

# **LE CHAUFFAGE PAR INDUCTION A HAUTE FRÉQUENCE**

**Par R. GAUTHERET**

---

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





ULTIMHEAT®

VIRTUAL MUSEUM

# **Le Chauffage par induction à haute fréquence**

Par R. GAUTHERET





## SOMMAIRE

	Pages
<i>AVANT-PROPOS</i> .....	4
<i>PREMIÈRE PARTIE : THÉORIE GÉNÉRALE</i> ..	6
<i>Principe du chauffage par induction</i> .....	6
<i>Définition des hautes fréquences</i> .....	8
<i>Transfert de l'énergie électrique</i> .....	8
<i>Transformation de l'énergie él. en énergie thermique</i> .....	13
<i>Transmission thermique</i> .....	13
<i>Choix de la fréquence</i> .....	14
<i>Générateurs de courant H. F.</i> .....	15
<i>générateur à alternateur</i> .....	15
— à étincelles .....	17
— à arc Poulsen .....	19
— à onduleur .....	19
— électronique .....	19
<i>Inducteurs</i> .....	29
<i>Avantages généraux du chauffage par induction H. F.</i> .....	35
<i>DEUXIÈME PARTIE : APPLICATIONS</i> .....	37
<i>Fusion et affinage des métaux</i> .....	37
<i>Frittage</i> .....	43
<i>Traitements thermiques des aciers</i> .....	45
<i>Forgeage, estampage, recuit et revenu</i> .....	57
<i>Brasage et soudage autogène</i> .....	61
<i>Dégazage des métaux</i> .....	67
<i>Autres applications</i> .....	69
<i>BIBLIOGRAPHIE</i> .....	72
<i>CONCLUSION</i> .....	73
<i>LISTE DES BROCHURES APEL</i> .....	74

## NOTE

---

*Nous avons indiqué, pour chaque figure illustrant cette brochure, le nom de la société qui nous a fourni le document photographique considéré. Pour éviter d'alourdir le texte, nous avons utilisé les abréviations suivantes pour les sociétés dont le nom revient fréquemment (ordre alphabétique) :*

CDL	Compagnie des Lampes.
CFTH	Compagnie Française Thomson-Houston.
CGR	Compagnie Générale de Radiologie.
PA	Établissements Partiot.
PH	Société Philips-Industrie.
SEE	Société d'Entreprises Électromécaniques.
SEF	Société Électronique Française.
SGAET	Société Générale d'Applications Électrothermiques.
EFCO	Électric Furnace Cy.
STEL	Société des Traitements Électrolytiques et Électrothermiques.

*Autres abréviations utilisées dans le texte :*

GA	Générateur à alternateur.
GE	Générateur électronique.

## AVANT-PROPOS

---

*Le principe du chauffage électrique par induction à haute fréquence est connu depuis longtemps. Toutefois, la théorie n'en a été faite que plus récemment (1) et ce n'est guère que depuis quelques années que ce mode de chauffage connaît en France un développement industriel important ; à tel point qu'on peut le considérer comme un procédé nouveau de fabrication ou de traitement.*

*Il semble donc que le moment soit venu de faire le point des applications industrielles de ce mode de chauffage.*

*L'objet de cette brochure est de donner les indications indispensables que tout industriel intéressé par un problème de chauffage par induction H. F. doit connaître. Il s'ensuit que nous n'entrerons dans le détail ni de la théorie — d'ailleurs souvent fort complexe — du chauffage, ni de la construction des appareils, ni de la technique des applications.*

*Nous chercherons au contraire à simplifier — sans les trahir — les théories indiquées, de façon à les rendre immédiatement assimilables. Nous mentionnerons succinctement un certain nombre d'applications — en multipliant les photographies — afin que le lecteur ait un aperçu aussi complet que possible des applications déjà réalisées et puisse déceler les nouvelles applications réalisables, techniquement et économiquement.*

*Nous ne saurions trop insister sur le fait que toute technique nouvelle doit être adaptée à la fabrication pour laquelle on veut l'employer et que cette adaptation, pour être efficace, entraîne souvent une modification heureuse des méthodes de travail auxquelles on a eu recours jusqu'alors.*

---

(1) Notamment par M. le Professeur Ribaud. Se reporter également à la bibliographie (articles de MM. Ribaud, Bunet, Fourment, Jouguet, Levasseur).



## PRINCIPE DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Une masse conductrice (métallique par exemple), placée dans un champ électromagnétique variable, s'échauffe (fig. 1). L'explication de ce phénomène est simple : la variation du champ provoque une variation du flux magnétique qui traverse la masse électriquement conductrice, ce qui donne naissance à une force électromotrice (1) et par suite

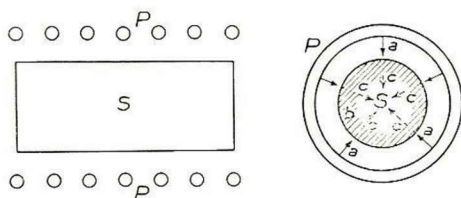


Fig. 1.

à des courants de Foucault. Ceux-ci produisent un effet Joule, c'est-à-dire une transformation de l'énergie électrique en énergie thermique et, à son tour, la chaleur se propage par conduction dans le métal.

Ainsi apparaissent trois faits physiques successifs, que la figure 1 met en évidence :

1° Transfert  $\alpha$  de l'énergie électrique depuis un solénoïde (bobine inductrice primaire ou inducteur P) jusqu'au corps à chauffer (secondaire S) par induction : analogie avec un transformateur sans fer (2) (fig. 2 à droite) ;

2° Transformation en chaleur, dans le secondaire, de l'énergie électrique qui y a été transférée : effet Joule (3) ;

3° Transmission  $\epsilon$  de cette chaleur, par conduction dans la masse.

(1) Rappel de la loi de Leuz : « Une force électromotrice induite prend naissance dans un circuit quand le flux magnétique qui traverse ce dernier varie ». La variation peut être produite par le balayage des lignes de force du champ par le conducteur (exemple : spires de l'induit d'un moteur à courant continu, donc à champ constant) ou par la variation du champ lui-même (exemple : champ alternatif produit par le courant alternatif parcourant le solénoïde de la fig. 1). « Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance » ; la force électromotrice considérée a pour valeur :

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad d\Phi \text{ étant la variation de flux pendant le temps } dt.$$

Rappel de la loi Joule : La puissance électrique P transformée en chaleur dans un conducteur de résistance R parcouru par un courant d'intensité I pour valeur :

$$P = RI^2$$

Bien entendu, ces phénomènes ne se produisent pas sans pertes.

D'autre part, ils sont pratiquement plus complexes qu'il ne vient d'être dit. En particulier, les courants de Foucault ne se répartissent pas régulièrement dans toute la masse.

Enfin, à l'effet de ces courants peut s'ajouter l'action de l'hystérésis dans les métaux ferro-magnétiques (4).

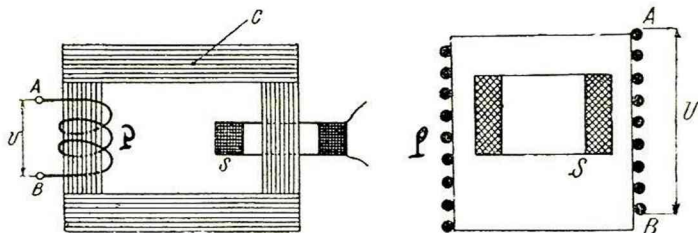


Fig. 2.

P = primaire (inducteur). S = secondaire (charge).  
C = circuit magnétique fermé.

(2) Rappelons à ce sujet que les « fours à induction » peuvent être classés comme suit :

les fours « avec circuit magnétique fermé » dénommés communément, mais à tort, « fours à Basse Fréquence », (fig. 2 à gauche).

les fours « sans circuit magnétique fermé » dits « fours à Haute Fréquence ». Les appareils de cette deuxième catégorie de fours ne sont, en somme, que de simples transformateurs dans l'air (fig. 2 à droite).

(3) La différence essentielle entre le chauffage par induction et le chauffage par résistance réside dans le fait suivant : dans le premier cas, l'effet Joule est produit sans qu'il y ait aucun contact direct entre la source d'énergie électrique et la matière à chauffer ; dans le second cas, il faut appliquer une tension électrique entre les deux extrémités de la matière (du corps de chauffe dans le cas général du chauffage au moyen de « résistances »).

(4) Les métaux magnétiques, soumis à l'action d'un champ variable, subissent une aimantation dont l'intensité varie avec le champ inducteur (fig. 3). La courbe d'aimantation n'est pas confondue avec la courbe de désaimantation. C'est au retard qui se produit lors de la désaimantation que l'on donne le nom d'hystérésis. Quand le champ varie (courant alternatif), le métal décrit un « cycle d'hystérésis » et il en résulte des pertes proportionnelles à la surface comprise entre la courbe d'aimantation et la courbe de désaimantation.

Ces pertes thermiques s'ajoutent à l'effet Joule dû aux courants de Foucault, ce qui facilite le chauffage des métaux magnétiques tant que ceux-ci n'ont pas atteint leur point de Curie.

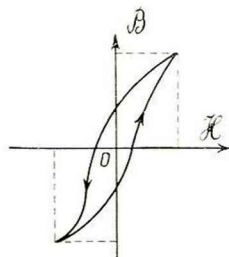


Fig. 3.

## DÉFINITION DES HAUTES FRÉQUENCES

Les phénomènes d'induction peuvent être produits par des courants à toutes fréquences. On désigne habituellement par « basses fréquences » les fréquences usuelles des secteurs (50 et 25 herz) et également les fréquences plus basses et par « hautes fréquences » les fréquences supérieures à 50 herz (50 herz = 50 périodes par seconde).

## TRANSFERT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

### Effet pelliculaire.

Les courants induits se concentrent à la surface du conducteur S. Cet « effet de peau », négligeable en général aux fréquences usuelles des réseaux de distribution (50 herz), est très important aux fréquences élevées qui nous intéressent ici.

### Cas d'un cylindre.

Pour fixer les idées, dans le cas d'une masse métallique cylindrique S placée à l'intérieur d'un solénoïde P (fig. 4 a), les courants induits se répartissent comme indiqué figure 4 b (le flux magnétique étant nul au centre et variant exponentiellement en fonction du rayon) et tout se passe en somme, au point de vue électrique, comme si on avait affaire à un tube (fig. 4 c) d'épaisseur  $e$  au lieu d'un cylindre, c'est-à-dire à une résistance de longueur  $\pi d$ , de section  $he$  et de résistivité  $\zeta$ . Cette « épaisseur de peau » a pour valeur :

$$e = \sqrt{\frac{\zeta}{\mu f}}$$

$f$  étant la fréquence du courant inducteur (courant traversant P, figure 4 a),  $\zeta$  la résistivité électrique et  $\mu$  la perméabilité magnétique du métal constituant le cylindre S.

### *Influence de la résistivité.*

L'épaisseur de peau est proportionnelle à la racine carrée de  $\zeta$ . Le tableau I montre l'importance de la nature du métal à ce titre.  $\zeta$  est d'ailleurs fonction de la température :  $\zeta t = \zeta_0 (1 + \alpha t)$ ,  $\zeta t$  et  $\zeta_0$  étant les valeurs respectives de  $\zeta$  aux températures  $t$  et zéro et  $\alpha$  un coefficient dépendant de



Tableau I

Métal	Résistivité électrique microhms. cm <sup>2</sup> :cm
Argent .....	1,47
Cuivre .....	1,56
Aluminium .....	2,56
Zinc .....	5,75
Fer .....	9,07
Nickel.....	12,32
Wolfram.....	10,92
Molybdène .....	9,01
Nickel-chrome à 80,20.....	102-108

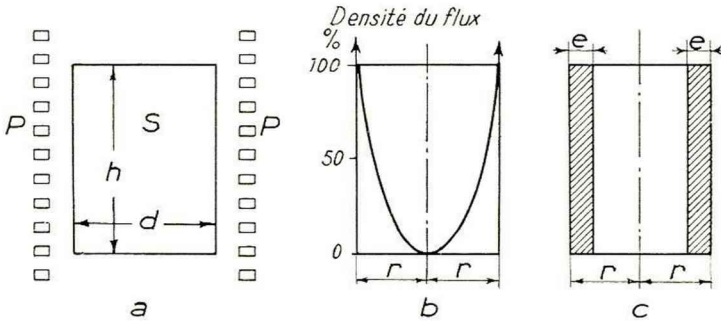


Fig. 4.

la nature du métal ( $\alpha$  est positif pour les métaux ; pour le carbone, il est généralement négatif).

*Influence de la perméabilité.*

Pour les métaux non magnétiques,  $\mu = 1$ . Pour les métaux magnétiques,  $\mu$  peut avoir une valeur élevée : 1.000 pour le fer en dessous du point de Curie (tableau II, page 10), 1 après passage de ce point.

*Influence de la fréquence.*

$e$  est proportionnelle à la racine carrée de l'inverse de  $f$ , donc a une valeur d'autant plus petite que la fréquence est plus élevée.

Tableau II

Métal	Point de Curie (°C)
Fer .....	775
Nickel.....	360
Cobalt.....	1.100
Aciers au carbone (1).....	770-720

(1) 770 jusqu'à 0,4 % de C; 720 pour 0,9 % de C.  
*N. B.* Dans les aciers : Co et Fe entraînent une augmentation du point de Curie ; Ni, Mg, Zn, Mb, Ti, Al, Si, Cr, Va entraînent une diminution, l'ordre d'efficacité étant celui dans lequel ils sont mentionnés. Exemples:  
 600°C pour 30 % de Ni, 400°C pour 60 % de Ni;  
 650°C pour 20 % de Zn ;  
 490°C de 15 à 35 % de Si.

*Valeur de e.*

Le tableau III donne à titre indicatif la valeur de  $e$  en cm pour différentes substances et diverses fréquences, les valeurs de  $\zeta$  étant approximatives.

*Energie induite.*

Elle a pour valeur  $R_2 I_2^2$ ,  $R_2$  étant la résistance du tube auquel on assimile le cylindre et  $I_2$  le courant moyen (courant secondaire) qui le traverse. Tous calculs faits, on trouve que la puissance  $W$  par cm de longueur garni de spires a pour valeur :

$$(1) \quad W = n^2 I^2 \pi \frac{d}{h} \sqrt{\mu f \zeta}$$

$I$  étant le courant dans le solénoïde (courant primaire) et  $d$  le diamètre moyen du tube supposé petit devant sa hauteur  $h$ .

Cette formule met en évidence l'influence du nombre d'ampères-tours ( $nI$ ), du rapport  $\frac{d}{h}$  du diamètre à la hauteur, de la perméabilité  $\mu$ , de la résistivité  $\zeta$  et de la fréquence  $f$ .

*Energie perdue dans l'inducteur.*

Le courant inducteur se localise également à la périphérie de l'inducteur (pratiquement en cuivre), d'où une certaine dépense d'énergie  $W'$ .

Tableau III

Fréquence	Cuivre froid	Plomb solide et cuivre fondu	Mercure froid	Platine et fer fondus	Graphite
	$\zeta = 2.10^3$	$\zeta = 25.10^3$	$\zeta = 100.10^3$	$\zeta = 200.10^3$	$\zeta = 1000.10^3$
50	1	4	8	11	26
500	0,4	1,2	2,4	4	8
2.000	0,2	0,6	1,2	2	4
10.000	0,1	0,3	0,6	0,8	2
100.000	0,03	0,1	0,2	0,3	0,6
1.000.000	0,01	0,03	0,06	0,1	0,2

B. Les valeurs de  $\zeta$  sont exprimées en unités CGS (ohms.cm<sup>2</sup>.cm).

*Rendement.*

Le rendement  $\eta$  relatif à la transformation de l'énergie électrique de haute fréquence (H F) en énergie thermique a pour expression  $\frac{W}{W + W'}$ . On démontre qu'il a pour valeur :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{d'}{d} \sqrt{\frac{\zeta'}{\mu \zeta}}}$$

$d'$  et  $\zeta'$  étant respectivement le diamètre intérieur et la résistivité de l'inducteur P.

$\eta$  sera donc d'autant plus élevé que :

le couplage inducteur-pièce sera plus serré ( $\frac{d'}{d}$  voisin de 1),

la résistivité  $\zeta$  et la perméabilité  $\mu$  du métal seront plus grands.

Le chauffage des métaux ferro-magnétiques au-dessous de leur point de Curie bénéficiera donc d'un bien meilleur rendement que celui des autres métaux. Le tableau IV (page 12) donne, à titre comparatif, la valeur du rendement théorique maximum de certaines substances pour diverses températures.

On notera d'ailleurs que, dans le cas de nombreux traitements en haute fréquence, le rendement a un intérêt beaucoup moindre que dans les opérations thermiques similaires,



Tableau IV

Métal	Températures		
	15°C	1.000°C	Temp. de fusion
Cuivre, argent....	0,50	0,70	0,75
Platine .....	0,70	0,80	0,90
Plomb .....	0,72		0,88
Mercure.....	0,87		
Fer ou acier.....		0,87	0,92
Graphite .....	0,97		

parce que le chauffage est extrêmement court ; c'est ce qui se passe en particulier pour le chauffage en vue de la trempe superficielle des aciers.

*Facteur de puissance.*

L'influence de l'inductance de fuite correspondant à l'intervalle compris entre la pièce à chauffer et l'inducteur conduit à un très faible facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) qui, en général, est de l'ordre de 0,1 à 0,2. On en relève la valeur par la batterie de condensateurs du générateur de courant HF.

*Facteurs de correction.*

La formule de départ qui donne  $e$  n'est exacte que si  $e$  est faible par rapport à  $\bar{d}$ . De même, il faut tenir compte du « facteur de forme » (rapport  $\frac{h}{\bar{d}}$ ) et d'un certain facteur dénommé « facteur de champ », lequel tient compte des caractéristiques de l'enroulement inducteur et du couplage entre primaire P et secondaire S.

**Cas d'un disque.**

Les bords d'un disque métallique placé dans un solénoïde sont beaucoup plus chauffés que la région centrale et la chaleur prend naissance sur les bords des deux faces du disque.

**Cas d'un tube mince.**

Dans le cas où l'épaisseur d'un tube métallique est infé-

rieure à la valeur de  $\epsilon$ , l'énergie induite est plus grande que dans le cas d'un cylindre plein de même diamètre.

### Cas de substances fragmentées.

Ex. : riblons, grenaille... L'énergie induite passe par un maximum pour  $\frac{d}{e}$  voisin de 3,6 ; puis elle décroît.

### Cas de métal en fusion.

Il se produit un brassage du bain de métal qui dépend de la fréquence du courant, de la puissance et du diamètre du four, de la résistivité de la charge. Cet effet est d'autant plus marqué que la fréquence est plus basse.

## TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN ÉNERGIE THERMIQUE

Finalement, la plus grande partie de l'énergie électrique du primaire (inducteur) se transforme en chaleur dans le secondaire constitué par la masse.

### TRANSMISSION THERMIQUE

La chaleur ainsi produite à la périphérie du secondaire (charge) se transmet rapidement dans la masse de la charge, quand cette dernière est métallique, les métaux étant bons conducteurs de la chaleur. Cette transmission se fait par conduction de la « couche de peau » vers l'intérieur et elle tend à égaliser la température dans la masse.

D'autre part, la surface de la masse donne lieu à des pertes par rayonnement et convection, pertes qui sont pratiquement négligeables dans le cas de traitements rapides et qui peuvent être facilement diminuées par des dispositifs appropriés dans le cas de traitements de longue durée (emploi de calorifuge par exemple).

On imagine facilement que l'on puisse agir, par le choix de la fréquence du courant inducteur, la puissance du générateur de courant et la durée du chauffage sur la transmission de la chaleur et réaliser ainsi, suivant le cas, un *chauffage à cœur* ou un *chauffage superficiel*, tout en évitant la surchauffe superficielle.

## CHOIX DE LA FRÉQUENCE

La relation (1) indiquée précédemment (page 10), montre que, pour une charge donnée, on peut augmenter la puissance induite  $W$  :

En augmentant le nombre d'ampères-tours ( $nI$ ) : mais on est limité dans cette voie par la place dont on dispose pour installer les  $n$  spires du solénoïde (inducteur) et par l'intensité  $I$  qui les parcourt :

En augmentant la fréquence  $f$  : on est toutefois limité dans cet accroissement de  $f$  par les diverses considérations qui suivent :

la résistance de l'inducteur (cuivre) croît avec la fréquence, ce qui limite  $I$  ;

les pertes dans les isolants (de la batterie de condensateurs jointe au générateur, ainsi que des supports de l'appareil) croissent avec  $f$  ;

les pertes par rayonnement ( $W'$ ) croissent également avec  $f$  ;

la couche de peau  $e$  est d'épaisseur d'autant plus petite que  $f$  est plus élevée : or, dans certains cas, on recherche un chauffage rapide, mais pas trop superficiel.

Il y a cependant une fréquence minimum qu'il faut atteindre pour obtenir un rendement  $\eta$  convenable. Dans le cas d'un cylindre par exemple,  $\eta$  est fonction de  $\frac{d}{e}$ , donc de  $e$  et par suite de  $f$  ; la valeur minimum de  $f$  a alors pour valeur  $f_m = \frac{2}{d^2} \frac{\xi}{\eta}$  : elle varie en fonction inverse du carré du diamètre, pour un métal donné. En conséquence, pour chauffer un cylindre de grand diamètre, on pourra se contenter d'une fréquence basse ; pour chauffer des feuilles minces, des fils fins ou des poudres, il faudra des fréquences élevées.

Ces résultats généraux ne sont plus rigoureusement valables, dans le cas de fréquences très élevées de l'ordre du mégahertz (MHz) par exemple, en raison de l'importance que prennent alors les capacités parasites des circuits et de la charge.

## GÉNÉRATEURS DE COURANT H. F.

Ils doivent pouvoir répondre à tous les besoins industriels de fréquence, de puissance et de fonctionnement (régime constant ou variable).

En principe, on peut les classer en 5 groupes.

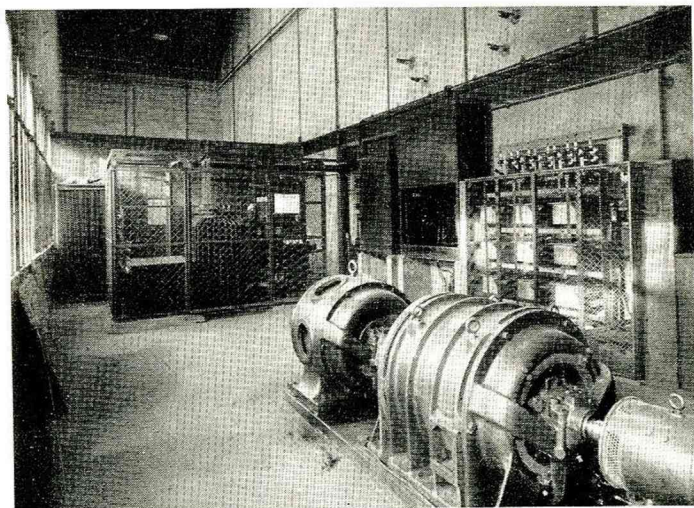
### Générateur à alternateur.

Un tel groupe comporte essentiellement :

un moteur polyphasé (en général triphasé) du type asynchrone ordinaire ou, exceptionnellement, du type synchrone (si l'on veut améliorer le facteur de puissance du moteur lui-même). Ce moteur est alimenté par le réseau normal du secteur à 50 Hz ;

un alternateur monophasé HF, en principe du type homopolaire à fer tournant, donc sans aucun bobinage sur le rotor, ce qui permet d'améliorer le rendement et la robustesse de la machine,

une batterie de condensateurs statiques HF, usuellement du type au papier dans l'huile, destiné à l'amélioration du



(Doc. SGAET).

Fig. 5. — Générateur à alternateur 150 kW.



facteur de puissance du circuit HF. La valeur de ce facteur est ramenée le plus souvent de sa valeur initiale voisine de 0,1 jusqu'à l'unité. Les pertes des condensateurs étant minimales, de l'ordre de 0,20 — 0,25 % de la puissance nominale, ces appareils ont une très longue durée, par exemple plus de dix ans sans aucun entretien.

Les puissances de tels groupes sont couramment de 5 à 500 kW, exceptionnellement de quelques milliers de kW.

Les fréquences varient de quelques centaines à quelques milliers de Hz, en général de 0,5 à 10 kc/s (1 herz = 1 cycle par seconde).

Le rendement global est élevé, par exemple 82-88 %.

La capacité des condensateurs en service peut être réglée, au moyen de simples interrupteurs, pour tenir compte des variations éventuelles (en particulier dans le cas de fusion de métaux) du facteur de puissance du circuit HF.

La puissance appliquée à l'inducteur alimenté par le

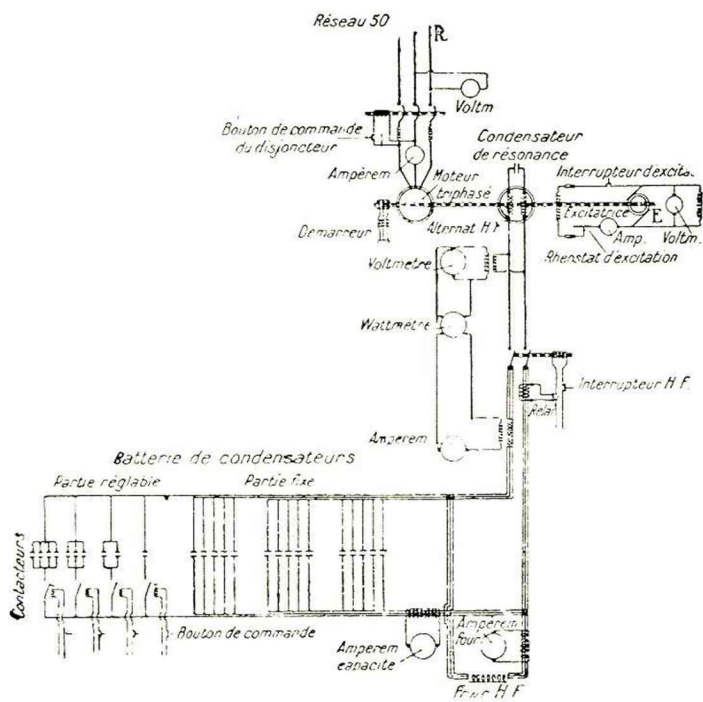


Fig. 6.

groupe peut être réglée de façon continue par action sur le circuit d'excitation de l'alternateur, ce qui fait varier la tension du circuit HF.

Dans certaines installations de fusion, il peut être intéressant d'utiliser un inducteur supplémentaire alimenté à BF (fréquence du réseau, par exemple) pour homogénéiser le bain du métal fondu.

La fig. 6 donne le schéma simplifié d'une installation avec alternateur HF. La fig. 5 représente une installation de production d'énergie HF (5).

### Générateur à étincelles.

Ce type de générateur, dénommé souvent « poste à éclateur », est le premier qui ait été réalisé industriellement pour l'obtention de courants HF (5).

Principe : une source  $S$  (fig. 7, en haut, à gauche) de courant continu à tension élevée charge une capacité  $C$  dont la différence de potentiel  $d$  entre  $A$  et  $B$  s'accroît ; lorsque  $d$  a atteint une certaine valeur,  $C$  se décharge brusquement

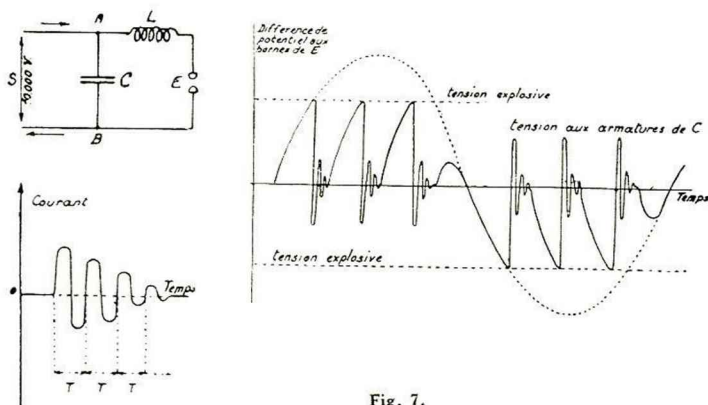


Fig. 7.

dans une étincelle qui jaillit entre les pointes de l'éclateur  $E$  ;  $C$  se charge de nouveau et le cycle recommence. D'où une série de décharges (fig. 7, en bas, à gauche).

(5) On trouvera de plus amples détails sur ce type de générateurs, ainsi que d'autres photographies dans la brochure Apel intitulée : « Les tours électriques à induction » par J. Minssieux. Voir également les autres photographies de la présente brochure.

Pratiquement, on remplace la source de courant continu par une source de courant alternatif, mono ou triphasé, un transformateur permettant d'obtenir facilement la tension élevée nécessaire.

L'énergie totale mise en jeu dépend de la tension de la source à potentiel élevé et du nombre d'étincelles par seconde, c'est-à-dire du réglage de la tension (impédance de réglage) et de l'éclateur (vitesse de l'éclateur et distance de coupure dans le cas d'un éclateur tournant). La fig. 7 (à droite) se rapporte à l'alimentation d'un éclateur en courant alternatif.

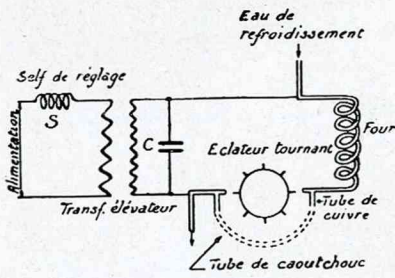
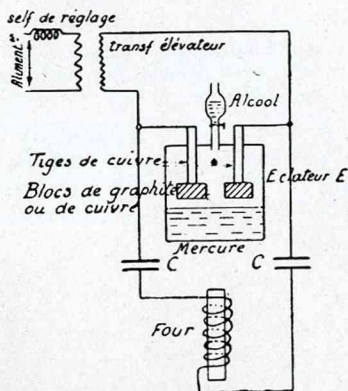


Fig. 8.

Un poste à étincelles comporte donc essentiellement :

- un transformateur élévateur de tension,
- un condensateur,
- un éclateur,
- l'inductance constituant le four ou l'inducteur.

Deux sortes d'éclateurs sont utilisés en chauffage HF :

l'éclateur tournant, système Ribaud (fig. 8, en bas).

l'éclateur fixe, système Ajax-Northrup (fig. 8, en haut).

L'étincelle peut jaillir soit à l'air libre, soit dans une atmosphère définie (hydrocarbure par exemple).

Les puissances usuelles sont de 5 à 50 kW, les fréquences de 2 500 à 250 000 Hz.

Le rendement global est faible, de l'ordre de 50%, soit une puissance utile de 2,5 à 25 kW.

La puissance absorbée, quand l'appareil ne débite pas, est faible.



### **Générateur à arc Poulsen.**

Un tel générateur consiste essentiellement en un arc alimenté en courant continu sur une tension de quelques centaines de volts et jaillissant dans une atmosphère d'hydrocarbure (une électrode en cuivre refroidie par courant d'eau et une électrode en graphite). Aux bornes de cet arc soufflé par un champ magnétique transversal est branché un circuit oscillant comprenant une inductance, une batterie de condensateurs et la charge placée dans l'inducteur.

La fréquence est de l'ordre de quelques dizaines de milliers à quelques centaines de milliers de herz.

Ce type de générateur ne semble pas avoir donné lieu à d'importantes réalisations industrielles.

### **Générateur à onduleur.**

En utilisant des thyratrons convenablement connectés entre eux et dont les anodes sont alimentées par une source de courant continu à haute tension, on peut obtenir directement de l'énergie dont la fréquence peut atteindre, dans l'état actuel de la technique, 2 000 à 3 000 herz.

Ce type de générateur a fait l'objet d'applications de laboratoire, mais son développement industriel est encore très limité.

### **Générateur électronique.**

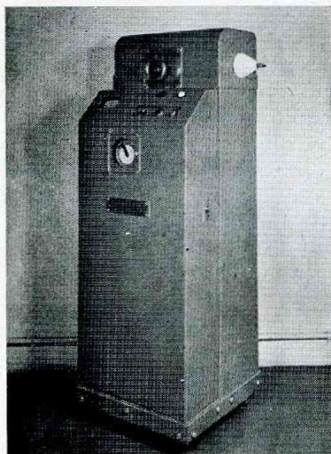
Un tel générateur (6) qui est en quelque sorte un convertisseur statique de fréquence, comporte essentiellement un ou plusieurs tubes électroniques, en général du type « triode », fonctionnant en auto-oscillateur sur un circuit comprenant essentiellement le plus souvent, une inductance, une capacité et une résistance « apparente » constituée par la charge elle-même placée dans un inducteur.

Dans un générateur électronique, on trouve donc trois

---

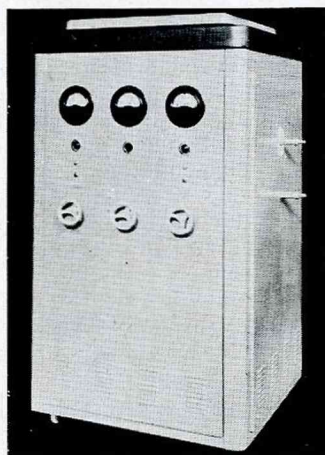
(6) Il paraît nécessaire de souligner la différence qui existe entre les émetteurs radiotélégraphiques et les générateurs industriels de courant à HF. Tous deux utilisent les mêmes techniques ; tous deux doivent être robustes et d'un fonctionnement sûr. Mais les premières doivent fournir une onde stable et pure ; ils fonctionnent généralement à charge constante, dans des locaux conditionnés, avec du personnel spécialisé. Pour les appareils industriels, la qualité de l'onde passe au second plan ; ce qui prime, c'est la possibilité de fonctionner à charge très variable, dans un local quelconque, avec un personnel non spécialisé, dans des conditions satisfaisantes de rendement et avec des dépenses d'amortissement (prix d'installation) et d'exploitation aussi réduites que possible. Les conditions de la conception et de la construction sont par suite différentes.





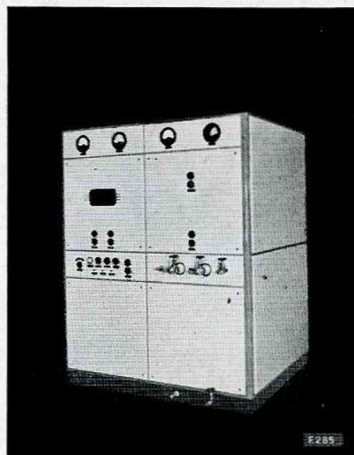
(Doc. CFTH.)

**Fig. 9.**  
**Générateur électronique 1.250 W.**



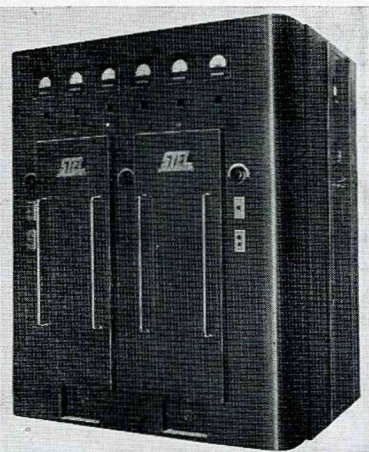
(Doc. SEE.)

**Fig. 10.**  
**Générateur électronique 5 kW.**



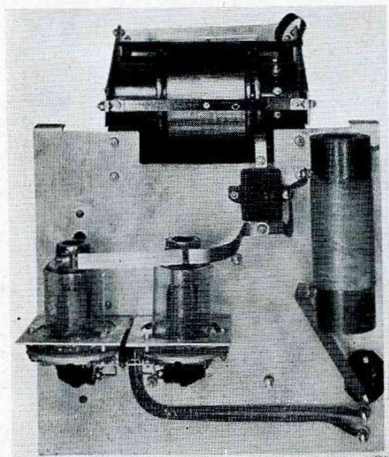
(Doc. PH.)

**Fig. 11.**  
**Générateur électronique 22 kW.**

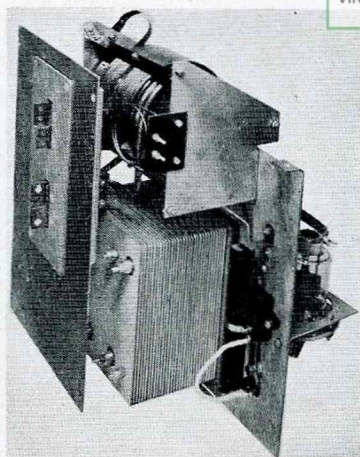


(Doc. STEL.)

**Fig. 12.**  
**Générateur électronique 20 kW.**

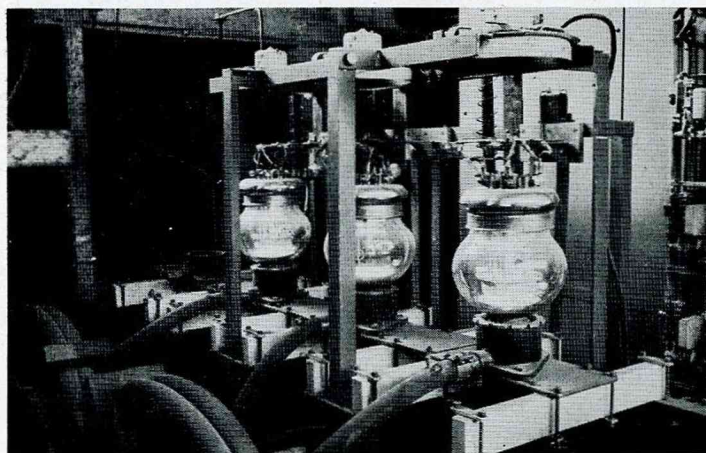


(Doc. STEL.)



(Doc. STEL.)

**Fig. 13 et 14. — Générateur électronique 200 W. Vues intérieures du circuit oscillant, montrant notamment le condensateur (à droite), les inductances (en haut) et les lampes (à gauche).**



(Doc. SEF.)

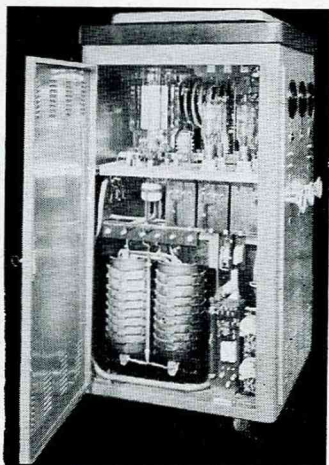
**Fig. 15. — Générateur électronique 100 kW. Vue intérieure montrant les 3 lampes.**





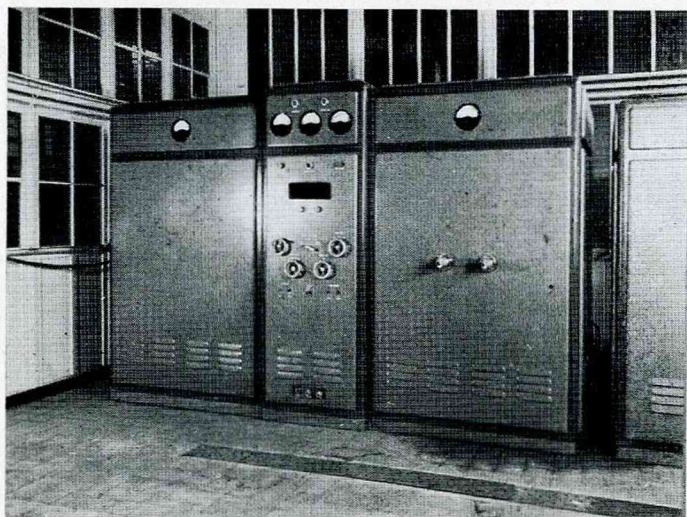
(Doc. STEL )

**Fig. 16.**  
Générateur électronique 200 W.



(Doc. SEE.)

**Fig. 17. — Générateur électronique**  
5 kW. *Vue intérieure : en bas,*  
*alimentation; en haut, valve et triode.*



(Doc. PH.)

**Fig. 18. — Générateur électronique 44 kW.**

parties essentielles : une source d'alimentation anodique, un tube électronique, un circuit oscillant.

Les générateurs électroniques peuvent être alimentés soit directement par une source de courant alternatif à haute tension, notamment dans le cas d'appareils de petite ou de moyenne puissance (par ex. inférieure à 25 kW), soit par une source de courant continu (en général courant alternatif redressé par des valves).

Leur puissance peut atteindre plusieurs centaines de kW et leur fréquence peut varier pratiquement de quelques milliers à quelques centaines de milliers de herz. Dans le cas du chauffage par induction, cette fréquence dépasse rarement un mégahertz.

L'alimentation en courant continu de ces générateurs peut être avantageusement faite par un redresseur branché directement sur un réseau de distribution à haute tension.

Les générateurs électroniques présentent une grande souplesse de réglage et d'utilisation ; en particulier, ils oscillent sur la fréquence du circuit branché à leurs bornes, alors que les groupes à alternateur ont une fréquence définie, fonction de leurs caractéristiques propres et de leur vitesse. C'est ainsi qu'il est possible avec un groupe de tubes électroniques de passer instantanément d'un régime à une fréquence donnée à un régime correspondant à une autre fréquence, avantage qui peut être appréciable dans le cas de certains traitements pour lesquels on doit faire varier rapidement les profondeurs de pénétration des courants induits.

Le rendement d'ensemble d'un générateur électronique HF peut atteindre 70-80 %.

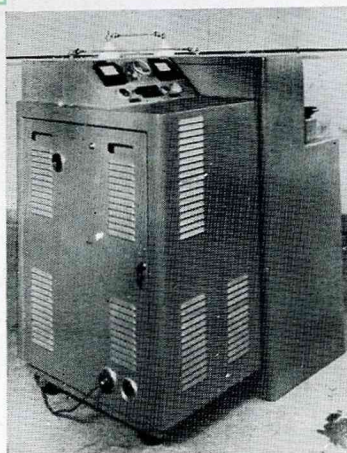
Le facteur de puissance à la source d'alimentation peut être voisin de l'unité, avec un montage convenable des valves de redressement.

Le réglage de la puissance peut s'effectuer soit par variation de la tension d'anode, soit par celle d'un des éléments constitutifs du circuit oscillant (inductance, capacité, couplage de la charge, etc.), soit au moyen de divers dispositifs électroniques dont la description sortirait du cadre de la présente notice.

De récents perfectionnements apportés à la fabrication des tubes électroniques ont permis de réaliser des générateurs à « régime intermittent » qui, en utilisant un tube d'une puissance nominale donnée, permettent d'obtenir, pendant un temps court, une puissance nettement plus élevée que la puissance nominale, sous réserve que chaque temps de travail soit suivi d'un temps de repos approprié.

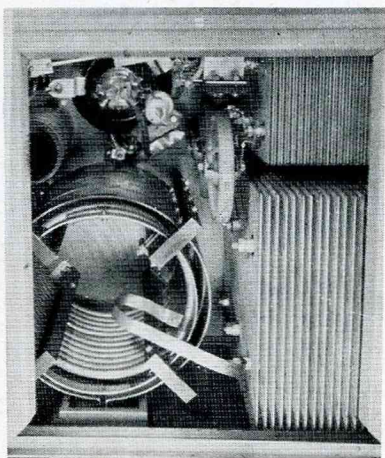
La fig. 24 donne le schéma de principe d'un générateur électronique de petite ou de moyenne puissance alimenté





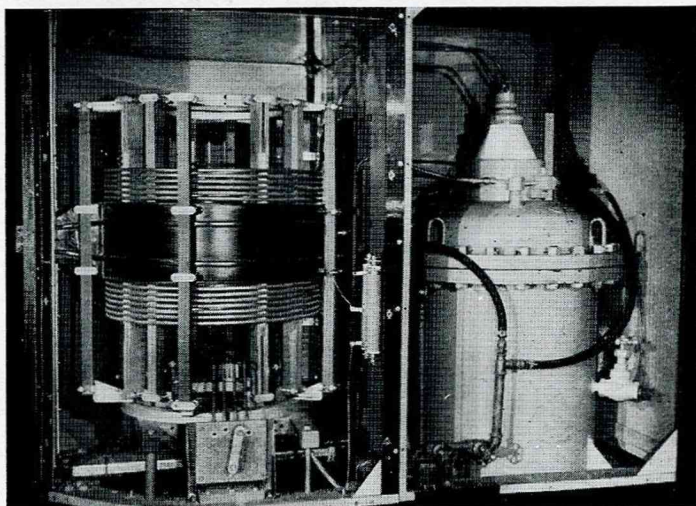
(Doc. CFTH.)

**Fig. 19. — Générateur électronique 1.250 W, avec table de travail à 2 postes.**



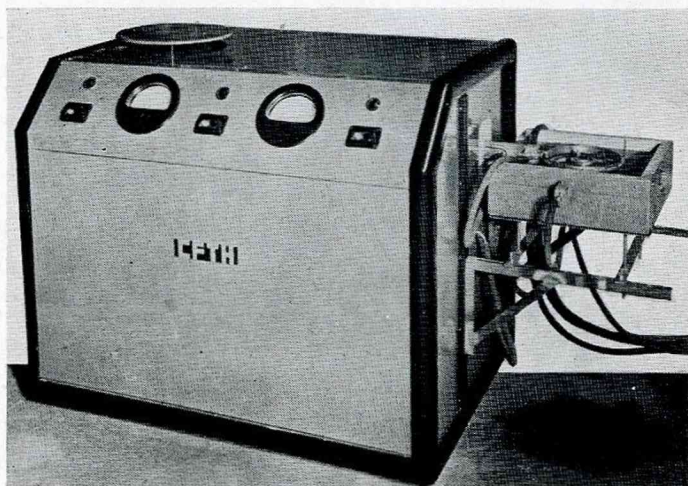
(Doc. STEL.)

**Fig. 20. — Générateur électronique 2.500 W. Vue intérieure montrant notamment les condensateurs et le transformateur HF.**



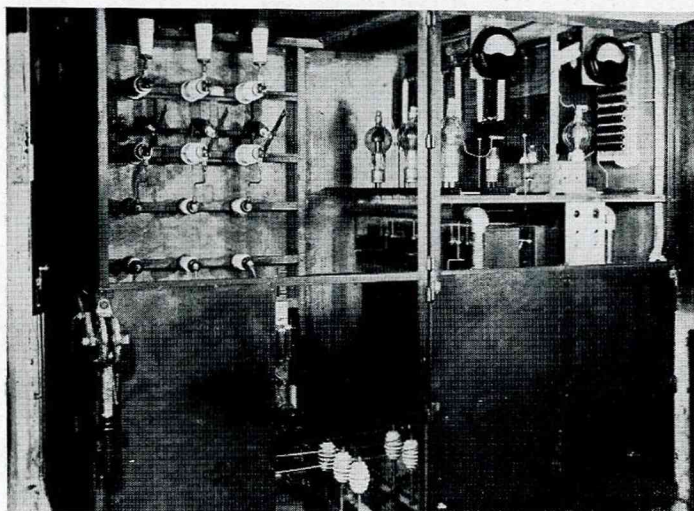
(Doc. STEL.)

**Fig. 21. — Générateur électronique 100 kW. Vue intérieure montrant un condensateur de 1.500 k Var à gaz comprimé, le transformateur HF et le circuit oscillant.**



(Doc. CFTH.)

Fig. 22. — Générateur électronique à régime intermittent 12/120 kW.



(Doc. CDL.)

Fig. 23. — Vue d'ensemble (panneaux de sécurité ouverts) d'une cabine d'alimentation de GE de 25 kW, comportant un raccordement direct au réseau de distribution à haute tension.



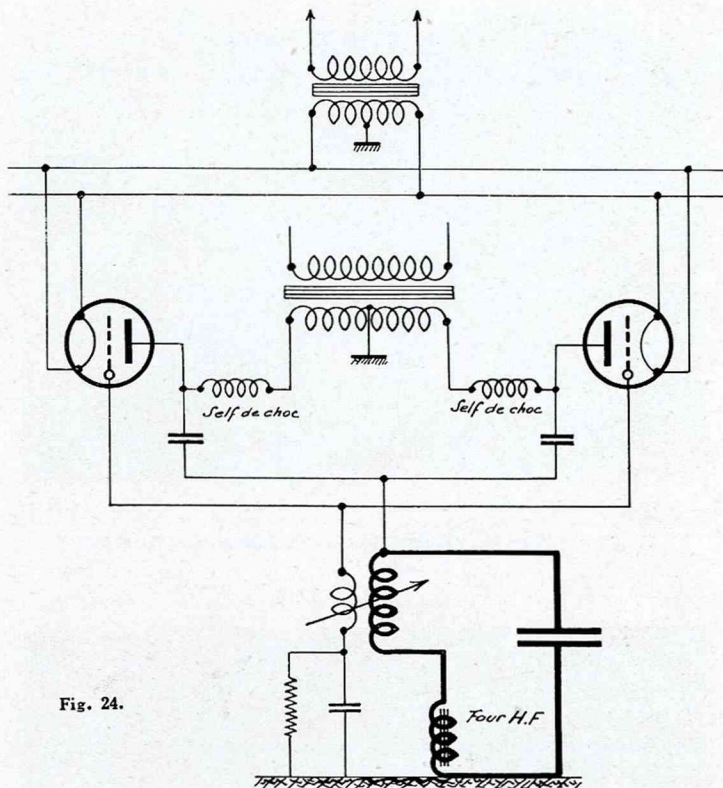


Fig. 24.

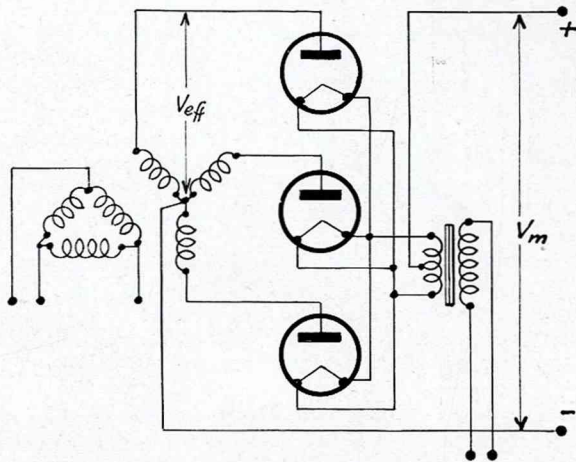
directement par une source monophasée de courant alternatif à haute tension (utilisation des deux alternances).

La fig. 25 donne deux types de redressement de courant alternatif triphasé en courant continu au moyen de valves (3 ou 6). Dans le cas d'alimentation directe d'un tel ensemble par un réseau de distribution (Secteur) à haute tension, le schéma à 6 valves s'impose.

Ces schémas sont donnés à titre purement indicatif. Il existe de nombreux montages différant en particulier par le choix du dispositif d'entretien des oscillations (excitation de la grille).

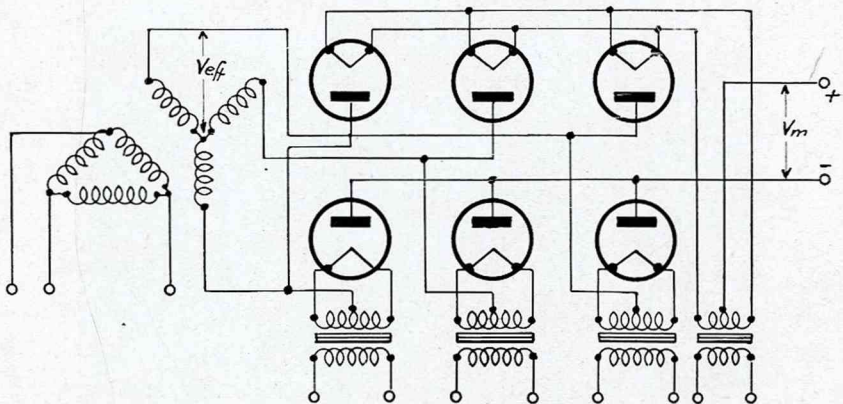
La fig. 26 est relative à un générateur à régime intermittent permettant par exemple à un appareil de 12 kW de fournir 120 kW pendant 20 secondes (cf. également fig. 27).

Les fig. 9 à 23 représentent des générateurs électroniques de différentes formes, dimensions, puissances et fréquences.



Tension redressée :  $V_m = 1,170 V_{eff}$   
Tension inverse :  $V_i = 2,09 V_m$

- REDRESSEMENT 3 TUBES -



Tension redressée :  $V_m = 2,34 V_{eff}$   
Tension inverse :  $V_i = 1,045 V_m$

REDRESSEMENT 6 TUBES

Fig. 25.



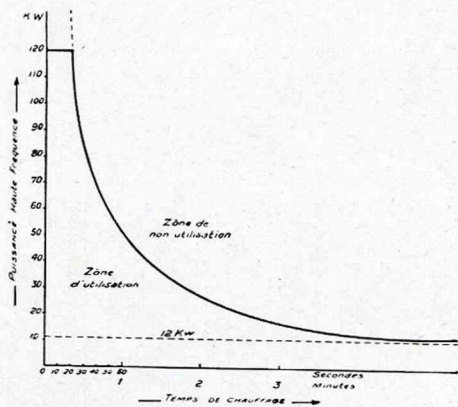
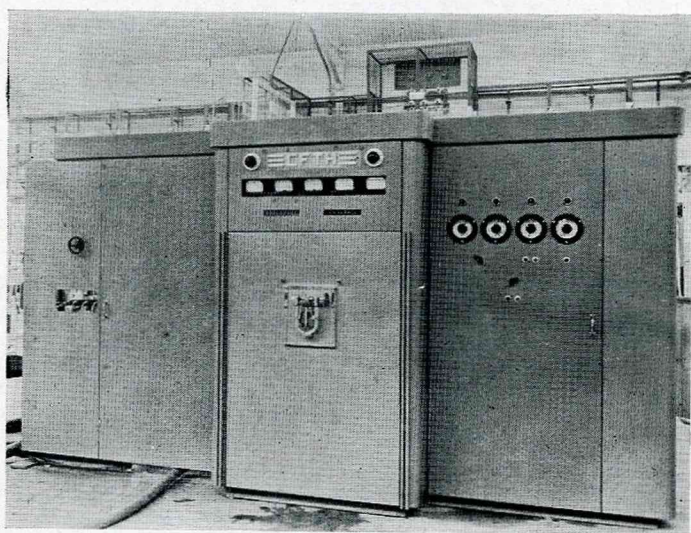


Fig. 26.



(Doc. CFTH.)

Fig. 27. — Générateur électronique à régime permanent ou intermittent.  
50/ quelques centaines de kW.

## INDUCTEURS

Dans un problème de chauffage par induction HF, la nature, les dimensions et la forme de la pièce à traiter et de l'opération à effectuer déterminent la puissance nécessaire et éventuellement la fréquence à adopter.

Dans le cas où la fréquence n'est pas imposée par la nature de l'opération, ce sont en général des considérations d'ordre économique qui fixent le choix de la fréquence et du type des générateurs (le plus souvent : alternateur HF ou tubes électroniques).

Encore faut-il que l'énergie HF soit utilisée convenablement, c'est-à-dire que le rendement thermique le plus élevé soit obtenu et que la chaleur soit répartie correctement dans la pièce. Il s'ensuit que l'inducteur est pratiquement la partie essentielle d'un appareil de chauffage par induction HF.

Enfin, le critère peut être : le transfert du maximum d'énergie, la régularité de la répartition de la chaleur ou au contraire la localisation de la chaleur dans une certaine partie de la pièce, la pénétration plus ou moins grande de la chaleur dans le corps de la pièce, la durée de l'opération, etc.

La forme de l'inducteur et sa position par rapport à la pièce dépendent dans une certaine mesure du critère choisi.

### *Forme.*

La forme de l'inducteur dépend essentiellement de la nature de l'opération thermique envisagée, ainsi que de la forme de la pièce à traiter (d'une façon plus précise de la partie de la pièce à chauffer). Les inducteurs peuvent être à spire unique ou à spires multiples et peuvent présenter une grande diversité.

### *Nature.*

Les spires sont en cuivre rouge de haute conductibilité thermique.

### *Section.*

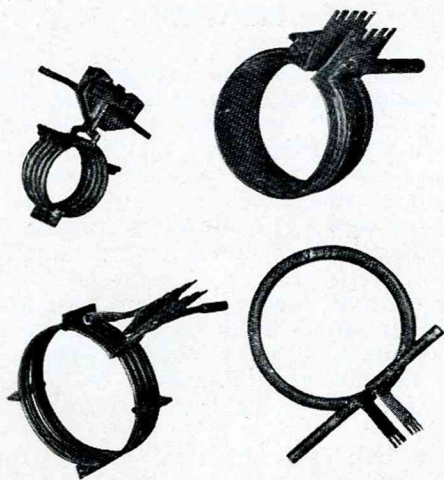
Il est nécessaire de refroidir les spires pour en éviter la destruction par échauffement exagéré. Le refroidissement est assuré par un des moyens suivants :

courant d'eau, le plus souvent ;

aillettes ;

jet d'air.

Dans le premier cas, ou bien l'inducteur est creux, ou bien, s'il est massif, un tube de cuivre additionnel lui est accolé par brasage.



(Doc. STEL.)

Fig. 28. — Inducteurs divers à refroidissement par eau : inducteurs creux à une ou plusieurs spires et inducteur plein (tube de refroidissement accolé) avec leurs mâchoires de prise de courant.

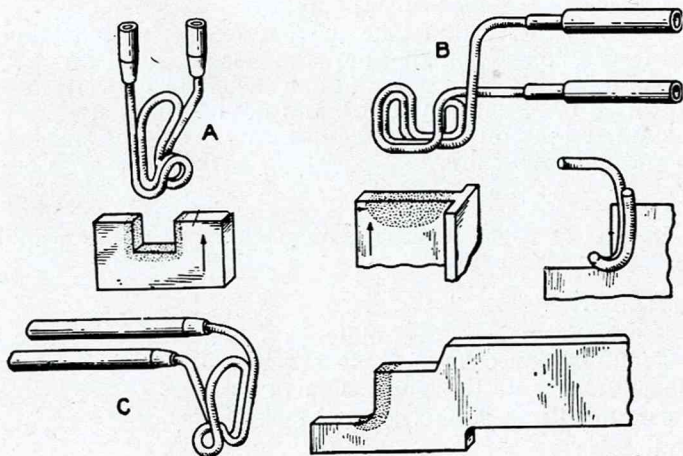


Fig. 29. — Inducteurs de formes particulières pour traitements localisés. En pointillé, les zones de chauffage correspondantes. (Extrait de l'ouvrage de Curtis : *Electronic Heating*.)



Pour constituer les spires creuses, on utilise un tube de section circulaire (le plus souvent aplati) ou de section rectangulaire.

Pour les bobines du type massif, on a recours à une barre de forme appropriée, de section pleine ou creusée.

Pour les inducteurs importants, les spires sont réunies par des entretoises électriquement isolantes (amiante, matière plastique). Quelquefois, on réunit en série plusieurs inducteurs.

*Disposition de l'inducteur.*

L'inducteur peut être disposé (fig. 30) soit à l'extérieur soit à l'intérieur de la pièce.

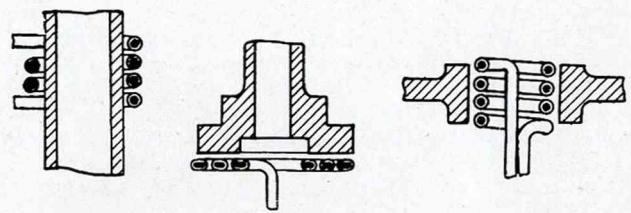


Fig. 30

Dans le premier cas, il peut envelopper plus ou moins complètement la pièce. Il peut être placé aussi contre la pièce, sans l'envelopper ; la durée de chauffage, toutes choses égales d'ailleurs, est alors un peu plus lente.

Dans le deuxième cas, la concentration du flux magnétique sur la surface traitée est encore moindre et par suite la vitesse de chauffage est encore plus réduite.

C'est ainsi qu'on est souvent amené à utiliser des inducteurs à une seule spire de large section, de forme appropriée au résultat à obtenir. Cette spire est alors couplée apériodiquement à une inductance, l'ensemble se présentant comme un transformateur HT, appelé habituellement « concentrateur de champ ».

*Couplage.*

Le couplage, déterminé par la position relative de l'inducteur et de la pièce (ou de la partie à chauffer) a évidemment une importance considérable. En dépendent : la puissance absorbée et le rendement de l'opération (donc la durée du

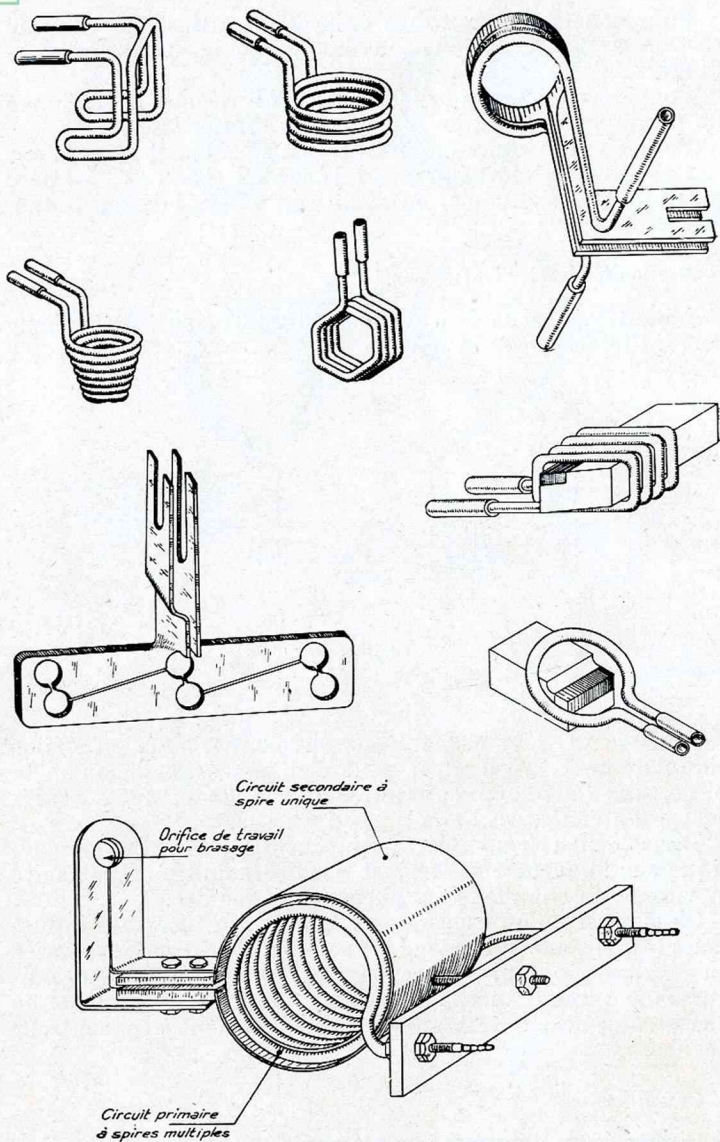


Fig. 31. — Inducteurs de formes diverses et concentrateur de champ.



chauffage), ainsi que la répartition de la chaleur dans la masse. Le transfert de l'énergie est d'autant mieux réalisé que le couplage est plus serré, c'est-à-dire que l'espace entre les spires et la partie à chauffer est plus faible ; cela ne signifie pas toutefois que le couplage doit toujours être serré ; c'est une question de cas d'espèce.

*Longueur de l'inducteur.*

La longueur de l'inducteur n'est pas indifférente. Il y a notamment une limite à ne pas dépasser dans la longueur chauffée en une seule fois d'une pièce déterminée.

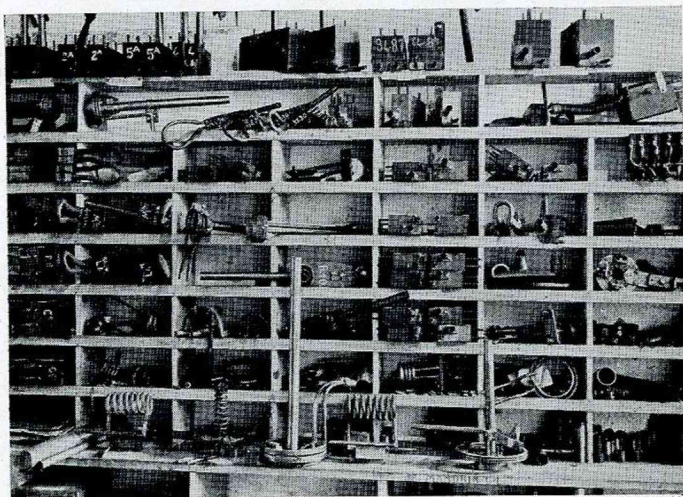
*Pas de l'inducteur.*

L'écartement des spires d'un inducteur a une influence sur la profondeur de pénétration de la chaleur et sur l'uniformité concomitante de la répartition de la chaleur.

Remarque. Dans certains cas, des précautions doivent être prises pour éviter des surchauffes locales.

Les fig. 28 à 34 des pages 30 à 34 montrent quelques modèles d'inducteurs.

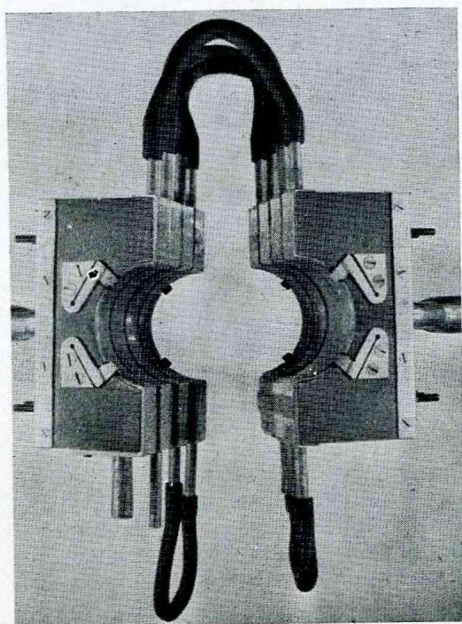
Le choix de l'inducteur est primordial. Il fait intervenir un grand nombre de facteurs. La connaissance des lois physiques, l'expérience et le bon sens permettent de trouver la solution optimum de chaque problème.



(Doc. PA.)

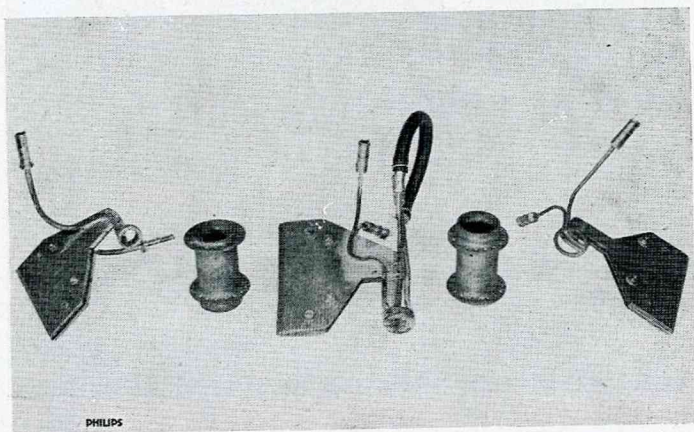
Fig. 32. — Vue d'une partie du magasin des inducteurs d'une société spécialisée dans les traitements thermiques HF.





(Doc. PA.)

Fig. 33. — Inducteur à 4 spires pour chauffage de vilebrequin à partie très large.



(Doc. PH.)

Fig. 34. — Inducteurs pour chauffage intérieur de cuvettes  
(également représentés)

## AVANTAGES GÉNÉRAUX DU CHAUFFAGE PAR INDUCTION H. F.

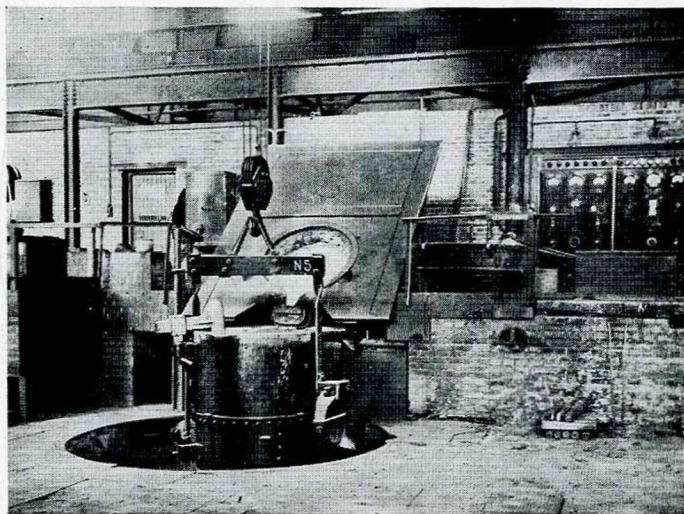
Ils découlent des caractéristiques essentiels de ce mode de chauffage :

Possibilité d'obtenir des concentrations de puissance très importantes, par exemple quelques dizaines de  $\text{kW}\cdot\text{cm}^2$  (avec le chalumeau oxydrique, on dépasse difficilement  $1\,200\ \text{W}\cdot\text{cm}^2$  et avec la transmission de chaleur par contact direct  $10\ \text{W}\cdot\text{cm}^2$ ), d'où :

Possibilité de réaliser des chauffages très rapides et d'obtenir des températures élevées, soit dans toute la masse, soit seulement dans une zone définie et notamment :

Possibilité de localiser le chauffage à la périphérie de la pièce.

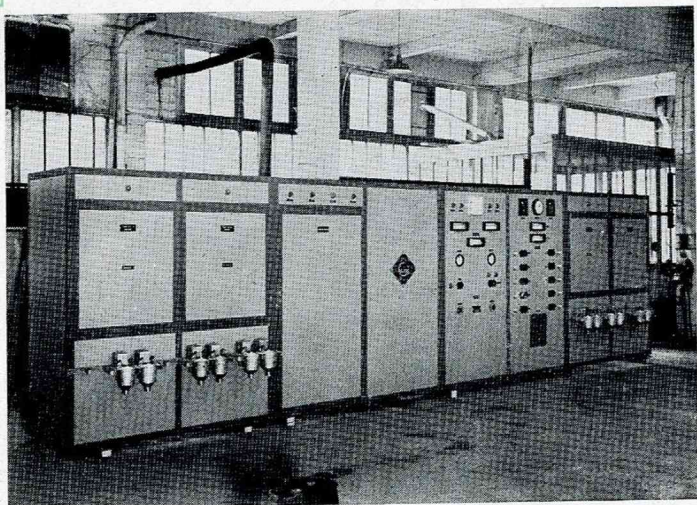
Absence de tout contact électrique entre la source d'énergie et les substances à traiter, d'où possibilité de réaliser facilement des traitements thermiques en atmosphère définie et en particulier dans le vide.



(Doc. SGAET)

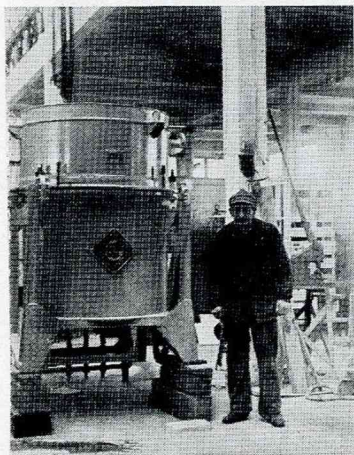
Fig. 35. — Fusion d'aciers spéciaux. Four de 5 T. GA Ie 1.500 kW.





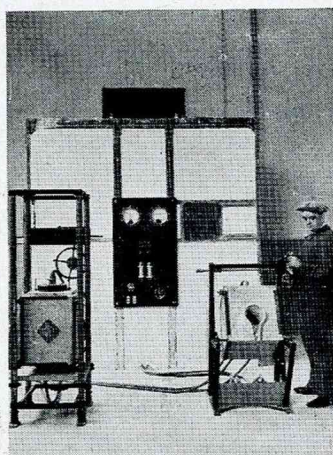
(Doc. SGAET.)

Fig. 36. — Fusion d'acier. Tableau de commande avec 4 cellules de départ. GA de 400 kW.



(Doc. SGAET.)

Fig. 37. — Fusion sous vide d'acier spéciaux et d'alliages de nickel. Four de 500 kg. GA de 400 kW.



(Doc. SGAET.)

Fig. 38. - Fusions diverses. Fours de 25 kg en atmosphère normale (à gauche) et de 15 kg sous vide (à droite). GA de 25 kW.



## APPLICATIONS

Les principales applications du chauffage par induction HF réalisées jusqu'à maintenant sont relatives :

à la fusion et à l'affinage des métaux ;

au chauffage des métaux à cœur ou en surface, en vue soit de traitements thermiques proprement dits (trempe et notamment trempe superficielle, recuit, etc...), soit d'opérations de formage (forgeage, estampage), soit de dégazage, soit de frittage.

au chauffage de substances conductrices ou non de l'électricité, en vue d'opérations particulières.

Le chauffage d'une substance par induction peut être :

soit *direct* (cas le plus fréquent où les courants de Foucault sont produits dans la substance même à chauffer : substance conductrice (métal en général).

soit *indirect* (cas où l'on chauffe des substances qui sont plus ou moins des isolants électriques) : on chauffe alors la substance par l'intermédiaire d'une enceinte conductrice (graphite le plus souvent, plombagine, zircon) dans laquelle se développent les courants de Foucault.

Les applications qui se sont le plus développées jusqu'à présent sont :

la fusion des aciers, la trempe superficielle des aciers, le brasage et enfin le forgeage.

## FUSION ET AFFINAGE DES MÉTAUX

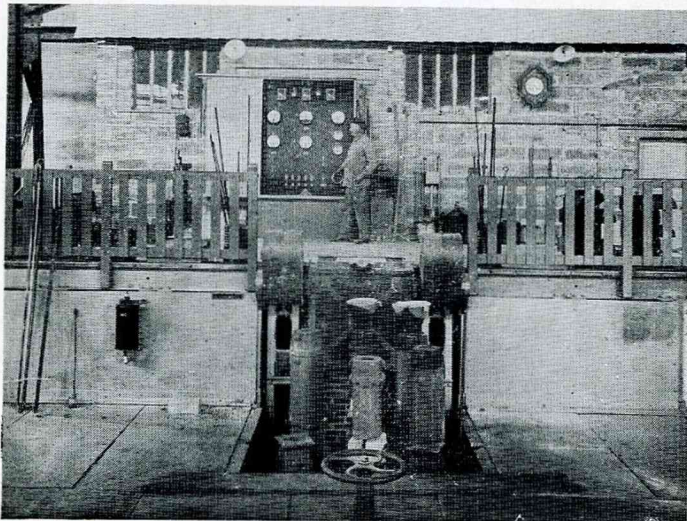
### Principe.

La fusion est obtenue :

soit par chauffage direct du métal à fondre placé dans un creuset en matière réfractaire ;

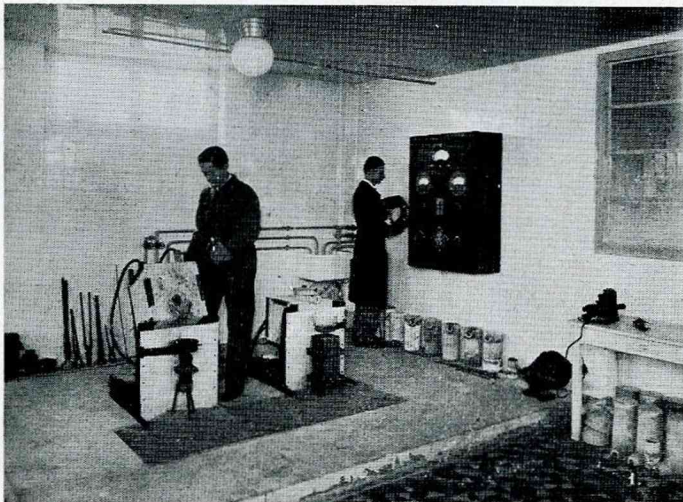
soit par chauffage d'un creuset conducteur (graphite en principe, à cause de la résistivité  $\rho$  élevée de cette substance ; plombagine, zircon), dans lequel on dispose le métal à fondre.

Le deuxième procédé est employé notamment pour les métaux précieux.



(Doc. SGAET.)

Fig. 39. — Fusion de nickel. Four de 500 kg. GA de 200 kW.



(Doc. SGAET.)

Fig. 40. — Fusion d'alliages de nickel. Fours de 12 kg (à gauche) et 3 kg (à droite)  
G à éclateur de 20 kW.



Dans le premier cas, on a en principe recours, tout au moins pour les fours importants d'aciérie, à une méthode simple et économique pour constituer le creuset : un pisé réfractaire convenable est dammé entre l'enroulement primaire (inducteur) et une forme en tôle présentant le profil désiré pour le creuset ; au pisé, on a ajouté un agglomérant approprié. Lors de la première opération de chauffage en charge, le réfractaire se fritte et s'agglomère, la tôle disparaît dans la charge lors de la fusion et le creuset est ainsi constitué dès la première fusion. Pour les petits fours, on utilise au contraire des creusets cuits à l'avance.

Le garnissage réfractaire est acide ou basique ; en aciérie, il est généralement acide (silice) pour la fusion et basique (magnésie) par les opérations d'affinage.

### **Avantages.**

Les principaux avantages du chauffage HF pour la fusion des métaux sont les suivants :

1<sup>o</sup> possibilité de concentrer une énergie importante dans un faible volume ; d'où :

obtention de très hautes températures, permettant pratiquement la fusion de tous les métaux connus ;

très grande rapidité de chauffage du métal, directement ou indirectement (cas d'un creuset chauffant intermédiaire), donc de la fusion ;

chauffage possible et facile d'éléments métalliques de toutes formes, jusqu'aux grenailles et limailles ;  
et par suite :

réduction des réactions sur le métal (oxydation par exemple), d'où : obtention d'un produit plus pur ;

réduction des pertes au feu, qualité plus homogène et économie de métal.

2<sup>o</sup> Possibilité d'opérer sous vide ou en atmosphère contrôlée ; d'où : contrôle très précis de la composition du métal fondu et pureté absolue de ce métal si besoin est.

3<sup>o</sup> Possibilité d'utiliser le brassage électromagnétique ; d'où : homogénéisation du bain, donc du métal.

4<sup>o</sup> Possibilité de réaliser une grande souplesse de marche ; pas de chauffage préalable ; régulation facile, automatique ou non, continue ou discontinue, du chauffage.

5<sup>o</sup> Possibilité de réduire les frais d'exploitation par l'utilisation rationnelle de l'énergie électrique, la réduction des dépenses de réfractaires et de main-d'œuvre, la diminution des pertes au feu, l'amélioration de la qualité.



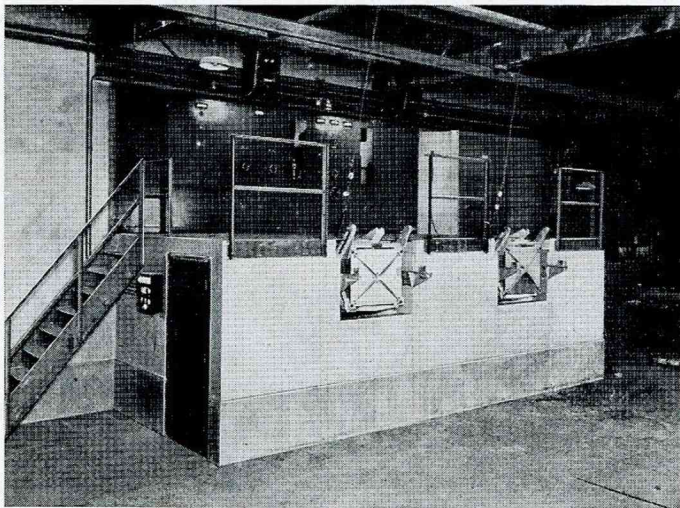


Fig. 41. — Fusion d'aciers spéciaux. Creusets de 100 kg. GE de 250 kW.

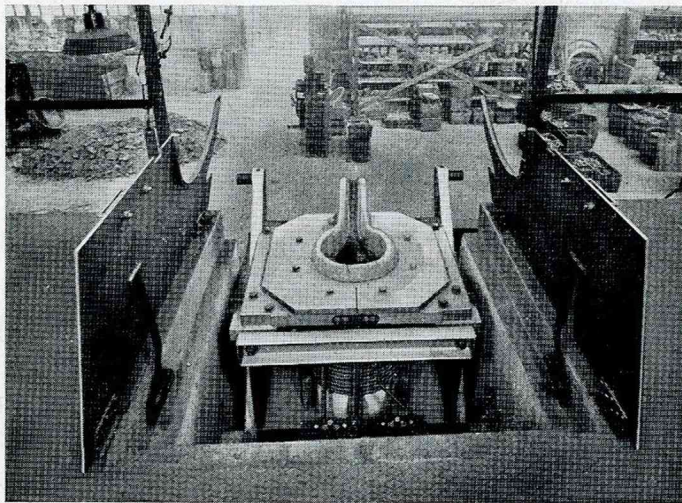


Fig. 42. — Même installation que fig. 41. Vue d'un four.

6° Possibilité d'améliorer les conditions du travail de la main-d'œuvre : commodité, hygiène, sécurité.

### Principales applications actuelles.

Aciers — notamment :

aciers dits « au creuset » : aciers rapides, aciers au carbone pour outillage ;

aciers inoxydables ;

aciers spéciaux (pour aimants par exemple) ;

aciers de moulage (cas des marches discontinues ou du moulage de petites pièces : coulabilité favorisée et températures élevées).

Nickel et ses alliages : nickel pur, cupro-nickel, nickel-chrome.

Métaux précieux : platine, or, argent.

Alliages cuivreux : bronze au plomb (intérêt du brassage et de la rapidité de fusion).

Métaux légers : application rare jusqu'à présent.

Etain : fusion du métal déposé électrolytiquement sur un feillard d'acier (fabrication du fer blanc).

Se reporter aux photographies des fig. 35 à 45 qui donnent quelques exemples d'applications.

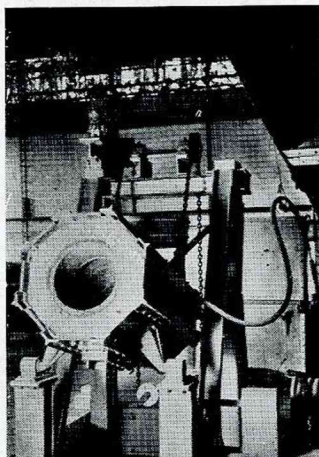
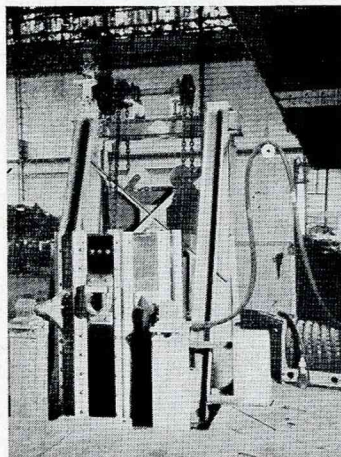
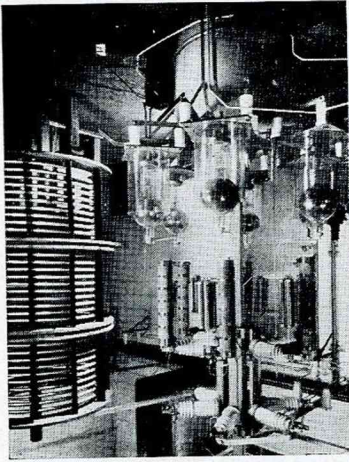


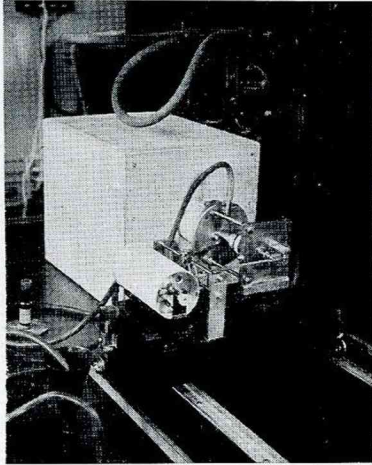
Fig. 43 et 44. — Fusion d'alliages légers. Four de 250 kg. GE de 200 kW.





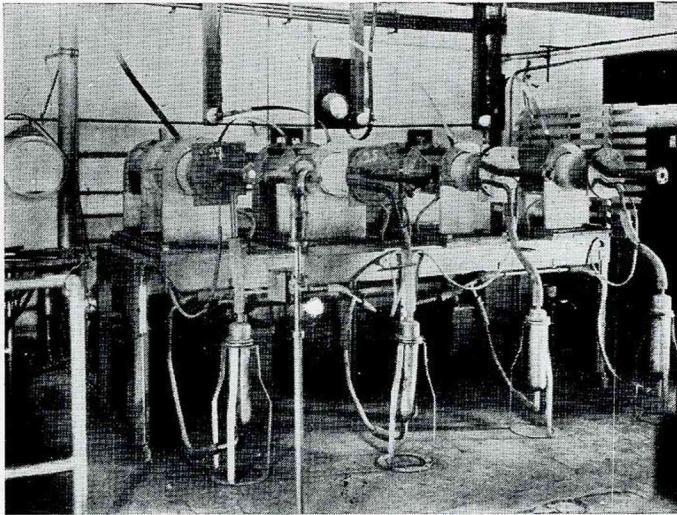
(Doc. CEGEDUR.)

Fig. 45. — Vue intérieure de la cabine d'alimentation d'un GE de 200 kW (fusion d'aluminium).



(Doc. ONERA.)

Fig. 46. — Frittage des poudres (oxydes ou métaux) en atmosphère rigoureusement contrôlée. Rétractomètre Tacvorian et Levêque. GE (STEL) de 20 kW.



(Doc. Le Carbone Lorrain; Dept. Carborain.)

Fig. 47. — Batterie de fours de frittage sous vide.



## FRITTAGE

### Principe.

On part du métal en poudre et on le presse avec un liant approprié de façon à lui donner la forme désirée. La pièce ainsi obtenue est portée à une température inférieure à la température de fusion. Ce chauffage peut être avantageusement réalisé par induction HF.

### Avantages.

Principaux avantages : chauffage rapide et sous vide ou en atmosphère contrôlée.

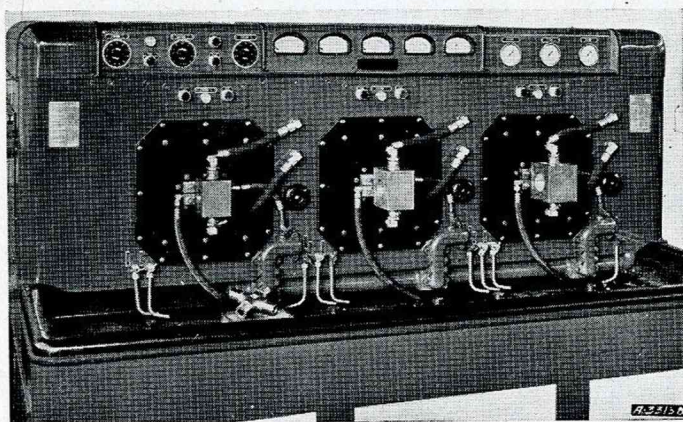
### Exemples d'applications.

Signalons :

la préparation du carbone de tungstène : la poudre est chauffée (plus de 2 000°C) dans un récipient, en graphite par exemple, sous vide ou en atmosphère non oxydante, et ensuite les pièces sont obtenues par moulage sous pression (1 800°C environ) ;

le frittage d'un dépôt de zirconium sur les anodes ou grilles des tubes électroniques.

Se reporter aux fig. 46 et 47.



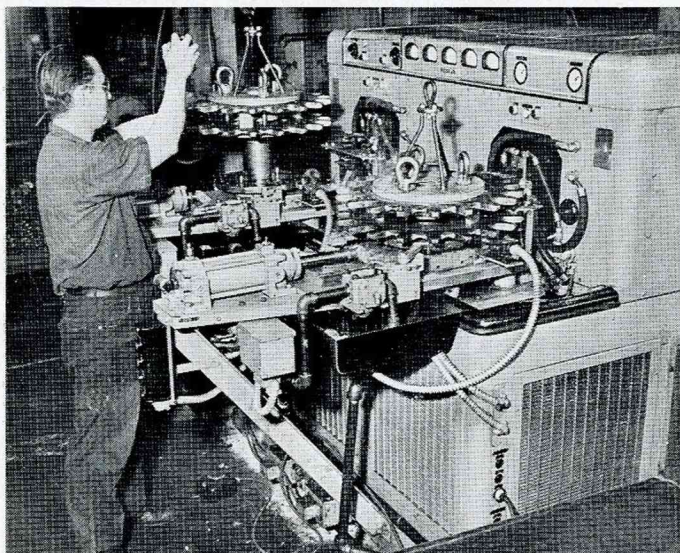
(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 48 — Trempe de portées de croisillons de joints universels. GA de 40 kW.



(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 49. — Trempe de vilebrequins. Tunnel à 5 postes. GA de 450 kW.



(Soc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 50. — Trempe des dents de roues. Machine à 2 postes. GA de 125 kW.



## TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

Il s'agit en l'espèce des traitements thermiques proprement dits, c'est-à-dire du chauffage de pièces métalliques avant trempe et des opérations de recuit, revenu, etc...

La trempe HF est surtout indiquée pour les pièces de forme complexe dont le chauffage par d'autres procédés est difficile à réaliser, ainsi que pour les pièces de faibles dimensions. Elle a son domaine propre qui répond essentiellement aux deux desiderata suivants : localiser le chauffage (cas de la trempe superficielle et de la trempe localisée sur une ou plusieurs parties de la pièce), réaliser un chauffage rapide. Ce domaine correspond d'ailleurs aux avantages propres au chauffage HF.

### Principe.

Le chauffage est réalisé au moyen de courants de fréquences relativement élevées ou très élevées, par l'intermédiaire d'un inducteur de forme appropriée. L'importance de cette forme et du couplage de l'inducteur et de la pièce est capitale.

### Avantages.

Les principaux avantages du chauffage HF pour les opérations de trempe des métaux sont les suivants :

1° Très grande rapidité de chauffage qui permet :

l'obtention d'une grande cadence de production et par suite, le cas échéant, l'insertion de l'appareil de trempe dans une chaîne de fabrication ;

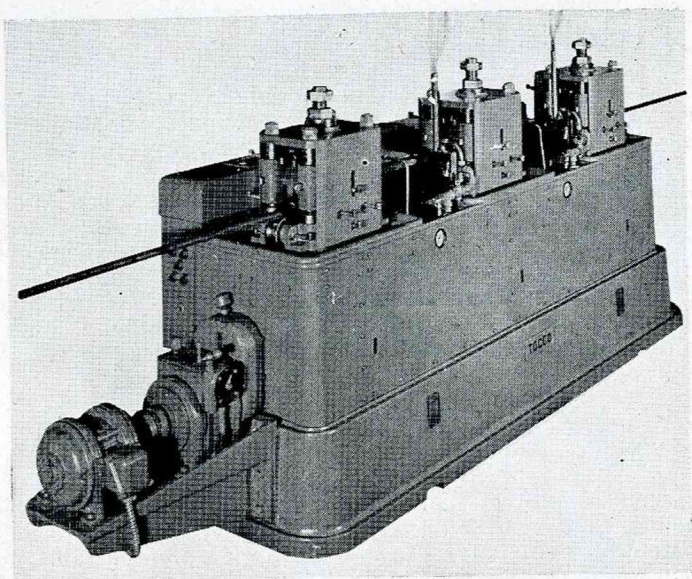
la suppression ou la réduction de la décarburation et de l'oxydation ; d'où amélioration de la dureté, suppression de la calamine et de toute opération ultérieure de nettoyage ;

la suppression ou la réduction des déformations et de la modification de la couche sous-jacente ;

l'amélioration de la structure cristalline : le métal n'a pas le temps de cristalliser à chaud ; d'où structure micrographique plus fine, dureté supérieure, fragilité moindre ;

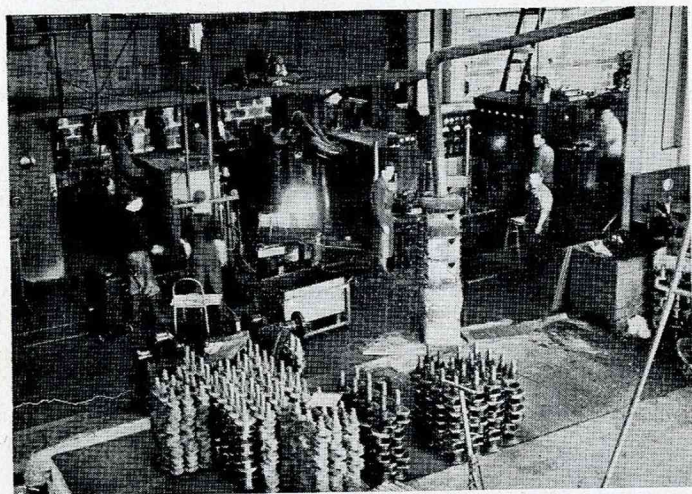
l'emploi d'aciers moins coûteux, grâce à la possibilité de tremper superficiellement, ce qui ne détruit pas l'effet du traitement thermique précédemment appliqué à la masse





(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

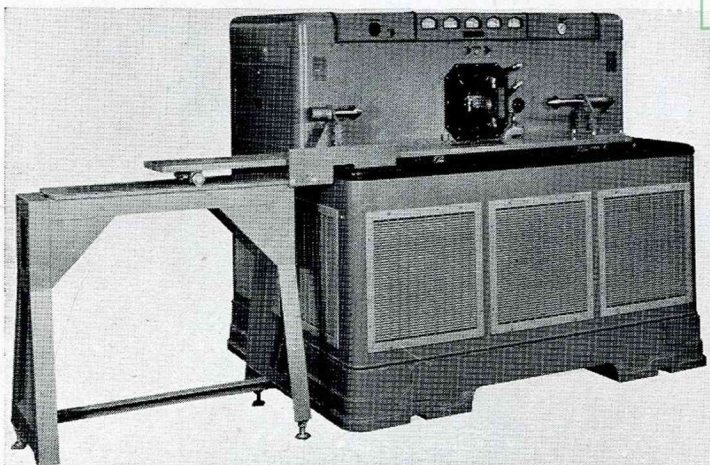
Fig. 51. — Trempe et revenu continus de barres. GA.



(Doc. PA.)

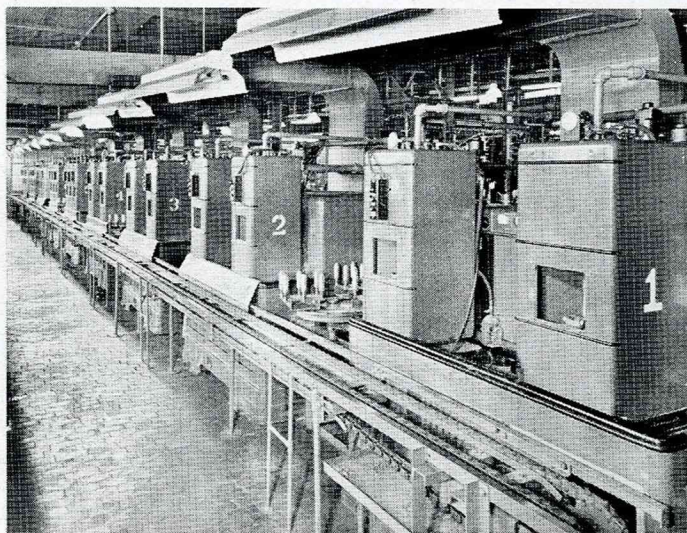
Fig. 52. — Vue d'une partie d'un atelier de traitements HF-GE d'une puissance totale de 420 kW.





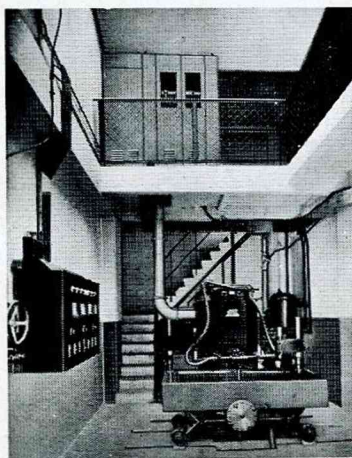
(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 53. — Trempe de pièces diverses (arbres à cames, etc...). GA.



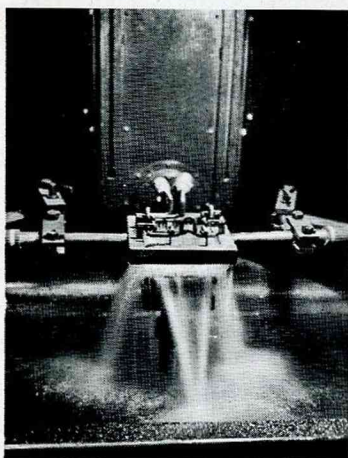
(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 54. — Trempe d'obus. Nombreux postes. GA de 100 kW.



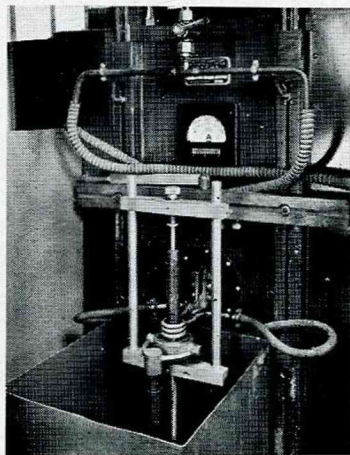
(Doc. Ernault-STEL.)

**Fig. 55. — Vue d'un atelier de trempe de pignons, tourelles et broches de tours.  
GE de 100 kW.**



(Doc. Ernault-STEL.)

**Fig. 56. — Même installation  
que fig. 55. Trempe.**



(Doc. Snecma-STEL.)

**Fig. 57. — Trempe au défilé.  
GE de 20 kW.**



de la pièce et permettra par exemple d'utiliser un acier mi-dur au lieu d'un acier allié.

2° Grande souplesse d'emploi, caractérisé par la possibilité (grâce au choix de l'inducteur) de chauffer telle partie de la pièce que l'on désire à l'exclusion de toute autre, par la possibilité de réaliser une trempe à la profondeur désirée (épaisseur de peau ou davantage à volonté), par la possibilité de chauffer plus ou moins vite (choix de la fréquence et de la puissance en jeu), par la possibilité de traiter des pièces unitaires, des petites ou des grandes séries.

3° Simplicité d'emploi, puisqu'il suffit de placer la pièce à traiter dans le champ d'un inducteur convenablement déterminé, l'alimentation pouvant se faire manuellement (poste fixe) ou au défilé (marche continue dans le cas de grandes séries).

4° Régularité du traitement (puisque'il suffit que la tension et la fréquence de la source d'alimentation soient stables et que les réglages des installations électrique et mécanique ne soient pas changés) et réalisation de l'automatisme des opérations si on le désire.

5° Qualité élevée du traitement, pour les raisons déjà dites (relatives à la décarburation, à l'oxydation, à la structure cristalline et aux déformations) et par suite de la suppression du risque de surchauffe dangereuse de l'âme de la pièce traitée et de l'autorégulation relative qui se produit lorsque le métal atteint le point de Curie (l'effet d'hystérésis disparaît et par suite aussi la chaleur correspondante développée dans la pièce).

6° Réduction du prix de revient des pièces, provenant essentiellement de la possibilité de remplacer les aciers à faible teneur par des aciers à forte teneur de carbone, de l'économie d'énergie due à la localisation du chauffage (économie d'autant plus grande que la surface à traiter est plus faible par rapport à la surface totale de la pièce) et de la rapidité du chauffage.

7° Amélioration des conditions du travail ouvrier.

### **Quelques exemples d'applications.**

Il nous est impossible d'entrer dans les détails. Mais il paraît utile de rappeler quelques données essentielles se rapportant à la trempe superficielle par HF.

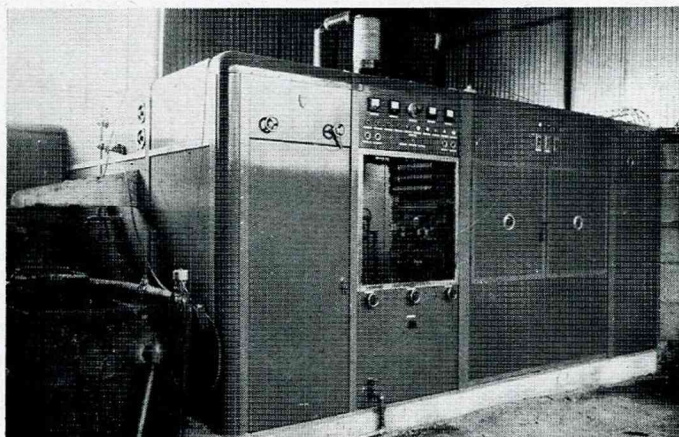
#### *Machine ou dispositif de présentation.*

Le dispositif de présentation des pièces dans l'inducteur doit être étudié et réalisé soigneusement : d'une part, le



(Doc. Ernault-STEL.)

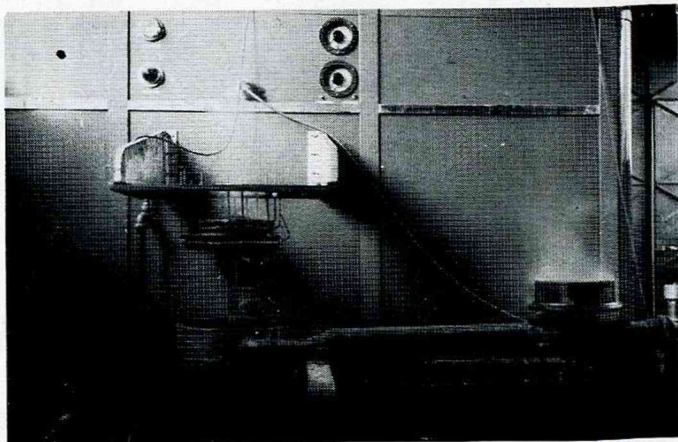
**Fig. 58.** — Môme installation que fig. 55. Trempe à la machine type «Gyrin-Partiot»



(Doc. SEF.)

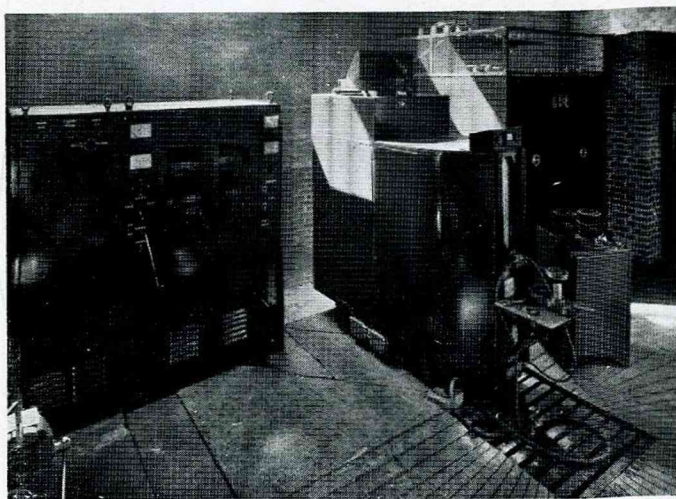
**Fig. 59.** — Trempe de roues et wagonnets. GE de 100 kW.





(Doc. SEF.)

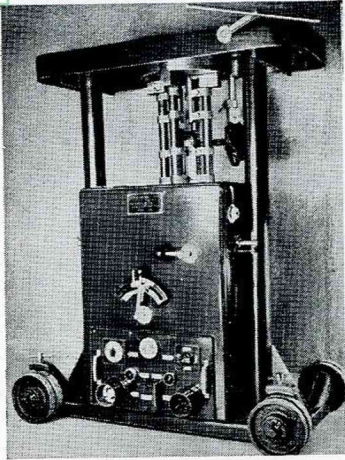
Fig. 60. — Même installation que fig. 59. Détail.



(Doc. Cazeneuve-STEL.)

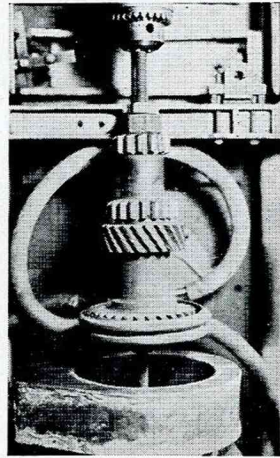
Fig. 61. — Trempe de pignons et bancs de tours. GE de 100 kW.



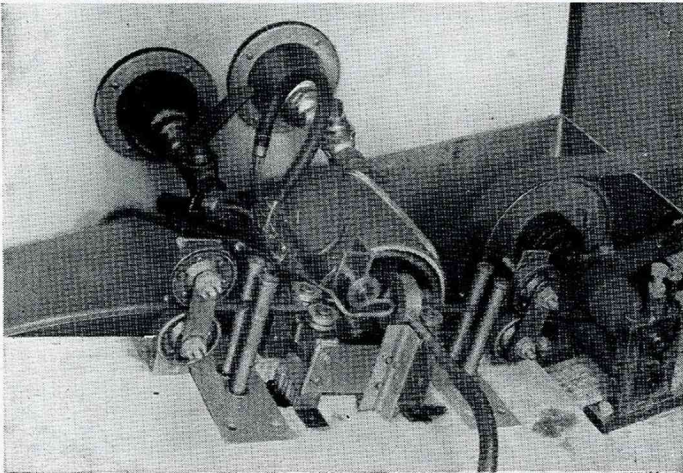


(Doc. PA.)

**Fig. 62. — Machine de  
présentation à défilé vertical. GE.**



**Fig. 63.  
Trempe d'engrenages. GE.**



(Doc. PH.)

**Fig. 64. — Trempe continue de scies à ruban. GE.**

temps de chauffage étant très court, « on emploie plus de temps à alimenter la machine qu'à la faire travailler » ; il faut réduire le temps mort nécessaire pour disposer la pièce ; d'autre part, dans le cas de travail automatique pour grande série, on ne peut envisager un réglage manuel de la mise en place des pièces ; d'où nécessité d'avoir un dispositif bien établi afin d'assurer un centrage correct de la pièce (compte tenu des jeux de dilatation) et un couplage convenable entre l'inducteur et la pièce (notamment pour une question de rendement).

#### *Inducteur.*

Formes très variées, suivant la forme et les dimensions des objets. Se reporter aux fig. qui illustrent cette notice.

#### *Dispositif de trempe.*

La trempe peut se faire à l'eau (cas le plus fréquent), à l'huile, à l'air. Le dispositif de trempe doit être soigneusement étudié et convenablement disposé. Il en existe une grande variété, que le dispositif d'arrosage de la pièce soit fixé sur l'inducteur ou non, que la trempe soit faite en une seule fois ou qu'elle soit progressive. Il faut tenir compte de multiples considérations relatives notamment à la forme et aux dimensions des pièces, à la rapidité du chauffage (puissance et fréquence du générateur) et du refroidissement.

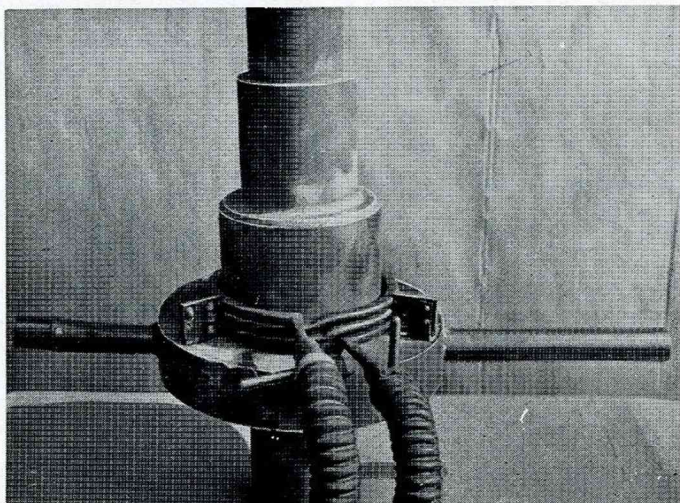
#### *Pièces à traiter.*

On ne saurait trop insister sur le fait que l'on a intérêt, dans bien des cas, à modifier la forme des pièces, afin d'obtenir une amélioration importante du traitement. Autrement dit, et suivant une règle souvent vérifiée dans l'industrie, tout nouveau procédé de traitement d'une pièce entraîne, si l'on veut obtenir le résultat technique et économique optimum, une adaptation *réciproque* du procédé et de la pièce.

#### *Exemples.*

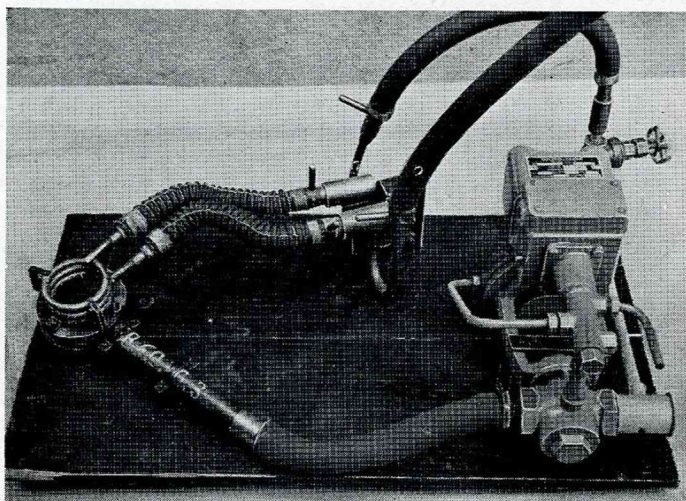
On chauffe notamment par HF avant trempe : les axes, les portées de vilebrequins, les soupapes, les engrenages, les chemises intérieures de certains cylindres de moteurs, les culbuteurs, les bielles, etc., toutes pièces des industries de l'automobile, du cycle, de la traction, etc. Les fig. 48 à 73 sont relatives à quelques-unes de ces applications.





(Doc. PA.)

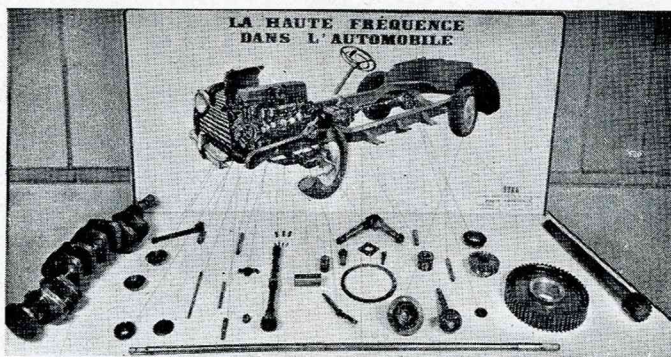
Fig. 65. — Ensemble inducteur-douche pour trempé au défilé de cylindres de laminoir (GE).



(Doc. PA.)

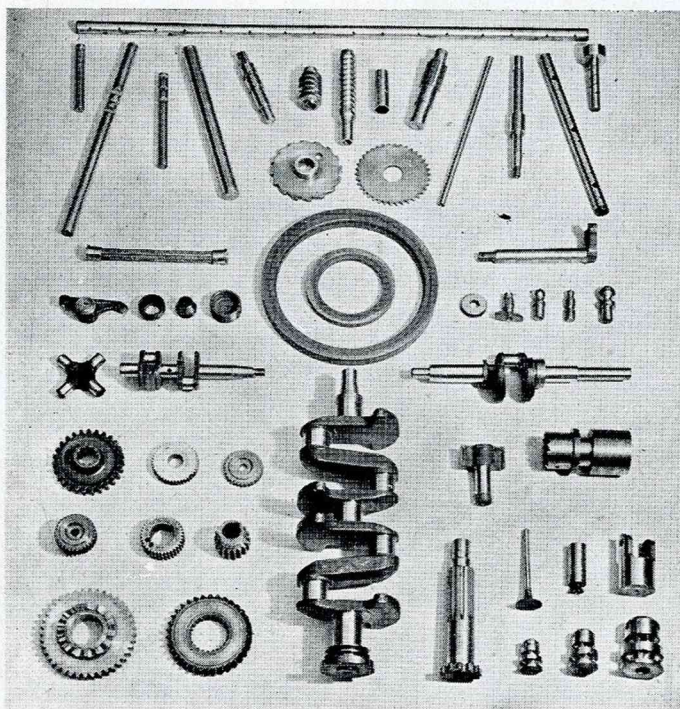
Fig. 66. — Exemple de liaison standard pour alimentation en courant HF et en eau de refroidissement (GE).





(Doc. STEL.)

Fig. 67. — Pièces diverses de l'industrie automobile traitées en HF (GE).



(Doc. SGAET.)

Fig. 68. — Pièces diverses traitées en HF (GA).

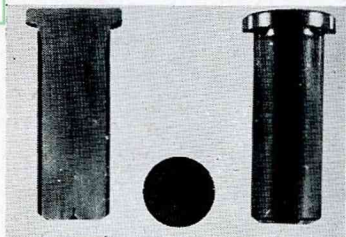
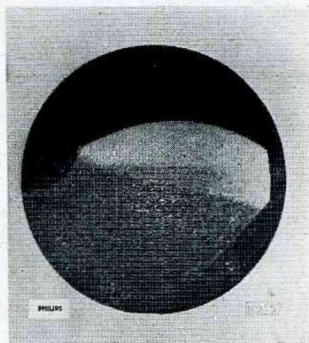


Fig. 70. — Micrographie  
↓ d'une tête de culbuteur (GE)



(Doc. PH.)

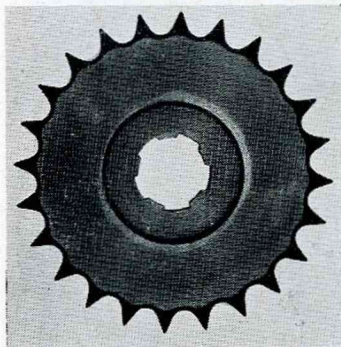
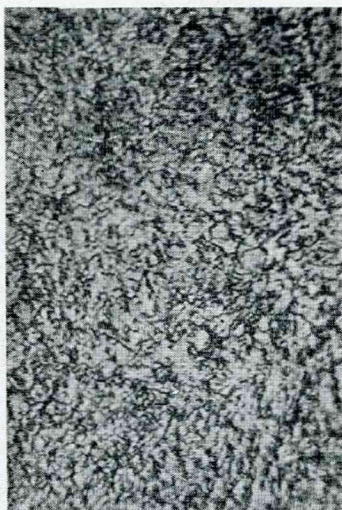


Fig. 69-71. — Répartition  
← de la trempe sur deux pièces (GE).  
(Doc. PA.)



(Doc. PA.)

Fig 72-73. — Structure après trempe à l'eau à 850° C de deux aciers à 0,4 p. c. de carbone. (trempe au four, à gauche et trempe HF, à droite).



## FORGEAGE, ESTAMPAGE, RECUIT ET REVENU

### Principe.

Le chauffage doit être fait à cœur ; mais, dans certains cas, il doit être localisé. On a donc recours en général à des fréquences relativement peu élevées.

### Avantages.

Les principaux avantages du chauffage HF sont les suivants :

Grande rapidité de la durée du chauffage en raison du taux de puissance possible ;

Localisation éventuelle du chauffage ; donc plus grande rapidité de travail, économie d'énergie thermique, suppression ou réduction des déformations ;

Qualité supérieure : pas d'écaille à la surface des pièces, d'où plus grande durée des matrices d'estampage ; pas de surchauffe sur les pièces (possibilité de supprimer instantanément le chauffage en cas d'arrêt accidentel des presses d'estampage) ; réduction des pièces rebutées.

Traitement en atmosphère contrôlée si besoin est : recuit brillant des aciers inoxydables par exemple.

Réduction des prix de revient : corrélative aux avantages qui viennent d'être indiqués.

### Exemples d'applications.

Chauffage avant forgeage de l'ogive d'obus en acier (1 000°C) et de bombes (1 260°C).

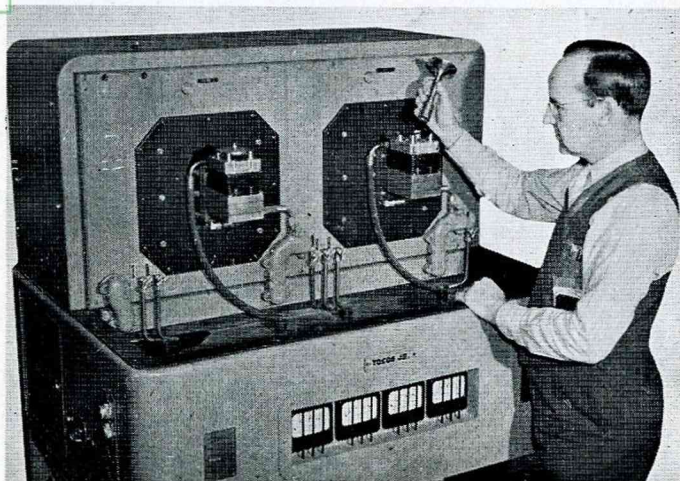
Chauffage avant estampage de boîtes métalliques (1 100°C).

Recuit de l'extrémité de douilles en acier pour projectiles (760°C).

A cette catégorie de traitements se rattache le chauffage en vue de leur redressement de pièces qui ont pu être déformées : axes et mèches de forets par exemple.

Se reporter aux fig. 74 à 78.





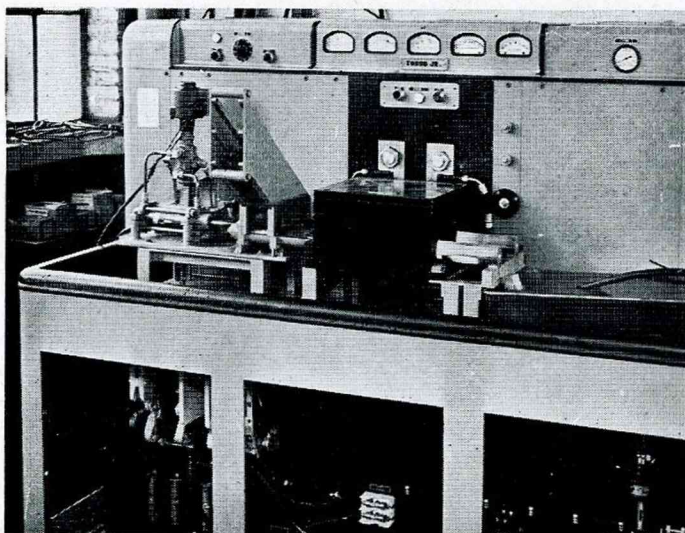
(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 74. — Chauffage de l'extrémité de soupapes à sodium. GA de 30 kW.



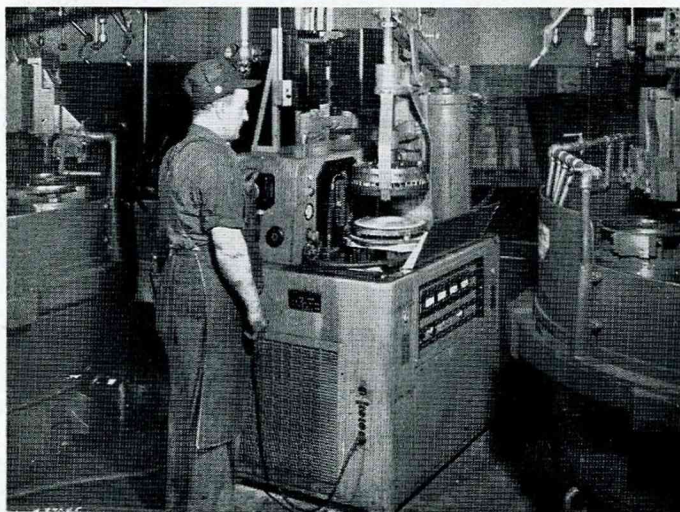
(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 75. — Montage des pales d'avion pour chauffage des moyeux. G. A.



(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

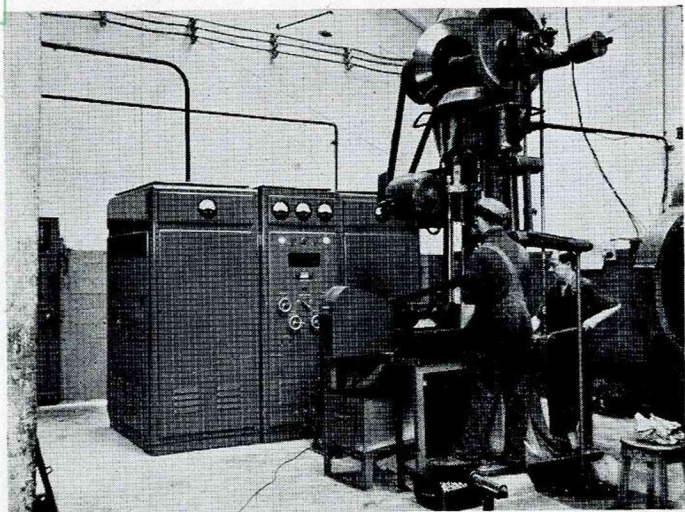
Fig. 76. — Chauffage de sections hexagonales de bronzes spéciaux. GA.



(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

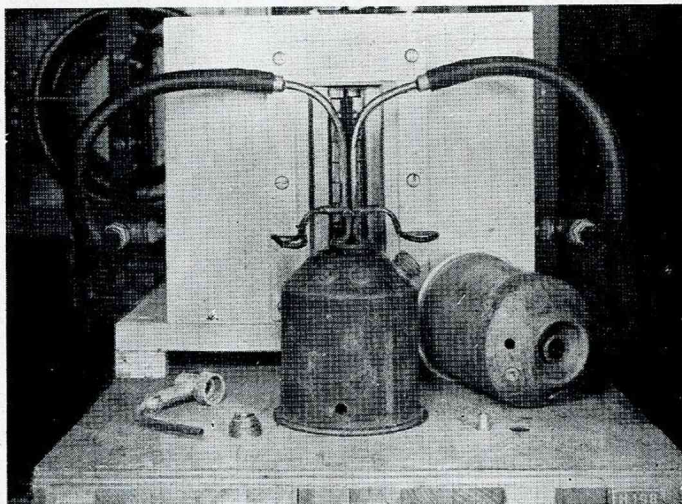
Fig. 77. — Chauffage de couronnes de démarreurs avant frettage sur le volant. GA.





(Doc. PH.)

Fig. 78. — Chauffage de roulements à rouleaux avant matricage. GE de 22 kW.



(Doc. PH.)

Fig. 79. — Brasage de lampes à souder. GE.

## BRASAGE ET SOUDAGE AUTOGÈNE

### Principe.

Brasage. On réunit des pièces d'un même métal ou de métaux différents (métaux de base) par l'intermédiaire d'un autre métal (métal d'apport) plus fusible. Pour les brasages « forts », ce métal d'apport est généralement du cuivre, du laiton et, de plus en plus quand on utilise la HF, des alliages à base d'argent ; pour les brasages « faibles » (généralement appelés « soudages »), des alliages à base d'étain.

Soudage autogène. On rapproche les pièces du même métal à souder, on chauffe, on obtient le soudage par pression quand le métal est fondu à l'état pâteux et on laisse refroidir en maintenant la pression.

### Avantages.

Les principaux avantages du chauffage HF sont les suivants :

Localisation du chauffage ;

Rapidité du chauffage ;

Limitation des déformations des pièces chauffées ;

Possibilité d'opérer en général en atmosphère normale étant donné la rapidité du chauffage et, le cas échéant, en atmosphère contrôlée ou à l'intérieur d'une enceinte étanche ;

Suppression ou tout au moins réduction de la décarburation et de l'oxydation ;

Possibilité de réaliser éventuellement des brasages impossibles par d'autres procédés ou des brasages simultanés ;

Abaissement du prix de revient (réduction des rebuts ; éventuellement, recours à l'automatisme) ;

Facilité du travail, hygiène et sécurité ;

### Exemples d'applications.

Signalons seulement quelques applications, à titre d'exemples (7). Se reporter également aux fig. 79 à 87.

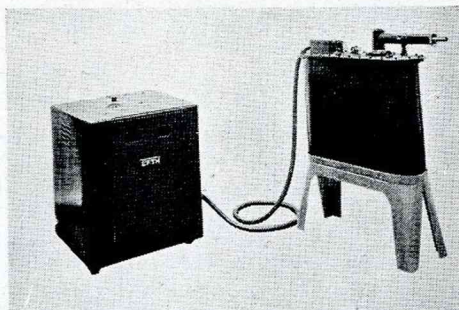
#### 1° Brasage:

Mises rapportées sur corps en acier pour outils à coupe rapide, taillants de mine, plaquettes de fraises, collerettes

---

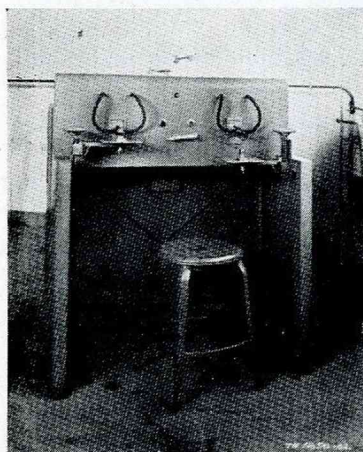
(7) Cf « Le brasage électrique » par R. Gautheret, brochure éditée par Apel.





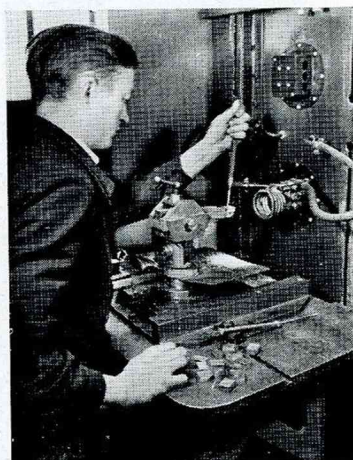
(Doc. CFTH.)

Fig. 80 — Brasage de pièces diverses. GE blindé de 3 kW.



(Doc. CFTH.)

Fig. 81. — Brasage de pièces diverses. GE de 1 kW.



(Doc. SNECMA.)

Fig. 82. — Brasage de mises rapportées (outils). GE de 20 kW.

sur tubes, brides sur corps en acier, collets sur corps creux, fonds sur tubes, pièces rapportées sur autres pièces, etc...

Couvercles sur boîtiers de condensateurs, éléments de radiateurs, etc...

2° Soudage autogène:

    Tubes placés bout à bout.

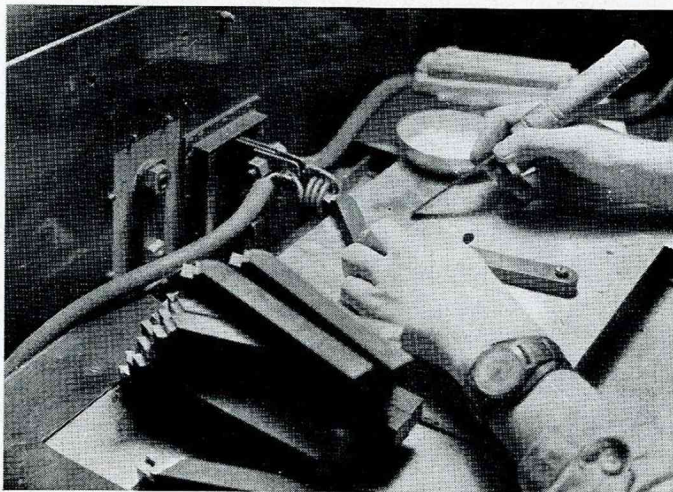
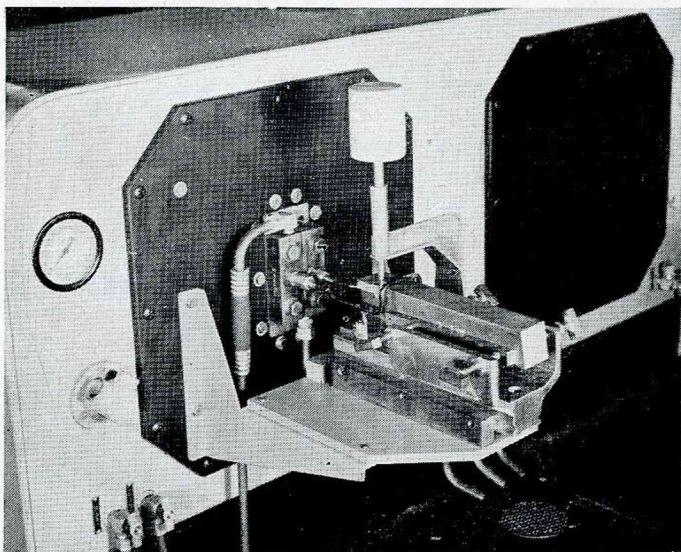


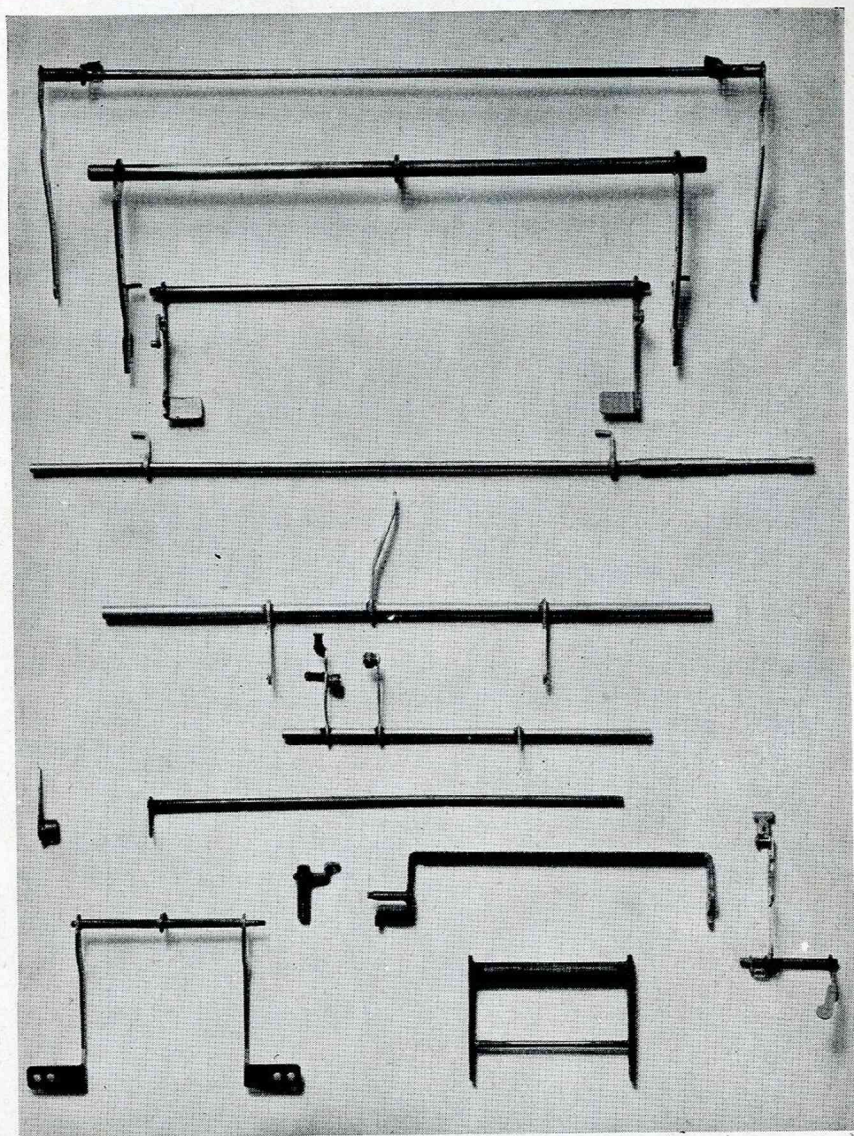
Fig. 83. — Brasage de mises rapportées (*outils*). GE.



(Doc. SGAET-EFCO-TOCCO.)

Fig. 84. — Brasage de mises rapportées (*outils*). GA.





(Doc. Japy-STEL.)

Fig. 85. — Pièces brisées de machines à écrire. GE.



Fig. 86. — Brasage à l'étain de boîtiers. GE de 6 kW.

(Doc. PH.)

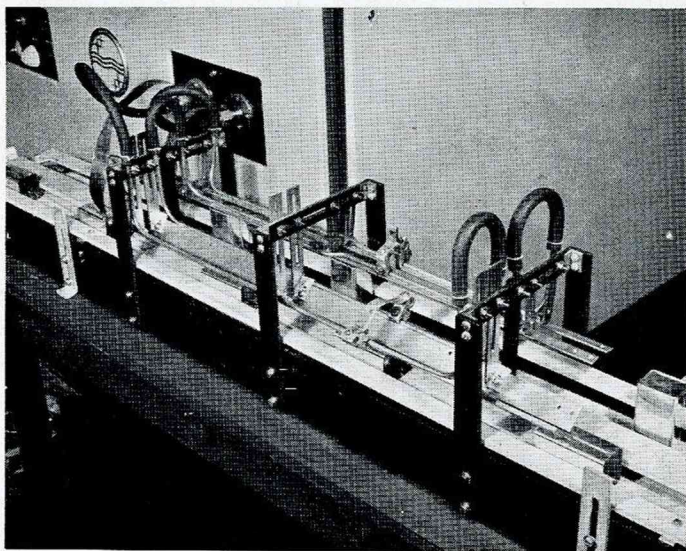
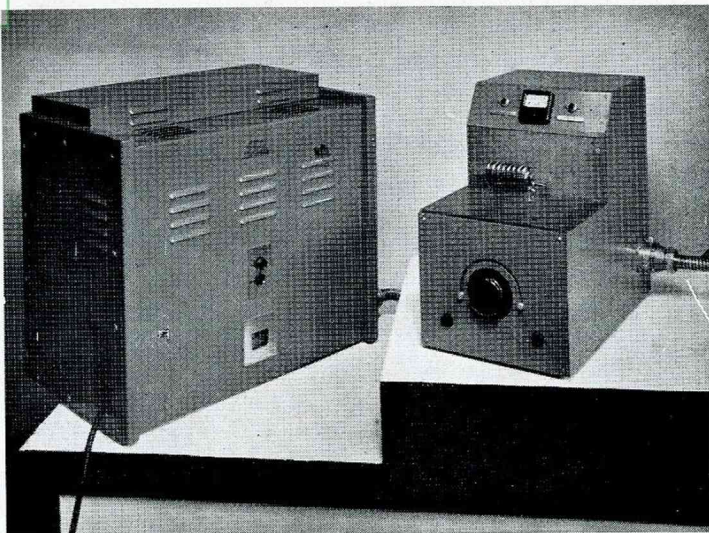


Fig. 87. — Détail de l'installation de la fig. 86.

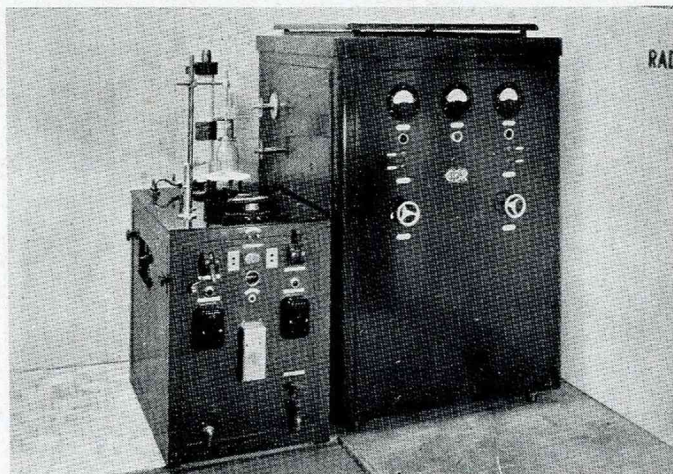
(Doc. PH.)





(Doc. STEL.)

Fig. 88. — Dosage du carbone et du soufre dans les aciers. GE de 450 W. A gauche, alimentation et redressement; à droite, générateur.



(Doc. CGR-SEE.)

Fig. 89. — Dosage des gaz occlus dans les aciers. GE de 10 kW.

## DÉGAZAGE DES MÉTAUX

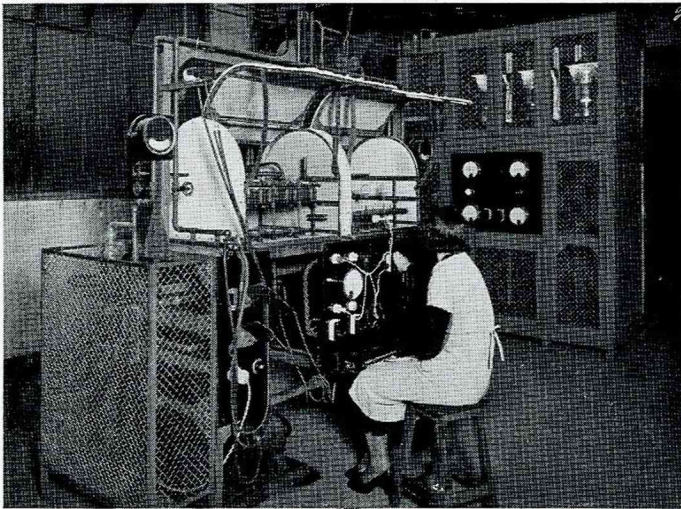
### Principe.

On porte le métal à haute température sous vide. Les gaz occlus s'échappent et peuvent être recueillis en vue de leur dosage, s'il y a lieu.

Principe analogue pour la détermination du carbone et du soufre contenus dans un acier.

### Exemples d'applications.

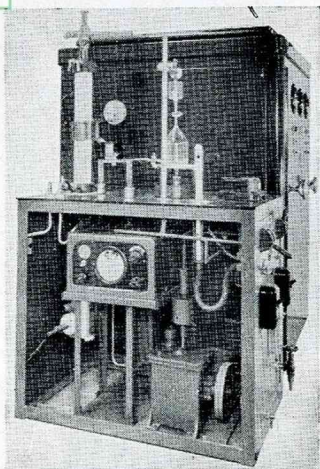
Se reporter aux fig. 88 à 93.



(Doc. Cie générale de TSF-Malakoff).

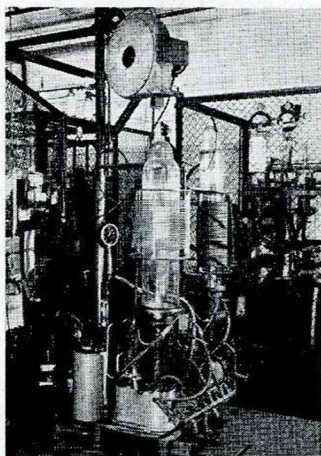
Fig. 90. — Dégazage des métaux sous vide (*lampes de radio*).





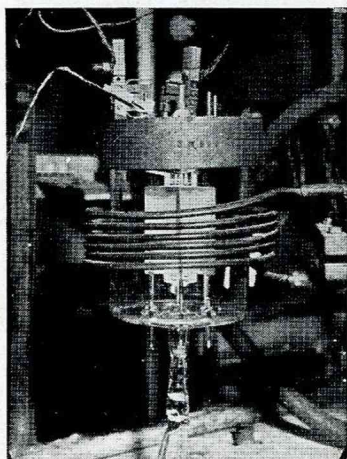
(Doc. CGR-SEE.)

Fig. 91. — Même installation que fig. 89. Vue sur le côté (*capot enlevé*).



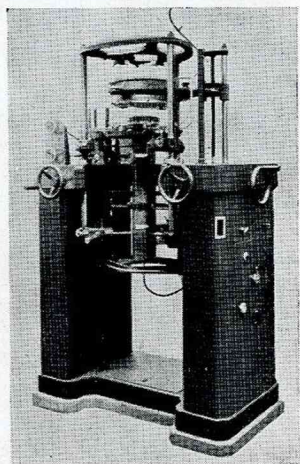
(Doc. CDL.)

Fig. 92. — Dégazage des métaux sous vide. GE de 50 kW.



(Doc. CDL.)

Fig. 93. — Tube électronique en cours de pompage (*dégazage de l'anode*).



(Doc. CFTH.)

Fig. 94. — Machine à souder les corps de verrerie sur les chemises métalliques des tubes électroniques. GE de 5 kW.

## AUTRES APPLICATIONS

Parmi les autres applications, signalons les suivantes (voir également les fig. 94 à 99) :

Séchage et cuisson de peintures ou vernis, en particulier sur petites pièces métalliques et sur tubes métalliques (grande rapidité du traitement, qualité supérieure).

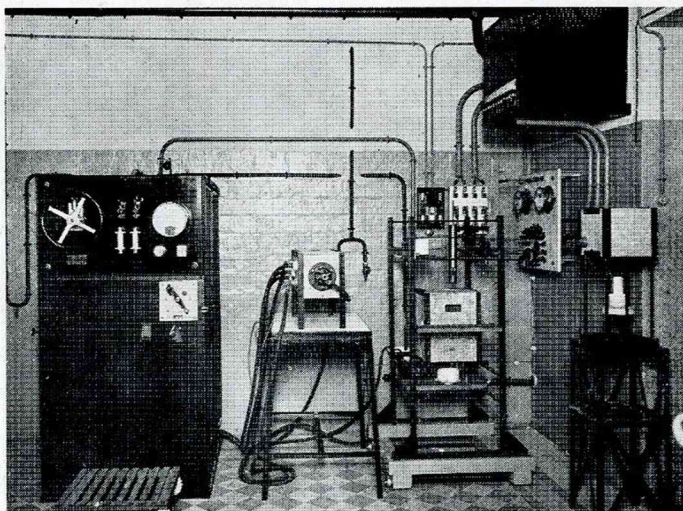
Décollage du revêtement de caoutchouc moulé sur des pièces en acier (on évite ainsi une surchauffe détériorant le revêtement de caoutchouc).

Percement de petits trous dans des blocs de bois (le foret qui traverse le bois est chauffé par induction HF au moyen d'un inducteur placé au-dessus de l'extrémité du foret).

Fusion du sable de silice dans un creuset de graphite (fabrication du verre de silice).

Graphitisation (balais de machines électriques, etc...) contenues dans un creuset conducteur (induction dans le creuset et également dans les pièces en traitement).

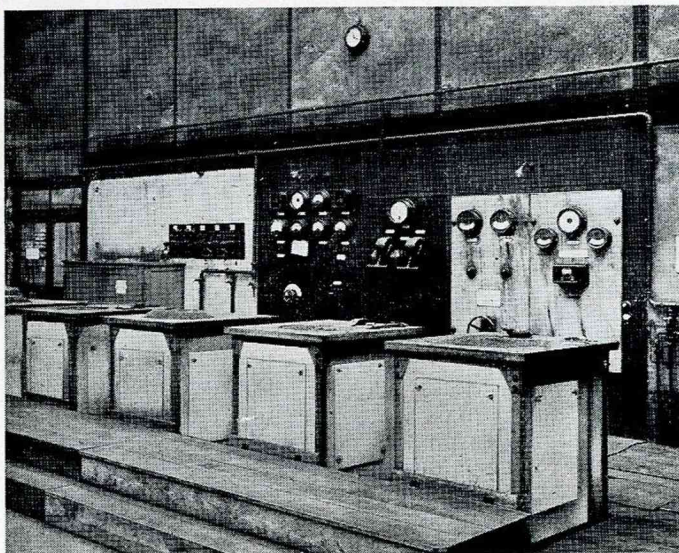
Soudage de corps de verrerie sur les chemises métalliques des tubes électroniques.



(Doc. SGAET)

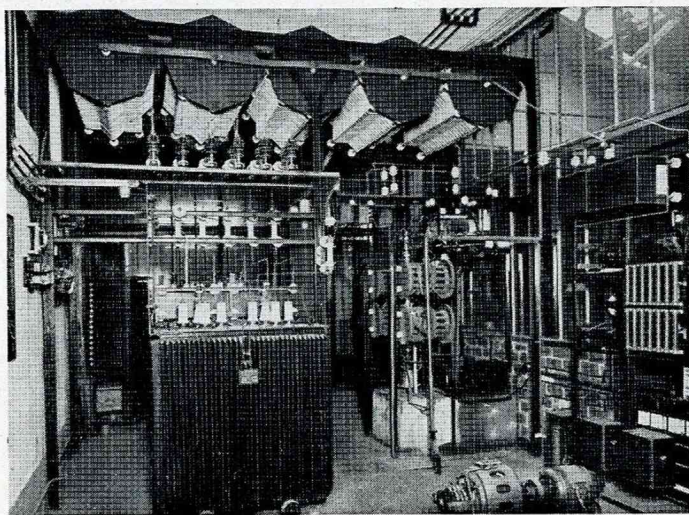
Fig. 95. — Essais de réfractaires. — Installation de 3 fours G à éclateur de 5 kW.





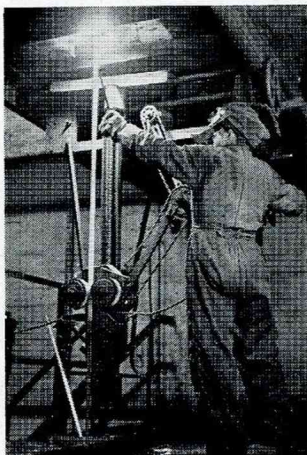
(Doc. Sté Le Carbone-SGAET)

Fig. 96. — Fours de graphitisation. GA de 150 kW.



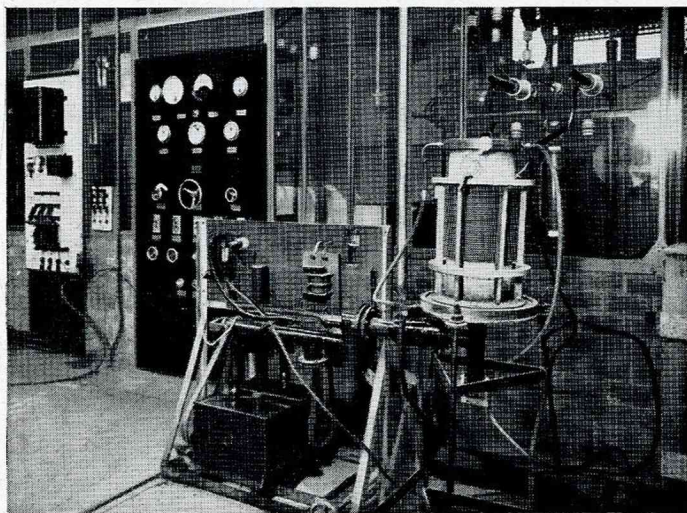
(Doc. Lab. Electrothermique de St-Gobain)

Fig. 97. — Elaboration de silice transparente. GE de 50 kW



(Doc. Lab. El. St-Gobain)

**Fig. 98. — Installation du GE alimentant le four de la fig. 99.**



(Doc. Sté Quartz & Silice)

**Fig. 99. — Etirage de la silice fondue dans un four HF (GE).**



## Bibliographie. (\*)

- A. — *Ouvrages (ordre chronologique).*
- W.-J. Curtis. — **High Frequency Induction Heating** (1944) Traduction française (1948), par G. Génin et A. Eigel.
- M. Jouguet. — **Courants de Foucault et Fours à Induction** (1944).
- Markors et Zeluff. — **Electronics for Engineers** (1945).
- A. Levasseur. — **L'Electrochimie et l'Electrometallurgie** (tome II, 1947). Réédition au fur et à mesure de l'épuisement des éditions antérieures.
- Ch. Bézy. — **Le Chauffage par H. F.** (1948).
- C. F. E. — **Compte rendu des Journées Françaises d'Electrothermie de septembre 1949** (Comité Français d'Electrothermie)\*\*.
- G. Ribaud. — **Les Hautes Températures et leurs Utilisations en Chimie** (chapitre « Fours à Induction », 1950).
- B. — *Revue Française (ordre alphabétique des auteurs).*
- P. Bunet. — **Bulletin de la Société Française des Electriciens** (septembre 1928).
- A. Fourment. — **Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France** (mai et juin 1947).
- J. Froidevaux. — **Bulletin de la Société Française des Electriciens** (novembre 1935).
- H. George. — **Revue Générale de l'Electricité** (avril 1927).
- Giroz. — **Bulletin de la Société Française des Electriciens** (mai 1939).
- G. Gourod. — **La Machine Moderne** (novembre 1946, janvier 1947).
- G. Heller. — **Journal du Four Electrique** (septembre 1936).
- M. Jouguet. — **Revue Générale de l'Electricité** (juillet 1944). **Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France** (mai et juin 1947). **Onde électrique** (août 1947).
- A. Levasseur. — **Revue Générale de l'Electricité** (juin 1934). **Bulletin de la Société Française des Electriciens** (mai 1939).
- M. Minssieux. — **Revue Générale de l'Electricité** (février 1939 ; février, mars et avril 1943).
- Van Laucker. — **Bulletin de la Société Française des Electriciens** (septembre 1937).
- G. Ribaud. — **Journal de Physique** (juin 1923, septembre 1925, avril 1926, avril 1927, novembre 1932). **Compte rendu de l'Académie des Sciences** (n° 216, 1943 ; n° 222, 1946). **Electricité** (mai 1946).
- C. — *Revue Etrangères (ordre alphabétique des auteurs).*
- J. P. Jordan. — **Proc. Inst. Radio-Engin.** (1944).
- M. Jouguet. — **Electronics** (1944).
- V. T. Kinn. — **Proc. Inst. Radio-Engin.** (1945).
- Stansel. — **General Electric Review** (1948). **Electronics** (1950).
- Van Sluifers, H. Baumgartner, M. Descarsin, H. M. Hofer. — **L'Electrique** (1947).
- M. J. O. Strutt. — **Ann. der Physik** (1928). **Archiv. fur Elektrotechnik** (1928).
- Westley J. M. Roberts. — **Proc. Inst. Radio-Engin** (1945).
- D. — *Brochures A. P. E. L.*
- I. Minssieux. — **Les Fours Electriques à Induction** (1943).
- R. Gautheret. — **Le Brasage Electrique** (1950).
- On pourra également se reporter à la bibliographie qui se trouve dans ces deux brochures.
- E. — *Documents divers.*
- Brochures et notices des constructeurs.

(\*) Ne sont retenus que les principaux articles.

(\*\*) Communications de M<sup>rs</sup> G. Ribaud, E. Partiot, J. Briand, Ch. Wait.

## CONCLUSION

---

Le chauffage électrique par induction à haute fréquence offre à l'industrie des moyens nouveaux, soit pour résoudre des problèmes qui jusqu'à présent n'ont pas eu de solution, soit pour améliorer les conditions techniques d'une fabrication déterminée. Ce mode de chauffage permet, non seulement d'effectuer avec plus de précision les traitements auxquels il s'applique, mais encore de réaliser des économies appréciables et de faciliter considérablement la tâche de l'ouvrier. Ce sont ces avantages d'ordre technique, économique et humain qui sont à la base de son développement actuel et permettent d'en prévoir l'essor ultérieur.

*Décembre 1950.*

R. GAUTHERET.



## Liste des brochures A. P. E. L. sur les applications de l'électricité

Titre	Auteur	Nombre de pages	Observations
<i>Les alliages modernes et leur traitement thermique</i> .....	APEL	24	
<i>L'électricité, auxiliaire précieux du céramiste</i> .....	R. GAUTHERET	18	
<i>L'électricité dans la minoterie</i> ..	ROODE	16	épuisé
<i>L'électricité dans les cimenteries</i> .	H. YOKEL	34	épuisé
<i>L'électricité dans l'imprimerie</i> ..	HISCHMANN	36	épuisé
<i>L'électricité en émaillerie</i> .....	R. GAUTHERET	63	épuisé
<i>Le moteur électrique dans l'industrie du bois</i> .....	GIROUD	18	épuisé
<i>Les applications du chauffage électrique en galvanisation</i> .....	ETIENNE	16	épuisé
<i>L'électricité dans la fabrication des produits pharmaceutiques</i> .	R. GAUTHERET	46	épuisé
<i>L'électricité dans la bonneterie</i> ..	G. THONNAT	44	
<i>Avaries pouvant survenir aux moteurs électriques</i> .....	A. GIROUD	12	
<i>L'électricité dans les petits ateliers de nickelage</i> .....	R. GAUTHERET	84	2 <sup>e</sup> éd.
<i>Les résistances métalliques</i> .....	R. GAUTHERET	37	épuisé
<i>L'électricité dans la brasserie</i> ... )	DESFORGES et MASCART	44	
<i>Les résistances non métalliques et leurs applications</i> .....	R. GAUTHERET	47	épuisé
<i>Les éléments protégés et leurs applications</i> .....	R. GAUTHERET	41	épuisé
<i>Les redresseurs secs et leurs applications industrielles</i> .....	LEBLANC	52	épuisé
<i>L'électricité dans les industries de protection des métaux contre la corrosion et l'usure</i> .....	R. GAUTHERET	56	épuisé
<i>Les fours électriques à bain de sels à électrodes</i> .....	R. GAUTHERET	48	
<i>Les fours électriques à résistances.</i>	R. GAUTHERET	50	épuisé
<i>Les différents types de fours à résistances</i> .....	R. GAUTHERET	75	épuisé

Titre	Auteur	Nombre de pages	Observations
<i>Comment choisir et commander un four à résistances .....</i>	R. GAUTHERET	64	épuisé
<i>Comment installer, réceptionner, utiliser un four à résistances ..</i>	R. GAUTHERET	40	épuisé
<i>L'électricité dans l'industrie des matières plastiques.....</i>	PIARD	28	
<i>L'amélioration du facteur de puissance dans les installations industrielles .....</i>	R. GAUTHERET	80	3 <sup>e</sup> éd.
<i>Les machines à chauffer électriques par résistances et leurs applications industrielles.....</i>	D. BIDAUX	46	épuisé
<i>Les étuves électriques et leurs applications industrielles .....</i>	L. TILLAUD	37	
<i>Les appareils thermostatiques ...</i>	J. LELY	58	
<i>Le séchage artificiel des fourrages.</i>	Th. TOURNIER	25	
<i>L'électricité dans une grande usine de produits alimentaires .....</i>	R. GAUTHERET	47	épuisé
<i>Les fours électriques à arc.....</i>	DÉRIBÉBÉ	67	
<i>La soudure électrique à l'arc et ses applications industrielles ..</i>	SALELLES	74	
<i>Les fours électriques à induction..</i>	MINSSIEUX	80	
<i>Les différents modes de chauffage électrique .....</i>	R. GAUTHERET	100	
<i>Mémento du chauffage électrique .</i>	R. GAUTHERET et Th. TOURNIER	244	3 vol.
<i>Les fours électriques de céramique.</i>	R. GAUTHERET	80	
<i>Le brasage électrique.....</i>	R. GAUTHERET	72	

### Brochures en cours d'impression

<i>Le chauffage électrique par lampes à rayonnement infra-rouge ..</i>	R. GAUTHERET, G. SEURIN, B. HAZNADAROFF ET J. MAISONNEUVE.
<i>L'électricité dans les industries du bois .....</i>	J. COLLARDET, M. WILFART, J. BESSET ET R. GAUTHERET.





XL-XII-50

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

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