

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL

LES RÉSISTANCES MÉTALLIQUES

Par M. R. GAUTHERET

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



THE HISTORY OF THE
CITY OF BOSTON
FROM 1630 TO 1800

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL

Les résistances métalliques

Par M. R. GAUTHERET

SOMMAIRE

Principes sur lesquels reposent les fours « à résistance » :

Loi d'Ohm, groupement des conducteurs, loi de Joule

Qualités optima des résistances

Classification des résistances

Résistances métalliques

A) *Alliages « nickel-chrome » :*

Nature, caractéristiques, forme, durée

B) *Alliages « fer, chrome, aluminium »*

C) *Métaux précieux*

Remarques :

Répartition des éléments chauffants :

Souplesse du chauffage électrique

Importance de la tension

Réglage de la puissance

Conclusion

Les appareils électro-thermiques se sont considérablement développés au cours des dernières années.

Les premiers fours à résistance étaient des appareils de laboratoire de petite puissance constitués par un tube ou manchon en terre réfractaire ou en porcelaine autour duquel on enrobait un fil (boudiné ou non) ou un ruban (fig. 1). Pour les faibles températures, on employait des métaux communs : fer, cuivre, cuivre émaillé ; pour les températures plus élevées, du platine ou du nickel.

Le prix élevé du platine, la fragilité du nickel et la difficulté d'obtenir dans le tube une température suffisante à cause de la chute de température dans les matières constituant le tube, ne permettaient pas d'envisager l'industrialisation de ces fours.

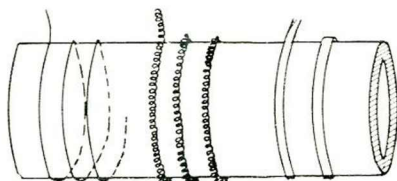


Fig. 1

Les deux améliorations qui ont permis au four électrique de se développer sont :

1^o L'obtention d'aciers spéciaux connus sous le terme générique de « nickel-chrome » (permettant d'atteindre pratiquement des températures utiles de l'ordre de 1 000^o C) et aussi l'élaboration plus récente d'alliages à base de fer, de chrome et d'aluminium (qui ont permis de réaliser, dans une enceinte fermée et dans des conditions raisonnables de durée, une température de l'ordre de 1 250^o C) ;

2^o La possibilité de disposer des résistances à l'intérieur de la chambre de chauffe, d'où une réduction de la différence de température entre le corps de chauffe et la pièce à chauffer et, par suite, une augmentation de la température maximum réalisable et utilisable dans la chambre de chauffe.

L'évolution du chauffage électrique industriel, au cours des dernières années, est caractérisée essentiellement du point de vue qui nous intéresse ici :

1^o Par l'augmentation de la durée des corps de chauffe (1) (emploi de résistances métalliques de qualité supérieure, de plus grande section, disposées le plus souvent à l'intérieur des appareils : c'est le cas général des fours par exemple) ;

2^o Par le développement considérable, bien que plus tardif, des divers petits appareils électro-thermiques, parallèlement aux fours électriques. Ce développement a été rendu possible par la présentation, sur le marché, d'éléments chauffants « standard », faciles à employer, robustes, bien conçus et d'un prix convenable.

*
* * *

L'usager, qu'il ait l'intention de commander et d'utiliser un four ou autre appareil construit par un spécialiste ou qu'il désire équiper lui-même un appareil thermique plus simple (petite étuve, cuve, etc.), doit connaître un minimum de renseignements relatifs aux résistances métalliques et à leurs conditions d'emploi.

C'est à quoi voudrait répondre cette courte notice.

*
* * *

Principes sur lesquels reposent les appareils « à résistance »

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

Il est donc nécessaire de rappeler ces lois simples, mais fort utiles dans la pratique, ne serait-ce que pour rafraîchir la mémoire de ceux qui ont été amenés à laisser s'estomper leurs souvenirs.

(1) On désigne ainsi les parties de l'appareil qui transforment l'énergie électrique en énergie calorifique.

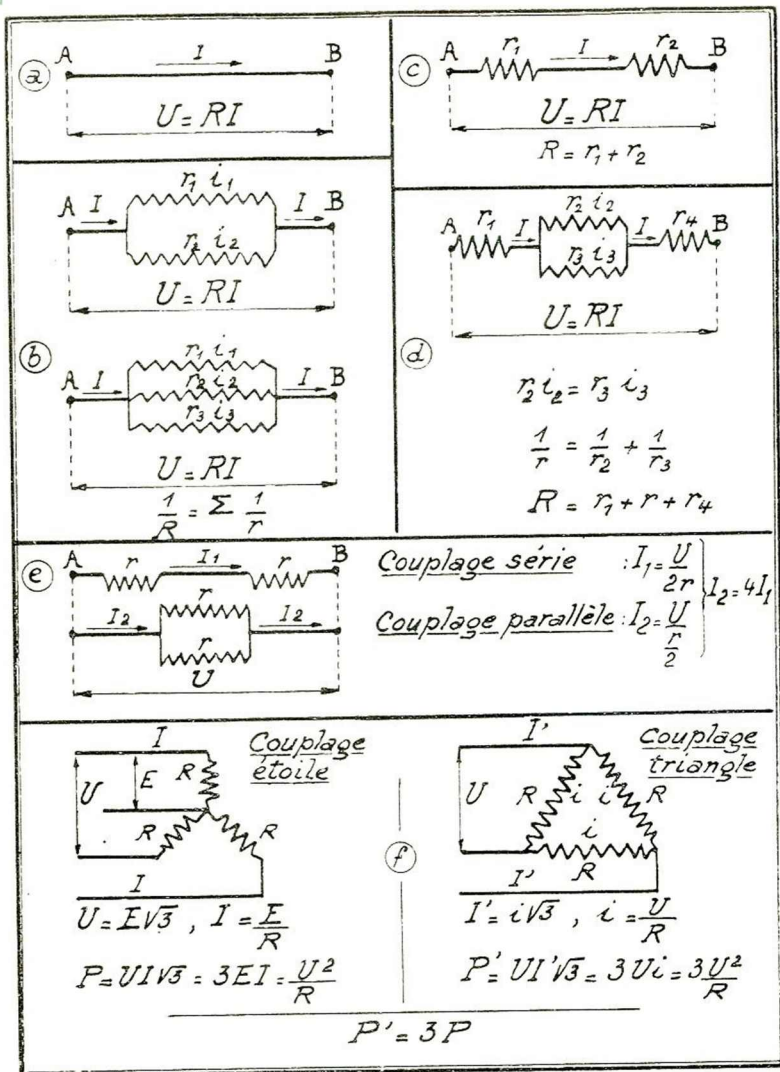


Fig. 2

Loi d'Ohm.

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

Si l'on applique aux extrémités d'un conducteur AB (fig. 2 a) de résistance R, une tension U, ce conducteur sera parcouru par un courant d'intensité I et l'on aura la relation :

$$U = RI$$

volts ohms ampères

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

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

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

Résistance et résistivité.

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

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

Les unités étant par exemple les suivantes :

R en ohms ;

l en centimètres ;

s en centimètres carrés ;

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

Variation de la résistance en fonction de la température.

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

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

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

Loi des circuits dérivés (lois de Kirchhoff).

Dans les cas de deux conducteurs (fig. 2-b), on a :

$$\begin{aligned} I &= i_1 + i_2 \\ U &= r_1 i_1 = r_2 i_2 \end{aligned}$$

Dans le cas de plusieurs conducteurs (fig. 2-b), on a :

$$\begin{aligned} I &= i_1 + i_2 + i_3 + \dots = \sum^{(1)} i \\ U &= r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3 = \dots \end{aligned}$$

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 : $U = RI$, un calcul simple montre que :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots = \sum^{(1)} \frac{1}{r};$$

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

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

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

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

(1) Ce signe veut dire : addition (ex. somme des i ou somme des valeurs de $\frac{1}{r}$).

Groupement 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. 2-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. 2-b).

Couplage mixte. — Combinaison des deux couplages précédents (exemple fig. 2-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. 2-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. 2-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 :

$$P = UI$$

watts volts ampères

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

$$W = Pt = UIt$$

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

D'où

$$P = RI^2$$

watts ohms ampères

et

$$W = R I^2 t$$

joules ohms ampères secondes

Valeur de la puissance d'un appareil électrothermique

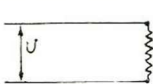
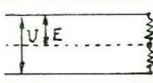
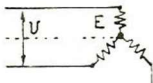
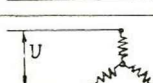
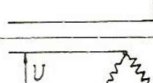
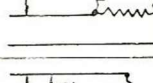
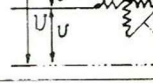
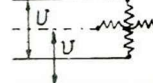
Designation	Nbre de fils	Schema d'alimentation	Tension	Puissance
Courant continu ou courant alternatif monophasé	2		U	$P = UI$
Courant continu ou courant alternatif monophasé	3		$U = 2E$	$P = UI = 2EI$
Courant alternatif triphasé avec neutre (étoile)	4		$U = E\sqrt{3}$	$P = UI\sqrt{3} = 3EI$
Courant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

Tableau I

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

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

petites calories joules ohms ampères secondes

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

$$\text{Puissance} = P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

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

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

$$W = U I t$$

watts-heure volts ampères heures

En particulier, on a l'équivalence suivante :

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

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

Le tableau I de la page 8 donne la valeur de la puissance P pour les cas d'alimentation les plus courants.

Le tableau II des pages 10 à 12 indique comment on peut mesurer la puissance P d'un appareil électrothermique à résistance à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre ou d'un wattmètre.

Remarque. — La chaleur est donc produite par la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique. Celle-ci est ensuite transmise aux matières à traiter par les trois modes habituels de transmission :

- Conduction ;
- Radiation ;
- Convection (fig. 3, p. 15).

(1) Dans les appareils électrothermiques « à résistance », le facteur de puissance (cos φ) est égal pratiquement à l'unité.

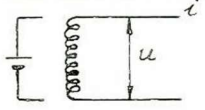
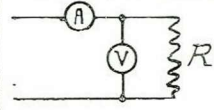
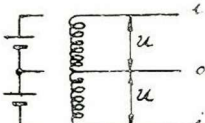
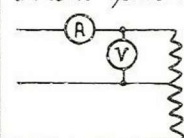
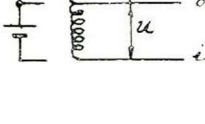
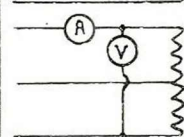
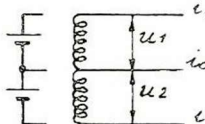
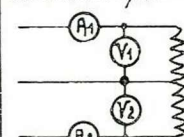
<i>Mesure de la puissance d'un appareil électrothermique à résistance (cos φ = 1)</i>		
<i>Circuit d'alimentation (Côté secteur)</i>	<i>Circuit d'utilisation (Côté abonné : appareil)</i>	<i>Valeur de la puissance P</i>
<i>Courant continu à 2 fils ou courant alternatif monophasé à 2 fils</i>		
		UI ou W
<i>Courant continu à 3 fils ou courant alternatif monophasé à 3 fils.</i>		
<i>Circuits équilibrés</i>		
		<i>1^{ère} méthode :</i> $2 UI$ ou $2 W$.
		<i>2^{ème} méthode</i> UI ou W
<i>Circuits non équilibrés</i>		
		$U_1 I_1 + U_2 I_2$ ou $W_1 + W_2$
<p>R = Résistance de l'appareil. E = Impédance d'équilibrage du fil fin (voltmètre ou wattmètre) V = Voltmètre ou bobine fil fin du wattmètre. A = Ampèremètre ou bobine gros fil du wattmètre. U, E = Lecture au voltmètre I = Lecture à l'ampèremètre, W = Lecture au wattmètre</p>		

Tableau II-a

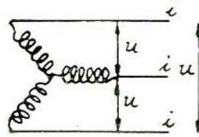
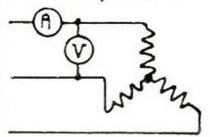
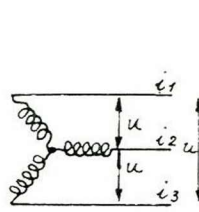
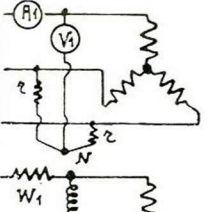
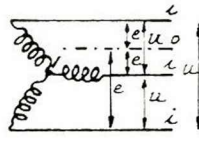
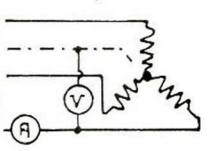
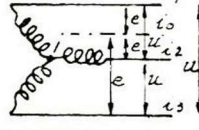
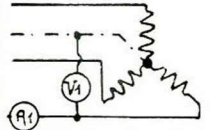
Circuit d'alimentation (Côté secteur)	Circuit d'utilisation (Côté abonné appareil)	Valeur de la puissance P
<u>Courant triphasé à 3 fils (montage triangle ou étoile sans neutre)</u>		
	<p><u>Circuits équilibrés</u></p> 	$U_l \sqrt{3}$ ou $2W$
<u>Circuits non équilibrés</u>		
	<p><u>Circuits non équilibrés</u></p> 	<p>1^{ère} méthode création d'un point neutre artificiel</p> $U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3$ <p>ou</p> $W_1 + W_2 + W_3$
<u>2^{ème} méthode dite des deux wattmètres</u>		
$W_1 + W_2$		
<u>Courant triphasé à 4 fils (montage étoile avec neutre)</u>		
<u>Circuits équilibrés</u>		
		$3EI$ ou $3W$
<u>Circuits non équilibrés</u>		
		$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3$ <p>ou</p> $W_1 + W_2 + W_3$
<p><small> lorsqu'il est nécessaire de faire plusieurs lectures, les lettres U, E, I et W portent les indices 1, 2, 3, 4</small></p>		

Tableau II-b

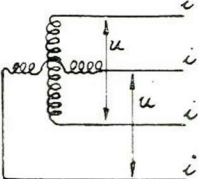
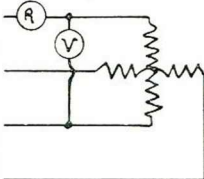
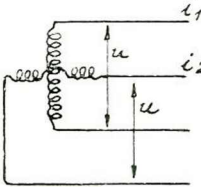
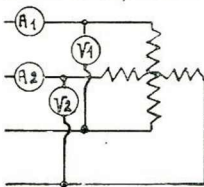
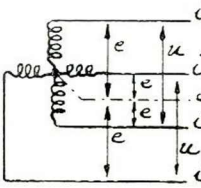
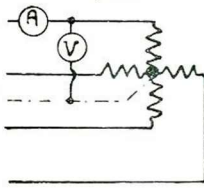
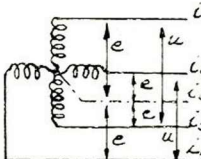
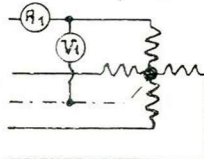
Circuit d'alimentation (côté secteur)	Circuit d'utilisation (côté abonné : appareil)	Valeur de la puissance P
<u>Courant diphasé à 4 fils.</u>		
<u>Circuits équilibrés.</u>		
		$2 UI$ ou $2 W$
<u>Circuits non équilibrés</u>		
		$U_1 I_1 + U_2 I_2$ ou $W_1 + W_2$
<u>Courant diphasé à 5 fils (avec neutre)</u>		
<u>Circuits équilibrés.</u>		
		$4 EI$ ou $4 W$
<u>Circuits non équilibrés</u>		
		$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_4 I_4$ ou $W_1 + W_2 + W_3 + W_4$

Tableau II-c

* * *

Qualités optima des résistances

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

La *résistivité* ρ doit être relativement élevée (limitation de l'intensité à une valeur raisonnable, réduction de l'encombrement du corps de chauffe), eu égard toutefois aux conditions d'encombrement, de résistance mécanique, de prix, etc.

Le *coefficient de température* α doit être faible, positif si possible et sensiblement constant pour toute l'échelle d'utilisation du four (suppression ou atténuation des variations importantes d'intensité, facilité du réglage, etc.).

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

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

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

Le *coefficient de dilatation* doit être faible.

La *conductibilité thermique* doit être réduite (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) : par exemple gaz formant l'atmosphère naturelle ou artificielle d'un four ou provenant des corps en traitement, matière constituant les supports des corps de chauffe, etc.

Les éléments doivent avoir une *longue durée de service*. Ils doivent être d'un *prix raisonnable*.

Les qualités précédentes ne sont pas limitatives, c'est dire que 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. (Ceci explique les déboires qu'ont rencontré certains industriels qui, frappés de la simplicité — apparente — des fours électriques, en ont construit de leur propre chef sans être suffisamment au courant de la question.)

Conséquences :

Entre deux devis de constructeurs très sérieux, il peut y avoir des différences sensibles ; plutôt que de s'en étonner, il faut en chercher les causes dans des détails de construction, dont l'importance est souvent capitale.

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

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

*
* *

Classification des résistances

On peut distinguer : les *résistances métalliques*, les *résistances non métalliques* (carbone ; graphite ; oxycarbure de silicium : globar, silit, savoie, etc.), auxquelles il faut ajouter les *bains de sels* (lorsque le bain sort de résistance, c'est-à-dire lorsqu'il est traversé directement par le courant). Nous ne parlerons ci-après que des résistances métalliques (1).

*
* *

Nature des résistances métalliques

On a employé autrefois et on continue encore parfois à employer :

1° Des métaux communs (fer, fonte, cuivre) pour les faibles températures ;

(1) Les résistances non métalliques et les fours à bains de sels feront l'objet de notices spéciales.

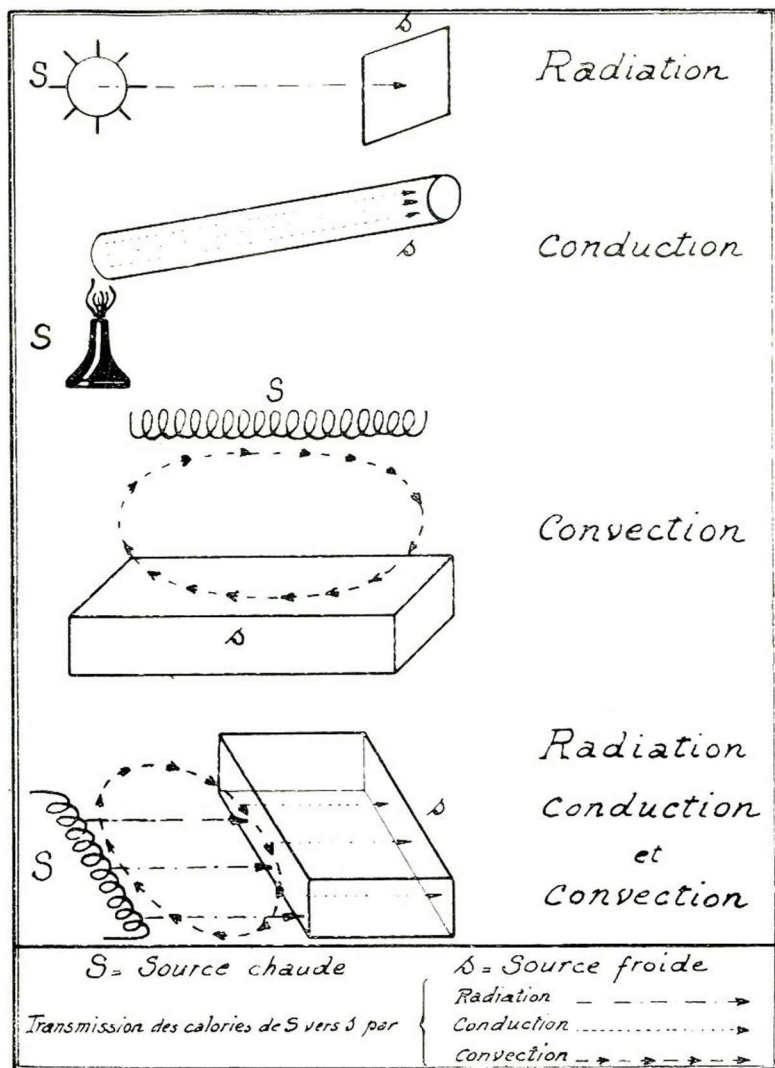


Fig. 3

Tableau III

Désignation	Composition de l'alliage p. 100	Résistivité ρ au voisinage de 0-20° C $\Omega \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^2$	Densité	Température de fusion °C	Coefficient de température moyen α entre 0 et les valeurs usuelles de la température
Argent		0,01468	10,50	960	4,0 · 10 ⁻³
Cuivre		0,01561	8,92	1 080	4,2 -
Aluminium		0,0256	2,56	650	4,2 -
Zinc		0,0575	7,19	412	4,0 -
Fer		0,0907	7,84	1 575	6,2 -
Nickel		0,1232	8,90	1 452	6,0 -
Platine		0,1092	21,50	1 755	3,67 -
Tungstène		0,055	18,70	2 974	4,5 -
Molybdène		0,057	9,01	2 550	3,3 -
Laiton		0,0697	6,40-7,30	—	—
Maillechort		0,30	8,30-8,60	—	2,7 · 10 ⁻⁴
Manganin		0,4668	8,15	—	0,2 -
Chromin	env. 30 Ni + 5 Cr + 65 Fe	0,95	7,96	1 415	6,2 -
RNC 1	env. 35 Ni + 10 Cr + Fe	1,00	8,05	1 450	3,2 -
NYO	env. 45 Ni + 23 Cr + Fe	1,09	—	—	1,8 -
RNC 2	env. 60 Ni + 11 Cr + Fe	1,11	8,25	1 450	1,2 -
Tophet C	env. 60 Ni + 15 Cr + 25 Fe	1,12	8,20	1 350	1,3 -
Chromel C	env. 60 Ni + 16 Cr + 23 Fe	1,12	8,24	1 405	1,5 -
Glowray	env. 65 Ni + 15 Cr + 20 Fe	1,06	8,27	1 400	1,4 -
Niehrome	env. 60 Ni + 15 Cr + Fe	1,12	8,25	1 350	1,7 -
BS Cr/Ni/Fe	env. 70 Ni + 20 Cr + 8 Fe	1,11	8,27	1 395	1,1 -
NYS	env. 75 Ni + 23 Cr	1,12	—	—	0,75 -
BS Cr/Ni	env. 77 Ni + 20 Cr + 2 Mn	1,10	8,39	1 405	0,9 -
Niehrome V	env. 80 Ni + 20 Cr	1,08	8,41	1 400	1,3 -
RNC 3	env. 80 Ni + 18 Cr	1,02	8,45	1 475	0,6 -
Uranus 1	env. 82 Ni + 14 Cr	1,00	8,50	1 450	1,9 -
Tophet A	env. 80 Ni + 20 Cr	1,08	8,42	1 390	1,0 -
Chromel A	env. 80 Ni + 20 Cr	1,08	8,40	1 405	0,8 -
Brightray	env. 80 Ni + 20 Cr	1,03	8,35	1 375	0,5 -
Cekas II	sans fer	1,09	8,45	1 400	0,6 -
RCA 33	Fe + Cr + Al	1,38	7,20	1 500	0,5 -
RCA 44	Fe + Cr + Al	1,40	7,10	1 500	0,6 -
Kanthal A ₁	env. 62 Fe + 23 Cr + 5 Al + + 2,5 Co + divers	1,45	7,10	1 530-1 549	0,6 -
Kanthal A	env. 69 Fe + 23 Cr + 4,5 Al + + 2 Co + divers	1,35	7,20	1 530-1 549	0,8 -
Kanthal D	env. 72 à 74 Fe + 20 à 22 Cr + + 4 Al + 1,5 Co + divers	1,30	7,25	1 530-1 540	1,0 -
Mégapyr	env. 65 Fe + 30 Cr + 5 Al	1,44	7,10	—	0,3 -
Cekas-extra	Fe + Cr + Al	1,40	7,00	—	0,5 -
Charbon lampes incandescence		39	—	—	—
Carbone amorphe Graphite		45 à 70 / 8 à 40 (dens. réelle)	1,80 à 2,25	—	-2 à -4 -
Oxycarbure de sil- licium		9 à 30	2,2	—	—

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

2° Des alliages à base de fer et de nickel (éventuellement avec adjonction de chrome ; exemple : chromin) ou de cuivre et de nickel (constantan, etc.) pour des températures pouvant atteindre en général 500° C au maximum.

Pratiquement (fig. 5-a, p. 21), on emploie surtout et de plus en plus (en dehors des résistances non métalliques) :

3° Pour les températures atteignant au maximum 1 000 à 1 100° C des alliages à base de nickel et de chrome ;

4° Pour les températures de l'ordre de 1 000 à 1 280-1 300° C, des alliages à base de fer, de chrome et d'aluminium ;

5° Pour des températures plus élevées et uniquement pour des fours de petite puissance, des métaux précieux (ex. : tungstène, molybdène, platine).

Remarque. — Deux températures délimitent les diverses catégories de fours électriques industriels à résistance : 500 et 1 000° C.

Jusqu'à 500° C, on peut construire des mouffles métalliques, car il n'y a pas lieu en principe de craindre l'oxydation.

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

Au-dessus de 1 000° C, on ne peut plus, en principe, utiliser de résistances métalliques (sauf toutefois pour les petits fours : emploi de métaux précieux — et pour certains fours ou portions de fours : emploi d'alliages à base de fer, de chrome et d'aluminium jusque vers 1 280° C. On équipe alors les fours avec des résistances non métalliques, ou bien on emploie des bains de sels à chauffage direct.

A) Alliages « Nickel-chrome »

Nature. — Ces alliages (obtenus au four électrique : élaboration au four à arc ou au four à induction à haute fréquence, traitements thermiques au four à résistance) sont de beaucoup les plus utilisés. On distingue :

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

Ces alliages ne sont jamais utilisés au-delà de 900° C ; pratiquement, on les utilise surtout pour des températures beaucoup plus basses ;

2° Les *alliages à forte teneur* ou *alliages binaires de nickel et de chrome* qui contiennent sensiblement 80 p. 100 de Ni et 20 p. 100 de Cr, métaux auxquels il y a lieu d'ajouter quelques autres corps,

Tableau IV

Diamètre mm	Section mm ²	Poids par mètre g	Long. par kg m	Résistance en ohms pour 100 m			
				0° C	300° C	600° C	1 000° C
<i>Alliage = env. 35 Ni + 10 Cr + 55 Fe (température limite 700° C)</i>							
0,10	0,007854	0,0632	15 822	12 700	14 240	15 310	
0,50	0,1963	1,5802	632	510	570	615	
1	0,7854	6,322	158	126	140	152	
1,5	1,7671	14,225	70,3	56,4	63,6	68,8	
2	3,1416	25,289	39,5	31,7	35,6	38,5	
2,5	4,9087	39,525	25,3	20,2	22,6	24,6	
3	7,0686	56,913	17,3	14	15,8	17,2	
4	12,5664	101,288	9,88	7,9	8,9	9,6	
5	19,6349	158,021	6,32	5,10	5,7	6,13	
<i>Alliage = env. 60 Ni + 11 Cr + 29 Fe (température limite 1 000° C)</i>							
0,10	0,007854	0,06479	15 434	14 130	14 830	15 368	15 760
0,50	0,1963	1,6194	617	565	594	615	631
1	0,7854	6,479	154,34	141	148	153	157
1,5	1,7671	14,578	68,63	62,8	65,9	68,3	70
2	3,1416	25,918	38,59	35,3	37,07	38,4	39,4
2,5	4,9087	40,507	24,69	22,6	23,7	24,6	25,2
3	7,0686	58,327	17,14	15,7	16,4	17	17,5
4	12,5664	103,70	9,64	8,82	9,26	9,5	9,85
5	19,6349	161,94	6,17	5,65	5,94	6,15	6,34
<i>Alliage = env. 80 Ni + 18 Cr (température limite 1 100° C)</i>							
0,10	0,007854	0,06636	15 069	12 987	13 398	13 643	13 916
0,50	0,1963	1,8594	603	519	536	546	553
1	0,7854	6,637	151	130	134	136	138
1,5	1,7671	14,932	67	57,7	59,5	60,6	61,5
2	3,1416	26,546	37,7	32,5	33,5	34,1	34,6
2,5	4,9087	41,478	24,1	20,8	21,4	21,8	22,1
3	7,0686	59,730	16,74	14,4	14,9	15,2	15,4
4	12,5664	106,186	9,42	8,12	8,37	8,53	8,64
5	19,6349	165,915	6,03	5,19	5,36	5,46	5,53

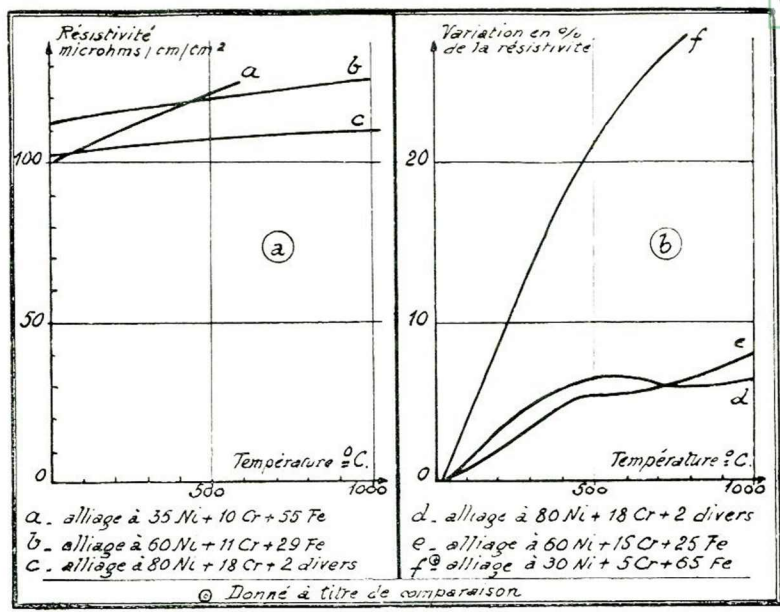


Fig. 4

(2 p. 100 au maximum) : Mn et Mg (qui, en faible proportion, facilitent le laminage et le tréfilage), Si, C, Fe. Ces alliages peuvent être utilisés jusqu'à 1 100° C, mais généralement on en limite l'emploi aux environs de 980-1 000° C.

Caractéristiques.

Le tableau III de la page 16 donne les caractéristiques d'un certain nombre de métaux et des alliages ou autres substances utilisés comme « résistances ». Ces indications sont complétées, à titre d'exemples, par les nombres du tableau IV de la page 18 (qui est traduit graphiquement par la fig. 4-a) et par les courbes de la figure 4-b, courbes et nombres relatifs à des alliages de deux fabricants.

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

Densité de l'ordre de 8 à 8,5 ;

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

Coefficient de température α moyen positif et de faible valeur : de l'ordre de 0,0001 (ou moindre) pour la zone habituelle d'utilisation (0 à 1 000° C) ;

Température de ramollissement vers 1 300° C ;

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

Température maximum d'utilisation (pour les nickel-chrome à 80/20) de 1 000° C (exceptionnellement, température plus élevée). Les autres caractéristiques (en particulier le coefficient de dilatation) intéressent surtout les constructeurs.

Forme.

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

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

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 : mono, tir ou diphasé) avec obligation ou non d'équilibrer les charges ;

Tension d'alimentation ;

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

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

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

Résistance mécanique des fils et rubans ;

Remplacement éventuel des éléments ;

Prix de revient des éléments (fig. 5-d).

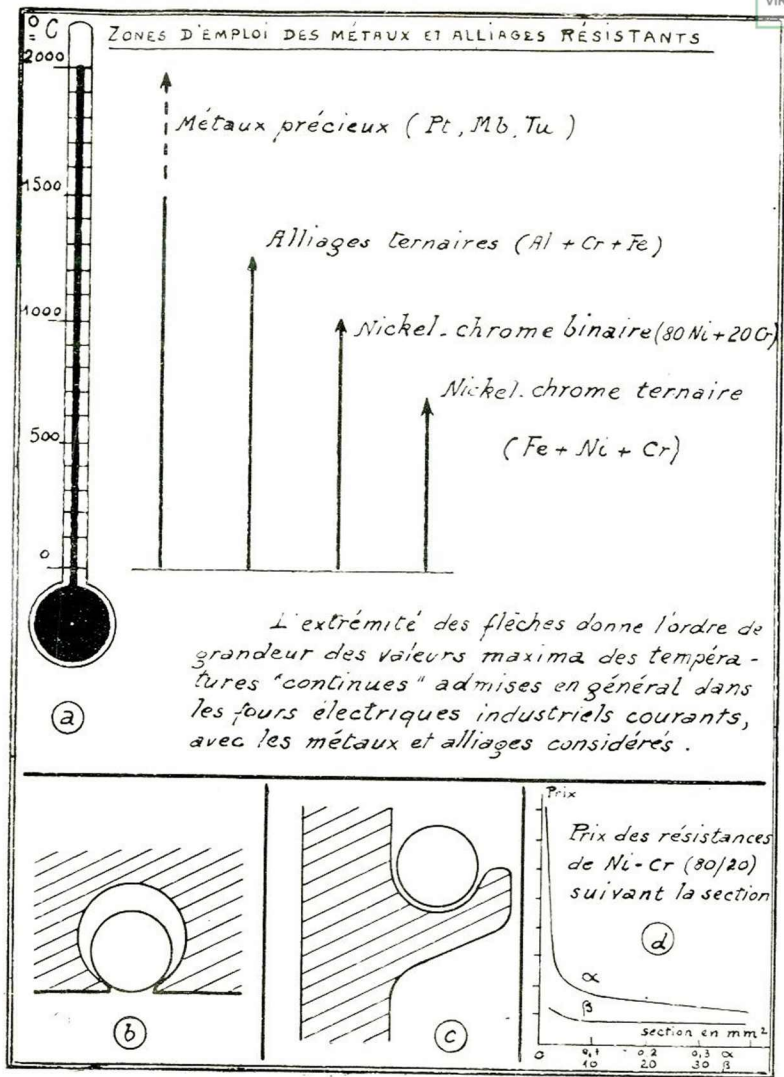


Fig. 5

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

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

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

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

Les fils peuvent être employés (fig. 6 à 8) soit tendus, soit tissés (faibles températures, trame d'amiante), soit boudinés (cas le plus fréquent des fours).

Ils peuvent être montés en éléments nus (fig. 6 à 8) (cas habituel des fours) ou en éléments protégés (fig. 11, chauffage des liquides par thermo-plongeurs par exemple).

Les éléments nus, généralement en fil boudiné (fig. 5-*b* et *c*), sont le plus souvent placés dans des briques (qu'ils enveloppent plus ou moins) ou dans des pièces isolantes de formes appropriées ou montés sur des supports convenables. Dans certains cas, si le fil a une grosse section, il est disposé sous forme de tiges rectilignes ou d'épingles à cheveux (fig. 7-*b*) dont le couplage est facile à réaliser.

Les éléments protégés (1) (isolant électrique constitué par exemple par du mica ou par de la magnésie) sont de plus en plus employés pour l'équipement des petits appareils (fig. 11).

Les rubans, bandes et barres de section rectangulaire et à bords généralement arrondis s'emploient, soit à plat, soit montés de champ sur des supports appropriés (fig. 9 et 10).

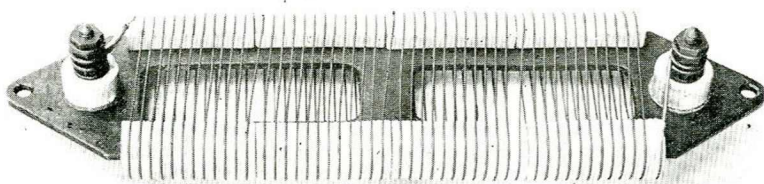
Remarque. — Il paraît nécessaire d'insister sur le point suivant :

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

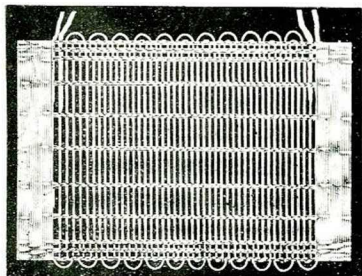
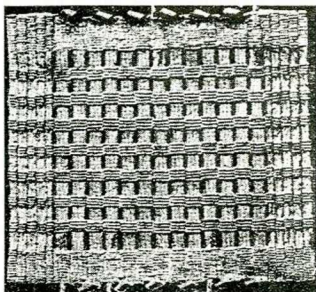
Durée des résistances.

La longévité des éléments est une donnée capitale. L'incidence des frais d'entretien sur le bilan économique d'un appareil électrothermique est, en général, négligeable. Encore faut-il que les résis-

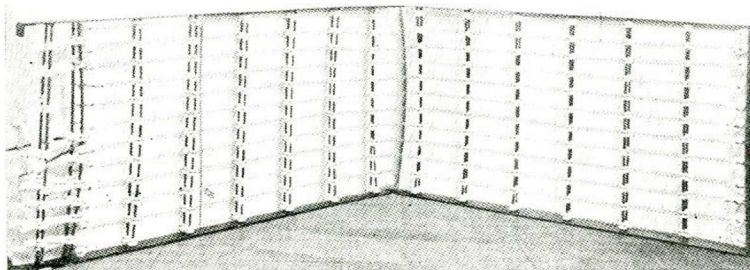
(1) Ces éléments feront l'objet d'une notice spéciale.



a. Élément chauffant (étuve, réchauffeur d'air)



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



d. Élément chauffant (four de boulangerie industrielle)

Fig. 6

tances, qui en constituent une partie 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 d'une couche d'oxyde non poreuse (ce qui protège le métal intérieur), isolante (ce qui permet, dans certains cas très particuliers, de placer les spires jointivement ou tout au moins très près les unes des autres, si la tension électrique entre spires voisines est suffisamment faible) et adhérente (ce qui augmente la valeur de la protection par la pellicule superficielle d'oxyde).

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

L'effet de cette oxydation lente est de diminuer la section du fil ou de la bande ou du ruban constituant l'élément chauffant, donc d'augmenter la résistance électrique R , et par suite de réduire

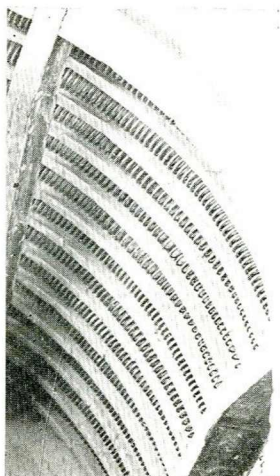
la puissance $\left(P = \frac{U^2}{R} \right)$ que l'élément peut dissiper. En cas de rupture ou de détérioration partielle de l'élément, on peut d'ailleurs le reconstituer dans certains cas en réunissant les parties saines par une réparation simple que les constructeurs peuvent facilement exécuter (en général, il en résulte une légère réduction de la valeur de la résistance $R = \rho \cdot \frac{l}{s}$).

2) Détérioration accidentelle.

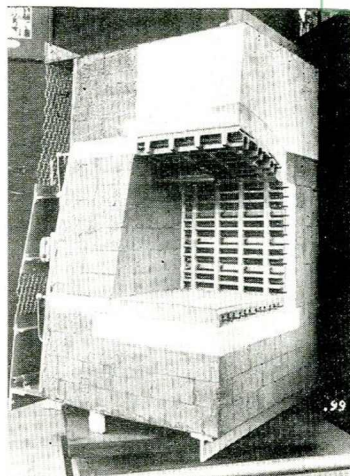
Une telle détérioration peut provenir soit d'un défaut de fabrication ou de construction, soit d'un défaut dans l'utilisation de l'appareil.

a) **Défaut de fabrication ou de construction.** — Le défaut visé peut être :

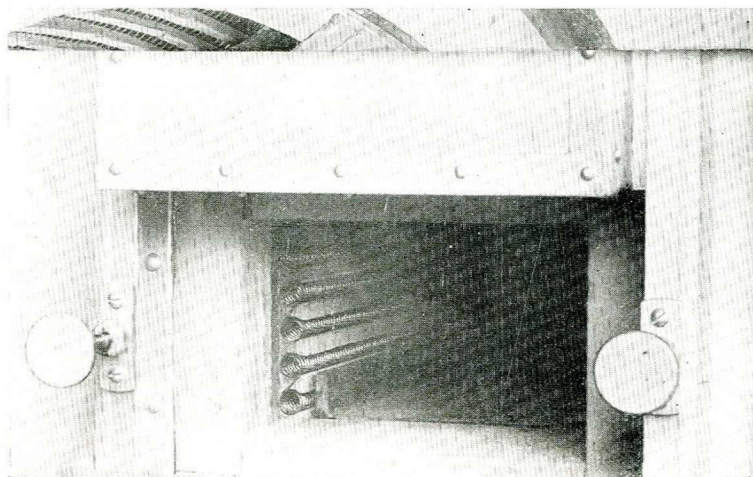
Soit le manque d'homogénéité du métal ; ce défaut, d'ailleurs exceptionnel, peut être d'origine métallurgique (soufflure, paillette, impureté) ou mécanique (section irrégulière : résistance R plus éle-



a. Vue partielle intérieure
d'un four vertical
de traitement thermique



b. Maquette d'un four équipé
avec des résistances en épingle à cheveux



c. Vue intérieure d'un petit four à sole

vée aux points faibles, donc augmentation de RI^2 et par suite de la température en ces points) ;

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

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

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

Soit enfin le conditionnement défectueux des différentes parties du four.

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

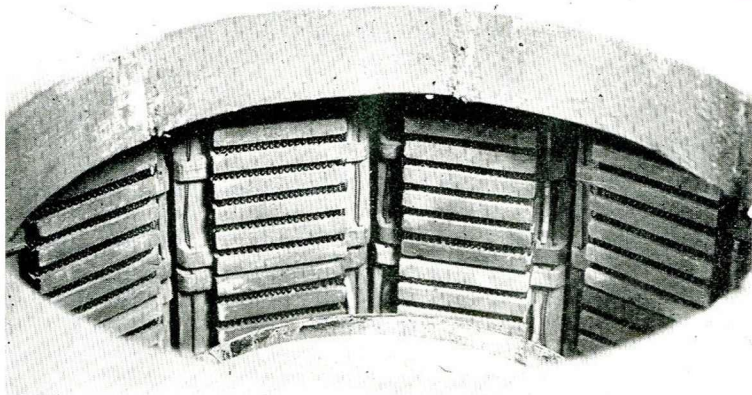
La valeur trop élevée de la tension d'alimentation entraînant d'une part un échauffement trop rapide des éléments $\left(P = \frac{U^2}{R} \right)$ et surtout des réfractaires voisins pendant la période de mise en température (double action calorique et métallique sur la couche protectrice d'oxyde), et d'autre part une surchauffe exagérée bien que, pratiquement, il y ait en général une légère auto-compensation due à l'augmentation de R avec la température ;

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

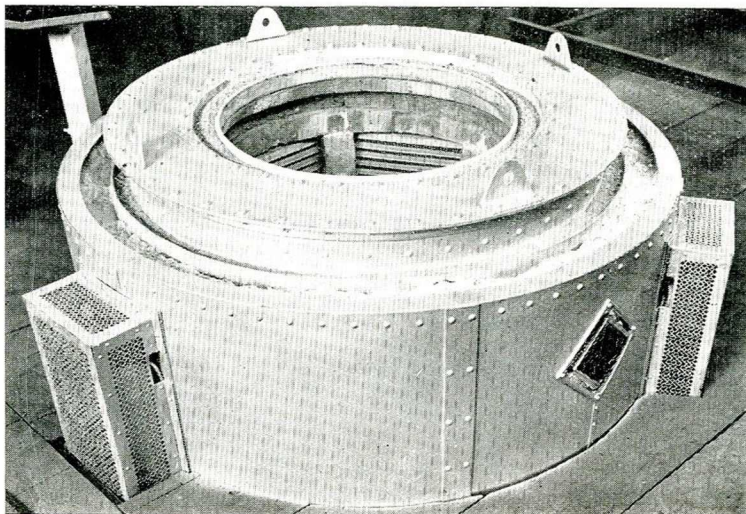
Le choix défectueux de l'emplacement des thermo-couples et en particulier de leurs soudures chaudes (par ex. : influence sur la soudure chaude, d'une pièce froide introduite dans un four), ou la trop grande inertie thermique de ces appareils ;

La marche défectueuse d'un régulateur automatique (rare avec les bons appareils ; on cherche parfois à y pallier — avec un résultat plus ou moins sûr — par l'emploi de fusibles caloriques judicieusement placés) ;

La nature de l'atmosphère : gaz échappés de la matière en traitement ou provenant d'une réaction chimique, vapeurs. Ces gaz sont rarement néfastes. Signalons toutefois l'action des vapeurs de soufre (SO^2 , SH^2 , SO^3 , SO^4 H^2) et d'huile et aussi d'aluminium et des gaz de cémentation et de cyanuration. On peut y remédier, si nécessaire, par des dispositions simples et appropriées que les constructeurs indiquent. Le four électrique — c'est un *avantage*



a, Vue intérieure d'un four vertical de trempé



b, Four de recuit de fils en couronnes (marmite enlevée)

Fig. 8

capital — permet de réaliser dans la chambre de chauffe une *atmosphère quelconque* (oxydante, neutre ou réductrice), voire même le vide pour certains appareils spécialement conçus ;

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

Pratiquement, il faut attacher une grosse importance à la quantité de chaleur dissipée par unité de surface de l'élément chauffant, quantité exprimée sous le nom de puissance spécifique et généralement prise de l'ordre de 0,5 à 2 W par cm^2 , tout au moins pour les fours usuels (par ex. 0,4 à 0,6 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$ pour $1\ 100^\circ\text{C}$; 0,6 à 0,8 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$ pour $1\ 000^\circ\text{C}$; 1 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$ pour 900°C ; 2 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$ pour $700\text{-}800^\circ\text{C}$; ces nombres, toutefois, ne sont donnés qu'à titre indicatif ; ils ne sont pas absolus).

3) Durée pratique.

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

Mais, dans la pratique, et sauf cas exceptionnels, les résistances ont une très longue durée.

Nous connaissons par exemple des fours de cémentation ou de traitements thermiques fonctionnant à $900\text{-}925^\circ\text{C}$ d'une manière presque continue, depuis environ dix ans et dont les résistances n'ont fait l'objet d'aucun incident.

Pratiquement, l'entretien des résistances par les fours usuels de construction correcte jusqu'à $950\text{-}1\ 000^\circ\text{C}$ est négligeable.

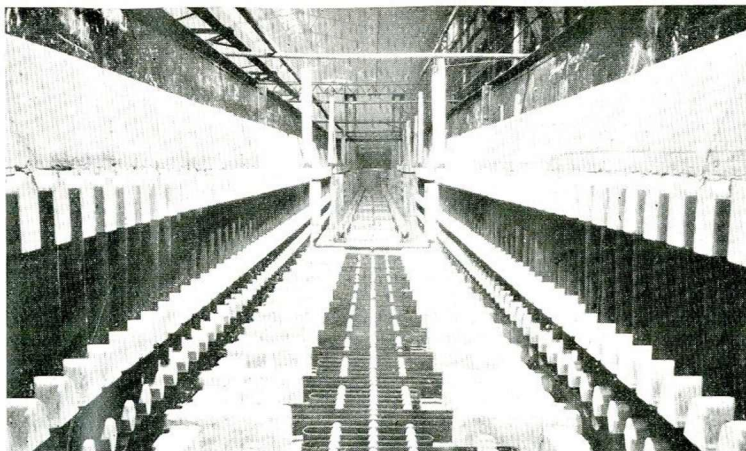
*
* *

B) Alliages « fer-chrome-aluminium »

Ces alliages sont à base de fer, de chrome et d'aluminium. Ils contiennent environ 25 à 30 p. 100 de chrome, 2 à 5 p. 100 d'aluminium, le reste étant constitué par du fer (et également d'autres métaux en faible proportion, par ex. du cobalt).

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

Ils sont protégés par une couche superficielle d'oxyde. Ils résistent beaucoup mieux que les nickel-chrome à l'attaque des gaz sulfureux (H^2S et SO^2) et également à l'oxydation. Ils ne s'accroissent pas toutefois de toutes les substances (en particulier, se



(Photo Draeger)

a, Vue intérieure d'un four de traitement thermique en construction



b, Vue intérieure d'un four à bain de sels en construction

Fig. 9

méfier des atmosphères réductrices et de la vapeur d'eau, observer certaines règles pour leur emploi dans les fours de cémentation ou de fusion d'aluminium, choisir convenablement les réfractaires supportant les résistances). Ils cristallisent à chaud (fragilité).

Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

Valeur élevée de la résistivité ρ (en moyenne 1,4 ohms par mètre et par millimètre carré au lieu de 1,1 pour les nickel-chrome à 80/20) ;

Faible valeur du coefficient de température α (moyenne de 0,3 à $0,5 \cdot 10^{-4}$ entre 0 et $1\ 100^{\circ}$ C).

Densité δ relativement faible (7 à 7,2 contre 8-8,5 pour le nickel-chrome à 80/20) : il faut tenir compte des valeurs relatives de ρ et de δ dans la comparaison des prix de revient d'un élément chauffant en nickel-chrome et d'un élément en fer-chrome-aluminium.

Coefficient de dilatation relativement élevé (il faut y prendre garde dans la construction des fours et dans la disposition des éléments).

Dans la pratique courante, les « fer-chrome-aluminium » sont surtout employés pour l'équipement des fours ou portions de fours où la température de travail doit atteindre de 1 000 à 1 280° C.

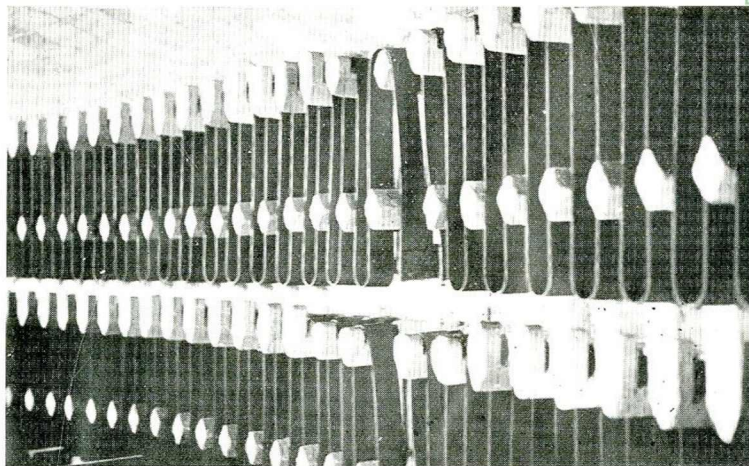
Les alliages actuellement utilisés (sous forme de fils, de rubans ou de bandes) sont les suivants : RCA 33 et RCA 44 (France) ; kanthal A, A₁ et D (Suède) ; mégapyr et cékas-extra (Allemagne) ; se reporter au tableau III, de la page 16.

*
* *

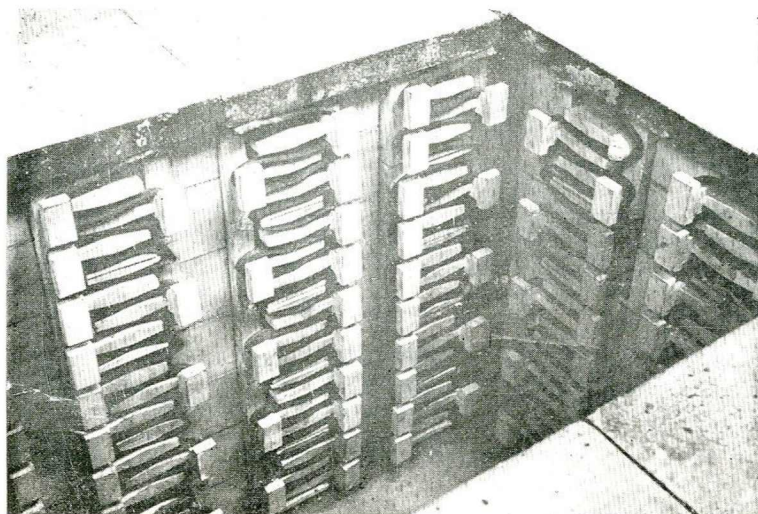
C) Métaux précieux

Ces métaux (nickel, platine ; pratiquement molybdène et tungstène) s'altèrent vite à haute température, surtout en présence de vapeur d'eau. On les protège par une atmosphère artificielle d'azote, plus généralement d'hydrogène. On les utilise, soit sous forme de fils bobinés sur un moufle en alundum, soit sous forme de feuilles enroulées. Leurs points de fusion étant élevés (1 452° C pour le nickel, 1 775° C pour le platine, 2 550° C pour le molybdène, 2 974° C pour le tungstène), c'est le réfractaire qui généralement limite la température d'emploi. On peut ainsi atteindre 1 700 à 2 000° C si besoin est.

Le coefficient de température α est élevé (voir tableau III, page 16) ; les fours correspondants sont par suite munis d'un démar-



a. Vue intérieure (piédroit) d'un four de traitement thermique



b. Vue intérieure d'un four à bain de sels (cuve enlevée)

reur (grande variation de la résistivité ρ en fonction de la température). Le molybdène s'emploie de préférence au tungstène, parce que plus facile à travailler.

* * *

Remarques

Répartition des éléments chauffants et souplesse du chauffage électrique.

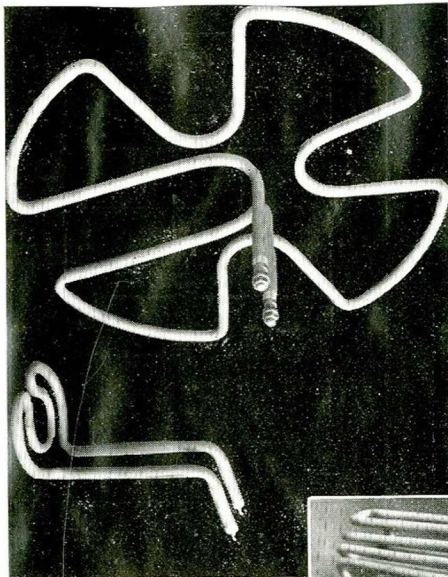
L'effet Joule se manifeste en tout point des éléments chauffants. Or ceux-ci peuvent épouser la forme de la chambre de chauffe et être répartis au gré du constructeur. Il s'ensuit que l'on peut fournir en un point quelconque une quantité de chaleur déterminée *a priori* et même variable dans le temps.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

Importance de la tension.

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

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

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

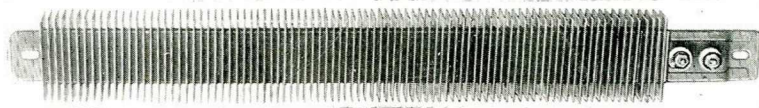
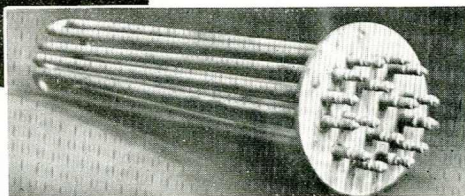


b, Éléments chauffants tubulaires

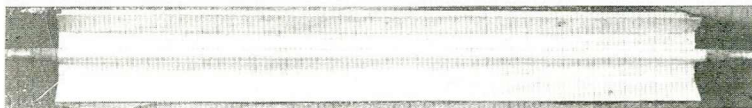


a, Élément plongeant pour chauffage de liquides

c, Élément à immersion pour réchauffage d'huile →



d, Élément à ailettes



e, Élément à ailettes

Fig. 11. — Éléments protégés

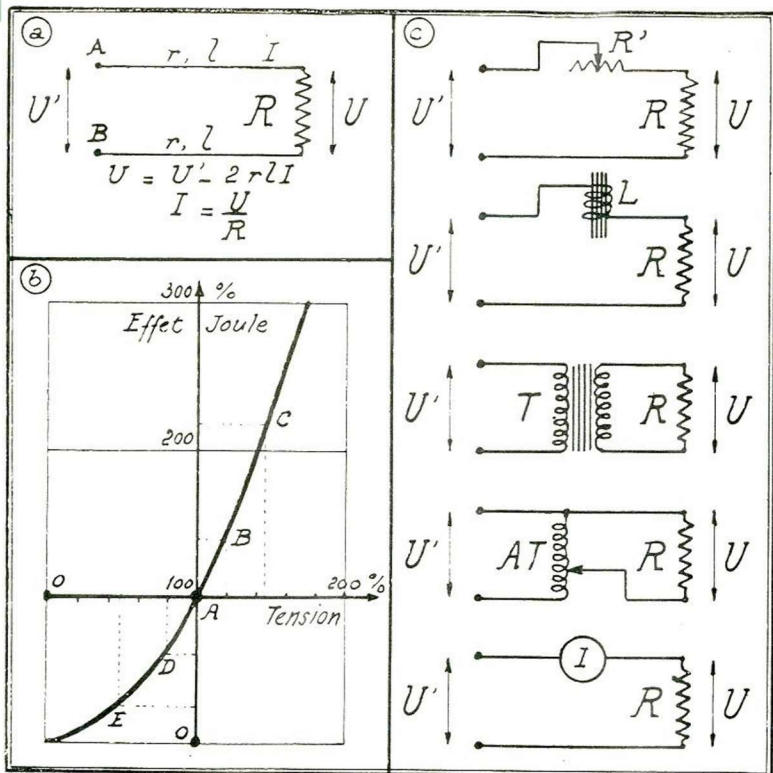


Fig. 12

pas la température désirée et le traitement ne pourra pas être réalisé ;

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

1) Période de mise en température. — La résistance $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ varie avec la température t . La chaleur $Q = 0,24 RI^2 t = 0,24 \frac{U^2}{R} t$, développée au début pendant un intervalle de temps t suffisamment petit pour que R puisse être considérée comme constante, servira 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 .

$$0,24 \frac{U^2}{R} l = ls dc\theta$$

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

$$\theta = 0,24 \frac{l}{Rlsdc} U^2, \text{ qui montre que l'élévation de tempéra-}$$

ture 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 auto-compensation due à la transmission de la chaleur aux autres éléments constitutifs du four et à la petite variation de R ($\alpha > 0$), donc de P , avec la température ;

2) *Période de marche normale.* — Une surtension permanente sera d'autant plus à craindre, toutes choses égales d'ailleurs, que le coefficient de température 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 usager. Les constructeurs sérieux évitent l'effet d'une tension insuffisante ou exagérée par le choix de la puissance (plus élevée qu'il n'est nécessaire) et des réfractaires ou par des dispositifs appropriés de réglage de la température et de la puissance.

La figure 12-b montre comment varie l'effet Joule en fonction de la tension :

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

Réglage de la puissance.

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

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

a) *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 sera généralement pas pour les fours industriels alimentés en courant alternatif ;

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

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

d) *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 ») de tout ou partie des éléments chauffants, couplage série-parallèle (rapport des puissances : 1 à 4), couplage étoile-triangle (rapport : 1 à 3).

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

*
* *

Conclusion

En résumé : le chauffage électrique industriel s'est considérablement développé au cours des dernières années. Ce développement est dû en partie à l'existence des alliages à base de nickel et de chrome, tout spécialement des « nickel-chrome à 80/20 » que l'on emploie couramment jusqu'aux environs de 1 000° C. Judicieusement utilisés, dans des fours correctement conçus et réalisés, ces alliages ont une très longue durée. De sorte que, pratiquement, l'entretien des résistances électriques est le plus souvent négligeable.

La mise au point, plus récente, de résistances à base de fer, d'aluminium et de chrome, a permis d'atteindre, dans des conditions satisfaisantes de durée, des températures plus élevées (jusque vers 1 280-1 300° C).

Au-dessus de cette dernière température, on doit avoir recours actuellement soit aux résistances non métalliques (en particulier pour les fours industriels), soit à des métaux assez coûteux (tungstène, molybdène, platine) pour des fours de petites dimensions (fours de laboratoires universitaires ou industriels).



XI. 6^e 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)