

**LES
DIFFÉRENTS MODES
DE CHAUFFAGE
ÉLECTRIQUE**

Par R. GAUTHERET

**EDITE PAR
LA SOCIÉTÉ POUR LE DÉVELOPPEMENT
DES APPLICATIONS DE L'ELECTRICITÉ APEL**



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

Les différents modes de chauffage électrique

Par R. GAUTHERET

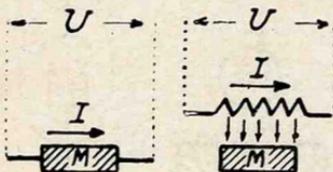
SOMMAIRE

CHAUFFAGE PAR RÉSISTANCE

Loi de Joule = application d'une tension aux extrémités de la résistance

sans résistor

avec résistor

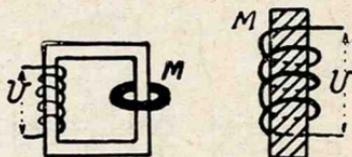


CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Loi de Joule = création par induction d'une force électromotrice dans la résistance

avec circuit magnétique fermé

sans circuit magnétique fermé



PAGES

Avant-propos 5

A) Chauffage par résistance 8

Loi de Joule $P = RI^2$.

Nature de la résistance.

Valeur de la résistance.

Réglage de l'effet Joule.

B) Chauffage par induction 29

Rappel de quelques notions d'électromagnétisme.

Principe du chauffage par induction.

Principaux modes de chauffage par induction:

Fours à circuit magnétique fermé (BF)

Puissance. Effet de pincement. Brassage.

Différents types de fours { Fours à canal horizontal.
Fours à canal submergé.

Fours sans circuit magnétique fermé (HF en principe)

Effet de peau. Puissance. Brassage.

Production des courants à haute fréquence (éclateurs aternateur, ampe triode).

Divers types d'appareils { à induction directe (HF);
à induction indirecte (HF);
à induction mixte (HF);
à secondaire magnétique (BF).

Fours mixtes (à éléments autorégulateurs) (BF)

Chauffage à très haute fréquence (THF)

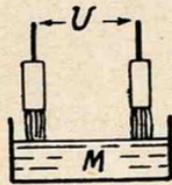
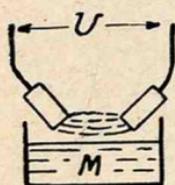
SOMMAIRE (suite)

CHAUFFAGE PAR ARC

Propriétés calorifiques de l'arc
(loi de Joule non apparente)

arc indirect

arc direct

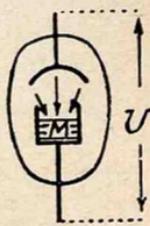
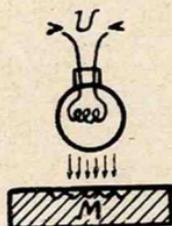


CHAUFFAGE PAR RAYONS SPÉCIAUX

Propriétés calorifiques de certains rayons

rayons infrarouges

rayons cathodiques



PAGES

C) Chauffage par arc	61
Rappel de la théorie de l'arc.	
Puissance de l'arc.	
Diverses sortes d'arcs { arc indirect ou libre ; arc direct (arc sur métal).	
Fours métallurgiques.	
Soudure à l'arc.	
Oxydation de l'azote.	
D) Chauffage par rayons infrarouges	87
Rappel de la théorie des rayonnements.	
Production des rayons infrarouges.	
Absorption des rayons infrarouges.	
E) Chauffage par rayons cathodiques	94
F) Fours mixtes	95
Conclusion	95
Tableau général des divers modes de chauffage électrique.	
Tableau des températures.	

Liste des brochures APEL traitant du chauffage électrique industriel en général (1)

1) **Principes généraux.**

Les divers modes de chauffage électrique (présente brochure).

2) **Chauffage par résistance.**

Les résistances métalliques.

Les résistances non métalliques et leurs applications industrielles.

Les éléments protégés et leurs applications industrielles.

Les fours électriques à résistances.

Les divers types de fours à résistances.

Comment choisir et commander un four à résistances.

Comment installer, réceptionner et utiliser un four à résistances.

Les fours à bains de sels à électrodes.

Les étuves électriques et leurs applications industrielles.

La soudure électrique par résistance (2).

Les machines à chauffer par résistance et leurs applications industrielles.

3) **Chauffage par induction.**

Les fours électriques à induction.

4) **Chauffage par arc.**

Les fours électriques à arc.

La soudure électrique à l'arc et ses applications industrielles.

5) **Réglage de la température.**

Les appareils thermostatiques.

(1) Brochures déjà parues sauf (2) brochure en cours d'impression.

N. B. — On trouvera à la fin de la présente brochure, la liste de toutes les brochures parues, y compris celles qui traitent des applications industrielles de l'électricité.

AVANT-PROPOS

Les principes sur lesquels repose le chauffage électrique sont connus depuis longtemps. L'utilisation des propriétés thermiques du courant électrique a été entrevue et même tentée dès le début du XIX^e siècle, avant même que l'on ait connu les lois quantitatives d'Ohm (1826) et de Joule (1843). Mais un long laps de temps s'est écoulé entre les premières tentatives de chauffage électrique et les réalisations déjà importantes de la fin du dernier siècle.

Vers 1810, Davy construisit et utilisa les premiers fours électriques, alimentés par des piles de Volta. Quelques années plus tard, en 1815, Pepys obtint la cémentation d'un fil de fer par chauffage électrique.

Pendant longtemps, les savants poursuivirent leurs recherches au moyen de petits fours de laboratoire alimentés par des éléments galvaniques. Il fallut attendre l'invention de la dynamo et surtout la production et le transport à distance des courants alternatifs pour que le four électrique pût devenir un appareil industriel.

En 1849, Desprets construisit le premier four à arc et le premier four à chauffage indirect par résistance. Mais ce n'est qu'en 1878-1879 que Siemens fit les premières installations industrielles pour la fusion des métaux. Entre temps, Pichon avait cependant conçu un four à arc à chauffage indirect qui ne put être réalisé, faute de disposer de la puissance nécessaire pour l'alimenter.

Parmi les principaux savants et ingénieurs qui, par leurs recherches ou leurs conceptions souvent géniales, ont contribué au développement du four électrique, il faut citer surtout :

pour les fours à arc : Moissan (1890) et Héroult (1899) ;

pour les fours à induction à basse fréquence : de Ferranti (1897) et Kjellin (1900) et, pour les fours à haute fréquence : M. Ribaud en France et M. Northrup en Amérique (vers 1920) et tout récemment, pour la très haute fréquence : MM. Dufour et Leduc.

Il ne faut pas s'étonner que le four à résistances métalliques ait apparu tardivement dans l'industrie : il a fallu auparavant mettre au point les alliages de nickel-chrome dont l'élaboration a été rendue possible grâce au four à arc.

Enfin, peu de temps avant la guerre, on a commencé à utiliser, dans l'industrie américaine, les étuves à rayons infrarouges pour le vernissage.

But de la présente étude

Nous nous proposons de rappeler de façon volontairement sommaire, les principes sur lesquels s'appuie le chauffage électrique et nous aurons essentiellement en vue les applications électrothermiques industrielles.

Classification

Nous distinguerons :

le chauffage par résistance ;

le chauffage par induction ;

le chauffage par arc ;

le chauffage par rayons infrarouges ;

le chauffage par rayons cathodiques.

Remarque capitale.

Il ne faut pas juger de l'importance de chacun des modes de chauffage que nous venons d'indiquer d'après la place plus ou moins grande que nous lui avons donnée dans la présente étude. Cette place dépend en effet de la complexité du sujet examiné et de la nécessité dans laquelle nous nous trouvons de rappeler les lois de l'induction et la théorie de l'arc pour permettre à nos lecteurs de se faire une idée aussi précise que possible de la question, sans avoir à recourir aux livres spéciaux d'électricité ou d'électrotechnique générales.

Le chauffage par résistance tient, à beaucoup près, une place prépondérante, tant par le nombre des appareils existants et leur puissance globale que par la diversité des applications déjà réalisées ou que l'on peut envisager. On a recours à des appareils « à résistances » aussi bien pour des usages domestiques, commerciaux ou artisanaux que pour des usages industriels. La puissance individuelle des appareils peut varier de quelques watts (éléments chauffants) jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de kilowatts (fours d'électrometallurgie).

Il n'existe actuellement aucune statistique permettant de connaître le nombre d'appareils à résistance en service en France. Une enquête à ce sujet, commencée en 1939, a été interrompue par la guerre.

Vient ensuite *le chauffage par arc* qui est représenté essentiellement par les fours de l'électrometallurgie, lesquels peuvent atteindre des puissances unitaires de quelques dizaines de milliers de kilowatts et dont les capacités de production sont souvent considérables.

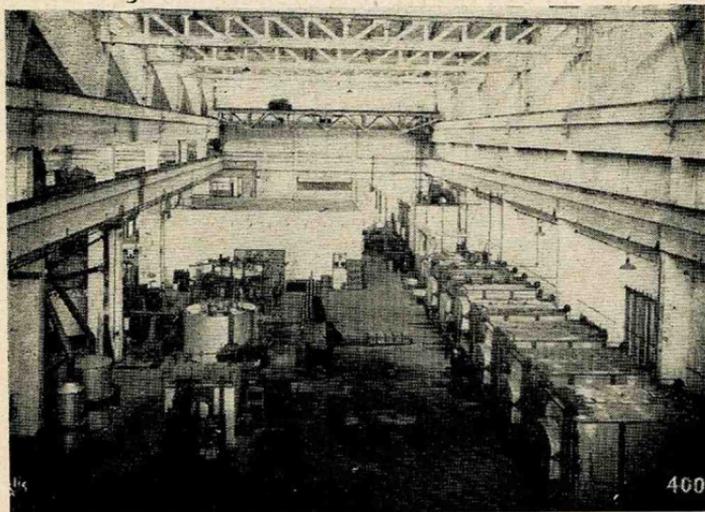
Le nombre des fours dénommés « fours à arcs » (fours à arcs proprement dits et fours à arcs et à résistance) utilisés en électrometallurgie (électrosidérurgie, ferros-alliages, carbure de calcium, autres métaux et alliages) est actuellement en France de l'ordre de 250.

Puis vient le *chauffage par induction* à basse ou à haute et même à très haute fréquence dont le domaine d'application s'accroît et qui, dans certains cas (laitonnerie par ex.), tend à devenir le seul mode de chauffage.

Le nombre des fours à induction utilisés actuellement en France est de l'ordre de 150 pour la basse fréquence et de 200 pour la haute fréquence dont 100 environ pour les laboratoires et 100 pour l'industrie proprement dite.

Enfin, le *chauffage par rayons infrarouges* est un nouveau venu qui semble devoir donner d'excellents résultats dans beaucoup d'applications à basse température, en particulier pour les séchages et pour le vernissage.

Quant au *chauffage par rayons cathodiques*, nous le citons surtout pour mémoire, car il ne convient que pour des cas très particuliers et n'a donné lieu jusqu'à présent qu'à quelques réalisations de faible puissance pour laboratoires de recherches.



Installation de fours de traitements d'alliages ferreux et légers
Résistances métalliques. Puissance totale : 1 600 kW

A) — Chauffage par résistance (I)

Ce mode de chauffage est basé sur la loi de Joule, relative à la transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique dans un conducteur parcouru par un courant électrique.

LOI DE JOULE

La puissance P mise en jeu dans un conducteur AB de résistance électrique R parcouru par un courant d'intensité I , la tension entre A et B étant U , a pour valeur :

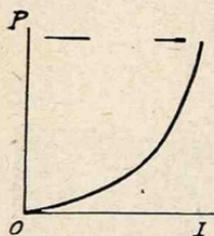


Fig. 1

$$(1) \quad P = U \quad I$$

watts volts ampères

Or, en vertu de la *loi d'Ohm*, il existe entre U , R et I la relation :

$$(2) \quad U = R \quad I$$

volts ohms ampères

On en conclut que :

$$(3) \quad P = R \quad I^2 = \frac{U^2}{R}$$

watts ohms ampères

La figure 1 montre combien est rapide la variation de P en fonction de I (ou de U) pour R constante.

Si R et I sont constants, l'énergie mise en jeu pendant le temps t aura pour valeur :

$$(4) \quad W = Pt = UI t = R \quad I^2 \quad t$$

joules ohms ampères secondes

Cette énergie W se transforme en chaleur. La quantité de chaleur ainsi dégagée sera :

$$(5) \quad Q = 0,24 \quad W = 0,24 R \quad I^2 \quad t$$

petites calories équivalent calorifique du travail joules ohms ampères secondes

(1) Pour plus amples renseignements, on pourra se reporter d'une part aux brochures indiquées p. 4, d'autre part aux livres français suivants :

L'Electrochimie et l'Electrometallurgie, t. II. Fours électriques, par M. LEVASSEUR.

L'Electrothermie appliquée, par G. FLUSIN. (Calculs electrothermiques ; le carbone en electrothermie.)

Fours électriques et chimie, livre publié sous la direction de P. LEBEAU (livre un peu ancien et relatif aux fours de recherches).

Les Fours électriques industriels et les applications electrothermiques, par ESCARD (livre assez ancien).

D'où, en résumé, les formules équivalentes :

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

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

Dans la pratique industrielle, l'énergie électrique est évaluée en kWh, le kWh étant l'énergie mise en jeu par une puissance constante de 1 kW fournie pendant 1 h. D'où la relation :

$$W = \frac{U}{\text{volts}} \frac{I}{\text{ampères}} \frac{t}{\text{heures}}$$

L'équivalent mécanique de la calorie étant égal à 425 (valeur moyenne ; la valeur de 0,24 admise pour l'équivalent calorifique du travail est par suite une valeur approchée par excès), on en déduit que :

1 kWh équivaut à 3 600 joules ou 864 grandes calories

C'est à cette transformation de l'énergie électrique en énergie thermique que l'on donne communément le nom d'effet Joule.

NATURE DE LA RÉSISTANCE

Deux cas :

1^o **Classe A.** — La matière à chauffer sert elle-même de résistance R , c'est-à-dire qu'elle constitue le conducteur parcouru par le courant I et dans lequel se développe l'effet Joule.

Exemples : four de graphitisation (fabrication des électrodes, fig. 2-a), haut fourneau (fig. 2-b), four à carbure de calcium (fig. 2-c), four de fabrication (fig. 2-g) ou de raffinage de l'aluminium par électrolyse ignée, four à bain de sels à électrodes (fig. 2-e), chaudière à électrodes (fig. 2-d), appareil de soudure par résistance (fig. 2-f). En général, courants de grande intensité. Se reporter au tableau I des pages 10 et 11 et à la figure 2, page 15.

2^o **Classe B.** — La matière à traiter est chauffée indirectement par l'intermédiaire d'un conducteur ou d'une association de conducteurs auxiliaires traversés par le courant et dans lesquels se dégage l'effet Joule (fig. 3). Ce ou ces conducteurs prennent le nom de *corps de chauffe* ou de *résistor*, plus simplement de *résistances*, sans qu'aucune de ces dénominations n'ait prévalu jusqu'alors.

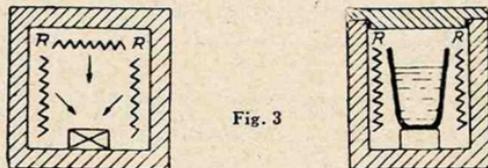


Fig. 3

TABLEAU I
Quelques appareils à électrodes, à chauffage par résistance (I)

Désignation	Nature de la résistance	Nature des électrodes
Four de graphitisation (5).	Mélange de charbon amorphe (coques spéciaux) et d'agglomérés carbonés.	Matière carbonée
Four à carbure de calcium (6).	Mélange de chaux et de carbone.	Carbone
Haut fourneau.	Minerais ; charbon de bois (ou coke) comme réducteur.	Carbone
Four de fabrication d'aluminium (7).	Mélange de cryolithe ($AlF_3 \cdot 3 NaF$) et d'alumine (Al_2O_3) + additions.	Matières carbonées
Four de raffinage d'aluminium (7).	Partie inférieure (+) : alliage anodique d'Al impur allié à Cu ; partie médiane : électrolyte constituée par cryolithe, alumine et fluorures ; partie supérieure : couche d'Al raffiné (-).	Amenées de courant en carbone
Chaudière à électrodes.	Eau.	Acier
Four à bain de sels à électrodes (5).	Mélange de sels : chlorure de baryum + additions.	Acier
Soudeuses par résistance.	Métal : acier, aluminium, alliages divers, etc.	Cuivre

(1) Ces renseignements sont fournis à simple titre indicatif, pour donner une idée de l'importance des appareils au moyen de quelques exemples. Ils ne doivent être considérés ni comme absolus, ni comme exclusifs. Nous avons d'ailleurs laissé de côté beaucoup d'appareils, notamment des fours d'électrochimie et d'électrometallurgie.

(2) A = alternatif, m = monophasé, t = triphasé, d = diphasé, C = continu.

(3) Températures usuelles.

(4) Indications données à simple titre d'exemples : puissances usuelles ou, dans certains cas, puissances maxima.

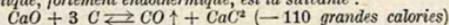
(5) Ces appareils sont quelquefois appelés fours de graphitisation, mais la première désignation est la plus fréquente. Des fours du même genre sont utilisés pour la fabrication du carborandum. Pour plus amples détails, se reporter au livre de M. FLUSIN, L'Electrothermie appliquée.

TABLEAU I (suite)

Quelques appareils à électrodes, à chauffage par résistance (1)

Nature du courant (2)	Température	Nature du traitement	Caractéristiques électriques (4)
	° C (3)		
A, m	2 000- 2 400	Cuisson : fabrication des électrodes en graphite.	Ex. : 800 kW ; tension de 120 V (au début) à 20 V ; 1 000 A au début, 6 000 A ou davantage à la fin de l'opération. Autre ex. : 1 200 kW (max.).
A, m, t	2 400- 3 000	Fabrication du carbure de calcium.	Ex. : 1 500 à 6 000 kVA (m). Autre ex. : 16 000 kVA-15 000 kW (m) ; 22 à 55 V ; 410 000 A. Autre ex. : 25 000 kVA (t). Tension de 40 à 60 V par ex. : avec les fours m et de 175 V par ex. avec les fours t.
A, t, d	1 700- 1 800	Fabrication de la fonte.	1 800-5 000 kW ; de 40 à 120 V ; quelques milliers d'A par ex.
C	950	Fusion et électrolyse ignée de l'alumine.	Ex. : 60 kW ; faible tension (6 V) ; 10 000 A (voire 50 000 A).
C	950- 1 000	Raffinage de Al par électrolyse ignée.	Ex. : 70 kW ; 7 V ; 10 000 A.
A, m, t		Production de vapeur d'eau.	Par ex. : de 50 à 5 000 kW pour basse tension (110-550 V) ; de 300 à 25 000 kW pour haute tension (1 000-10 000 V).
A, m, t, d	1 300- 1 350 (8)	Chauffage avant trempe d'aciers spéciaux (outils).	De 20 à 140 kW ; 30 V au départ, 5 V en marche ; quelques milliers d'A (10 000 A par ex.).
A, m,	Jusqu'à 3 000 (9)	Soudure des métaux et de leurs alliages.	Maximum : 500 kVA.

(6) La réaction chimique, fortement endothermique, est la suivante :



Au début, on a utilisé des fours à arc ; dans les fours actuels, on s'efforce d'éviter le fonctionnement à arc et pratiquement les fours marchent par résistance. Toutefois, certains fours américains seraient à arc. Certains usagers français estiment que les fours fonctionnent à la fois par arc et par résistance (voir note, p. 14). Pour plus amples détails sur ces fours, se reporter notamment aux articles parus dans le Journal du Four électrique.

(7) Dans les fours à électrolyse ignée, on emploie le courant simultanément pour obtenir un effet thermique et un effet d'électrolyse.

(8) Certains fours à bain de sels à électrodes sont prévus pour fonctionner à des températures inférieures à 1 000° C. Se reporter à la brochure APEL : « Les fours à bain de sels à électrodes », par R. GAUTHERET.

(9) Soudure des aciers (par ex. : 1 700-1 800° C), soudure du tungstène (jusqu'à 3 000° C). Se reporter à la brochure APEL : « La soudure par résistance », par M. SALLELES.

TABLEAU II

Nature des résistances (1)		Composition approximative de l'alliage	
		p. 100	
Alliages métalliques usuels	{	Nickel-chrome à faible teneur..	30 à 60 Ni + 30 à 50 Fe + 10 à 20 Cr.
		Nickel-chrome à forte teneur..	80 Ni + 20 Cr.
		Fer-chrome-aluminium	25 à 30 Cr + 2 à 5 Al + Fe.
Métaux précieux (Ni, Tu, Mb, Pt)		—	
Résistances non métalliques	{	Carbone, graphite	—
		Oxycarbure de silicium	—

(1) Pour tous renseignements complémentaires, se reporter aux brochures APEL sur les résistances (voir p. 4 et 98).

Les résistors sont constitués (fig. 4) :

1. Soit par des *résistances métalliques* ;
2. Soit par des *résistances non métalliques*.

Le tableau II donne quelques indications à ce sujet.

VALEUR DE LA RÉSISTANCE R

La résistance électrique R du conducteur AB, de longueur l et de section uniforme s a pour valeur :

$$(6) \quad R = \rho \frac{l}{s}$$

formule dans laquelle par exemple R et ρ sont exprimés en ohms, l en cm et s en cm^2 .

ρ s'appelle *résistivité*. C'est la résistance d'un conducteur de la même matière, mais de longueur et de section respectivement égales à l'unité de longueur et à l'unité de section adoptées.

Quand on donne la valeur d'une résistance, il faut toujours préciser à quoi elle se rapporte.

Ex. : la résistance du nickel-chrome à 80 p. 100 de nickel et 20 p. 100 de chrome est de 100 microhms par cm et cm^2 ou, ce qui revient au même, de 1 ohm par m et mm^2 .

TABLEAU II (suite)

Températures usuelles ou maxima d'emploi	Température de fusion	Valeur approximative de ρ à 0-20° C	Valeur moyenne de α entre 0 et t
° C	° C	ohm:m:mm ²	
800- 900	1 350-1 450	1-1,1	+ 1 à $3 \cdot 10^{-4}$
1 000-1 100	1 400-1 475	1-1,1	+ 0,5 à $1 \cdot 10^{-4}$
1 250-1 280	1 350-1 450	1,3-1,45	+ 0,6 à $1 \cdot 10^{-4}$
2 000	1 450 à 2 975	0,12 à 0,055	+ 60 à $33 \cdot 10^{-4}$
1 500-2 700	—	8 à 40	—
1 300-1 400	—	9 à 30	—

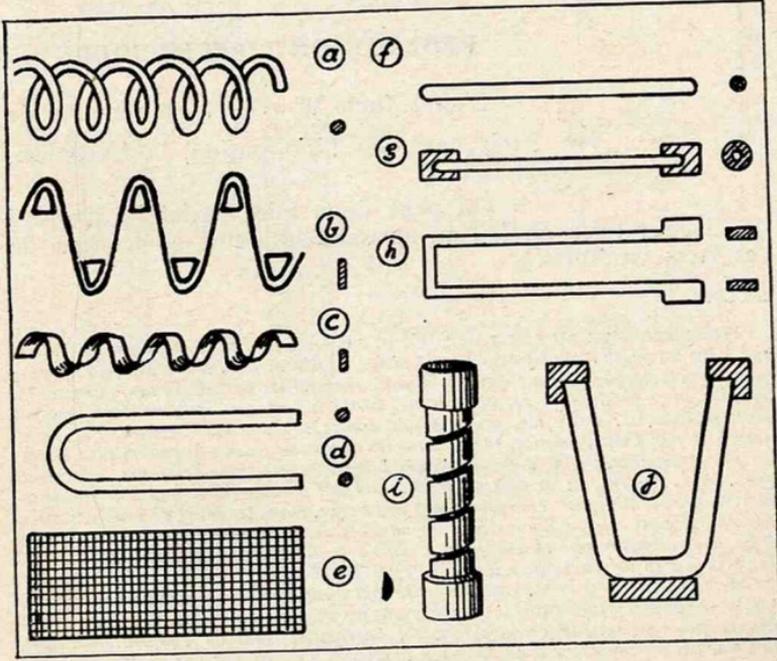


Fig. 4

Résistances métalliques :

a, fil boudiné ; b, bande ; c, ruban ; d, tige en épingle à cheveux ; e, toile.

Résistances non métalliques :

b, g, tiges (graphite ou oxycarbure de silicium) ; h, barre (graphite) ; i, tube sculpté (graphite) ; j, creuset.

Variation de R en fonction de la température.

Sous l'action de l'effet Joule, le conducteur s'échauffe et sa résistance R (ou ρ) varie suivant une certaine loi que l'on peut représenter, sans trop d'erreur, par la formule suivante :

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

R_t désignant la valeur de la résistance à la température t^0 , R_0 la valeur de la résistance à 0^0 , α le coefficient moyen de température pour t compris entre 0^0 et t^0 .

α est positif pour les résistances métalliques ; il est toutefois pratiquement nul ou négligeable pour certaines d'entre elles (fig. 5 relative au nickel-chrome à 80/20). Pour les résistances non métalliques, il peut être positif ou négatif suivant la nature et la température. Pratiquement, la matière constituant les résistances usuelles est choisie de telle façon que α ait une très faible valeur.

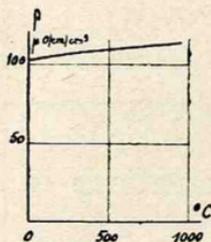


Fig. 5

RÉGLAGE DE L'EFFET JOULE

L'effet Joule $W = \frac{U^2}{R} t$ est fonction de trois variables : la tension, la résistance, le temps.

On peut donc faire varier la quantité de chaleur mise en jeu en agissant sur l'une quelconque de ces trois variables.

NOTE RELATIVE AU TABLEAU I (6), p. II. — Ceci peut s'expliquer par le fait que, dans les fours à carbure ou à ferro-alliages ordinaires (au silicium, au manganèse,...) dans lesquels il y a fusion, le courant traverse les parties solides, pâteuses ou liquides en y produisant un effet Joule. Mais il se forme également des arcs en certains endroits. Toutefois, ces arcs sont courts et plutôt indésirables. Par destination et par prédominance, même dans les appareils récents à tension plus élevée, les fours considérés sont donc des fours à résistance et non des fours à arc bien que, le plus souvent, on les désigne sous ce dernier vocable parce que, par construction, ils ne se distinguent guère des fours de ce type. Dans les fours de graphitisation par ex., il peut aussi y avoir des arcs, mais ces arcs sont alors extrêmement courts et on peut admettre que le chauffage se fait essentiellement par effet Joule normal (voir plus loin la remarque relative à l'effet Joule dans l'arc).

M. LEBLANC père et M. LEBLANC fils font d'ailleurs remarquer (livre intitulé : La décharge électrique dans le vide et dans les gaz) : « 20, 30 ou 40 V sont insuffisants pour maintenir un arc amorcé, particulièrement en courant alternatif. Si l'une des électrodes est constituée par le creuset, l'autre électrode se trouvant dans le corps à traiter liquide, on a la marche dite à résistance. Si la matière non fondue est introduite dans le creuset, les deux électrodes sont réunies par les corps solides entre lesquels les contacts sont plus ou moins bons ; il peut alors se produire entre eux une série de petits arcs fonctionnant en parallèle ou en série : on a la marche dite à arc qui nécessite une tension plus élevée que dans le cas précédent. »

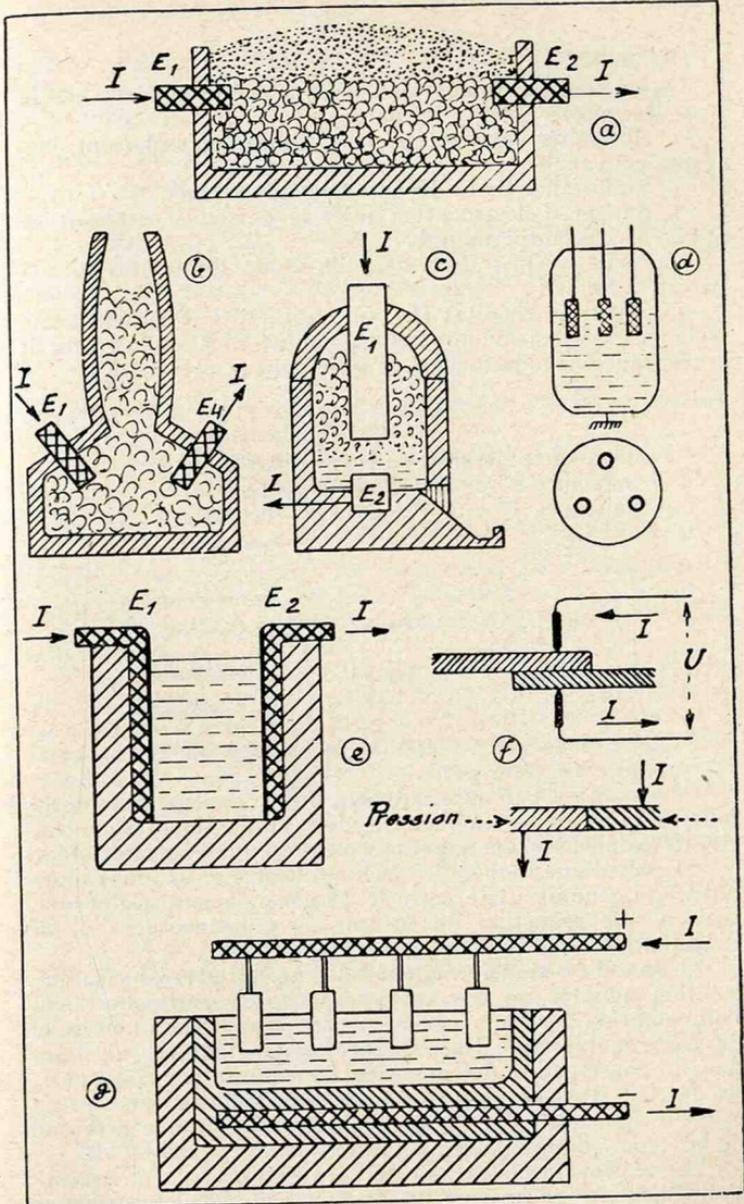


Fig. 2

1° Action sur U.

On ne peut pas donner à la tension une valeur trop élevée, pour les raisons essentielles suivantes :

- difficultés rencontrées pour réaliser un isolement électrique convenable ;
- importance de la dépense correspondante ;
- danger d'électrocution pour le personnel utilisant les appareils électrothermiques.

On peut modifier la valeur de U de différentes façons, par ex. à l'aide :

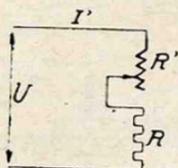
a) Soit d'un rhéostat (fig. 6), c'est-à-dire d'une résistance réglable, extérieure à l'appareil thermique. Si R' est la valeur de la résistance introduite ainsi en série dans le circuit, on a :

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

La puissance totale mise en jeu se répartit en :

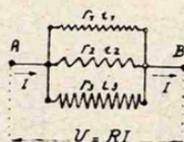
une puissance $P = RI^2$ dans l'appareil ;

une puissance $P' = R' I'^2$ dans le rhéostat.



← Fig. 6

Fig. 7 →



Seule, P concourt à l'effet Joule cherché. La puissance P' est produite en pure perte.

Ce moyen est par suite rarement utilisé, sauf pour les petits fours à cause de sa simplicité et de la faible importance relative de la dépense d'énergie supplémentaire qu'il entraîne alors ;

b) Soit d'une inductance (self) utilisable en courant alternatif, qui conduit à une perte $R' I'^2$ généralement négligeable, mais à une réduction du facteur de puissance ($\cos \varphi$) de l'installation.

c) Soit d'un transformateur ou d'un auto-transformateur, solution adoptée en courant alternatif, en particulier pour l'alimentation des fours à basse tension et à grosse intensité et des fours équipés avec des résistances non métalliques, ainsi que dans la construction des appareils de soudure par résistance ;

d) Soit d'un régulateur d'induction, solution adoptée en courant alternatif, par ex. pour obtenir une grande précision de U et par suite de la température.

Les tensions usuelles sont de l'ordre de 110-230 V. Exceptionnellement, elles peuvent atteindre des valeurs élevées (10 000 V par ex. dans les chaudières à électrodes, fig. 2-d) ou

basses (quelques dizaines de volts ou même quelques volts, par ex. dans les fours à tube de graphite ou dans les appareils de soudure par résistance).

2° Action sur R.

Si R est relativement trop grand, la chaleur dégagée sera très faible.

Si R est trop petit, la résistance supplémentaire R' (somme de la résistance de réglage et des résistances aux contacts des amenées de courant) prendra une grande importance et le rendement η du système :

$$\eta = \frac{R}{R + R'}$$

sera trop faible. En outre, on aura affaire à de grandes intensités, de transport généralement délicat.

En conséquence, on s'efforce de prendre pour R une valeur qui ne soit ni trop grande ni trop petite. Deux moyens (formule 6) :

a) Agir sur le rapport $\frac{l}{s}$ en choisissant convenablement la longueur l et la section s du conducteur. Ceci n'est possible qu'exceptionnellement (cas de la classe A) ;

b) Agir sur ρ , donc adopter une résistance auxiliaire. C'est la solution la plus courante.

Dans les résistors, les résistances constitutives sont le plus souvent couplées d'une certaine façon afin de permettre en particulier d'obtenir facilement et rapidement une variation de la puissance mise en jeu : suppression d'une partie des résistances normalement sous tension, couplage semi-parallèle, couplage étoile-triangle. L'application des lois d'Ohm, de Kirchhoff et de Joule permet de déterminer la valeur de la puissance.

La loi de Kirchhoff ou loi générale des circuits dérivés se traduit par les formules suivantes (fig. 7) :

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

$$U = r_1 i_1 = r_2 i_2 = \dots = r_n i_n$$

La résistance R équivalente de l'ensemble des résistances r_1, r_2, \dots, r_n est donnée par la relation :

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

Les schémas de la figure 8, page 19, donnent les principaux cas de groupement des conducteurs.

Remarque. — Dans certains cas, la résistance R du résistor varie sensiblement avec la durée d'emploi (vieillessement des baguettes en carbone ou en composés de carbone). On pallie cet inconvénient par des moyens simples tels que l'emploi de

résistances ou de selfs de compensation, de résistances ou de selfs de réglage, d'autotransformateurs de réglage, etc.

3° Action sur *t*.

Par simple coupure du circuit d'alimentation, on peut arrêter le chauffage pendant une certaine durée ; on peut le rétablir instantanément, si besoin est. Une réalisation pratique de ce moyen de modifier la durée du chauffage est celle de la marche « par tout ou rien », qui permet de maintenir la température constante dans un circuit au moyen d'un thermostat ou d'un pyromètre qui provoque la coupure du courant lorsque la température atteint une certaine valeur limite inférieure et le rétablissement du courant quand la température atteint une valeur limite supérieure.

Réglage de la température.

Le réglage de l'effet Joule et par suite de la température est obtenu soit manuellement (sur le vu des lectures d'un appareil indicateur de température : thermomètre ou pyromètre), soit le plus souvent automatiquement (thermostat ou pyromètre commandant des systèmes de relais et contacteurs).

APPLICATIONS

Le chauffage par résistance est de beaucoup le plus répandu. Il s'applique :

1° Au chauffage des solides.

— Fusion des corps : métaux et leurs alliages (fontes, aciers, cuivres, laitons, bronzes, alliages légers, plomb, étain, or, argent, etc. ; soudure par résistance), verre, brai, compounds, colle, cire, etc.

— Changement de forme : forgeage, matriçage, chauffage des rivets, boîtes en carton, cylindres de laminoirs.

— Modification des propriétés physiques ou chimiques : traitements thermiques des métaux (trempe, recuit, revenu, cémentation, etc.), galvanisation, trempe et recuisson du verre, cuisson des produits alimentaires, cuissons diverses (céramique, etc.), opérations de finition (émaillage, vernissage, etc.), traitements chimiques (bakélisation, vulcanisation, etc.).

— Simple transport de calories : plateaux et manchons chauffants, thermo-plongeurs, etc.

2° Au chauffage des liquides.

— Volatilisation : production de vapeur d'eau, séchage, dessiccation, etc.

— Augmentation de la fluidité ou maintien à l'état liquide ou pâteux = colle, vernis, résines, bains de métaux fondus, compounds, défigeage des huiles, etc.

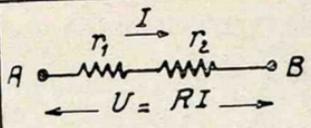
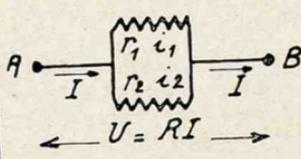
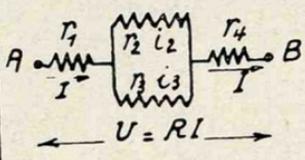
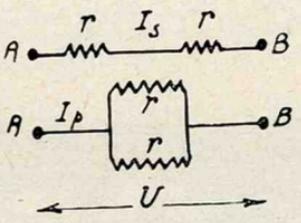
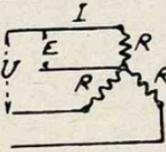
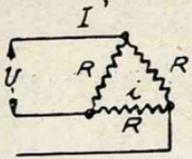
Couplage Série		$R = r_1 + r_2$
Couplage parallèle		$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$ ou $R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
Couplage mixte		$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$ ou $r = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}$ $R = r_1 + r + r_4$
Couplage Série-parallèle		<u>Couplage Série</u> $I_s = \frac{U}{2r}$ <u>Couplage parallèle</u> $I_p = \frac{U}{r} = 2 \frac{U}{r}$
Couplage étoile-triangle (Courant triphasé)		<u>Couplage étoile</u> $U = E\sqrt{3}$ $I = \frac{E}{R}$ $P_e = UI\sqrt{3} = 3EI = \frac{U^2}{R}$
$P_t = 3 P_e$		<u>Couplage triangle</u> $I' = \sqrt{3} i$ $i = \frac{U}{R}$ $P_t = UI'\sqrt{3} = 3Ui = \frac{3U^2}{R}$

Fig. 8

— Maintien de la température : bains-marie, bains de sels, bains d'électrolyse, etc.

— Modification des propriétés : accélération de certaines réactions chimiques (bains de nickelage, chromage, etc.).

— Simple transport de calories : circulation d'eau ou d'huile.

3° Au chauffage des gaz.

— Chauffage d'air sec (locaux, étuves) ou humidifié (climatisation), etc. Le chauffage par résistance permet le traitement des substances dans leur ambiance habituelle ou en milieu spécial actif (atmosphère oxydante ou réductrice par ex.) ou neutre (atmosphère neutre par ex.).

Les appareils chauffés par ce mode de chauffage sont très variés comme forme et comme dimensions : fers à repasser, chauffe-colle, fours industriels, étuves, chaudières et chauffe-eau, etc.

Les puissances mises en jeu peuvent varier de quelques watts ou dizaines de watts à des milliers ou dizaines de milliers de kilowatts.

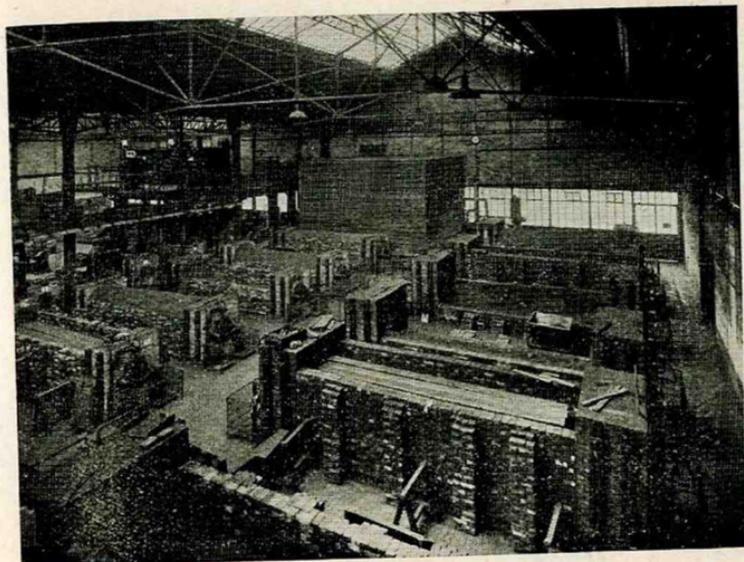
Les températures usuelles peuvent atteindre des valeurs élevées (se reporter aux tableaux I et II).

Les figures des pages 7 et 20 à 28 donnent plusieurs exemples d'appareils électrothermiques à résistances de provenances différentes (I) et utilisés pour des applications très diverses.

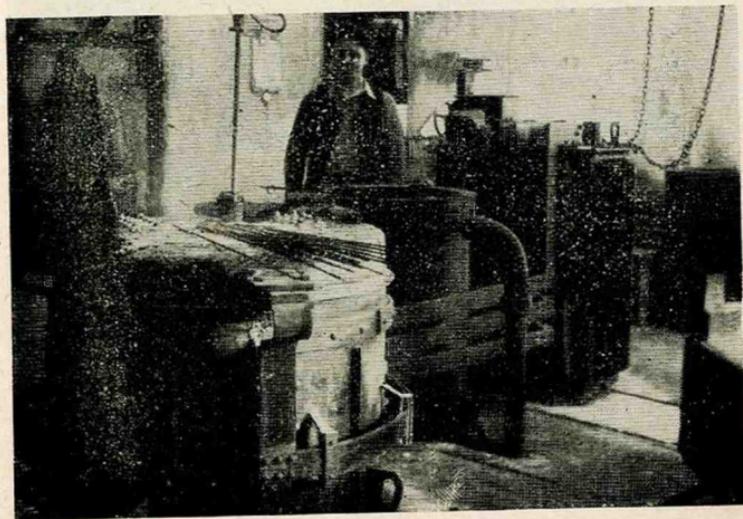


**Fers à souder (puissance individuelle : 0,15 à 0,25 kW)
et pots à paraffine (puissance individuelle : 1,5 kW)**

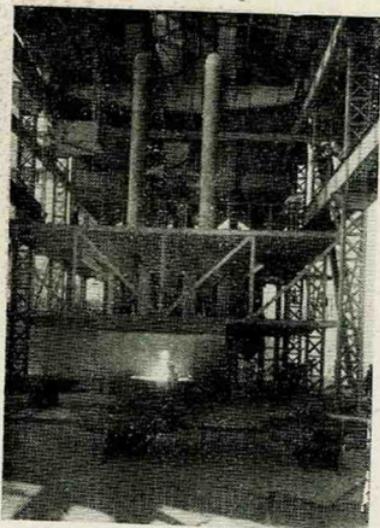
(1) Nous n'avons pas donné de noms de constructeurs, faute de pouvoir montrer au moins une photographie d'un appareil construit par chacun d'eux.



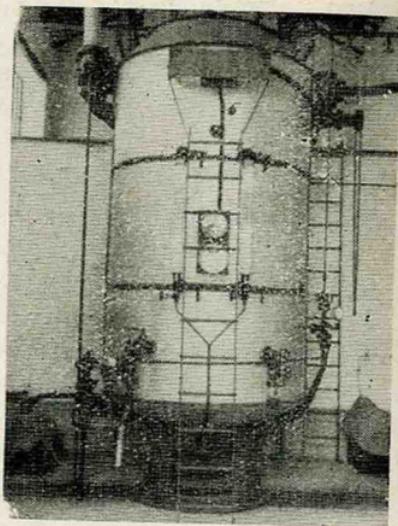
Vue partielle d'une installation de fours de graphitisation
Puissance individuelle : jusqu'à 300 kW



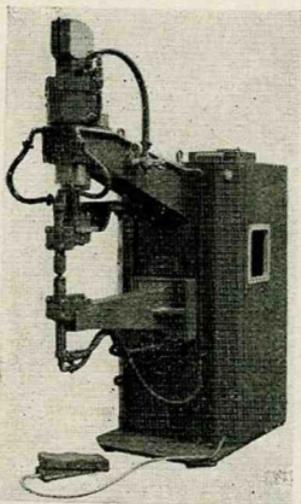
Four à bain de sels à électrodes. 40 kW



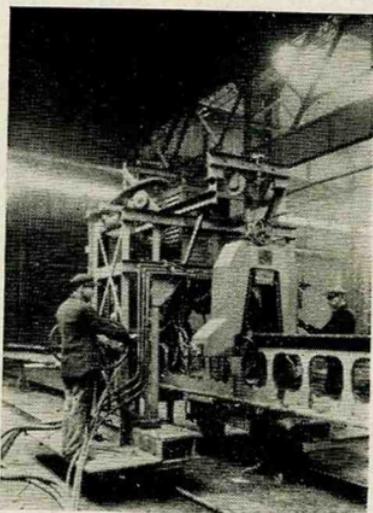
Four Miguet à carbure de calcium
6 000 kW



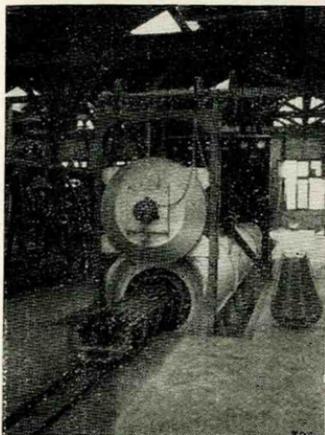
Chaudière à électrodes
15 000 kW. 6 000 V



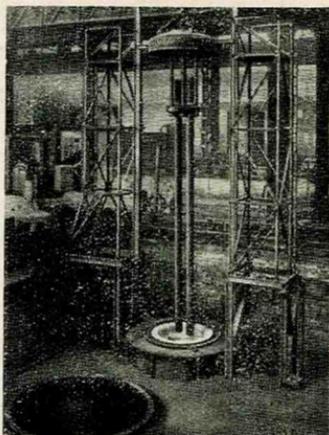
Soudeuse par résistance
(par points). 120 kVA



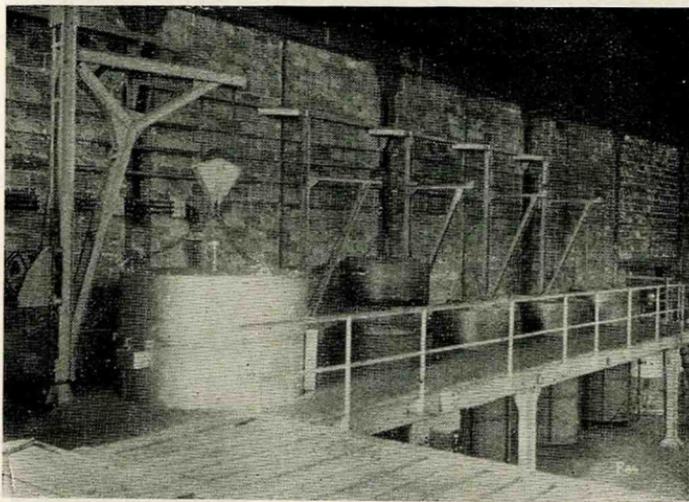
Pince à souder
400 kVA



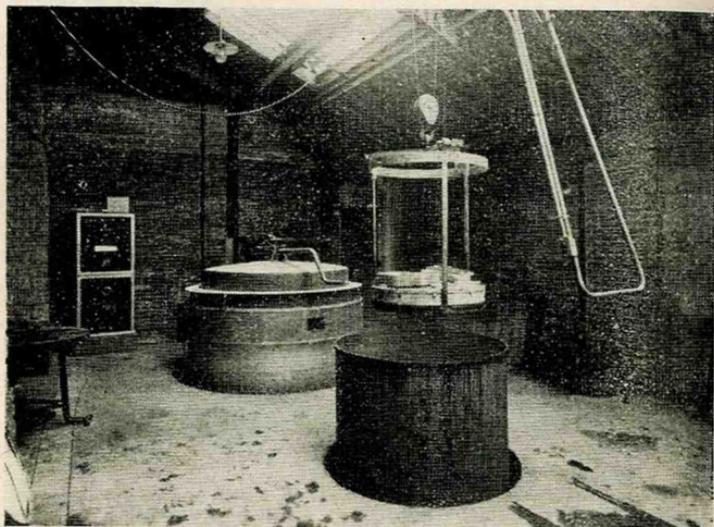
Four à convection forcée pour le recuit de tubes et profilés en alliages légers.
Résistances métalliques. 95 kW



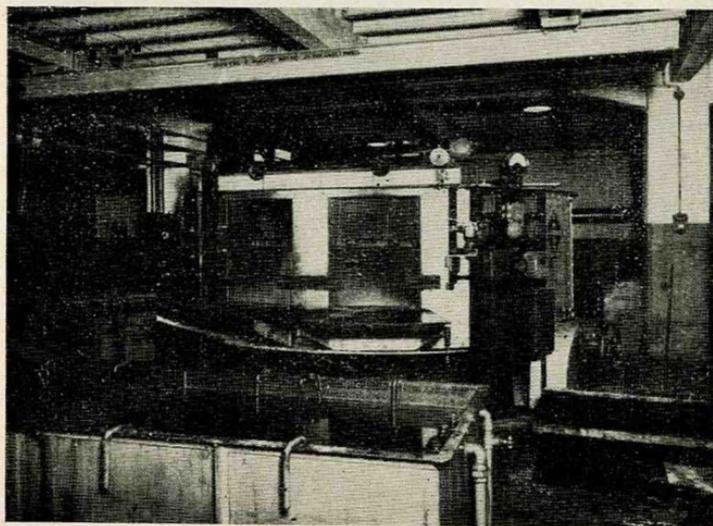
Four à puits pour trempe d'acier
Résistances métalliques



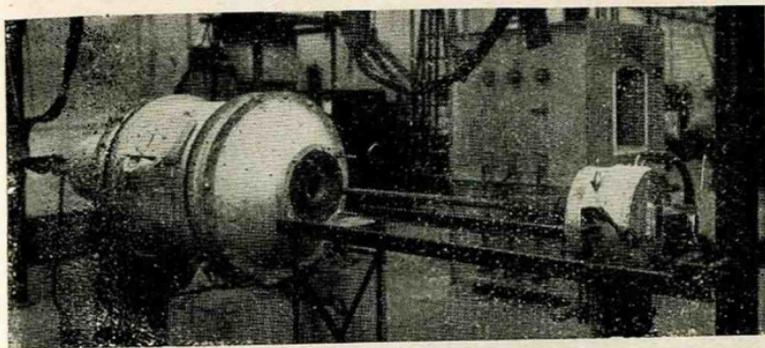
Installation de recuit blanc en atmosphère spéciale
Résistances métalliques. 100 kW



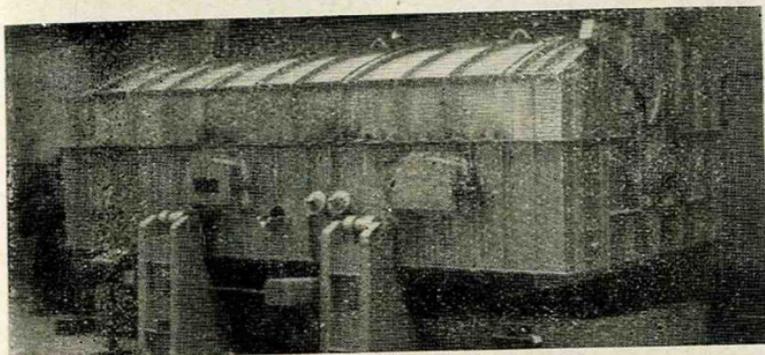
Four de recuit d'alliages légers. Résistances métalliques. 60 kW



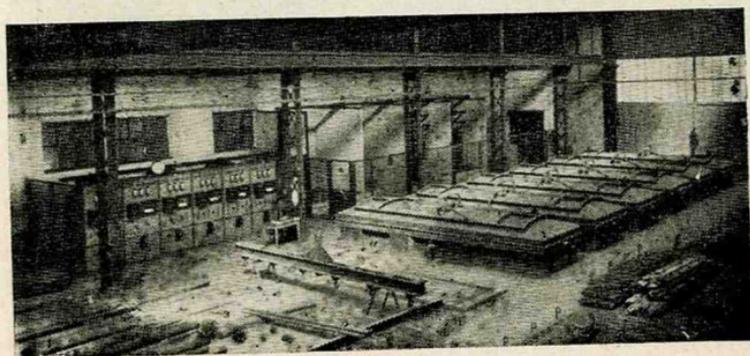
Four à sole tournante pour trempe d'acier. Résistances métalliques. 150 kW



Four oscillant à baguette axiale en graphite
Traitements divers (fusion de fontes, etc.). 150 kW



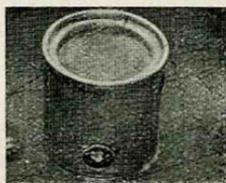
Four mélangeur pour aluminium. 5 t. Résistances métalliques. 200 kW



Batterie de fours à auge. Résistances métalliques
Puissance individuelle : 250 kW



Four à convection forcée pour le traitement des alliages ultra-légers. Résistances métalliques. 18 kW



Chauffe-colle. 2 kW

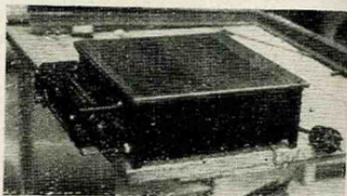
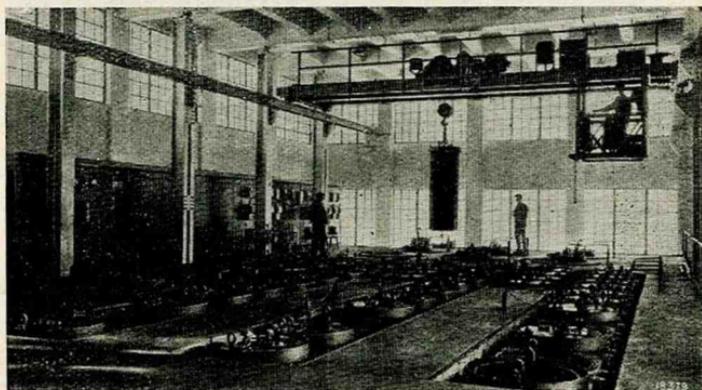


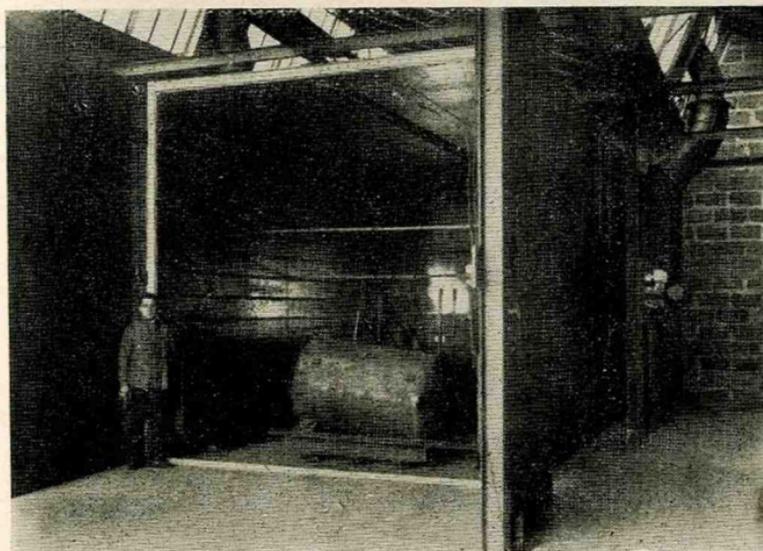
Table chauffante Résistances métalliques. 0,6 kW



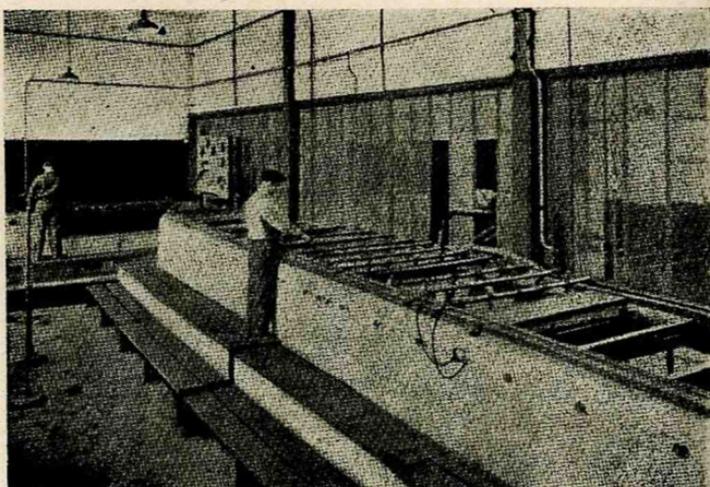
**Installation de fours pour le recuit blanc de couronnes en feuillards d'acier
8 fours de 80 kW, soit 640 kW. 75 marmites**



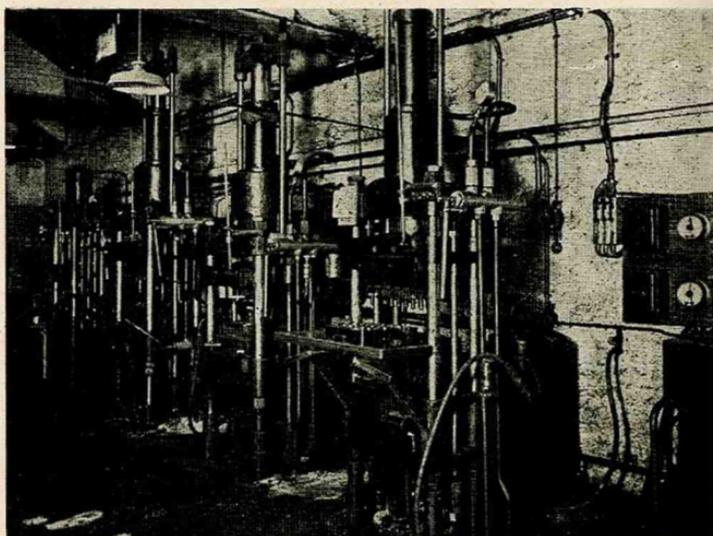
Cuisine électrique. Puissance totale : 545 kW



Étuve pour laques et isolants. Résistances métalliques. 90 kW



Installation d'électrolyse. Éléments chauffants de 1 kW

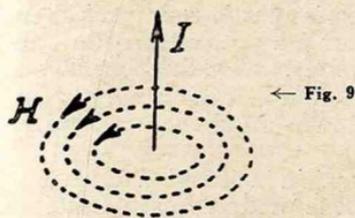


Presses pour matières plastiques. Puissance moyenne de 4 kW par presse

B) Chauffage par induction (1)

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS D'ÉLECTROMAGNÉTISME.

Un courant continu circulant dans un conducteur rectiligne crée autour de ce conducteur un *champ magnétique* que l'expérience classique du spectre magnétique peut mettre en évidence et dont les *lignes de force* sont des circonférences concentriques (fig. 9). Le sens de ces lignes de force est donné par la règle du bonhomme d'Ampère ou par celle du tire-bouchon de Maxwell.



← Fig. 9

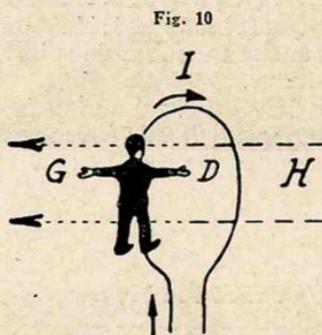
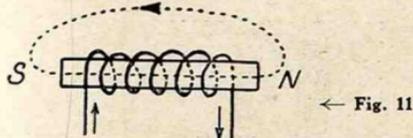


Fig. 10



← Fig. 11

Un courant I parcourant un circuit circulaire donne, de même, naissance à un champ H dont la direction est indiquée par la figure 10.

Enfin, un *solénoïde* long (obtenu en réunissant un certain nombre de spires) parcouru par un courant a des propriétés analogues à celles d'un aimant (fig. 11) et les lignes de force se

(1) Les lecteurs qui voudraient de plus amples détails sur cette question pourront se reporter à l'étude de M. MINSSIEUX (brochure APEL, « Les fours à induction », revue Electricité, février, mars et avril 1943), aux nombreux articles ou communications parus dans les revues savantes et dans les revues spécialisées (Journal de Physique, Bulletin de la Société française des Electriciens, Electricité, Revue générale d'Electricité, Journal du Four électrique, Physical Review, General Electric Review) et au livre : Fours électriques et chimie, publié sous la direction de P. LEBEAU (chapitre intitulé : « Fours à induction », par G. RIBAUD). Pour la haute fréquence, signalons notamment les études et notes parues en France de MM. RIBAUD, BUNET, LEVASSEUR, MINSSIEUX, GIROZ, PERRIN, SORREL et MATHIEU ; pour la très haute fréquence, les études de MM. DUFOUR et LEDUC. Signalons également le livre de M. LEVASSEUR, L'électrochimie et l'électrometallurgie, t. II. Fours électriques.

dirigent, à l'extérieur, du pôle N vers le pôle S. On réalise ainsi un *champ uniforme* dont les lignes de force sont parallèles à l'axe du solénoïde et de même sens.

Un tel champ uniforme est caractérisé par son intensité et sa direction.

L'intensité H du champ (évaluée en gauss) et souvent appelée « champ » par abréviation, a pour valeur :

$$H = 1,25 \frac{NI}{l}$$

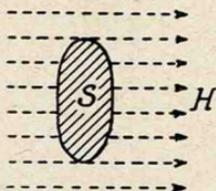
N étant le nombre de spires traversées par le courant d'intensité I (en ampères) et l la longueur (en centimètres) du solénoïde. (NI) s'appelle le nombre d'*ampères-tours* du solénoïde.

La formule précédente montre que le champ est proportionnel au nombre de spires et à l'intensité du courant qui les traverse.

Soit S (fig. 12) une surface normale à la direction du champ. On appelle *flux de force* magnétique le produit de l'intensité du champ par la surface :

$$\Phi = H S$$

maxwells gauss cm²



← Fig. 12

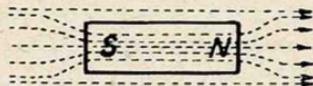


Fig. 13

Le flux est représenté par le tube de force qui s'appuie sur les contours de la surface, c'est-à-dire par le faisceau des lignes de force qui passent par tous les points de la surface.

Si, dans un champ magnétique, on place un barreau de fer parallèlement aux lignes de force (fig. 13), on constate que les lignes de force traversant le barreau sont plus denses ; autrement dit, le nombre des lignes de force passant dans le volume occupé par le barreau est plus grand qu'auparavant. Le fer est plus perméable que l'air aux lignes de force. L'intensité du champ est devenue :

$$B = \mu H$$

B s'appelle l'*induction*, μ la *perméabilité*.

Le flux devient :

$$\Phi' = BS = \mu HS$$

$\mu = 1$ pour l'air et les corps « amagnétiques » (cuivre, laiton,...) ;

$\mu > 1$ pour les corps « magnétiques » (fer, acier,...) ;

$\mu < 1$ pour certains corps « dimagnétiques » (bismuth, antimoine,...).

Le barreau de fer précédent s'aimante dès que le courant traverse le solénoïde.

On peut dès lors se poser la question suivante : puisqu'un courant donne naissance à un champ magnétique, inversement un champ peut-il créer un courant ?

Si l'on fait *varier* le flux Φ embrassé par une spire fermée placée dans un champ magnétique H (fig. 12), on constate qu'un courant, dit *courant induit*, prend naissance dans la spire et qu'il dure aussi longtemps que la variation du *flux inducteur*, mais cesse en même temps que cette variation.

D'une façon plus précise, toute variation de flux fait naître une *force électromotrice d'induction* qui donne elle-même naissance à un courant, si la spire est fermée.

Force électromotrice (f. é. m.) et courant sont d'autant plus élevés que la variation du flux est plus grande et plus rapide. Le sens du courant induit est tel qu'il engendre des lignes de force qui tendent à s'opposer à la variation du flux qui le produit. C'est la *loi de Lenz* qui peut s'exprimer ainsi :

« Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance (1). »

Si $d\Phi$ (exprimée en maxwells) désigne la variation du flux inducteur Φ pendant le temps très petit dt (en secondes), la f. é. m. induite E (en volts) a pour valeur :

$$(7) \quad E = - \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}$$

On peut obtenir la variation de flux $d\Phi$ de plusieurs façons :

1° Soit que le flux étant constant, on déplace convenablement la spire dans le champ. C'est le cas des dynamos dont les enroulements inducteurs alimentés en courant continu donnent en principe un champ constant que traversent les spires constituant l'induit ;

2° Soit que le flux soit variable. C'est le cas des transformateurs statiques dans lesquels le flux inducteur est obtenu

(1) Cette loi n'est d'ailleurs qu'un aspect particulier du principe de la conservation de l'énergie et de la loi générale de la nature qui veut que tout phénomène tende à s'opposer à la cause qui le produit ; ceci revient à dire qu'à toute action correspond une réaction.

au moyen du courant alternatif (fig. 14) qui circule dans l'enroulement primaire et qui, par le fait de sa variation (sinusoïdale en principe), donne naissance à un flux variable qui fait naître dans le secondaire une f. é. m. induite de même nature.

Si le circuit du secondaire est fermé sur lui-même, la f. é. m. E donne naissance à un courant dont la valeur I est fixée par la relation :

$$(8) \quad I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

$\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ s'appelle *impédance* (ohms) du circuit secondaire ;
 R est la *résistance* ohmique (ohms) du dit circuit ;
 L est l'*inductance* (henrys) du circuit ;
 L ω est la *réactance* (ohms) du circuit ;
 $\omega = 2 \pi f$ est la *pulsation* du courant ;
 f est la *fréquence* (nombre de périodes par seconde).

PRINCIPE DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Dans le chauffage par résistance, on applique aux extrémités A et B d'un conducteur de résistance R une tension U ;

d'où un courant $I = \frac{U}{R}$ et un effet Joule : $P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$.

On peut songer à remplacer la tension U par une f. é. m. induite E qui provoquera dans le conducteur AB préalablement *fermé* sur lui-même un courant I et un effet Joule $P = RI^2$, R désignant la résistance ohmique du conducteur.

On note, en passant, que le *chauffage par induction* n'est qu'un cas particulier du *chauffage par résistance*. Ici, on utilise directement la source de courant ; là, on a recours à l'intermédiaire d'un appareil d'induction.

VARIATION DE LA PUISSANCE

La formule précédente (7) montre que E, donc P, sera d'autant plus grande que :

$d\Phi$ sera plus élevée, pour une même valeur de dt ;

dt sera plus petite, pour une même valeur de $d\Phi$;

d'où deux moyens de faire varier E et P.

1° Action sur $d\Phi$.

On peut renforcer le circuit magnétique en ayant recours à du métal à forte perméabilité, ce qui a pour effet de faire dévier les lignes de force, de les grouper et de les guider. Nous avons vu que l'air a une faible perméabilité, c'est-à-dire qu'il offre une grande résistance au passage du flux. Par contre, certains aciers ont une excellente perméabilité. Un exemple d'appli-

cation de ce mode de renforcement de $d\Phi$ est celui du transformateur statique.

Un transformateur monophasé par exemple (fig. 15) est constitué essentiellement par un circuit magnétique M en tôles d'acier spécial sur les noyaux duquel sont disposés :

- un enroulement primaire comportant n_1 spires ;
- un enroulement secondaire comportant n_2 spires.

Si E_1 est la tension appliquée au primaire et E_2 la f. é. m. induite au secondaire, on aura :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{et} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2}$$

I_1 et I_2 désignant respectivement les courants primaire et secondaire. Ces relations ne sont pas rigoureusement exactes,

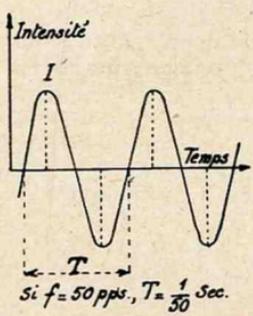


Fig. 14

Fig. 15 →

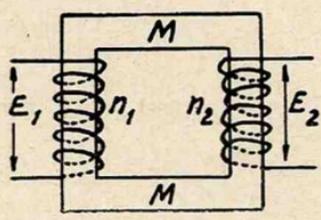
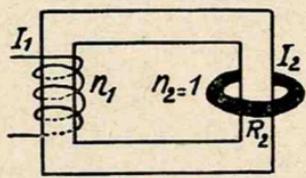


Fig. 16 →



mais, en première approximation, elles sont suffisantes. Elles supposent en particulier que l'on ne tient pas compte de la chute ohmique de tension dans le primaire et elles reviennent à admettre que la puissance restituée au secondaire $P_2 = E_2 I_2$ est égale à la puissance $P_1 = E_1 I_1$ fournie au primaire, ce qui n'est pas très éloigné de la vérité, car les transformateurs ont un excellent rendement.

Si le secondaire (fig. 16) ne comporte qu'une seule spire, $n_2 = 1$, on a :

$$(9) \quad E_2 = \frac{E_1}{n_1} \quad \text{et} \quad I_2 = n_1 I_1$$

On peut ainsi transformer une puissance électrique donnée, fournie sous une tension élevée et une intensité relativement faible, en une puissance électrique modifiée, recueillie sous une tension très faible et une intensité très grande. Par suite, on peut obtenir dans une résistance ohmique R donnée un effet

Joule important, sans avoir à transporter une intensité considérable à une faible tension, ce qui pourrait présenter de sérieuses difficultés de réalisation.

D'où l'idée d'utiliser pour la fusion des métaux (faible valeur de R) un simple transformateur dont le secondaire est constitué par une spire unique formée par le métal à fondre.

Un tel appareil est appelé four à basse fréquence ou plus exactement four à circuit magnétique fermé.

2° Action sur dt .

On peut obtenir des variations rapides du flux en ayant recours à des courants à haute ou à très haute fréquence.

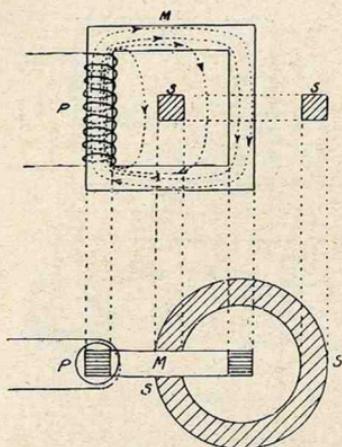


Fig. 17

En général, les courants fournis par les distributeurs d'énergie électrique (« Secteurs ») ont une fréquence de 50 p.s.; les alternances de courant (fig. 14) se reproduisent alors 50 fois par seconde (basse fréquence).

Si $f = 1\ 000$ p.s. par ex., dt sera 20 fois plus petit que si $f = 50$ p.s.

En principe, les fours dits « à haute fréquence » présentent une certaine analogie avec les transformateurs sans circuit magnétique fermé utilisés en radio-électricité.

PRINCIPAUX MODES DE CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Les indications succinctes qui précèdent permettent de distinguer :

1° Les fours avec circuit magnétique fermé, dénommés communément, mais à tort, « fours à basse fréquence » ;

2° Les fours sans circuit magnétique fermé, dits « fours à haute fréquence ».

Ces deux types d'appareils ont des propriétés communes ; ils sont toutefois assez dissemblables et il est nécessaire de les examiner séparément.

FOURS A CIRCUIT MAGNÉTIQUE FERMÉ

Pratiquement, le four à circuit magnétique fermé n'est guère utilisé que pour la fusion des métaux.

C'est, en somme, la combinaison d'un transformateur à spire unique secondaire et d'un four à résistance constitué par la matière à fondre formant précisément la spire secondaire (fig. 16 et 17).

Remarques importantes.

1. Pour limiter le plus possible les fuites magnétiques, c'est-à-dire pour réduire le nombre de lignes de force qui ne traversent pas la spire secondaire S ou qui se détachent du circuit magnétique M (fig. 17), on cherche à rapprocher le plus possible l'enroulement primaire de la matière à traiter ; on place donc primaire P et secondaire S sur le même noyau, suivant l'une des dispositions de la figure 18 ;

2. Pour éviter d'une part un échauffement exagéré du circuit magnétique, ce qui entraînerait une diminution de la perméabilité magnétique de ce circuit, d'autre part toute détérioration du four et en particulier du primaire, on est conduit à ménager, entre le réfractaire qui contient le métal en fusion et le circuit magnétique, un intervalle dans lequel on insuffle de l'air.

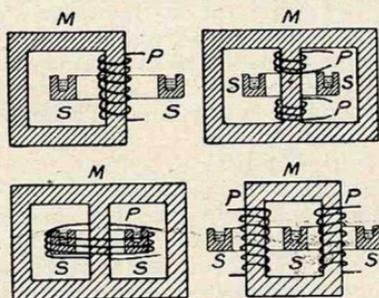


Fig. 18

Puissance secondaire.

$$P_2 = R_2 I_2^2 = R_2 \frac{E_1^2}{n_1^2 (R_2^2 + L_2^2 \omega^2)}$$

d'après les formules (8) et (9), l'indice 2 se rapportant aux éléments de la spire secondaire.

Rendement électrique.

C'est le quotient de la puissance P_2 par la puissance active P_1 absorbée par le primaire. Il varie, généralement, de 60 à 80 p. 100 suivant le type de four.

Facteur de puissance.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} = \frac{I}{\sqrt{I + \left(\frac{L\omega}{R}\right)^2}}$$

R et L, étant respectivement la résistance ohmique et l'impédance globales de l'ensemble du four.

Un point important : si la capacité du four augmente, ou bien la section de la veine liquide formant secondaire doit être augmentée et R diminue, ou bien la longueur de cette veine doit être prise plus grande et L augmente rapidement ; d'où baisse de $\cos \varphi$ dans les deux cas.

Deux solutions pour y remédier :

a) Diminuer la fréquence f et par suite ω , car $\omega = 2\pi f$, solution adoptée dans le four Kjellin (fig. 19) utilisé en sidérurgie, dans lequel la fréquence adoptée variait de 25 à 5 p.s. suivant la capacité, ce qui obligeait à installer des groupes encombrants et coûteux de production de courant à très basse fréquence ;

b) Accroître R tout en conservant une valeur convenable de L, solution adoptée dans les fours Röchling-Rodenhauser (fig. 20), Compagnie française des Métaux (fig. 21), Ajax-Wyatt (fig. 22) et Russ (fig. 23).

Dans le cas de la figure 20 on a en somme affaire à deux fours monophasés accolés, dont les canaux se réunissent pour former une cuve centrale plus large (intérêt pour l'affinage en particulier, ces fours étant utilisés en sidérurgie ; ils peuvent d'ailleurs être triphasés).

Dans le cas de la figure 21, trois noyaux magnétiques parallèles, réunis en haut et en bas par des culasses, portent chacun un enroulement primaire. Ils sont entourés par les canaux secondaires.

Dans le cas des figures 22 et 23, la plus grande partie du métal liquide (en général laiton) se trouve dans un réservoir relié au canal secondaire ; ce dernier peut par suite être de faible section. Cette disposition présente d'autres avantages primordiaux.

Effet de pincement.

Soit une veine liquide (fig. 24) placée dans une rigole et parcourue par un courant. Si l'on fait croître l'intensité de ce courant, on observe que la surface du liquide se creuse au milieu, en forme de V, et que, pour une certaine valeur de l'intensité, le courant peut même se trouver coupé, quitte à se rétablir aussitôt pour être coupé de nouveau, et ainsi de suite.

Ce phénomène auquel on a donné le nom d'effet de pincement (« pinch effect », a gêné pendant longtemps le développe-

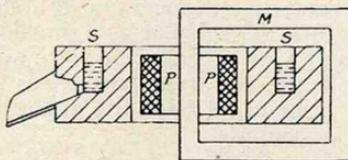


Fig. 19

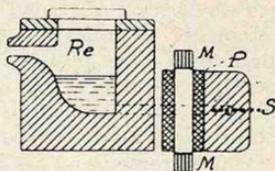


Fig. 23

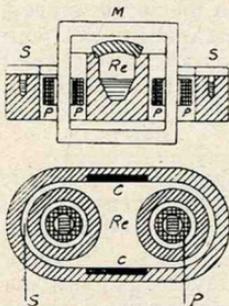


Fig. 20

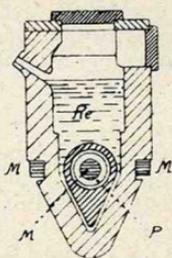


Fig. 22]

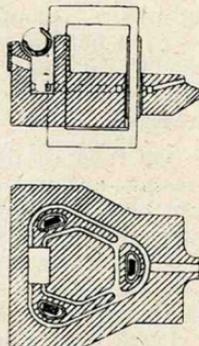
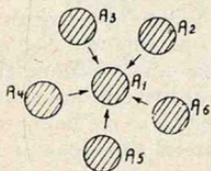


Fig. 21



Fig. 24



← Fig. 25

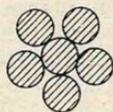


Fig. 26 →

ment des fours à basse fréquence (crépitements accompagnés de projections de métal, solidification à craindre si le métal est surmonté de laitier ; impossibilité d'augmenter la section du canal, ce qui aurait entraîné une diminution de $\cos \varphi$).

L'explication en est la suivante : la veine liquide peut être considérée comme constituée (fig. 25) par un grand nombre d'éléments de courant A_1, A_2, \dots , parallèles (vus en bout sur la fig.) et parcourus par des courants de même sens. Il s'exerce entre eux des forces électromagnétiques qui tendent à les rapprocher et qui varient en fonction directe des intensités des

courants en jeu et en fonction inverse des distances qui séparent les éléments. Ces éléments étant libres de se déplacer, la pression radiale ainsi créée pousse le liquide vers le centre, de sorte que la section se rétrécit (fig. 26). S'il y a une irrégularité dans la rigole, il y aura constriction en ce point, et par suite augmentation de la densité de courant et coupure.

On a pu remédier à ces inconvénients grâce à des dispositions telles que celle de la figure 27. La pression hydrostatique due à la masse métallique qui se trouve dans le réservoir *Re* s'oppose à la coupure du courant dans le canal. On a même pu, grâce à cet artifice, recourir à une faible section de canal (intérêt pour $\cos \varphi$) et par suite à de fortes densités de courant (intérêt pour l'emploi du four, en particulier au point de vue métallurgique).

Brassage.

On constate dans les fours à basse fréquence une sorte de brassage automatique du métal liquide. Ce phénomène intéressant pour le métallurgiste se produit ou peut se produire sous l'effet de plusieurs causes :

— 1. Tout conducteur flexible fermé traversé par un courant a tendance à embrasser une surface maximum sous l'action du champ qu'il crée. Ce flux provenant du secondaire exercera donc sur le bain des forces telles que *F* (fig. 28) ;

— 2. Les courants primaire et secondaire sont sensiblement en opposition de phase et, par suite, il en est de même des flux correspondants Φ_1 et Φ_2 . Si, pour fixer les idées, nous supposons Φ_1 maximum et dirigé de bas en haut à l'intérieur de l'enroulement primaire, donc de haut en bas à l'extérieur de cet enroulement, Φ_2 sera au même moment sensiblement maximum et dirigé de haut en bas à l'intérieur de l'enroulement secondaire. Φ_1 et Φ_2 seront donc de même sens au voisinage du secondaire et leurs effets s'ajouteront, c'est-à-dire que les forces centrifuges seront renforcées par l'action de Φ_1 ;

— 3. D'autre part, l'action de la pesanteur s'exerce sur le bain sous forme de forces telles que *P*.

En définitive, en tout point, le bain sera soumis à l'action de la force résultante *R* de *F* et *P* et sa surface prendra une certaine inclinaison (fig. 29) ; mais cette force résultante n'est pas constante, car les forces *F* s'annulent deux fois par période, donc ($2f$) fois par seconde, et le bain aura tendance à redevenir horizontal à ces moments ;

— 4. Les forces d'inertie limitent les mouvements qui viennent d'être indiqués ;

— 5. La surface du bain, en contact avec l'air, est plus froide et par conséquent plus dense. Par suite, une portion du métal situé en *A* tend à descendre vers *B*, d'où un mouvement

du métal dans le sens de la flèche pointillée (fig. 29), le métal froid descendant et le métal chaud remontant ;

— 6. Dans certains fours (Ajax-Wyatt par ex.), le canal de fusion (fig. 22) a une forme spécialement étudiée pour assurer les meilleures conditions de circulation du métal liquide ; les trois effets (pincement, mouvement dû à la différence de température aux différents points de la masse liquide et répulsion électrodynamique entre les courants de sens contraire aux points de raccordement du canal ajoutent leurs effets).

Ces mouvements de brassage sont plus ou moins intenses et ils sont, le plus souvent, étudiés et guidés par les constructeurs de façon à assurer une grande homogénéité du bain et un certain mouvement de thermo-siphon, sans pour cela nuire par trop à la bonne tenue du réfractaire constituant le canal.

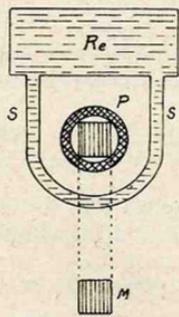


Fig. 27

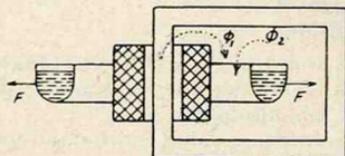


Fig. 28

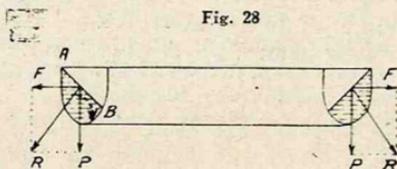


Fig. 29

Différents types de fours.

Tous ces fours sont alimentés en courant à basse fréquence. On peut en distinguer deux types :

— a) **Les fours à canal horizontal** (à rainure découverte, donc à métal non en charge) dans lesquels la surface du métal est libre. Ex. : four Kjellin (fig. 19) et à un canal, four Hiorth (fig. 30) à deux canaux réunis, four Röchling-Rodenhauer (fig. 20), également à double canal secondaire (ce dernier four comporte en plus des résistances supplémentaires de chauffage ; c'est donc un four mixte à induction et à résistance).

Les fours à canal horizontal sont en principe monophasés ; dans certains cas, on a alimenté ces fours en courant triphasé soit en passant par l'intermédiaire du courant triphasé (emploi d'un transformateur spécial alimentant le four monophasé,) soit en utilisant un four triphasé à 3 enroulements primaires et un seul bain.

— b) **Les fours à canal submergé** (en charge).

Le principe de ces fours est dû à Saladin (four Schneider à acier, fig. 31) : le canal de chauffage comprend deux branches reliées à un réservoir R_e , le métal fond dans les branches et la chaleur se transmet dans le réservoir, au début par conduction et ensuite par circulation du métal fondu.

Appartiennent à cette catégorie les fours Compagnie française des Métaux, Ajax-Wyatt (Société générale d'Applications Electrothermiques), Russ, Siemens.

On peut les classer comme suit :

- 1. Les fours à canal vertical, type Ajax-Wyatt (fig. 22) ;
- 2. Les fours à canal horizontal ou incliné : ex. four Russ (fig. 23) à un canal hélicoïdal ou à plusieurs canaux, four Siemens.

Ces fours sont monophasés ou triphasés.

Applications.

Les fours de la première catégorie ont été utilisés surtout pour la fusion des métaux ferreux ; pratiquement, ils sont actuellement abandonnés.

Les fours à canal submergé sont surtout utilisés pour la fusion du laiton ; leur domaine tend à s'étendre, en particulier pour la fusion des alliages légers.

A signaler également quelques autres applications du chauffage par induction à basse fréquence, par ex. pour le chauffage des pièces métalliques de presses.

Puissances courantes usuelles : 40 à 240 kW pour les fours de laitonnerie de 150 à 1 200 kg.

FOURS SANS CIRCUIT MAGNÉTIQUE FERMÉ

Un tel four est en somme un simple transformateur dans l'air (fig. 32).

Le flux n'étant pas renforcé par la présence de fer à haute perméabilité magnétique, on doit avoir recours à des variations très rapides du flux, donc à un courant alternatif de fréquence élevée, afin d'obtenir une valeur suffisante de la f. é. m. E.

En quelque sorte, la suppression du circuit magnétique est compensée par l'augmentation de la fréquence f du courant d'alimentation.

Effet de peau (effet Kelvin).

Les courants alternatifs ont tendance à se localiser dans les régions périphériques des conducteurs. Aux basses fréquences, cet effet pelliculaire (« skin effect ») peut généralement être négligé. Il n'en est pas de même dans les fours HF à cause d'une part de la grande valeur de f , d'autre part de l'intensité des courants mis en jeu.

Soit, pour fixer les idées, un cylindre métallique (fig. 33) soumis à l'action d'un champ inducteur parallèle à son axe, obtenu par ex. au moyen d'un enroulement primaire (fig. 34). Le cylindre sera le siège de courants induits (dénommés « courants de Foucault ») qui, aux hautes fréquences envisagées, peuvent être considérés comme localisés dans une couche superficielle dite « couche de peau » dont l'épaisseur ε est donnée par la formule de Kelvin :

$$(10) \quad \varepsilon = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

ρ désignant la résistivité électrique de la substance constituant le secondaire ;

μ sa perméabilité magnétique ;

f la fréquence du courant inducteur (pulsation $\omega = 2\pi f$).

L'épaisseur ε croît avec la résistivité de la substance et décroît si la fréquence augmente.

La formule précédente ne vaut toutefois que si ε est très petite par rapport au rayon du cylindre ou encore si ε est égale ou sensiblement égale à ce rayon.

Puissance.

Dans ces conditions, on peut admettre que tout se passe comme si le cylindre secondaire était remplacé par un tube (« coque fictive ») de hauteur h , de diamètre d et d'épaisseur ε .

La résistance électrique d'un tel cylindre a pour valeur (formule 6 indiquée dans la première partie de cette étude) :

$$R_2 = \frac{\pi d}{h\varepsilon} \rho$$

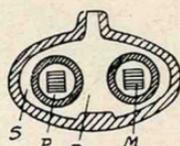


Fig. 30

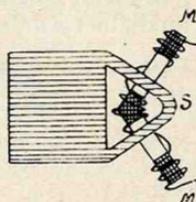


Fig. 31

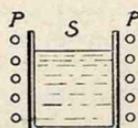


Fig. 32

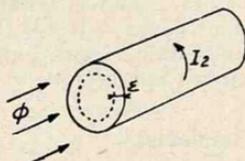


Fig. 33

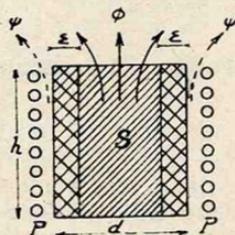


Fig. 34

d'où

$$(11) \quad P_2 = R_2 I_2^2 = n_1^2 I_1^2 \frac{\pi d \rho}{h \epsilon} = n_1^2 I_1^2 \frac{d \sqrt{\mu f \rho}}{2 h}$$

car

$$I_2 = n_1 I_1$$

formule qui montre que P_2 est proportionnelle :

à la racine carrée de la fréquence f ;

à la racine carrée de la résistivité ρ ;

au diamètre d du cylindre auquel on a assimilé la substance.

P_2 est également fonction du quotient $\frac{n_1^2}{h}$; pratiquement, quant h augmente, on augmente également n_1 et P_2 croît.

La formule approximative précédente est valable si ρ est faible. C'est le cas des métaux et de leurs alliages solides ou fondus.

Elle n'est plus exacte si ρ est élevée, par ex. pour du graphite.

La théorie des fours HF a été faite (vers 1920) en France par M. Ribaud et en Amérique par M. Northrup. Elle est complexe et sort du cadre que nous nous sommes fixé.

Dans le cas du chauffage des solides, il existe un état de division de la substance pour lequel la puissance recueillie est maximum.

Il faut encore remarquer que, pour les substances magnétiques, μ peut atteindre de grandes valeurs (par ex. : $\mu = 1\ 000$ pour l'acier à froid) et que, par suite, on peut alors donner à f une faible valeur, par ex. 50 p/s. On obtient ainsi un four sans circuit magnétique et cependant à basse fréquence.

Rendement.

Le rendement électrothermique ou global des fours à haute fréquence est élevé, par ex. de l'ordre de 80 à 85 p. 100 pour un four de fusion d'acier (compte non tenu du rendement du générateur).

Facteur de puissance.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

$\omega = 2 \pi f$ a une valeur élevée. Il en est de même de L , par suite de l'importance du flux de fuite ψ qui s'échappe dans l'intervalle important occupé par le garnissage réfractaire entre primaire et secondaire (fig. 34). $\cos \varphi$ a donc une très faible

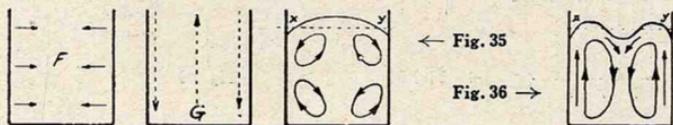
valeur, par ex. 0,1. D'où la nécessité, pour les constructeurs de fours HF, de prévoir des condensateurs statiques pour améliorer $\cos \varphi$ et éviter des dépenses prohibitives d'installation.

Brassage.

Dans les fours HF de fusion, le métal fondu est soumis à un brassage automatique. L'explication en est la suivante :

— a) Cas d'un four monophasé. Les courants secondaires sont concentrés à la périphérie (fig. 35). Sous l'action du courant primaire, ils ont tendance à être repoussés vers le centre (flèches F), car courant primaire I_1 et courants secondaires I_2 sont de sens contraires ; d'où, puisque le liquide est incompressible, surélévation du bain au milieu (flèches G ; xy représente le niveau horizontal normal). L'importance des mouvements de brassage est fonction directe de la puissance et du diamètre du four et fonction inverse de la fréquence et de la résistivité de la charge (1) ;

— b) Cas d'un four triphasé. On a affaire à un champ tournant qui produit un mouvement du genre de celui indiqué dans la figure 36 (1).



Pour utiliser au mieux ces mouvements très utiles de brassage, on peut soit agir sur la valeur de la fréquence, soit combiner dans un même four les efforts radiaux dus à un courant monophasé et les efforts tangentiels causés par un courant polyphasé. Dans ce dernier cas, le primaire peut être alimenté successivement ou simultanément par plusieurs sources de périodicité différente (*fours à double ou à triple fréquence*), par ex. par une source monophasée HF à 1 000 ou 2 000 p:s utilisée pour la fusion et une source triphasée BF à 16 ou 25 p:s utilisée pour le brassage intense nécessaire pour accélérer l'affinage du métal. On obtient ainsi des réglages séparés du chauffage et du brassage (ex. fours ASEA).

(1) Les figures 35 (à gauche) et 36 ne sont données qu'à titre indicatif. Il ne faut attacher aux circuits des flèches indiquées qu'une valeur suggestive et non pas une valeur certaine.

Production des courants à haute fréquence.

Les courants à fréquence élevée peuvent être obtenus :

— a) Au moyen de producteurs d'ondes entretenues, à savoir :

1. Arc chantant (arc Poulsen) ;
2. Alternateur ;
3. Lampe thermoïonique.

— b) Au moyen de producteurs d'ondes amorties :

4. Installation à étincelles (à éclateur).

Pratiquement, on a eu tout d'abord recours aux postes à éclateur qui ne sont guère utilisés que pour les laboratoires ; puis aux alternateurs qui permettent d'obtenir les puissances plus élevées demandées par l'industrie ; quant aux lampes, elles ont été jusqu'alors employées seulement pour des applications particulières.

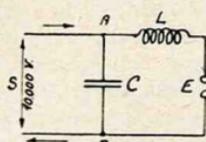
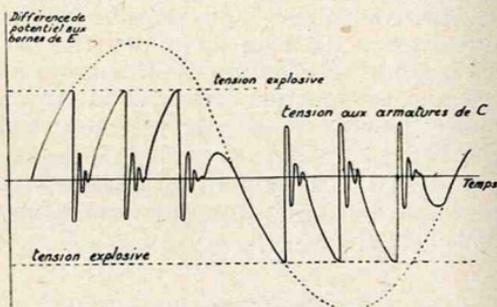
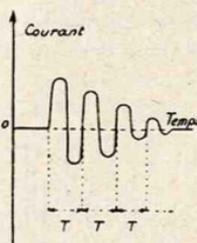


Fig. 37



← Fig. 38

↑ Fig. 39

Générateurs à étincelles.

Considérons le schéma (fig. 37) d'une installation HF à étincelles. La source S de courant continu à tension élevée charge la capacité C dont la différence de potentiel aux bornes A et B s'accroît. Lorsque cette différence de potentiel atteint une valeur suffisante, la capacité se décharge brusquement dans une étincelle qui jaillit entre les pointes de l'éclateur E. La capacité se recharge et ainsi de suite. On obtient ainsi une série de décharges représentées par des courbes du genre de celle de la figure 38 (1), séparées par des intervalles de temps beaucoup plus longs que la durée d'une étincelle.

(1) La période T qui sépare deux oscillations consécutives de courant dans la figure 38 est donnée par la relation : $T = 2\pi\sqrt{CL}$, avec $L = \frac{\pi^2 n^2 d^2 10^{-9}}{h}$, L désignant l'inductance de l'enroulement du jour, n le nombre de spires, d le diamètre et h la hauteur. Pour un jour de hauteur donnée, T est donc proportionnel à n, d et \sqrt{C} .

On a intérêt à remplacer la source de courant continu par une source de courant alternatif, un transformateur permettant d'obtenir facilement la tension élevée nécessaire.

Suivant le réglage de la distance des pôles de l'éclateur, on pourra avoir une étincelle chaque fois que la tension passera par sa valeur maximum (soit 100 fois par seconde pour du courant à 50 p/s) ou même plusieurs étincelles par période (fig. 39).

L'énergie mise en jeu à chaque décharge a pour valeur : $\frac{I}{2} CV^2$, C désignant la capacité et V la tension aux bornes de la capacité.

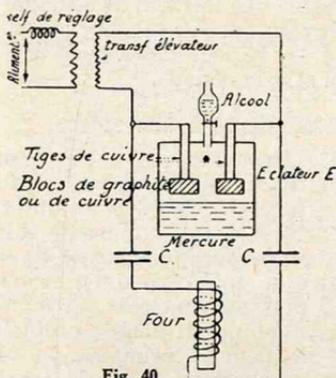


Fig. 40

Alimentation triphasée

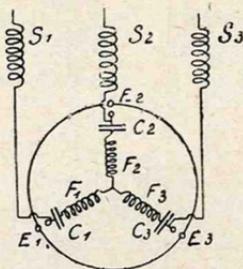


Fig. 41

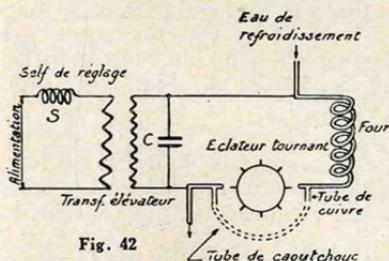


Fig. 42

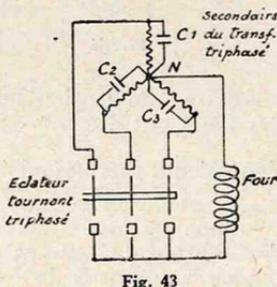


Fig. 43

L'énergie totale dépendra par suite de la tension de la source à potentiel élevé et du nombre d'étincelles par seconde, c'est-à-dire du réglage de l'éclateur.

Une installation à étincelles comporte donc un transformateur élévateur de tension, un condensateur et un éclateur.

Il existe deux sortes d'éclateurs :

— a) **L'éclateur fixe.** La figure 40 donne le schéma de montage d'une installation Ajax-Northrup de 2 à 35 kW. Au-dessus de 35 et jusqu'à 105 kW, on a recours à une alimentation en courant triphasé avec montage étoile de l'installation (fig. 41) ;

— b) **L'éclateur tournant.** Les figures 42 et 43 se rapportent à des installations Ribaud. L'éclateur (monophasé, fig. 42, ou triphasé, fig. 43) est refroidi par un courant d'eau. La puissance mise en jeu peut être réglée par la vitesse de l'éclateur, donc du moteur qui l'entraîne.

Pratiquement, le réglage de la puissance des générateurs à étincelles est généralement obtenu par les moyens suivants :

- changement de la vitesse de rotation de l'éclateur (tournant) ;
- changement de la longueur de coupure de l'éclateur ;
- réglage de la tension par la self de réglage.

Générateurs à alternateur.

L'installation complète comporte un alternateur à haute fréquence (généralement du type homopolaire à fer tournant, fonctionnant avec une tension de service de 500 à 3 000 V), entraîné le plus souvent par un moteur asynchrone triphasé ordinaire, l'enroulement primaire du four et une batterie de condensateurs destinée à améliorer le facteur de puissance. (Les brevets de base

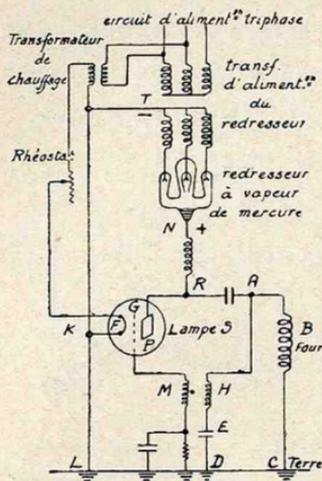


Fig. 44

relatifs à l'application des alternateurs HF pour l'alimentation des fours ont été pris par M. Ribaud et par Ajax-Northrup).

Générateurs thermoïoniques.

L'installation comporte (schéma simplifié de la fig. 44) :

— d'une part, un circuit oscillant ABCDEHA qui est le circuit d'utilisation du courant à haute fréquence et qui contient la bobine primaire B du four ;

d'autre part, le système S constitué par une lampe triode en verre ou métallique (avec des circuits annexes d'alimentation et de connexion du filament F, de la grille G et de la plaque P) et une bobine M en couplage magnétique avec la bobine H ;

enfin, le réseau à courant continu NQ avec son redresseur branché sur le réseau à courant alternatif d'alimentation de l'ensemble de l'installation.

Les oscillations s'amorcent dans le circuit oscillant lorsqu'on allume la lampe. Lorsque le régime stable est atteint, elles sont entretenues par un courant d'entretien qui parcourt le trajet (PGFKLD — circuit oscillant — ARP).

L'énergie nécessaire pour entretenir les oscillations est fournie par le redresseur à courant continu qui produit le courant qui passe dans la lampe (la source de courant continu « joue le même rôle que, dans une horloge, le poids moteur, tandis que la grille joue le rôle de l'échappement » ; la grille est une « porte qui peut être, à volonté, ouverte, entr'ouverte ou fermée »).

Par action sur le transformateur T (ou sur une bobine d'induction), on peut faire varier la tension appliquée à la plaque (de l'ordre de 10 000 V par ex.) et par suite la puissance débitée. En agissant sur le réglage de H et E, on peut modifier la puissance débitée et la fréquence.

Fréquences usuelles (voir tableau III ci-dessous).

Générateur à éclateur	f de l'ordre de 10 000 à 100 000 p/s
— à alternateur	— 300 à 5 000 —
— thermoïonique	— 10 000 à 1 000 000 —

(voire davantage (par ex. 1 million de p/s))

TABLEAU III

Fréquences utilisées dans le chauffage par induction

Valeur usuelle de la fréquence p/s	Mode de production	Principales applications actuelles	
		Avec noyau magnétique fermé	Sans noyau magnétique fermé
Très basses fréquences : < 50..	Alternateur à « basse fréquence »	Fusion de l'acier	—
Normale des « Secteurs » : 50, quelquefois 25.....	Secteur (alternateur)	Fusion du laiton	Fusion des métaux blancs, traitements thermiques des métaux.
Moyennes : de 300 à 5 000	Alternateur dit « à haute fréquence »	—	Fusion du cuivre (300-500 p/s). Fusion de l'acier (2 000-5 000 p/s)
Hautes : de 10 000 à 100 000	Éclateur fixe ou tournant	—	Essais de laboratoire.
Très hautes : de 10 000 à 10 000 000	Lampe triode	Applications spéciales : par ex. : filage du latex, vulcanisation du caoutchouc.	

Principaux types d'appareils.

On peut distinguer, du point de vue du principe relatif au chauffage sur lequel ils reposent :

— a) **Les fours à induction directe (HF).**

Ce sont les fours usuels dont le secondaire est constitué par la substance à fondre ou à chauffer. Ils sont à HF (fig. 45-a).

Ex. : fours de fusion d'acier.

— b) **Les fours à induction indirecte (HF).**

La substance à traiter n'étant pas conductrice, on la place dans une enceinte S formant secondaire (creuset en graphite par ex.) dans laquelle se développent les courants de Foucault.

Ce sont en somme des fours à chauffage indirect. Ils sont à HF (fig. 45-b). Ex. fours de fusion de verre de silice.

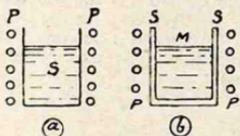


Fig. 45

— c) **Les fours à induction mixte (HF).**

La substance M placée dans un récipient et ce récipient S lui-même sont soumis à l'action de l'induction.

Ex. : creuset de graphite contenant un

alliage cuivreux : les courants de Foucault se développent à la fois dans le graphite (chauffage indirect) et dans le métal (chauffage direct interne). Ce sont des appareils à HF (fig. 45-b).

— d) **Les fours à secondaire magnétique (BF).**

L'épaisseur de la couche de peau ε (formule 10) est inversement proportionnelle à la racine carrée de la perméabilité magnétique et la puissance P_2 (formule 11) est proportionnelle à cette même racine carrée. D'où la possibilité d'obtenir une grande puissance calorifique dans un creuset en matière magnétique. Pour l'acier à froid, par exemple, $\mu = 1000$ (au lieu de 1 pour l'air et les réfractaires usuels). Les fours à creuset magnétique peuvent par suite être alimentés à BF, par ex. à la fréquence des secteurs (50 p/s en général), ce qui évite l'emploi de générateurs à HF. De tels fours peuvent assurer une certaine autorégulation de la température, car à une température donnée, le creuset cesse d'être magnétique et la valeur de μ devient très faible.

Ex. : fours de fusion de métaux blancs (SGAET, Ugine-Infra).

— e) **Les appareils divers (HF).**

On se propose soit de chauffer directement une pièce métallique intégralement (chauffage interne par courants de Foucault avec transmission de la chaleur et égalisation de la température éventuelles par conduction) ou superficiellement (grâce à l'effet de peau, procédé « Tocco » de trempe superficielle des

pièces d'acier), soit de chauffer indirectement une substance contenue dans une enceinte métallique susceptible d'être parcourue par des courants de Foucault.

Principales applications.

a) Chauffage direct HF :

Fusion des métaux, en particulier des aciers spéciaux, et également des métaux précieux, du nickel et de certains bronzes. Traitements thermiques superficiels (trempe). Essais de laboratoires : hautes températures (au delà de $1\ 300^{\circ}\text{C}$) et très hautes températures, chauffages très rapides, opérations dans le vide.

b) Chauffage indirect HF :

Fusion du verre de silice, graphitisation, fabrication des carbures métalliques.

c) Chauffage BF :

Fusion des métaux blancs.

d) Puissances :

Puissance maximum réalisée jusqu'à ce jour (à notre connaissance) : $1\ 500\ \text{kW}$, 7 à 8 t (four de fusion d'acier).

FOUR A INDUCTION A AUTORÉGULATION DE LA TEMPÉRATURE

Ce four (type Ugine-Infra, fig. 46), dont l'alimentation se fait à BF, se rattache aux deux classes de fours ci-avant définies.

Il comporte :

une bobine primaire inductrice A;

une enveloppe conductrice B, non magnétique (en acier au nickel par ex.) jouant le rôle de secondaire ;

un circuit magnétique comprenant d'une part un moufle C situé à l'intérieur du secondaire et d'autre part des paquets de tôle feuilletée D.

Lors de la mise en route, le four se présente comme ayant un noyau magnétique (première classe de fours).

Le moufle C s'échauffe d'une part directement sous l'action de l'hystérésis et des courants de Foucault, d'autre part, indirectement sous l'effet de la chaleur que lui transmet le secondaire B.

Le moufle C est en métal ferromagnétique qui à une certaine température (point de Curie) cesse d'être magnétique. A ce moment, le noyau magnétique formé par C et D se trouve

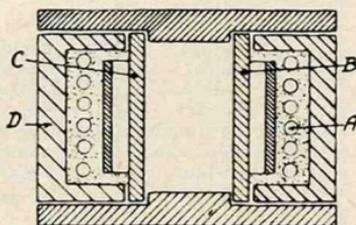


Fig. 46

LE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

repose sur

LA LOI DE JOULE

Le courant qui traverse un conducteur chauffe ce dernier (effet Joule)

Chauffage par résistance (Application d'une tension)

L'effet Joule se produit directement dans la résistance

chauffage interne

La substance à chauffer sert elle-même de résistance

chauffage externe

La chaleur se produit dans une résistance auxiliaire (résistor)

Résistances métalliques

1. Métaux communs;
2. Fe-Ni-Cr;
3. Ni-Cr à 80/20;
4. Fe-Cr-Al;
5. Métaux précieux.

Résistances non métalliques

1. Carbone;
2. Graphite;
3. Oxy-carbure de silicium;
4. Magnésie.

Chauffage par induction (induction d'une f. é. m.)

L'énergie électrique est transmise par induction dans la résistance où se produit l'effet Joule

avec circuit magnétique fermé

Effet Joule dans la spire secondaire fermée

fusion des métaux

canal découvert

autres applications

canal submergé

(1)

sans circuit magnétique fermé

courants de Foucault | pertes diélectriques

1. Réseau du Secteur BF;
2. Alternateur TBF et MF;
3. Eclateur HF;
4. Lampe triode THF.

(4)

(3)

LES PROPRIÉTÉS DE L'ARC

L'arc qui jaillit entre les électrodes dégage de la chaleur

Chauffage par arc

L'effet Joule est masqué

arc direct

1. Arc sur métal (fours à arcs);
2. Soudure à l'arc;
3. Arc dans la substance (air).

arc indirect

1. Arc libre (fours à arcs);
2. Soudure à l'arc.

(5)

(2)

LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE CERTAINS RAYONS

Chauffage par rayons infrarouges ou par rayons cathodiques

rayons IR

lampes à IR

rayons cathodiques

four à RC

- (1) Fours mixtes à induction et à résistance.
 - (2) Fours mixtes à arc et à résistance.
 - (3) Fours mixtes à induction à basse fréquence.
 - (4) Fours à induction à fréquence multiple.
 - (5) Fours fonctionnant à volonté soit à arc libre, soit à arc sur métal.

TABLEAU IV
Fours à induction à basse fréquence

Catégorie		Désignation
Avec circuit magnétique fermé	Canal découvert (surface libre du métal)	Hiorth (1)
		Kjellin (1)
	Canal suomergé (métal en charge)	Röchling-Rodenhauser (1)
		Saladin-Schneider (1)
Sans circuit magnétique fermé	} Secondaire magnétique ..	Compagnie Française des Métaux
		Ajax-Wyatt-SGAET (2)
Mixte	} Avec C. m. f. à froid ... } Sans C. m. f. à chaud ..	Russ, Siemens
		SGAET, Ugine-Infra
		Ugine-Infra

(1) Ces fours sont indiqués pour mémoire. On n'en construit plus, à notre connaissance, mais il y en a encore quelques-uns en service.
 (2) Les fours Ajax-Wyatt sont construits :
 en France par la Société Générale d'Applications Electrothermiques (SGAET) ;
 à l'étranger par les Sociétés Ajax, Electric-Furnace, Allgemeine-Elektizität-Gesellschaft (AEG).

coupé ; le flux est réduit (diminution de la perméabilité) considérablement et par suite aussi les courants induits. On se trouve alors en somme en présence d'un four de la deuxième classe.

Toutefois, dès que la température a tendance à baisser au-dessous du point de Curie, le magnétisme de C réapparaît, μ augmente, d'où accroissement du chauffage.

Il y a ainsi autorégulation de la température.

Par un choix convenable de la matière constituant le moufle ou par des artifices (barrettes métalliques ajoutées), on peut d'ailleurs modifier la valeur de la température désirée.

Le facteur de puissance de tels fours est assez faible.

Applications : certains traitements thermiques ou fusion de métaux à bas point de fusion.

Remarque. Les tableaux IV et V donnent quelques indications complémentaires sur les types de fours les plus connus.

TABLEAU IV (suite)
Fours à induction à basse fréquence

Particularités	Alimentation	Utilisations usuelles
Double canal. Canal unique. Double canal ; four mixte I et R. Canal unique.	m ou t m m (ou d) ou t m	Acier. Alliages non ferreux. Acier.
Canal horizontal. Canal dans un plan vertical.	t m ou t	Alliages non ferreux. Essentiellement laiton ; également, autres métaux et alliages (alliages de Cu ; Al ; Zn).
Canal horizontal ou incliné.	m ou t	Essentiellement laiton ; également autres métaux et alliages.
La régulation de la température peut être en quelque sorte rendue automatique.	m ou t	Fusion de métaux blancs.
Avec éléments autorégulateurs de la température.	m ou t	Essentiellement traitements thermiques.

*N. B. — Les fours que l'on rencontre habituellement en France sont :
soit des fours SGAET pour la fusion des métaux et alliages non ferreux et en particulier des laitons ;
soit des fours Russ pour la fusion des laitons ;
soit des fours Ugine-Infra, pour la fusion de certains alliages métalliques et pour certains traitements thermiques d'alliages métalliques.*

TABLEAU V
Dispositifs à induction à haute fréquence

Désignation	Nature	Utilisations usuelles
Ribaud (SGAET) (1) ..	Four à éclateur tournant HF	Laboratoire.
	Four à alternateur MF et HF	Sidérurgie et autres applications.
	Four à lampes triodes THF	Applications spéciales.
Ajax-Northrup	Four à éclateur fixe HF	Laboratoire.
	Four à alternateur MF et HF	Sidérurgie et autres applications.

(1) SGAET : Société Générale d'Applications Electrothermiques.

CHAUFFAGE A TRÈS HAUTE FRÉQUENCE

Le chauffage par induction tel que nous l'avons envisagé précédemment n'est autre qu'un simple transfert d'énergie électrique d'un enroulement primaire à une substance formant secondaire, suivi d'une transformation dans le secondaire de l'énergie électrique en énergie thermique, le transfert se réalisant par induction.

On pourrait croire qu'il est impossible de chauffer une matière isolante par un procédé analogue. Il n'en est rien.

Si on soumet certains diélectriques à un champ électrique de très haute fréquence (de 1 à 10 000 000 p/s) produit entre les armatures d'un condensateur (fig. 47), on constate expérimentalement que :

- les diélectriques s'échauffent ;
- l'échauffement se manifeste simultanément dans toute l'étendue de la matière ;

- pour une matière homogène, l'échauffement est uniforme si le champ est lui-même uniforme ;

- l'échauffement croît avec l'hétérogénéité électrique du mélange, avec l'intensité du champ et avec la fréquence, tout au moins jusqu'à un certain point.

La théorie de ce phénomène n'a pas encore été mise au point et elle paraît être fort complexe (1).

L'échauffement se produit (comme en diathermie) sous l'effet des pertes diélectriques dues aux variations très rapides du champ entre les armatures.

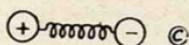
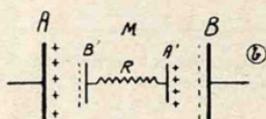
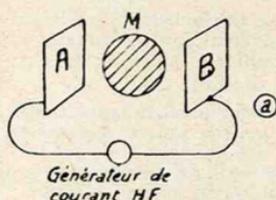


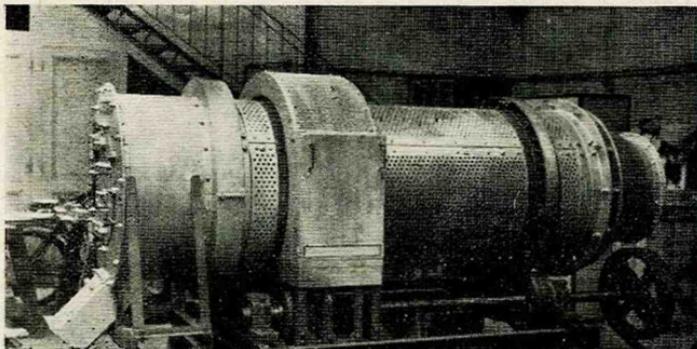
Fig. 47

(1) Théories de Wagner ou de Debye. Voir à ce sujet « Le chauffage industriel par les courants de haute fréquence », par M. LEDUC (conférence publiée par le Centre de Documentation chimique) et « Les courants à haute fréquence et leurs applications aux opérations industrielles », par M. LEDUC (Revue générale d'électricité, avril 1935).

Tout se passe comme si la substance à traiter constituait un second condensateur dont les armatures A' et B' étaient reliées par une résistance R (fig. 47 b). La tension U, provoquée par haute fréquence, donne dans la résistance un dégagement de chaleur $\frac{U^2}{R}$. Dans les corps dits isolants, R a une grande valeur, mais U peut être considérable ; d'autre part, l'effet de peau est pratiquement nul et toute la masse de la substance s'échauffe à la fin.

En somme, au lieu d'avoir affaire à une liaison inductive, comme dans ce qui précède, nous nous trouvons ici en présence d'une liaison capacitive.

(Suite page 55.)



Four tournant à induction BF pour le recuit de lait. 50 p.s. 50 kW

Applications réalisées ou envisagées : filage du latex, trempe du verre, vulcanisation du caoutchouc, etc.

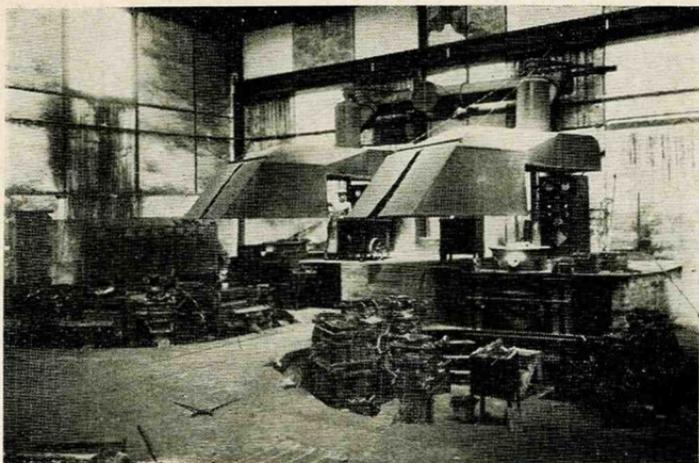
Il s'agit là d'un procédé nouveau (étudié peu de temps avant la guerre), susceptible de débouchés intéressants.

Remarque. Les photos des pages 55 à 60 donnent quelques exemples d'appareils à induction à basse ou à haute fréquence.

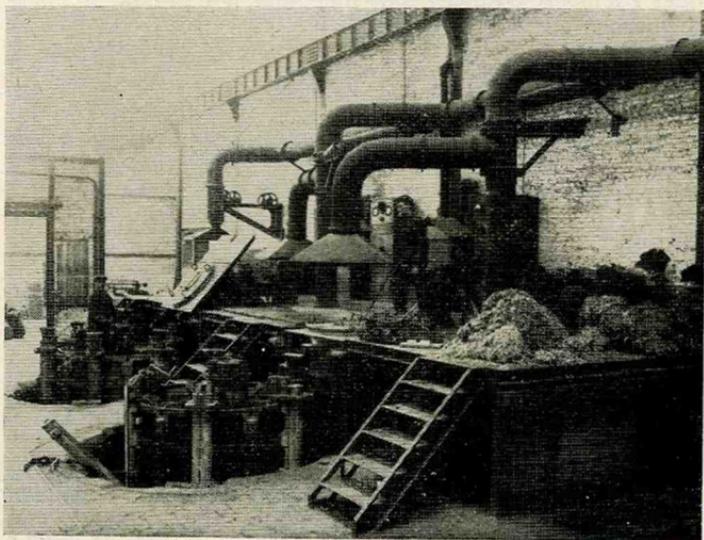
(Suite de la note de a page 54)

Théorie de Wagner : La perte diélectrique est due à l'hétérogénéité diélectrique (milieu électriquement trouble) de la substance (analogie avec un milieu optiquement trouble qui absorbe la lumière).

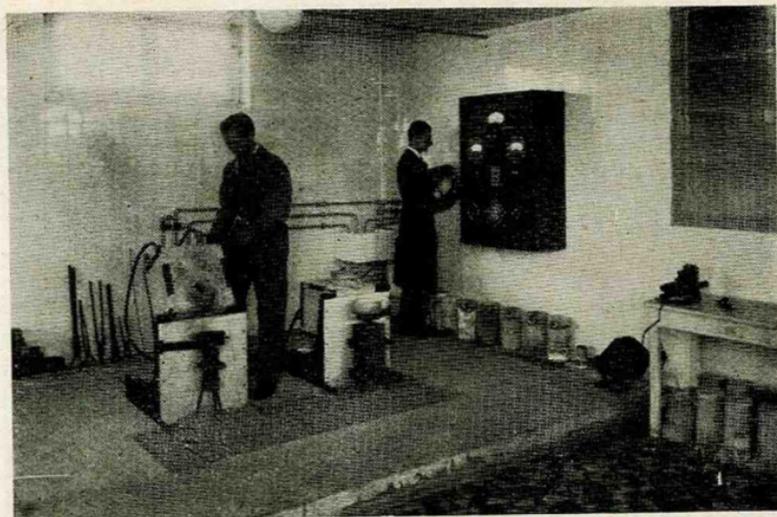
Théorie de Debye ou de l'échauffement d'un produit polaire en solution dans un solvant non polaire : une molécule polaire est constituée par une charge électrique nulle au total (fig. 47 b : somme des charges + et -), mais répartie de telle façon que cette molécule ne soit pas électriquement neutre dans ses actions antérieures ; elle peut être représentée par un doublet (fig. 47 c), système de deux masses d'électricité A et B égales et de signes contraires, distantes l'une de l'autre et reliées entre elles de façon plus ou moins rigide. Placées dans le champ d'un condensateur chargé, la charge (+) est attirée par l'électrode négative, la charge (-) par l'électrode positive ; le doublet tend à s'orienter dans le sens du champ ; mais ce dernier est alternatif ; d'où mouvement de pivotage du doublet, résistance au milieu à cause de sa viscosité, et par suite dissipation d'énergie correspondant à ce freinage ; d'où enfin chauffage de la substance.



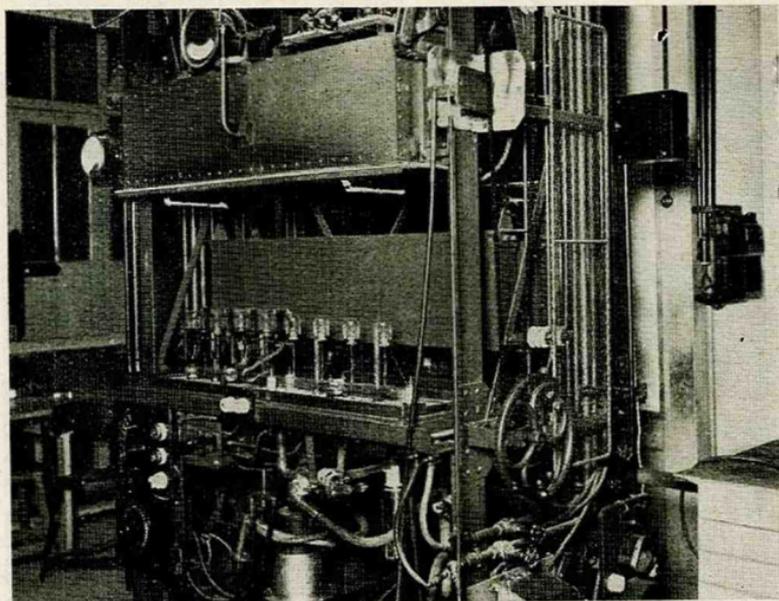
Fours à induction BF. Fusion de laiton. 2×300 kg. P = 2×75 kVA



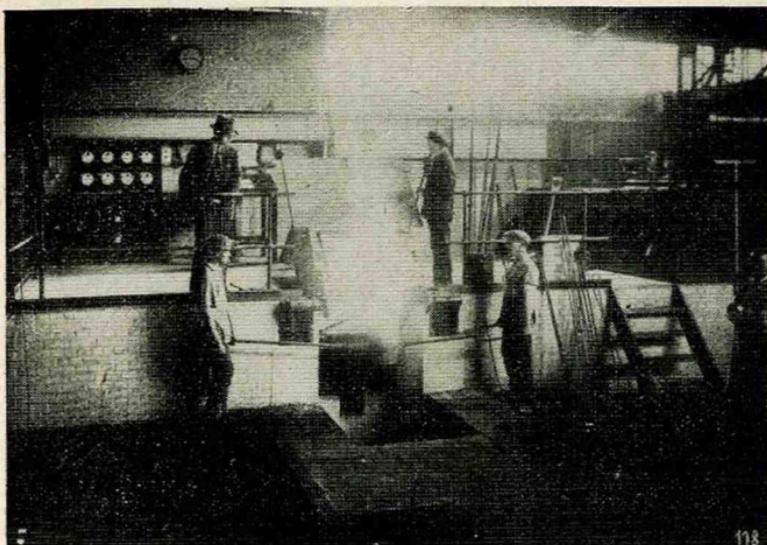
Fours à induction BF. Fusion de laiton. 2×300 kg. P = 2×80 kVA



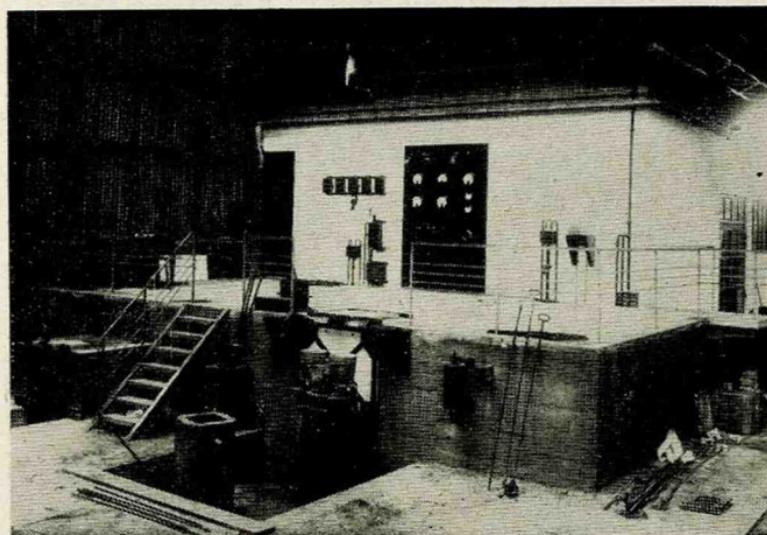
Fours à induction HF. Fusions diverses. 12 et 33 kg
Groupe générateur à éclateur tournant. 20 kVA



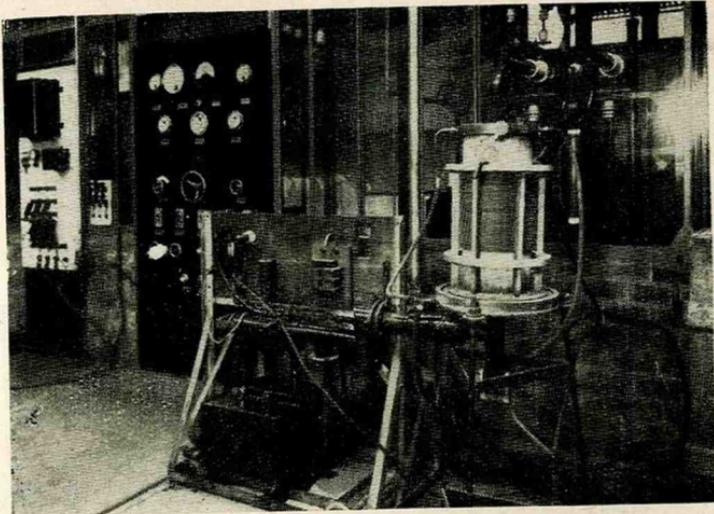
Poste de dégazage des métaux sous vide par dispositif de chauffage HF
Puissance : 20 kVA pour 2 postes



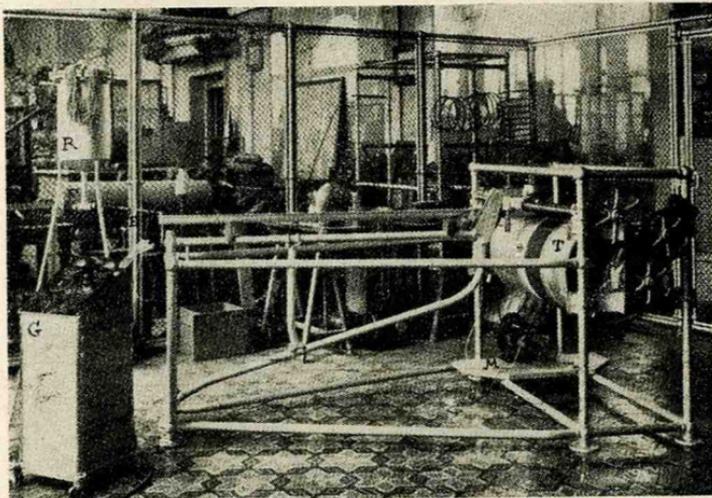
Four à induction HF. Fusion d'acier. 260 kg
Groupe générateur à alternateur. 150 kVA



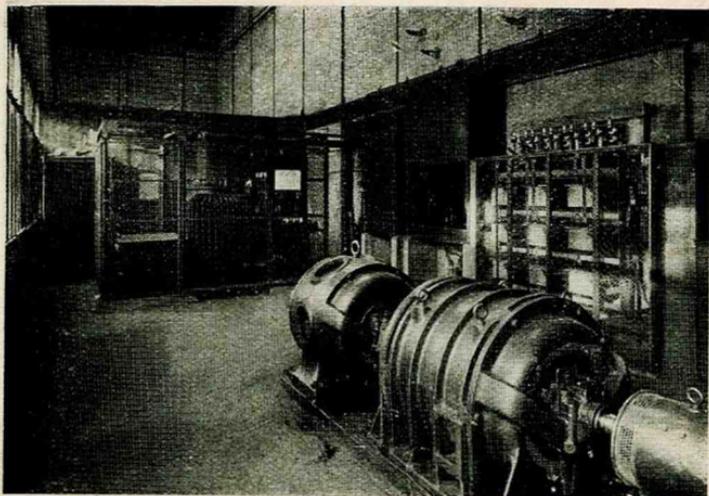
Four à induction HF. Fusion d'acier. 600 kg
Groupe générateur à alternateur. 300 kVA



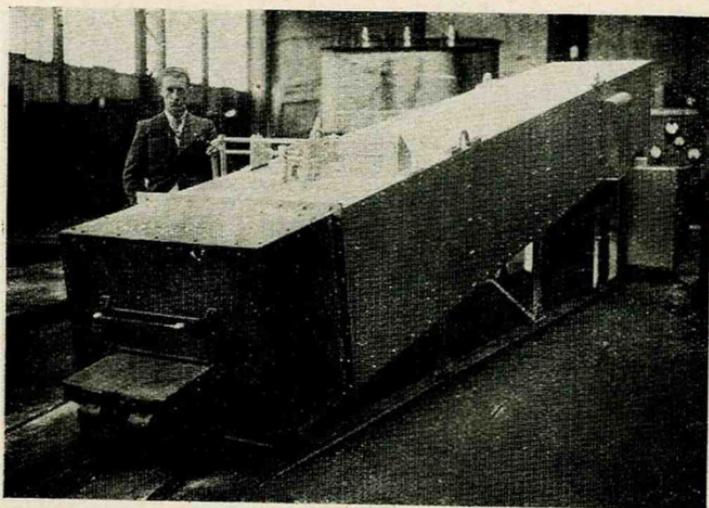
Four à induction THF
Groupe générateur à lampe triode. 50 kVA



Appareil de filage de latex THF
Générateur à lampe



Groupe de production de courant HF. 150 kVA



Four tunnel à induction pour traitements thermiques
Puissance 200 kW

C) Chauffage par arc (1)

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

Si l'on écarte l'une de l'autre (fig. 48) deux électrodes de charbon horizontales préalablement en contact et reliées aux deux pôles d'une source de courant continu, on constate qu'un « arc » se forme entre les deux électrodes ; c'est « l'arc voltaïque » dont la forme caractéristique est due au mouvement d'air chaud ascendant qui sou- lève la flamme.



Fig. 43

On peut d'ailleurs obtenir également un « arc » avec des électrodes constituées par une substance autre que du charbon et disposées verticalement ou autrement, ainsi qu'avec du courant alternatif au lieu de courant continu.

On constate que :

- 1° L'arc électrique est *lumineux* ;
- 2° L'arc produit de la *chaleur* ;
- 3° L'arc est *instable*.

On a par suite cherché à l'utiliser soit pour l'éclairage, soit pour le chauffage, mais il faut toujours prévoir des dispositions particulières pour assurer sa stabilité.

(1) Les lecteurs qui désireraient avoir des indications plus complètes sur cette question pourront se reporter aux articles et études parus dans les revues d'électricité ou de métallurgie ou dans les bulletins ou documents édités par les constructeurs de fours à arc ou d'appareils de soudure à l'arc. Signalons notamment la documentation française de : Compagnie Electro-Mécanique (études et conférences de M. GOURDON), Société générale d'Applications Electrothermiques-Alsthom (études et conférences de M. FOURMENT et de M. WILFART), Stein-Jeumont (études et conférences de M. BOUTIGNY). Rappelons l'étude de M. DÉRIBÉRE intitulée « Les Fours à arc » (brochure APEL, revue Electricité, mai 1941, mai et décembre 1942). Signalons enfin parmi les livres français : L'Electrochimie et l'Electrometallurgie, t. II. Fours électriques, par LEVASSEUR (livre récent), La Fabrication des ferro-alliages, par A. COUTAGNE (livre récent), L'Electrosidérurgie, par CLAUDEL DE COUSERGUES (livre assez ancien). Pour la soudure à l'arc, on pourra se reporter à : Cours de soudure électrique à l'arc (Ecole de soudure autogène), par MM. BRILLIÉ, VOLFF, LÉONARD, BÉTHENOD et PIETTE ; Manuel pratique de soudure électrique à l'arc, par MM. GRANJEON et SALELLES ; La Soudure électrique à l'arc et la soudure à l'hydrogène atomique, par M. LEBRUN ; La Soudure électrique à l'arc, par M. SARAZIN, ainsi qu'à l'étude de M. SALELLES, intitulée « La Soudure électrique à l'arc » (brochure APEL, revue Electricité, mai, juillet et septembre 1942, janvier 1943), et aux articles parus dans le Bulletin des Ingénieurs soudeurs.

Constitution de la matière.

D'après l'hypothèse actuellement admise, la nature est constituée par des éléments sensiblement identiques, appelés atomes. Un corps simple comprend un certain nombre d'atomes liés entre eux par des affinités chimiques. Chaque atome est formé d'un noyau central, de très faibles dimensions, possédant une charge électrique positive et autour duquel gravitent des grains ou particules d'électricité négative dénommées électrons (analogie avec les systèmes solaires comportant un soleil entouré de planètes). Un certain équilibre électrique existe entre charges positives et charges négatives. Toutefois, sous l'action de diverses causes, les électrons peuvent se déplacer dans le vide ou dans la matière sans que pour cela l'équilibre soit détruit.

Courant électrique.

Le courant électrique est un déplacement d'électrons libérés de l'atome. Cette libération correspond à une certaine dépense d'énergie faite par ex. sous forme thermique (corps chauffé au rouge : émission thermoionique) ou cinétique (bombardement de la matière : ionisation par chocs).

THÉORIE DE L'ARC

Arc en courant continu.

Dans l'arc, les électrons se déplacent de la cathode C vers l'anode A. C étant porté au rouge par effet Joule (passage du courant au moment où A et C au contact l'une de l'autre sont soumises à l'action de la tension U), un certain nombre d'électrons sont libérés. Mais, pour qu'ils puissent s'échapper de la matière, il faut qu'une force s'exerce sur eux ; en effet, leur départ transformé, au point de vue électrique, l'atome neutre en ion positif qui, par conséquent, attire à lui les charges négatives. La force extérieure qui, s'opposant à cette attraction, soutire les électrons de la cathode pour donner lieu à une véritable vaporisation d'électrons (émission thermo-électronique ou thermionique) est le champ électrique dû au passage du courant à travers A et C au contact. Ce champ doit être en outre assez important pour imprimer aux électrons une vitesse suffisante pour assurer l'ionisation par chocs des molécules gazeuses situées entre C et A et permettre aux électrons d'atteindre A.

L'expérience montre effectivement que les deux conditions suivantes sont nécessaires pour l'établissement et le maintien de l'arc continu :

- incandescence de la cathode ;
- différence de potentiel entre cathode et anode.

Arc en courant alternatif.

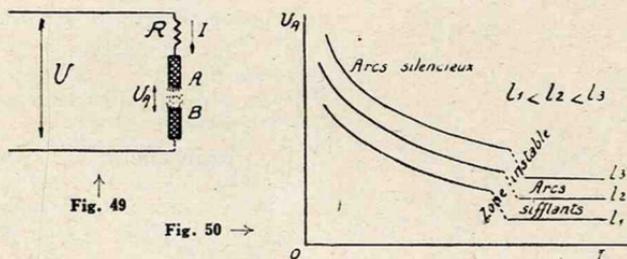
Si l'on inverse brusquement la polarité des électrodes A et C, l'arc s'éteint. Pour le rétablir, il faut d'abord provoquer l'incandescence de la nouvelle cathode A. Il faut ensuite laisser le temps aux électrons qui se sont accumulés précédemment autour de A (lorsque cette dernière était anode) de se déplacer vers la nouvelle anode C. Par suite, le réallumage de l'arc nécessite une tension plus élevée que son entretien.

D'où les conditions d'établissement d'un arc en courant alternatif :

- incandescence des deux électrodes ;
- différence de potentiel plus élevée au moment du réallumage de l'arc.

PROPRIÉTÉS DE L'ARC EN COURANT CONTINU

Soit un arc AB alimenté sous une tension constante U et réglé au moyen d'une résistance variable R , I et U_A désignant



respectivement l'intensité du courant et la tension aux bornes A et B de l'arc. On a (fig. 49) :

$$\begin{aligned} U &= U_A + RI \\ U_A &= U - RI \end{aligned}$$

Courbes caractéristiques de l'arc.

Si l'on étudie les variations de U_A en fonction de I pour différentes valeurs croissantes l_1, l_2, l_3 , de la longueur l de l'arc AB, on obtient les courbes « caractéristiques » de la figure 50 qui font apparaître deux zones remarquables :

la zone des arcs silencieux et la zone des arcs sifflants, séparées par une zone instable.

Zone des arcs silencieux.

Les courbes ont pour équation (formule de Mme Ayrton) :

$$(12) \quad U_A = A + Bl + \frac{C + Dl}{I}$$

A, B, C et D étant des constantes positives dépendant de la nature des électrodes, de leur diamètre et de la nature du milieu gazeux.

On en déduit :

$$I = \frac{C + Dl}{U_A - A - Bl}$$

Donc le courant I décroît quand la tension U_A aux extrémités de l'arc augmente ; d'où une certaine autorégulation de la puissance ($U_A I$) dissipée dans l'arc, autorégulation malheureusement insuffisante.

La connaissance de la courbe $U_A = f(I)$ permet de résoudre les deux problèmes suivants :

Problème I. — Quelle est la plus grande valeur de la résistance R de réglage pour laquelle l'arc peut subsister ?

Reportons sur la figure 51 la courbe $U_A = f(I)$ pour la longueur l de l'arc.

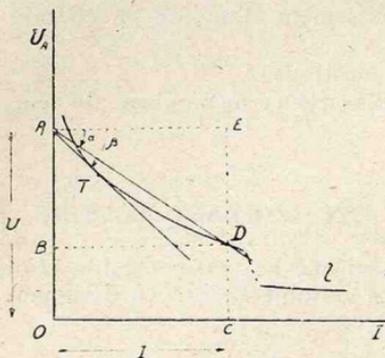


Fig. 51

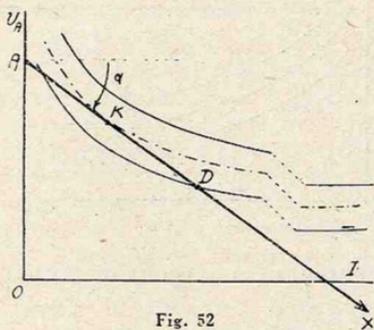


Fig. 52

Soit D un point de cette courbe. Pour ce point, la tension dans l'arc est représentée par OB et l'intensité par I . Soit A tel que $OA = U$. On a :

$$DE = BA = CE - CD = OA - OB = RI$$

Il s'ensuit que :

$$\operatorname{tg} z = \frac{DE}{AE} = \frac{RI}{I} = R$$

La résistance R est donc représentée graphiquement par $\operatorname{tg} \alpha$.

La valeur maximum de R sera $\operatorname{tg} \beta$, β étant la plus grande valeur de α , obtenue par AT , tangente menée par A à la courbe.

Problème II. — Quelle est la plus grande longueur d'arc possible, R étant constante ? R étant constante, il en est de même de α . Le point figuratif D se déplace sur la droite Ax (fig. 52) ; la plus grande longueur cherchée est celle de la courbe représentative qui est tangente (en K) à la droite Ax .

Zone des arcs sifflants.

Les arcs sifflants correspondent aux fortes intensités. Les courbes de la figure 50 montrent que, pour une tension U_A donnée, l'intensité est indéterminée.

On aurait pu d'ailleurs prévoir cette propriété *a priori* en cherchant à se représenter physiquement le phénomène de l'arc (fig. 53) :

A la surface de la cathode, les électrons ne peuvent s'échapper que si la force qui les projette hors de la cathode est suffisante ; d'où une chute brusque de tension u_c .

Entre cathode et anode, les électrons continuent à cheminer, à vitesse constante, dans un espace supposé homogène où leur déplacement est ralenti simplement par des forces analogues à un frottement mécanique ; d'où chute régulière de tension u_m .

L'anode s'échauffe sous l'action du bombardement d'électrons auquel elle est soumise ; elle tend donc, elle aussi, à émettre des électrons et cette tendance s'oppose à l'entrée des électrons en provenance de la cathode ; d'où accumulation d'électrons et nécessité d'une force nouvelle permettant aux électrons de pénétrer dans l'anode ; donc chute brusque de tension u_a .

Finalement, la tension : $U_A = u_c + u_m + u_a$ est de la forme :

$$U_A = a + bl$$

où a est une constante qui désigne la somme des chutes fixes de tension u_c et u_a à la cathode et à l'anode et b une autre constante, l étant la longueur de l'arc.

L'influence de I sur u_c est nulle : analogie entre le champ terrestre (pesanteur) qui imprime à des grains identiques de sable qui tombent une même vitesse quel que soit le nombre de

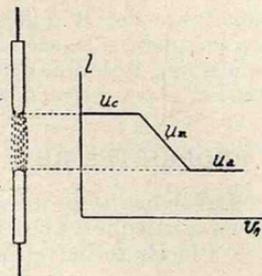


Fig. 53

ces grains, et la chute de tension cathodique qui imprime aux électrons une certaine vitesse indépendante du nombre d'électrons, c'est-à-dire de l'intensité I .

Même raisonnement pour u_a .

En ce qui concerne la chute de potentiel le long de l'arc, si I augmente, les électrons sont en plus grand nombre et ils occupent un plus large espace entre les deux électrodes ou si l'on veut, la colonne qu'ils forment s'élargit ; la chute (bl) reste ainsi la même, mais c'est la section de la colonne qui augmente.

En résumé, dans un arc sifflant à forte intensité, I et U_A sont indépendants.

Une conséquence est la suivante : tout se passe comme si la densité de courant, c'est-à-dire le nombre d'électrons par unité de section (dans un plan perpendiculaire à l'arc), restait constant. Par suite, la résistance ohmique de l'arc diminue lorsque I augmente (formules $R = \rho \frac{l}{S}$ et $U = RI$, d'où $U = \rho \frac{l}{S} I$, dans lesquelles R représente la résistance de la colonne d'arc, l sa longueur, S sa section, ρ la résistivité du milieu traversé).

En fait, il semble que l'arc se règle de lui-même à densité de courant à peu près constante.

PROPRIÉTÉS DE L'ARC EN COURANT ALTERNATIF

Les indications que nous venons de donner restent valables et, en particulier, pour les arcs sifflants à forte intensité :

— la chute de tension dans l'arc est de la forme :

$$U_A = a + bl$$

— il y a indépendance entre l'intensité efficace et la tension efficace dans l'arc.

On notera toutefois que, dans le cas du courant continu, il y a une cathode et une anode bien différenciées ; en courant alternatif, les deux électrodes sont alternativement (à raison de 100 changements par seconde pour du courant à 50 p/s) cathode et anode.

D'autre part, en courant alternatif, tension et courant restent en phase. Toutefois, les courbes correspondantes cessent d'être sinusoïdales, par suite des conditions particulières dans lesquelles l'arc se forme ou s'éteint. On doit ainsi faire intervenir dans les calculs un certain facteur appelé « *facteur de puissance de l'arc* » K (qu'il ne faut pas confondre avec le facteur de puissance dénommé $\cos \varphi$ dont nous avons parlé précédemment) et qui dépend en particulier, dans le cas des fours à arcs, de la puissance volumique de l'appareil (rapport de la puissance de l'arc à la capacité du four), de la nature des électrodes et de l'atmosphère du four.

CONDITIONS PRATIQUES D'UTILISATION DE L'ARC

L'arc continu est surtout utilisé en soudure ; l'arc alternatif dans les fours et aussi la soudure.

Les théories que nous venons de rappeler sont approchées et on ne s'en étonnera pas si l'on veut bien tenir compte de la complexité des conditions d'utilisation industrielle des arcs. Ces théories sont cependant suffisantes en première approximation.

Pratiquement :

L'arc silencieux ne présente qu'une stabilité très relative, car les grandeurs A, B, C, D de la formule (I₂), définissent les conditions du moment pour les électrodes et le milieu dans lequel elles se trouvent. Dans un four par ex., ces grandeurs peuvent varier considérablement à tout moment sous l'action de variables diverses, telles que forme de la charge, naissance d'arcs secondaires, longueur des électrodes, température de l'enceinte, de la charge et des électrodes, composition de l'atmosphère du four.

L'arc sifflant est instable par nature.

Or une certaine stabilité est nécessaire :

- pour que l'arc puisse être utilisé ;
- pour que la puissance puisse être réglée convenablement ;
- pour l'exécution correcte des différentes opérations chimiques envisagées ;
- pour que tous incidents ou accidents d'exploitation soient évités ;
- pour que des perturbations inacceptables sur le réseau d'alimentation ne se produisent pas.

On obtient une stabilité suffisante par divers moyens :

- alimentation par des dynamos ou des alternateurs à forte réaction d'induit (cas des appareils de soudure par ex.) ;
- montage d'une résistance ou d'une réactance supplémentaire en série avec l'arc (fours et soudure) ;
- montage de plusieurs arcs en série (fours) ;
- régulation des électrodes (fours et soudure).

L'examen de ces moyens sont du cadre de la présente étude.

Remarque importante. — Dans les fours à arcs, les conditions de fonctionnement ne sont plus celles qui ont conduit aux courbes de la figure 50, courbes qui correspondent à l'arc libre. Deux facteurs principaux interviennent qui peuvent changer notablement l'allure de l'arc : d'une part la pression de l'atmosphère ambiante, d'autre part la nature de cette atmosphère fortement ionisée. Il y a ainsi suppression ou tout au moins atténuation de la zone instable qui sépare la zone des arcs silencieux de celle des arcs sifflants. Dans l'ensemble, l'arc est plus stable. La température des électrodes est probablement plus élevée.

PUISSANCE DE L'ARC

Si l'arc est silencieux, la puissance électrique mise en jeu dans l'arc a théoriquement pour valeur :

$$P = KU_A I = KAI + KBI + KC + KDI$$

Par conséquent, P croît avec I (et non avec I^2) et avec l .

Il semble donc que le chauffage par arc ne suive pas la loi de Joule ; ce n'est là qu'une apparence : *la loi de Joule reste applicable, mais elle est masquée par la diminution de la résistance R.*

Si l'arc est sifflant, l'intensité et par suite la puissance peuvent prendre une valeur indéterminée, par suite de l'indépendance de U_A et de I.

D'où la nécessité de recourir à un organe de liaison établissant une relation entre la tension appliquée aux bornes de l'arc et l'intensité. La liaison est assurée manuellement dans certains cas (soudure par ex.), automatiquement par des régulateurs dans d'autres cas (fours métallurgiques, appareils de soudure automatique par ex.).

La quantité de chaleur fournie par l'arc est, bien entendu, égale à :

$$Q = 0,24 Pt$$

Température de l'arc.

La valeur de la température des pôles des électrodes en charbon est assez mal connue. Dans le cratère positif, elle serait, suivant les auteurs, de 3 500 à 4 100° C, sous la pression normale.

A la pointe négative, elle serait de l'ordre de 2 900° C.

DIFFÉRENTES SORTES D'ARCS INDUSTRIELS

Industriellement, l'arc est utilisé sous deux formes :

- l'arc court ou à faible tension ;
- l'arc long ou à haute tension.

L'arc court est par excellence l'arc métallurgique (fusion et affinage des métaux, soudure).

Il est fourni soit par du courant continu (soudure), soit par du courant alternatif (fusion et soudure). Les tensions usuelles sont assez faibles pour des raisons d'ordre électrique, métallurgique et de sécurité, par ex. de 60 à 280 V pour les fours et de 20 à 25 V pour la soudure en marche normale (50-60 V pour l'amorçage en courant continu, 60-100 V pour l'amorçage en courant alternatif) (1). De plus, on doit pouvoir obtenir rapi-

(1) Dans la soudure par résistance, les tensions secondaires usuelles peuvent varier de quelques dixièmes de volts à 14 V pour les soudeuses et de 20 à 24 V pour les pinces à souder.

dement et facilement des variations de la tension appliquée. Pour ce faire, on a recours à des transformateurs à prises multiples (en courant alternatif seulement) ou à d'autres moyens ou dispositifs (résistances, réactances, régulateurs d'induction, etc.)

L'arc long est obtenu avec du courant alternatif à une tension élevée. Il est utilisé pour la fixation de l'azote atmosphérique.

FOURS MÉTALLURGIQUES A ARCS

Ces appareils sont alimentés en courant alternatif. On peut adopter, du point de vue qui nous intéresse, plusieurs classifications, par ex. :

— Première classification :

a) Les fours à arcs libres (fig. 54-a et 55), dans lesquels le ou les arcs jaillissent entre les électrodes, sans toucher la matière traitée ;

b) Les fours à arcs sur charge (fig. 54 b et c et 56), dont le ou

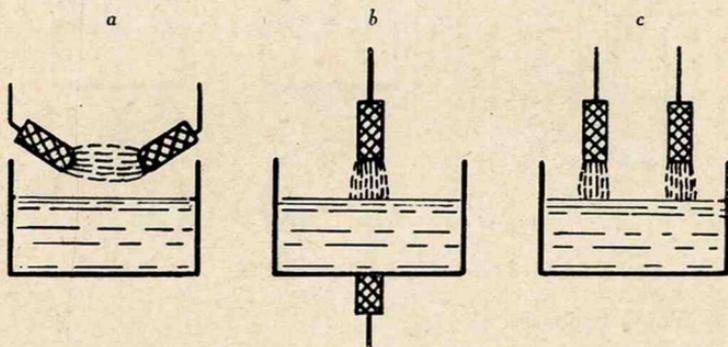


Fig. 54

les arcs sont produits au contact de la matière chauffée, le circuit électrique se fermant soit par la sole du four, soit par le métal.

— Deuxième classification.

- Les fours monophasés ;
- Les fours triphasés ;
- Les fours diphasés.

a) Fours monophasés.

1. Fours à arc libre (fig. 54-a).

L'arc jaillit entre les deux électrodes, disposition adoptée

par ex. dans les fours Stassano, Booth (rotatif), Détroit (oscillant), Brown-Boveri (BBC), Russ (oscillant), Siemens, Compagnie Electromécanique type Mazières (oscillant) (1).

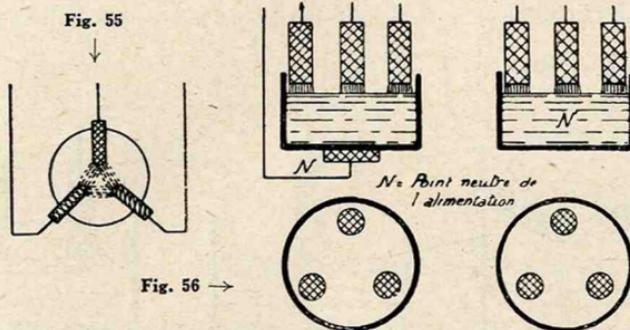
2. Fours à arc sur métal (fig. 54 b et c).

Ils peuvent comporter :

α) Soit un arc unique, le circuit se fermant par la sole (ex. fours Girod, Keller, Greaves-Etchells) ou autrement (ex. four Chaplet). En principe, ces fours sont le plus souvent des fours mixtes fonctionnant à arc (entre électrode et bain) et par résistance (dans le bain et éventuellement dans la sole établie à cette fin = four Greaves-Etchells par ex.) ;

β) Soit deux arcs en série ou arc double (ex. disposition Héroult).

Ces divers types de fours ont des avantages et des inconvénients propres.



b) Fours triphasés.

Ils sont :

1. Soit à arcs libres (fig. 55 et 57 a), le four équivalant à un récepteur électrique monté en triangle. Ex. : fours Nathusius, Fiat (Pittsburgh) ;

2. Soit à arcs sur métal (fig. 56 et 57 b), avec ou sans neutre de retour, le four équivalent à un récepteur en étoile. Ex. : disposition Héroult.

Les fours triphasés type Héroult sont de beaucoup les plus répandus (ex. : fours Compagnie Electromécanique-Brown-Boveri ; Heuland ; Société Générale d'Applications Electrothermiques-Alsthom ; Société Stein-Jeumont, etc.).

(1) On peut voir au Palais de la Découverte à Paris des modèles des premiers fours à arc utilisés par Moissan dans ses célèbres recherches de laboratoire.

c) Fours diphasés.

Le four diphasé le plus connu est le four Rennerfeld (fig. 58), prévu pour l'alimentation par un réseau diphasé à 3 fils et susceptible de fonctionner, à volonté, comme four à arcs libres (arc dit « en fleur de lis »; à cause de la forme prise par les arcs sous l'action du soufflage magnétique qui étale les flammes des arcs) ou comme four à arcs sur métal (si les électrodes sont suffisamment abaissées vers le bain).

— Troisième classification.

a) Les fours à arcs proprement dits (ex. fours CEM-Mazières, Hérault);

b) Les fours mixtes à arcs et à résistance (ex. : four Greaves-Étchells).

La figure 59 (pages 72 et 73) donne les schémas de principe de principales dispositions. Tableau VI (pages 74 à 76).

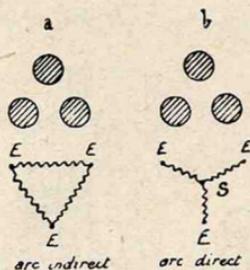


Fig. 57

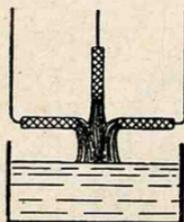


Fig. 58

Remarque. — Nous laissons de côté un certain nombre d'autres dispositions de fours peu utilisés ou actuellement abandonnés dans la pratique industrielle.

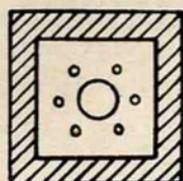
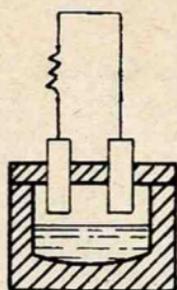
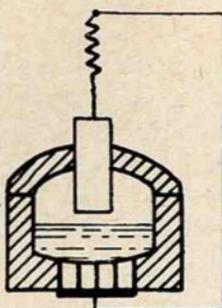
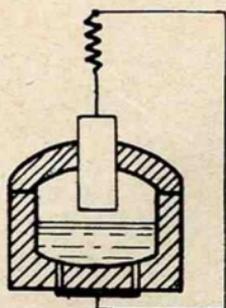


Fig. 60

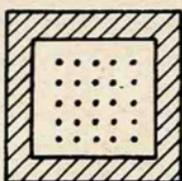


Électrodes.

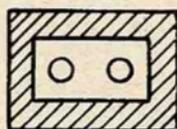
Les fours à arcs précédents sont en général des fours métallurgiques. Les électrodes sont soit en graphite (cas le plus fréquent), soit en carbone amorphe. Pour obtenir la marche continue des fours, on recourt soit à des électrodes niplées (graphite, rarement carbone amorphe) ou à taraudage conique (carbone amorphe), en ajustant à une électrode usée une élec-



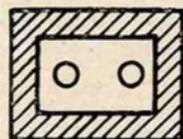
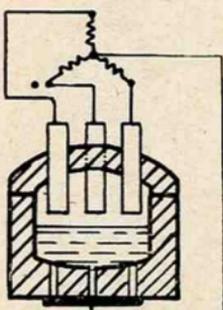
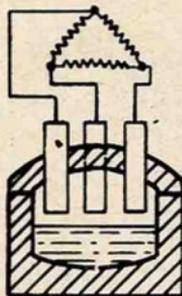
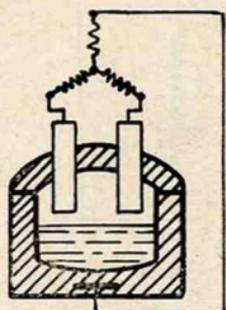
Girod (m)



Keller (m)

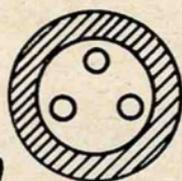


Hèroult (m)

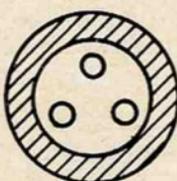


Greaves - Etchells (t)

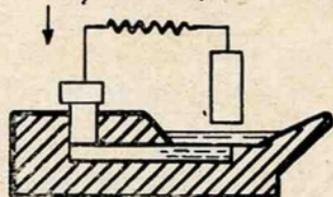
Chaplet (m)



Hèroult (t)



Girod (t)



m = monophasé.

t = triphasé.

d = diphasé.

r = rotatif.

o = oscillant

Fig. 59. — I

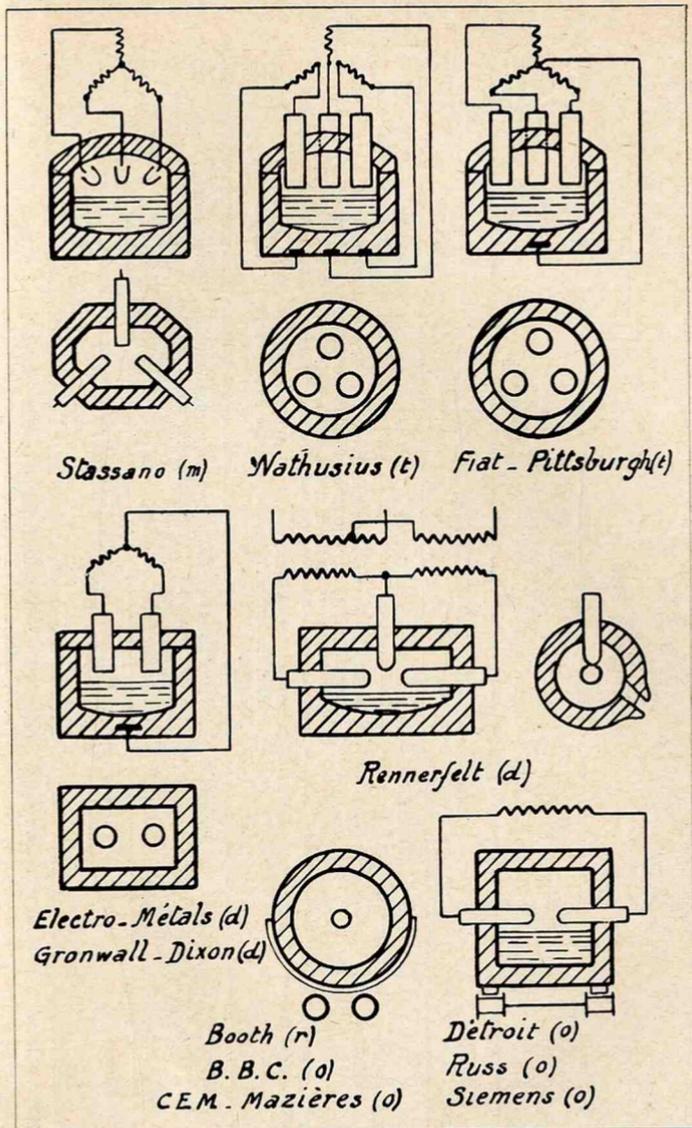


Fig. 59. — II

TABEAU VI
Fours à arcs (I)

Désignation (2)	Nature du courant (3)	Nature de l'arc	Particularités	Métaux traités (4)	Observations (5)
Booth (6)	Am	Libre	Deux électrodes horizontales. Four rotatif.	Alliages cuivreux	
Brown-Boveri* (BBC)	Am	Sur métal	Deux électrodes verticales.	Acier, ferros	
	At	Sur métal	Deux électrodes verticales supérieures. Une électrode verticale inférieure venant au contact du métal. Four du type cylindrique à axe horizontal.	Bronze, cuivre, nickel	
CEM (Mazières)	Am	Libre	Deux électrodes horizontales. Four oscillant (cylindre à axe horizontal). Quelque analogie avec le four Détroit.	Acier, bronze, cuivre	
Chaplet*	Am	Sur métal	Une ou plusieurs électrodes verticales supérieures en parallèle. Amenée de courant inférieure en fer ou en carbone. Canal (queue) remplie de matière conductrice (fer ou acier). Une ou deux queues.	Ferros, acier	
Détroit	Am	Libre	Deux électrodes horizontales. Four oscillant (cylindre à axe horizontal).	Fonte, cuivre, alliages cuivreux	
Electro-Metals ou Gronwal-Dixon*	Ad	Sur métal	Petits fours : deux électrodes et neutre relié à la sole du four. Gros fours : quatre électrodes reliées aux extrémités des deux phases du diphasé. Neutre (milieux réunis des deux phases) relié à la sole du four.	Acier	

Fiat*	At	Sur métal	Trois électrodes verticales supérieures. Plaque de cuivre noyée dans la sole et formant point neutre.	Acier	
Girod*	C ou Am	Sur métal	Une ou plusieurs électrodes verticales de même polarité à la partie supérieure. Dans la sole, une ou plusieurs pièces de l'autre polarité, en acier doux.	Acier	AR
	At	Sur métal	Analogue à un four Héroult ; mais le point neutre est conservé par mesure de sécurité.	Acier	
Greaves-Etchells* (7)	At	Sur métal	Deux (ou quatre) électrodes verticales supérieures, la troisième est constituée par un plot métallique noyé dans la sole. Au départ, fonctionnement sur deux phases ; ensuite, sur trois.	Acier	AR
Héroult	Am	Sur métal	Deux électrodes verticales supérieures. Deux arcs en série.		
Héroult (8) CEM, Heuland, SGAET-Alsthom, Stein-Jeumont, BBC, AEG, Demag, Siemens, ASEA, Electric-Furnace Tagliaferri, etc.	At	Sur métal	Trois électrodes verticales supérieures. L'ensemble des trois arcs correspond à un récepteur en étoile. Cette disposition est généralement adoptée sur les fours à arcs en sidérurgie.	Essentiellement acier et ferros	
Keller*	Am, t	Sur métal	Sole en pisé, armé au moyen de bandes verticales de fer solidaires d'une plaque métallique formant amenée de courant. Une ou plusieurs électrodes verticales en parallèle (m) ou en étoile (t).	Acier	AR
Nathusius*	At	Sur métal	Trois électrodes verticales supérieures. Trois plots inférieurs en acier. Le neutre se forme dans la charge.	Acier	AR

(1) Voir page 76 en fin de tableau les renvois 1 à 8.

TABLEAU VI (suite et fin)

Désignation (2)	Nature du courant (3)	Nature de l'arc	Particularités	Métaux traités (4)	Observations (5)
Rennerfelt	Ad	Sur métal ou libre	Une électrode verticale supérieure, deux électrodes horizontales, arc soufflé en « fleur de lys ».	Bronze, acier	
Stassano*	At	Libre	Trois électrodes inclinées.	Acier	

(1) Les fours métallurgiques à arcs les plus courants sont les fours triphasés type Héroult. En France, on emploie surtout : les fours triphasés Héroult à arc sur métal (CEM, Stein-Jeumont, SGAET-Alsthom) ; et aussi des fours monophasés à arc libre (CEM-Mazières).

Les fours marqués d'un astérisque sont indiqués surtout pour mémoire, car ils sont de moins en moins utilisés et en voie de disparition, semble-t-il. Toutefois, il y a tendance actuellement à rétablir la liaison de la sole avec le neutre de l'alimentation en triphasé, pour certains fours à arc sur métal utilisés pour les ferros. La figure 59 donne les schémas de principe des différents types de fours.

(2) Les fours sont classés par ordre alphabétique de désignation.

(3) A : courant alternatif ; m : monophasé ; t : triphasé ; d : diphasé ; C : continu.

(4) Métaux habituellement traités.

(5) AR : fonctionnement mixte à arc et à résistance.

(6) Il existe un autre type de four Booth alimenté en courant diphasé par l'intermédiaire d'un groupe Scott (transformant le courant triphasé en courant diphasé) et comportant deux électrodes. Le neutre du secondaire (diphasé) est relié à la sole du four.

(7) L'alimentation des fours Greaves-Elschels se fait quelquefois en courant diphasé.

(8) AEG : Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft ; BBC : Brown-Boveri ; CEM : Compagnie Electro-Mécanique ; SGAET : Société Générale d'Applications Electrothermiques. Signalons également le four Ludlum, du genre Héroult, mais avec trois électrodes en ligne.

N. B. — Les fours monophasés sont soit à sole fixe, soit à sole mobile ; parmi ces derniers, on peut distinguer les fours rotatifs et les fours oscillants. Dans les premiers, du type à cylindre à arc horizontal, le trou de coulée est pratiqué dans une des parois perpendiculaires à l'axe (ex. four Booth) ; dans les seconds, de même type, les portes de chargement et de coulée sont percées dans le cylindre même (ex. fours Détroit, CEM-Mazières, Russ, etc.).

Les fours triphasés modernes d'aciérie sont basculants. Les grands fours sont à chargement rapide, soit à voûte mobile par translation ou rotation (avec portique, à voûte pivotante, à grue ou à potence), soit à cuve mobile par translation ou par rotation.

trode neuve (fig. 60), soit à un procédé de fabrication continue (fours à carbure) ou discontinue (fours à ferros) de l'électrode sur le four lui-même (procédé Söderberg), soit encore en utilisant des électrodes constituées par des segments (fours Miguet).

A titre indicatif, le diamètre des électrodes peut atteindre 500, voire même 600 mm pour le graphite, 700 mm pour le carbone amorphe, 750 mm pour les électrodes Söderberg et jusqu'à 1 200 mm pour les électrodes à secteurs.

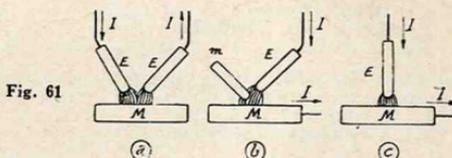
Les intensités peuvent être de quelques dizaines de milliers d'ampères, par ex. de 20 000 A pour une électrode de 400 mm en graphite.

ARCS DE SOUDURE

L'alimentation se fait :

a) Soit en courant continu (réseau à courant continu ; groupe moteur-dynamo ou groupes spéciaux ; exceptionnellement commutatrice) ou ondulé (redresseur à vapeur de mercure ; redresseur sec oxymétal ou au sélénium, solution plus récente) ;

b) Soit en courant alternatif (réseau à courant alternatif du



secteur ; groupe moteur-alternateur ; le plus souvent poste statique du type transformateur).

La figure 61 montre quelles sont les dispositions que l'on peut rencontrer. Le plus souvent, on utilise l'arc sur métal avec baguette-électrode fusible fournissant le métal d'apport (fig. 61-c).

Se reporter également au tableau VII (pages 78 et 79).

Fours d'oxydation de l'azote atmosphérique (1)

Principe : on fait jaillir un arc dans l'air, entre des électrodes métalliques ; on obtient ainsi de l'oxyde azotique ou bioxyde d'azote NO. Pour avoir une production suffisante, on cherche à réaliser une large nappe de flammes que l'on fait traverser par un courant d'air.

(1) Actuellement, ce procédé est peu utilisé (à cause de son mauvais rendement), car la fabrication de l'acide nitrique et des nitrates (engrais) s'obtient surtout en partant de l'ammoniac synthétique obtenu lui-même en envoyant un courant d'azote et d'hydrogène en proportion voulue sur un catalyseur à base d'oxyde de fer, à haute pression et à température élevée (procédés Haber, Claude, Casale).

TABLEAU VII

Appareils de soudure

Mode de chauffage	Désignation des appareils	Nature du courant de soudure (r)
Par résistance	a) Soudeuses par recouvrement Soudeuses par points ou à molettes.....	Alternatif
	b) Soudeuses par rapprochement ou en bout b ₁) Simple..... b ₂) Par étincelage.....	
Par arc	c) Groupes rotatifs c ₁) Moteur avec génératrice (2) (combinés ou séparés)..... c ₂) Groupe tri-mono..... c ₃) Moteur avec alternateur.....	Continu Alternatif Alternatif
	d) Redresseurs d ₁) A lampes..... d ₂) A éléments au sélénium ou oxy-métal.....	On-lulè (genre continu)
	e) Postes statiques e ₁) Sans condensateurs..... e ₂) Avec condensateurs.....	Alternatif
A l'hydrogène atomique	f) Poste statique.....	Alternatif
Par flux conducteur	g) Appareil spécial pour soudure automatique...	Alternatif

(1) *Pratiquement, le courant alternatif de soudure est toujours monophasé. Les machines à chauffer (monophasées ou polyphasées) sont similaires à des soudeuses par résistance. Puissance max. de l'ordre de 150 kVA en triphasé.*

TABLEAU VII (suite)

Appareils de soudure

Métaux traités	Observations
<p>a) Aciers doux et aciers inoxydables ; alliages légers ; Mb, Tu, Ni, laiton ; tous métaux sauf Cu rouge ; b₁) Tous métaux, y compris Cu rouge ; surtout fils en Al ; b₂) Surtout aciers doux et aciers rapides ; métal sur un autre métal.</p>	<p>Certains appareils sont à accumulation, quelquefois mécanique, le plus souvent électrique (par condensateurs ou par selfs). Puis. max. = 500 kVA.</p>
<p>c) Essentiellement aciers et également fontes ; et aussi alliages légers et ultra-légers.</p>	<p>Les appareils les plus répandus sont les postes statiques. Puissance usuelle = de 5 à 20 kVA.</p>
<p>Essentiellement aciers ; également laiton, bronze et alliages légers.</p>	<p>La chaleur de l'arc est transmise aux pièces à souder par l'hydrogène dissocié. Puissance de 11 (monophasé) à 30 kVA (triphase).</p>
<p>Acier.</p>	<p>La fusion du fil électrode fournissant le métal d'apport est obtenue par le passage d'un courant de très forte intensité dans un flux conducteur, sans formation d'arcs. Puissance de l'ordre de 50 kVA par ex.</p>
<p>(2) Dans les chantiers navals, on a affaire à de véritables centrales de soudure, très importantes, par ex. quelques milliers d'amperes sous 40 à 60 V.</p>	

L'arc est soufflé soit magnétiquement, soit pneumatiquement.

Les indications qui suivent sont données à titre d'exemples :

Four Birkenland-Eyde : arc en disque de 3 m de diamètre, 4 000 kW, 5 000 V, température de la flamme de 3 à 3 500° C, température de sortie des gaz de 850° C.

Four Schönherr : un seul arc hélicoïdal de 5 m de longueur par ex., pour 440 kW, 5 à 7 000 V, température de sortie des gaz de 1 200° C. La figure 63 donne le schéma de principe de la formation de l'arc entre l'électrode centrale A et l'électrode concentrique B, l'arc étant allongé par insufflation d'un courant d'air F introduit tangentiellement.

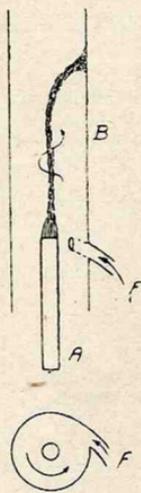


Fig. 63

Remarque 1. — La décharge électrique dans un gaz à une pression voisine de la pression atmosphérique donne naissance à l'un des phénomènes suivants :

— l'effluve (aigrette), simple manifestation lumineuse mettant en jeu une quantité d'énergie insignifiante (perte dans les lignes de transmission d'électricité à très haute tension) ;

— l'étincelle, qui se produit lorsque la différence de potentiel entre deux points atteint la valeur du potentiel explosif, ce dernier étant fonction de la nature du gaz, de sa pression, etc. L'étincelle est une décharge disruptive et il n'y correspond qu'une quantité d'énergie passagère qui peut toutefois

se renouveler à intervalles rapprochés s'il y a succession d'étincelles ;

— l'arc pour lequel le passage du courant est devenu continu par suite de l'ionisation du gaz. L'énergie mise en jeu peut alors être importante et on s'explique que l'arc soit utilisé industriellement.

Remarque 2. — Un cas particulier est celui du procédé de soudure par rapprochement dit « par étincelage », d'application récente et dont la théorie n'est pas encore fixée. On réalise en tout cas, entre les points en regard des pièces à souder, une série d'étincelles. Le chauffage est obtenu par effet Joule dans les parties en contact. Entre les autres parties, les portions de métal fondu qui se trouvent dans l'atmosphère assurent le passage du courant. Mais on ne sait pas encore s'il y a effectivement transport d'énergie — tout au moins en quantité appréciable — par les étincelles elles-mêmes.

Remarque 3. — Un autre cas intéressant est celui du *chalumeau à arc et hydrogène atomique*, imaginé par Langmuir et utilisé en soudure. Dans l'arc, on fait arriver un courant d'hydrogène. La température de l'arc est suffisante pour dissocier l'hydrogène moléculaire (la fig. 62 montre l'ensemble de la flamme obtenue). Si l'on place du métal dans le panache, les atomes d'hydrogène se recombinent en mettant en liberté l'énergie considérable (100 000 calories par molécule H^2) qui avait servi à les dissocier. L'arc sert ainsi de simple transporteur d'énergie à faible distance.

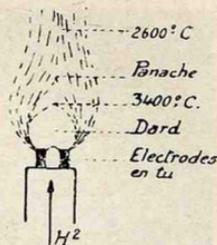


Fig. 62

APPLICATIONS DU CHAUFFAGE PAR L'ARC

Essentiellement :

— fusion et affinage des métaux et de leurs alliages, en particulier en sidérurgie et élaboration des ferros (fours à arc pour ferro-chrome surraffinés ; fours à arc et à résistance pour ferros ordinaires) ;

— soudure des métaux et de leurs alliages, notamment des alliages ferreux.

Les puissances usuelles et maxima sont, à notre connaissance, les suivantes :

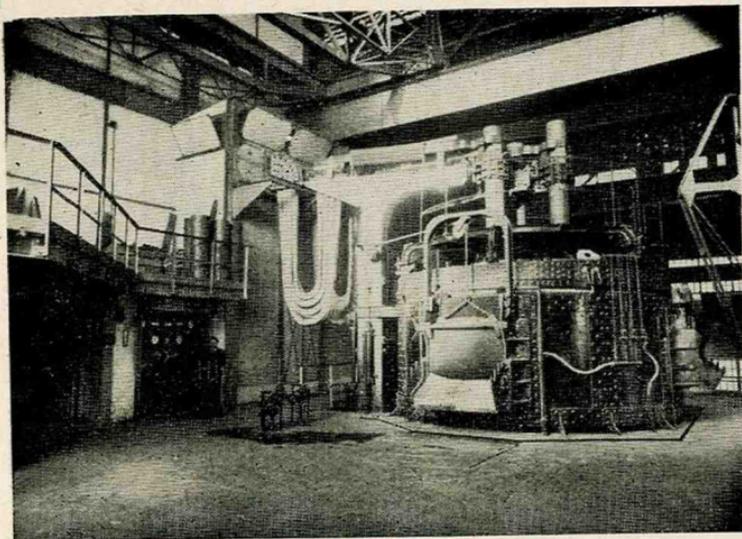
Fours à arc à un seul groupe triphasé d'électrodes : jusqu'à 9 000 kVA pour des capacités pouvant atteindre 40 t d'acier.

Soudure : de 5 à 20 kVA en général (sauf centrales de soudure des chantiers navals. Quelques milliers d'ampères sous 40-60 V par ex.).

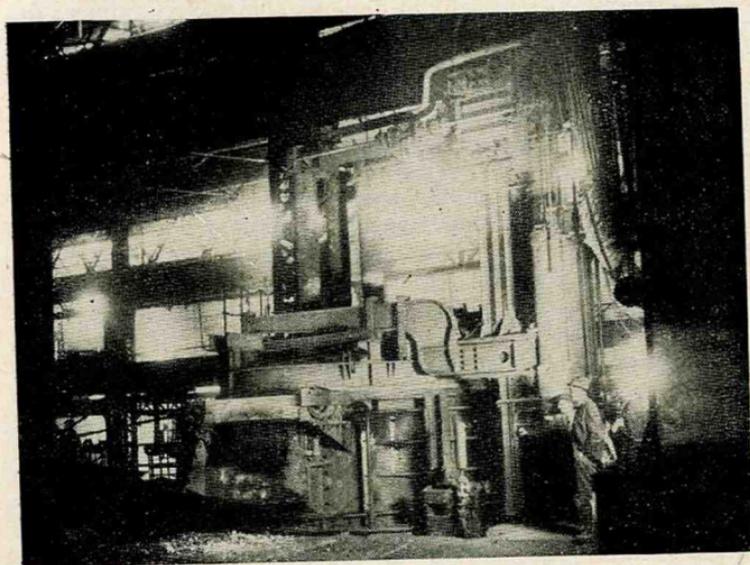
Production de AzO : quelques milliers de kW.

Remarque 1. — Le mot « électrode » prête souvent à confusion, car il désigne aussi bien certains conducteurs auxquels aboutissent les arcs dans les appareils que nous venons de décrire, que les amenées de courant employées dans certains autres appareils à résistance ou à résistance et à arc (par ex. fours à bain de sels à haute température, chaudières, fours à carbure de calcium) et notamment dans les fours d'aluminium (à électrolyse ignée). Se reporter au tableau I.

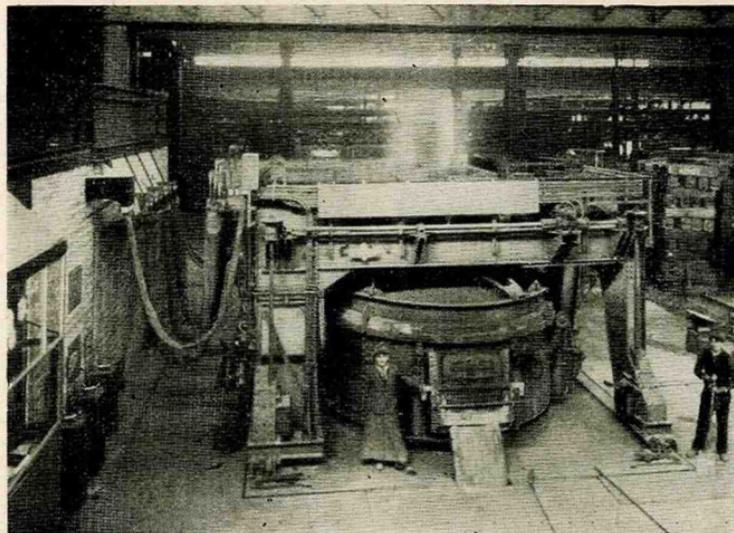
Remarque 2. — Les figures des pages 82 à 86 donnent quelques exemples de fours à arcs et d'appareils de soudure à l'arc.



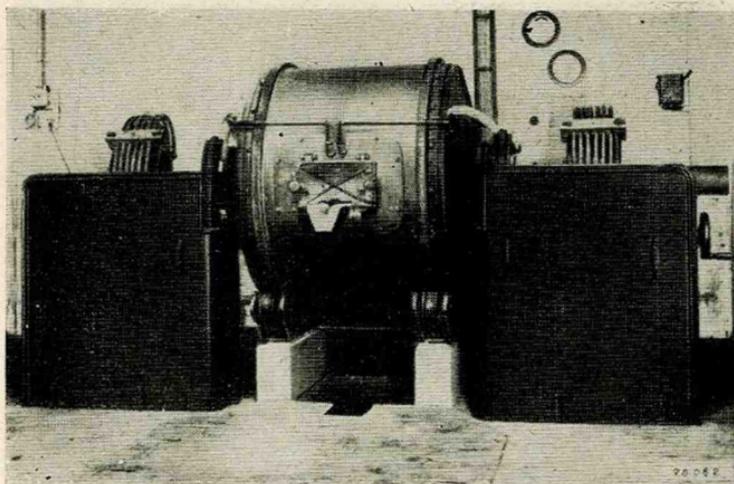
Four à arc d'aciérie. 30 t. 5 000 kVA



Four à arc d'aciérie. 10 t. 3 560 kVA

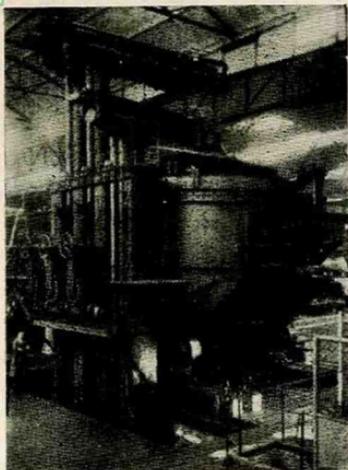


Four à arc d'aciérie. 8 t. 3 250 kVA



Four à arc d'aciérie type Mazières. 500 kg. 400 kVA

N. B. — Les puissances indiquées pour les installations des fours à arcs sont celles des transformateurs qui alimentent les fours.



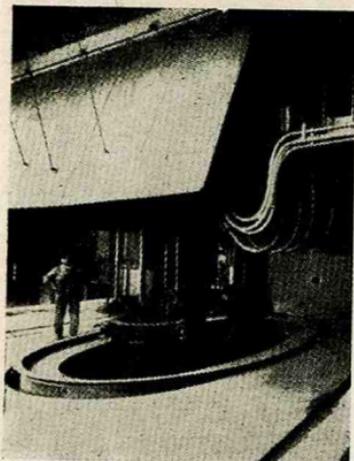
Four à arc d'aciérie. 30 t. 7 000 kVA



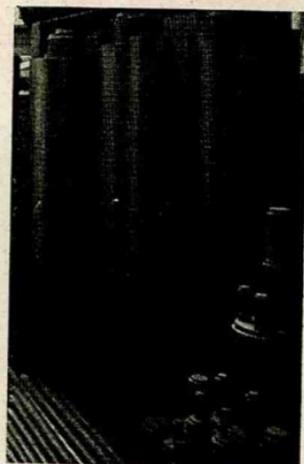
Four à arc d'aciérie. 20 t. 6 650 kVA



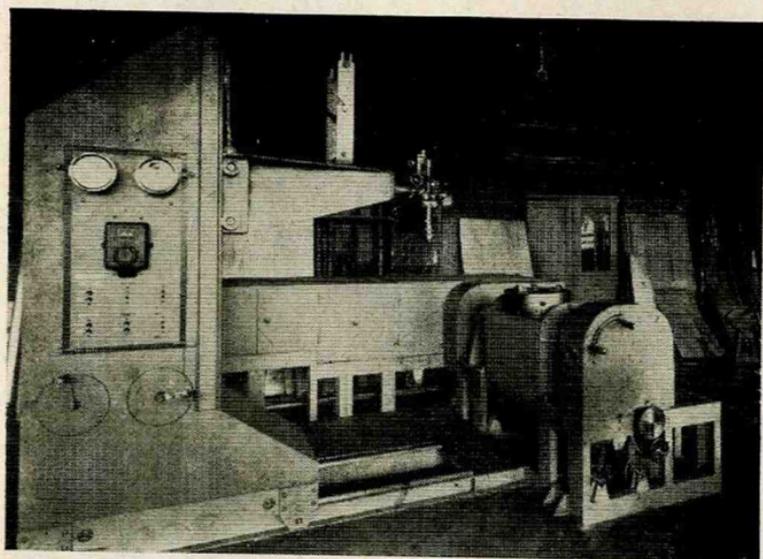
Four à arc d'aciérie. 20 t. 3 700 kVA



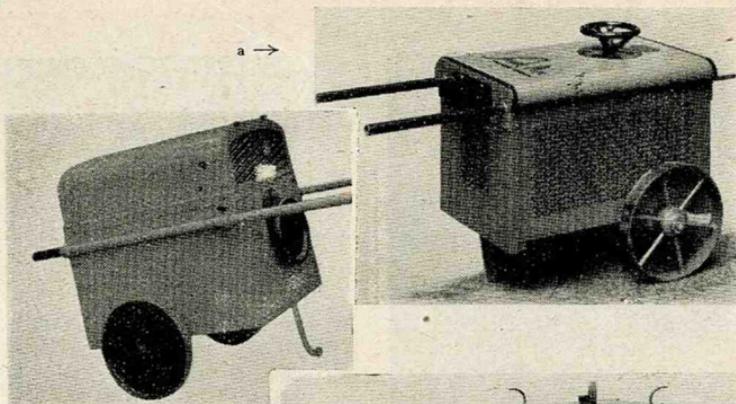
Électrodes Soderberg



Électrodes en graphite Acheson



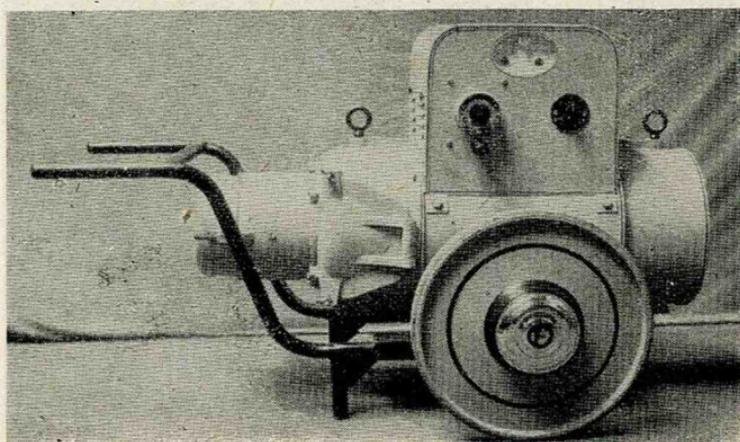
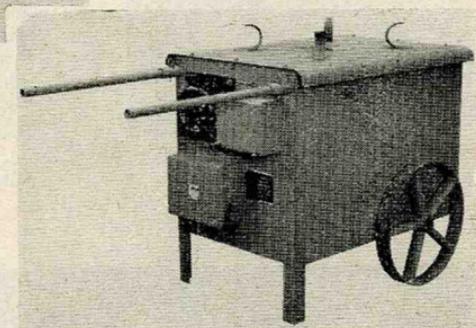
Machine à souder à l'arc. 9 kW



↑ b

**Différents
appareils mobiles
de soudure à l'arc**

a, b, c : groupes statiques
d : groupe rotatif



d

D) Chauffage par rayons infrarouges (1)

Dans la gamme des rayonnements électromagnétiques, le spectre visible (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge) occupe une zone très réduite qui va (fig. 64 : représentation en échelle logarithmique) de 4 000 à 7 600 angströms (A°) environ (7 200 à 8 000 A° suivant les individus).

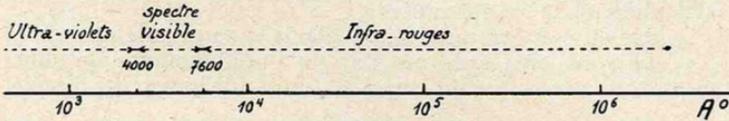


Fig. 64

D'un côté du spectre s'étendent les rayons ultra-violets et de l'autre les rayons infrarouges, dénommés improprement « rayons calorifiques » parce que découverts (par Herschell en 1800) au moyen d'un thermomètre lors d'une exploration du spectre solaire.

Les rayons infrarouges s'étendent sur une zone très importante, puisqu'ils chevauchent les ondes hertziennes (2).

Les recherches des savants ont permis d'affirmer « l'identité des rayons lumineux et des rayons calorifiques », proclamés dès 1835 par Ampère. Les rayons infrarouges se comportent, vis-à-vis d'une substance qu'ils rencontrent, comme les rayons lumineux ou les rayons ultra-violets :

Si la substance leur est parfaitement perméable, ils la traversent tout simplement, sans qu'il y ait production de chaleur ;

Si la substance est parfaitement réfléchissante, ils sont réfléchis purement et simplement ;

Si la substance les absorbe totalement ou partiellement, l'énergie qu'ils transportent se dégrade en énergie calorifique.

(1) Pour plus amples renseignements, le lecteur pourra se reporter aux livres suivants :

Principes et Applications de l'éclairage (conférences faites au Conservatoire des Arts et Métiers, publication de la Société pour le développement de l'éclairage S. P. E.), par M. DE VALBREUZE ;

Lumière et rayons IR, par E. et H. BIANCANI ;

Le Spectre IR, par J. LECOMTE ;

Les Applications pratiques des rayons IR, par M. DÉRIBÉRE (livre en cours de parution) ;

Ainsi qu'aux différentes études mentionnées dans ces deux derniers ouvrages, en particulier Le Rayonnement des corps incandescents, livre de M. G. RIBAUD ; articles de ICKIS et HAYNES dans la General Electric Review ; « Le Séchage par rayons infrarouges », étude de M. DÉRIBÉRE dans la revue Electricité (janvier, février et avril 1942).

(2) Rappelons que : 1 Angström (A°) = 0,1 millimicron ($m\mu$) et que : 1 micron (μ) = 1.10^{-6} mètre (m).

Cette dernière propriété est utilisée dans les appareils de chauffage à résistances à feu vif et exceptionnellement dans les appareils de chauffage équipés de lampes à incandescence ordinaires. Mais il y a là, en général, une solution peu économique du problème du chauffage électrique parce qu'on ne se préoccupe pas des conditions d'absorption des rayons émis par la substance à chauffer.

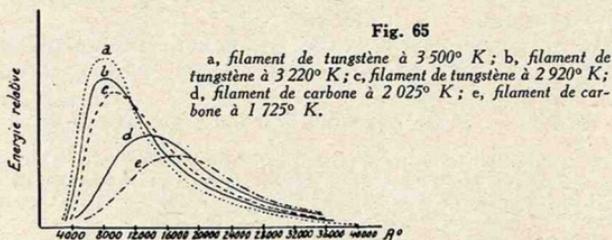
A ce sujet, les rayons infrarouges présentent deux propriétés particulièrement intéressantes :

- ils peuvent être produits facilement en grande quantité ;
- ils sont bien absorbés par un grand nombre de substances, tout au moins dans certaines limites de longueurs d'onde.

PRODUCTION DES RAYONS INFRAROUGES

Un corps chauffé émet un rayonnement, c'est-à-dire un ensemble de radiations simples constituant un spectre d'émission. Le spectre est continu (ex. : filament de tungstène ou de carbone) ou discontinu, c'est-à-dire comportant des raies ou des bandes séparées (ex. : flamme, gaz chauffé). Les radiations sont caractérisées par leur fréquence propre et invariable et par leur longueur d'onde qui dépend du milieu dans lequel la radiation se propage. Le rayonnement transporte une certaine énergie. C'est cette énergie que l'on s'efforce de transformer en chaleur dans les applications thermiques des rayons infrarouges.

Les lois physiques du rayonnement (lois de Wien, de Kirchhoff, de Stefan-Boltzmann, formule de Plank), s'appliquent au cas des rayons dont nous nous occupons, mais elles sont complexes et nous ne les citons que pour mémoire.



La figure 65, de laquelle nous ne retiendrons que l'allure des courbes, montre suffisamment que le maximum d'émission énergétique de la substance chauffée se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température s'élève. Autrement dit, on a la possibilité, en choisissant convenablement d'une part la substance chauffée (tungstène, carbone), d'autre part sa

température, de réaliser une émission de radiations plus ou moins riche en rayons infrarouges compris dans une zone de longueurs d'onde déterminées. Par ex., le filament de carbone à 2 025° K donne relativement peu de rayons visibles et au contraire une grosse émission d'IR entre 12 000 et 16 000 Å.

D'où un moyen simple de produire des rayons IR au moyen d'une lampe comportant un filament de carbone ou de tungstène porté à température convenable par simple passage du courant électrique.

Il y a donc une certaine analogie entre une lampe à IR et une lampe à incandescence ordinaire. Il y a toutefois des différences sensibles :

La lampe ordinaire d'éclairage émet essentiellement des rayons lumineux, donc de faible longueur d'onde. La lampe à IR émet essentiellement des rayons de grande longueur d'onde (de 10 000 à 20 000 Å avec maximum vers 12 000 Å en général) ; par suite, elle donne peu de lumière (fig. 66).

L'énergie émise doit être répartie d'une façon convenable ;

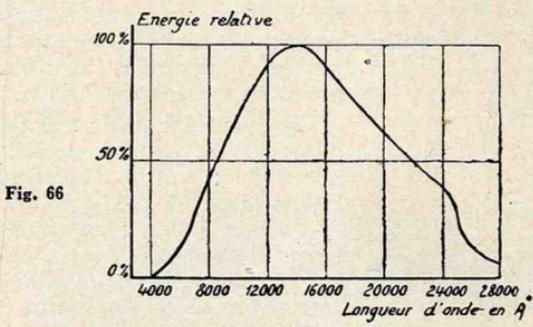


Fig. 66

d'où la nécessité d'utiliser un réflecteur doué d'un pouvoir réfléchissant aussi élevé que possible pour les rayons considérés.

Pratiquement, on a équipé au début les lampes à IR au moyen de filaments de carbone. Actuellement, ces filaments sont en tungstène.

L'ampoule est en verre, substance qui laisse passer les rayons IR. Le culot, de forme appropriée, permet d'éviter le noircissement de l'ampoule à l'usage.

Les métaux qui ont le meilleur pouvoir réfléchissant, aux longueurs d'onde envisagées, sont l'argent, l'or, le cuivre, l'aluminium poli, notamment par procédé électrolytique (« Alzac »). Encore faut-il que les métaux ne ternissent pas (ce qui est le cas de l'argent).

Les Américains avaient recours, avant la guerre, à des réflecteurs en Alzac doré. Dans les lampes de construction française, le réflecteur est réalisé au moyen d'un cuivrage ou d'un argentage intérieur de la partie sphérique ou parabolique de l'ampoule ; ampoule et réflecteur forment ainsi un seul appareil et la partie réfléchissante est à l'abri de toute détérioration ou flétrissure telles que oxydation, dépôt de poussières, salissures, rayures.

Les lampes actuelles sont équipées avec un culot à vis Edison ; elles sont de forme sphérique ou parabolique (fig. 67), mais il est possible qu'ultérieurement on en construise de forme allongée ; leur puissance est de 250 W.

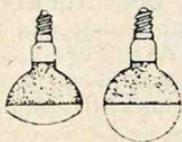


Fig. 67

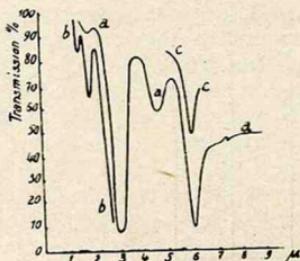


Fig. 68

a, épaisseur d'eau de 0,01 mm ; b, épaisseur d'eau de 0,05 mm ; c, épaisseur d'eau de 0,001 mm.

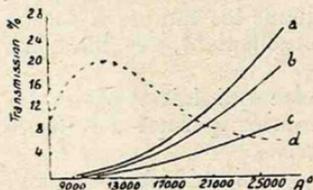


Fig. 69

a, vernis laqué à la poudre de bronze 0,005 mm ; b, rouge de première couche 0,01 mm ; c, laque noire 0,02 mm ; d, émission de la lampe de séchage.

ABSORPTION DES RAYONS INFRAROUGES

Lorsque les radiations IR rencontrent une substance opaque, ils sont plus ou moins absorbés par la substance. L'énergie transportée se dégrade ainsi plus ou moins en énergie calorifique.

Le spectre d'absorption dépend d'un certain nombre de facteurs, tels que : nature, épaisseur et température de la substance. A titre d'exemples : la figure 68 (d'après Coblenz) donne les courbes de transmission de l'eau, sous différentes épaisseurs, pour diverses longueurs d'onde ; la figure 69 (d'après Ickes et Haynes) montre que la transmission des laques considérées est faible dans la zone 10 000-20 000 Å et que par suite les rayons IR ayant les longueurs d'onde indiquées sont bien absorbés par ces substances.

Pratiquement, les longueurs d'onde les plus intéressantes à utiliser se situent entre 10 000 et 20 000 Å et notamment entre 12 000 et 16 000 Å, longueurs d'onde très favorables pour le

séchage (absorption par l'eau). C'est pourquoi les lampes à IR sont actuellement construites pour cette zone de longueurs d'onde.

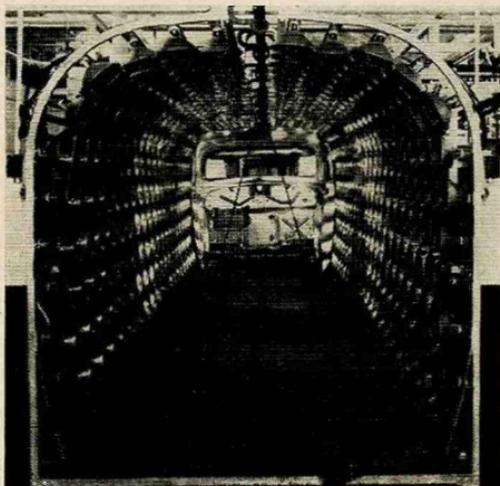
APPLICATIONS

Débuts prometteurs, en particulier pour les opérations de séchage (vernis et peintures, poudres, textiles, etc.), le chauffage par rayons IR étant essentiellement un chauffage interne et non externe : les calories sont dégagées à une certaine profondeur de la surface de la substance traitée et par suite le transport des calories se fait de l'intérieur vers l'extérieur.

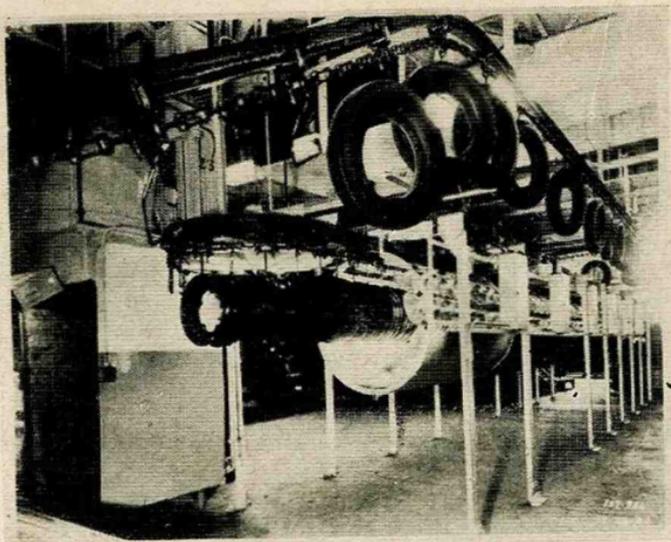
A notre connaissance, la puissance globale maximum réalisée jusqu'à ce jour dans une même installation serait de l'ordre de 2 500 kW (environ 10 000 lampes réparties dans différentes étuves de vernissage d'une usine d'automobiles aux Etats-Unis),

Les figures des pages 91 à 93 donnent quelques exemples d'appareils utilisant le chauffage par rayons infrarouges.

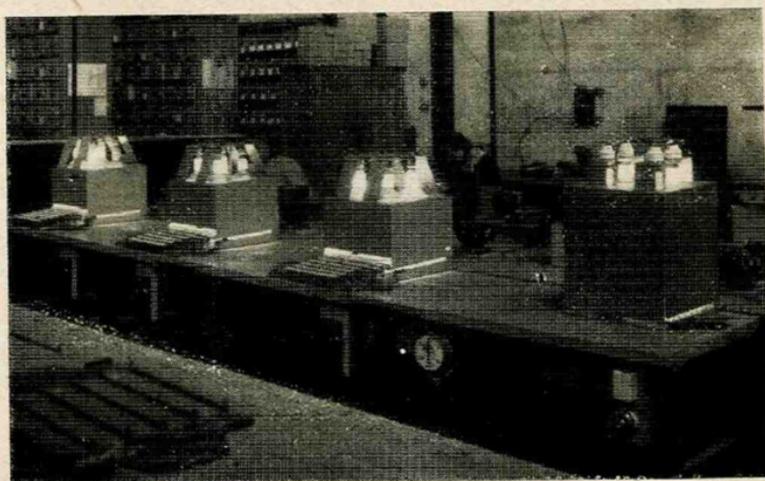
Remarque. — Notons en passant l'intérêt qu'il peut y avoir à combiner dans un même appareil l'action des rayons infrarouges pour le séchage et des rayons ultra-violetes pour une action chimique (polymérisation par ex.).



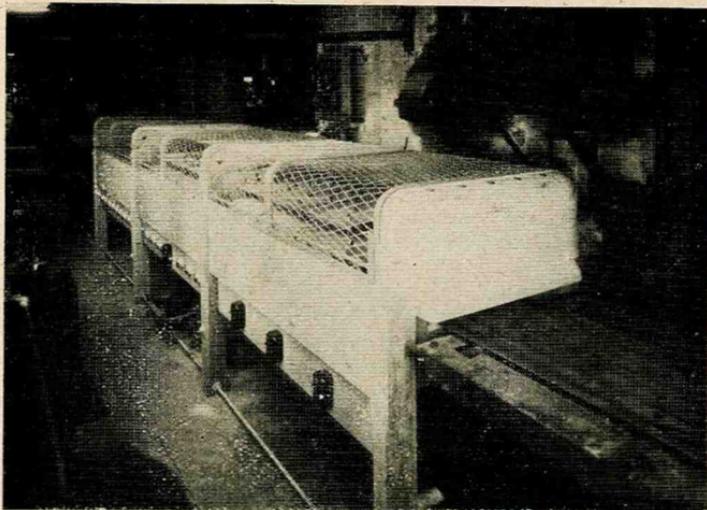
Étuve de vernissage. 480 lampes IR



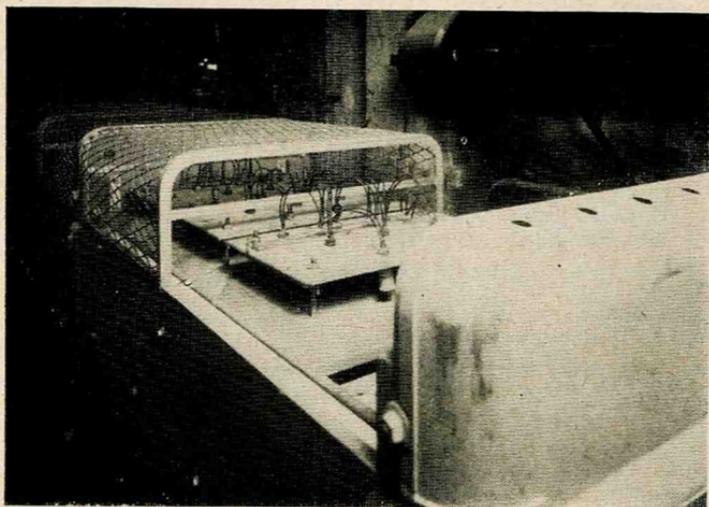
Étuve de vernissage de garde-boue. 288 lampes



Étuves de séchage de résistances vernies. 4 lampes I R par étuve



Four de biscuiterie à lampes infrarouges. Vue générale

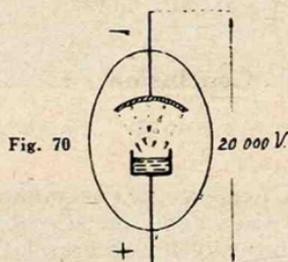


Même four. Vue du montage des lampes

E) Chauffage par rayons cathodiques

Fours à rayons cathodiques.

Soit une ampoule de verre comportant deux électrodes métalliques et dans laquelle on maintient un vide de l'ordre de 0,01 mm de mercure. Si l'on relie les électrodes aux deux pôles d'une source continue de très haute tension (20 000 V) on constate que la cathode projetée en avant d'elle, perpendiculairement à sa surface, un faisceau d'électrons à grande vitesse (rayons cathodiques) qui transportent avec eux une certaine énergie. Si ce faisceau rencontre un corps quelconque (anti-cathode), les électrons pourront y produire un échauffement notable pouvant entraîner la fusion du corps. La quantité d'énergie ainsi mise en jeu est toutefois faible. On s'arrange pour



que les électrons convergent en un point : cathode taillée en forme de sphère concave, le corps à chauffer se trouvant au centre de la sphère (fig. 70).

De tels fours à rayons cathodiques (1) ont été utilisés dans les laboratoires de recherches (fusion de fer, nickel, chrome, platine, tantale, etc.) pour des températures pouvant atteindre 2 400° C environ. La puissance est par ex. de 3 kW.

Quelques appareils de ce genre ont été construits, mais sont restés du domaine du laboratoire.

Remarque. Fours à chute anodique. — Si la cathode est formée d'un métal chauffé recouvert d'un oxyde alcalino-terreux (au lieu d'alumine), le phénomène observé est différent : l'énergie transformée en chaleur se trouve localisée au voisinage de l'anode. On a pu ainsi réaliser des fours de laboratoire à chute anodique pour l'étude de la fusion du tungstène (2 800° C environ).

(1) On peut en voir un exemplaire au Palais de la Découverte à Paris.

F) Fours mixtes (1)

Chemin faisant, nous avons constaté que certains appareils pouvaient faire appel, simultanément ou non, à plusieurs modes de chauffage. Rappelons les principaux :

- a) Chauffage mixte à induction et à résistance : ex. four Röchlin-Rodenhauser ;
- b) Chauffage mixte à arc et à résistance : ex. : fours Keller, Girod (m), Greaves-Etchells, Nathusius ;
- c) Chauffage mixte à induction : fours Ugine-Infra à éléments auto-régulateurs fonctionnant soit avec circuit magnétique fermé (à froid), soit sans circuit magnétique fermé (à une certaine température quand le moufle cesse d'être magnétique) ;
- d) Chauffage mixte à arc : four Rennerfelt, fonctionnant à volonté à arc libre ou à arc sur métal :

Conclusion

Ce qui précède montre que les propriétés essentielles du chauffage électrique sont les suivantes :

1° **Variété**, mise en évidence par le nombre de modes de chauffage auxquels on peut avoir recours et la diversité que chacun d'eux comporte (tableau récapitulatif de la double page 50-51) :

- chauffage par résistance, direct ou indirect ;
- chauffage par induction, à basse, à haute fréquence ou à très haute fréquence ;
- chauffage par arc ;
- chauffage par rayons infrarouges, voire par rayons cathodiques.

2° **Possibilité de fournir une grande quantité de chaleur en un petit espace**, notamment soit au moyen de l'arc, soit au moyen de l'induction ;

3° **Possibilité d'obtenir des températures élevées** : se reporter à la figure 71, page 97.

(1) Certains appareils (soudouses par résistance : par points ou à molettes, par rapprochement ; machines à chauffer et à refouler ; postes statiques de soudure à l'arc) participent à la fois de l'induction et de la résistance ou de l'arc ; toutefois, l'induction n'intervient pas alors pour le chauffage, mais simplement pour la réduction de la tension (l'appareil est un simple transformateur abaisseur) ; la spire secondaire fournit une tension qui donne naissance à un effet Joule direct dans la résistance fermée par les pièces à traiter ou indirect par l'arc. Il ne s'agit donc pas alors, à proprement parler, d'appareils à chauffage mixte.

A titre indicatif, on obtient couramment dans la grande industrie :

— 1 000° C dans les fours de traitement thermique des métaux et de leurs alliages ;

— 1 100-1 200° C dans les fours à induction BF de laitonnerie ;

— 1 700° C ou davantage dans les fours à arc ou à induction HF de l'électrosidérurgie ;

— 2 300-2 800° C dans les fours de graphitisation.

En atmosphère inerte ou réductrice, le carbone et le graphite permettent d'obtenir 3 000° C dans les fours spéciaux de laboratoire.

Pour l'étude de la sublimation du carbone, on a réalisé un four à induction HF qui a permis d'atteindre 3 500° C (1).

Le cratère positif de l'arc est à une température d'environ 3 500° C pour la pression atmosphérique.

Le chalumeau à arc et hydrogène atomique permet de fondre le tungstène (3 400° C) et la température maximum réalisable est probablement de l'ordre de 3 700° C ;

4° **Souplesse**, souplesse dans l'espace et dans le temps :

Souplesse dans l'espace, par la possibilité de fournir la chaleur en tout point du volume à chauffer et de répartir cette chaleur comme on le veut.

Souplesse dans le temps, par la possibilité de modifier la quantité de chaleur à tout moment et de régler la température sans difficulté ;

5° **Indépendance du chauffage et de l'ambiance**, particulièrement intéressante dans un grand nombre de traitements industriels (tels que traitements thermiques des métaux, cuisson et décor de la céramique) et de recherches de laboratoire : fours à atmosphère spéciale, fours à atmosphère sous pression, fours à vide.

A titre indicatif, signalons que les puissances usuelles varient de quelques wats à quelques dizaines de milliers de kilowatts.

A notre connaissance, la plus grande puissance mise en jeu dans un four électrique non compartimenté est d'environ 25 000 kW.

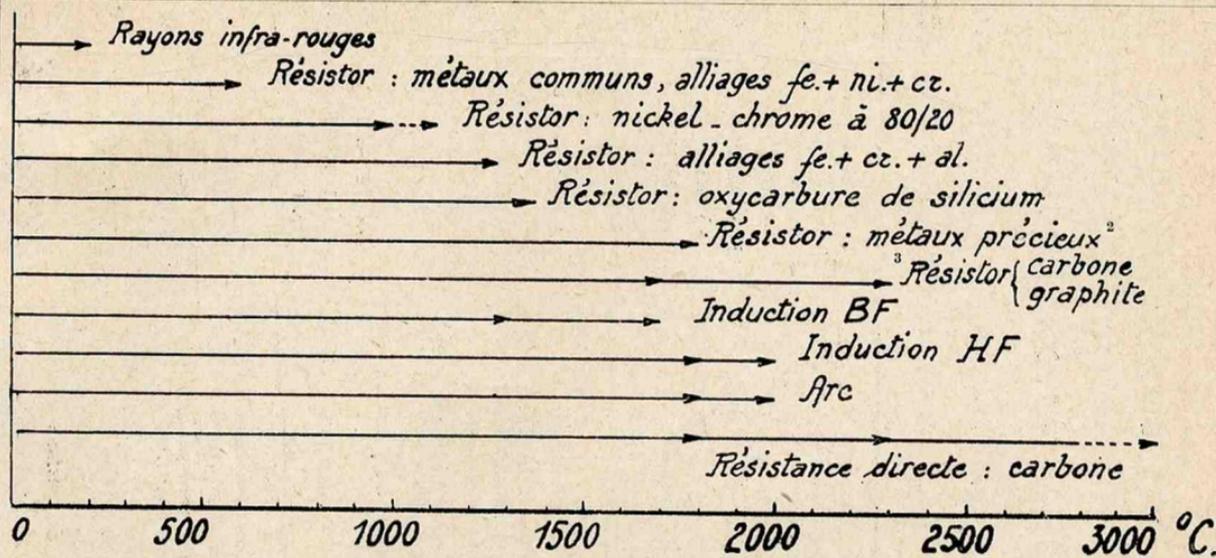
La puissance globale des appareils groupés dans les grandes installations électrothermiques industrielles atteint fréquemment des milliers ou des dizaines de milliers de kilowatts.

Dans la « conquête du feu » qui caractérise essentiellement la vie de l'homme depuis la plus haute antiquité, l'électricité a joué un rôle prépondérant et, dans une mythologie moderne, Vulcain serait sans doute représenté auprès d'un four électrique ou d'un arc électrique.

R. G.

(1) Se reporter au livre de M. RIBAUD : Les Hautes températures.

Températures obtenues couramment dans les appareils électrothermiques industriels usuels¹



¹ Les limites sont évidemment approximatives. Elles correspondent aux cas que l'on rencontre plus ou moins fréquemment dans l'industrie. On peut, bien entendu, réaliser des températures plus élevées, sous certaines conditions, par exemple, dans les fours de laboratoire, dans certains fours particuliers en atmosphère spéciale ou dans le vide.

² En atmosphère spéciale.

³ Dans le vide.

Fig. 71

LISTE DES BROCHURES "APEL"
DE
DOCUMENTATION INDUSTRIELLE

Titre	Auteur	Nombre de pages
<i>Les alliages modernes et leur traitement thermique.....</i>	APEL	24
<i>L'électricité dans la minoterie....</i>	RODDE	16
<i>L'électricité dans l'imprimerie....</i>	HISCHMANN	36
<i>L'électricité dans les cimenteries..</i>	YOKEL	34
<i>L'électricité en émaillerie.....</i>	GAUTHERET	63
<i>Le moteur électrique dans l'industrie du bois.....</i>	GIROUD	18
<i>Les applications du chauffage électrique en galvanisation....</i>	ÉTIENNE	16
<i>L'électricité dans la fabrication des produits pharmaceutiques.....</i>	GAUTHERET	46
<i>L'électricité dans la bonneterie....</i>	THONNAT	44
<i>Avaries pouvant survenir aux moteurs électriques.....</i>	GIROUD	12
<i>L'électricité dans les petits ateliers de nickelage.....</i>	GAUTHERET	84
<i>Les résistances métalliques.....</i>	GAUTHERET	37
<i>L'électricité dans la brasserie....</i>	DESFORGES et MASCART	44
<i>Les résistances non métalliques et leurs applications industrielles.</i>	GAUTHERET	47
<i>Les éléments protégés et leurs applications industrielles.....</i>	GAUTHERET	41
<i>Les redresseurs secs et leurs applications industrielles.....</i>	LEBLANC	52
<i>L'électricité dans les industries de protection des métaux contre la corrosion et l'usure.....</i>	GAUTHERET	56

LISTE DES BROCHURES "APEL"
DE
DOCUMENTATION INDUSTRIELLE
(Suite)

Titre	Auteur	Nombre de pages
<i>Les fours électriques à bains de sels à électrodes.....</i>	GAUTHERET	48
<i>Les fours électriques à résistances.</i>	GAUTHERET	50
<i>Les différents types de fours à résistances.....</i>	GAUTHERET	64
<i>Comment choisir et acheter un four à résistances.....</i>	GAUTHERET	64
<i>Comment installer, réceptionner, utiliser un four à résistances...</i>	GAUTHERET	40
<i>L'électricité dans l'industrie des matières plastiques.....</i>	PIARD	28
<i>L'amélioration du facteur de puissance dans les installations industrielles.....</i>	GAUTHERET	72
<i>Les machines à chauffer électriques par résistances et leurs applications industrielles.....</i>	BIDAUX	46
<i>Les étuves électriques et leurs applications industrielles.....</i>	TILLAUD	37
<i>Le séchage artificiel des fourrages</i>	TOURNIER	25
<i>L'électricité dans une grande usine de produits alimentaires.....</i>	GAUTHERET	47
<i>Les appareils thermostatiques....</i>	LELY	58
<i>La soudure électrique à l'arc et ses applications.....</i>	SAELLES	74
<i>Les fours électriques à arc.....</i>	DÉRIBÉRE	67
<i>Les fours électriques à induction.</i>	MINSSIEUX	80

1943. — Imprimerie des Presses Universitaires de France, Vendôme (France). — C.O.L. 31.0455

*Extrait de la revue Électricité
numéros de novembre et décembre 1943*

N° d'autorisation 201

Dépôt légal : 4-1943. — N° 10.070. — 703, 104



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM



XXXI-1943

La Société pour le Développement des Applications de l'Électricité AP-EL, 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)