

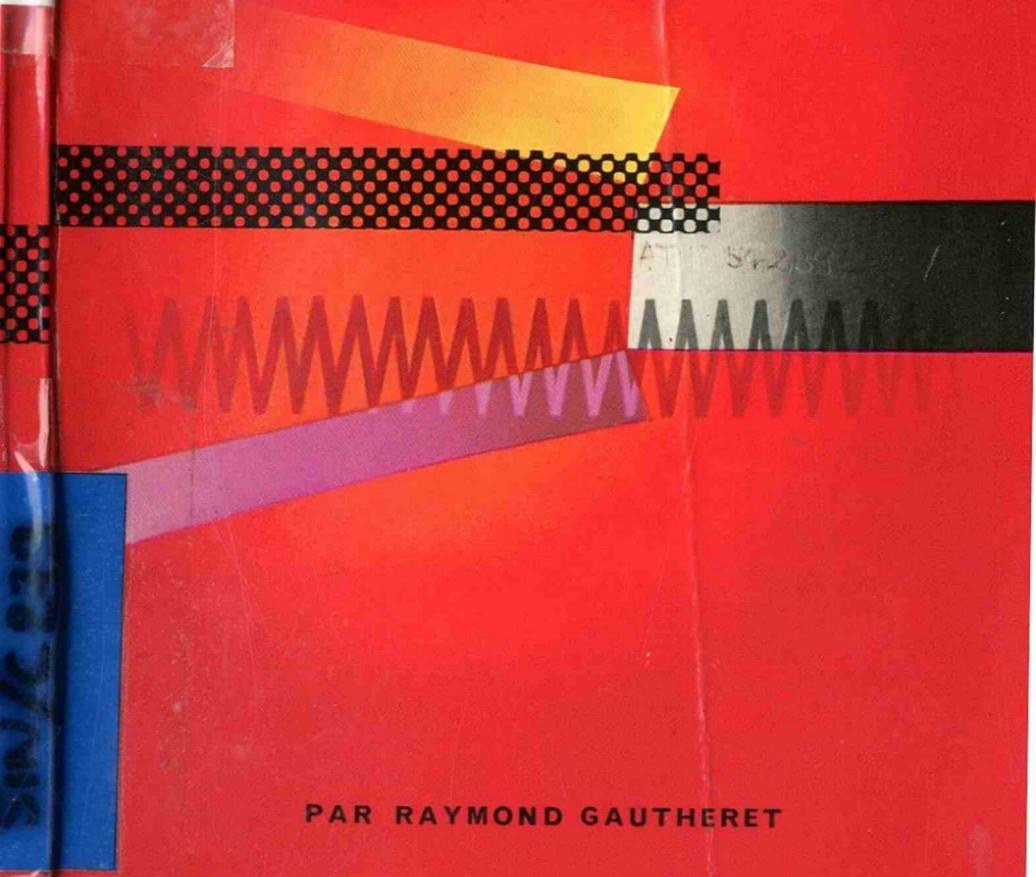


APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉLECTRICITÉ
ÉLECTROTHERMIE

S
I
N

C
2
7
9

LES RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES DE CHAUFFAGE



PAR RAYMOND GAUTHERET



Adressé par

d F - G d F

Services Nationaux

GC.IE.ML/LG

Direction de la Distribution

le 040767

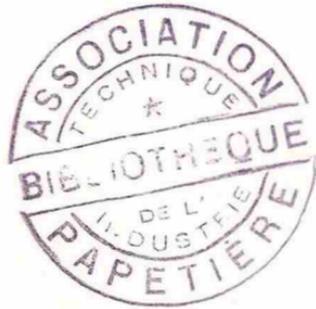
23 bis, avenue de Messine

Paris 8 D 2679400

document mis à jour

par l'auteur à la date du 1 Mars 1966

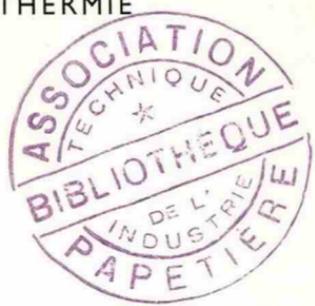
11 AVR 1967





APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉLECTRICITÉ
ÉLECTROTHERMIE

← ATIP 54239



11 AVR 1967

LES RÉSISTANCES

ÉLECTRIQUES

DE CHAUFFAGE

par Raymond GAUTHERET

Résistances métalliques
Cermets
Résistances non métalliques

DU MÊME AUTEUR

- L'Électricité en émaillerie, APEL 1936 (épuisé).
- L'Électricité dans la fabrication des produits pharmaceutiques, APEL 1936 (épuisé).
- L'Électricité dans les petits ateliers de nickelage, APEL 1937 (épuisé).
- Les résistances métalliques, APEL 1937 (épuisé).
- Les résistances non métalliques et leurs applications, APEL 1937 (épuisé).
- Les éléments protégés et leurs applications, APEL 1937 (épuisé).
- L'Électricité, auxiliaire précieux du céramiste, APEL 1939 (épuisé).
- L'Électricité dans les industries de protection des métaux contre la corrosion et l'usure, APEL 1939 (épuisé).
- Les fours électriques à bain de sels à électrodes, APEL 1939 (épuisé).
- Les fours électriques à résistances, APEL 1940 (dernière édition épuisée).
- Les différents types de fours à résistances, APEL 1940 (épuisé).
- Comment choisir et commander un four à résistances, APEL 1940 (épuisé).
- Comment installer, réceptionner, utiliser un four à résistances, APEL 1940 (épuisé).
- Les résistances électriques de chauffage, APEL 1940, dernière édition 1951 (épuisé).
- L'amélioration du facteur de puissance dans les installations industrielles, APEL 1940 (épuisé).
- L'Électricité dans une grande usine de produits alimentaires, APEL 1942 (épuisé).
- Les différents modes de chauffage électrique, APEL 1943 (épuisé).
- Mémento du chauffage électrique, en collaboration avec Th. Tournier, APEL 1945 (3 volumes, épuisés).
- Les fours électriques de céramique, APEL 1950 (épuisé).
- Le brasage électrique, APEL 1950 (épuisé).
- Le chauffage électrique par lampes infrarouges, en collaboration avec différents auteurs, APEL 1950 (épuisé).
- Le chauffage par induction à haute fréquence, APEL 1950.
- L'Électricité dans les industries du bois, en collaboration avec J. Collardet, M. Wilfart et J. Besset, APEL 1950 (épuisé).
- Le chauffage électrique par émetteurs de rayonnement infrarouge court, SODEL 1954 (épuisé).
- L'amélioration du facteur de puissance dans les installations industrielles, SODEL 1965 (8^e édition).
- Les résistances électriques de chauffage, SODEL 1962 (2^e édition, 1966).

AUTRES OUVRAGES DISPONIBLES

- Les applications industrielles du chauffage électrique, par Max Wurmser et René Malgat, SODEL 1964.
- Etuves et Séchoirs électriques artisanaux, par R. Malgat, SODEL 1957.

NOTA . La Société pour le développement des applications de l'électricité — SODEL — a pris la suite des éditions APEL en 1954.

Préambule

LA présente étude a en vue les seules applications industrielles et artisanales. En principe, elle laisse de côté tout ce qui a trait aux appareils domestiques et agricoles. Toutefois certains éléments chauffants et résistances, d'un emploi courant dans ces appareils, équipent également des appareils similaires fréquemment utilisés dans l'industrie et il en est fait mention.

La première édition (janvier 1962), mise à jour à la date du 1^{er} octobre 1960, constituait une refonte complète des anciens fascicules publiés par APEL (liste page 2) et comportait un grand nombre d'indications sur des éléments de fabrication nouvelle et dont beaucoup n'étaient pas encore disponibles sur le marché français.

La présente édition a été mise à jour au 1^{er} mars 1966 et elle tient compte des données récentes sur la question.

Sommaire

	Pages
GÉNÉRALITÉS	5
Principes du chauffage par résistance	5
Qualités optimales des résistances	12
Classification des résistances	13
 RÉSISTANCES MÉTALLIQUES	 14
a) Alliages « nickel-chrome »	15
1° Eléments nus	25
2° Eléments protégés	31
b) Alliages « fer-chrome-aluminium »	62
c) Autres métaux	68
 CERMETS	 78
 RÉSISTANCES NON MÉTALLIQUES .	 83
a) Carbone, graphite	83
b) Carbure de silicium	90
c) Autres substances	106
 CONCLUSION	 107

N.B. — Dans un souci de neutralité, qui a toujours été adopté dans les brochures de documentation générale telles que celle-ci, nous ne donnons pas le nom des fabricants ou constructeurs. Très souvent d'ailleurs, ceux-ci sont nombreux. Nous ne dérogeons exceptionnellement à cette règle de principe que lorsque cela est nécessaire pour la compréhension ou la clarté du texte ou la recherche du lecteur, qu'il s'agisse par exemple d'un matériau plus ou moins nouveau encore inconnu ou peu connu des utilisateurs ou d'un matériel spécial fabriqué par un seul constructeur ou un nombre très réduit de constructeurs.

Généralités

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

Elaboration des alliages de la famille des « nickel-chrome » et notamment des alliages binaires à 80 % de nickel et 20 % de chrome ; amélioration plus récente des alliages binaires Ni-Cr et ternaires Fe-Ni-Cr en vue d'augmenter leur température limite d'emploi ou leur longévité et leur tenue en atmosphères spéciales.

Elaboration et mise au point des alliages ternaires « fer-chrome-aluminium ».

Création et mise au point des éléments protégés et en particulier des éléments blindés, notamment à la magnésie.

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

Elaboration plus récente des « cermets ».

Améliorations dans le domaine des réfractaires et calorifuges.

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 ont été et sont encore parfois 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 utilisateurs d'appareils électrothermiques :

Si l'on applique aux extrémités d'un conducteur AB (fig. 1-a)

de résistance R , une tension U , ce conducteur est parcouru par un courant d'intensité I et l'on a la relation :

$$U = R I$$

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 est égale à : $U = R I$.

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

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 adoptées étant par exemple les suivantes :

- R en ohms ;
- l en centimètres ;
- s en centimètres carrés ;
- ρ en ohms par centimètre et centimètre carré ;

ρ 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 ρ est appelée « résistivité ». Elle dépend de la nature du conducteur, supposé d'ailleurs homogène.

On évalue quelquefois, par convention, la résistivité en ohms par centimètre cube ($\text{cm}^3 = \text{cm}/\text{cm}^2$), voire en ohms par centimètre, ce qui est regrettable car cela crée une certaine imprécision et de la confusion.

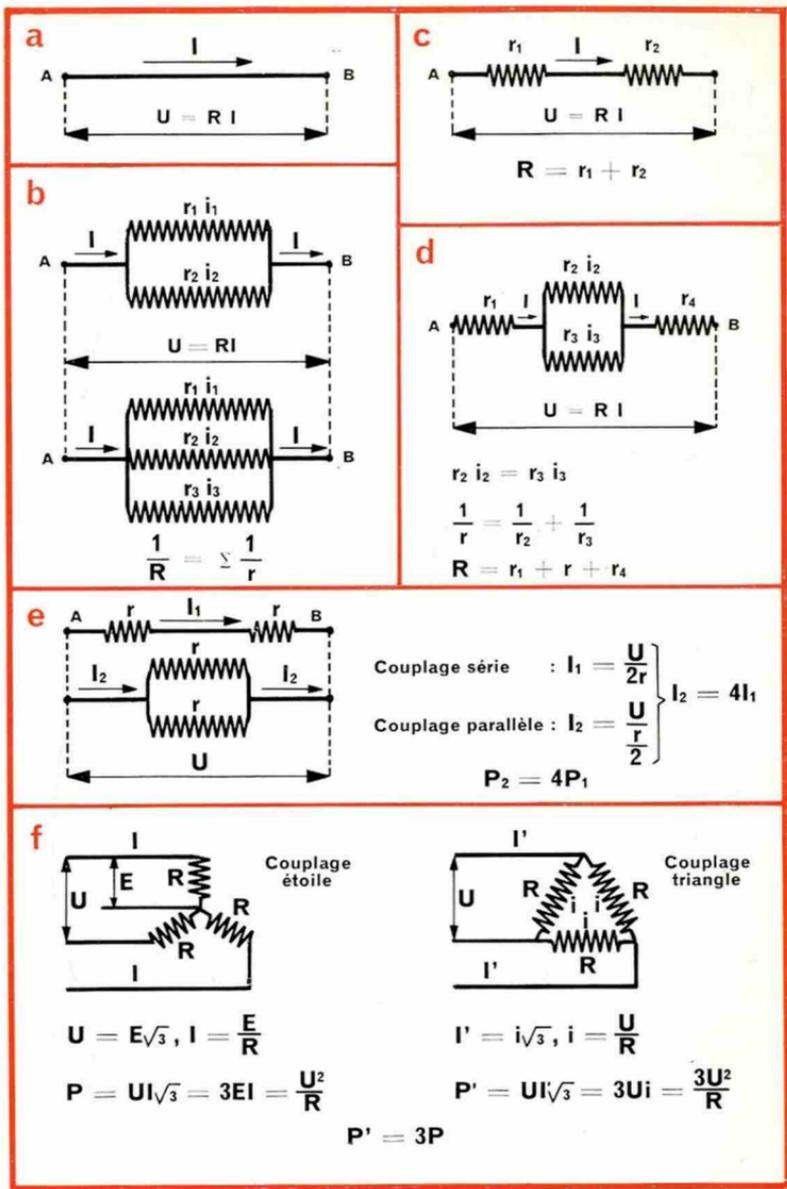


Fig. 1

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 α peut être positif (résistances métalliques ordinaires employées dans les fours électriques), nul (constantan par exemple) ou négatif (graphite par exemple dans une certaine zone de température).

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 :

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

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 entre elles (valeur r) on a :

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

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

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 (ex. 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 :

$$P = U \quad I$$

watts ohms 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 :

$$W = Pt = Ult$$

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

D'où :
$$P = R \quad I^2$$
watts ohms ampères

et :
$$W = R \quad I^2 \quad t$$
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 chauffe le conducteur AB. La quantité de chaleur ainsi dégagée a pour valeur :

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

petites joules ohms ampères secondes
calories

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

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

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

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

$$W = U \quad I \quad t$$

wattheures volts ampères heures

Le décret ministériel n° 61.501 du 3 mai 1961 fixe les définitions, symboles et équivalences suivants :

$$1 \text{ wattheure (Wh)} = 3\,600 \text{ joules (J)}$$

La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 g d'un corps dont la chaleur massique est égale à celle de l'eau à 15 °C sous la pression atmosphérique normale (101 325 pascals).

$$1 \text{ calorie (cal)} = 4,185\,5 \text{ J}$$

Le nombre 4,185 5 est une valeur expérimentale résultant des déterminations les plus récentes.

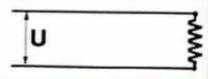
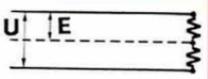
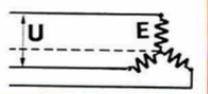
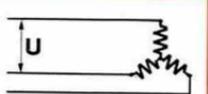
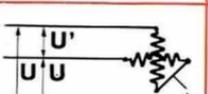
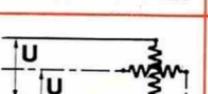
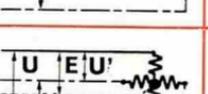
$$1 \text{ thermie ou mégacalorie (th)} = 4,185\,5 \cdot 10^6 \text{ J}$$

D'où l'équivalence suivante :

$$1 \text{ kilowattheure (kWh)} \text{ donne } 3\,600 \text{ kilojoules ou } 860 \text{ kilocalories.}$$

C'est sur cet *Effet Joule* que sont précisément basés les appareils de chauffage électrique par résistance.

La figure 2 donne la valeur de la puissance P pour les divers cas d'alimentation que l'on peut rencontrer dans la pratique,

Désignation	N ^b re de fils	Schéma 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

les cas les plus fréquents se rapportant au courant monophasé — 2 fils (petites puissances) et surtout au courant triphasé.

QUALITÉS OPTIMALES DES RÉSISTANCES

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

La *résistivité* ρ 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* α 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 des alliages métalliques*, doivent être très supérieures à la température maximale atteinte lors de la marche normale du four afin d'éviter la destruction des éléments par fusion ou court-circuit (cas des boudins par exemple).

La *résistance mécanique* de l'élément chauffant doit être suffisante, non seulement au moment de la pose, mais encore en tout temps, notamment après une assez longue durée de service, et lorsque l'élément atteint sa température maximale. 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* (ductibilité permettant d'obtenir des *formes* diverses en vue 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 détérioration ni de désagrégation).

Le *coefficient de dilatation* doit être faible.

La *conductivité thermique* doit être peu élevée 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), vapeurs ou 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. Cette condition a pris une importance accrue avec la généralisation de l'emploi des atmosphères spéciales et notamment des atmosphères dites « contrôlées ».

La substance doit éventuellement ne pas s'évaporer dans le vide.

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

Ils doivent être d'un *prix raisonnable*.

Les qualités précédentes, qui s'appliquent au cas général, 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.

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

- Résistivité relativement élevée ;
- Coefficient de température faible et sensiblement constant ;
- Inoxydabilité, résistance chimique à certaines atmosphères ;
- Stabilité dans les conditions d'utilisation (température et ambiance) ;
- Température de ramollissement, de fusion ou de détérioration élevée ;
- Travail facile, grande souplesse d'emploi.

CLASSIFICATION DES RÉSISTANCES

On peut distinguer :

- Les résistances métalliques (nues ou protégées) ;
- Les cermets ;
- Et les résistances non métalliques (1).

(1) Nous laisserons en principe de côté le cas où la substance à traiter constitue elle-même la résistance traversée par le courant (fours de graphitisation, chauffe-rivets, appareils de soudage par résistance, etc.), ainsi que celui des fours à bain de sels à électrodes.

Résistances métalliques

 N a employé autrefois et on continue à employer parfois :
— Soit des métaux communs (fer, fonte, cuivre, pour de faibles températures ; étain pur ou alliage plomb-étain-bismuth fondus pour des températures élevées, par exemple 1 350-1 450 °C) ;

— Soit des alliages à base de fer et de nickel (éventuellement avec addition de chrome ; par exemple : 10-12 Ni + 20-12 Cr + Fe) ou de cuivre et de nickel (alliages relativement à faible coefficient de température donc à résistivité considérée comme de valeur sensiblement constante ; exemple : constantan, etc.) pour des températures pouvant atteindre en général 500 °C au maximum.

Pratiquement, on emploie surtout (1) :

a) Pour les températures atteignant au maximum 1 000 à 1 200 °C des alliages à base de fer, de nickel et de chrome, ou de nickel et de chrome.

b) Pour les températures de l'ordre de 1 000 et 1 350 °C des alliages à base de fer, de chrome et d'aluminium.

c) Pour des températures plus élevées (et également à partir de 1 000 °C et plus généralement au-dessus de 1 200-1 300 °C) des métaux spéciaux (platine, platine-rhodié, molybdène, rhodium, tungstène, etc.).

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

Jusqu'à 500 °C et même un peu au-delà de cette valeur, on a généralement recours à des tôleries d'acier ordinaire pour la chambre de chauffe, car il n'y a pas lieu en principe de craindre l'oxydation à ces températures ou à des températures inférieures.

(1) Dans ce qui suit et sauf indications contraires, les valeurs indiquées sont celles de la température usuelle du volume utile de la chambre de chauffe du four supposé fonctionner en atmosphère oxydante et sans impuretés (gaz sulfureux, oxyde de carbone...). La température de la résistance chauffante est évidemment plus élevée que la précédente.

A partir de 500 °C, on construit les parois intérieures des chambres de chauffe en matériaux réfractaires (aciers, matériaux silico-alumineux, alumine frittée, quartz...).

Au-dessus de 1 100-1 300 °C, on a d'ailleurs recours, suivant les cas, soit à des résistances non métalliques, soit à des résistances métalliques spéciales (molybdène, platine...) soit à des cermets, soit à des fours spéciaux à chauffage direct (fours à bain de sels à électrodes par exemple).

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 résistances en atmosphère spéciale. Ils sont de beaucoup les plus utilisés.

On distingue :

1^o 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 % Ni, de 30 à 50 % Fe, de 10 à 25 % Cr et jusqu'à 2 % Mn.

Pratiquement, ces alliages ont été généralement utilisés pour des températures inférieures à 900 °C. Toutefois, vers 1960, ont apparu des alliages de même nuance, comportant diverses additions qui ont permis d'en augmenter la durée de service ou la température limite d'emploi. Dénommés à l'époque « alliages améliorés », ils sont assez vite devenus des alliages normaux qui se sont substitués aux anciens. Ils sont utilisés jusqu'à 1 050 °C, voire 1 100 °C.

On a tendance actuellement à distinguer trois classes de ces alliages, suivant leur composition approximative :

- 30 % Ni + 20 % Cr + Fe.
- 45 % Ni + 23 % Cr + Fe.
- 60 % Ni + 15 % Cr + Fe.

2^o Les alliages à forte teneur ou alliages binaires de nickel et de chrome qui contiennent sensiblement 80 % Ni et 20 % Cr, métaux auxquels il y a lieu d'ajouter quelques autres corps (2 % au maximum) : Mn et Mg (qui, en faible proportion,

facilitent le laminage et le tréfilage), Si (désoxydant), et diverses additions (terres rares) destinées à augmenter la durée de service ou la température limite d'emploi.

Ici encore, les anciens alliages à 80/20, utilisés généralement jusqu'à 950-1 050 °C (la température d'emploi dépend aussi de la section de la résistance) ont été peu à peu remplacés, vers 1960, par des alliages dits alors « améliorés » et devenus aujourd'hui des alliages normaux utilisés jusqu'à 1 150-1 200 °C.

Remarques. — 1° Quand il est chauffé à l'air, l'alliage Ni-Cr se recouvre d'une pellicule d'oxyde qui assure une certaine autoprotection 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 % 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 généralement le pourcentage de chrome à 25, pour des raisons de facilité de travail de l'alliage, de prix, et de stabilité en fonction de la température, et aussi parce que l'alliage à 80/20 répond parfaitement aux besoins de la pratique industrielle pour des températures de traitement jusqu'à 1 200 °C. Certain alliage récent du type 80/20 comporte 70 % de Ni et 30 % de Cr et serait utilisable jusqu'à 1 260 °C.

Au-delà de 35 % Cr, on risque une transformation de l'état métallurgique en fonction de la température, pouvant entraîner de l'instabilité de l'alliage et, par suite, une plus grande rapidité de destruction ou, si l'on préfère, une moindre durée de vie.

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.

2° 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.

3° Ce qui précède se rapporte au fonctionnement en atmosphère oxydante. Mais certaines atmosphères (notamment atmosphères dites « contrôlées ») peuvent, par destination expresse, être réductrices, carburantes ou décarburantes. Dans ce cas, l'introduction de fer dans l'alliage peut être utile. Autrement dit, on peut alors avoir intérêt à utiliser des alliages ternaires au lieu d'alliages binaires, par exemple, un alliage du type 45 Ni-23 Cr-Fe dont la tenue en atmosphère oxydante est très bonne et qui a été spécialement étudiée pour résister aux atmosphères réductrices et carburantes pouvant même contenir une certaine proportion de composés sulfureux.

Ce ne sont pas forcément les alliages les plus chers (à 80/20 par ex.) qui répondent le mieux aux atmosphères particulièrement dangereuses pour les résistances et le recours aux alliages ternaires peut être avantageux si, bien entendu, la température à obtenir le permet.

Caractéristiques

Le Tableau I donne les caractéristiques d'un certain nombre de métaux et alliages ou autres substances utilisés en France comme « résistances » et permet ainsi les comparaisons.

Parmi les « nickel-chrome » on trouvera notamment les alliages des séries carbimphy, superimphy, tophet, nichrome, NK et NY.

Le tableau I est complété par les tableaux II et III, et par les courbes de la figure 3, tableaux et courbes figurant à seul titre d'exemples.

Les données essentielles pour les « nickel-chrome à 80/20 », alliages qui sont actuellement les plus utilisés dans les fours, sont les suivantes :

Densité de l'ordre de 8 à 8,5 ;

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

Coefficient de température α moyen positif et de faible

TABEAU I

Nature des résistances	Composition approximative %	Température <i>t</i> usuelle ou maximale d'emploi °C	Température de fusion °C	Valeur de ρ entre 0 et 20 °C	
				$\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$	Valeur moyenne de α entre 0 et <i>t</i> ($\times 10^{-4}$)
Nickel-chrome à très faible teneur	10 à 18 Ni+9 à 12 Cr+74 à 80 Fe	600	1 450	70 à 80	7 à 9
Nickel-chrome à faible teneur	30 à 60 Ni+10 à 25 Cr+30 à 50 Fe	800 à 1 150	1 300 à 1 475	100 à 110	1 à 3
Nickel-chrome à forte teneur	80 Ni+20 Cr	1 100 à 1 200	1 400 à 1 475	108 à 110	0,5 à 1,5
Fer - chrome - aluminium	20 à 35 Cr+2 à 6 Al+Fe	1 100 à 1 350	1 500	135 à 145	0,3 à 0,6
Métaux particuliers	Mo, Pt-Rh, Ta, W	1 500 à 2 400	1 774 à 3 410	3 à 20	30 à 140
Cermets	90 Mo Si ₂	1 300 à 1 600	»	35 à 40	48
Carbone, graphite	—	Jusqu'à 2 700	»	800 à 8 000	Négatif ou positif
Carbure de silicium	—	1 100 à 1 450	»	9 à 12.10 ⁴	Positif

N.B. — Les indications de ce tableau sont approximatives. Elles représentent des moyennes des valeurs usuelles.

TABEAU II

Diamètre mm	Section mm ²	Poids par mètre g	Longueur par kilo m	Résistance en Ω par m		
				0 °C	500 °C	1 000 °C
Alliage = environ 43 Ni+23 Cr+Fe						
0,20	0,031 416	0,251 32	3 978	34,7	37,7	38,8
0,25	0,049 087	0,392 69	2 546	22,2	24,1	24,8
0,50	0,196 35	1,570 8	636	5,55	6,03	6,21
1,00	0,785 40	6,284 0	159	1,39	1,51	1,55
1,50	1,767 1	14,137	70,7	0,617	0,670	0,690
2,00	3,141 6	25,132	39,8	0,347	0,377	0,388
2,50	4,908 7	39,269	25,5	0,222	0,241	0,248
3,00	7,068 6	56,548	17,7	0,154	0,167	0,172
4,00	12,566 4	100,531	9,94	0,086 7	0,094 1	0,097 0
5,00	19,634 9	157,079	6,36	0,055 5	0,060 3	0,062 1
6,00	28,274	226,192	4,42	0,038 5	0,041 9	0,043 1
Alliage = environ 80 Ni+20 Cr						
0,20	0,034 16	0,265 5	3 766	34,3	35,5	34,8
0,25	0,049 087	0,414 8	2 411	22,0	22,7	22,3
0,50	0,196 35	1,659 1	603	5,50	5,69	5,58
1,00	0,785 40	6,637	151	1,37	1,42	1,40
1,50	1,767 1	14,932	67	0,611	0,633	0,620
2,00	3,141 6	26,546	37,7	0,343	0,355	0,348
2,50	4,908 7	41,478	24,1	0,222	0,227	0,223
3,00	7,068 6	59,730	16,7	0,153	0,158	0,155
4,00	12,566	106,186	9,42	0,085 9	0,088 9	0,087 2
5,00	19,635	165,915	6,03	0,055 0	0,056 9	0,055 8
6,00	28,274	238,015	4,19	0,038 2	0,039 5	0,038 8

TABEAU III

Propriété	Alliage		
	43 Ni+ 23 Cr+ Fe	80 Ni+ 20 Cr	
Résistivité à 15 °C	109±5 % μΩ · cm : cm ²	108±5 % μΩ · cm : cm ²	
Coefficient de température (valeur moyenne de α entre 0 et 1 000 °C)	0,12×10⁻³	0,015×10⁻³	
Point de Curie (disparition du magnétisme)	Amagnétique à toutes températures	Amagnétique à toutes températures	
Densité	8	8,45	
Dilatabilité (coefficient moyen de 0 à 800 °C) ...	17,3×10⁻⁶	17×10⁻⁶	
Ténacité (état recuit)	70-75 kg/mm ²	75-85 kg/mm ²	
Limite élastique (état recuit)	40-45 kg/mm ²	40-50 kg/mm ²	
Allongement de rupture (état recuit)	25-30 %	25-35 %	
Module d'élasticité	à la traction	19 000 kg/mm ²	21 500 kg/mm ²
	à la torsion	7 300 kg/mm ²	8 300 kg/mm ²
Point de fusion	1 450 °C	1 475 °C	
Température limite d'emploi (1)	1 100-1 150 °C	1 100-1 200 °C	

(1) Se reporter, plus loin, au chapitre « Température limite d'emploi ».

valeur : de l'ordre de 0,000 1 pour la zone habituelle d'utilisation (0 à 1 000 °C); la variation de ρ avec la température étant faible, on peut utiliser les « nickel-chrome » à tension constante, sans être astreint à recourir à un dispositif de régulation (démarreur) comme ce serait le cas avec l'alliage α de la figure 3 par exemple ;

Température de ramollissement vers 1 300 °C ;

Température de fusion de 1 400 à 1 475 °C ;

Température maximale d'utilisation, en général 1 150 °C, voire 1 200 °C.

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

Forme

On distingue :

Les produits de section circulaire : fils ou tiges ;

Les produits de section rectangulaire : bandes obtenues par cisailage dans des plats de plus grande largeur, tôles ;

Les produits de section elliptique : rubans obtenus par laminage à froid de fils de section circulaire.

On emploie le plus souvent des fils, des rubans ou des bandes ; parfois des tiges, des tôles incurvées et notamment ondulées, ou encore des tubes.

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.

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, piédroits, portes) ;

Nature du courant d'alimentation (continu ou alternatif : monophasé, triphasé ou diphasé) avec obligation ou non d'équilibrer les charges ;

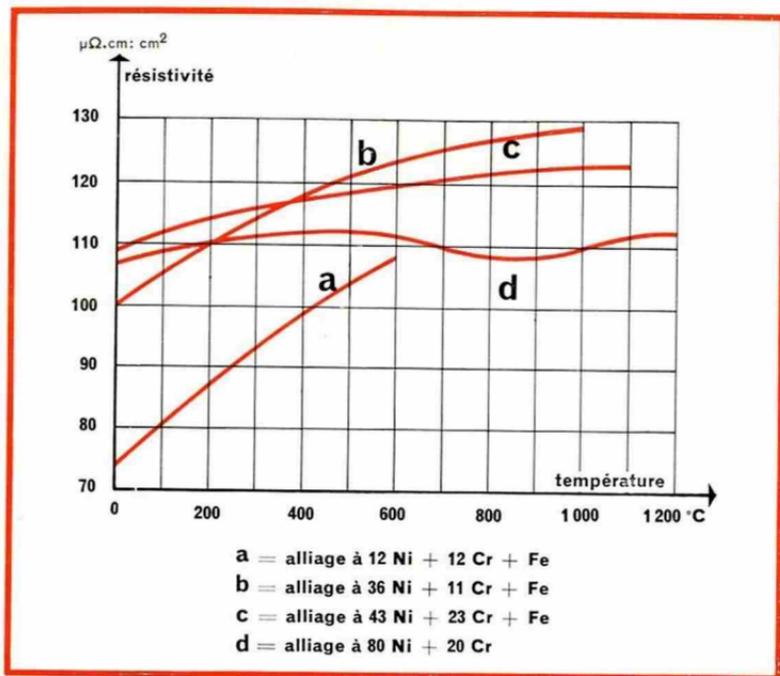


Fig. 3

Tension d'alimentation ;

Puissance maximale fournie par le distributeur d'énergie électrique (en particulier, horaire d'utilisation permettant d'obtenir un prix de courant plus favorable) ;

Nature du traitement à effectuer : protection des éléments chauffants contre les chocs ou contre les gaz ou vapeurs ou atmosphères spéciales, 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 : rayonnement, convection naturelle ou forcée, conduction ; choix du mode de réglage : répartition, division et couplage des éléments) ;

Résistance mécanique des fils, bandes ou rubans ;

Remplacement éventuel des éléments détériorés ;

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 minimale.

Le ruban ou 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 normales (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 exceptionnellement provoquer des points chauds réduisant la longévité des résistances.

Dimensions des éléments. Norme dimensionnelle

Les dimensions normalisées sont indiquées dans la publication NF - C31-711 (adoptée le 4 juin 1953) par l'Union Technique de l'Electricité (U.T.E.), le projet en ayant été préparé par le Comité Français d'Electrothermie (C.F.E.) en liaison avec le Syndicat des Constructeurs de Fours et Equipements thermiques (S.C.O.F.E.T.) et le Syndicat Général de la Construction Electrique (S.G.C.E.).

Cette norme est intitulée « Alliages pour résistances électriques de chauffage en nickel-chrome, fer-nickel-chrome et fer-aluminium-chrome. Dimensions des fils, tiges et bandes ». Elle s'applique aux produits de section circulaire (fils et tiges) et aux produits de section rectangulaire (bandes) de largeur supérieure à 2 mm et d'épaisseur inférieure à 15 % de la largeur. Elle ne s'applique pas aux rubans.

Pour les fils et tiges, couramment utilisés dans les fours et certains éléments chauffants, les diamètres normaux en millimètres sont les suivants :

0,14 - 0,16 - 0,18 - 0,20 - 0,224 - 0,25 - 0,28 - 0,315 - 0,355 - 0,4 - 0,5 - 0,56 - 0,63 - 0,71 - 0,8 - 0,9 - 1 - 1,12 - 1,25 - 1,4 - 1,6 - 1,8 - 2.

2 - (2,12) - 2,24 - (2,36) - 2,5 - (2,65) - 2,8 - (3) - 3,15 - (3,35) - 3,55 - (3,75) - 4.

Les diamètres entre parenthèses sont à éviter.

Ces nombres sont d'ailleurs ceux de la série actuelle des nombres normaux de l'International Standard Organisation (I.S.O.), les valeurs adoptées étant celles de la série Renard 20 pour les petits diamètres et celles de la série Renard 40 pour les grosses sections.

Pour les bandes, les dimensions normalisées sont les suivantes :

Pour une largeur de 10 mm, les épaisseurs en millimètres sont : 1 - 1,2 - 1,4 - 1,6.

Pour une largeur de 15 mm, les épaisseurs sont : 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1 - 1,2 - 1,4 - 1,6.

Pour une largeur de 20 mm ou de 25 mm, les épaisseurs sont : 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1 - 1,2 - 1,4 - 1,6 - 1,8 - 2.

La norme fixe d'autre part les tolérances et indique les méthodes de vérification.

Pour les rubans (forme de méplats à bords arrondis), les dimensions ne sont pas normalisées. Elles sont données par les fabricants.

On note actuellement une tendance à les normaliser en largeur (de 1,1 à 2,5 mm) et en épaisseur (de 0,08 à 0,25 mm).

Norme de qualité

L'U.T.E. a établi une norme C31-712 adoptée le 24 mai 1951 et intitulée « Alliages pour résistances électriques de chauffage en nickel-chrome et fer-nickel-chrome — Méthode de classement par vieillissement accéléré ». Elle « définit un procédé permettant, en un temps relativement court, d'apprécier la façon dont se comporte à haute température un alliage pour résistances électriques de chauffage et, éventuellement, de comparer la tenue de différents lots d'un même alliage, ou encore celle de différents alliages ». Elle dérive de la méthode américaine de Bash and Harsch et tient compte des travaux que le C.F.E. a faits en liaison avec le S.G.C.E. et le S.C.O.F.E.T.

Température limite d'emploi Charge admissible

La chaleur utile émise par un élément chauffant dépend non seulement de la forme de cet élément (fil, tige, tube, bande 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).

Pratiquement, il faut attacher une grande importance à la quantité de chaleur dissipée par unité de surface de l'élément, quantité exprimée sous le nom de puissance surfacique (puissance spécifique ou charge).

Il faut en effet éviter que la résistance soit portée à une température exagérée qui entraînerait sa destruction. Cette « température limite d'emploi » n'est pas une donnée bien définie ; elle dépend essentiellement des conditions particulières de fonctionnement de l'appareil et de sa durée de marche considérée comme techniquement et économiquement acceptable sans que l'on ait à remplacer la résistance.

On peut alors : soit disposer celle-ci de telle manière que la chaleur perdue puisse être facilement dissipée dans l'ambiance (dispositions particulières de la construction, convection forcée, etc.), soit adopter une puissance surfacique relativement faible.

Les fabricants d'éléments chauffants donnent, à titre indicatif, des tableaux des charges admissibles en W/cm^2 de surface rayonnante, étant bien entendu que chaque cas particulier doit faire l'objet d'un choix approprié de la valeur de la charge, compte tenu des conditions exactes de rayonnement ou plus généralement de transmission de la chaleur et de construction et d'utilisation des appareils. C'est essentiellement affaire de constructeur.

Modes d'emploi

Les fils peuvent être employés, soit tendus, soit tissés (faibles températures ; par exemple sur une chaîne d'amiante), soit boudinés (cas le plus fréquent dans les fours et très fréquent dans les éléments protégés). Ils peuvent être montés en éléments nus ou en éléments protégés.

Les tiges, tôles, bandes et rubans sont employés nus. Toutefois, les rubans sont aussi utilisés en éléments protégés.

1. — ÉLÉMENTS 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 où ils sont montés sur des supports convenables. Dans certains cas, si le fil a une

grosse section, il est disposé sous forme de tiges rectilignes ou en épingles à cheveux.

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

Les tôles s'emploient de diverses façons : par exemple, ondu-
lées et disposées verticalement le long de la surface interne de
la chambre de chauffe d'un four vertical ; ou encore cintrées et
épousant la forme cylindrique d'une chambre de chauffe
horizontale.

Les tubes sont suspendus.

On a utilisé parfois les 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 se fait par soudure autogène (notamment pour
les réparations des parties chauffantes), soit à l'arc soit au
chalumeau oxy-acétylénique.

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.

Les figures 4, 5 et 6 donnent quelques exemples des disposi-
tions les plus courantes (fils boudinés et bandes).

Durée des résistances

La longévité des éléments est une donnée capitale. L'inci-
dence des frais d'entretien sur le bilan économique d'un
appareil électrothermique 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.

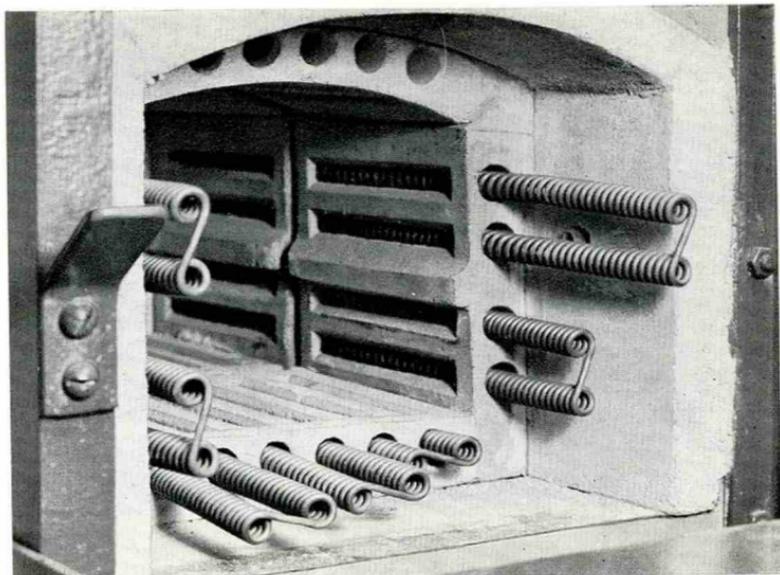
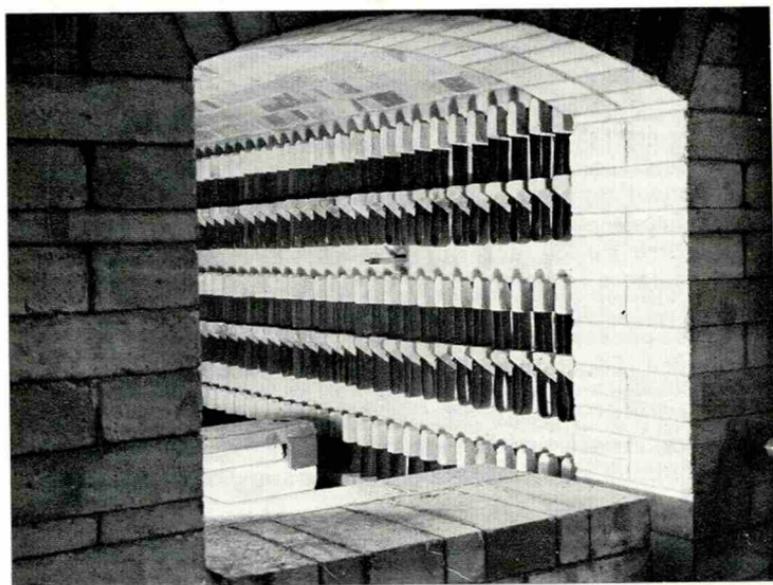


Fig. 4

Fig. 5



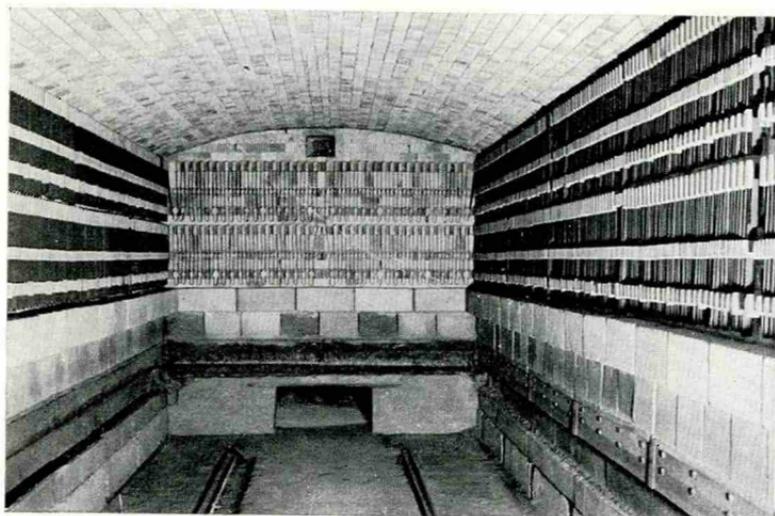


Fig. 6

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 (naturelle ou artificielle) 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^o *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 dissymétrie 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 ;

Soit enfin le conditionnement défectueux des différentes parties du four.

Pratiquement, on ne rencontre pas de défauts de fabrication ou de construction dans les fours modernes convenablement étudiés et construits.

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 calorifique 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 thermocouples et en particulier de leurs soudures chaudes (par exemple : 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 par l'emploi de fusibles calorifiques judicieusement placés) ;

La nature de l'atmosphère : gaz échappés de la matière en traitement ou provenant d'une réaction chimique, vapeurs, atmosphères particulières introduites dans le four (atmosphères contrôlées), tous agents susceptibles de provoquer des réactions chimiques dans certaines conditions et à certaines températures. Signalons l'action des vapeurs de soufre (SO_2 , SH_2 , SO_3 , SO_4H_2) et d'huile et aussi d'aluminium et des gaz de cémentation et de cyanuration. Les atmosphères les plus dangereuses sont celles qui sont en principe réductrices mais qui, en fait, sont légèrement oxydantes (vapeur d'eau) vis-à-vis de certains éléments constitutifs de la résistance. On peut y remédier, si nécessaire, par le choix convenable de la nature des éléments chauffants ainsi que par des dispositions appropriées que les constructeurs utilisent. Le four électrique 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 maladroitemment 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.

Généralement, la charge superficielle adoptée est de l'ordre de $0,5$ à 2 W/cm^2 , tout au moins pour les fours usuels (par exemple : $0,4$ à $0,6 \text{ W/cm}^2$ pour 1100°C ; $0,6$ à $0,8 \text{ W/cm}^2$ pour 1000°C ; 1 W/cm^2 pour 900°C ; 2 W/cm^2 pour 700 - 800°C ; ces nombres, toutefois, ne sont donnés qu'à titre indicatif ; ils ne sont pas absolus).

3^o Durée pratique

La garantie habituellement donnée par les constructeurs est d'une année. Elle peut même être 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 en atmosphère oxydante et en l'absence de toute contamination, surtout pour les fours à marche continue, aux températures usuelles (par ex. pendant dix ans, voire bien davantage, pour des fours à 900 - 925°C).

Pratiquement, l'entretien des résistances pour les fours usuels de construction correcte jusqu'à 950-1 100 °C est négligeable.

2. — ÉLÉMENTS PROTÉGÉS

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

Description

Un tel élément comporte, en principe, les principales parties constitutives suivantes (fig. 7) :

- Une résistance électrique R en fil ou en ruban ;
- Un isolant électrique D ;
- Une enveloppe E assurant la protection (mécanique, chimique, électrique) de l'élément.

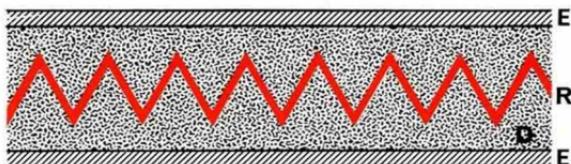


Fig. 7

L'isolant formant support de la résistance est constitué par une matière appropriée assurant un isolement électrique satisfaisant à toutes les températures d'emploi : amiante, mica, verre, porcelaine, stéatite, ciment spécial, magnésie, 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 (éléments semi-blindés).

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 exemple).

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 formes très diverses : cylindrique, plate, annulaire, etc. (se reporter aux figures qui suivent). 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 optimale avec un rendement thermique souvent égal à l'unité.

Durée des éléments

La longévité d'un élément protégé est essentiellement fonction :

1^o 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 ; assurer l'étanchéité, point important, etc.).

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

3° De la puissance spécifique évaluée en calories ou en watts dissipés par centimètre carré de la surface d'échange thermique (par exemple surface immergée dans un liquide) ou par centimètre 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 défec- tueuse (partie chauffante d'un élément d'immersion se trou- vant en dehors du bain, par exemple), etc.

En somme, la durée d'un élément dépend :

Des conditions de fabrication, donc du fabricant de l'élément ;

Des conditions d'emploi de l'élément dans un appareil déter- miné, donc du constructeur de cet appareil ;

Des conditions d'utilisation, donc de l'utilisateur de l'appareil.

Classification (suivant la nature de l'isolant)

La qualité de l'élément est primordiale et c'est elle qui condi- tionne 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 conduc- trices de l'électricité sont également mauvaises conductrices de la chaleur. Toutefois la magnésie a la propriété très inté- ressante d'être relativement bonne conductrice de la chaleur tout en conservant aux basses et même aux moyennes tempé- ratures 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 : $Al_2O_3SiO_2$ qui cris-

tallisent 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 : $3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2$ 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.

Nous adopterons une classification simple et pratique plus en rapport avec l'objet de cette étude qu'une classification plus orthodoxe, du point de vue chimique ou électrique, des isolants électriques employés dans les éléments protégés.

On peut considérer :

Les éléments à la magnésie ;

Les éléments comportant des produits réfractaires ;

Les éléments dans lesquels l'isolement électrique est assuré par d'autres matériaux : amiante, mica, verre ou quartz, matière plastique, etc.

ÉLÉMENTS A BASE DE MAGNÉSIE

Ce sont surtout des éléments blindés. Ils sont depuis longtemps de fabrication courante et sont essentiellement utilisés pour des applications domestiques et industrielles. Les premiers qui ont été présentés sur le marché français portaient les noms suivants (ordre chronologique) : calrod, backer, chromalox, tubalox, métanic, spyrox, rubanox, néocal, pyrotenax. Mais la plupart des brevets qui les protégeaient sont tombés dans le domaine public. Certaines marques de fabrique ont disparu de ce fait ; d'autres sont nées qui couvrent souvent des éléments de fabrication similaire ou assez voisine. Le nombre des fabricants français est relativement élevé et la production globale annuelle est considérable et tend à s'accroître.

Préparation de la magnésie

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

Elle est obtenue en partant de la magnésite ou carbonate de magnésium impur. La magnésite est, après calcination, fondue au four à arc (2700 °C) 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 électrofondue et on la broie à une granulométrie bien définie. Sa densité réelle est de l'ordre de 3,7.

On peut aussi obtenir de la magnésie calcinée en partant de la magnésie chimique préparée elle-même à partir de sels extraits de l'eau de mer par voie chimique.

Enfin, pour la fabrication de certains éléments tubulaires, on peut recourir à un procédé de production directe de la magnésie en partant de magnésium chimiquement pur que l'on traite par oxydation en présence d'eau, à haute pression (supérieure à 70 hpz) et à 250 °C. Au cours des réactions qui s'ensuivent, il se produit théoriquement une augmentation importante du volume, mais qui se trouve limitée par l'espace dans lequel elle se produit, d'où une certaine compression du produit final.

Pratiquement, les éléments industriels fabriqués actuellement en France contiennent tous, à notre connaissance, de la magnésie électrofondue. Toutefois un certain nombre d'éléments encore en service ont été fabriqués par le processus chimique rappelé ci-dessus.

Fabrication des éléments

Une des principales difficultés de la fabrication de ces éléments est d'obtenir une compression correcte de la magnésie, pure ou mélangée à un liant convenable, tout en maintenant, notamment dans le cas des éléments tubulaires, 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.

Une autre difficulté résulte de ce que la magnésie est très hygrométrique : la fermeture des tubes doit faire l'objet de soins particuliers qui sont, en principe, du domaine du fabricant.

Différents types d'éléments Caractéristiques courantes

Nous examinons ci-après les principaux types d'éléments.

a) **Éléments tubulaires blindés avec résistance hélicoïdale**

Un tel élément est généralement constitué par un fil boudiné, en alliage « nickel-chrome » à forte ou à faible teneur, contenu tout entier dans un tube métallique approprié, rempli de magnésie en poudre (fig. 8) se rapportant à un élément en U.

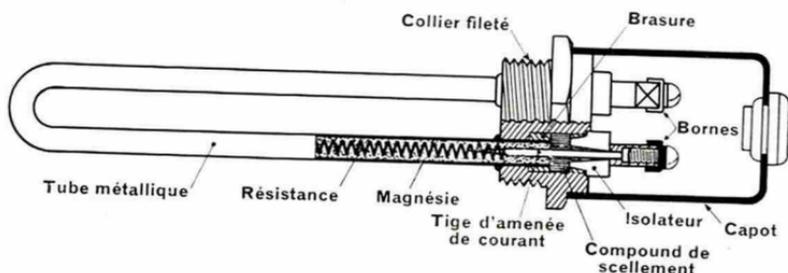


Fig. 8

Le fil résistant est enroulé en forme d'hélice très régulière et de diamètre inférieur à celui du tube extérieur (fig. 9). Les extrémités sont fixées à une tige d'amenée de courant de faible résistance électrique (telle que : acier très doux, monel, nickel, acier inoxydable, suivant la température d'utilisation).

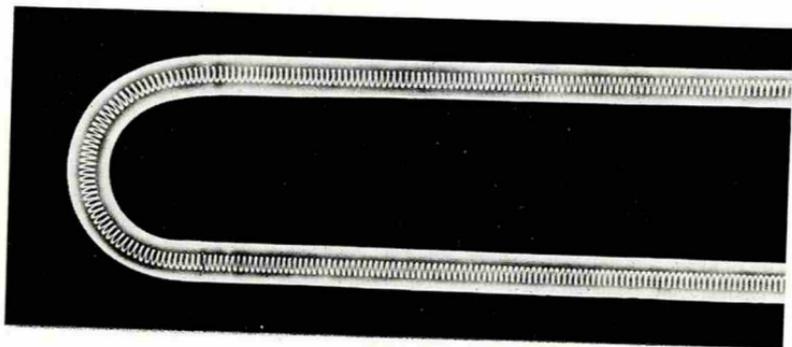


Fig. 9

La fabrication de ces éléments tubulaires, bien que délicate, est parfaitement au point depuis longtemps. 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 des détails de fabrication qui n'intéressent que le fabricant. 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 ou à secousses et de machines spéciales qui concourent à une réduction du diamètre du tube, par différents procédés tels que rétreinte, étirage, écrasement, laminage, éventuellement avec recuits intermédiaires entre passes ou recuit final pour rendre au métal sa ductilité primitive.

La longueur des tubes est fonction de la hauteur utile de la machine de remplissage. Dans l'état actuel des machines utilisées, la longueur maximale est de quelques mètres (7 à 10).

Les diamètres ne sont pas actuellement normalisés. Ils varient, suivant les fabricants, de 6 à 17 mm environ.

Les tubes peuvent être soit rectilignes, avec ou sans ailettes de refroidissement, soit de formes très diverses suivant les besoins. La figure 10 montre, à titre d'exemples, quelques-unes de ces formes.

Les tensions usuelles, non normalisées jusqu'à présent, s'échelonnent entre 24 et 440 V, sauf cas exceptionnel.

A titre d'exemple, les éléments à immersion sont généralement constitués par un, deux ou trois tubes repliés en épingles à cheveux ; les extrémités sont montées sur un même bouchon ou bride de fixation ; l'enveloppe est en cuivre nu, en acier doux ou protégé, en acier inoxydable, en inconel. Les tableaux VI et VII extraits de catalogues de fabricants donnent, à simple titre indicatif, les caractéristiques de thermoplongeurs usuels pour chauffage de liquides.

Certains éléments sont à deux circuits permettant de faire varier la puissance (un seul circuit ou deux circuits en série



Fig. 10

TABLEAU IV

Chauffage de l'eau			Chauffage de l'huile		
Nombre de circuits	Longueur m	Puissance W	Nombre de circuits	Longueur m	Puissance W
1	170	500	1	154	300
1	185	750	2	228	500
1	230	1 000	2	320	750
2	240	1 000	2	413	1 000
2	340	1 500	2	590	1 500
2	435	2 000	2	785	2 000
2	518	2 000	3	240	600
3	200	1 200	3	240	800
3	240	1 500	3	290	1 000
3	305	2 000	3	415	1 500
3	375	2 500	3	540	2 000
3	435	3 000	3	360	2 000
3	255	3 000	3	440	2 500
3	340	4 000	3	520	3 000
3	400	5 000	3	680	4 000
3	470	6 000	3	840	5 000
3	615	8 000	3	1 000	6 000
3	760	10 000			
3	900	12 000			

ou en parallèle) ou à trois circuits (alimentation monophasée ou triphasée en étoile).

D'autres éléments sont obtenus en coulant, dans un moule de forme quelconque contenant un tube blindé tel qu'il vient d'être décrit, un métal : fonte (température maximale d'enrobage de l'ordre de 1 300 °C), aluminium, bronze. Avantages : résistance mécanique élevée, grande surface chauffante, distribution uniforme de la chaleur sur une grande surface. Ces éléments se répandent de plus en plus.

Un type particulier d'élément tubulaire comporte deux enveloppes : une première enveloppe en tôle d'acier mince fondue longitudinalement formant gaine pour le fil résistant et l'isolant ; une deuxième enveloppe, plus épaisse et de nature appropriée à l'emploi prévu, assurant la protection

TABLEAU V

Puissance en W	Longueur sous tête en mm		Nombre de circuits (en épingle à cheveux)
	Cuivre rouge Inoxydable	Acier Inconel	
750	145	270	1
1 000	185	350	1
1 500	245	470	2
2 000	325	630	2
3 000	325	630-480	3
5 000	410	770	3
7 500	590	1 150	3
10 000	900		3
15 000	1 150		3

N.B. — Les thermoplongeurs à 3 circuits sont prévus pour une alimentation triangle-étoile. Les tubes en cuivre servent normalement pour le chauffage de l'eau et les tubes en acier pour le chauffage de l'huile, du mazout, etc. Le diamètre du tube varie, suivant les constructeurs de 8,7 à 16 mm, en fonction de la puissance. La longueur chauffante est égale à la longueur indiquée moins 30 mm. Les bouchons de fixation ont un diamètre de 45-55-77 mm, selon l'importance de l'appareil.

extérieure. Diamètre extérieur de 10,8 mm ; longueur maximale de 5 m.

Certains dispositifs de boudinage peuvent permettre la fabrication de boudins à spires jointives, à spires espacées, à pas différents, à deux fils au lieu d'un seul, etc.

Les autres caractéristiques relatives aux éléments tubulaires (puissance, température, charge spécifique, enveloppes) sont indiquées plus loin, pages 44 à 47. Se reporter également aux tableaux IV et V.

b) **Éléments cylindriques blindés à résistance non boudinée**

De tels éléments, utilisés notamment pour l'équipement de parois chauffantes, comportent une âme en fil résistant (cuivre, nickel-chrome, etc.) enrobée dans de la magnésie en poudre ou dans un produit pulvérulent à base de magnésie, l'ensemble étant enfermé dans un tube en cuivre ou en acier

(fig. 11). Au cours de la fabrication, ce tube subit des étirages et des recuits à température variable suivant la nature du métal (environ 550 °C pour le cuivre et 950 °C pour l'acier).



Fig. 11

Le diamètre extérieur des éléments fabriqués jusqu'à maintenant a varié de 5 à 18 mm ; la longueur peut atteindre plusieurs mètres (5 à 12), sans aucun raccord, avec du fil résistant en nickel-chrome à 80/20 ; elle pourrait atteindre 100 à 200 m avec un métal tel que l'aluminium. Les puissances réalisées jusqu'à ce jour sont de 30 à 500 W/m avec des températures maximales d'emploi de 300 à 400 °C. Théoriquement, il semble que l'on pourrait sans inconvénient utiliser ces conducteurs à des températures supérieures, sans que le courant de fuite fût exagéré et peut-être sous réserve d'augmenter (ce qui semble facile à faire) l'épaisseur de l'isolant.

Certains éléments chauffants comportent un ou plusieurs fils de résistance. Pour éviter la détérioration par surchauffe du joint qui les relie au câble d'alimentation, ou bien on augmente le diamètre du bout de l'élément ou bien on remplace les extrémités des fils par un matériau de faible résistance (diminution de R).

c) Éléments plats à fil boudiné

Un tel élément est constitué par exemple par un fil boudiné 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 % 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).

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

Les lames ont une largeur normale de 38 mm (limites de 25 mm et de 75 mm) et une épaisseur de 7 à 9 mm. La longueur totale peut varier de 200 à 1 100 mm environ, les longueurs utiles (chauffées) correspondantes étant respectivement de 100 et 930 mm. La puissance peut varier par exemple de 10 à 2 300 W, selon l'élément et la tension.



Fig. 12

Les anneaux se présentent sous deux types suivant qu'ils sont complètement blindés (sur deux faces) ou semi-blindés (sur une seule face) : leur diamètre extérieur varie de 90 à 220 mm environ et la puissance de 25 à 1 400 W. La figure 12 montre un tel élément coupé permettant de distinguer les fils chauffants.

d) **Éléments plats blindés à ruban découpé**

Contrairement aux éléments précédemment décrits, ils comportent non pas un fil mais un ruban de nickel-chrome, d'une certaine largeur (normalement 15 mm), laminé à l'épaisseur voulue, puis découpé en zig-zag. 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. 13).

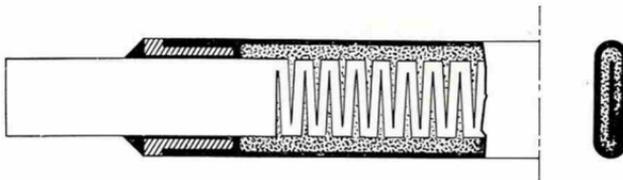


Fig. 13

L'isolant est constitué par de la magnésie électrofondue. 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 acier inoxydable fermé par soudage continu à l'arc électrique sous argon.

L'élément courant de forme plate, à bords arrondis, a les dimensions suivantes : largeur de 22 mm, épaisseur de 6 mm. 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 sont droits et peuvent être réunis deux par deux au moyen de chapeaux étanches pour former des éléments plats en A.

A titre indicatif, les longueurs usuelles des éléments plats, droits pour les tensions courantes (jusqu'à 380 V), varient de 260 à 1 660 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 1 500 à 3 000 W/m et la puissance surfacique de 3 à 5 W/cm² pour les éléments industriels.

On peut donner à un élément plat une forme cintrée suivant un cercle en vue du chauffage de pièces cylindriques, les éléments considérés se font généralement à la demande et, par suite, ne comportent pas de dimensions standards.

La figure 14 montre, à titre d'exemples, quelques formes données à ces éléments.

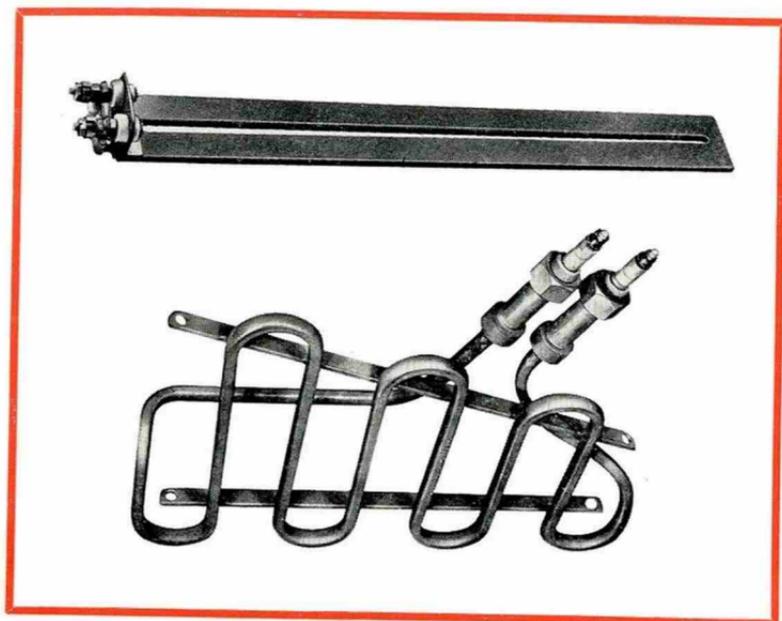


Fig. 14

Puissance

Les valeurs courantes de la puissance des éléments usuels ont été indiquées ci-avant.

La puissance que l'on peut réaliser par construction dans un tube, pour une tension donnée, dépend essentiellement de la longueur utile (longueur chauffée), du diamètre du tube, de l'intensité admissible dans le fil résistant, du diamètre et du pas de l'hélice constituée par le fil boudiné.

La puissance minimale correspond à la résistance maximale du fil résistant ($P = \frac{U^2}{R}$ et $R = \rho \frac{l}{s}$; ρ = résistivité à la température d'emploi, l = longueur, s = section); on est donc limité en particulier 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 en principe avantage à prendre un tube relativement long et une tension plus basse.

On a tendance actuellement à augmenter la puissance des tubes.

La puissance maximale d'un élément est limitée par la longueur maximale du tube, le diamètre du fil, le diamètre et le pas de l'hélice du boudin.

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 est limité : on a cependant fabriqué à un certain moment des éléments jusqu'à 650 V et même 1 500 V.

On a généralement le choix entre l'alimentation à 127 V environ et l'alimentation à 230 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 à 5 fils.

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

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

A titre indicatif, la puissance maximale 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 davantage, par exemple 10 kW/m, pour des éléments particuliers.

Il est très important de souligner que, en pratique, la puissance acceptable dans de bonnes conditions de durée de l'élément dépend essentiellement des conditions d'utilisation de cet élément et notamment de sa température d'emploi et des conditions de transmission de la chaleur.

Température

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

— 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 (exemple : 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, en ce qui concerne la convection et le rayonnement ;

- De la température de ramollissement du fil résistant ;
- De l'épaisseur de la magnésie ;
- De la température maximale que peut supporter l'enveloppe, compte tenu de l'ambiance dans laquelle elle plonge ; par exemple l'oxydation à l'air libre augmente rapidement avec la température lorsque cette dernière est élevée.

Puissance spécifique (charge)

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 surfacique en W/cm^2 de surface d'échange) sera limité :

- Par la température maximale à laquelle l'élément peut travailler donc :
- Par la température maximale acceptable pour l'enveloppe (chauffage continu ou discontinu) ;
- Par la température de fusion du métal constituant la résistance (en général, nickel-chrome) ;
- Par la température à partir de laquelle l'isolant ne remplit plus sa fonction ;
- Par la valeur du courant de fuite ;
- Par la forme de la section droite de l'élément.

Bien entendu, les conditions de l'ambiance sont capitales : nature (exemple : huile ou compound), mouvement (exemple : 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, le tableau VI donne des valeurs souvent admises ; les maximums, correspondant à des cas particuliers, peuvent être eux-mêmes dépassés parfois.

Bien entendu, les valeurs indiquées sont approximatives ; elles se rapportent à des tubes de section usuelle pour les

TABLEAU VI

Ambiance	Nature de l'enveloppe	Puissance spécifique	
		W/cm (1)	W/cm ² (2)
Air calme	Acier ordinaire, métallisé, inoxydable	2 à 20	1 à 6
Air et autres gaz (3) en mouve- ment (4)	— d° —	2 à 35	1 à 10
Eau (5)	Cuivre ou inoxydable	≤ 35	1 à 10
Huile (6)	Acier	≤ 5	1 à 3

(1) W/cm est la puissance spécifique par cm de longueur du tube.
 (2) W/cm² est la puissance spécifique par centimètre carré de surface de transmission thermique (surface d'échange = surface extérieure utile du tube).
 (3) Gaz naturel, méthane, CO₂, argon, etc.
 (4) La puissance est évidemment fonction de la vitesse du gaz.
 (5) La puissance adoptée dépend bien entendu de l'agitation de l'eau.
 (6) Huile de graissage, huile de chauffe, mazout, diphényle.

températures habituelles d'emploi. Elles donnent des ordres de grandeur.

Nature de l'enveloppe

Le tableau VII indique, pour les métaux usuels, les températures d'emploi et les principales applications.

Pour les bains chimiques, on a souvent recours aux métaux mentionnés dans le tableau VIII.

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 grand 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.

Les tubes en aluminium tendent actuellement à se développer pour les applications industrielles; ils ont pris une place importante pour certains appareils électrodomestiques tels que fers à repasser.

TABLEAU VII

Métal de l'enveloppe	Températures usuelles (1) °C	Principales applications
Cuivre (ordinaire, nickelé, étamé, recouvert de zinc ou de cadmium par voie électrolytique), laiton.	Jusqu'à 200	Chauffage des liquides en général et de l'eau en particulier.
Acier ordinaire.	Jusqu'à 400	Chauffage de l'air et de l'huile.
Aciers inoxydables.	Jusqu'à 700-750 Jusqu'à 650-700	Chauffage de l'air. Bains de sels, bains corrosifs, plaques de cuisine et autres appareils ménagers ou similaires.
Inconel.	Jusqu'à 900	Chauffage de l'air, surtout.

(1) Sans précautions spéciales.

TABLEAU VIII

Nature du bain	Nature du métal de l'enveloppe
Acide sulfurique concentré.	Plomb.
Acide azotique étendu.	Acier inoxydable.
Acides organiques.	Aluminium, aciers inoxydables.
Bains de nickelage.	Plomb, aciers inoxydables, titane.
Bains de chromage.	Aciers inoxydables, titane.
Bains de cuivrage.	Plomb (bain acide), aciers (bain alcalin).
Bains de phosphatation.	Aciers inoxydables.
Bains de soude ou de potasse.	Nickel, acier.
Bains photographiques.	Aciers inoxydables.

ÉLÉMENTS COMPORTANT DES PRODUITS RÉFRACTAIRES

On peut distinguer :

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

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

Produits céramiques en forme

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'exemple, en employant des petites pièces de forme (barillets) à neuf 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 peut réaliser des couplages divers (série-parallèle par exemple ; puissances variant dans le rapport de 1 à 4) ; avec un nombre de trous multiple de 3, on peut 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 exemple, de dimensions et de natures 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 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 peut limiter sensiblement la température maximale d'emploi.

Un élément tubulaire, formant radiateur de chauffage direct pour étuve ou chambre-étuve, peut être constitué par un support cylindrique dans les cannelures longitudinales duquel est emprisonné du fil boudiné en nickel-chrome. L'ensemble est placé et convenablement fixé dans un tube en fonte ou en acier garni d'ailettes. Le tableau IX donne, à titre d'exemple, les caractéristiques d'éléments standards d'une certaine fabrication.

TABLEAU IX

Nature du tube	Longueur totale de l'élément (tube unique avec ailettes) cm	Diamètre des ailettes cm	Puissance (1) en W pour une température au bord des ailettes de	
			180 °C	120 °C
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 pour chauffage de liquides, peut comporter un certain nombre de supports, par exemple en stéatite, empilés sur un axe en métal inoxydable; le fil boudiné en nickel-chrome est enfermé dans les cannelures, les extrémités du fil aboutissent à des bornes portées par une pièce isolante en porcelaine; un capot de protection recouvre la tête de l'élément. Le tableau X donne, à titre d'exemple, les caractéristiques des éléments d'une certaine fabrication tant pour le chauffage d'eau (gaine de cuivre) que pour celui des huiles (gainés d'acier), les tensions nominales étant les suivantes : 110-115, 125, 200, 200-230 V.

Un élément d'immersion pour bain d'électrolyse peut 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 des ordres de grandeur. Bien entendu, 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.

TABLEAU X

Chauffage de l'eau		Chauffage de l'huile	
Longueur de l'élément (sans le capot) mm	Puissance W	Longueur de l'élément (sans le capot) mm	Puissance 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

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'exemple, certains éléments comportent un tube en stéatite sur lequel est enroulé un fil en nickel-chrome recouvert d'un ciment silico-alumineux et d'un enduit vitrifié à 1 000 °C environ par traitement dans un four électrique, les connexions étant établies par colliers, bagues ou simplement par fils souples. Les dimensions courantes sont : longueur totale hors tout : 255-370 mm ; diamètre de la partie chauffante : 32-42 mm ; puissance maximale absorbée (pour une température de 500 °C environ à la surface, en atmosphère calme) : 450 à 700 W.

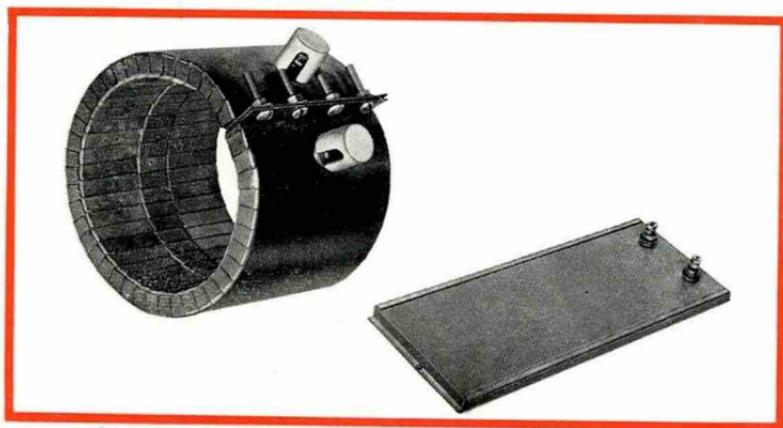
Les supports céramiques ont en général le défaut de mal résister aux variations de température surtout lorsque cette dernière est élevée. De plus, par suite de leur rigidité, ils se prêtent mal aux applications qui nécessitent des formes complexes d'éléments.

Toutefois, ils peuvent être constitués de pièces de forme enfilées les unes au bout des autres, ce qui permet une certaine flexibilité. Par exemple, on peut équiper un collier en acier inoxydable avec des séries droites de barillets en stéatite placées longitudinalement les unes à côté des autres ou encore avec des séries de barillets articulées en cercles et disposées les unes au-dessus des autres. On peut chauffer de tels colliers jusqu'à 800 - 1 000 °C.

La stéatite peut également être utilisée pour le chauffage de blocs métalliques jusqu'à 800-900 °C par exemple.

La figure 15 montre quelques exemples de réalisations.

Fig. 15



Ciments

Les produits réfractaires (silico-alumineux, alumineux ou magnésiens) sont employés à l'état pulvérulent, soit sous forme de ciments, soit secs (notamment pour les appareils domestiques et également pour certains appareils industriels, par exemple du type « foyers de cuisson »).

Les ciments sont obtenus en partant de produits silico-alumineux (donc à base d'alumine Al_2O_3 , de silice SiO_2 et d'eau H_2O), 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 le ciment devient friable (d'où destruction des propriétés de résistance mécanique). Leur conductibilité thermique est généralement faible.

Remarque. — Il existe aussi des ciments réfractaires spéciaux qui sont utilisés jusqu'à 1 850 °C pour l'enrobage des résistances électriques des fours à haute température.

AUTRES ÉLÉMENTS PROTÉGÉS

Dans ces éléments, le support de la résistance électrique est réalisé généralement par de l'amiante, du mica, une substance vitreuse, un produit plastique, du fibrociment, qui en assurent plus ou moins l'isolement électrique.

Les diverses matières sont souvent d'origine naturelle et hétérogène. Par suite, leurs propriétés physiques, notamment mécaniques et électriques, sont parfois assez peu précises et mal connues, notamment aux températures d'utilisation. En particulier, la rigidité électrique peut varier considérablement entre la température ambiante et la température usuelle d'emploi. Nous éviterons donc de donner à ce sujet des indications qui pourraient induire nos lecteurs en erreur. Il appartient aux fabricants d'éléments chauffants de choisir les qualités industrielles voulues des matières considérées, eu égard à l'emploi prévu.

Amiante

L'amiante est un hydrosilicate de magnésie sous forme cristalline (3 MgO , 2 SiO_2 , 2 H_2O). Elle présente une grande souplesse, une bonne résistance aux vibrations et elle n'est pas cassante. On a souvent recours à un mélange (qualité commerciale) de 85 % d'amiante et de 15 % de support

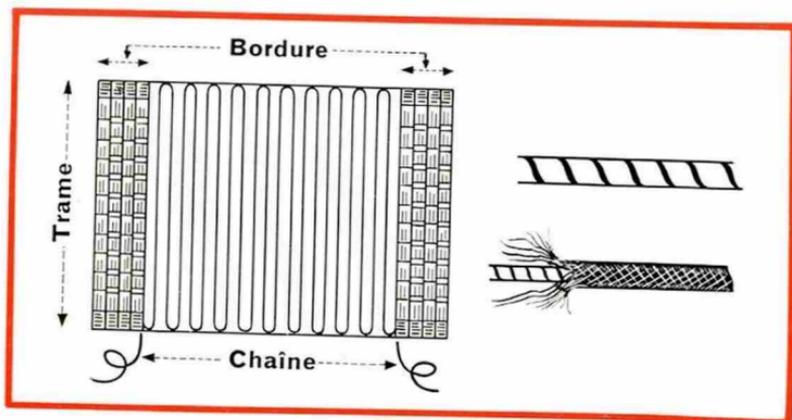
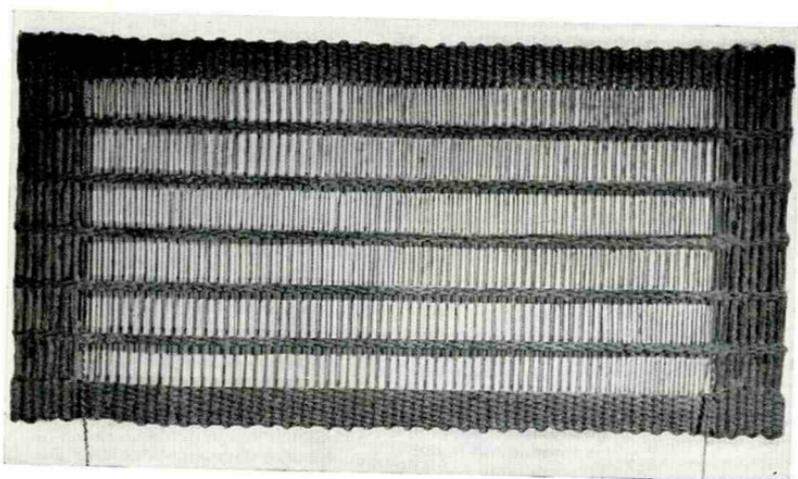


Fig. 16

textile (coton, fibranne), la température d'utilisation étant au maximum de 250 °C. Il existe aussi deux autres qualités (« marine ») susceptibles de températures plus élevées : 450 et 800 °C. Pratiquement, on emploie surtout l'amiante pour des températures ne dépassant pas 450 °C, exceptionnellement 600 °C sur l'élément.

L'amiante est surtout utilisée sous forme de toile, la chaîne formant la partie isolante et la trame la partie électrique chauffante (fig. 16 à gauche et 17).

Fig. 17



La chaîne est constituée par un grand nombre de fils fins d'amiante. Les fils de chaîne sont plus ou moins espacés suivant les applications.

La constitution de la trame est très variable, suivant ses dimensions et l'application envisagée pour l'élément. On a le plus souvent recours aux métaux suivants : alliages « Ni-Cr », constantan, nickel, le plus souvent sous forme de fils, quelquefois de rubans ou de cordons. La section des fils est faible, par exemple de 0,10 à 1,30 mm. Lorsque le conducteur doit être de section supérieure, on groupe les fils en parallèle.

La disposition de la trame peut être très différente suivant la destination de l'élément : circuit unique comportant un seul fil ou plusieurs fils groupés en parallèle, l'espacement des conducteurs étant régulier ou non ; circuits multiples, en vue de l'alimentation en courant triphasé ou diphasé ou d'un groupement éventuel en série ou en parallèle, etc.

Les toiles ainsi tissées comportent une bordure en fils d'amiante de grosseur plus forte que la chaîne et de qualité souvent moindre.

Dans la fabrication des toiles, on n'est limité en principe que par la dimension du métier à tisser, donc par la largeur de la trame, en général 20 à 800 mm. Les éléments livrés sont, pour des raisons mécaniques et pratiques (rechanges), d'une surface relativement réduite eu égard aux possibilités des métiers à tisser (maximum exceptionnel de 1 m²).

L'amiante ayant un faible isolement électrique, les toiles sont en général fixées à leurs supports par des canons en stéatite ou en porcelaine, des rondelles de mica, etc.

Dans certains cas, elles constituent simplement un support des résistances et sont elles-mêmes maintenues en place par un cadre métallique.

Les grilles chauffantes comportent une toile que l'on silicate pour leur donner la rigidité voulue.

Les applications des toiles sont très nombreuses : radiateurs, colliers chauffants, chauffe-colle, tables et plateaux chauffants, étuves, etc., pour s'en tenir au domaine industriel. Exemple fig. 18.

Une autre application importante est celle des cordes chauffantes, constituées par un cordon d'amiante calibré sur lequel on enroule le conducteur métallique et recouvert ou

non d'une tresse d'amiante ou d'autres substances isolantes (fig. 16 à droite).

Certains éléments chauffants sont constitués par un simple fil spiralé disposé entre deux petites plaques d'amiante pressées.

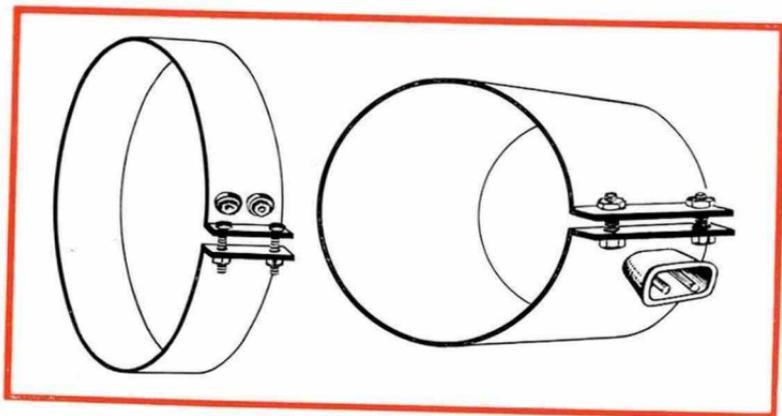


Fig. 18

Il existe une assez grande variété de sorties (amenées de courant ou connexions) des éléments.

La puissance des toiles usuelles peut varier, suivant les dimensions et la fabrication, de quelques dizaines de watts à 2 kW ou davantage. La puissance surfacique admise est très variable, suivant les besoins, par exemple de 0,2 (et même beaucoup moins) à 10 W/cm².

Mica

Le mica (nom donné à différents produits silico-alumineux de potasse et de magnésie) de bonne qualité a un pouvoir diélectrique satisfaisant à la température ambiante. Il perd ses propriétés isolantes à des températures inférieures à celles de l'utilisation maximale du nickel-chrome. La déshydratation du mica pur ou naturel, c'est-à-dire obtenue par découpage et clivage des blocs extraits de la mine, se produit à des températures relativement basses, par exemple 500-750 °C pour les muscovites [micas durs, potassiques, de formule générale $(OH)_2KAl_2(Si_2Al)O_{10}$; densité de 2,7-3,1]

et 700-1 100 °C pour les phlogopites [micas durs ou tendres, magnésiens, de formule générale $(OH)_2KMg_2(Si_2Al)O_{10}$; densité de 2,85].

Le mica supporte assez mal les variations de chaleur qui peuvent entraîner, dans certains cas et plus ou moins rapidement surtout pour les muscovites, la séparation des clivages et l'émiettement du mica.

Pratiquement, on emploie surtout du mica reconstitué, obtenu par collage, au moyen d'agglomérants appropriés (résines naturelles telles que gomme laque ou résines synthétiques telles que silicones), de paillettes minces ou de clivures (« splittings ») convenablement comprimés par passage à la presse à chaud, éventuellement dans des moules.

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 ne présente aucune fragilité. Il est fréquemment employé pour la constitution d'éléments chauffants avec ou sans ailettes (fig. 19), en particulier pour des températures

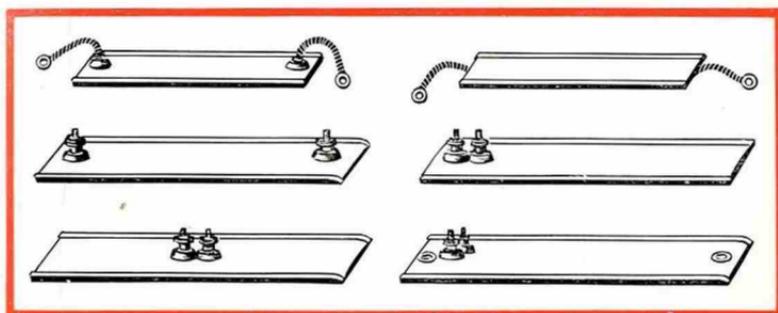


Fig. 19

égales ou inférieures à 400-500 °C et aussi pour des températures maximales de 700-800 °C. On a pu fabriquer également des éléments 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 surtout 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 ou agrafée. Pour une épaisseur totale de l'élément de 4 mm, la puissance surfacique admise est par exemple de 4 W/cm² au maximum, pour 400-450 °C.

Autres exemples : Un élément rectiligne peut être constitué par un boudin de fil très fin, lui-même boudiné sur une âme en acier recouverte de mica. Un collier chauffant peut comporter un ruban en Ni-Cr isolé au mica et protégé par une gaine en tôle pliée et crantée (fig. 20).

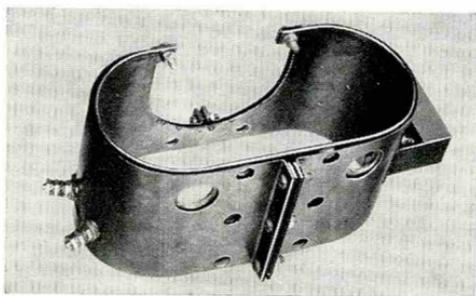


Fig. 20

Il existe de nombreux types de sorties (bornes) d'éléments.

Il semble aussi que le mica doive conserver une place privilégiée dans la fabrication des éléments de chauffage à haute tension (chauffage de grandes masses d'air, par exemple de locaux par convection) et pour l'équipement des éléments de très faible épaisseur.

Verre, quartz

Certains câbles chauffants sont constitués par un fil résistant en Fe-Ni-Cr ou en maillechort, simple ou double, protégé électriquement par des gaines ou tresses de soie de verre ou encore de soie de verre et de caoutchouc de silicone et mécaniquement par une gaine souple en métal approprié (plomb, acier, cuivre). Diamètre de 4 à 9 mm - Résistance de 0,25 à 100 Ω par mètre linéaire. Puissance en général de 30-40 W/m. Utilisation : domaines agricole et industriel (étuves de grandes dimensions, chauffage de liquides).

Assez récemment sont apparus sur le marché français des éléments chauffants souples comportant par exemple une résistance en Ni-Cr ou en Ni renfermée dans un tissu de verre (température limite 550 °C) permettant de chauffer des liquides jusqu'à 350 °C.

On réalise de cette façon des rubans ou des bandes que l'on peut découper aux dimensions voulues ou encore des tissus élémentaires de formes diverses auxquels on peut faire épouser strictement des surfaces quelconques, gauches au besoin, en assemblant ensuite convenablement les tissus élémentaires. Exemple : chauffage d'autoclaves, réservoirs, bassins, tubes, tuyaux, appareils de laboratoires (fig. 21).

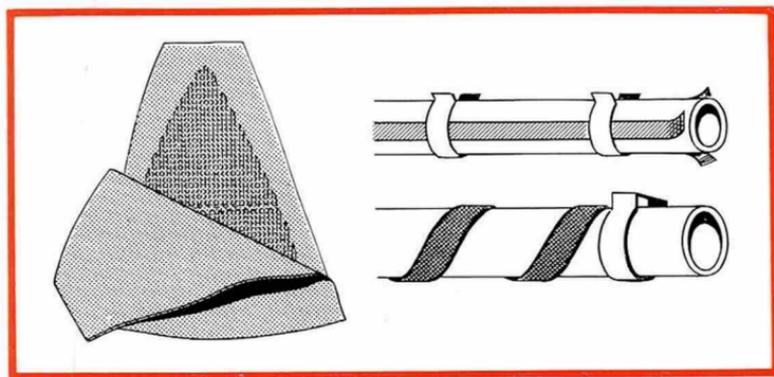


Fig. 21

Pour fixer les idées, certaines bandes pourront fournir une puissance surfacique de 0,4 à 1,25 W/cm².

En remplaçant le verre par du quartz, on peut atteindre 800 °C pour l'élément chauffant, soit 600 °C pour un liquide à chauffer.

Remarque. — Très souvent, les fabricants recourent à plusieurs isolants électriques. Par exemple, les cordes chauffantes peuvent comporter un fil de constantan ou de Ni-Cr boudiné sur une âme en amiante, l'ensemble étant ensuite recouvert de tresses convenables en soie de verre et en amiante avec imprégnation appropriée et éventuellement protection finale par une gaine de plomb ou un tissage métallique souple mais non étanche. Applications : chauffage d'éprouvettes, de bouts de tuyau, d'appareils de laboratoire.

La puissance linéique est par exemple de l'ordre de 300-380 W/m et la température maximale d'emploi de 500 °C.

Autre exemple : fil boudiné sur un support en mica, l'ensemble étant enfermé dans un tube en pyrex. Application : chauffage de bains acides, à 70 °C par exemple.

Il existe également des éléments chauffants constitués par une âme en fibre de verre sur laquelle est bobiné un fil fin en Ni-Cr par exemple, l'ensemble étant ensuite isolé électriquement par deux gaines en soie de verre et protégé mécaniquement, si besoin est, par une enveloppe en aluminium par exemple. Le câble chauffant ainsi constitué peut être éventuellement incorporé dans une pièce coulée en un métal ayant un point de fusion inférieur à 700 °C.

Produits plastiques

Les éléments chauffants plastifiés sont de fabrication assez récente. Cinq exemples :

Premier exemple : Une toile tissée, dont la chaîne est en amiante et la trame en Ni-Cr ou en constantan, est noyée dans un gel de matière plastique obtenu par un traitement approprié. L'isolement électrique est assuré par cette matière. Un tel élément, formant bloc, a une épaisseur de 2,5 à 5 mm et se fabrique sous différentes formes : rectangulaire (max. de 0,90 × 0,20 m) ou carrée (max. de 0,50 × 0,50 m) par exemple. Les puissances surfaciques varient, suivant la température d'emploi, de 0,4 à 1 W/cm². Température maximale de l'ordre de 250 °C.

Deuxième exemple : Des fils conducteurs parallèles, noyés dans une lanière de polyvinyle, constituent un ruban de 13 mm de largeur, permettant une puissance spécifique de 20-25 W/m à 100 °C maximum.

Troisième exemple : Un fil de cuivre est noyé dans une gaine de polyvinyle ou de néoprène pour former un élément qui peut être groupé avec d'autres éléments pour constituer une sorte de manteau ou de ruban chauffant.

Quatrième exemple : Résistance en nickel-chrome isolée aux silicones et disposée dans un tube en cuivre.

Dernier exemple : Des résistances en nickel-chrome isolées et protégées par une gaine en téflon.

Fibrociment

On a recours à des plaques de fibrociment comme support de résistances de Ni-Cr en fil ou quelquefois en ruban pour former des éléments chauffants entrant dans la construction d'étuves, par exemple.

Remarque. — Les indications qui précèdent ne sont pas limitatives. Elles sont données à titre d'exemples.

TEMPÉRATURES D'EMPLOI DES ÉLÉMENTS PROTÉGÉS

Le tableau XI 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. Elle dépend en particulier de la qualité du matériau isolant, de la fabrication et des conditions d'utilisation des éléments.

Par exemple, dans des essais de laboratoire, on a pu réaliser, avec des éléments blindés à la magnésie, des températures

TABLEAU XI

Nature de l'isolant	Températures usuelles d'emploi de l'élément protégé en °C	
	Courantes	Maximales
Amiante	Jusqu'à 250-350	400-600
Mica (muscovite)	— 350-500	650
Mica (phlogopite)	— 500-700	750
Verre	— 350	500
Quartz	— 600	800
Produit silico-alumineux en poudre	— 550	550
Produit réfractaire en forme	— 800	1 000
Ciment	— 800	800-900
Magnésie en poudre	— 500-600	750-800

N.B. — Ces nombres ne sont donnés qu'à titre indicatif, comme ordres de grandeur usuels. En tous cas, se reporter au texte.

de l'ordre de 1 000 °C avec une durée relativement satisfaisante; toutefois, pratiquement, on utilise surtout ces éléments au-dessous de 750-800 °C.

De même, on utilise généralement la stéatite pour des températures relativement basses, bien qu'il soit possible de le faire à des températures élevées.

La qualité du matériau de base est un point essentiel à examiner pour les problèmes de chauffage à température élevée.

Il est toujours préférable d'adopter, surtout aux hautes températures et chaque fois que cela est possible (question de volume et de surface), une puissance surfacique assez faible de façon à augmenter la durée des éléments.

b) **ALLIAGES « FER - CHROME - ALUMINIUM »**

Nature

Ces alliages contiennent environ 20 à 30 % de chrome, 2 à 6 % d'aluminium, le reste étant constitué par du fer (et également d'autres métaux en faible proportion, par exemple du cobalt).

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

On a tendance actuellement à les répartir entre trois classes :

- 8 % Cr + 5/7 % Al + Fe
- 20 % Cr + 5/7 % Al + Fe
- 30 % Cr + 5/7 % Al + Fe

ces pourcentages étant approximatifs et les températures maximales d'emploi étant respectivement de l'ordre de 1 050 - 1 200 - 1 350 °C.

Il existe toutefois d'autres alliages contenant par exemple du nickel, du chrome et de l'aluminium.

Caractéristiques

Les propriétés de ces alliages sont fonction du pourcentage de leurs constituants. Ils sont caractérisés essentiellement par une résistivité élevée (tableau I, page 18 ; nuances kanthal, RCA, ARE, ordre chronologique de leur présentation sur le

marché français), et une grande résistance à l'oxydation et à l'action du soufre et de ses composés aux températures élevées. Ils sont magnétiques jusque vers 600 °C, ce qui occasionne une variation de l'impédance au-dessus de cette température.

Leur résistivité est de l'ordre de 135-145 $\mu\Omega$ cm : cm² contre 110 environ pour le nickel-chrome à 80/20.

Le coefficient de température α est positif et de très faible valeur moyenne : de 0,3 à $0,6 \times 10^{-4}$ entre 0 et 1 200-1 350 °C suivant l'alliage et la température.

Le tableau XII relatif aux alliages RCA 44 (environ 30/35 Cr + 5/6 Al + Fe), le tableau XIII relatif aux alliages kanthal nuances DS (environ 22 Cr + 4,5 Al + 0,50 Co + Fe), A (environ 22/23 Cr + 5 Al + 0,5 Co + Fe) et A₁ (environ 22/23 Cr + 5,5 Al + 0,5 Co + Fe) et la figure 22 complètent les indications précédentes; les caractéristiques des alliages SER sont les suivantes : nuances M (environ 21/22 Cr + 4/4,5 Al + 0,3/0,6 Si + Fe), F (environ 22/23 Cr + mêmes éléments), Co (environ 22/23 Cr + 5/5,5 Al + 0,3/0,6 Si + 0,5/1 Co + Fe).

La densité est relativement faible : de 7 à 7,25 contre 8-8,5 pour le Ni-Cr à 80/20 (soit en moyenne 15 % en moins), facteur intéressant de comparaison pour le prix de revient d'un corps de chauffe ou d'un élément chauffant. La densité

TABLEAU XII

Dia- mètre mm	Section mm ²	Poids par mètre g	Longueur pour 1 kg m	Résistance en ohms par mètre			
				0 °C	1 000 °C	1 200 °C	1 300 °C
0,2	0,031 42	0,223 1	4 482	44,6	47,1	48,7	49,5
0,5	0,049 09	0,348 5	2 969	28,5	30,1	31,1	31,6
1,0	0,785 40	5,576	179	1,78	1,88	1,95	1,98
1,5	1,767 1	12,546	79,7	0,732	0,837	0,865	0,879
2,0	3,141 6	22,315	44,8	0,446	0,471	0,487	0,495
2,5	4,908 7	34,852	29,7	0,285	0,301	0,311	0,316
3,0	7,068 6	50,187	19,9	0,198	0,209	0,216	0,220
4,0	12,566 4	89,231	11,2	0,111	0,117	0,121	0,125
5,0	19,634 9	139,407	7,17	0,071 3	0,075 3	0,077 9	0,079 2

TABLEAU XIII

Propriété	Alliage		
	A ₁	A	DS
Résistivité à 20 °C en $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2, \dots$	145	139	135
Coefficient de température [valeur moyenne de α entre 20 °C et 1 350 °C (A ₁), 1 300 °C (A), 1 200 °C (DS)]	$32,4 \times 10^{-6}$	$48,5 \times 10^{-6}$	$63,5 \times 10^{-6}$
Densité	7,10	7,15	7,25
Dilatabilité [valeur moyenne entre 20 °C et 1 300 °C (A ₁ et A) 1 100 °C (DS)]	$26,8 \times 10^{-6}$	$24,2 \times 10^{-6}$	$19,5 \times 10^{-6}$
Résistance à la traction en kg/mm^2	80-85	75-80	80-85
Limite d'élasticité en kg/mm^2	60-65	55-60	60-65
Allongement à la rupture en %	12-16	13-17	12-16
Point de fusion en °C	1 510	1 510	1 510
Température limite d'emploi en régime permanent, en °C	1 370	1 320	1 200

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 Fe-Cr-Al (soutenir convenablement l'élément chauffant) et d'autre part dans leur façonnage (par exemple, pour le kanthal : façonnage à froid pour les fils de faible section d'un diamètre maximal de 4 mm ainsi que pour les rubans ; façonnage à chaud, par chauffage électrique obtenu par courant passant directement dans le métal, pour les fils de grosse section ou les bandes).

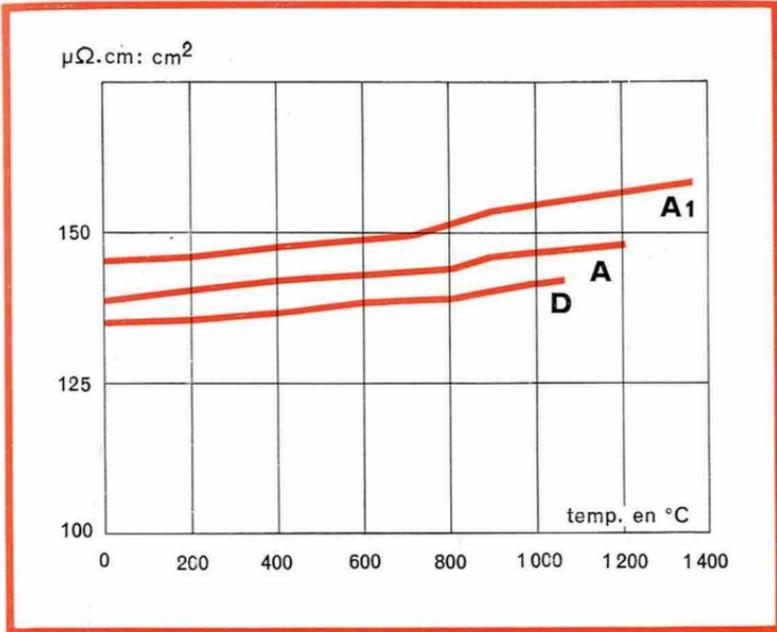


Fig. 22

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 puissance surfacique 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 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 1 350 °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.

La publication C 31-711 de l'U.T.E. (voir page 23) est valable également pour les dimensions des fils et barres en Fe-Cr-Al.

A titre indicatif, les RCA sont livrés en principe en fils de 0,05 ou de 0,17 mm (suivant la nuance) à 5,30 mm de diamètre, ainsi qu'en barres et rubans.

Normalement, le kanthal A₁ se fabrique en bandes laminées à froid pour des sections variant de 50 × 2,8 à 5 × 0,1 mm et également en fils de 1 mm et au-dessus ; le kanthal A en fils tréfilés de diamètre variant de 6,7 à 0,05 mm ou en rubans de sections variant de 4 × 1,25 à 0,2 × 0,1 mm ; le kanthal DS 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 A₁.

Dans certains cas, les fils fins peuvent comporter une surface oxydée en vue d'assurer un certain isolement électrique à tension réduite (tension entre spires d'un boudin).

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, ainsi que dans des éléments tubulaires blindés.

A titre d'exemple, le kanthal A est utilisé pour des éléments protégés, constitués par des boudins disposés sans remplissage dans des tubes en quartz, sous certaines conditions de température.

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 :

1° *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 H₂S et SO₂. 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 (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 éventuellement de la magnésie aux températures élevées, par exemple jusqu'à 1 100 °C. Jusqu'à 800-900 °C, l'argile réfractaire de bonne qualité, exempte de silice libre, convient. Au-dessus de 1 000 °C, on peut employer de la sillimanite ou du corindon fondu. Mêmes réserves pour les ciments d'enrobage.

2° Fragilité

Les Fe-Cr-Al cristallisent à chaud, comme nous l'avons vu ; d'où leur fragilité à froid après un certain service. Conséquence : adopter une construction appropriée ; en pratique, les constructeurs de fours soutiennent convenablement les résistances et prennent toutes dispositions pour laisser le libre jeu de la dilatation. Les zones soudées présentent toutefois une certaine fragilité à froid ; il suffit d'en tenir compte dans les manipulations.

3° 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 oxyacétylénique ou mieux encore de l'arc sous argon.

4° Durée pratique

A température égale, la durée des Fe-Cr-Al est en principe plus élevée que celle des Ni-Cr.

A titre indicatif, le tableau XIV donne les taux de transmissions calorifiques généralement conseillés par un fabricant. Toutefois, ces indications sont, bien entendu, tout à fait relatives. Les valeurs à adopter dépendent de la façon dont les résistances peuvent rayonner. Cela explique en particulier

TABLEAU XIV

Alliage	Puissance maximale admissible en W/cm ² pour une température en °C du four de							
	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300
A ₁ (bande, fil)					4,0	3,0	2,0	1,5
A (fil, ruban)				4,0	3,0	2,2	1,6	
DS (bande, fil, ruban) ..	3,9	3,5	3,0	2,4	1,5	1,0		

N.B. — Se reporter au texte.

la différence que l'on peut trouver en pratique entre les valeurs choisies pour les fils ou les rubans par exemple. Il faut alors faire intervenir le « coefficient de profil » des résistances. Les valeurs considérées dépendent aussi, pour les bandes, de la profondeur des ondulations et, pour les fils, du diamètre ainsi que du pas du boudin hélicoïdal.

Ces remarques sont d'ailleurs valables pour les autres résistances et en particulier pour les Ni-Cr.

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

c) AUTRES MÉTAUX

Pour obtenir des températures élevées, on a utilisé des métaux tels que le nickel (température de fusion : 1 455 °C), le chrome (1 800 °C), l'iridium (2 360 °C), métaux assez coûteux et délicats dont l'emploi a été limité à quelques fours de laboratoire.

Pratiquement, on a recours actuellement à d'autres métaux également coûteux :

- Soit le platine ou le platine-rhodié et aussi le rhodium pour des fours de laboratoire ou des petits fours industriels ;
- Soit le molybdène, notamment pour des fours industriels de petite puissance ;
- Soit le tungstène et aussi le tantale.

Platine et platine-rhodié, rhodium

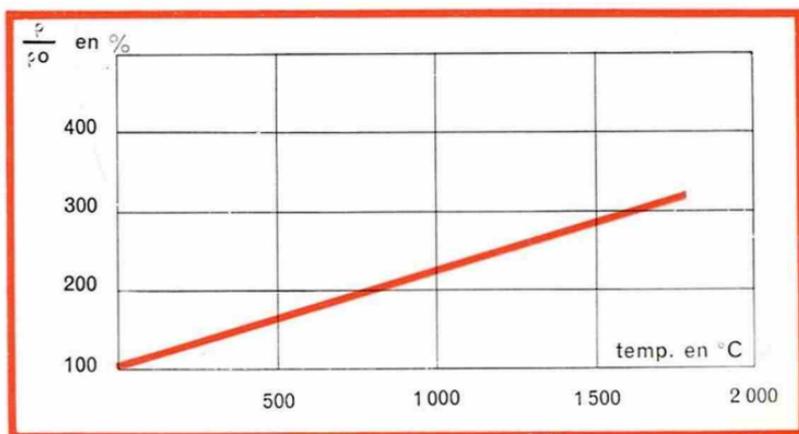
Les caractéristiques essentielles de ces métaux sont les suivantes :

TABLEAU XV

Propriétés	Pt	Pt-Rh à 10 %	Pt-Rh à 20 %
Densité	21,5	20	18,75
Point de fusion en °C	1 769	1 850	1 884
Résistivité ρ à 0 °C en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$: cm ²	9,81	18,4	20,4
Température maximale de régime en °C (1)	1 400	1 500	1 600-1 700
Coefficient de température α entre 0 et la température de régime (10^{-3})	31,62	14,22	12,10
Puissance émise tolérable à la température maximale de régime en W/cm ²	2	2	2-1

(1) Température sur la résistance.

La figure 23 ci-dessous donne la courbe de variation de ρ en fonction de la température pour du platine-rhodié à 20 % de rhodium.



Pour la construction des fours à résistances de platine, il y a lieu de prendre certaines précautions, notamment en ce qui concerne le choix des réfractaires (tube et ciment) et la nature de l'atmosphère (tension de vapeur relativement élevée à haute température, réaction en présence de certaines impuretés telles que le silicium), de façon à assurer à la résistance, de prix élevé, une longue durée de vie.

La résistance est généralement constituée par du fil enroulé sur un tube en réfractaire approprié.

Le nombre de fours actuellement en service en France est de l'ordre de quelques centaines, la puissance unitaire étant généralement de 1 à 7 kW.

On fait également des fours à résistance de rhodium pur (fritté ; densité : 12,48 ; point de fusion : 1 985 °C ; ébullition au-dessus de 4 500 °C ; résistivité de l'ordre de 4,3-4,8 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$: cm^2 à 0-20 °C et de 53 à 1 900 °C), pour des températures sur la résistance de l'ordre de 1 850-1 900 °C. Un certain nombre de ces appareils sont actuellement en service en France.

Molybdène, tungstène, tantale, niobium

Les propriétés essentielles des trois premiers de ces métaux sont groupées dans le tableau suivant :

TABLEAU XVI

Propriétés	Mo	W	Ta
Densité	9,6-10,28	19,32	16,65
Point de fusion en °C . .	2 625 ± 25	3 380	2 996 ± 50
Température de vaporisation en °C	4 800	5 930	
Résistivité ρ à 0°-20 °C en $\mu\Omega \cdot \text{cm}$: cm^2	5,17	5,5	12,4
Coefficient de température moyen α entre 20 et 2 000 °C (10^{-3})	5,5	5,5	3
Température limite usuelle d'emploi dans le four en °C	1 500-1 700	2 000-2 400	2 200
Puissance surfacique adoptée généralement en W/cm^2 . .	10-20	10-20	10-20

Les valeurs précédentes doivent être considérées comme approximatives ; elles ne sont en général pas connues avec précision et varient suivant les auteurs (pureté du métal examiné, conditions de mesure). Elles donnent des ordres de grandeur : se reporter au texte qui suit.

La figure 24 donne les variations de ρ en fonction de la température pour les métaux considérés.

Molybdène

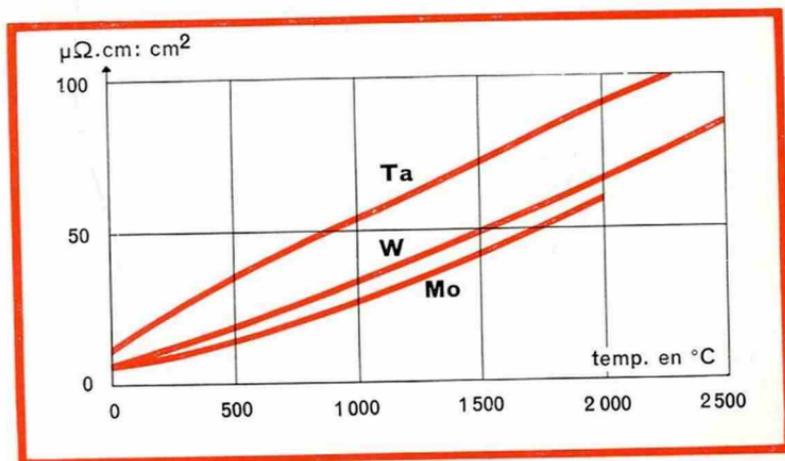
Il commence à s'oxyder dans l'air ou l'oxygène à partir de 400 °C et rapidement à partir de 600 °C (MoO_3 volatil), dans la vapeur d'eau à partir du rouge, dans l'anhydride carbonique CO_2 à partir de 1 000 °C. Il se carbure dans l'oxyde de carbone CO et les hydrocarbures à partir de 1 000 °C. Dans un vide poussé (10^{-4} mmHg), l'évaporation est importante vers 1 700 °C.

Aux températures élevées, il faut :

- Soit le protéger par une atmosphère spéciale : gaz inerte ou gaz réducteur soigneusement épuré (N_2 , NH_3 dissocié, gaz d'éclairage partiellement brûlé, gaz rare ; de préférence H, cas le plus fréquent) ;

- Soit l'employer sous un vide de moins de 10^{-2} mm Hg.

Fig. 24



Il faut aussi tenir compte des réactions entre le molybdène et les matériaux réfractaires, surtout aux températures élevées : emploi de conducteurs librement suspendus ou reposant seulement en quelques points sur des matériaux convenablement choisis (par exemple Al_2O_3 jusqu'à 1 700 °C, crochets en Mo jusqu'à 1 900-2 000 °C).

Pour les températures élevées (fours à vide spéciaux), on peut assurer l'isolation thermique au moyen d'écrans (tôles en Mo par exemple) au lieu de matériaux réfractaires.

Le molybdène est employé, suivant les cas, sous forme : de fils boudinés, de fils assemblés en faisceaux, de tiges ou de baguettes, de bandes ou de rubans, de plaques ou de feuilles.

La température maximale d'emploi est de 1 900 °C (température sur la résistance). En général, on se limite à une valeur moindre soit 1 500-1 700 °C dans le four. La température admise dépend des caractéristiques et de l'isolation du four, de l'ambiance des résistances (atmosphère spéciale ou vide : de la nature du service (continu : 10 à 20 W/cm² ; discontinu), 20-40 W/cm² exceptionnellement).

Tungstène

Le tungstène ou wolfram (W) est plus difficile à travailler que le molybdène, ce qui explique en partie l'emploi plus fréquent de ce dernier. Par contre, ses températures de fusion et de vaporisation sont plus élevées et sa vitesse d'évaporation aux températures élevées est plus faible. Il commence à s'oxyder dans l'air ou l'oxygène à partir de 500 °C. Comme pour Mo, il faut recourir à un gaz inerte ou neutre ou au vide pour le protéger et, aux températures très élevées, employer des tôles-écrans pour assurer l'isolation thermique.

Le tungstène est employé le plus souvent sous forme de barres rondes, de bandes ou de tubes.

La température maximale est de 2 000-2 200 °C, mais elle peut atteindre 2 500 °C sur le métal dans des conditions particulières.

Tantale

Il est plus facile à travailler que le tungstène. Il ne tolère pas H, O, N, C ; à l'air, il y a oxydation à partir de 500 °C ; on note une nitruration à partir de 700 °C, rapide à partir de 1 000 °C. Il est préférable au tungstène et au molybdène

pour les fours à vide poussé, car il n'a pas de tendance à la fragilité comme les métaux précédents.

Il faut également le protéger par emploi d'un gaz inerte ou neutre ou recours au vide.

Il est employé sous forme de fils spiralés ou de tubes.

En gros, ses caractéristiques sont intermédiaires entre celles du tungstène et du molybdène. Sa température maximale d'emploi est de l'ordre de 2 400 °C.

Niobium

Il semble que ce métal soit en voie d'être utilisé également comme résistance chauffante. Comme le tantale, il reste ductile après chauffage dans le vide. Densité : 8,56. Température de fusion : 2 420-2 500 °C. Température d'ébullition : 3 700 °C.

Observation

Les métaux considérés (Pt, Pt-Rh, Rh, Mo, W, Ta, Nb) ont un coefficient de température α élevé. Les fours qu'ils équipent doivent donc comporter un dispositif de démarrage pour limiter l'appel de courant au départ.

Ils doivent être utilisés — à haute ou à très haute température — en atmosphère spéciale ou dans le vide. La construction des fours nécessite des précautions particulières tant pour le choix des réfractaires et des écrans d'isolation thermique que des supports de résistances et des amenées de courant.

A notre connaissance, les puissances maximales des fours équipés avec ces métaux ont atteint 30-35 kW pour le molybdène et 200 kW pour le tungstène.

Les températures usuelles sont en général sensiblement inférieures aux températures maximales possibles.

Le tableau XVII donne, d'après un document assez récent, les températures de travail les plus élevées que l'on peut adopter pour les métaux indiqués pour lesquels, après 100 h de fonctionnement, l'évaporation sous un vide de 10^{-5} mmHg n'excède pas 1 % (les valeurs des températures de fusion diffèrent un peu de celles que nous avons mentionnées précédemment ; nous en avons donné les raisons).

TABLEAU XVII

Métal	Température de fusion (°C)	Température de travail (°C)
W	3 410	2 560
Ta	3 030	2 400
Rh	3 180	2 380
Nb	2 420	2 230
Mo	2 630	1 910
Pt	1 998	2 288

d) REMARQUES GÉNÉRALES

Répartition des éléments chauffants et souplesse du chauffage électrique

L'effet Joule se manifeste en tout point des éléments chauffants. Or, d'une part, *ceux-ci peuvent épouser la forme de la chambre de chauffe d'un four et d'une étuve ou de tout autre appareil*, — d'autre part, *ils peuvent être répartis au gré du constructeur*, — enfin, *ils peuvent être conçus de telle façon que la chaleur émise pour unité de longueur ou de surface soit variable* (boudin à pas variable). 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 une des caractéristiques essentielles du chauffage électrique.

Importance de la tension

1^o *Tension nominale.* — La puissance $P = UI = U^2/R$ 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 (ou autre appareil électrothermique), lorsque celui-ci absorbe la puissance P (fig. 25-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 = $2 r l I$, perte en ligne : $2 r l I^2$).

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 sont inférieurs aux prévisions du constructeur. La durée de la mise en température est allongée, le rendement moyen du four peut diminuer ; dans certains cas particuliers, on n'atteint pas la température désirée et le traitement ne peut être réalisé ;

b) S'il y a surtension, les phénomènes sont plus graves :

1. *Période de mise en température.* — La résistance $R = R_0(1 + \alpha t)$ varie avec la température t . La chaleur :

$$Q = 0,24 R I^2 t = 0,24 \frac{U^2}{R} t,$$

développée au début pendant un intervalle de temps t suffisamment petit pour que R puisse être considérée comme constante, sert uniquement à échauffer le conducteur que, pour fixer les idées, nous supposons être un fil de longueur l , de section s , de densité d et de chaleur spécifique c . On a :

$$0,24 \frac{U^2}{R} t = l s d c \theta$$

θ étant l'élévation de température. D'où :

$$\theta = 0,24 \frac{t}{R l s d c} U^2$$

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 dans une certaine mesure, à la variation plus ou moins importante 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 α 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 utilisateur. 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 25-b, illustration du tableau XVIII, montre comment varie l'effet Joule en fonction de la tension :

TABLEAU XVIII

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

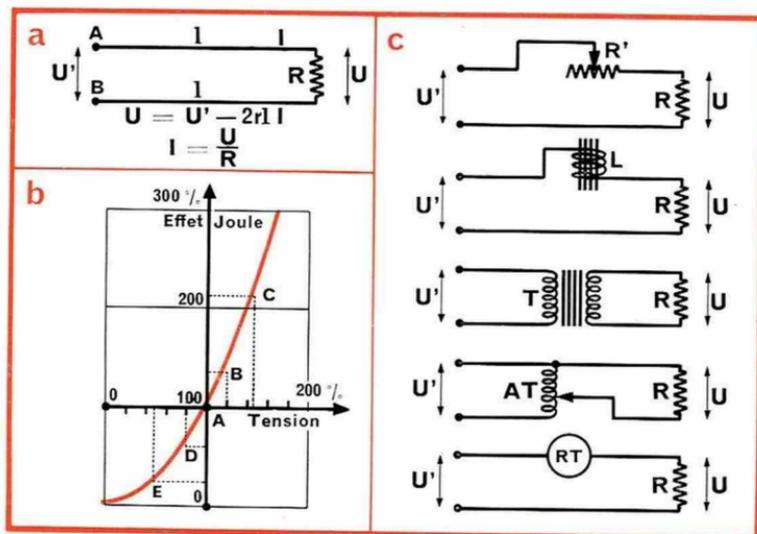


Fig. 25

Réglage de la puissance

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

1^o *Action sur U.* — On peut faire varier la valeur de la tension appliquée (fig. 25-c) soit au moyen d'un rhéostat, soit au moyen d'une inductance, soit au moyen d'un 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 l'est généralement pas pour les fours industriels alimentés en courant alternatif.

β) *Inductance.* Exceptionnellement, on peut employer une inductance 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 autotransformateur.* Cette solution est adoptée pour certains fours à courant alternatif (en particulier lorsque la résistance métallique a un coefficient de température α élevé), ainsi que pour les cermets et les éléments chauffants non métalliques.

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

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

Dans les fours électriques ainsi que pour les éléments protégés, c'est généralement à ces dernières dispositions que l'on a recours.

Cermets

LES « cermets » (céramique-métal) ont fait leur apparition il y a quelque dix ans sur le marché. Un grand nombre de fours équipés de telles résistances sont en service en France.

A notre connaissance, il y a deux sortes de cermets utilisés en Europe continentale : le « kanthal-super » (Suède) qui équipe les appareils précédents et le « mosilit » (Allemagne) au sujet duquel nous sommes moins renseignés. Les indications qui suivent se rapportent donc essentiellement au kanthal-super.

Les techniques d'utilisation ont été améliorées au cours des dernières années.

Nature

Il s'agit de composés de métaux et de métalloïdes avec adjonction de céramique, le matériau de base étant, à raison de 95 % environ, le bisiliciure de molybdène MoSi_2 . Les mélanges ainsi obtenus sont frittés à haute température et dans des conditions particulières de fabrication.

Leur élaboration est difficile et leurs traitement et façonnage sont actuellement effectués par les soins du fabricant lui-même.

Propriétés

La résistivité ρ est élevée, mais variable avec la température. De l'ordre de $35 \mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ à froid, elle atteint environ $350 \mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ à $1\,500^\circ\text{C}$. Cela exige l'emploi de tensions croissantes pour la mise en service des fours (dispositif de démarrage approprié).

La résistivité est pratiquement constante dans le temps (elle diminue légèrement pendant les premières heures d'utilisation pour le kanthal-super ; elle augmente au début de l'utilisation du mosilit). Cette absence pratique de phénomène de vieillissement permet le couplage en série ou en parallèle d'éléments neufs avec des éléments usagés, sans qu'il en résulte d'inconvénients.

Le coefficient de température α est positif ; sa valeur moyenne entre 0 et $1\,600^\circ\text{C}$ est de 0,004 8 (fig. 26).

La densité est plus faible que celle des Fe-Ni-Cr : 5,6 au lieu de 7-7,2.

Les cermets sont durs et cassants à froid, plastiques à haute température, par exemple à partir de 1 100 °C ; ils ont une faible résistance aux chocs.

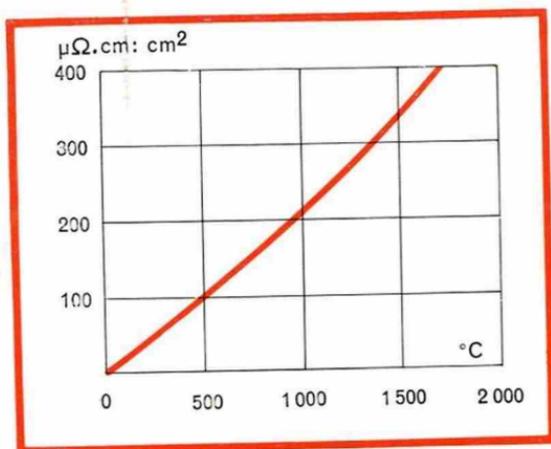
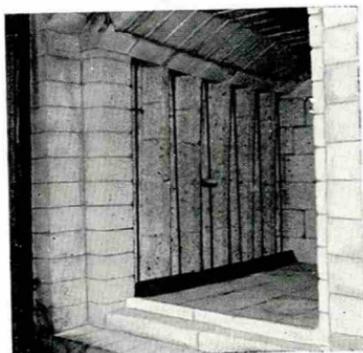


Fig. 26

La surface de l'élément se recouvre d'une couche de silice protectrice qui se forme en atmosphère oxydante (le bisiliciure donne un oxyde volatil de molybdène et de la silice) et n'est plastique qu'aux températures élevées. Cette couche a tendance à adhérer au revêtement du four lorsque la température dépasse 1 600 °C, d'où risque de rupture de l'élément lors du refroidissement. On évite ce collage en suspendant les parties incandescentes verticalement à une certaine distance des parois du four (four à éléments suspendus, fig. 27) ou en

Fig. 27



limitant la température à une valeur moindre (four à éléments horizontaux).

Pour maintenir la couche protectrice, il suffit de porter périodiquement les éléments à une température au moins égale à 1 400 °C.

Si l'élément est placé horizontalement, il faut le soutenir, car il se ramollit vers 1 300 °C, tout en permettant le libre déplacement de l'élément lors du chauffage et du refroidissement (allongements et retraits).

Pour éviter une réaction entre les éléments et le revêtement du four, il faut utiliser des réfractaires convenables, silico-alumineux, stables aux températures élevées (exemples : réfractaires du type sillimanite surcomprimé).

Températures d'emploi

On utilise généralement les cermets pour des températures de l'ordre de 1 300-1 700 °C maximum, températures superficielles de l'élément. La température limite d'emploi varie suivant la nature de l'atmosphère. Le tableau XIX se rapporte aux éléments kanthal-super.

TABLEAU XIX

Atmosphère	Température maximale tolérée sur l'élément (°C)
Air	1 700
Azote, anhydride carbonique, oxyde sulfureux	1 600
Argon, hélium, oxyde de carbone	1 500
Hydrogène humide (point de rosée + 15 °C) .	1 460
Ammoniac craqué et partiellement brûlé (environ 8 % H ₂)	1 400
Hydrogène sec, méthane	1 350
Mélanges gazeux usuels (atmosphères contrôlées)	1 500-1 350

Pratiquement, ces éléments ne sont pas utilisables pour les valeurs usuelles du vide réalisé dans l'industrie.

Forme

Les éléments sont actuellement livrés :

— soit sous la forme d'un fil plein de forte section (6 ou 9 mm) en U dont les deux extrémités formant amenées de courant ont une section plus élevée (12 ou 18 mm) (fig. 28) ;

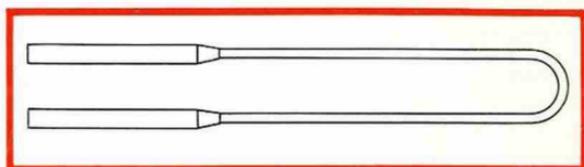


Fig. 28

— soit sous la forme d'un fil disposé en W (double U).
La forme d'un élément neuf peut être facilement rectifiée ; mais un élément déjà utilisé ne peut l'être.

Les longueurs se font à la demande. La longueur maximale actuelle est de $2 \times 1,25$ m (longueur double chauffante), avec deux amenées de courant de 0,80 m.

Durée des éléments

Elle dépend surtout des conditions d'emploi (constructeur de four) et surtout d'utilisation (donc de l'utilisateur), notamment de la fréquence des chauffages et refroidissements successifs, de la température de l'élément lui-même, de la puissance surfacique qui lui est imposée, de l'atmosphère du four, de la nature des supports en matière céramique, des conditions de refroidissement de l'élément.

Les indications que l'on possède jusqu'à ce jour sont encore insuffisantes pour que l'on puisse déterminer exactement l'influence de chacune de ces conditions sur la longévité des éléments.

Il semble que la cause la plus fréquente de destruction soit la fragilité de l'élément, d'ailleurs réduite par les additions céramiques et métalliques faites lors de l'élaboration des éléments. Il importe de manipuler ces derniers avec soin. En particulier, à l'heure actuelle, il faut en principe monter les éléments sur les fours en place.

La durée de vie la plus longue s'observe en atmosphère oxydante (air, oxygène, vapeur d'eau, anhydride carbonique). Les éléments résistent aux gaz réducteurs s'ils ont été au préalable suffisamment oxydés. Il faut en particulier éviter l'hydrogène sec et d'une manière générale les métaux et émaux qui forment avec la silice des composés facilement fusibles ou des silicates.

De nombreux éléments en service depuis de nombreuses années continuent à fonctionner normalement.

La puissance surfacique généralement adoptée est de 10-12 W/cm² aux températures d'utilisation de l'ordre de 1 500 °C dans le four et de 6-10 W/cm² pour 1 600 °C.

Résistances non métalliques

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

a) CARBONE

Nature

On emploie le carbone sous deux variétés allotropiques :

- 1^o Le carbone amorphe ;
- 2^o Le graphite artificiel.

Pratiquement, ces deux substances ne sont pas pures, tout au moins absolument pures (le graphite synthétique peut être obtenu avec 99 % de carbone au minimum).

Les pièces ou objets de carbone amorphe sont réalisés soit par usinage, soit par extrusion 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 partiellement au cours de la graphitisation qui a lieu au four électrique ; par exemple la silice est d'abord réduite par le carbone pour donner du carbure de silicium qui cristallise à plus haute température et finalement est dissociée vers 2 200 °C), travail facile (par exemple, on peut préparer au tour des tubes hélicoïdaux).

Une nouvelle variété de carbone, le graphite de pyrolyse, semble devoir être utilisée avec intérêt. Le corps est obtenu par cracking d'un hydrocarbure (méthane) sur une paroi (graphite) portée à haute température. Le graphite pyrolytique est constitué par des couches de carbone parallèles au support. Sa densité est de l'ordre de 2,20-2,25. Il est imperméable et fortement anisotrope. Sa résistivité dans la direction de grande résistance est environ mille fois supérieure à celle de la direction de faible résistance. On peut ainsi recourir à des tensions d'alimentation plus élevées et à des intensités plus faibles, à puissance égale, qu'avec du graphite ordinaire.

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 usuel) ;

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

— Conductibilité calorifique faible pour le carbone (surtout réduit en poudre), excellente pour le graphite. Coefficient de dilatation peu élevé (par exemple $7,86 \cdot 10^{-6}$ pour le graphite 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 $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ pour le carbone amorphe, de l'ordre de 800 à 1 050 $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ pour le graphite artificiel habituellement employé pour la fabrication des corps de chauffe. A titre de comparaison, la valeur de la résistivité pour le Ni-Cr à 80/20 est d'environ 110 $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$, soit dix fois moins.

Coefficient de température α 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 ρI^2 est

moins en ces points, ce qui a tendance à réduire l'élévation de température et réalise une certaine autorégulation de la température) : α peut toutefois devenir positif (c'est le cas, par exemple du graphite usuel à partir de 500 °C environ : la résistance diminue de 20 % 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 % à 1 800 °C).

Le carbone est un des corps les plus réfractaires que l'on connaisse. Il commence à s'oxyder vers 400 °C (carbone), 450-500 °C (graphite) ; à cette dernière température, la perte de poids du graphite est de 1 % en 24 h. 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 à 2 200-2 300 °C. On réalise des fours avec graphite sous vide jusque vers 2 700 °C et sous argon jusque vers 2 800 °C.

Remarques. — 1^o Pratiquement, les fours à corps de chauffe en carbone sont utilisés exclusivement pour l'obtention de températures élevées. 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 cm² de section (section forcément grande, ne serait-ce que pour des raisons de fabrication et de résistance mécanique) a une résistance électrique de l'ordre de $1\,000 \times 20 = 20\,000 \mu\Omega$, soit 0,02 Ω . 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^o 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 exemple).

3^o De même, les constructeurs doivent prendre certaines précautions soit pour éviter la détérioration ou la destruction

rapide 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

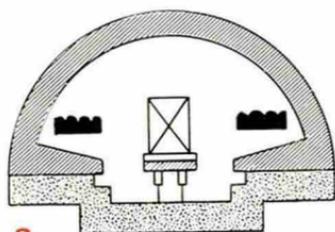
Les corps de chauffe en carbone peuvent se présenter sous une des formes suivantes : simples morceaux de charbon, grains de charbon, plaques ou briques, barres, tiges, tubes simples ou découpés, creusets, dépôt de graphite sur un tissu de verre.

La figure 29 donne quelques schémas de principe des fours correspondants. Bien que certains de ces appareils soient de moins en moins utilisés, notamment à cause des progrès réalisés par d'autres modes de chauffage électrique, nous donnerons ci-après quelques indications très sommaires à leur sujet, parce que le lecteur peut y trouver éventuellement la solution de tel ou tel problème particulier.

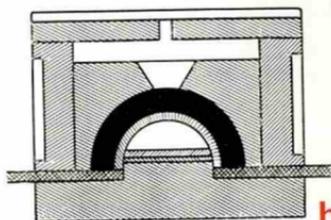
1° *Simple morceaux de charbon* (coke de pétrole, charbon de cornue) ou de graphite convenablement disposés dans une rigole, goulotte ou auge en carborundum (fig. 29-a) avec amenées de courant en graphite. Cette solution connaît actuellement un certain essor avec des fours Pits d'une capacité de 20 à 160 t et d'une puissance individuelle de 600 à 2 100 kVA (puissance en transformateurs) utilisés pour le réchauffage de lingots d'aciers ordinaires, alliés ou inoxydables (fours avec un, deux — fours simples ou doubles — ou trois résistors), ou pour la forge ; l'entretien courant, très réduit, consiste simplement à remplacer le coke de pétrole qui a brûlé au contact de l'air entrant dans le four : consommation de 0,5 kg de coke par tonne de métal à réchauffer. Un certain nombre de ces fours, dont les avantages apparaissent intéressants, sont en service à l'étranger et en France.

2° *Charbon granuleux* constitué par des grains ou petits morceaux de charbon (graphite ou coke par exemple, grosseur des grains : de 1 à 6 mm, densité apparente de 0,9 par exemple), mélangés éventuellement à d'autres substances (carborundum en poudre ou silicates par exemple) 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. 29-b). Le courant est amené au moyen de deux électrodes de graphite qui s'enfoncent dans la masse où la densité de courant peut être par exemple de 5 A/cm².

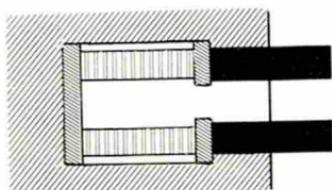
Principaux types de fours industriels et semi-industriels à carbone classés suivant la nature du corps de chauffe



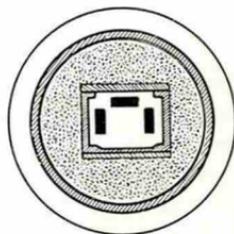
a



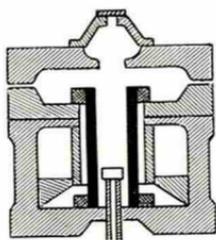
b



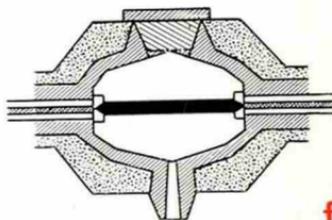
c



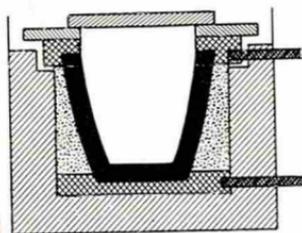
d



e



f



g

- a** - Charbon en morceaux
- b** - Charbon en grains
- c** - Plaques ou briques
- d** - Barres
- e** - Tubes (généralement découpés)
- f** - Tiges
- g** - Creusets

Fig. 29

Avantages : 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.

Inconvénient principal : difficulté d'obtenir une température uniforme et constante, en dépit des dispositions adoptées.

Ce type de four n'est guère utilisé que lorsque l'on n'a pas besoin d'une température très précise.

3^o *Plaques ou briques de graphite* (fig. 29-c) convenablement pressées les unes contre les autres (comme dans les rhéostats de réglage employés dans certains laboratoires); solution indiquée pour mémoire.

4^o *Barres de carbone ou de graphite*. — Par exemple barres de graphite découpées en épingles à cheveux (fig. 29-d) employées comme corps de chauffe dans certains fours à vide utilisés jusqu'à 2 200 °C; puissances habituelles : 75 et 120 kW environ.

Four de 75 kW : monophasé; alimentation par un transformateur dans l'air à prises multiples, sous une tension moyenne de l'ordre de 25 V; réglage manuel ou automatique; vide de 0,01 mmHg; refroidissement des joints par circulation d'eau; dimensions utiles : hauteur 115 mm, largeur 150 mm, longueur 600 mm.

Four de 120 kW : triphasé; alimentation par un transformateur dans l'huile; dimensions utiles : hauteur 150 mm, largeur 150 mm, longueur 120 mm.

La durée des résistances, qui travaillent normalement dans le vide, est très élevée; par exemple, fonctionnement quotidien pendant trois ans sans que les corps de chauffe aient à être remplacés.

Autres exemples : barres de graphite percées d'alvéoles, équipant certains fours de brasage du tungstène en atmosphère d'hydrogène; barres équipant des fours pour le frittage des connexions des lampes de radio et des transistors.

Un certain nombre de ces fours sont en service en France.

5^o *Tubes de graphite* (fig. 29-e). — Pour obtenir une résistance mécanique suffisante et éviter la destruction rapide du corps de chauffe aux très hautes températures par volatilsation 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 tout en diminuant la section, donc en accroissant en définitive la résistance électrique du tube, fentes 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 hélice convenablement étudiée pour réaliser la résistance électrique voulue et une grande uniformité de la température.

Exemple : certain four utilisé éventuellement jusqu'à 2 300 °C (température utile à la surface d'un corps noir placé dans le four) avec chauffage dans le vide à 0,01 mmHg ou 2 800 °C dans une atmosphère d'argon. Il comporte un corps de chauffe tubulaire, en général vertical, en graphite entaillé le plus souvent en chicanes ou en hélice ; cela permet, grâce à l'augmentation de la résistance électrique obtenue par le découpage, d'éviter l'emploi de trop fortes intensités de courant. L'étanchéité du four est assurée par des joints refroidis par un courant d'eau. Le réglage de la puissance, donc de la température, se fait au moyen d'un transformateur abaisseur de tension qui, par un jeu d'inverseurs et éventuellement par l'emploi simultané d'un autotransformateur supplémentaire, permet de faire varier la tension secondaire appliquée au four dans les limites nécessaires : de 2 à 48 V par exemple.

Les dimensions courantes sont les suivantes : diamètre du tube de 60 à 120 cm, longueur utile de 80 à 270 cm, longueur totale de 260 à 500 cm, puissance de 10 à 30 kW, températures usuelles de 1 700-2 000 °C.

Un grand nombre de ces fours sont en service en France.

6° *Tiges de graphite.* — Par exemple (fig. 29-f), dans le four horizontal oscillant à rayonnement type George, le corps de chauffe est constitué par une tige alimentée à une faible tension (par exemple 25-60 V) que l'on peut faire varier au moyen d'un transformateur. Ce four, monophasé, est utilisé pour la

fusion des fontes spéciales, des bronzes, de la silice. Capacités variant de 100 à 1 000 kg, puissances de 100 à 525 kVA. Maximum : 2 000 kg (acier), 700 kW, 1 700 °C.

Le nombre de ces fours en service en France est assez important mais en voie de régression par suite des progrès réalisés en chauffage par induction et de regroupements d'usines.

Certains fours verticaux à vide construits et utilisés à l'étranger, sont également équipés de tiges disposées sur le pourtour de la chambre de chauffe cylindrique.

7° *Creusets en carbone* ou plutôt en agglomérés à base de carbone (fig. 29-g). Le creuset sert à la fois de récipient pour le métal à fondre et de corps de chauffe. Pour mémoire, cette solution étant maintenant abandonnée au profit d'autres modes de chauffage électrique.

8° *Dépôt de graphite* sur un tissu en verre. Solution récente : la résistance est constituée par un réseau maillé de faisceaux de fils de verre extrêmement fins, réseau recouvert d'une couche de graphite colloïdal d'épaisseur régulière. Le tissu obtenu est flexible et sa résistance électrique peut être actuellement, suivant la fabrication, de 4 à 150 Ω par carré (quelle que soit l'unité de longueur adoptée). La température maximale admissible est de 220 °C environ. Le coefficient de température α est négatif. De telles résistances peuvent être utilisées pour résoudre certains problèmes de chauffage superficiel.

b) 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 (exemples : silundum ; silfrax, $\rho = 0,04 \Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$) soit en utilisant des résistances en carbure de silicium plus ou moins pur (siloxicon par exemple).

Pratiquement, on utilise notamment, depuis quelque 30 ans, d'une façon courante, des baguettes dont le constituant essentiel est le carbure de silicium et qui sont obtenues au four électrique à haute température.

A titre documentaire, certaines baguettes sont fabriquées 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 8,3-8,4 pour le nickel-chrome à 80/20) ;

Résistivité très élevée : généralement de l'ordre de 100 000-150 000 $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ à la température ambiante pour les éléments industriels, contre 110 $\mu\Omega \cdot \text{cm} : \text{cm}^2$ pour le Ni-Cr à 80/20.

Coefficient de température α très faible : par exemple, pour certains de ces éléments, la résistance diminue progressivement ($\alpha < 0$) jusqu'à ce que la température atteigne 900 °C à la surface de la baguette (ρ minimum), puis augmente ensuite plus ou moins jusqu'à atteindre dans certains cas la valeur de départ et dans d'autres cas une valeur moindre que cette dernière. La loi de variation n'est pas identiquement la même pour les éléments de diverses provenances. Aux températures usuelles d'emploi, α est pratiquement positif. On évite ainsi l'emballement de la puissance absorbée.

Coefficient de dilatation : il est très variable ; pour un certain élément, 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.

Température pratique d'emploi dans les fours industriels 1 100-1 400 °C avec maximum un peu plus élevé de 1 450-1 475 °C. A une température trop 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 surfacique : la charge superficielle maximale 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.

La figure 30 donne, pour un certain type d'élément, la valeur maximale admissible (fixée par le fabricant) pour des températures de service des fours de 1 100 à 1 400 °C, soit 1 450 °C sur la baguette. Pour les autres types de baguettes, la courbe a la même allure.

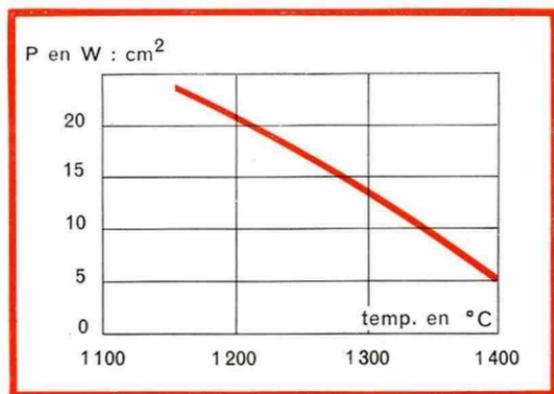


Fig. 30

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 puissance surfacique 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, par la présence de ses deux constituants : carbone et silicium.

Pour fixer les idées, mentionnons les réactions suivantes à la température d'incandescence :

Action des corps à réaction basique, comme les alcalins, les alcalino-terreux et les oxydes de métaux lourds en vapeur ou à l'état fondu (flux de brasure, sels de trempe), ainsi que les silicates et borates :

Oxydation progressive par l'air et l'anhydride carbonique, cause essentielle de l'augmentation de la résistance électrique, (vieillessement) des baguettes avec le temps de service en ambiance ordinaire (les baguettes vieillissent également dans le vide);

Action analogue des mélanges de gaz réducteurs généralement utilisés dans certains procédés de traitements thermiques, pour autant que ces mélanges ne comportent pas trop d'hydrogène ;

Action plus importante de la vapeur d'eau ;

Décomposition par l'hydrogène et les mélanges gazeux à forte teneur en hydrogène.

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 de ces cas, il est généralement facile d'éviter ou de limiter les actions destructives par des mesures ou par des dispositifs appropriés (moufles par exemple).

Formes

Court historique. Par ordre chronologique de leur présentation sur le marché français, les éléments utilisés jusque vers 1945 étaient les suivants : globar, silit, savoie. A notre connaissance, beaucoup de marques existent actuellement ou sont représentées en Europe, bien que certaines aient disparu récemment. En France, certaines marques équipent de très nombreux fours ; d'autres sont utilisées seulement dans quelques appareils. Les indications qui suivent se rapportent aux éléments, généralement dénommées « baguettes » que l'on peut y rencontrer sur les appareils électrothermiques utilisés.

Les baguettes se présentent (fig. 31) :

Soit sous forme de tiges pleines (a, b, c).

Soit sous forme de tiges creuses (d, e, f).

Deux problèmes délicats :

— Celui de l'amenée de courant, tout au moins lorsque l'intensité mise en jeu est élevée ;

— Celui de la traversée de la paroi du four que les baguettes équipent. Il importe en effet, d'une part, d'éviter la destruction rapide des extrémités des baguettes, de leurs supports et des réfractaires environnants ; d'autre part, de réduire les pertes de chaleur.

L'ingéniosité des fabricants de baguettes et des constructeurs de fours a trouvé à ces problèmes des solutions généralement simples et efficaces.

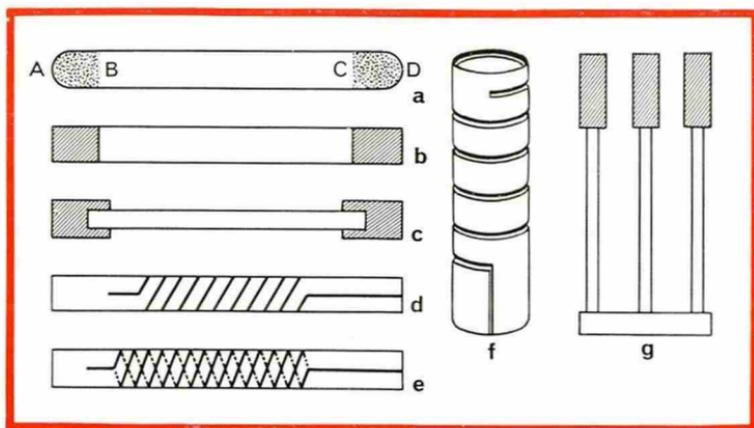


Fig. 31

Par exemple, on renforce les extrémités au moyen de manchons de résistivité égale à celle de la partie chauffante (manchons de même nature ; section augmentée, donc résistance et effet Joule diminués) ou de résistivité moindre.

Autre exemple : la baguette, en forme de tige pleine, a ses extrémités (rapportées ou non) AB et CD métallisées dans la masse, tandis que la partie chauffante BC est de composition homogène. La résistance des extrémités diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche de A et de D. Il s'ensuit que l'effet Joule et la température vont rapidement en décroissant au-delà de la partie chauffante.

Dernier exemple : la baguette, creuse, est découpée en hélice (ce qui augmente la résistance) dans la partie chauffante, les extrémités ne l'étant pas (résistance moindre). Ce type de baguettes est plus récent.

On peut distinguer :

— Les baguettes dont les extrémités sortent du volume extérieur du four ; les extrémités en sont relativement froides et la connexion avec les câbles d'amenée de courant ne présente aucune difficulté (fig. 32) ;

— Les baguettes dont les extrémités ne sortent pas du volume extérieur du four ; il faut alors adjoindre à la baguette des dispositifs séparés d'amenée de courant, céramiques ou

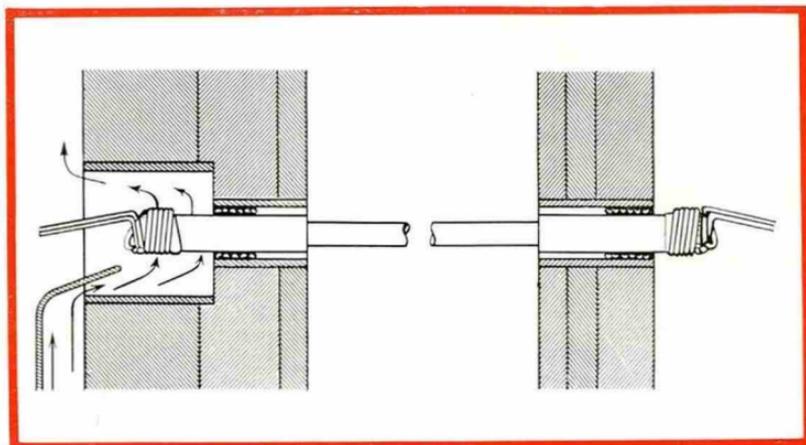


Fig. 32

métalliques, à refroidissement naturel (mouvement d'air facilité) ou à refroidissement artificiel (courant d'eau) : fig. 33.

Les figures 32 et 33 ne sont données qu'à titre d'exemples particuliers.

Les fabricants donnent toutes indications utiles sur le mode de connexion à adopter pour leurs propres baguettes et éventuellement sur le dispositif à choisir pour le refroidissement.

Les baguettes peuvent être disposées horizontalement ou verticalement. Pour ce dernier cas, les fabricants recommandent généralement que les baguettes ne soient pas suspendues mais soutenues. Pour certaine baguette creuse, de présentation plus récente, les deux connexions sont à la même extrémité et, selon le fabricant, l'extrémité peut pendre verticalement du plafond ou au contraire s'élever à partir de la sole du four.

Un modèle également assez récent de baguette creuse a un diamètre intérieur relativement grand et peut contenir un tube ou un creuset pour essais de laboratoire (fig. 31-f).

Toutes les baguettes mentionnées ci-dessus sont monophasées. Pour l'alimentation en courant triphasé, on les couple convenablement. Il existe également des éléments triphasés d'utilisation assez récente comportant trois baguettes verticales dont une extrémité porte une manchette; les trois autres extrémités sont réunies par une pièce de même nature formant pont (fig. 31-g).

Enfin, il existe aussi des résistances de forme quadrangulaire.

Dimensions

L'éventail des dimensions des baguettes pleines est vaste et il diffère suivant les fabrications.

D'après les catalogues des fabricants, la plus petite dimension est la suivante : diamètre de la partie utile de 4 mm, longueur utile (chauffante) de 60 mm, longueur totale de 120 mm.

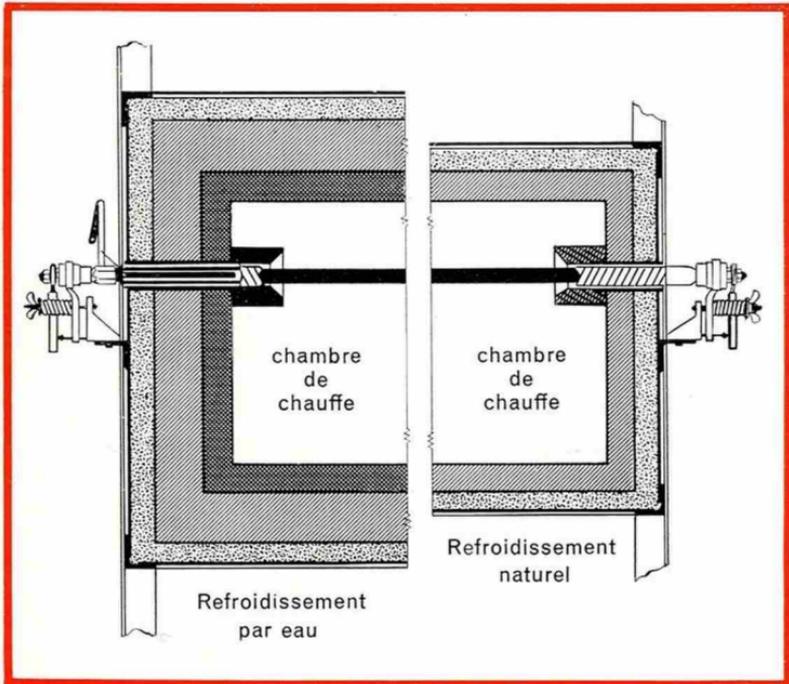


Fig. 33

La plus grande dimension est : diamètre de 60 mm, longueur utile de 1 500 mm.

Pour certaines baguettes creuses, le diamètre peut atteindre 65 mm (intérieur) et 75 mm (extérieur).

Puissance

En pratique, la puissance dépend de la charge spécifique acceptable à la température d'utilisation. Elle peut varier de

quelques dizaines de W pour une baguette de faible section à 1 450 °C à quelques dizaines de kW pour un élément de grosse section à 1 100 °C.

Pour fixer les idées, une baguette pleine de 40 mm de diamètre aura une puissance possible de 55 kW à 1 100 °C et seulement de 6 kW à 1 450 °C.

Autrement dit, *la puissance est fonction de la température à laquelle on veut faire travailler les baguettes.*

Durée des éléments

C'est un facteur capital, bien plus important que pour les résistances métalliques (les résistances habituelles en Ni-Cr à 80/20 ont en effet une très longue durée aux températures usuelles d'emploi inférieures à 1 000-1 100 °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'exemple : La durée moyenne, relevée au cours de plus de 10 années de service, d'un four de 40 kW utilisé pour la trempe d'acier rapide, four à marche discontinue (8 h par jour ouvrable) fonctionnant à 1 350 °C environ et entièrement équipé avec des baguettes à refroidissement naturel, ressort à environ 1 500 h.

La durée moyenne, relevée au cours de plus d'une année de service, de baguettes 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-dessus de 1 350 °C, la longévité des éléments peut être considérable ; les fabricants indiquent même des durées de 4 000-5 000 h, voire bien davantage.

On a parfois intérêt, pour des essais de laboratoire par exemple, à utiliser les baguettes au maximum de la température possible en acceptant alors une durée très faible.

La durée — pour laquelle aucune garantie ne peut généralement être donnée 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, charge spécifique des éléments ;

Nature de l'atmosphère du four ;

Conditions de mise en température des baguettes ; marche du four ;

Vieillesse des baguettes, réserves de tension.

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 optimales 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 exemple par un système de connexions avec ressort compensateur. Le montage de ce dispositif doit être particulièrement soigné si l'on veut :

— Eviter 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 d'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, comme nous l'avons déjà dit.

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 (voir fig. 31) — quand la température d'emploi augmente. Pour fixer un ordre de grandeur, ce gradient de température sera par exemple de 100 °C dans un four à 1 350 °C avec une puissance surfacique de 10 W/cm² (c'est-à-dire que la température superficielle de la baguette sera de 1 450 °C) et de 230 °C si la température du four (température utile de la chambre de chauffe) est de 1 200 °C (pour une puissance de 18 W/cm²). Il est évidemment minimum quand le rayonnement (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 défec- tueuse 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.

A ce problème de la température des baguettes est entière- ment lié celui de la régulation de la température. Si cette régu- lation est mal assurée, il peut en résulter des surchauffes locales ou une réduction plus ou moins importante de la vie des éléments.

3° Atmosphère du four

Une des caractéristiques essentielles du four électrique est de permettre *la régulation absolument indépendante de la tempé- rature de l'atmosphère.*

On peut toutefois être conduit à créer certaines atmo- sphères spéciales à l'intérieur du four. On tiendra compte de ce qui a été dit précédemment au sujet de l'action de certains gaz et vapeurs sur le carbure de silicium et on pourra

avoir l'intérêt à éviter que le tuyau d'arrivée de l'atmosphère aboutisse près des baguettes.

Dans certain type de baguettes, la partie axiale est constituée par une matière légèrement plus oxydable que le reste de la baguette ; l'attaque des gaz qui pénètrent à travers les pores de la partie extérieure se fait alors plutôt sur cette matière ; cela semble devoir augmenter la durée de vie de l'élément.

4^o 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. Toutefois, certains fabricants estiment 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 puissance surfacique ne dépasse pas certaines limites.

A vrai dire, et ceci est surtout valable dans le cas des baguettes pleines, il faut distinguer la température superficielle et la température axiale des baguettes ; la différence entre ces deux températures peut être importante soit lors de la mise en température des fours, soit dans le cas des fours à marche discontinue à mise en température accélérée (on gagne alors sur le temps de la mise en température, mais c'est au détriment de la durée).

5^o Vieillesse 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 (par exemple pendant les 60 à 150 premières heures d'utilisation), puis ensuite très lente. Cela résulte de deux actions simultanées :

— Oxydation avec production de silice, 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, sauf aux températures exagérées ;

— Désagrégation, due à des causes physiques (contractions et dilatations successives) et chimiques : influence de la température et de la mise en température, de la nature de l'atmosphère entourant les baguettes, de leur puissance superficielle, etc.

Il s'ensuit, pour une même tension U appliquée, une réduction de la puissance dissipée (effet Joule), donc une augmentation de la durée de la mise en température et, éventuellement, l'impossibilité de réaliser la température normale dans le four. L'augmentation de R peut atteindre 60, 80 et même 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 peut réaliser une *réserve de tension* de 40 % environ au moyen d'un autotransformateur permettant de faire varier la tension de 220 V (tension d'alimentation de l'appareil) à 140 V. Les baguettes sont choisies pour fournir la puissance voulue à 140 V. Au fur et à mesure de leur usure, on augmente progressivement jusqu'à 220 V la tension qui leur est appliquée.

Pratiquement, l'autotransformateur 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 paragraphe 4.

De la façon dont on joue avec la réserve de tension précédente dépend, 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 ; 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 est trop élevée et par suite la mise en température du four est plus rapide. On évite 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 peut 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 $P_0 = U^2/R_0$ la puissance initiale absorbée.

La puissance finale est : $P = U^2/R = U^2/2 R_0 = P_0/2$, 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 égale à la moitié de U).

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

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

Cette puissance est répartie comme suit :

P_0 dans la baguette et P_0 dans la résistance additionnelle.

La puissance finale absorbée est devenue :

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

Elle se partage comme suit :

d'une part, $\frac{2}{3}$ dans la baguette de résistance $R = 2R_0$,
soit :

$$\frac{2}{3} \times \frac{4}{3} P_0 = \frac{8}{9} P_0$$

et, d'autre part, $\frac{1}{3}$ 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 varie donc de la valeur normale P_0 à la valeur : $\frac{8}{9} P_0$, en fonction de la variation de la résistance, laquelle augmente de R_0 à $R = 2 R_0$.

Mais cette autorégulation approchée de la puissance absorbée par la baguette n'est 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 XX donne les résultats correspondants à :

$P_0 = 100 \text{ W}$, $R_0 = 100 \Omega$, $U = 100 \text{ V}$, $r = 100$ et 50Ω .

TABLEAU XX

Valeur de r (ohms)	Valeur de U (Volts)	Valeur de la puissance initiale absorbée (pour la résistance R_0 de la baguette) (Watts)			Valeur de la puissance finale absorbée (pour la résistance $R=2R_0$ de la baguette) (Watts)		
		Totale	Baguette	Résistance additionnelle	Totale	Baguette	Résistance additionnelle
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 d'inductances 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 inductances, car on réduit ainsi à une valeur négligeable la consommation propre d'énergie active (kWh) du dispositif de compensation. Mais cela se produit au détriment du facteur de puissance ($\cos \varphi$).

4. *Emploi de résistances de réglage (rhéostat).* — Le rhéostat de réglage peut servir à la fois pour le réglage pendant les mises en températures quotidiennes de l'appareil (four par exemple) 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 d'inductances de réglage.* — On peut remplacer, lorsque l'alimentation se fait en courant alternatif, les résistances par des inductances ; la consommation propre d'énergie active est alors considérablement réduite, mais au détriment du facteur de puissance.

6. *Emploi d'autotransformateurs de réglage.* — En courant alternatif, on a le plus souvent et par préférence, recours à un autotransformateur de réglage (excellent rendement) ou à un transformateur à prises multiples.

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 quelquefois de pair avec le couplage convenable des éléments (couplages série, parallèle, série-parallèle, étoile-triangle, etc.).

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 dissymétrie importante de charge dans le cas de l'alimentation en courant triphasé), soit une détérioration rapide des baguettes.

Par exemple : soient deux éléments de résistance respective R et $R/2$ montés en série. Le premier élément absorbera les deux tiers (soit RI^2) de la puissance totale de l'ensemble et le deuxième le tiers (soit $RI^2/2$) 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) ; 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 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) AUTRES SUBSTANCES

On a eu parfois recours à du verre fondu, disposé dans une rigole, comme résistance de chauffage (fours de chauffage de pièces avant forgeage).

Pour les recherches à haute température (au-dessus de 1 600 °C par exemple) 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 limité à la fabrication de petits fours de laboratoire.

Remarque. — Le tableau schématique XXI résume les indications précédentes relatives aux températures d'utilisation les plus fréquentes.

Conclusion

POUR l'équipement des appareils électrothermiques industriels dits « à résistances » on dispose actuellement de résistances et d'éléments chauffants qui ont fait leurs preuves et dont la gamme s'est élargie, ainsi que les possibilités d'emploi (tableau XXI).

Cette extension de la fabrication et de l'utilisation répond notamment aux besoins accrus et impératifs des techniques nouvelles et des industries récentes qui sont nées ou se sont développées rapidement au cours des dernières décennies.

Certaines tendances se sont précisées et restent d'actualité :

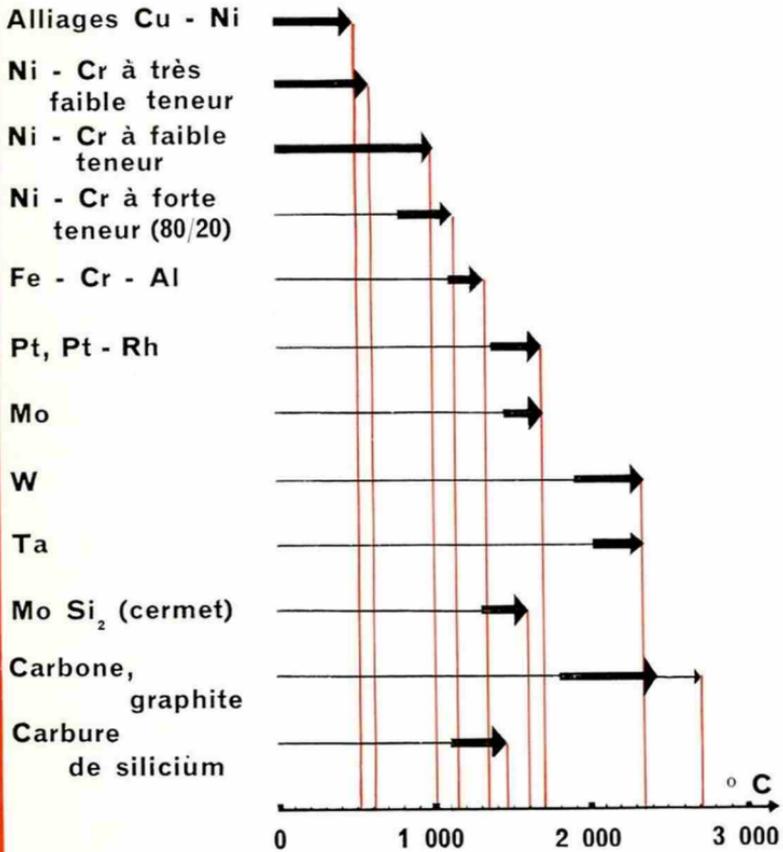
Du point de vue de la fabrication, tendance vers l'appropriation de certaines résistances aux besoins nouveaux (températures plus élevées, atmosphères contrôlées, vide, etc.), l'amélioration de la qualité, la spécification de celle-ci (normes de qualité), la standardisation des éléments (normes dimensionnelles).

Du point de vue des applications, tendance vers l'emploi de plus en plus généralisé des éléments protégés aux faibles et aux moyennes températures, la recherche d'éléments protégés nouveaux aux basses températures, la recherche et le développement de résistances nouvelles aux températures élevées et très élevées.

On ne saurait trop recommander aux utilisateurs 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.

TABLEAU XXI

Températures les plus fréquentes d'utilisation
des résistances électriques de chauffage



NB. Les valeurs indiquées sont celles des températures de la chambre de chauffe des fours usuels. Elles doivent être considérées comme des ordres de grandeur, les valeurs pratiques d'utilisation dépendant notamment des conditions d'emploi (se reporter au texte). Les traits renforcés désignent la zone la plus fréquente d'utilisation.

NOTE

Des renseignements complémentaires peuvent être fournis en s'adressant :

- **A l'éditeur**, pour toute demande à présenter à l'auteur.
- **A l'Electricité de France**, auprès des Directions Régionales et Centres dont dépend directement l'alimentation en énergie électrique du demandeur.
- **Ou directement à la Direction de la Distribution de l'E.D.F.**

Service Commercial, Division des Applications Industrielles de l'Electricité, 23 bis, avenue de Messine, Paris (8^e).

Pour tout ce qui concerne les questions traitées dans cet ouvrage, des renseignements peuvent également être obtenus auprès :

- **Du Comité Français d'Electrothermie (C.F.E.)**,
25, rue de la Pépinière, Paris (8^e).
- **Du Syndicat Général de la Construction Electrique (S.G.C.E.)**,
11, rue Hamelin, Paris (16^e).
- **Du Syndicat des Constructeurs de Fours et Equipements Thermiques (S.C.O.F.E.T.)**,
10, avenue Hoche, Paris (8^e).
- **Du Syndicat National de la Construction Electrothermique et Electrodomestique**,
39, avenue d'Iéna, Paris (16^e).
- **Enfin de l'Union Technique de l'Electricité (U.T.E.)**,
20, rue Hamelin, Paris (16^e), pour toutes indications relatives à la normalisation et à la réglementation.

