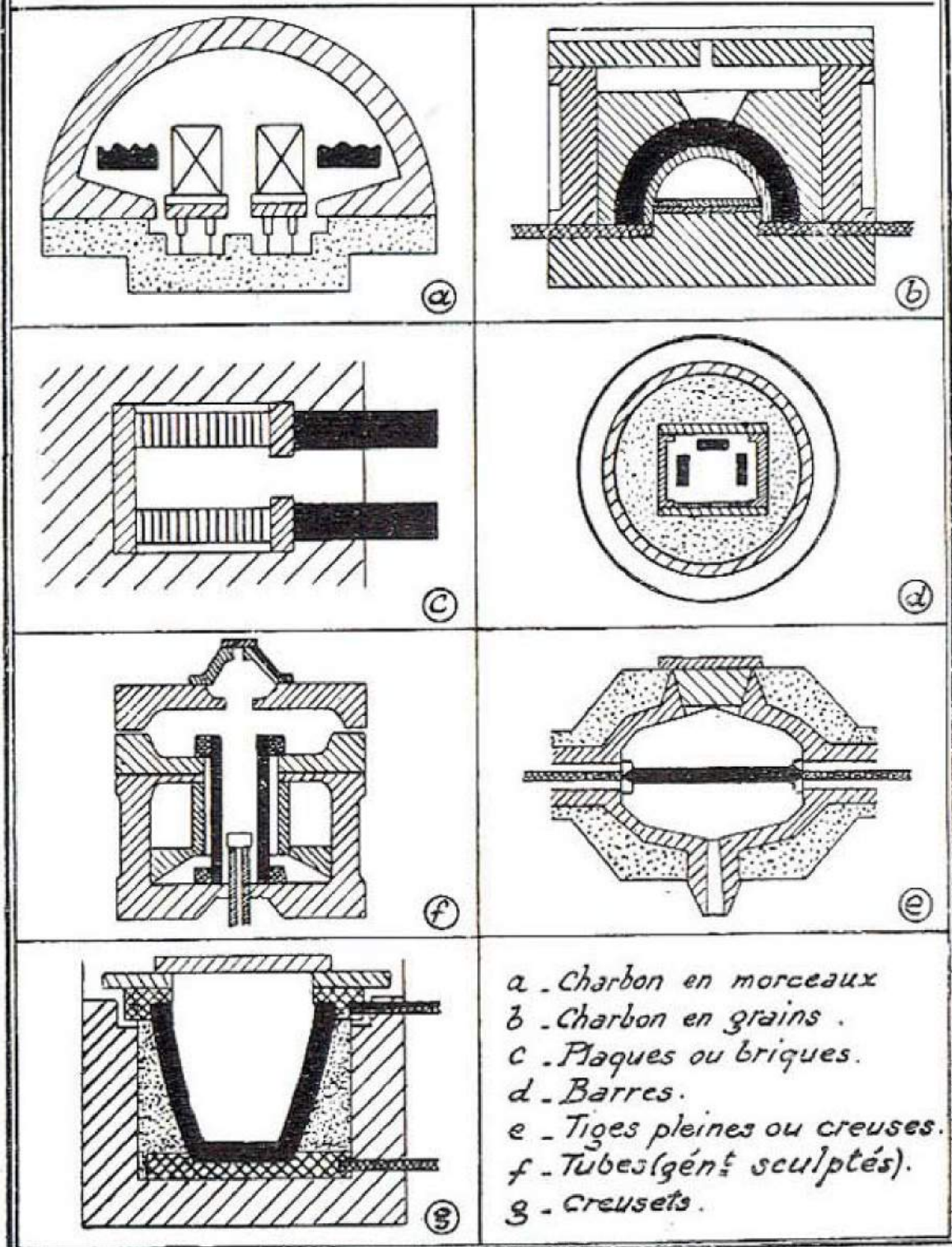


Fig. 13.

3) Plaques ou briques de graphite (fig. 13-c) convenablement pressées les unes contre les autres (comme dans les rhéostats de réglage employés dans certains laboratoires) : par ex., four américain Hoskins employé pour la fusion ou le traitement thermique de petites quantités de métal : à notre connaissance, ce four n'est pas utilisé en France : nous ne l'indiquons qu'à



titre documentaire. Mentionnons également, dans le même but, les plaques de morganite (aggloméré à base de carbone) utilisées dès 1925 dans la construction de fours de porcelaine en Suède ; la durée de ces plaques, d'une longueur de 2 m, d'une largeur de 0,40 m, et d'une épaisseur de 0,03 m, a pu atteindre 8 mois (1 050-1 100° C) ;

4) **Barres de carbone ou de graphite** : par ex., barres de graphite découpées en épingles à cheveux (fig. 13-d) employées comme corps de chauffe dans les fours à vide de la Compagnie Générale de Radiologie et prévues généralement pour être utilisées jusqu'à 2 200° C ; les puissances habituelles sont de 75 et de 120 kW environ.

L'appareil de 75 kW, dont les dimensions utiles (dimensions du volume utile, c'est-à-dire de la partie de la chambre de chauffe qui se trouve à température constante) sont les suivantes (pour 2 200° C) :

hauteur de 115 mm, largeur de 150 mm, longueur de 600 mm.

Le four comporte trois enceintes métalliques concentriques. Dans l'espace annulaire constitué par les deux premières, circule l'eau de refroidissement qui maintient les joints à une température suffisamment basse pour en assurer la longue durée ainsi que l'étanchéité. La troisième enceinte a un rôle d'écran thermique entre le réfractaire et l'espace refroidi.

La chambre de chauffe est délimitée par une sole mobile en graphite qui coulisse dans une rainure, par les autres parois (piédroits et voûte) également en réfractaire et par deux culasses mobiles fermant les extrémités.

La culasse du fond comporte les amenées de courant, en cuivre rouge, refroidies par circulation d'eau et soutient les trois résistances qui se trouvent à l'intérieur de la chambre de chauffe.

La culasse postérieure comporte deux ouvertures : la plus grande permet la visite de la partie réfractaire, la plus petite sert pour le chargement du four.

Les joints des culasses sont tous refroidis par circulation d'eau.

L'alimentation des barres de graphite se fait au moyen d'un transformateur dans l'air à prises multiples, sous une tension moyenne de l'ordre de 25 V, le réglage étant soit manuel, soit éventuellement automatique (pyromètre à radiation totale agissant sur une cellule photo-électrique qui actionne un contacteur, ce dernier commandant le réglage du transformateur d'alimentation).

L'appareil est complété par un groupe de pompage pour l'obtention du vide. On peut ainsi obtenir un vide correspondant à 0,001 mm de mercure.



Ce four est normalement monophasé.

Le four de 120 kW est par contre alimenté normalement par un transformateur triphasé dans l'huile. Les dimensions utiles sont les suivantes : hauteur de 150 mm, largeur de 150 mm, longueur de 120 mm. La montée à la température de 2 000° se fait en 2 h environ et le vide précédent est obtenu en 3 h environ.

La durée des résistances de graphite (qui travaillent normalement dans le vide) est très élevée. Par exemple, un tel four a fonctionné quotidiennement, à notre connaissance, pendant trois ans sans que les corps de chauffe aient été remplacés.

Le nombre des fours de ce genre en service actuellement est de l'ordre de 15.

Signalons également certains fours utilisés pour la brasure du tungstène en atmosphère d'hydrogène ; ils comportent des barres de graphite percées d'alvéoles et les amenées de courant en bronze sont refroidies par un courant d'eau.

5) **Tiges de graphite** (fig. 13-e). — Le four à rayonnement Fenwick est constitué par un cylindre horizontal en tôle garni intérieurement d'un revêtement calorifuge et d'un pisé réfractaire cuit en place ; ce cylindre comporte deux chemins de roulement et repose sur des galets ; on lui donne en principe un mouvement d'oscillation autour de son axe ; le corps de chauffe est formé par une tige de graphite alimentée à une tension relativement faible (par ex. 25-60 V) que l'on peut faire varier au moyen d'un transformateur.

Les fours de ce type ont fait l'objet de perfectionnements importants : amélioration des amenées de courant (d'abord emploi combiné de pièces en graphite et en carbone amorphe, puis pièces métalliques à circulation d'eau avec tampon complémentaire d'usure en graphite) ; emploi d'un chariot porte-électrode automatique permettant l'escamotage facile et rapide du corps de chauffe dans un éteignoir pendant les opérations de chargement, ce qui réduit sensiblement l'usure du graphite ; réduction des pertes thermiques aux extrémités du four ; emploi d'électrodes à section tubulaire, c'est-à-dire de tiges creuses, permettant de réduire la puissance superficielle, donc d'utiliser le graphite à une température moindre et par suite dans de meilleures conditions de longévité. Bien entendu, le jeu des dilatations est prévu.

Ces fours sont monophasés.

Les fours à rayonnement ont été jusqu'alors surtout utilisés pour la fusion des fontes spéciales et de la silice et également des bronzes. Le nombre d'appareils en service en France est actuellement assez important.

Les caractéristiques usuelles des fours sont les suivantes :

Capacité kg	Puissance max. appliquée kVA	Temps de fusion (mn)		
		Fontes	Bronzes	Aciers
100	100	40	20	48
200	175	42	22	53
300	225	48	25	60
500	325	53	28	70
1000	525	65	34	85

L'installation la plus importante comporte deux fours monophasés d'une capacité unitaire de 1 600 kg de fonte malléable, chargée solide froide et d'une puissance individuelle de 500 kW. Les électrodes tubulaires en graphite ont les caractéristiques suivantes : longueur utile de 1 350 mm, diamètre extérieur de 110 mm, diamètre intérieur de 55 mm ; poids de 17 kg ; durée, pour une température de coulée de 1 500° C, de 11 à 12 fusions en moyenne.

Le four le plus important a une capacité de 2 000 kg d'acier de moulage et une puissance de 705 kW ; température de coulée de 1 700° C.

6)  **Tubes de carbone ou plutôt de graphite (fig. 13-d).** — Pour obtenir une résistance mécanique suffisante et éviter la destruction rapide du corps de chauffe aux très hautes températures par volatilisation du carbone, on est amené à adopter une section de tube relativement importante, ce qui entraîne une résistance très faible (donc l'emploi de courants très élevés) et un grand encombrement.

Pour obvier — partiellement tout au moins — à ces inconvénients, on a eu recours à diverses solutions :

Soit que l'on ait constitué le tube par des anneaux empilés les uns sur les autres et serrés dans une monture appropriée, la résistance électrique étant essentiellement due aux résistances de contact des différents anneaux (cette solution est restée dans le domaine du laboratoire) ;

Soit que l'on ait coupé transversalement le tube de fentes augmentant la longueur parcourue par le courant, donc en définitive la résistance électrique du tube, et disposées éventuellement de façon à réaliser une résistance plus grande aux extrémités afin d'obtenir une meilleure répartition de la chaleur ;

Soit enfin que l'on ait découpé le tube en forme d'une spirale



convenablement étudiée pour réaliser la résistance électrique voulue et une grande uniformité de la température.

Ex. : le four normal Culmann est prévu pour des températures pouvant atteindre 2 300° C (température utile à la surface d'un corps noir placé dans le four) avec chauffage dans le vide ou dans un gaz neutre. Il comporte un corps de chauffe tubulaire vertical en graphite sculpté (entaillé ou spiralé), ce qui permet, grâce à l'augmentation de la résistance électrique obtenue par le découpage, d'éviter l'emploi de trop fortes intensités de courant et d'utiliser des tensions relativement élevées. Le corps de chauffe, facilement remplaçable, est maintenu à ses extrémités, dans la carcasse du four, au moyen de colliers à serrages élastiques permettant le jeu des dilatations. L'enceinte du four est constituée par des pièces métalliques à double enveloppe traversées par un courant d'eau assurant le refroidissement des parties extérieures. L'étanchéité est assurée par des joints en caoutchouc portant sur des surfaces froides (refroidissement par eau). La matière à traiter peut être placée dans un creuset, de nature appropriée, non attaquable par le carbone. Le creuset, une fois l'opération terminée et le couvercle soulevé, peut être sorti du four très simplement au moyen d'un vérin hydraulique. Le réglage de la puissance, donc de la température, se fait au moyen d'un transformateur abaisseur de tension qui, par un peu d'inverseurs (et éventuellement par l'emploi simultané d'un auto-transformateur supplémentaire), permet de faire varier la tension secondaire (appliquée au four) dans les limites nécessaires : de 2 à 62 V par ex. Le four est complété par une pompe à vide. Les modèles courants (fours monophasés) ont les caractéristiques suivantes :

Diamètre du tube cm	Longueur totale du tube cm	Longueur utile du tube cm	Puissance maximum kW
52 ou 58	260	80	15
52 ou 58	360	180	20
80	360	160	25
120	360	130	30

Le chauffage dans le vide a les principaux avantages suivants :

Le corps de chauffe a une longue durée, car il ne se trouve pas en atmosphère oxydante ;

Le vide assure le dégazage des métaux en traitement :



La mesure des températures au pyromètre optique est facilitée par le fait que l'atmosphère du four est limpide.

Le nombre des fours de ce type en service actuellement — la plupart en France — dépasse 150.

7) **Creusets en carbone.** — A titre d'exemple, le four anglais Morgan (fig. 13-g) comporte un creuset, en aggloméré à base de carbone, placé dans un corps cylindrique en cuivre revêtu intérieurement de matière calorifuge et réfractaire. Ce creuset sert à la fois de récipient pour le métal à fondre et de corps de chauffe, l'effet Joule ou transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique se produisant dans la matière même du creuset. Celui-ci est muni d'un doublage en matière spéciale qui le garantit contre l'oxydation et, de plus, en vertu de ses propriétés isolantes, interdit au courant le passage à travers le métal placé dans le creuset. Ce four est monophasé. Sa puissance normale est de 30 kW environ. Un transformateur abaisseur doit être prévu pour permettre l'alimentation aux tensions voulues (de 16 à 32 V, pour tenir compte également de la variation de la résistance électrique du creuset avec la température et avec l'usure). Le nombre de fours de ce genre en service actuellement en Europe est très réduit. En France il n'en existe que quelques exemplaires (fusion de bronze). La durée des creusets, fonction en particulier de la nature du métal et des conditions de travail, peut être évaluée, en moyenne, à 60 fusions pour les fours à marche continue et de 40 à 50 fusions pour les fours à marche intermittente.

## 2) **Carbure de silicium.**

### **Nature.**

Le carbone s'oxyde facilement à l'air. On a cherché à pallier cet inconvénient, soit en transformant superficiellement plus ou moins profondément le carbone en carbure de silicium moins oxydable (ex. : silundum ; silfrax,  $\rho = 0,04 \text{ ohms:cm:cm}^2$ ) soit en utilisant des résistances en carbure de silicium plus ou moins pur (siloxicon par ex.).

Pratiquement, on utilise maintenant, d'une façon courante, des baguettes de carbure de silicium obtenues au four électrique à haute température. Il en existe actuellement 4 sortes (ordre alphabétique) :

Les baguettes **global**, fabriquées par la Global-Corporation (American Resistor Cy, usine de Niagara Falls, U.S.A.) :

Les baguettes de **quarzilite**, fabriquées en Suisse (Etablissements Kummler et Matter, à Aarau) et qui, à notre connaissance, sont utilisées seulement dans ce pays :



Les baguettes **savoie**, mises au point et fabriquées en France par la Société des Electrodes de la Savoie ;

Les baguettes de **silit**, fabriquées en Allemagne (Sté Siemens).

A titre documentaire, les baguettes « savoie » sont obtenues en partant d'un mélange en proportions convenables de carbure de silicium, de silicium et de brai de goudron de houille : des traitements successifs à 1 000 et à 2 000° C permettent d'éliminer les matières volatiles du brai et de transformer le carbone résidu du brai, en carbure de silicium ; en définitive, les baguettes sont constituées par du carbure de silicium aggloméré par du carbure de silicium.

### Propriétés.

Densité moyenne : 2,15-2,2 (environ 8,5 pour le nickel-chrome à 80/20) ;

Résistivité très élevée : généralement de l'ordre de 100 000 microhms:cm:cm<sup>2</sup> pour les éléments industriels ; par ex. de 90 000 à 120 000 pour les baguettes industrielles « global », de 200 000 à 1 000 000 pour les baguettes domestiques « global », 100 000 pour les baguettes de « silit », de 100 000 à 200 000 pour les baguettes « savoie », contre 110 pour le nickel-chrome à 80/20.

Coefficient de température  $\alpha$  très faible : par ex., pour la « silit », la résistance diminue progressivement jusqu'à ce que la température atteigne environ 900° C, puis augmente ensuite légèrement ; variation du même genre pour le « global ». A vrai dire, la loi de variation de  $\alpha$  en fonction de  $t$  est complexe et souvent assez mal déterminée. Mais, aux températures usuelles d'emploi,  $\alpha$  est pratiquement positif. Il s'ensuit que l'on n'a pas à craindre l'augmentation progressive de la puissance absorbée que causerait la diminution de la résistance au fur et à mesure de l'élévation de la température ;

Coefficient de dilatation : il est très variable, pour le global par exemple il est de l'ordre de  $0,5-1 \times 10^{-5}$  cm:m et il est moins élevé au-dessous de 800° C environ qu'au-dessus de cette température critique. Pour assurer un contact convenable et laisser libre jeu à la dilatation et à la contraction, on utilise des montages spéciaux (fig. 17 et 18) ;

Température pratique maximum d'emploi dans les fours industriels : 1 400-1 500° C. A une température plus élevée, la durée des baguettes est considérablement réduite (désagrégation, oxydation rapide et vitrification vers 1 600-1 700 ° C, surtout en présence de certains gaz, tels que le gaz d'éclairage) ;

Puissance spécifique superficielle : la charge superficielle

maximum que l'on peut adopter dépend, en particulier, de la nature des baguettes, de la température à laquelle elles doivent fonctionner et de la constitution des fours. Les constructeurs donnent tous renseignements à ce sujet. A titre indicatif, pour les baguettes du type « global », on admet parfois une charge maximum de  $35 \text{ W}:\text{cm}^2$  à l'air libre et de  $22 \text{ W}:\text{cm}^2$  dans les fours fermés habituels ; mais en général, on adopte une valeur normale de 16 à  $9 \text{ W}:\text{cm}^2$  suivant la température ( $900\text{-}1\,500^\circ \text{C}$ ). Pour les baguettes du type « silit », la courbe

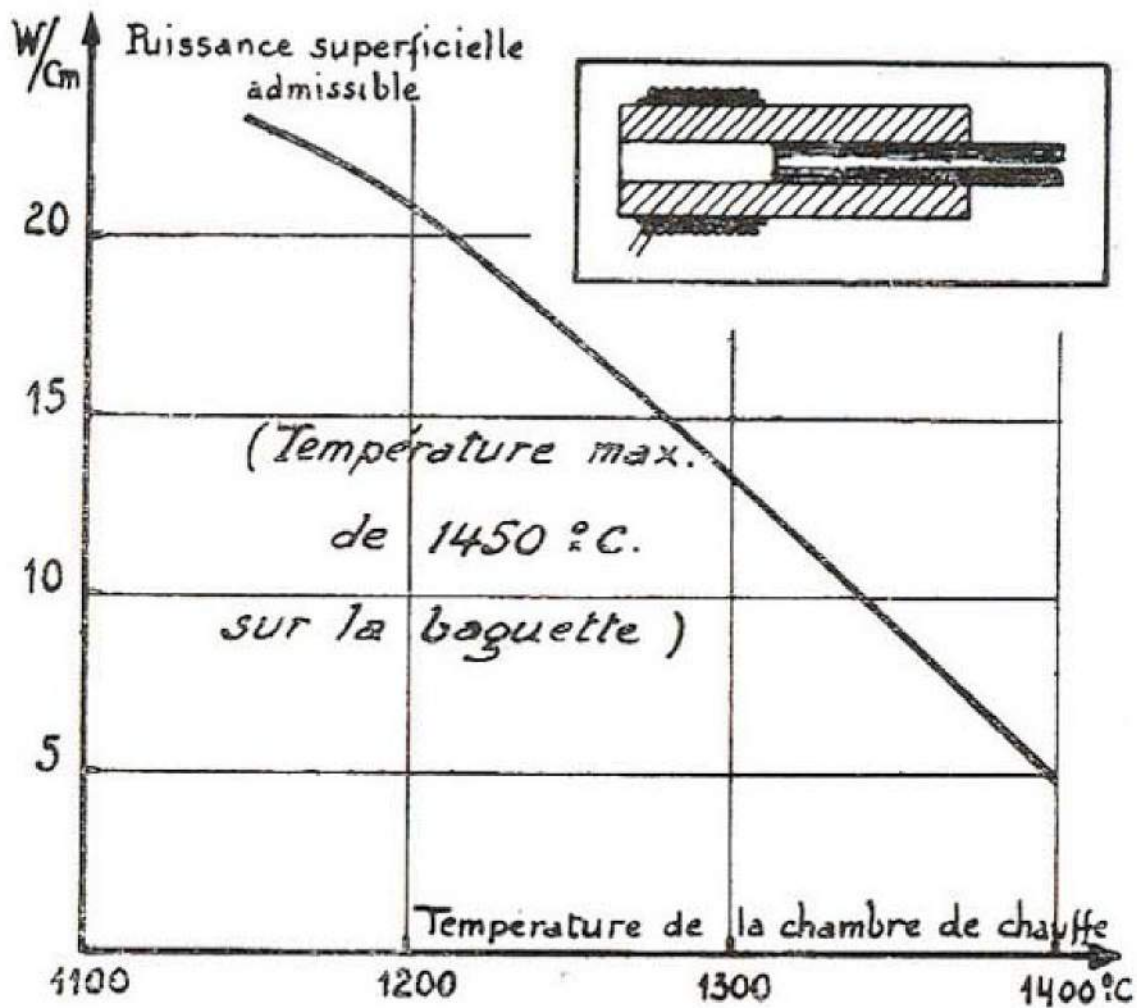


Fig. 16.

de la figure 16 donne la valeur maximum admissible pour des températures de service des fours de  $1\,100$  à  $1\,400^\circ \text{C}$ . On a toutefois intérêt — et on ne saurait trop insister sur ce point — à faire travailler les baguettes *en paresseuses*, c'est-à-dire sous une charge spécifique moindre, afin d'en augmenter la durée ;

Réactions chimiques : d'une manière générale, l'action chimique est possible chaque fois que la matière constituant la baguette peut être amenée à jouer le rôle d'agent réducteur.



Pour fixer les idées, mentionnons, pour la « silit », les réactions suivantes à la température d'incandescence :

Action sur la « silit » des corps à réaction basique, comme les alcalins, les alcalino-terreux et les oxydes de métaux lourds, ainsi que les silicates et borates :

Oxydation progressive de la « silit » par l'air et l'acide carbonique, cause essentielle de l'augmentation de la résistance électrique (vieillessement) des baguettes avec le temps de service ;

Action analogue des mélanges de gaz réducteurs généralement utilisés dans certains procédés de recuit et de chauffage, pour autant qu'ils ne comportent pas trop d'hydrogène :

Action très forte de la vapeur d'eau ;

Décomposition de la « silit » par l'hydrogène et les mélanges gazeux à forte teneur en hydrogène.

Pour les éléments « global », notons en particulier les actions suivantes :

Oxydation légèrement progressive à partir de 1 200° C en présence d'oxygène, et surtout d'ozone ;

Action des oxydes : CuO à partir de 800° C, Fe<sup>2</sup>O<sup>3</sup> à partir de 1 200° C, Ni<sup>2</sup>O<sup>3</sup> de 1 300° C, CaO et MgO de 1 000° C :

Action des métaux alcalins (K, Na, etc., fondus), du plomb, du chlore (à partir de 600° C), du soufre (à partir de 1 000° C), de CO (légère action), de certains sels (borax et cryolite fondus et vaporisés, nitrate et chlorate de potassium fondus et liquides).

Pratiquement, les actions précédentes s'effectuent sur les diverses sortes d'éléments et sont plus actives si la température est plus élevée.

Lorsqu'on se trouve en présence d'un des cas précédents, il est généralement facile d'éviter ou de limiter ces actions destructives par des mesures ou par des dispositifs appropriés (mouffles par ex.).

### Formes et dimensions courantes.

Les baguettes « global » du type « standard » se présentent sous forme de tiges pleines, de section relativement importante, donc offrant une bonne résistance mécanique. La partie utile (chauffante) est de composition homogène. Les extrémités sont métallisées dans toute leur masse et la résistance diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche des extrémités. Il s'ensuit que la température (effet Joule :  $q I^2$ ) va rapidement en décroissant au delà de la partie utile, ce qui est indispensable si l'on veut éviter la destruction rapide des extrémités de la

baguette, de leur support et des réfractaires voisins si l'on veut réduire les pertes de chaleur.

Les éléments de petite puissance ou montés dans des fours à moyenne température (par ex. 1 000° C) sont à refroidissement naturel ; les autres sont à refroidissement par eau (fig. 17 et 17 bis-a).

Pour les éléments industriels, les caractéristiques normales sont les suivantes :

Diamètre .....	8 à 60 mm
Longueur (partie chauffante seulement) ..	125 à 1 500 mm
Tension applicable par baguette .....	30 à 220 V
Intensité .....	12 à 300 A
Puissance unitaire .....	0,36 à 60 kW

D'autres types de baguettes « global » ont été mises au point plus récemment (un peu avant la guerre), à savoir (fig. 17 bis) :

1) Les baguettes du type « pin » (fig. 17 bis b et c) comportent une partie chauffante dont la résistivité est de  $1 \times 10^5$  microhms:cm:cm<sup>2</sup> à 1 900° F (1 038° C) et dont les extrémités ont une résistivité de  $3 \times 10^3$  microhms:cm:cm<sup>2</sup> à 300° F (140° C). La pièce terminale a la même résistivité que les extrémités de la baguette et son extrémité extérieure est métallisée afin d'assurer un bon contact avec le collier d'amenée de courant. La longueur chauffée peut atteindre, croyons-nous, 1 500 mm et la puissance unitaire 28 kW environ.

2) Les baguettes du type « AT » (fig. 17 bis-d) dont la partie chauffante et la pièce terminale sont réunies en une seule pièce et dont les résistivités respectives ont les mêmes valeurs que pour les baguettes du type « pin ». La longueur chauffée max. serait de 850 mm et la puissance max. de 8,3 kW environ. Ces baguettes s'emploient pour l'équipement des fours de laboratoire.

3) Les baguettes tubulaires utilisées pour les petits fours et les fours de laboratoire. Longueurs : 300-1 500 mm ; diamètres : intérieur de 30 mm et extérieur de 75 mm.

Les baguettes de « silit » (de fabrication plus récente que les baguettes « global » type « standard ») sont des tiges pleines ou creuses (en principe, creuses au-dessus de 6 mm de diamètre) en matière homogène. Pour éviter un échauffement exagéré des extrémités, on les métallise ou bien, pour les températures supérieures à 1 000° C on les renforce au moyen de manchons de même nature (section augmentée, donc résistance électrique diminuée, donc effet Joule moindre) à





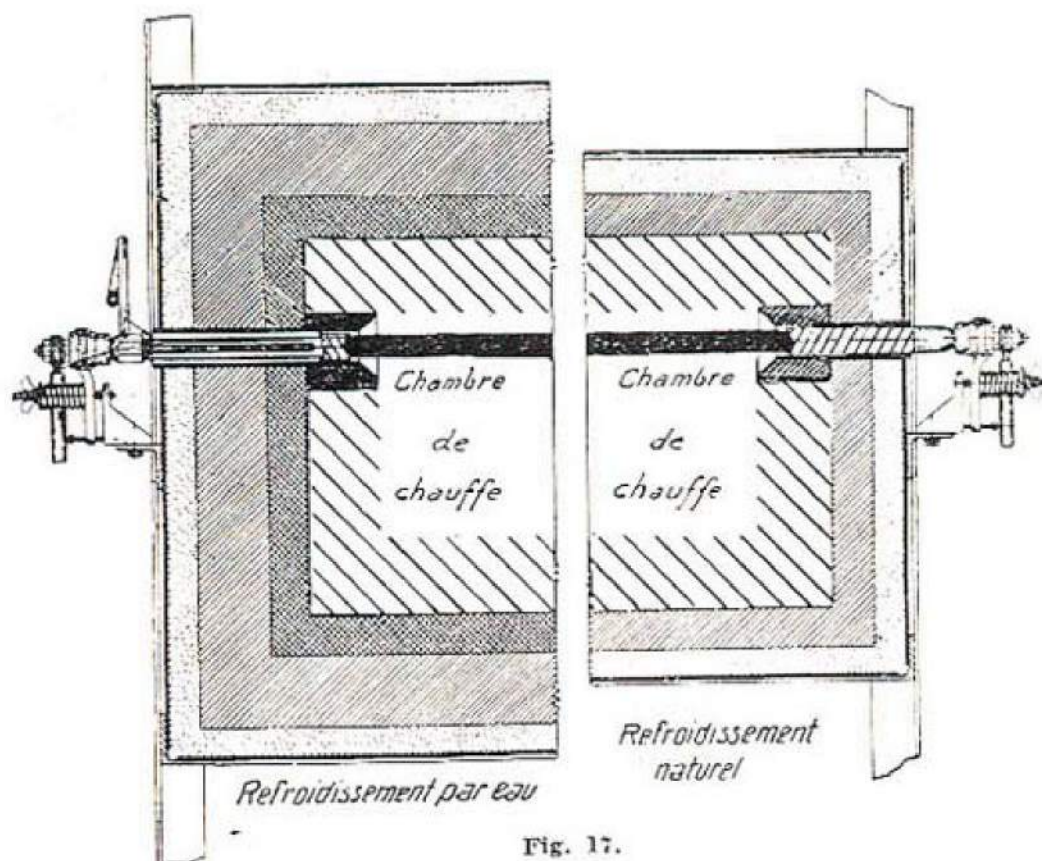


Fig. 17.

l'extrémité desquels on fixe les connexions métalliques (pression des fils par enroulement et métallisation externe). Ces baguettes sont à refroidissement naturel (fig. 16 et 18).

Les dimensions habituelles sont les suivantes :

Diamètre (partie incandescente) ..	4 à 30 mm
Longueur (partie incandescente) ..	60 à 800 mm
Longueur totale de la baguette (partie incandescente + bouts renforcés) .....	120 à 1 800 mm

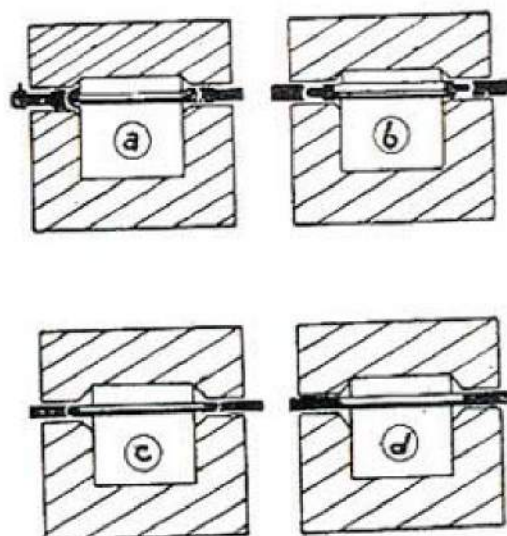


Fig. 17 bis.

Tension applicable par baguette ..	12 à 222 V
Puissance unitaire .....	0,060 à 18 kW (18 kW à 1 100° C et 3,75 kW à 1 400° C pour la même baguette).

Les baguettes « savoie », plus récentes que les précédentes, présentent des propriétés analogues. Elles sont renforcées aux extrémités par des manchons de moindre résistivité que la partie chauffante.

Les dimensions des baguettes actuellement offertes sur le marché sont les suivantes :

Diamètre (partie incandescente) .....	6-8-12-14-18 mm
Longueur (partie incandescente) .....	60 à 800 mm
Longueur totale .....	210 à 1 500 mm

Toutes les valeurs qui précèdent sont des valeurs limites (minima et maxima) : mais, pratiquement, à chaque valeur du diamètre correspond une ou plusieurs séries de baguettes de longueurs différentes et standardisées et dont la puissance est fonction de la température à laquelle on veut les faire travailler.

#### Durée des éléments.

C'est un facteur capital, bien plus important que pour les résistances métalliques (les résistances habituelles en nickel-chrome à 80/20 ont en effet une très longue durée aux températures usuelles d'emploi inférieures à 1 000° C).

Les fabricants indiquent des durées moyennes de l'ordre de 1 000 à 2 000 h suivant les températures et les conditions d'emploi, pour des températures normales, c'est-à-dire de 1 200 à 1 450° C à la surface des baguettes.

Les résultats d'exploitation montrent que la durée des éléments — qui dépend, comme nous allons le voir, d'un grand nombre de conditions — est assez variable. On peut admettre, en principe, qu'elle atteint de 1 500 à 2 000 h en moyenne, pour des températures de l'ordre de 1 300 à 1 350° C dans la chambre de chauffe de fours correctement construits et utilisés et à marche intermittente.

A titre d'exemples :

La durée moyenne, relevée au cours de plus de dix années de service, d'un four de 40 kW utilisé pour la trempe d'acier rapide, four à marche intermittente (8 h par jour ouvrable) fonctionnant à 1 350° C environ et entièrement équipé avec des baguettes de carbure de silicium à refroidissement naturel, ressort à environ 1 500 h.



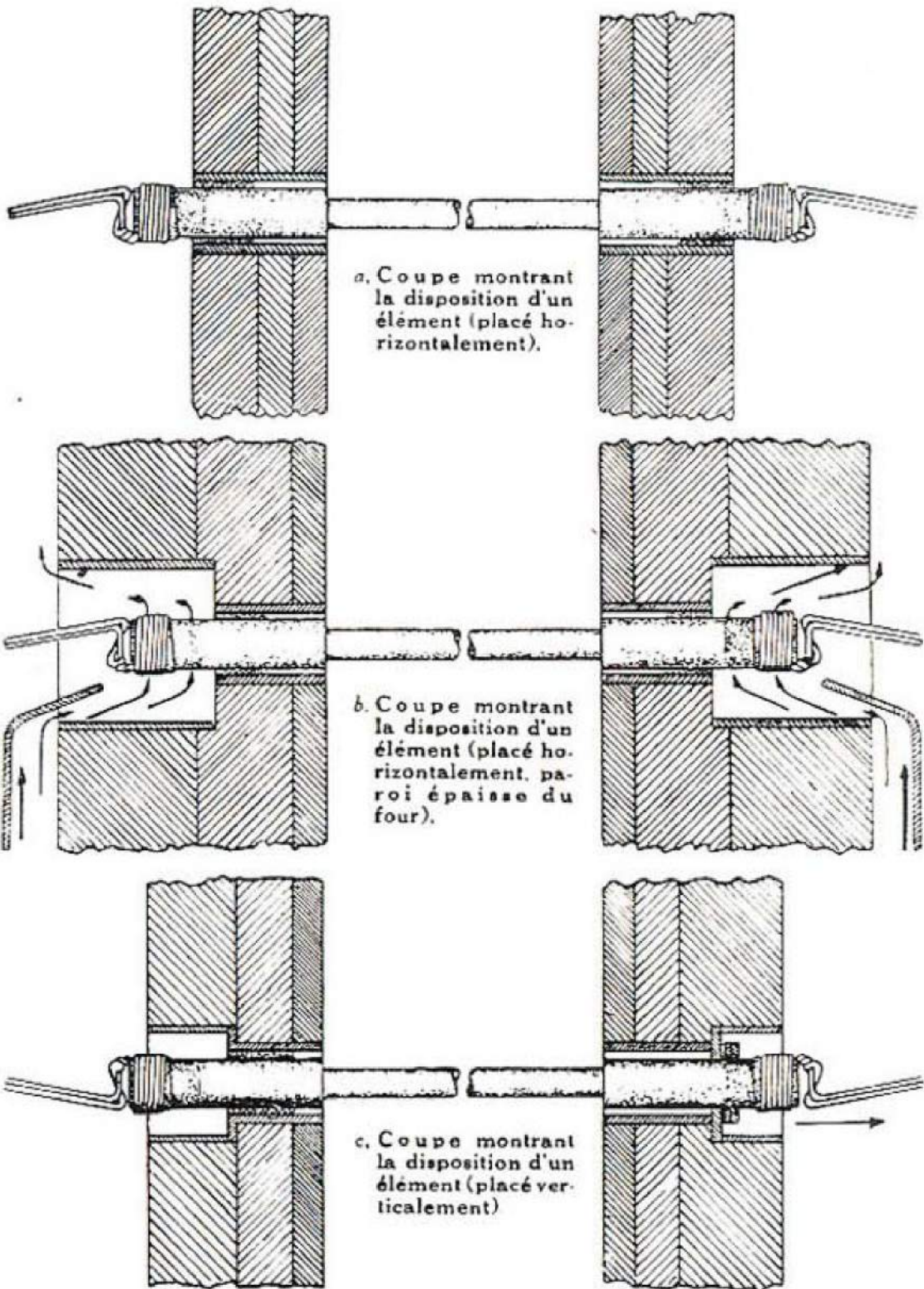


Fig. 18.

La durée moyenne, relevée au cours de plus d'une année de service, de baguettes de carbure de silicium à refroidissement par eau équipant la chambre de cuisson à 1 380-1 400° C d'un four à marche continue de porcelaine dure en atmosphère réductrice, ressort à environ 1 750 h.

Bien entendu, la durée s'accroît rapidement lorsque la température d'emploi est plus faible et si le chauffage est continu ; au-dessous de 1 350° C, la longévité des éléments peut être considérable.

Cette durée — pour laquelle aucune garantie en peut généralement être donné ni par le fournisseur de baguettes ni par le constructeur du four, lesquels ne savent pas comment le four sera pratiquement utilisé — dépend de plusieurs facteurs importants. Ces facteurs sont relatifs :

Soit à la construction ;

Soit à l'utilisation du four.

Les principaux sont les suivants :

Dessin et profil du four, montage des éléments ;

Température normale du four, régulation de la température ;

Nature de l'atmosphère du four ;

Conditions de mise en température des baguettes ;

Vieillessement des baguettes.

#### 1) Dessin et profil du four, montage des baguettes.

Le four doit être conçu, évidemment, de façon que les éléments soient utilisés dans les conditions optima de durée (examen à faire aux points de vue mécanique, électrique et chimique).

Le libre jeu des contractions et dilatations successives de la matière constituant les baguettes, contractions et dilatations particulièrement fréquentes dans le cas des fours à marche discontinue, est assuré par ex. par un système de connexions avec ressort compensateur (fig. 17). Le montage de ce dispositif doit être particulièrement soigné si l'on veut :

éviter tout effort mécanique qui briserait les baguettes (en particulier lors de leur dilatation) ;

assurer une pression suffisante de la tige métallique terminale (amenée de courant) contre l'extrémité voisine de la baguette, afin de ménager un passage facile au courant et éviter l'action des étincelles ;

assurer, éventuellement, une circulation correcte de l'eau de refroidissement (sans calcaire et non acide).



Pour d'autres éléments, les connexions métalliques situées aux extrémités sont pliées pour faire ressort et assurer une fixation élastique des baguettes. Le refroidissement naturel peut être renforcé grâce à des dispositions simples (fig. 18).

## 2) Température du four.

La durée des éléments dépend fortement de la température à laquelle ils travaillent. La température superficielle des éléments est plus élevée que celle du four (tout au moins pour les traitements courants sans réaction exothermique). La différence de température doit être aussi faible que possible, car la durée des éléments décroît rapidement — il est bon d'y insister — quand la température d'emploi augmente. Pour fixer un ordre de grandeur, ce gradient de température sera par ex. de  $+100^{\circ}\text{C}$  dans un four à  $1350^{\circ}\text{C}$ , avec une puissance spécifique de  $10\text{ W}\cdot\text{cm}^2$  (c'est-à-dire que la température superficielle de la baguette sera de  $1450^{\circ}\text{C}$ ) et de  $230^{\circ}\text{C}$  si la température du four (température utile de la chambre de chauffe) est de  $1200^{\circ}\text{C}$  (pour une puissance spécifique de  $18\text{ W}\cdot\text{cm}^2$ ). Il est évidemment minimum quand la radiation (les fours à haute température à atmosphère libre sont pratiquement des fours à radiation, la convection et la conduction y étant relativement faibles) se fait directement des baguettes vers le corps à chauffer. Il peut, par contre, être beaucoup plus important que nous venons de l'indiquer s'il y a interposition d'un moufle ou d'un creuset ou s'il se produit des interférences de chaleur (causant des surchauffes locales sur les éléments et entraînant une répartition défectueuse de la chaleur dans la chambre de chauffe) par suite de la mauvaise disposition des éléments, voire des pièces à traiter, ou du tracé incorrect du profil intérieur du four.

On notera en passant que les baguettes en carbure de silicium sont utilisées non seulement pour l'obtention de températures élevées, mais encore, dans certains cas, pour des températures sensiblement inférieures à  $1000^{\circ}\text{C}$ , lorsque l'on est astreint à disposer une puissance élevée dans un espace restreint (par ex. pour obtenir une fusion rapide).

A ce problème de la température des baguettes est entièrement lié celui de la régulation de la température. Si cette régulation est mal assurée, il peut en résulter des surchauffes locales ou générales, provisoires ou continues, entraînant en particulier une réduction plus ou moins importante de la vie des éléments.

## 3) Atmosphère du four.

Une des caractéristiques essentielles — et pratiquement très intéressante — du four électrique est de permettre la *régulation*





*absolument indépendante de la température et de l'atmosphère.* Cette particularité, très estimée pour un certain nombre de traitements thermiques (recuit et trempe par ex.) et pour la cuisson de la porcelaine dure, peut avoir une influence heureuse (azote sec par ex.) ou non (éviter l'hydrogène).

Dans le cas où l'on introduit certains gaz dans la chambre de chauffe (gaz d'éclairage par ex.), il peut être bon d'éviter que le tuyau d'arrivée aboutisse près des baguettes, ce qui peut provoquer à la surface de celles-ci la formation d'une couche ressemblant à de l'émeraude et qui, vraisemblablement, provient d'une exagération accidentelle (régulation défectueuse) de la température entraînant une vitrification superficielle des baguettes.

#### 4) Mise en température du four.

Sous l'action de la chaleur, les éléments commencent par se contracter, puis ils se dilatent. Pour éviter l'action destructive des contractions et dilatations successives, particulièrement fréquentes lors de la marche discontinue des appareils électrothermiques, il paraît indiqué de réaliser un chauffage progressif et lent jusque vers 800-850° C par application d'une tension progressivement croissante (comme pour un démarrage de moteur, mais au ralenti) ; on peut ensuite appliquer d'un seul coup la tension normale. Le fabricant des baguettes de « silit » estime toutefois que l'on peut sans inconvénient appliquer dès le début la pleine tension, voire même une tension plus élevée, sous la seule réserve que la charge superficielle en  $W:cm^2$  ne dépasse pas les limites indiquées pour la courbe de la figure 16.

#### 5) Vieillessement des baguettes.

On constate qu'au bout d'un certain nombre d'heures de travail la résistance électrique  $R$  des baguettes a augmenté. Cette variation est d'abord très rapide (pendant les 60 à 150 premières heures d'utilisation), puis ensuite très lente. Cela résulte de deux actions simultanées : oxydation (qui entraîne une usure superficielle, donc une diminution du diamètre et par suite, une augmentation de la résistance des baguettes : cette action est probablement très faible et très lente dans la plupart des cas) et désagrégation (causes physiques — contractions et dilatations successives — et chimiques). Il s'ensuit, pour une même tension  $U$  appliquée, une réduction de la puissance dissipée (effet Joule :  $P = \frac{U^2}{R}$ ) donc une augmentation de la durée de mise en température et, éventuellement l'impossibilité





réaliser la température normale dans le four. L'augmentation de  $R$  peut atteindre 60, 80 et même 100 p. 100. Pour neutraliser les effets de ce « vieillissement », on peut avoir recours à plusieurs moyens qui se ramènent à ménager, dès le début, une marge de tension suffisante pour combattre progressivement l'accroissement de la valeur de  $R$  par augmentation de la tension  $U$  appliquée aux baguettes.

Par exemple, pour un four à atmosphère normale devant fonctionner à 1 400° C, on réalisera une réserve de tension de 40 p. 100 environ au moyen d'un auto-transformateur permettant de faire varier la tension de 220 V (tension d'alimentation du réseau) à 140 V. Les baguettes seront choisies pour fournir la puissance voulue à 140 V. Au fur et à mesure de leur usure, on augmentera progressivement jusqu'à 220 V la tension qui leur est appliquée.

Pratiquement, l'auto-transformateur sert à deux fins : neutraliser l'usure des baguettes avec la durée de leur utilisation, c'est-à-dire leur vieillissement ; réaliser éventuellement une mise en température progressive telle qu'elle a été indiquée dans le § 4.

De la façon dont on jouera avec la réserve de tension précédente dépendra, pour une part importante, la durée des baguettes. Il va sans dire qu'il ne faut pas profiter, au début de l'utilisation des baguettes, de la marge de tension dont on dispose pour obtenir une mise en température plus rapide

(  $P = \frac{U^2}{R}$  : on surchargerait alors les baguettes et on accélérerait leur destruction ).

Les solutions auxquelles on peut recourir pour neutraliser le vieillissement des baguettes et pour régler éventuellement la puissance du four, sont les suivantes :

1. *Emploi de baguettes de puissance plus élevée.* — S'il s'agit de petits fours, on peut à la rigueur se contenter d'employer des baguettes de résistance moins élevée. Au début de l'utilisation des baguettes, la puissance sera trop élevée et par suite la mise en température du four sera plus rapide. On évitera toutefois de cette façon l'emploi d'un dispositif spécial et coûteux de réglage. Si l'on craint une usure exagérée des réfractaires par suite de la trop grande rapidité de la montée en température, on pourra recourir à une résistance additionnelle limitant, au début de l'utilisation des baguettes, la puissance mise en œuvre dans le four.

2. *Emploi de résistances de compensation.* — Soit, à titre d'exemple,  $R_0$  la résistance initiale d'une baguette prévue pour

une tension nominale  $U$ . Supposons qu'au bout d'un certain temps de fonctionnement, cette résistance soit devenue  $R = 2 R_0$ .

Soit  $P_0 = \frac{U^2}{R_0}$  la puissance initiale absorbée.

La puissance finale sera :  $P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{2 R_0} = \frac{P_0}{2}$ , soit la moitié de la puissance initiale.

Insérons en série avec cette baguette une résistance additionnelle fixe  $r = R_0$  et doublons la tension (on aurait le même résultat en prenant initialement une baguette de puissance  $P_0$  prévue pour une tension  $\frac{U}{2}$ ).

La puissance initiale absorbée par l'ensemble (baguette + résistance) sera :

$$\frac{(2 U)^2}{R_0 + r} = \frac{4 U^2}{2 R_0} = 2 \frac{U^2}{R_0} = 2 P_0.$$

Cette puissance sera répartie comme suit :

$P_0$  dans la baguette et  $P_0$  dans la résistance additionnelle.

La puissance finale absorbée sera :

$$\frac{(2 U)^2}{R + 2 r} = \frac{4 U^2}{3 R_0} = \frac{4}{3} P_0.$$

Elle se partagera comme suit :

$\frac{2}{3}$  dans la baguette de résistance  $R = 2 R_0$ , soit  $\frac{2}{3} \times \frac{4}{3} P_0 = \frac{8}{9} P_0$  et  $\frac{1}{3}$  dans la résistance additionnelle  $r = R_0$ , soit  $\frac{1}{3} \times \frac{4}{3} P_0 = \frac{4}{9} P_0$ .

La puissance absorbée par la baguette variera donc de la valeur normale  $P_0$  à la valeur :  $\frac{8}{9} P_0$ , en fonction de la variation de la résistance, laquelle aura augmenté de  $R_0$  à  $R = 2 R_0$ .

Mais cette autorégulation approchée de la puissance absorbée par la baguette ne sera réalisée que moyennant une dépense supplémentaire d'énergie électrique (absorbée par la résistance additionnelle et variant dans le cas précédent de  $P_0$  à  $\frac{4}{9} P_0$ ).

Pour concrétiser immédiatement ce calcul théorique, le tableau suivant donne les résultats correspondants à  $P_0 = 100 \text{ W}$ ,  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $U = 100 \text{ V}$ ,  $r = 100$  et  $50 \Omega$ .



Valeur de $r$ (ohms)	Valeur de $U$ (V)	Valeur de la puissance initiale absorbée (pour la résistance $R^0$ de la baguette) (W)			Valeur de la puissance finale absorbée (pour la résistance $R = 2 R_0$ de la baguette) (W)		
		Totale	Baguette	Résistance addi- tionnelle	Totale	Baguette	Résistance addi- tionnelle
0	100	100	100	0	50	50	0
50	150	150	100	50	90	72	18
100	200	200	100	100	133	89	44

L'intérêt de l'emploi de résistances additionnelles ne réside pas surtout, à vrai dire, dans l'autorégulation de la puissance absorbée par la ou les baguettes, donc de la puissance utilisée dans l'appareil (en général petit four) équipé avec ces éléments, mais bien plutôt dans l'augmentation de la longévité des baguettes, ce qui peut compenser la consommation supplémentaire d'énergie électrique :

3. *Emploi de bobines de réactance ou selfs de compensation.* — Lorsque l'alimentation se fait en courant alternatif, ce qui est le cas général, on a évidemment intérêt à remplacer les résistances précédentes par des selfs, car on réduit ainsi à une valeur négligeable la consommation propre d'énergie active (Wh ou kWh) du dispositif de compensation. Mais ceci se produit au détriment du facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) et il faut en tenir compte si la tarification est fonction de la valeur de  $\cos \varphi$  :

4. *Emploi de résistances de réglage (rhéostat).* — Le rhéostat de réglage peut servir à la fois pour le réglage pendant les mises en température quotidiennes de l'appareil (four par ex.) et pour la compensation du vieillissement des baguettes. Il exige toutefois de la part de l'utilisateur une certaine attention. Les résistances de réglage ont d'autre part une consommation propre d'énergie électrique qui, dans certains cas, est loin d'être négligeable.

5. *Emploi de selfs de réglage.* — On peut remplacer, lorsque l'alimentation se fait en courant alternatif, les résistances par des selfs ; la consommation propre d'énergie active est alors considérablement réduite, mais au détriment du facteur de puissance ;

6. *Emploi d'auto-transformateurs de réglage.* — En courant alternatif, on a le plus souvent recours à un auto-transformateur de réglage (excellent rendement).

7. *Emploi de régulateurs d'induction.* — On emploie parfois, en particulier pour des fours de puissance élevée ou si l'on veut obtenir un réglage très progressif et très précis de la température, un régulateur d'induction :

8. *Réalisation de couplages appropriés des éléments.* — L'emploi des dispositifs précédents va souvent de pair avec le couplage convenable des éléments (couplage série, parallèle, vieillissement des baguettes que pour assurer le réglage).

#### Remarque

*Remplacement des baguettes.* — Lorsqu'il y a lieu de remplacer une baguette pour une raison quelconque (usure, casse), il faut soit la remplacer par une baguette de même résistance électrique que celles qui subsistent, soit changer en même temps toutes les baguettes du même jeu (par exemple les trois baguettes dans le cas d'un montage en étoile).

On pourra bien entendu remployer ultérieurement les baguettes encore utilisables en les associant avec des éléments de même résistance électrique. On évite ainsi soit des anomalies de fonctionnement (par exemple dyssymétrie importante de charge dans le cas de l'alimentation en courant triphasé), soit une détérioration rapide des baguettes.

Par ex., soient deux éléments de résistance respective  $R$  et  $\frac{R}{2}$  montés en série. Le premier élément absorbera les  $\frac{2}{3}$  (soit  $\frac{2}{3} RI^2$ ) de la puissance totale de l'ensemble et le deuxième le  $\frac{1}{3}$  (soit  $\frac{1}{3} RI^2$ ) de cette puissance ( $I$  étant l'intensité du courant qui traverse les deux baguettes). La première baguette sera donc surchargée et vieillira plus vite, d'où augmentation de sa résistance et par suite de sa surcharge (la puissance globale  $P$  étant maintenue constante par réglage afin d'assurer la marche normale du four), etc. : l'élément de plus grande résistance sera donc rapidement détruit (on a parfois donné à ce mode de couplage le nom de « couplage de suicide »).

Dans le cas du couplage en parallèle, les conditions sont plus favorables. En effet, tout se passe comme si chaque élément était alimenté individuellement sous la tension  $U$ . La baguette de moindre résistance absorbe donc une puissance plus grande ( $\frac{U^2}{R/2}$  soit  $\frac{2U^2}{R}$ ) et, par suite, elle vieillit plus vite que l'autre (laquelle absorbe  $\frac{U^2}{R}$ ) : peu à peu les valeurs des résistances



se rapprochent jusqu'à s'égaliser ; l'usure suit alors la même loi, en principe, pour les deux éléments.

Il faut encore remarquer que le fait d'avoir des baguettes de résistances électriques différentes, donc absorbant une puissance différente, peut entraîner une dissymétrie inacceptable dans la répartition de la chaleur dans la chambre de chauffe.

Le remplacement des baguettes, bien souvent, peut être réalisé très facilement et très rapidement pendant la marche même du four (simple coupure de courant entraînant — ou non — un arrêt très court du travail).

La détermination de la valeur de la résistance peut être faite très simplement par application de la loi d'Ohm ; au moyen d'un voltmètre et d'un ampèremètre, la baguette installée dans le four étant seule alimentée.

#### En résumé :

Les baguettes peuvent être détruites :

Soit par chocs mécaniques (inattention du personnel ou construction défectueuse du four) ;

Soit par attaque chimique (en particulier oxydation — lente en général) ;

Soit par désagrégation.

Attaque chimique et désagrégation peuvent être :

Soit lentes ; usure normale ;

Soit accélérées ; usure anormale provenant :

Soit d'un défaut de fabrication des éléments ;

Soit d'un défaut de construction du four ;

Soit d'une faute dans l'utilisation du four et des baguettes : température exagérée (en particulier, appareil de régulation de la température défectueux), mises en température mal conduites, réglage incorrect de la puissance, atmosphère défavorable.

*Si le four est bien conçu et correctement utilisé, les résistances auront une durée suffisamment longue pour que la dépense d'entretien correspondante ait une incidence qui sera, suivant le cas, négligeable ou très faible ou tout au moins acceptable sur le prix de revient définitif du traitement effectué.*

#### c) Divers

Pour les recherches à haute température (au-dessus de 1 600° C par ex.) en atmosphère oxydante, on a cherché à utiliser des oxydes ou mélanges d'oxydes réfractaires qui, à partir d'une certaine température relativement élevée, deviennent conducteurs. Tels sont les oxydes de thorium, zirconium,

cérium, béryllium, etc. L'emploi de ces substances se heurte à d'assez grandes difficultés et est, pour le moment, limité à la fabrication de petits fours de laboratoire.

### Conclusion.

Pour l'équipement des appareils électrothermiques industriels dits « à résistances », on dispose actuellement de résistances qui ont fait leurs preuves.

On ne saurait cependant trop recommander aux usagers éventuels de bien préciser, soit aux constructeurs d'appareils, soit aux fournisseurs d'éléments chauffants, les conditions du problème de chauffage qu'ils désirent résoudre. C'est le seul moyen d'éviter absolument tout déboire et d'obtenir des appareils donnant toute satisfaction. On peut noter, en ce moment, une double tendance : d'une part vers la construction et la standardisation d'éléments protégés fabriqués en série pour l'équipement des appareils à temp. relativement basse, d'autre part vers la recherche de substances permettant d'obtenir des temp. très élevées, quelle que soit la nature de l'atmosphère ambiante.





XXXV-51

La Société pour le Développement des Applications de l'Electricité APEL a pour objet l'amélioration et la vulgarisation des appareils électriques d'applications diverses.

Pour toute étude et renseignements techniques,  
s'adresser : 33, rue de Naples — PARIS (8<sup>e</sup>)

---

21.1490 — Imp. de Montmartre, 4, Pl. J.-B. Clément, Paris

