



CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL

**LES RÉSISTANCES
NON MÉTALLIQUES
ET LEURS APPLICATIONS**

Par M. R. GAUTHERET

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



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL

Les résistances non métalliques et leurs applications

Par M. R. GAUTHERET

SOMMAIRE

Classification des résistances non métalliques

A) Résistances de carbone

Nature = carbone amorphe, graphite artificiel

Propriétés

Formes, différents types de fours industriels

B) Résistances en carbure de silicium

Nature = quarzillite, globar, silit, savoie

Propriétés

Formes, dimensions courantes

Durée : principaux facteurs de longévité

Applications

Conclusion

DANS une précédente étude (1), nous avons indiqué quels sont les principes (loi d'Ohm et loi de Joule en particulier) sur lesquels repose le chauffage électrique dit « par résistance ». Nous nous bornerons, dans la présente notice, à rappeler brièvement, au moyen des tableaux résumés des pages 4 et 5, le minimum de connaissances théoriques nécessaires pour permettre la compréhension de ce qui suit.

C'est essentiellement pour les températures élevées que l'on emploie les résistances non métalliques. Encore faut-il noter que la mise au point, relativement récente, des alliages métalliques à base de fer, d'aluminium et de chrome qui permettent d'atteindre 1 200-1 280° C dans la chambre de chauffe a sensiblement réduit la zone d'application des éléments non métalliques. Par contre, l'évolution de certaines applications industrielles semble ouvrir à ces éléments nouveaux tels sont l'extension de l'emploi des fontes spéciales (fours de fusion) et surtout des aciers spéciaux (fours de trempe et de recuit), la mise au point récente des fours de cuisson de céramique à haute température, le développement de l'emploi des carbures métalliques, la modernisation des laboratoires industriels (ou universitaires).

En pratique, c'est surtout à l'équipement des fours industriels ou de laboratoire dits « à haute température », c'est-à-dire au-dessus de 1 000° C, que sont utilisés les résistances chauffantes que nous allons examiner.

* * *

Classification des résistances non métalliques

Ces résistances sont généralement

- 1° Soit en carbone,
- 2° Soit en oxycarbure de silicium.

(1) Notice de la Société pour le développement des applications de l'électricité (A. P. E. L.) intitulée : Chauffage électrique industriel. — Les résistances métalliques.

* * *

A) Résistances de carbone

Nature.

On emploie le carbone sous deux variétés allotropiques

- 1° Le carbone amorphe ,
- 2° Le graphite artificiel.

Pratiquement, ces substances ne sont pas pures, tout au moins absolument pures (le graphite synthétique peut être obtenu actuellement avec 99,5 p. 100 de carbone au minimum).

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

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

Ce dernier passe plus ou moins complètement à l'état graphitique 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 (r) constante, plus grande résistance à l'oxydation, plus grande pureté (les impuretés oxydés tels que silice, alumine et oxyde de fer contenues dans le carbone de départ s'éliminent au cours de la graphitisation qui a lieu au four électrique : par exemple, la silice sera d'abord réduite par le carbone pour donner du carbure de silicium qui cristallisera à plus haute température et finalement sera dissocié vers 2 200° C), travail facile (par ex., on peut préparer au tour des tubes spiralés).

(1) Rappelons que la résistivité est la résistance électrique d'un conducteur ayant pour longueur l'unité de longueur et pour section l'unité de section adoptées dans le système d'unités envisagé. Par exemple, dans le système C. G. S., la résistivité, exprimée en ohms par cm et cm², sera la résistance électrique d'un conducteur de 1 cm de longueur et de 1 cm² de section.

Loi d'OHM - Si l'on applique une tension U aux extrémités d'un conducteur de résistance R , ce conducteur sera parcouru par un courant d'intensité I et l'on aura :

$$U = RI$$

Volts Ohms, Ampères

Ex.: $U = 200 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$ - On aura : $I = 20 \text{ A}$.

Loi de JOULE - La puissance électrique absorbée par le conducteur précédent a pour valeur :

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

P en Watts, U en Volts, I en Ampères, R en Ohms.

Ex.: $P = 200 \times 20 = 4000 \text{ Watts}$ ou 4 kilowatts

Si cette puissance est absorbée pendant un temps θ , l'énergie absorbée sera :

$$W = P\theta$$

Watt-heures, Watts.heures

Ex.: Au bout de 2 heures, la consommation sera :

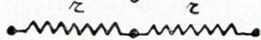
$W = 4 \times 2 = 8 \text{ kilowattheures}$

1 kilowatt-heure donne 3600 joules
ou 862 grandes calories

GROUPEMENT DES RÉSISTANCES NON MÉTALLIQUES

Il arrive fréquemment que des résistances de valeur égale sont groupées en parallèle quelquefois en série

Couplage série

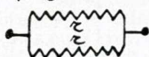


Ex.: Avec 2 éléments

$$R = z + z$$

Résistance globale : $R = 2z$

Couplage parallèle



Ex.: Avec 2 éléments

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{z} + \frac{1}{z}$$

Résistance globale : $R' = \frac{z}{2}$

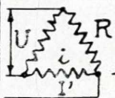
Pour faire varier la valeur de la puissance P , on a souvent recours soit au couplage étoile-triangle, soit plus rarement au couplage série-parallèle

Couplage étoile-triangle



(étoile)

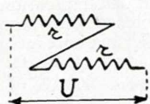
$$P = UI\sqrt{3} = \frac{U^2}{R}$$



(triangle)

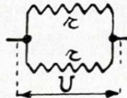
$$P' = \frac{3U^2}{R}$$

$$P' = 3P$$



(série)

$$P = \frac{U^2}{2z}$$



(parallèle)

$$P' = \frac{2U^2}{z}$$

$$P' = 4P$$

Tableau II

Propriétés.

Les principales propriétés (1) du carbone, en ce qui concerne son emploi comme résistance électrique de chauffage, sont les suivantes

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

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

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

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

Résistivité (2) 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 4 000 à 7 000 microhms:cm:cm² pour le carbone amorphe, de l'ordre de 800 à 1 000 microhms:cm:cm² pour le graphite artificiel habituellement employé pour la fabrication des corps de chauffe. A titre de comparaison, la valeur de la résistivité pour le nickel-chrome à 80/20 est d'environ 110 microhms:cm:cm², soit dix fois moins (2) ,

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 moindre

(1) Voir à ce sujet le livre L'Electrothermie appliquée de M. FLUSIN et également le livre Fours Électriques et Chimie, publié sous la direction de M. LEBEAU et qui se rapporte essentiellement aux fours de laboratoire.

(2) La résistance R d'un conducteur de longueur l et de section s est donnée par la relation :

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

ρ étant la résistivité.

La loi qui régit la variation de ρ en fonction de la température est, pratiquement, la suivante :

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

ρ_t = résistivité à la température t ;

ρ_0 = résistivité à la température 0.

Pour les métaux et leurs alliages, α est positif.

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 Savoie-Acheson à partir de 500° C environ la résistance diminue de 20 p. 100 de 0 à 500° C, puis augmente pour atteindre la valeur initiale vers 1 200° C, elle croît ensuite moins rapidement et l'augmentation est de 9 p. 100 à 1 800° C).

Le carbone est un des corps les plus réfractaires que l'on connaisse. Il commence à s'oxyder vers 500° C (carbone), 700° C (graphite). La température d'ébullition sous la pression atmosphérique est supérieure à 3 600° C. Mais le carbone distille rapidement à une température qui est de l'ordre de 2 200 à 2 800° C. Dans le vide, en particulier, cette distillation est plus intense. Aussi, l'emploi pratique des fours à carbone est-il limité vers 2 200-2 300° C. On a cependant réalisé des fours à argon jusque vers 2 800° C (1).

Remarques.

1° Pratiquement, les fours à corps de chauffe au carbone sont utilisés exclusivement pour l'obtention de hautes, voire de très hautes températures. Il s'ensuit que les puissances électriques mises en jeu sont relativement importantes, eu égard aux dimensions de la chambre de chauffe. La puissance est donnée par la loi de Joule : $P = \frac{U^2}{R}$ 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) aura une résistance électrique de l'ordre de $1\ 000 \times 20 = 20\ 000$ microhms, soit 0,02 ohms. D'où la nécessité d'employer des courants d'intensité très élevée (loi d'Ohm : $I = \frac{U}{R}$), dont on réduit cependant la valeur par l'emploi de basses tensions (à partir de 10 V par exemple)

(1) Des travaux récents effectués au Palais de la Découverte de l'Exposition Internationale des Arts et Techniques à Paris, en 1937, ont même permis d'atteindre, à l'air libre, des températures dépassant largement 3 000° C (graphite fondu par plages) avec des densités de courant de l'ordre de 1 000 A:cm². Il s'agit là d'essais de laboratoire, mais qui peuvent tôt ou tard donner des réalisations semi-industrielles intéressantes.

obtenues généralement au moyen de transformateurs statiques.

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

3° De même, les constructeurs doivent prendre certaines précautions soit pour éviter la détérioration ou la destruction rapides des corps de chauffe par l'oxydation, soit, dans certains cas, pour éviter l'action du carbone sur la substance à traiter dans le four ou sur les réfractaires et réciproquement.

Formes.

Les corps de chauffe en carbone se présentent habituellement sous une des formes suivantes (1)

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

1° **Simples morceaux de charbon** (coke de pétrole, charbon de cornue) ou de **graphite** convenablement disposés dans une auge en carborundum (fig. 1-a) avec amenées de courant en graphite : cas du four américain Baily qui, à notre connaissance, n'est pas employé en France et qui tend d'ailleurs à disparaître, nous ne le citons donc qu'à titre documentaire, il a été utilisé en particulier pour la fusion de l'aluminium (tension de 80 à 120 V, réglage par régulateur d'induction par ex.) et pour certains traitements thermiques,

2° **Charbon granuleux** constitué par des grains ou petits morceaux de charbon (graphite ou coke par ex., grosseur des grains de 1 à 6 mm, densité apparente de 0,9 par ex.) mélangés éventuellement à d'autres substances (carborundum en poudre

(1) Nous laissons de côté les fours de graphitisation à résistance, dans lesquels les pièces à graphiter servent elles-mêmes de corps de chauffe, c'est-à-dire sont parcourues directement par le courant. Voir à ce sujet la description que nous avons faite de l'installation des fours électriques de l'usine de Gennevilliers de la Société « Le Carbone » dans la revue *Electricité*, avril 1936 : fours de 75 à 300 kW.

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

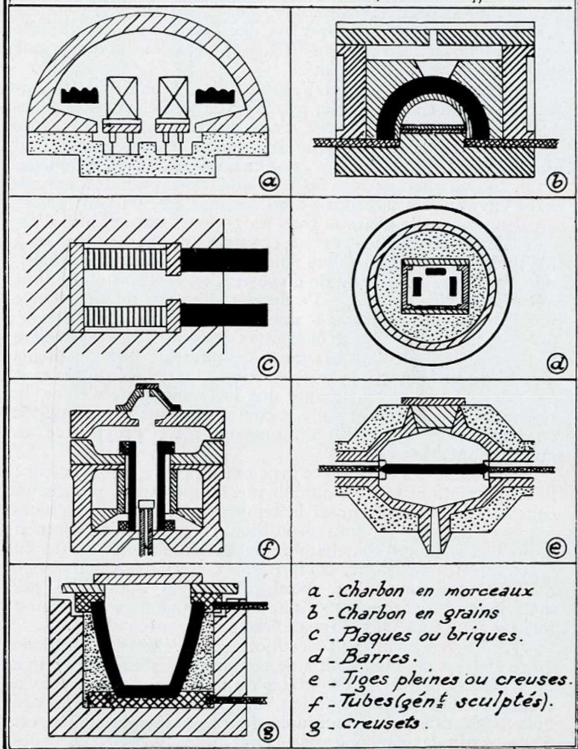


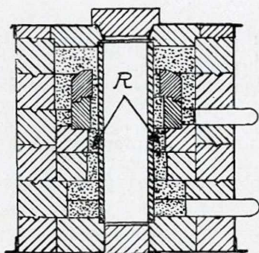
Fig. 1

ou silicates par ex.) qui deviennent progressivement conducteurs aux températures élevées (mélanges connus généralement sous le nom de « Kryptol »). Ces grains de charbon entourent la chambre de chauffe moufle, tube, creuset (fig. 1-b). Le courant est amené au moyen de deux électrodes de graphite qui s'enfoncent dans la masse (fig. 2-a) où la densité de courant peut être par ex. de 5 A:cm^2 .

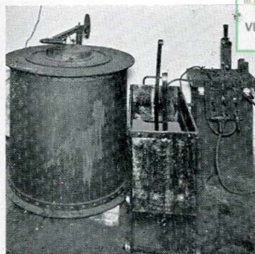
Les avantages des fours à grains de charbon sont les suivants : construction simple, prix d'achat peu élevé, frais d'entretien très réduits (il suffit d'ajouter de temps à autre des grains nouveaux peu coûteux pour remplacer ceux qui se sont peu à peu consumés par exemple, il faudra remplacer 10 p. 100 du charbon tous les trois mois pour un four fonctionnant environ 8 h par jour, dans certains cas, on peut passer un fleuret dans le charbon tous les 15 jours par ex. afin d'assurer l'homogénéité de la masse, et tamiser ce charbon tous les 3 à 4 mois en complétant alors pour remplacer les grains brûlés), non obligation en général de disposer d'un rhéostat ou de tout autre dispositif de réglage. Ce dernier avantage provient de ce que le charbon granuleux a une résistance électrique élevée, due surtout à la résistance de contact des grains, cette dernière résistance dépend d'ailleurs de la compression plus ou moins grande du mélange, à la mise en route, l'intensité du courant est faible, au fur et à mesure que la température s'élève, la résistance décroît et par suite le courant augmente la montée en température est ainsi en quelque sorte progressive et automatique.

Par contre, les fours de ce type ont un grave inconvénient : ils ne permettent guère d'obtenir une température uniforme et constante. Pour uniformiser la température, les constructeurs ont eu recours à différentes dispositions répartition du charbon granuleux le long de la chambre de chauffe suivant un dessin préétabli ou empirique, compression convenable du mélange d'ailleurs judicieusement choisi, disposition appropriée des matériaux réfractaires constituant l'enveloppe du four (fig. 2-a relative à un four de trempe de forets et de mèches).

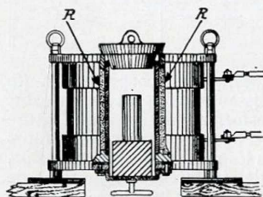
Quelles que soient les précautions prises, il est bien difficile de réaliser et de maintenir une compression uniforme et une homogénéité suffisante des grains du mélange et, par suite, la résistivité du corps de chauffe n'est constante ni dans l'espace ni dans le temps : c'est pourquoi le four à charbon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



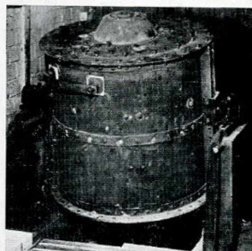
a, Coupe d'un four à charbon granuleux (trempé)



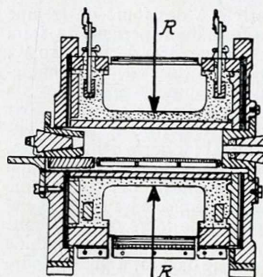
b, Four à charbon granuleux :
trempé de mèches et de forets, 10 kW



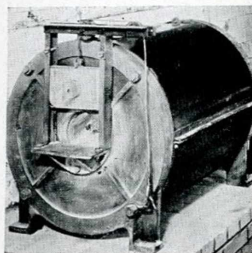
c, Coupe d'un four à charbon granuleux
(essais de réfractaires)



d, Four à charbon granuleux : 60 kW



e, Coupe d'un four à charbon granuleux
(appl. diverses)



f, Four à charbon granuleux :
essais, 24 kW

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

A titre d'exemple, les figures 2-c à f, se rapportent à des fours Daniel Petit de la Compagnie des Produits Céramiques et Réfractaires du Nord. Les fours normaux de ce type sont monophasés et ont les caractéristiques suivantes :

Diamètre d	Hauteur utile h	Longueur utile l	Puissance nominale
mm	mm	mm	kW
70	50	180	12
110	85	300	24
140	110	385	28
200	135	540	32

La tension moyenne qu'on applique au corps de chauffe est de 60 à 90 V, le réglage de la puissance se faisant par rhéostat ou le plus souvent par autotransformateur. La température maximum habituelle est de 1 700-1 800° C pour les petits fours et de 1 400-1 500° C pour les fours les plus grands. En principe, ces appareils ne comportent pas de régulateur automatique de température. Ils sont surtout utilisés pour les essais de matériaux réfractaires. Le nombre des fours de ce type actuellement en service est de l'ordre de 35-40 dont environ les 2/3 sont installés en France.

Les figures 2-a et b sont relatives à des fours de trempe pour forets et mèches. Un transformateur permet de faire varier la tension (donc également la puissance) de 10 en 10 V.

3° **Plaques ou briques de graphite** (fig. 1-c) convenablement pressées les unes contre les autres (comme dans les rhéostats de réglage employés dans certains laboratoires) par ex., four américain Hoskins employé pour la fusion ou le traitement thermique de petites quantités de métal à notre connaissance, ce four n'est pas utilisé en France, nous ne l'indiquons qu'à titre documentaire. Mentionnons également, dans le même but, les plaques de morganite (aggloméré à base de carbone) utilisées dès 1925 dans la construction de fours de porcelaine en Suède ; la durée de ces plaques, d'une longueur de 2 m, d'une largeur de 0,40 m, et d'une épaisseur de 0,03 m, a pu atteindre 8 mois (1 050-1 100° C),

4° **Barres de carbone ou de graphite** : par ex., barres de graphite découpées en épingles à cheveux (fig. 1-*d* et 5-*d*) employées comme corps de chauffe dans les fours à vide de la Compagnie Générale de Radiologie et prévues généralement pour être utilisées jusqu'à 2 200° C les puissances habituelles sont de 75 et de 120 kW environ.

Les figures 3-*a* à *c* sont relatives à un appareil de 75 kW, dont les dimensions utiles (dimensions du volume utile, c'est-à-dire de la partie de la chambre de chauffe qui se trouve à température constante) sont les suivantes (pour 2 200° C) :

Hauteur	115 mm
Largeur	150
Longueur	600

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

La chambre de chauffe est délimitée par une sole mobile en graphite (laquelle coulisse dans la rainure visible sur la photo de la figure 3-*b*), par les autres parois (piédroits et voûte) également en réfractaire et par deux culasses mobiles fermant les extrémités.

La culasse du fond comporte les amenées de courant, en cuivre rouge, refroidies par circulation d'eau (fig. 3-*a*) et soutient les trois résistances visibles à l'intérieur de la chambre de chauffe sur la figure 3-*b*.

La culasse postérieure comporte deux ouvertures : la plus grande (fig. 3-*b*) permet la visite de la partie réfractaire, la plus petite sert pour le chargement du four.

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

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

L'appareil est complété par un groupe de pompage pour

l'obtention du vide. On peut ainsi obtenir un vide correspondant à 0,001 mm de mercure.

Ce four est normalement monophasé.

Le four de 120 kW est par contre alimenté normalement par un transformateur triphasé dans l'huile. La montée à la température de 2 000° C se fait en 2 h environ et le vide précédent est obtenu en 3 h environ. On peut introduire dans l'espace utile des pièces de 1,20 m de longueur et de 150 mm de diamètre.

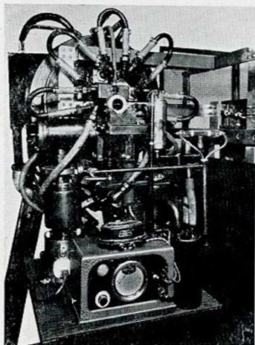
La durée des résistances de graphite (qui travaillent normalement dans le vide) est très élevée. Par ex. un tel four fonctionne quotidiennement à notre connaissance depuis 3 ans environ sans que les corps de chauffe aient été remplacés.

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

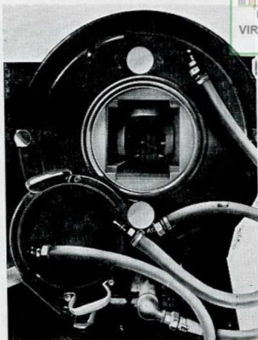
Signalons également certains fours utilisés pour la brasure du tungstène en atmosphère d'hydrogène, ils comportent des barres de graphite percées d'alvéoles et les amenées de courant en bronze sont refroidies par un courant d'eau.

4° **Tiges de graphite** (fig. 1-e). Le four à rayonnement Saint-Gobain-Fenwick, dont la première réalisation industrielle est due à MM. George et Delpach, est constitué par un cylindre horizontal en tôle garni intérieurement, en principe, soit d'un revêtement calorifuge et d'un pisé réfractaire cuit en place, soit de briques réfractaires ce cylindre comporte deux chemins de roulement et repose sur des galets, on peut donc lui donner un mouvement de rotation ou d'oscillation autour de son axe le corps de chauffe est formé par une tige de graphite alimentée à une tension relativement faible (par ex. 25-35 V) que l'on peut faire varier au moyen d'un transformateur.

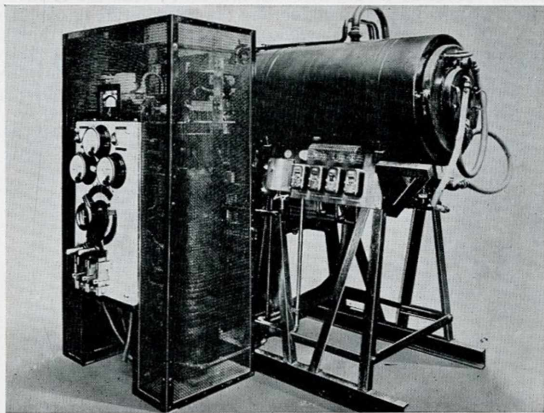
Les fours de ce type ont fait l'objet, au cours des dernières années, de perfectionnements importants amélioration des amenées de courant (d'abord emploi combiné de pièces en graphite et en carbone amorphe, puis pièces métalliques à circulation d'eau avec ou sans tampon complémentaire d'usure en graphite), réduction des pertes électriques (dues aux courants induits dans les parties métalliques) grâce à la localisation, à une seule extrémité, des connexions de polarité différente, emploi d'un chariot porte-électrode automatique permettant l'escamotage facile et rapide du corps de chauffe dans un éteignoir pendant les opérations de chargement, ce qui réduit sensiblement l'usure du graphite, réduction des pertes thermiques aux extrémités du four emploi d'électrodes à section tubulaire, c'est-à-dire de tiges creuses, permettant de réduire la



a. Vue arrière montrant les amenées de courant et les tubulures d'eau^{de} refroidissement.



b. Vue avant (culasse ouverte) montrant les corps de chauffe en barres (épingles à cheveux) de graphite.



c. Four à vide : vue générale, 75 kW.

puissance superficielle, c'est-à-dire à la surface, donc d'utiliser le graphite à une température moindre et par suite dans de meilleures conditions de longévité. Bien entendu, le jeu des dilatations est prévu.

Ces fours sont monophasés. Mais un premier appareil industriel triphasé, prévu pour la fusion de fontes, est en construction, les électrodes étant réparties en une nappe parallèle à la surface du bain.

Les fours à rayonnement (fig. 4-a et b et 5-a et b) ont été jusqu'alors surtout utilisés pour la fusion des fontes spéciales et de la silice et également des bronzes (1). Le nombre d'appareils actuellement en service est de 31, à savoir 5 représentant une capacité globale de 3 260 kg pour les aciers, 22 (9 300 kg) pour les fontes et 4 (2 250 kg) pour les alliages cuivreux. L'installation la plus importante comporte deux fours monophasés d'une capacité unitaire de 1 600 kg de fonte malléable, chargée solide froide et d'une puissance individuelle de 500 kVA ; les électrodes de graphite sont tubulaires et leurs dimensions sont les suivantes : longueur utile : 1 350 mm, diamètre extérieur : 110 mm, diamètre intérieur 55 mm la durée des électrodes (17 kg) est de 11 à 12 fusions en moyenne, celle des réfractaires (3 500 kg) de 180 à 200 fusions la température de coulée est de 1 500° C environ la consommation d'énergie électrique ressort en moyenne (y compris le réchauffage du métal et les prélèvements d'échantillons) à 650 kWh par tonne de métal coulé (marche discontinue à raison de 5 opérations quotidiennes).

Bien entendu, les consommations d'énergie électrique, de graphite et de réfractaires sont essentiellement fonction des conditions de travail (nature de l'alliage, caractéristiques du four, conditions opératoires).

Le tableau ci-après donne des valeurs approchées de ces

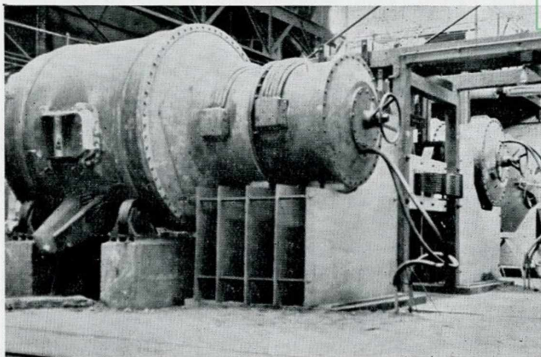
(1) On se reportera avec intérêt aux documents suivants classés par ordre chronologique :

« Fours électriques à rayonnement à résistance de carbone, leur application à la fusion des métaux », article de M. GEORGE dans la Revue générale de l'électricité, 23 juin 1934 ;

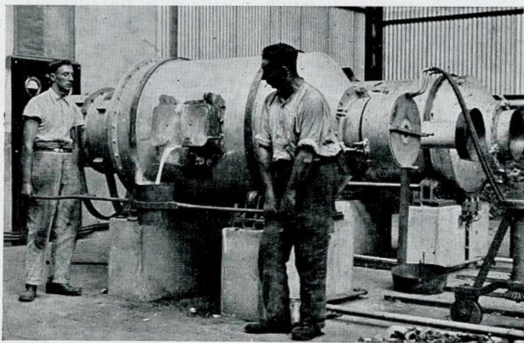
« Les fours à rayonnement à résistance de graphite, applications à la fusion des métaux », article de M. GRIMAUDT dans la revue La Fonte, janvier 1936 ;

« Les diverses applications du four à rayonnement en fonderie, métallurgie et chimie », rapport de M. ETIENNE au Congrès International des Applications Electrocalorifiques et Electrochimiques, 1936 ;

« Les progrès et le développement des fours électriques à rayonnement », par M. SEVIN, Revue du chauffage électrique, juin-juillet 1936.



a, Fours à tige de graphite pour la fusion de fonte malléable, $2 \times 1\ 600\ \text{kg}$, $2 \times 500\ \text{kVA}$



b, Fours à tige de graphite pour la fusion de fontes, $2 \times 250\ \text{kg}$, $2 \times 175\ \text{kVA}$

Fig. 4

grandeurs (1) pour une marche continue en partant de charges froides.

Nature des alliages	Fontes	Bronzes	Aciers
Température maximum de coulée..... °C	1 500	1 300	1 700
Consommation d'énergie électrique kWh	500-600	240-300	800-900
— d'électrodes (graphite)... kg	1,5	0,75	2-2,5
Pisé d'usure zirconal	8-10	3-4	très variable

Les temps de fusion correspondants (1) sont indiqués par le tableau suivant

Capacité	Puissance maximum appliquée	Temps de fusion (mn)		
		Fontes	Bronzes	Aciers
kg	kVA			
100	100	40	20	48
200	175	42	22	53
300	225	48	25	60
500	325	53	28	70
1 000	525	65	34	85

Des résultats d'exploitation relatifs à 9 installations en service et à marche intermittente (fonctionnement quotidien) sont groupés dans le tableau de la page 19.

5° Tubes de carbone ou plutôt de graphite (fig. 5-d).

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

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

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

(1) D'après un article paru dans le n° 7 du bulletin, Les Applications thermiques de l'Électricité. Se reporter également au n° 10 du même bulletin.

Capacité du four	Nature de l'alliage	Puissance moyenne de régime	Température de coulée	Consommations rapportées à la tonne d'alliage fondu		Pertes au feu
				Energie électrique	Graphite (1)	
kg		kVA	° C	kWh	kg	p. 100
1 600	Fonte malléable à cœur noir C=2,45 — Si = 1,14 Mn = 0,41	500	1 520	650	2	1
500	Spiegel Mn = 8-10	260	1 300	460	1,8	2
500	Fonte pour segments d'aviation coulés individuellement Ni — Cr — Cu	260	1 430	580	2	1,2
300	Fonte à segments C = 3,2	180	1 400	520	2	1,5
1 000	Acier réfractaire de moulage C < 0,20 Cr = 30	460	1 700	960	3	≤1,5
1 000	Aciers divers pour forge	375	1 600	850	2,8	1,5
300	Aciers divers	180	1 600	840	3	1,3
160	Acier rapide C=1—Cr—V _a —Tu	110	1 600	900	2	1
1 000	Bronze au glucinium	400	1 250	290	1,6	1,5
250	Cuivre	180	—	280	1,5	1,2

(1) Electrode + pièces d'usure.

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

Soit enfin que l'on ait découpé le tube en forme d'une spirale convenablement étudiée pour réaliser la résistance électrique voulue et une grande uniformité de la température.

Ex. le four normal Culmann (fig. 6-a à c) est prévu pour des températures pouvant atteindre 2 300° C (température

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

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

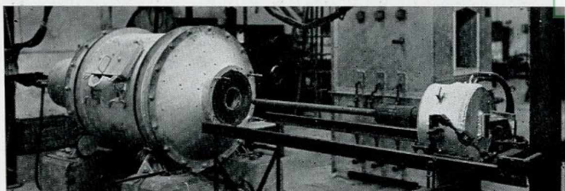
Les fours Culmann sont monophasés.

Le chauffage dans le vide a les principaux avantages suivants

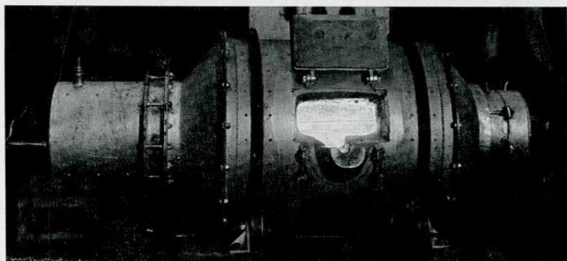
Le corps de chauffe a une longue durée, car il ne se trouve pas en atmosphère oxydante

Le vide assure le dégazage des métaux en traitement ,

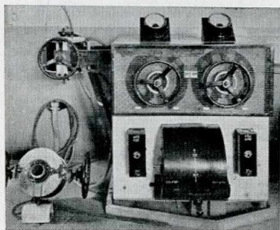
La mesure des températures au pyromètre optique est facilitée par le fait que l'atmosphère du four est limpide.



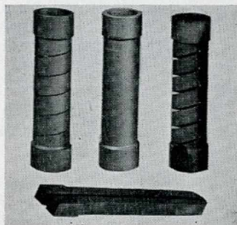
a, Four à tige de graphite (porte de coulée ouverte) montrant le corps de chauffe



b, Four à tige de graphite, corps de chauffe sorti



c, Four à tube de carbone avec son transformateur d'alimentation



d, Tubes et barre (en épingle à cheveux) de graphite (documents Savoie-Acheson)

Fig. 5

Le nombre des fours de ce type en service actuellement la plupart en France dépasse 65, dont une trentaine sont utilisés dans l'industrie, les autres étant installés dans des laboratoires universitaires.

Le four allemand Tammann (fig. 5-c) comporte un tube en carbone, alimenté sous tension réduite au moyen d'un transformateur de réglage. Le creuset (graphite, réfractaire, etc.) contenant les matières à traiter est introduit dans le tube. Ce type de four est surtout répandu en Allemagne.

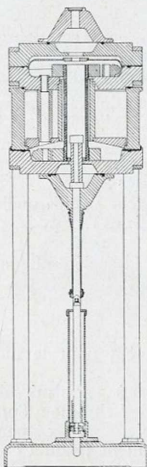
7° **Creusets en carbone.** A titre d'exemple, le four anglais Morgan est constitué comme indiqué sur la figure 6-d. Le creuset, en aggloméré à base de carbone, est placé dans un corps cylindrique en cuivre revêtu intérieurement de matière calorifuge et réfractaire. Il sert à la fois de récipient pour le métal à fondre et de corps de chauffe, l'effet Joule ou transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique se produisant dans la matière même du creuset. Celui-ci est muni d'un doublage en matière spéciale qui le garantit contre l'oxydation et, de plus, en vertu de ses propriétés isolantes, interdit au courant le passage à travers le métal placé dans le creuset. Ce four est monophasé. Sa puissance normale est de 30 kW environ. Un transformateur abaisseur doit être prévu pour permettre l'alimentation aux tensions voulues (de 16 à 32 V, pour tenir compte également de la variation de la résistance électrique du creuset avec la température et avec l'usure). Nous ignorons le nombre — toutefois réduit — de fours de ce genre en service actuellement en Europe. En France, à notre connaissance, il en existe deux exemplaires (fusion de bronze). La durée des creusets, fonction en particulier de la nature du métal et des conditions de travail semble devoir être évaluée, en moyenne, à 60 fusions pour les fours à marche continue et de 40 à 50 fusions pour les fours à marche intermittente.

* * *

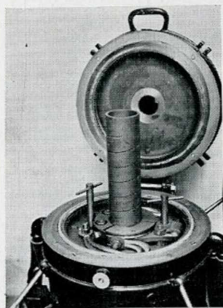
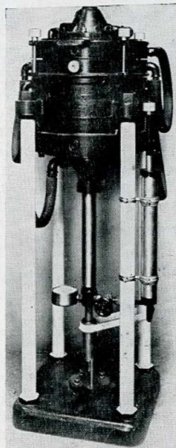
B) Résistances en carbure de silicium

Nature.

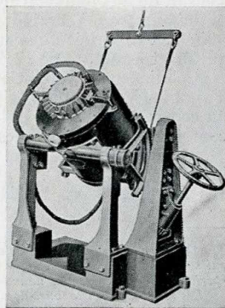
Le carbone s'oxyde facilement à l'air. On a cherché à obvier à cet inconvénient, soit en transformant superficiellement le carbone en carbure de silicium SiC moins oxydable (silfrax, silundum), soit en utilisant des résistances en oxycarbure de silicium SiOC plus ou moins pur (siloxicon, silit).



a et b, Coupe et
vue extérieure
d'un four à tu-
be de graphite,
20 kW.



c, Vue du four ci-dessus avec cou-
vercle ouvert et corps de chauffe
partiellement sorti.



d, Four à creuset, 30 kW

Pratiquement, on utilise maintenant, d'une façon courante, des baguettes obtenues au four électrique à haute température (1). Il en existe actuellement 4 sortes (ordre alphabétique)

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

Les baguettes de **quartzilite**, fabriquées en Suisse (Établissements Kummeler & Matter, à Aarau) et qui, à notre connaissance, sont utilisées seulement dans ce pays,

Les baguettes **savoie**, mises sur le marché depuis quelques mois seulement et fabriquées par la Société des Electrodes de la Savoie

Les baguettes de **silit**, fabriquées par la société allemande Siemens.

Propriétés.

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

Résistivité très élevée : par ex. de 900 à 5 000 microhms: cm:cm² pour le « global » (110 pour le nickel-chrome à 80/20)

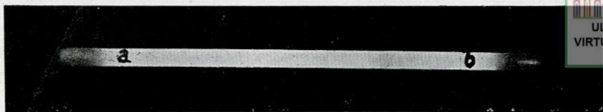
Coefficient de température α très faible. par ex., pour la « silit », la résistance diminue progressivement jusqu'à ce que la température atteigne environ 900° C, puis augmente ensuite légèrement, variation du même genre pour le « global ». Il s'ensuit qu'aux températures usuelles d'emploi (1 200 à 1 400° C), on n'aura pas à craindre l'augmentation progressive de la puissance absorbée que causerait la diminution de la résistance au fur et à mesure de l'élévation de la température

Coefficient de dilatation : pour le « global », par ex., il est d'abord négatif, puis positif à partir de 850° C. Pour assurer un contact convenable et laisser libre jeu à la dilatation et à la contraction, on utilise des montages spéciaux (fig. 7 et 8),

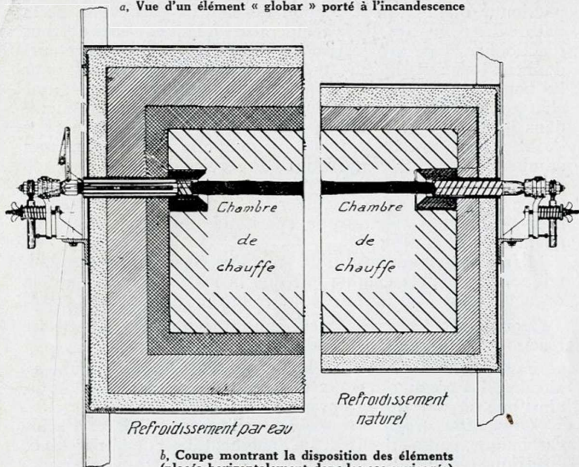
Température pratique maximum d'emploi dans les fours industriels : 1 400° C. À une température plus élevée, la durée des baguettes est considérablement réduite (désagrégation,

(1) Les fours à résistances de carbone sont, en général, protégés par des brevets qui sont encore valables et chaque type de four est construit par un seul fabricant spécialisé. Nous indiquons dans ce cas le nom des constructeurs.

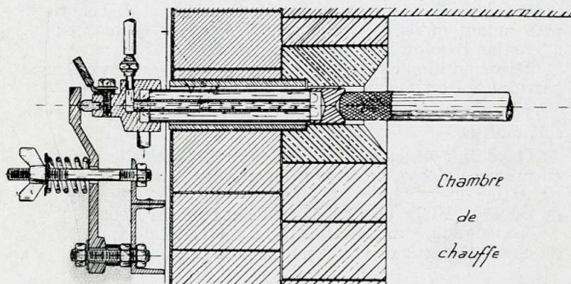
Les résistances en carbure de silicium sont utilisées par la plupart des constructeurs de fours électriques industriels. Nous ne donnons donc pas de nom de constructeurs. Les photos des figures 10 à 14 montrent quelques cas d'application des baguettes en carbure de silicium.



a, Vue d'un élément « global » porté à l'incandescence



b, Coupe montrant la disposition des éléments (placés horizontalement dans les cas envisagés)



c, Coupe montrant le dispositif de fixation et de refroidissement (par eau)

Fig. 7

oxydation rapide et vitrification vers $1\ 600^{\circ}\text{C}$ pour la « silit » par ex., surtout en présence de certains gaz, tels que le gaz d'éclairage)

Puissance spécifique superficielle la charge superficielle maximum que l'on peut adopter dépend, en particulier, de la nature des baguettes, de la température à laquelle elles doivent fonctionner et de la constitution des fours. Les constructeurs donnent tous renseignements à ce sujet. A titre indicatif, pour les baguettes du type « global », on admet généralement une charge maximum de $35\ \text{W}\cdot\text{cm}^2$ à l'air libre et de $22\ \text{W}\cdot\text{cm}^2$ dans les fours fermés habituels pour les baguettes du type « silit », la courbe de la figure 9-c donne la valeur maximum admissible pour des températures de service des fours de $1\ 100$ à $1\ 400^{\circ}\text{C}$. On a toutefois intérêt — et on ne saurait trop insister sur ce point — à faire travailler les baguettes *en paresseuses*, c'est-à-dire sous une charge spécifique moindre, afin d'en augmenter la durée

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

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

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

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

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

Action très forte de la vapeur d'eau ,

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

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

Oxydation légèrement progressive à partir de $1\ 200^{\circ}\text{C}$ en présence d'oxygène, et surtout d'ozone ,

Action des oxydes CuO à partir de 800°C , $\text{Fe}^2\ \text{O}^3$ à partir de $1\ 200^{\circ}\text{C}$, $\text{Ni}^2\ \text{O}^3$ de $1\ 300^{\circ}\text{C}$, CaO et MgO de $1\ 000^{\circ}\text{C}$.

Action des métaux alcalins (K, Na, etc., fondus), du plomb, du chlore (à partir de 600°C), du soufre (à partir de $1\ 000^{\circ}\text{C}$),

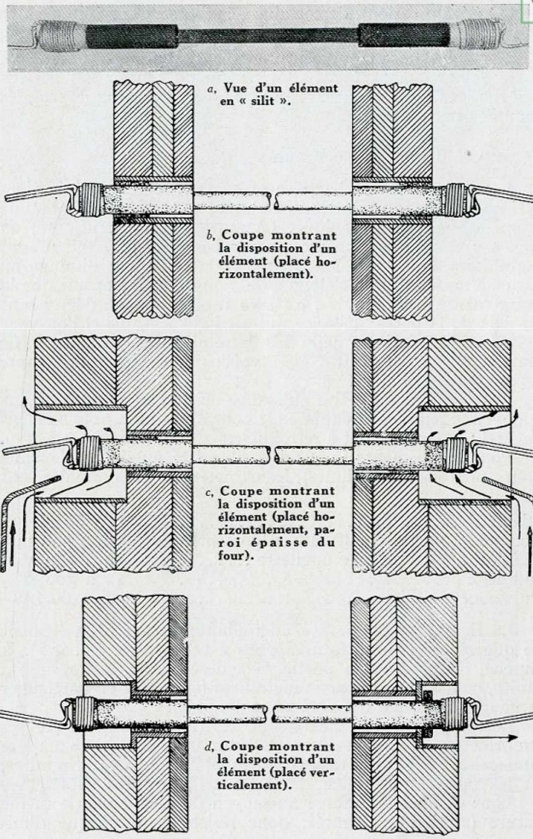


Fig. 8

de CO (légère action), de certains sels (borax et cryolite fondus et vaporisés, nitrate et chlorate de potassium fondus et liquides).

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

Formes et dimensions courantes.

Les baguettes « global » se présentent sous forme de tiges pleines, de section relativement importante, donc offrant une bonne résistance mécanique. La partie utile (chauffante) *ab* (fig. 7-a) est de composition homogène. Les extrémités sont métallisées dans toute leur masse et la résistance diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de *a* ou de *b*. Il s'ensuit que la température (effet Joule ρI^2) va rapidement en décroissant au delà de la partie utile, ce qui est indispensable si l'on veut éviter la destruction rapide des extrémités de la baguette, de leur support et des réfractaires voisins et si l'on veut réduire les pertes de chaleur.

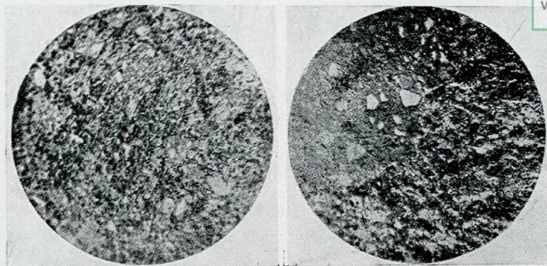
Les éléments de petite puissance ou montés dans des fours à moyenne température (par ex. 1 000° C) sont à refroidissement naturel, les autres sont à refroidissement par eau (fig. 7-b et c).

Pour les éléments industriels (il existe aussi des éléments pour appareils domestiques), les caractéristiques normales sont les suivantes :

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

La figure 9-a donne des microphotographies d'un élément de quarzilite (propriétés analogues à celles du « global »). A gauche, coupe dans la partie incandescente et homogène, à droite, coupe dans la partie métallisée (examiner en particulier la gauche de cette dernière photographie).

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



a. Microphotographies d'un élément de quartzite

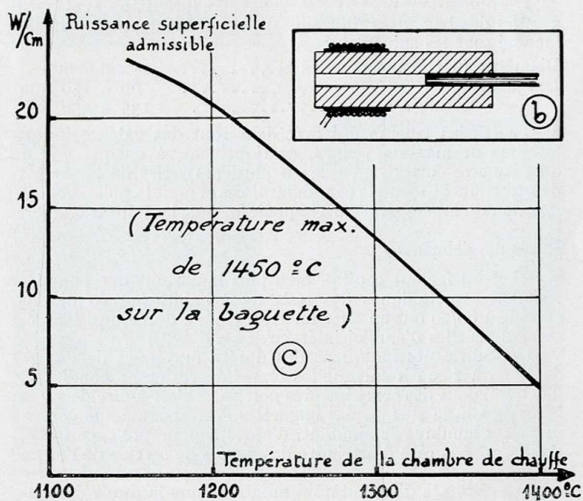


Fig. 9



nuée, donc effet Joule moindre) à l'extrémité desquels on fixe les connexions métalliques (pression des fils par enroulement et métallisation externe). Ces baguettes sont à refroidissement naturel (fig. 8 et 9-b).

Les dimensions habituelles sont les suivantes :

Diamètre (partie incandescente)..	4 à 30 mm
Longueur — ..	60 à 800
— totale de la baguette (partie incandescente + bouts renforcés)	120 à 1 800
Tension applicable par baguette	12 à 222 V
Puissance unitaire ..	0,060 à 18 kW (18 kW à 1 100° C et 3,75 kW à 1 400° C pour la même baguette).

Les dimensions des baguettes « savoie » (propriétés analogues à celles des baguettes de « silit ») actuellement offertes sur le marché sont les suivantes

Diamètre (partie incandescente)	4-6-8 mm
Longueur ..	60 à 150 mm
totale .	135 à 350

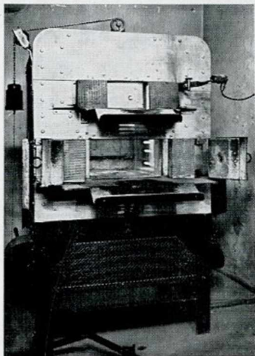
Toutes les valeurs qui précèdent sont des valeurs-limites (minima et maxima), mais, pratiquement, à chaque valeur du diamètre correspond une ou plusieurs séries de baguettes de longueurs différentes et standardisées et dont la puissance est fonction de la température à laquelle on veut les faire travailler.

Durée des éléments.

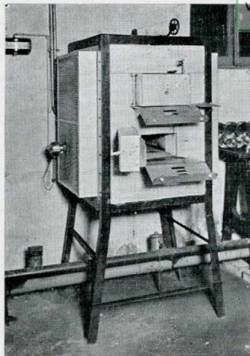
C'est un facteur capital, bien plus important que pour les résistances métalliques (les résistances habituelles en nickel-chrome à 80/20 ont en effet une très longue durée aux températures usuelles d'emploi inférieures à 1 000° C).

Les fabricants indiquent des durées moyennes de l'ordre de 1 000 à 2 000 h suivant les températures et les conditions d'emploi, pour des températures normales, c'est-à-dire de 1 200 à 1 450° C à la surface des baguettes. Certains auteurs confirment ces nombres et ajoutent, d'après leur propre expérience, qu'il n'est pas rare d'atteindre des durées de service de l'ordre de 3 500 à 5 000 h.

Les résultats d'exploitation montrent que la durée des éléments qui dépend, comme nous allons le voir, d'un grand



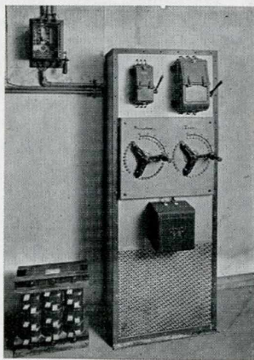
a, Four de trempe de fraises
en acier rapide, 24 + 12 kW



b, Four de trempe de fraises
en acier rapide, 8 + 4 kW



c, Rhéostat de réglage du four ci-dessus



d, Autotransformateur de réglage
du four ci-dessus

Fig. 10

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 1 350 à 1 400° C dans la chambre de chauffe de fours correctement construits et utilisés et à marche intermittente.

A titre d'exemples :

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

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

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

Cette durée pour laquelle aucune garantie 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.

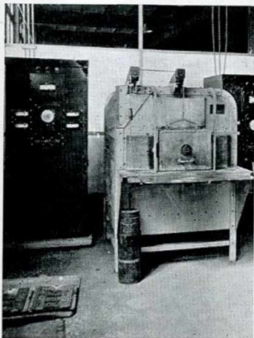
Les principaux sont les suivants :

Dessin et profil du four, montage des éléments
Température normale du four, régulation de la température
Nature de l'atmosphère du four
Conditions de mise en température des baguettes,
Vieillessement des baguettes.

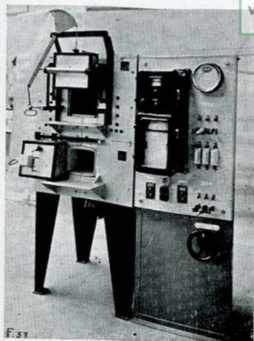
1° Dessin et profil du four, montage des baguettes.

Le four doit être conçu, évidemment, de façon que les éléments soient utilisés dans les conditions optima de durée (exa-

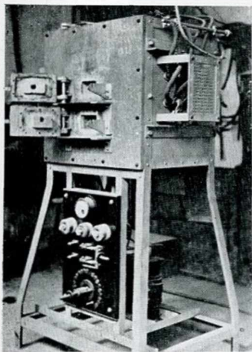
(1) Communication faite par M. DE GROOTE au Congrès Technique de l'Industrie Céramique en juin 1938. Voir également la note « La cuisson de la porcelaine dure au four électrique », revue *Electricité*, mai 1938.



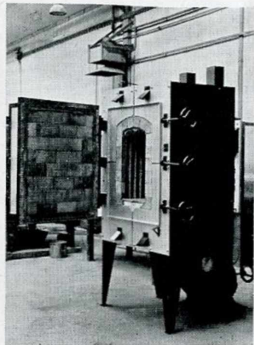
a. Four pour trempé de matrices en acier spécial, 40 kW (réglage par auto-transformateur).



b. Four pour trempé d'acier rapide, 20 kW (réglage par régulateur d'induction).



c. Four pour travaux de laboratoire, 35 kW (réglage par régulateur d'induction, éléments placés verticalement).



d. Four pour trempé d'acier rapide, 9 + 1,5 kW (réglage par autotransformateur).

Fig. 11

men 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 pour les baguettes « globar » par un système de connexions avec ressort compensateur (fig. 7-*b* et *c*). 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),

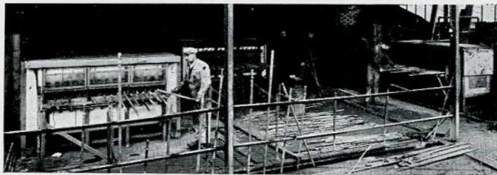
Assurer une pression suffisante de la tige métallique terminale (amenée de courant) contre l'extrémité voisine de la baguette, afin de ménager un passage facile au courant (sinon, les étincelles détruiraient rapidement la partie concave de la tige et également la partie convexe de la baguette),

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

Pour les éléments en « silit », les connexions métalliques situées aux extrémités sont pliées pour faire ressort et assurer une fixation élastique des baguettes (fig. 8). Le refroidissement naturel peut être renforcé grâce à des dispositions simples (fig. 8-*c*).

2° Température du four.

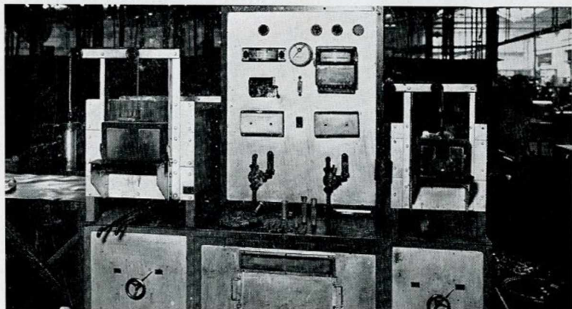
La durée des éléments dépend fortement de la température à laquelle ils travaillent. La température superficielle des éléments est plus élevée que celle du four (tout au moins pour les traitements courants sans réaction exothermique). La différence de température doit être aussi faible que possible, car la durée des éléments décroît rapidement — il est bon d'y insister quand la température d'emploi augmente. Pour fixer un ordre de grandeur, ce gradient de *tp.* sera par ex. de 180° C dans un four à 1 400° C (c'est-à-dire que la température superficielle de la baguette sera de 1 580° 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 spécifique de 18 W:cm²). Il est évidemment minimum quand la radiation (les fours à haute température à atmosphère libre sont pratiquement des fours à radiation, la convection et la conduction y étant relativement faibles) se fait directement des baguettes vers le corps à chauffer. Il peut, par contre, être beaucoup plus important que nous venons de l'indiquer s'il y a interposition d'un moufle ou d'un



a. Fours de forgeage de forets, $2 \times 70 + 50$ kW



b. Terrasses électriques mobiles (industrie de la soie)



c. Installation de trempe d'acier rapide, $10 + 7$ kW

Fig. 12



creuset ou s'il se produit des interférences de chaleur (causant des surchauffes locales sur les éléments et entraînant une répartition défectueuse de la chaleur dans la chambre de chauffe) par suite de la mauvaise disposition des éléments, voire des pièces à traiter, ou du tracé incorrect du profil intérieur du four.

On notera en passant que les baguettes en carbure de silicium sont utilisées non seulement pour l'obtention de températures élevées, mais encore, dans certains cas, pour des températures sensiblement inférieures à 1 000° C, lorsque l'on est astreint à disposer une puissance élevée dans un espace restreint (par ex. pour obtenir une fusion rapide).

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

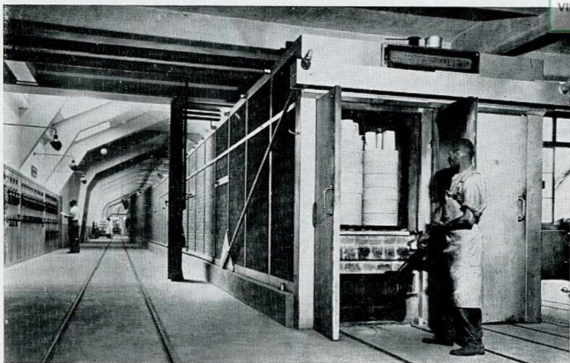
3° **Atmosphère du four.**

Une des caractéristiques essentielles — et pratiquement très intéressante — du four électrique est de permettre la *régulation absolument indépendante de la température et de l'atmosphère*. Cette particularité, très estimée pour un certain nombre de traitements thermiques (recuit et trempe par ex.) et pour la cuisson de la porcelaine dure, peut avoir une influence heureuse (azote sec par ex.) ou non.

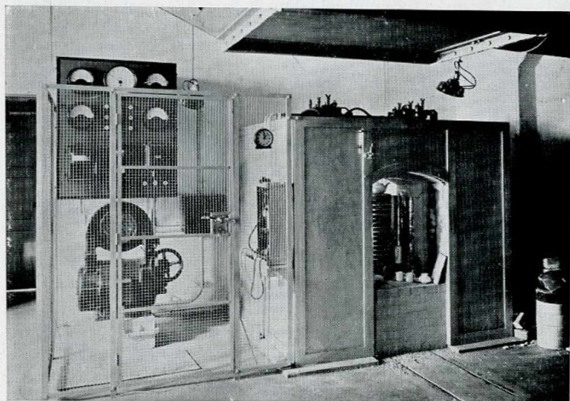
Dans le cas où l'on introduit certains gaz dans la chambre de chauffe (gaz d'éclairage par ex.), il peut être bon d'éviter que le tuyau d'arrivée aboutisse près des baguettes, ce qui peut provoquer à la surface de celles-ci la formation d'une couche ressemblant à de l'émeraude et qui, vraisemblablement,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

4° **Mise en température du four.**

Sous l'action de la chaleur, les éléments commencent par se contracter, puis ils se dilatent. Pour éviter l'action destructive des contractions et dilatations successives, particulièrement fréquentes lors de la marche discontinue des appareils électrothermiques, il paraît indiqué de réaliser un chauffage progressif et lent jusque vers 800-850° C par application d'une tension progressivement croissante (comme pour un démarrage de moteur, mais au ralenti) on peut ensuite appliquer d'un seul coup la tension normale. Le fabricant des baguettes de



a, Four de cuisson de porcelaine dure, 90 m, 600 kW (réglage par régulateur d'induction)



b, Four d'essais pour cuisson de porcelaine, 35 kW

« silit » estime toutefois que l'on peut sans inconvénient, appliquer dès le début la pleine tension, voire même une tension plus élevée, sous la seule réserve que la charge superficielle en W/cm^2 ne dépasse pas les limites indiquées par la courbe de la figure 9-c.

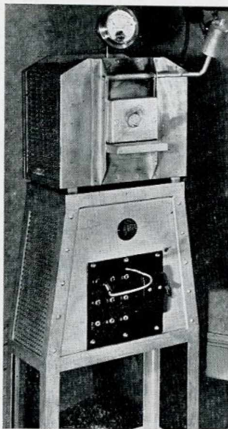
5° Vieillesse des baguettes.

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 (pendant les 60 à 150 premières heures d'utilisation), puis ensuite très lente. Cela résulte de deux actions simultanées : oxydation (qui entraîne une usure superficielle, donc une diminution du diamètre et par suite, une augmentation de la résistance des baguettes), cette action est probablement très faible et très lente dans la plupart des cas) et désagrégation (causes physiques — contractions et dilata-tions successives — et chimiques). Il s'ensuit, pour une même tension U appliquée, une réduction de la puissance dissipée (effet Joule $P = \frac{U^2}{R}$), donc une augmentation de la durée de mise en température et, éventuellement l'impossibilité de réaliser la température normale dans le four. L'augmentation de R peut atteindre 60, 80 et même 100 p. 100. Pour neutraliser les effets de ce « vieillissement », on peut avoir recours à plusieurs moyens qui se ramènent à ménager, dès le début, une marge de tension suffisante pour combattre progressivement l'augmentation de R par augmentation de la tension U appliquée aux baguettes.

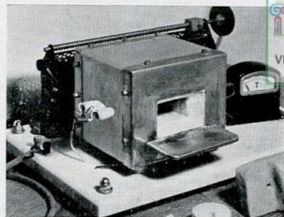
Par exemple, pour un four à atmosphère normale devant fonctionner à $1400^{\circ}C$, on réalisera une réserve de tension de 40 p. 100 environ au moyen d'un auto-transformateur permettant de faire varier la tension de 220 V (tension d'alimentation du réseau) à 140 V. Les baguettes seront choisies pour fournir la puissance voulue à 140 V. Au fur et à mesure de leur usure, on augmentera progressivement jusqu'à 220 V la tension qui leur est appliquée.

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

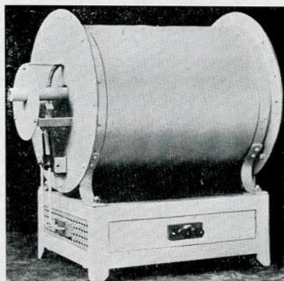
De la façon dont on jouera avec la réserve de tension précédente dépendra, pour une part importante, la durée des



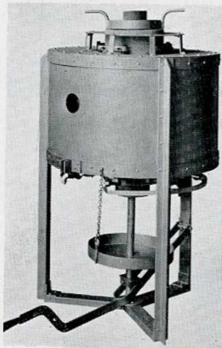
a, Four de cuisson de porcelaine dentaire, 2 kW (réglage par auto-transformateur).



b, Four de cuisson de porcelaine dentaire, 1 kW (réglage par rhéostat).

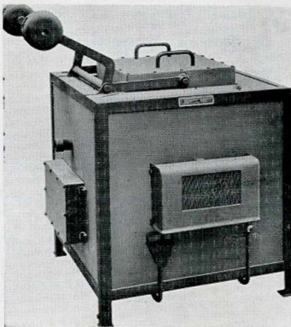


c, Four de laboratoire, 1,5 kW (résistance de compensation).



d, Four de fusion de métaux précieux, 8 kW.

e, Four de fusion d'or, 14 kW. →



baguettes. Il va sans dire qu'il ne faut pas profiter, au début de l'utilisation des baguettes, de la marge de tension dont on dispose pour obtenir une mise en température plus rapide ($P = \frac{U^2}{R}$ on surchargerait alors les baguettes et on accélérerait leur destruction).

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

1. *Emploi de baguettes de puissance plus élevée.* S'il s'agit de petits fours, on peut se contenter d'employer des baguettes de puissance supérieure à la puissance nominale, sans avoir recours à un dispositif spécial et coûteux de réglage. Au début, la mise en température sera plus rapide (prévoir toutefois l'action sur les réfractaires et employer au besoin une résistance additionnelle);

2. *Emploi de résistances de compensation.* Soit, à titre d'exemple, R_0 la résistance initiale d'une baguette prévue pour une tension nominale U . Supposons qu'au bout d'un certain temps de fonctionnement, cette résistance soit devenue $R = 2 R_0$.

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

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

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

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

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

Cette puissance sera répartie comme suit

P_0 dans la baguette et P_0 dans la résistance additionnelle.

La puissance finale absorbée sera

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

Elle se partagera comme suit :

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

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

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

Pour concrétiser immédiatement ce calcul théorique, le tableau suivant donne les résultats correspondants à

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

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

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

3. *Emploi de bobines de réactance ou selfs de compensation.*

Lorsque l'alimentation se fait en courant alternatif, ce qui est le cas général, on a évidemment intérêt à remplacer les résistances précédentes par des selfs, car on réduit ainsi à une

valeur négligeable la consommation propre d'énergie active (Wh ou kWh) du dispositif de compensation. Mais ceci se produit au détriment du facteur de puissance ($\cos \varphi$) et il faut en tenir compte si la tarification est fonction de la valeur de $\cos \varphi$

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

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

6. *Emploi d'autotransformateurs de réglage*. En courant alternatif, on a le plus souvent recours à un autotransformateur de réglage (il n'en était pas ainsi il y a une dizaine d'années, certains constructeurs étrangers en particulier ayant par principe adopté le réglage par rhéostat parce que, à l'époque, le prix d'achat en était relativement moins élevé que celui d'un autotransformateur ; le bénéfice ainsi obtenu par l'utilisateur sur le prix de premier établissement se transformait rapidement en perte par suite de la consommation exagérée de l'ensemble four-rhéostat). Étant donné l'excellent rendement des autotransformateurs, cette solution s'impose dans la plupart des cas

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

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

Remarque : *Remplacement des baguettes*. Lorsqu'il y a lieu de remplacer une baguette pour une raison quelconque (usure, casse), il est préférable de changer en même temps toutes les baguettes du même jeu (par exemple les trois baguettes dans le cas d'un montage en étoile) et de réemployer ultérieure-

Principales APPLICATIONS INDUSTRIELLES des RESISTANCES non METALLIQUES

A. Résistances en CARBONE (surtout en GRAPHITE)

- Équipement de tous appareils thermiques pour les recherches, les essais et le contrôle à haute et à très haute température dans les laboratoires industriels
- Équipement des fours électriques de fabrication et de contrôle à haute et à très haute température

Type de fours	Principales applications déjà réalisées.
Charbon grains	Essais pyrométriques des produits réfractaires Chauffage avant trempe de certains outils Fabrication du Mg. et des alliages de Ti. et de Tu.
Barres graphite	Traitement thermique des pièces métalliques (TSF, rayons X) Fusion métaux purs et dégazés (anticathodes rayons X) Fusion des alliages métalliques (fontes, bronzes, etc..)
Tiges graphite	Fusion et calcination d'oxydes très réfractaires Fabrication des carbures métalliques (silicé, etc.)
Tubes graphite	Fabrication du tungstène pur Dégazage des métaux. Etc...
Creusets	Fusion de bronzes

B. Résistances en CARBURE de SILICIUM { Global silit savoie

- Équipement de tous appareils thermiques à haute température des laboratoires industriels
- Essentiellement, équipement des fours électriques de fabrication à haute température en particulier :

Fours de traitements thermiques { Trempe (acier rapide en particulier)
Recuit (aciers spéciaux)
Forgeage

Fours de céramique (en particulier porcelaine dure).

Fours de fusion (métaux précieux)

Tableau III

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

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

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

Il faut encore remarquer que le fait d'avoir une puissance absorbée différente pour les baguettes peut entraîner une dyssymétrie inacceptable dans la répartition de la chaleur dans la chambre de chauffe.

Il est donc toujours indiqué de remplacer les baguettes par jeux complets.

Ce remplacement, 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).

En résumé : Les baguettes peuvent être détruites

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

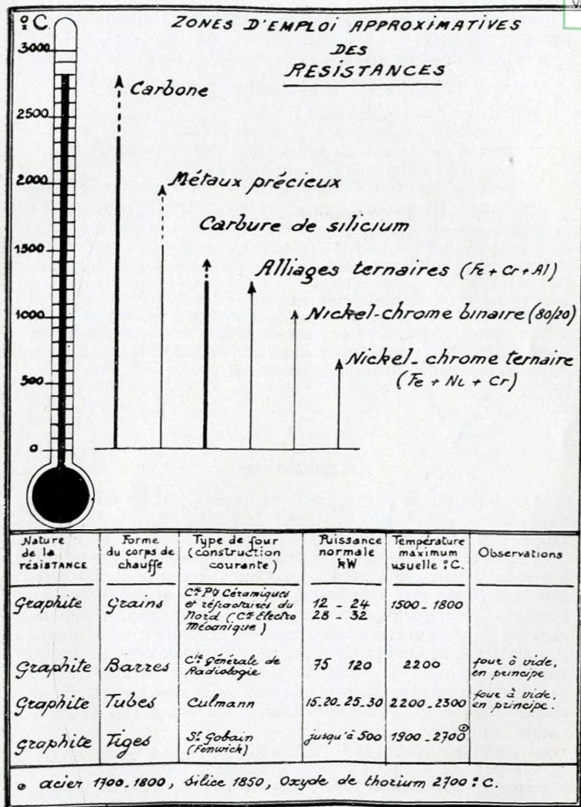


Tableau IV

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.

* * *

Applications

Le tableau de la page 43 indique quelles sont les *principales* applications *industrielles courantes déjà réalisées* avec les résistances non métalliques.

1° Les résistances de carbone et surtout de graphite sont utilisées, en dehors des laboratoires, pour l'équipement des fours à vide à haute et à très haute température dont le développement bien que relativement limité — se poursuit régulièrement et pour celui des fours à tiges de graphite qui ont donné jusqu'alors d'excellents résultats pour l'élaboration des fontes spéciales et dont le domaine d'application semble devoir s'étendre. Le tableau du bas de la page 45 groupe les principales caractéristiques des fours industriels les plus courants de fabrication française

2° Les résistances en carbure de silicium sont très employées, depuis plus de dix ans, pour l'équipement des fours de 1 000 à 1 400° C. Le nombre des fours de trempe d'aciers rapides en service actuellement en France est sans doute élevé, mais aucune statistique n'existe malheureusement à ce sujet. De

nouvelles applications s'offrent à ces résistances, en particulier, tant au point de vue des traitements thermiques des alliages métalliques que de la cuisson de la céramique à haute température.

*
* *

Conclusion

Pour l'équipement des appareils électrothermiques « à résistance » et en particulier des fours industriels, on dispose actuellement de résistances non métalliques (carbure de silicium, carbone amorphe et graphite) qui ont fait leurs preuves et dont la durée aux hautes (1 000 à 1 400° C) et aux très hautes températures (jusqu'à 2 200° C, voire davantage) est satisfaisante si les appareils sont correctement conçus et utilisés. Par suite de l'évolution de la science et de l'industrie, ces résistances prendront sans doute une place de plus en plus considérable — relativement, bien entendu — dans le domaine du chauffage industriel.

Août 1938.



Imprimerie des Presses Universitaires de France. — Vendôme-Paris (France)



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM



XIII. 9. 38

La Société pour le Développement des Applications de l'Électricité APEL, créée avec le patronage du Groupement des Secteurs Français, a pour objet l'amélioration et la vulgarisation des appareils électriques d'applications diverses.

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