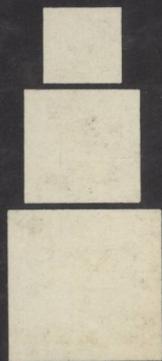
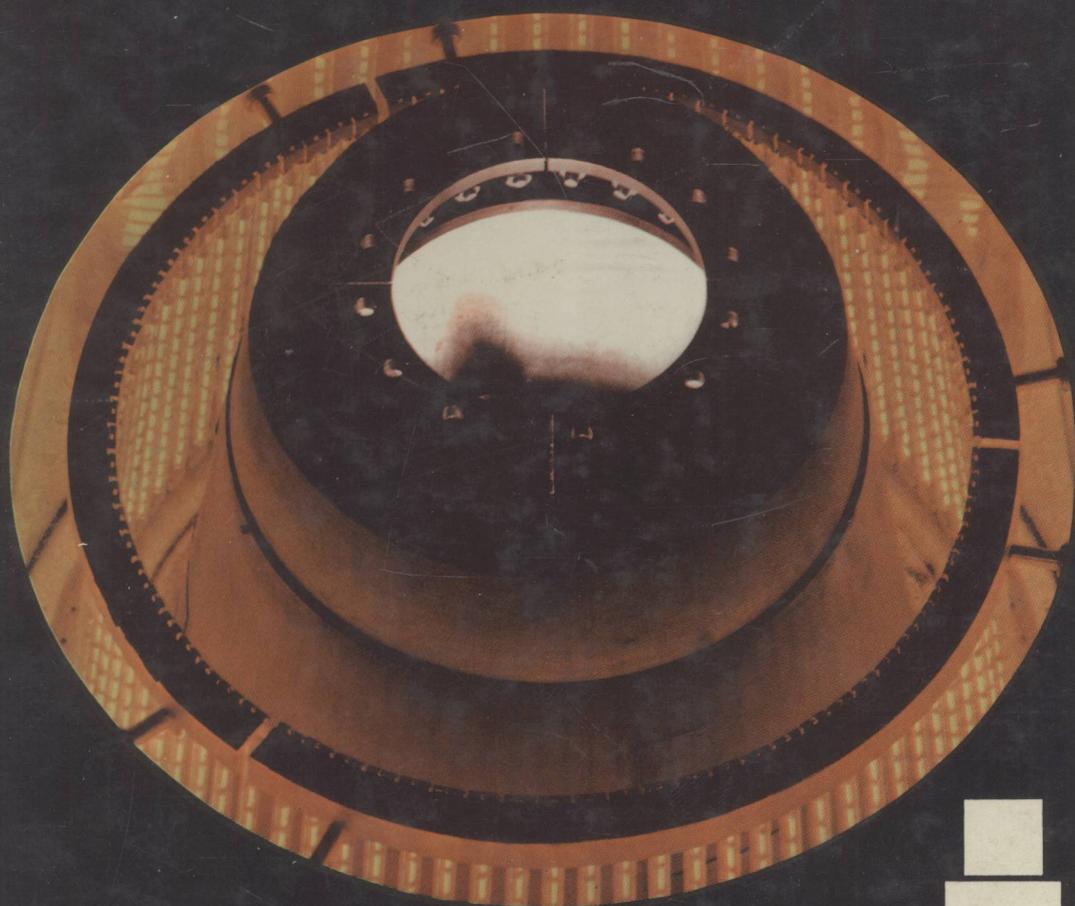


Maurice Orfeuil

Electrothermie industrielle



dunod

TM 924
01

8261417

Electrothermie industrielle

Fours et équipements thermiques électriques industriels

Par

Maurice Orfeuill

Ingénieur civil des Mines
Ingénieur à Électricité de France

Préface de

Albert Robin

Directeur à la direction générale
d'Électricité de France



E8261417

dunod

Photo de couverture :
Four infrarouge de simulation
Aérospatiale. Centre des Mureaux

© BORDAS, Paris, 1981

ISBN 2-04-012179-X

“ Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration ”

Electrothermie industrielle

Préface

L'ouvrage de Maurice Orfeuil arrive à point nommé pour combler une lacune et répondre à un besoin.

Il comble une lacune en faisant une synthèse des multiples façons dont on peut chauffer de la matière — qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse — grâce à l'énergie électrique, synthèse que l'on ne semble trouver nulle part jusqu'ici.

Beaucoup de ces procédés sont connus depuis l'origine de l'électricité industrielle; ils ont permis le développement d'applications qui constituent ce que l'on peut appeler l'électrothermie traditionnelle : leur champ préférentiel d'application a été l'élaboration, le formage et le traitement thermique des métaux; fours à résistances, fours à arc et fours à induction, dans leurs diverses variantes, ont longtemps constitué l'essentiel de la panoplie dont disposait l'électrothermicien.

Mais progressivement, l'évolution technologique a rendu utilisables industriellement des phénomènes souvent connus dans leur principe depuis longtemps, mais relativement peu mis en œuvre (hystérésis diélectrique, plasma, bombardement électronique); ou parfois nouvellement découverts, tel le laser qui n'est apparu dans les laboratoires qu'il y a moins de vingt ans.

Il était essentiel qu'un même ouvrage mette sous les yeux des étudiants, des ingénieurs et des dirigeants d'entreprise l'état actuel de l'art, sous une forme certes condensée, mais suffisante pour comprendre et évaluer les possibilités d'application de l'électricité à des usages thermiques. Et l'on verra que si pratiquement la gamme des besoins industriels courants est largement couverte, l'électricité ouvre en outre des voies difficilement accessibles à d'autres énergies.

Il répond à un besoin : une connaissance approfondie des possibilités de l'électricité pour des usages thermiques est d'ores et déjà essentielle — et va le devenir encore plus dans un proche avenir — pour ceux qui auront à prendre ou à préparer les décisions d'investissements en secteur industriel. Car deux facteurs principaux vont motiver un recours accru à l'électricité :

- L'évolution des coûts relatifs des énergies : elle avait été défavorable à l'électricité entre 1960 et 1973 (sa compétitivité par rapport aux fuels s'était réduite d'un tiers), mais depuis 1974 le coût relatif des fuels a triplé et cette tendance ne semble pas près de se renverser, bien au contraire.
- La nécessité d'utiliser rationnellement, c'est-à-dire notamment économiquement, les énergies disponibles.

A service compétitif donné, il faut utiliser le moins possible d'énergie et recourir prioritairement aux sources énergétiques les moins rares, celles qui sont les moins dispendieuses en devises, dont le coût n'aura pas tendance à monter, et dont l'approvisionnement est le plus sûr. Or, il est désormais démontré par de nombreuses installations grandeurs nature, que contrairement à une opinion encore trop répandue, la satisfaction des besoins thermiques par le canal du vecteur « électricité » peut non seulement amener, dans un grand nombre de cas, des économies importantes d'énergie primaire mais encore dans presque tous les cas procurer des économies de devises et cela même si toute l'électricité utilisée était censée provenir de centrales thermiques alimentées au fuel lourd, ce qui n'a plus rien à voir avec la réalité.

Dès maintenant, la production marginale est assurée par du charbon, quand ce n'est pas un peu par du nucléaire, pendant plusieurs centaines d'heures lors des périodes de faible charge de l'été. Le développement du programme électronucléaire français permettra dès 1985 de produire les 2/3 de notre électricité à partir d'hydraulique et de nucléaire, la plus grande partie du complément étant assurée à partir de charbon : aussi le coût moyen en devises de l'électricité s'abaissera-t-il fortement, et s'annulera pratiquement pendant plusieurs mois d'été.

*
* *

L'ouvrage de M. Orfeuil comble une lacune et répond à un besoin : ces raisons sont déjà suffisantes pour lui trouver intérêt.

Mais bien d'autres s'y ajoutent et notamment :

- la précision de sa documentation technique;
- la clarté de la présentation;
- l'indication méthodique des applications réalisées — ou envisageables à bref délai tant sur le plan technique qu'économique.

Car bien qu'il s'agisse d'un ouvrage essentiellement technique, l'auteur — Ingénieur civil des Mines mais aussi « Master in Business Administration » — n'oublie pas les considérations économiques et financières qui rendent une technique acceptable ou non sur le plan industriel.

Et au fil des pages, l'auteur soutient l'intérêt du lecteur par ses qualités didactiques et sa maîtrise des sujets abordés, maîtrise qu'il a su acquérir tant au cours de ses études qu'au cours des quelques années qu'il a passées comme Ingénieur à la Division Industrie Électricité du Service commercial de la Direction de la Distribution d'E.D.F. — où il avait précisément mission de promouvoir le développement des techniques qu'il nous présente aujourd'hui.

Grâce à ces techniques, l'Industrie française se voit offrir une chance qu'il apparaît fondamental de saisir sans hésiter.

Et cela malgré — ou plutôt à cause de — la situation de dépendance énergétique où se trouve encore notre pays. Car dans cette situation délicate — à la fois pour rester compétitif et pour réduire le risque de paralysie partielle par pénurie d'énergie —, il faut convertir notre Industrie aussi bien à l'utilisation accrue des procédés électriques disponibles qu'à la mise au point de nouveaux matériels.

Cela aura pour résultat, en améliorant sa productivité et la qualité de ses produits, de rendre notre Industrie de biens de consommation plus compétitive sur le plan international; cela donnera aussi à notre Industrie de biens d'équipement la possibilité de mettre sur le marché, avec plusieurs années d'avance sur ses concurrents, du matériel qui va être de plus en plus recherché.

En répandant largement la connaissance des possibilités techniques qui s'offrent à tous les utilisateurs, nul doute que cet ouvrage ne contribue à leur permettre de saisir cette chance unique de renforcer la situation de leurs entreprises tout en améliorant la Balance des Comptes du pays.

Albert ROBIN

Directeur à la Direction Générale d'Électricité de France

Remerciements

L'auteur exprime sa plus profonde gratitude à tous ceux qui l'ont aidé et conseillé dans la réalisation de cet ouvrage, notamment :

— Monsieur J. Gosse, Professeur de Thermique industrielle au Conservatoire national des Arts et Métiers, qui lui a confié une responsabilité d'enseignement en électrothermie et l'a encouragé à entreprendre sa rédaction;

— Monsieur A. Busson, Professeur d'Électricité au Conservatoire national des Arts et Métiers, Conseiller scientifique et technique du Président de l'Union technique de l'Électricité, qui lui a donné, il y a des années déjà, le goût d'écrire et l'a conforté dans son projet;

— Monsieur A. Robin, Directeur à la Direction générale d'Électricité de France, qui a accepté de le préfacer et de situer ses objectifs dans le contexte des perspectives énergétiques à court et long terme;

— Monsieur R. Robin, Directeur adjoint de la Direction de la distribution d'Électricité de France-Gaz de France, qui a encouragé ce projet et donné toutes facilités pour sa réalisation;

— Monsieur L. Hallot, Directeur adjoint des Méthodes Fonderie de la Régie nationale des Usines Renault, qui l'a fait bénéficier de sa vaste expérience et lui a confié une précieuse documentation.

Ses remerciements vont également à l'Institut français de l'Énergie et, en particulier, au Directeur de son École de Thermique pour lui avoir permis d'enseigner depuis plusieurs années l'Électrothermie industrielle et d'enrichir son expérience grâce aux nombreux contacts avec les étudiants des sessions de formation continue.

Les pages qui suivent doivent beaucoup à la documentation très complète mise à la disposition de l'auteur qui leur en est très reconnaissant par :

— le Comité français d'Électrothermie, en particulier son Délégué général Monsieur P. Michel;

— les constructeurs d'équipements électrothermiques grâce auxquels le texte a de plus pu être enrichi de nombreuses illustrations;

— les utilisateurs de ces équipements qui ont accepté de faire part de leurs résultats d'exploitation;

— les centres de recherches engagés dans l'innovation en électrothermie.

Ses collègues enfin, ingénieurs et chercheurs d'Électricité de France participant à l'approfondissement des techniques électrothermiques, en particulier ceux de la Division Industrie-Électricité animée par Monsieur C. Medan, retrouveront au fil de cet ouvrage la trace de tout ce que l'auteur leur doit et il les remercie de l'appui sans réserve qu'ils ont apporté à sa réalisation.

Table des matières

Préface.....	V
Remerciements.....	IX
Chap. 1. — Électrothermie et processus industriel.....	1
1. <i>Équipement thermique et électrothermie.....</i>	1
2. <i>Électrothermie et processus industriel.....</i>	2
3. <i>Électrothermie et rayonnement électromagnétique.....</i>	7
4. <i>Évolution de l'électrothermie industrielle.....</i>	7
4.1. <i>Accroissement des densités de puissance.....</i>	8
4.1.1. <i>Amélioration des procédés classiques.....</i>	8
4.1.2. <i>Recours à des procédés spéciaux.....</i>	9
4.1.3. <i>Gamme de densités de puissance.....</i>	10
4.2. <i>L'impératif « économies d'énergie ».....</i>	10
4.3. <i>Développement de l'électronique.....</i>	10
4.3.1. <i>Régulation électronique.....</i>	11
4.3.2. <i>Convertisseurs de fréquence.....</i>	12
4.3.3. <i>Automatisation.....</i>	12
4.3.4. <i>Microprocesseurs, microordinateurs et optimisation.....</i>	13
4.4. <i>Évolution de la tarification de l'électricité et électrothermie.....</i>	14
4.5. <i>Diffusion de l'électrothermie dans de nouveaux secteurs.....</i>	16
5. <i>Électrothermie et économies d'énergie.....</i>	16
5.1. <i>Économies d'électricité dans un processus électrothermique et dans l'entreprise.....</i>	17
5.1.1. <i>Distribution.....</i>	17
5.1.2. <i>Force motrice.....</i>	18
5.1.3. <i>Éclairage.....</i>	18
5.1.4. <i>Équipements électrothermiques.....</i>	18
5.1.5. <i>Tarification.....</i>	19
5.2. <i>Processus électrothermiques et économies d'énergie.....</i>	20

6.	<i>Annexe 1. — Transmission de la chaleur et échauffement des corps.</i>	22
6.1.	Relation entre température et chaleur.	22
6.2.	Transmission de la chaleur.	22
6.2.1.	La conduction.	22
6.2.1.1.	Loi de Fourier.	23
6.2.1.2.	Régimes permanents.	24
6.2.1.2.1.	Paroi plane composite.	24
6.2.1.2.2.	Paroi cylindrique composite.	25
6.2.1.2.3.	Paroi sphérique composite.	27
6.2.1.2.4.	Cas général.	27
6.2.1.3.	Régimes variables.	28
6.2.2.	La convection.	30
6.2.2.1.	Coefficient de convection.	30
6.2.2.2.	Transfert de chaleur par convection.	32
6.2.3.	Le rayonnement.	33
6.2.4.	Transmission de chaleur à travers une paroi baignée par deux fluides.	34
6.3.	Échauffement des corps.	35
7.	<i>Annexe 2 — La pompe à chaleur et ses applications industrielles.</i>	36
7.1.	Principe.	36
7.2.	Applications industrielles.	39
8.	<i>Bibliographie.</i>	41
Chap. 2.	— Le chauffage par résistances — Application aux fours électriques.	45
1.	<i>Principe de chauffage des fours à résistances.</i>	45
1.1.	Puissance dissipée dans une résistance.	45
1.2.	Chauffage d'un four à résistances.	46
2.	<i>Constitution et caractéristiques des fours à résistances.</i>	48
2.1.	Transmission de la chaleur dans un four à résistances.	49
2.1.1.	Transfert de chaleur par conduction.	49
2.1.2.	Transfert de chaleur par rayonnement.	49
2.1.3.	Transfert de chaleur par convection.	50
2.1.4.	Échange thermique global dans un four à résistances.	51
2.2.	Calcul de la puissance d'un four à résistances.	53
2.2.1.	Énergie absorbée par la charge.	53
2.2.2.	Énergie absorbée par les parois.	54
2.2.3.	Dépense thermique des fours.	54
2.2.4.	Puissance à installer.	55
2.2.4.1.	Fours intermittents ou discontinus.	55
2.2.4.2.	Fours continus.	56
2.3.	Rendement des fours à résistances.	57
2.3.1.	Rendement électrique.	57
2.3.2.	Rendement thermique.	57
2.3.3.	Rendement pratique ou industriel, relation avec les consommations spécifiques.	57
2.4.	Les différents types de fours à résistances.	59
2.4.1.	Les fours à sole fixe.	59
2.4.2.	Les fours à sole mobile.	62
2.4.3.	Les fours à cloche.	62
2.4.4.	Les fours à sole élévatrice.	63
2.4.5.	Les fours à sole tournante.	63
2.4.6.	Les fours à plateau tournant.	63

2.4.7.	Les fours à sole inclinée.	64
2.4.8.	Les fours à secousses et à sole vibrante.	64
2.4.9.	Les fours à chaînes et à convoyeur à fils.	64
2.4.10.	Les fours continus à tablier, à tapis ou à bande.	64
2.4.11.	Les fours à wagonnets.	65
2.4.12.	Les étuves électriques à résistances.	66
2.5.	Les réfractaires et les isolants : la chambre de chauffe.	67
2.5.1.	Les réfractaires.	68
2.5.2.	Les isolants thermiques.	70
2.5.3.	Les réfractaires isolants.	70
2.5.4.	Réfractaires et résistances.	71
2.5.5.	Épaisseur optimale des parois.	72
3.	Les résistances électriques.	74
3.1.	Résistance et résistivité.	74
3.2.	Groupement de résistances.	74
3.3.	Critères de choix des résistances.	77
3.4.	Les différents types de résistances.	79
3.4.1.	Les résistances métalliques.	79
3.4.1.1.	Les résistances en alliages fer-nickel-chrome ou nickel-chrome.	79
3.4.1.1.1.	Caractéristiques.	79
3.4.1.1.2.	Les résistances fer-nickel-chrome.	81
3.4.1.1.3.	Les résistances nickel-chrome.	82
3.4.1.1.4.	Formes des éléments chauffants.	83
3.4.1.1.5.	Domaines d'utilisation.	83
3.4.1.2.	Les résistances en alliages fer-chrome-aluminium.	84
3.4.1.2.1.	Caractéristiques.	84
3.4.1.2.2.	Formes des éléments.	87
3.4.1.2.3.	Domaines d'utilisation.	87
3.4.1.3.	Les résistances en fer-nickel-chrome-aluminium.	87
3.4.1.4.	Autres types de résistances métalliques.	88
3.4.1.4.1.	Platine, platine rhodié et rhodium.	88
3.4.1.4.2.	Molybdène, tungstène, tantale et niobium.	89
3.4.2.	Les cermets.	91
3.4.2.1.	Résistances en bisiliciure de molybdène.	91
3.4.2.1.1.	Caractéristiques.	91
3.4.2.1.2.	Les types d'éléments chauffants.	95
3.4.2.1.3.	Alimentation électrique.	96
3.4.2.1.4.	Durée de vie des éléments.	97
3.4.2.1.5.	Intérêt et limitations des résistances en bisiliciure de molybdène.	97
3.4.2.1.6.	Domaines d'utilisation.	98
3.4.2.2.	Les résistances en chromite de lanthane.	98
3.4.2.3.	Les résistances en zircone.	99
3.4.3.	Les résistances non métalliques.	99
3.4.3.1.	Les résistances en carbone.	99
3.4.3.1.1.	Caractéristiques.	99
3.4.3.1.2.	Formes des éléments chauffants et domaines d'utilisation.	101
3.4.3.2.	Les résistances en carbure de silicium.	102
3.4.3.2.1.	Caractéristiques.	103
3.4.3.2.2.	Les différents types d'éléments chauffants.	106
3.4.3.2.3.	Durée de vie des éléments.	109
3.4.3.2.4.	Montage électrique et remplacement des résistances.	111
3.4.3.2.5.	Intérêt et limitations des résistances en carbure de silicium.	112

3.4.3.2.6.	Domaines d'utilisation.	112
3.5.	Formes et dispositions des résistances dans les fours.	113
3.5.1.	Résistances pour fours à convection forcée.	114
3.5.2.	Résistances pour fours travaillant par rayonnement.	114
3.5.2.1.	Résistances boudinées.	115
3.5.2.2.	Résistances en rubans ondulés.	116
3.5.2.3.	Résistances en épingles formées en ondes.	117
3.5.2.4.	Résistances tubulaires.	118
3.5.2.5.	Résistances moulées.	119
3.5.2.6.	Autres formes de résistances.	120
3.5.2.7.	Les tubes radiants électriques.	120
3.5.2.7.1.	Les tubes radiants à résistances métalliques.	120
3.5.2.7.1.1.	Tubes radiants à résistances boudinées.	120
3.5.2.7.1.2.	Tubes radiants à bandes spiralées sur chant.	121
3.5.2.7.1.3.	Tubes radiants à épingles.	122
3.5.2.7.1.4.	Autres tubes radiants à résistances métalliques.	122
3.5.2.7.2.	Les tubes radiants à résistances non métalliques.	123
3.5.2.7.3.	Les tubes protecteurs.	123
3.5.2.8.	Panneaux radiants.	124
3.6.	Calcul des résistances.	124
3.6.1.	Principe de calcul.	124
3.6.2.	Exemple.	125
3.6.3.	Calcul pratique des résistances.	126
4.	<i>Fours à résistances et régulation.</i>	127
4.1.	Constitution d'un système de régulation pour fours à résistances.	127
4.2.	Dispositifs de variation de la puissance.	129
4.3.	Régulation à thyristors.	131
4.3.1.	Principe.	131
4.3.2.	Modes de commande par thyristors.	132
4.3.3.	Commande par thyristors et fours à résistances.	133
5.	<i>L'évolution des fours à résistances.</i>	135
5.1.	Les fours électriques à haute densité de puissance.	136
5.1.1.	Remarques sur les transferts de chaleur entre résistances et charge.	136
5.1.1.1.	Influence de l'émissivité totale des résistances.	137
5.1.1.2.	Influence du facteur de forme global d'un four.	137
5.1.1.3.	Influence de la température maximale des résistances.	138
5.1.2.	Les fours à résistances non métalliques très haute température.	139
5.1.3.	Les fours à résistances métalliques à haute densité de puissance.	139
5.1.3.1.	Remarques sur les fours à résistances de conception classique.	140
5.1.3.2.	Principe des fours à résistances métalliques à haute charge spécifique.	143
5.1.3.3.	Intérêt et limitations.	145
5.2.	Les fours à résistances à faible inertie thermique.	146
5.3.	Les fours à résistances sous vide.	148
5.3.1.	Les fours sous vide à parois chaudes.	149
5.3.1.1.	Les fours à parois chaudes à simple vide.	149
5.3.1.2.	Les fours à parois chaudes à double vide.	150
5.3.2.	Les fours sous vide à parois froides.	150
5.3.3.	Les applications des fours sous vide.	152
5.3.4.	Intérêt et limitations des fours sous vide.	154
6.	<i>Intérêt et limitations des fours à résistances.</i>	156
6.1.	Intérêt des fours à résistances.	156
6.2.	Limitations des fours à résistances.	157

7. Les applications des fours à résistances.	158
7.1. Les industries métallurgiques, mécaniques et électriques.	158
7.1.1. La fusion des métaux.	158
7.1.1.1. Les fours à baguette rayonnante.	158
7.1.1.2. Les fours à bassin.	159
7.1.1.3. Les fours à creuset.	162
7.1.2. Les traitements thermiques des métaux.	166
7.1.2.1. Les fours à résistances classiques.	167
7.1.2.1.1. Types de fours.	167
7.1.2.1.2. Puissance et consommations spécifiques.	170
7.1.2.2. Les fours sous vide.	172
7.1.2.3. Les fours à lit fluidisé.	173
7.1.2.4. Les fours à bain de sels.	174
7.1.2.5. Les générateurs d'atmosphère.	175
7.1.3. Le chauffage avant formage des métaux.	175
7.1.4. Les fours de galvanisation.	177
7.1.4.1. Les fours à cuve métallique.	177
7.1.4.2. Les fours à cuve céramique.	178
7.1.4.3. Puissance à installer et consommations spécifiques.	179
7.1.5. Les fours de cuisson d'émail.	180
7.1.5.1. Les fours à chambre.	181
7.1.5.2. Les fours continus.	181
7.1.5.3. Consommations spécifiques et intérêt des fours à résistances.	183
7.1.6. Le brasage des métaux.	184
7.1.7. Le frittage.	185
7.1.8. Le séchage et la cuisson de revêtements organiques.	186
7.1.9. La fabrication de semi-conducteurs et composants électroniques.	188
7.2. L'industrie céramique.	189
7.2.1. Fabrication des produits céramiques.	189
7.2.2. Les fours à résistances dans l'industrie céramique.	193
7.2.2.1. Les fours discontinus.	193
7.2.2.1.1. Les fours à chambre.	193
7.2.2.1.2. Les fours à sole mobile.	194
7.2.2.1.3. Les fours à cloche.	195
7.2.2.2. Les fours continus.	195
7.2.2.2.1. Les fours à passages.	195
7.2.2.2.2. Les fours tunnels à wagonnets.	196
7.2.2.3. Consommations spécifiques et domaines d'utilisation.	198
7.3. L'industrie du verre.	199
7.3.1. Les fours de fusion à creuset.	199
7.3.2. Chauffage des chenaux de tirée et d'alimentation et des avant-fours.	200
7.3.3. Traitements thermiques du verre.	200
7.3.4. La cuisson de décors.	201
7.4. Les industries alimentaires.	201
7.4.1. Les fours de cuisson du pain.	201
7.4.1.1. Les fours discontinus.	202
7.4.1.2. Les fours continus.	205
7.4.1.3. Intérêt des fours électriques en boulangerie.	207
7.4.2. Les fours de cuisson et de traitement des plats et produits préparés.	207
7.4.3. Autres applications des fours à résistances dans les industries alimentaires.	209
7.5. Autres industries et applications. Laboratoires.	209
7.5.1. Les industries transformatrices des matières plastiques.	211
7.5.2. Les industries chimiques, pharmaceutiques et biologiques.	212

7.5.3.	Les industries du bois.	212
7.5.4.	Les générateurs d'air et de gaz chauds.	213
7.5.5.	Les cylindres chauffants.	213
8.	<i>Bibliographie.</i>	214
Chap. 3 — Le chauffage par résistances électriques gainées.		219
1.	<i>Principe du chauffage par résistances gainées.</i>	219
2.	<i>Constitution d'une résistance gainée.</i>	219
3.	<i>Les différents types de résistances gainées.</i>	222
3.1.	Les cartouches chauffantes blindées.	222
3.2.	Les éléments tubulaires blindés.	224
3.3.	Les thermoplongeurs à résistance blindée.	225
3.3.1.	Les thermoplongeurs amovibles verticaux ou horizontaux.	225
3.3.2.	Les thermoplongeurs à visser ou sur bride.	226
3.3.3.	Caractéristiques des thermoplongeurs à résistance blindée.	227
3.4.	Les résistances sur barillets.	228
3.4.1.	Thermoplongeurs à résistances sur barillets.	229
3.4.2.	Chauffages de solides par résistances sur barillets.	230
3.5.	Les éléments plats à gaines métalliques.	230
3.6.	Les colliers chauffants.	232
3.7.	Les éléments gainés céramique souples.	233
3.8.	Les câbles chauffants blindés.	235
3.9.	Les rubans chauffants.	237
3.10.	Les panneaux et tissus chauffants.	240
3.10.1.	Panneaux travaillant par conduction thermique.	240
3.10.2.	Panneaux rayonnants.	242
3.11.	Les résistances à ailettes.	243
3.12.	Autres éléments chauffants gainés.	244
3.12.1.	Éléments chauffants moulés dans des réfractaires fibreux céramiques.	245
3.12.2.	Éléments chauffants imprimés.	245
3.12.3.	Tissus chauffants.	246
4.	<i>Intérêt et limitations des résistances électriques gainées.</i>	246
5.	<i>Applications industrielles des résistances électriques gainées. Éléments de calcul.</i>	247
5.1.	Applications des résistances gainées au chauffage des cuves et des réservoirs contenant des liquides.	248
5.1.1.	Techniques électriques de chauffage des cuves et réservoirs.	248
5.1.1.1.	Chauffage décentralisé.	248
5.1.1.2.	Chauffage centralisé.	251
5.1.2.	Puissance des équipements.	251
5.1.2.1.	Besoins thermiques d'une cuve traitant des produits par immersion.	253
5.1.2.2.	Puissance nécessaire à la montée en température d'une cuve ou d'un réservoir.	253
5.1.2.2.1.	Calcul simplifié de la puissance nécessaire à la montée en température.	254
5.1.2.2.2.	Évolution de la température du liquide au cours de la montée en température et puissance correspondante.	254
5.1.2.3.	Maintien en température d'une cuve ou d'un réservoir.	255
5.1.2.4.	Puissance à installer dans une cuve ou un réservoir.	256
5.1.2.4.1.	Durée de montée en température imposée.	256

5.1.2.4.2.	Durée de montée en température non imposée.	257
5.1.2.5.	Élévation de la température des produits immergés et refroidissement du bain.	257
5.1.2.6.	Éléments de calcul.	259
5.1.2.6.1.	Pertes thermiques par la surface libre d'une solution aqueuse.	259
5.1.2.6.2.	Pertes thermiques par les parois d'une cuve ou d'un réservoir.	260
5.2.	Chauffage et maintien des tuyauteries parcourues par des liquides. . .	263
5.3.	Les chauffe-eau électriques industriels.	265
5.4.	Les chaudières à vapeur chauffées par thermoplongeurs.	268
5.5.	Les réchauffeurs à circulation et les chaudières électriques à eau chaude.	270
5.6.	Les chaudières à fluide thermique.	271
5.7.	Le chauffage de moules, de plateaux et de matrices.	272
5.7.1.	Caractéristiques des résistances gainées utilisées pour le chauffage de moules, plateaux et matrices.	272
5.7.2.	Calcul de la puissance à installer.	272
5.7.2.1.	Puissance nécessaire à la mise en température.	273
5.7.2.2.	Puissance nécessaire à la production.	277
5.8.	Préchauffage et traitements thermiques en construction soudée.	278
5.9.	Le chauffage électrique des ateliers par planchers chauffants.	282
5.9.1.	Constitution d'un plancher chauffant.	283
5.9.2.	Puissance à installer.	284
5.9.3.	Implantation des machines.	284
5.9.4.	Intérêt du plancher chauffant.	285
5.10.	Le durcissement accéléré du béton.	286
5.10.1.	Les éléments chauffants.	286
5.10.2.	Techniques de chauffage des coffrages, des moules et des aires. . .	287
5.10.3.	Étuvage de blocs en béton.	290
5.11.	La fusion des métaux.	291
5.11.1.	La fusion du plomb et de l'étain.	291
5.11.2.	La fusion et le maintien de bains de zinc en galvanisation.	293
6.	<i>Bibliographie.</i>	294
Chap. 4 — Le chauffage par conduction — Chauffage par passage direct du courant électrique dans le produit à chauffer.		297
1.	<i>Principe du chauffage par conduction.</i>	297
2.	<i>Caractéristiques du chauffage par conduction et constitution d'une installation.</i>	299
3.	<i>Intérêt et limitations du chauffage par conduction.</i>	300
4.	<i>Les applications du chauffage par conduction.</i>	301
4.1.	La fabrication des électrodes en graphite.	301
4.2.	La fusion du verre.	302
4.2.1.	Caractéristiques du verre fondu.	302
4.2.2.	Les fours de fusion du verre par conduction.	305
4.2.2.1.	Les électrodes.	305
4.2.2.2.	Les fours de fusion et d'appoint.	307
4.2.2.2.1.	Les fours horizontaux à électrodes horizontales.	307
4.2.2.2.2.	Les fours verticaux à électrodes horizontales.	309
4.2.2.2.3.	Les fours verticaux à électrodes verticales.	312
4.2.2.2.4.	Les fours spéciaux.	314

4.2.3.	Intérêt et limitations de la fusion du verre par conduction.....	317
4.3.	La fusion des émaux.....	318
4.4.	Les chaudières à vapeur à électrodes.....	318
4.4.1.	Constitution d'une chaudière à électrodes.....	319
4.4.2.	Les différents types de chaudières à électrodes.....	320
4.4.3.	Rendement et consommations spécifiques.....	326
4.4.4.	Domaines d'emploi des chaudières à électrodes.....	327
4.5.	Les chaudières à eau chaude à électrodes.....	327
4.6.	Les accumulateurs électriques de vapeur.....	330
4.7.	Le chauffage de tuyaux (traçage).....	331
4.7.1.	Chauffage du tuyau transportant le fluide.....	331
4.7.2.	Chauffage d'un tuyau auxiliaire de traçage.....	332
4.8.	Le chauffage du béton.....	333
4.9.	Le chauffage des métaux avant formage.....	334
4.9.1.	Conditions d'emploi du chauffage par conduction.....	335
4.9.2.	Distribution de la température et choix de la fréquence.....	336
4.9.3.	Constitution et caractéristiques d'une chauffeuse à conduction.....	337
4.9.3.1.	Les contacts d'aménée du courant.....	338
4.9.3.2.	Alimentation en énergie électrique et régulation.....	339
4.9.3.3.	Facteur de puissance et compensation de l'énergie réactive.....	340
4.9.3.4.	Temps de chauffage et production.....	341
4.9.3.5.	Consommations d'énergie et rendement.....	343
4.9.3.6.	Intérêt et limitations du chauffage par conduction.....	344
4.9.3.7.	Comparaison des chauffages par conduction et induction.....	344
4.9.4.	Applications de la conduction au chauffage avant formage.....	345
4.9.4.1.	Chauffage avant forgeage.....	345
4.9.4.1.1.	Chauffage de lopins ou de barres d'acier.....	345
4.9.4.1.2.	Refoulement sur machines électriques.....	347
4.9.4.2.	Chauffage avant laminage.....	350
4.9.4.3.	Chauffage de tubes avant étirage.....	352
4.9.4.4.	Autres applications du chauffage des métaux avant formage.....	352
4.10.	Traitements thermiques et de surface des métaux.....	353
4.10.1.	Traitements thermiques de fils.....	353
4.10.2.	Traitements thermiques ou de surface de tôles.....	353
4.10.3.	Traitements thermiques par conduction haute fréquence.....	354
4.10.3.1.	Électrodes de contact.....	354
4.10.3.2.	Localisation du courant et de l'énergie dissipée.....	355
4.10.3.3.	Application aux traitements thermiques.....	356
4.11.	Les fours à bain de sels à électrodes.....	357
4.11.1.	Fours à électrodes plongeantes.....	357
4.11.2.	Fours à électrodes submergées.....	361
4.11.2.1.	Fours à électrodes submergées métalliques.....	361
4.11.2.2.	Fours à électrodes submergées en graphite.....	362
4.11.3.	Fours à électrodes à canaux croisés.....	363
4.11.4.	Domaines d'utilisation des fours à bain de sels et intérêt.....	365
4.12.	La refusion des métaux sous laitier électroconducteur.....	366
4.12.1.	Principe.....	366
4.12.2.	Rôle du laitier.....	367
4.12.3.	Éléments de comparaison avec le four à arc sous vide à électrode consommable.....	368
4.12.4.	Domaines d'utilisation.....	368
4.12.5.	Variantes du procédé.....	368
4.12.5.1.	Refusion continue sous laitier électroconducteur avec injection de poudre.....	369
4.12.5.2.	Fabrication de pièces moulées par fusion sous laitier électroconducteur.....	370

4.12.5.3. Le soudage vertical sous laitier électroconducteur.....	371
4.13. La fusion en creuset électroconducteur.....	371
4.14. Le chauffage de bains de galvanisation par conduction.....	372
4.15. Le soudage et le brasage par conduction.....	373
5. <i>Bibliographie</i>	375
Chap. 5 – Le chauffage par rayonnement infrarouge	379
1. <i>Introduction</i>	379
2. <i>Les lois fondamentales du rayonnement infrarouge</i>	380
2.1. Domaine spectral.....	380
2.2. Émission et absorption du rayonnement.....	380
2.2.1. Émission du rayonnement.....	381
2.2.2. Absorption du rayonnement.....	382
2.3. Rayonnement du corps noir.....	385
2.3.1. Pouvoir émissif total : loi de Stefan Boltzmann.....	385
2.3.2. Répartition spectrale de l'énergie émise : lois de Planck et de Wien.....	386
2.4. Rayonnement des corps réels.....	388
2.4.1. Émissivité et puissance dissipée.....	388
2.4.2. Relation entre absorption et émission : loi de Kirchhoff.....	388
2.5. Puissance transmissible.....	390
2.5.1. Calcul de la puissance transmissible.....	390
2.5.2. Densité de puissance, comparaison avec le chauffage par convection.....	391
3. <i>Émetteurs électriques de rayonnement infrarouge</i>	392
3.1. Les émetteurs d'infrarouge court.....	393
3.1.1. Technologie.....	393
3.1.2. Propriétés.....	394
3.2. Les émetteurs d'infrarouge moyen.....	395
3.2.1. Technologie.....	395
3.2.2. Propriétés.....	398
3.3. Les émetteurs d'infrarouge long.....	399
3.3.1. Technologie.....	399
3.3.2. Propriétés.....	400
3.4. Tableau récapitulatif des caractéristiques des émetteurs de rayonnement infrarouge.....	400
4. <i>Constitution d'une installation infrarouge</i>	403
4.1. Les réflecteurs.....	403
4.2. Les panneaux radiants constitués de sources élémentaires.....	403
4.3. Les fours à rayonnement infrarouge.....	404
4.3.1. Types de fours utilisés.....	404
4.3.2. Isolation.....	405
4.3.3. Ventilation.....	406
4.3.4. Régulation.....	408
4.4. Sélection d'un équipement infrarouge.....	409
4.4.1. Choix des émetteurs.....	409
4.4.2. Puissance à installer.....	410
5. <i>Intérêt et limitations du rayonnement infrarouge dans les processus industriels</i>	412