

Electra

Les fours industriels à résistances électriques

**Conception
Choix et
Utilisation**

1-1

DOPEE 65

SOMMAIRE

Page

Chapitre 1 : Quel four, pour quel usage?	1-1
• Besoins et données de l'utilisateur	1-3
. Impératifs techniques.....	1-3
. Contraintes d'exploitation.....	1-4
• Possibilités technologiques du constructeur.....	1-5
• Four continu ou four à charge	1-7
. Généralités	1-7
. Critères de production, de fiabilité, énergétiques et technologiques	1-8
• Impératifs et choix économiques	1-9
• Types de fours et applications.....	1-11
. Domaines d'utilisation des fours.....	1-11
. Types de fours utilisés.....	1-12
• Bibliographie.....	1-15
Chapitre 2 : L'enceinte thermo-isolante d'un four	2-1
• Pertes par une paroi.....	2-3
. Calculs de base	2-3
. Ordres de grandeur des valeurs de conductivité.....	2-9
. Choix des matériaux composant une paroi.....	2-11
. Evolution des pertes en fonction de la température	2-12
. Différence de température des parois extérieures.....	2-13
. Influence de l'atmosphère du four sur la conductivité des matériaux.....	2-14
• Energie accumulée dans une paroi.....	2-15
. Problème statique.....	2-15
. Problème dynamique.....	2-16
. Hétérogénéité de conception des différentes parois d'un four.....	2-18
• Organigramme de calcul des caractéristiques thermiques d'une paroi.....	2-19

● Pertes par les ponts thermiques.....	2-23
. Généralités.....	2-23
. Ponts soudés sur la carcasse.....	2-24
. Traversées de paroi.....	2-27
● Pertes diverses.....	2-31
. Généralités.....	2-31
. Pertes par rayonnement à travers un orifice.....	2-31
. Pertes par joint de sable.....	2-31
. Pertes par ouvertures de porte.....	2-34
. Pertes par chauffage de l'atmosphère.....	2-35
. Pertes par entrée d'air.....	2-36
● Refroidissement d'un four.....	2-39
. Généralités.....	2-39
. Etat d'un four après arrêt.....	2-39
. Refroidissement accéléré.....	2-42
. Courbes de refroidissement.....	2-43

Chapitre 3 : Les échanges thermiques avec la charge 3-1

● Echanges entre four et charge.....	3-3
. Généralités.....	3-3
. Aspects pratiques.....	3-5
. Méthodologie des calculs.....	3-9
. Limitation de la méthode.....	3-22
. Développement de la méthode pour améliorer l'exploitation d'un four.....	3-24
● Refroidissement de la charge dans un four.....	3-29
. Principe de la méthode.....	3-29
. Réalisation pratique.....	3-29
● Réalisation pratique de la convection.....	3-37
. Conditions nécessaires pour obtenir une bonne convection.....	3-40
. Caractéristiques des turbines.....	3-40
. Echauffement dû à la convection, équilibre entre pertes du four et puissance de ventilation.....	3-41
. Conception générale d'une turbine de four.....	3-43
● Bibliographie.....	3-45

Chapitre 4 : Les résistances chauffantes	4-1
• Principes généraux régissant les résistances.....	4-3
. Généralités	4-3
. Taux de travail des résistances.....	4-6
• Résistances métalliques.....	4-15
. Caractéristiques générales	4-15
. Calcul des résistances métalliques classiques.....	4-18
. Mise en œuvre des résistances métalliques.....	4-28
. Connexions des résistances métalliques	4-46
. Mise en œuvre spéciale des résistances métalliques.....	4-46
. Ecrans de protection des résistances	4-47
. Tubes radiants électriques.....	4-48
• Résistances non métalliques.....	4-55
. Caractéristiques générales	4-55
. Résistances en graphite.....	4-55
. Résistances en carbure de silicium.....	4-56
. Résistances en bisiliciure de molybdène.....	4-65
. Résistances en chromite de lanthane.....	4-71
• Résistances blindées.....	4-73
. Généralités	4-73
. Emploi dans les fours.....	4-74
• Incidents sur les résistances.....	4-79
. Généralités	4-79
. Surchauffe	4-79
. Fusion localisée.....	4-80
. Corrosion des résistances.....	4-80
. Dépôt de carbone.....	4-83
• Bibliographie.....	4-85

Chapitre 5 : L'électricité dans les fours	5-1
• Règlements et normes.....	5-3
• Le langage de l'électricien.....	5-5
. La terminologie dans les différents textes.....	5-5
. Classement des installations en fonction des tensions.....	5-1
• Caractéristiques générales des installations.....	5-15
. Alimentation et structure.....	5-15
. Influences externes.....	5-22
. Degrés de protection procurés par les enveloppes de matériel.....	5-24
. Compatibilité.....	5-26
. Maintenabilité.....	5-26
• Sécurité des biens et des personnes.....	5-27
. Protection contre les chocs électriques.....	5-27
. Protection contre les effets thermiques en service normal.....	5-42
. Protection contre les surintensités.....	5-45
. Protection contre les surtensions.....	5-50
. Protection contre les baisses de tension.....	5-51
. Sectionnement et commande.....	5-51
• Choix et mise en œuvre des matériels.....	5-55
. Quel régime de neutre ?.....	5-55
. Mise à la terre - interconnexion - équipotentialité.....	5-58
. Transformateurs.....	5-61
. Appareillage.....	5-62
. Appareils de mesure.....	5-64
. Canalisations.....	5-65
. Circuits de commande.....	5-67
• L'électronique de puissance dans les fours.....	5-69
. Utilisation des gradateurs de puissance électroniques dans les fours à résistances.....	5-69
. Le facteur de puissance de l'installation.....	5-75
. La puissance réactive absorbée par l'installation.....	5-75
. Le problème des parasites.....	5-77
. Les harmoniques.....	5-78
. Le problème du flicker.....	5-80
. Conclusion.....	5-81

● Vérification et entretien des installations	5-83
. Vérifications à la mise en service.....	5-83
. Vérifications périodiques	5-84
. Vérificateurs.....	5-84
. Surveillance - entretien.....	5-85

Chapitre 6 : Modulation de la puissance, régulation de la température.....

6-1

● Remarques préliminaires	6-3
. Généralités	6-3
. Thermocouples	6-3
. Mesure de température par infrarouge	6-5
● Régulation par contacteurs et régulation continue	6-7
. Régulation par contacteurs.....	6-7
. Régulation continue	6-8
● Modulation de la puissance en régulation continue.....	6-13
. Rappel des procédés anciens.....	6-13
. Modulation par thyristors.....	6-14
● Régulation multizone	6-17
. Four continu.....	6-17
. Four discontinu	6-17
. Zone pilote.....	6-18
● Régulation programmée.....	6-19
. Généralités	6-19
. Programme four - programme charge.....	6-20
. Simulation du cycle de chauffage.....	6-20
. Cycle de refroidissement.....	6-23
● Régulation avec surindexation	6-25
● Régulation en cascade	6-27
● Bibliographie.....	6-33

Chapitre 7 : L'exploitation des fours	7-1
• Bilan thermique.....	7-3
. Généralités.....	7-3
. Principe de la méthode.....	7-3
. Erreurs courantes dans l'établissement d'un bilan thermique.....	7-8
. Bilan élargi.....	7-10
. Particularités des fours de fonderie.....	7-11
• Conduite et exploitation.....	7-15
. Généralités.....	7-15
. Détermination des conditions d'exploitation.....	7-15
. Suivi du bilan d'exploitation.....	7-17
. Suivi des conditions d'exécution.....	7-17
. Liaisons entre les services responsables.....	7-18
• Entretien.....	7-19
. Généralités.....	7-19
. Entretien de l'enceinte.....	7-21
. Entretien des résistances.....	7-22
. Entretien de la pyrométrie.....	7-23
. Entretien des cabines électriques.....	7-24
. Entretien des dispositifs de manutention interne.....	7-24
. Entretien des turbines de brassage.....	7-25
. Entretien des équipements périphériques.....	7-26
. Utilisation de la détection infrarouge.....	7-26
• Bibliographie.....	7-27

Chapitre 8 : Les fours spéciaux, les bacs de trempe..... 8-1

• Fours à creuset.....	8-3
. Généralités.....	8-3
. Fours à bain de sel.....	8-3
. Fours de maintien et de fusion des métaux.....	8-6
. Choix des résistances des fours à creuset.....	8-8
. Fours à bain de sel à électrodes.....	8-9

● Fours sous vide.....	8-11
. Généralités	8-11
. Echange de chaleur	8-12
. Pertes par les parois et inertie thermique.....	8-13
. Conception particulière et choix des résistances.....	8-15
. Refroidissement dans le four.....	8-16
. Consommation des équipements annexes.....	8-16
. Particularités de l'installation, de l'exploitation et de l'entretien.....	8-17
. Emploi des fours sous vide.....	8-18
● Bacs de trempes.....	8-19
. Généralités	8-19
. Choix des caractéristiques thermiques.....	8-20
. Détermination des caractéristiques thermiques	8-24
. Equipement électrique.....	8-36
. Sortie des pièces d'un bain de sel.....	8-37
. Traitements après trempes.....	8-38
● Bibliographie.....	8-39

Chapitre 9 : Le cahier des charges, une approche méthodique..... 9-1

● Un outil de construction de la qualité	9-3
. Le cahier des charges : première pierre et clé de voûte de la qualité.....	9-3
. Le cahier des charges fonctionnel : pour éviter les causes de conflit.....	9-4
. Préparation d'une trame.....	9-4
● Une trame de cahier des charges.....	9-5
. Méthodologie de conception.....	9-5
. Elaboration de la trame de cahier des charges.....	9-6
. Adaptation aux cas réels.....	9-7
. Un outil de dialogue	9-7
● Le cahier des charges - mode d'emploi.....	9-11
. Présentation du document trame.....	9-11
. Contenu du document trame.....	9-13
. Conclusion.....	9-15

● Le point de vue de l'ingénieur conseil.....	9-17
. Recommandations concernant l'exploitant.....	9-17
. Recommandations concernant le constructeur.....	9-18
. Essais et réception.....	9-20
. Modifications en cours d'étude et de réalisation.....	9-21
. Fourniture d'équipement et fourniture de procédé.....	9-21
. Notice d'entretien.....	9-21

Chapitre 10 : Réalisations industrielles..... 10-1

● La valeur de l'exemple.....	10-3
● Traitements thermiques.....	10-5
. Four de détensionnement de bâtis mécano-soudés.....	10-7
. Four de traitement d'acier moulé.....	10-17
. Four continu de carbonituration.....	10-33
. Electrification d'un four de recuit de fonte GS.....	10-43
. Four continu à tapis pour trempe bainitique.....	10-53
. Four de traitement thermique de pièces moulées en alliage d'aluminium.....	10-59
● Fusion et maintien en température des métaux.....	10-71
. Four de fusion et de maintien des alliages légers.....	10-71
. Four de maintien inerté à l'azote.....	10-75
. Four de maintien chauffé par thermoplougeurs.....	10-81
● Réchauffage avant forgeage.....	10-85
. Four avant estampage à chaud.....	10-85
● Cuisson des céramiques.....	10-95
. Four de cuisson de céramique sanitaire.....	10-95
. Four pour la cuisson grand feu de la porcelaine.....	10-103
● Emaillage.....	10-109
. Four d'émaillage électrique.....	10-109
● Galvanisation.....	10-119
. Four de galvanisation à chaud.....	10-119

Chapitre 11 : La profession..... 11-1

• **Le rôle essentiel des constructeurs..... 11-3**

• **Carnet d'adresses..... 11-5**

Index..... I-1