

MÉMENTO DU CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

Par R. GAUTHERET et Th. TOURNIER

Premier volume :

Applications domestiques, agricoles, commerciales et artisanales

Deuxième et troisième volumes :

Applications industrielles

III

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



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

Mémento
du
chauffage électrique

Par R. GAUTHERET et Th. TOURNIER

III

Troisième volume :
Applications industrielles (*suite et fin*)



SOMMAIRE DU MÉMENTO

	Volume	Nombre de pages	
	—	—	
Rappel des notions élémentaires d'électrothermie.. .. .	I	} 61	
Applications domestiques... .. .	I		
Applications agricoles.	I		
Applications commerciales et artisanales.. ..	I		
Applications industrielles	Electrochimie et électrométallurgie.	II	} 89
	Autres applications.	II	
		et III	III

ABRÉVIATIONS

L = longueur
l = largeur
p = profondeur
h = hauteur
e = épaisseur

P = puissance
temp. = température
cons. = consommation
én. él = énergie électrique
u = utile.



SOMMAIRE DU PRESENT VOLUME

	PAGES
Chauffage des solides (suite).	
Changement de forme	5
Métaux	5
Autres substances	15
Traitements thermiques et chimiques	16
Traitements thermiques des métaux	17
{ aciers et fontes { tremp, recuit, revenu, etc.....	24
{ cuivre et alliages	26
{ alliages de l'aluminium.....	37
{ alliages du magnésium.....	33
{ autres métaux et alliages.....	34
Traitements thermiques du verre (tremp, recuit).....	35
Traitements chimiques de diverses substances.....	37
Cuisson de la céramique.....	40
Cuisson des décors sur céramique, verre, etc.....	44
Emaillage céramique	45
Cuisson des produits alimentaires.....	47
Incinération et crémation.....	50
Grillage et calcination	51
Traitements divers et de laboratoires.....	52
Transport de calories	55
Chauffage des liquides.	
Volatilisation	56
{ eau { vaporisation	59
{ distillation	60
{ stérilisation	60
{ autres liquides.....	60
{ séchage.....	60
Maintien à l'état liquide ou pâteux.....	70
Fluidification	72
Chauffage et maintien en température	74
{ eau	75
{ huiles	76
{ liquides divers.....	76
Modification des propriétés (huiles, vernis, etc.).....	81
Transport de calories	83
Chauffage des gaz.	
Chauffage de l'air (locaux, étuves), etc.....	84

REMARQUES ESSENTIELLES

Les industriels savent parfaitement que les résultats d'exploitation qu'ils obtiennent dépendent de plusieurs facteurs dont l'influence peut être considérable.

Ils ne s'étonneront donc pas de trouver parfois dans ce mémento des nombres assez différents se rapportant au même objet. Ces nombres correspondent à des conditions de travail différentes, sur lesquelles il ne nous a pas toujours été possible de donner toutes les précisions désirables, étant donné la forme nécessairement condensée du présent ouvrage.

Pour fixer les idées, le chauffage avant trempe d'un acier d'une nuance donnée peut demander une consommation d'énergie électrique variant par ex. dans le rapport de 1 à 2, voire davantage, suivant que le traitement se fait dans un four fixe ou dans un four à passage, que le fonctionnement est continu ou discontinu, que les pièces sont petites ou de grandes dimensions, de faible poids ou de poids élevé, de forme plus ou moins complexe; dans certains cas, d'ailleurs, la récupération de calories peut encore augmenter ce rapport.

Nous nous sommes efforcés, en conséquence, de donner des valeurs moyennes et parfois des valeurs extrêmes.

On ne devra donc, dans certains cas faciles à déterminer, considérer les nombres indiqués que comme des valeurs approximatives, des ordres de grandeur ou des données comparatives permettant de « dégrossir » rapidement un problème à résoudre.

Étant donné l'importance des indications fournies, nous pensons que le lecteur pourra se faire immédiatement une idée assez précise sur le type d'appareils susceptibles de l'intéresser et sur les consommations à prévoir.

Mais il ne devra oublier en aucun cas que :

— 1^o la technique industrielle est constamment en voie d'évolution;

— 2^o les constructeurs d'appareils électrothermiques peuvent le documenter très vite pour chaque cas particulier qu'il voudra bien leur soumettre;

— 3^o la comparaison de deux bilans thermiques est insuffisante pour se faire une idée exacte de deux procédés. Ce qui importe, c'est de comparer des bilans économiques, **complets**, c'est-à-dire de tenir compte des avantages (d'ordre technique, commercial et social) et inconvénients propres à chaque procédé. L'adoption du chauffage électrique permet bien souvent de modifier intégralement l'organisation du travail et le bénéfice qui y correspond est tel que toute autre considération peut devenir illusoire.

A. FUSION

Rappel du sommaire du chapitre A du volume II.

Métaux et alliages

aciers et fontes.
 nickel et alliages Ni-Cr.
 cuivre et alliages.
 alliages de l'aluminium.
 alliages du magnésium.
 autres métaux blancs.
 métaux spéciaux.
 métaux précieux.
 soudage à l'arc.
 soudage par résistance.
 brasage.
 soudure tendre.
 découpage et métallisation.

Verre.
 Sels et mélanges de sels.
 Substances diverses.

B. CHANGEMENT DE FORME

Métaux (préchauffage ou chauffage) et substances diverses (carton, matières plastiques, etc.).

B¹. METAUX

Chauffage avant forgeage, rivetage, matriçage, laminage, étirage, tréfilage, refoulage, estampage, filage, mises en forme diverses.

Temp. inférieure à la temp. de fusion ; en principe, temp. de ramollissement (ex. : fabrication des soupapes par refoulage).

Principaux avantages du chauffage électrique : facilité et commodité du travail par emploi d'appareils spéciaux ; précision de la temp. (ex. : forgeage du duralumin ou des aciers spéciaux) ; propreté (ex. : laminage des alliages légers), facilité de manutention (intérêt par ex. pour le forgeage) ; possibilité de chauffage en atmosphère connue (ex. forgeage de l'acier en atm. d'azote ou d'ammoniaque craqué) ; précision du volume de métal chauffé (ex. : fabrication des soupapes, des têtes de boulon), possibilité de chauffer localement.

Appareils utilisés : fours ou appareils spéciaux, le plus souvent à chauffage par résistance, quelquefois par induction. Dans bien des cas, on utilise des fours analogues aux fours de traitements thermiques et en particulier aux fours de recuit dont il est question plus loin.

Cons. d'én. él. : Le tableau suivant donne le nombre de kWh : t, théoriquement nécessaire pour élever la temp. de certains métaux de l'ambiance jusqu'à une valeur déterminée. Il est traduit et complété graphiquement par la figure de la page 7.

Température °C	100	200	400	600	800	1 000
Fer. . .	17	35	70	105	153	196
Cuivre	11,5	23	46,5	70	93	116
Aluminium.	28,	55	112	169		
Zinc. . .	14,5	28	26,5			
Etain..	20	30				
Plomb.	3,5	7				

Les cons. pratiques d'én. él. dépendent évidemment des conditions pratiques de travail et des pertes thermiques des appareils de chauffage. Elles peuvent être parfois sensiblement supérieures aux valeurs précédentes.

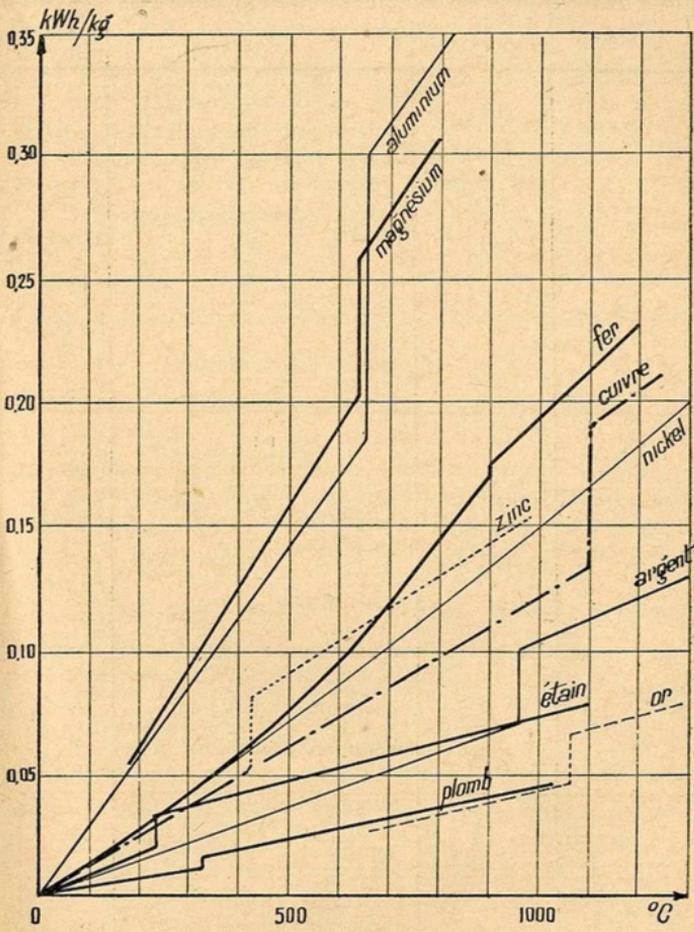
a) Aciers.

Fours, machines à chauffer, appareils spéciaux. Le plus souvent chauffage par résistance ; quelquefois, chauffage par induction.

Quelques températures usuelles :

Opération	Température en °C	Appareils de chauffage
Forgeage	850-1 250	fours
Rivetage.. . . .	900	chauffe-rivets
Refoulage (soupapes)	1 000-1 100	machines à refouler
Étirage (tubes) . .	900-1 000	machines à étirer
Réchauffage (blooms)	900-1 200	fours
Laminage... . . .	900-1 000	appareils spéciaux (1)

(1) Réchauffage des cylindres de laminoirs à une certaine température avant travail.





TEMPÉRATURES NORMALES DE FORGEAGE DES ACIERS

Division	Subdivision	Groupe	Température en °C	
	aciers d'usage général	aciers au carbone ordinaires	1 100-950	
		aciers spéciaux trempants ordinaires	1 150-850	
		aciers spéciaux auto-trempants	1 050-900	
Aciers de construction	aciers d'usages particuliers	aciers de cémentation	1 100-750	
		aciers de nitruration	variable	
		aciers inoxydables	semi-inoxydables	1 100-1000
			intachables	1 100-900
			inoxydables proprement dits	1 250-950
			réfractaires	1 250-900
			aciers à haute résistance à chaud	1 150-850
			aciers résistant à l'usure	1 000-850
			aciers à haute limite élastique	1 100-750
			aciers à aimants	1 050-650
Aciers à outils	aciers forgeables	aciers au carbone	1 100-800	
		aciers spéciaux	1 150-850	
		aciers rapides	1 200-900	

1° Fours.

Chauffage par résistance. Peu répandus.

Petits fours de forge (jusqu'à 1 300° C).

Dimensions intérieures en mm			Puissance en kW
largeur	profondeur	hauteur	
250	150	40	5
300	500	60	15
400	200	60	12

Fours importants.

Quelques indications, notamment sur des fours en service à l'étranger :

- 1) Chauffage avant forgeage. Charge horaire moyenne : 100-120 kg ; puissance : 60 kW ; travail discontinu ; cons. d'énergie : 400 kWh : t.
- 2) Chauffage avant forgeage (industrie automobile) : P = 560 kW ; cons. d'énergie : 370 kWh : t.
- 4) Chauffage avant forgeage. Charge horaire moyenne : 450 kg ; P = 300 kW ; cons. d'énergie : 550 kWh : t.
- 5) Chauffage avant forgeage (petites pièces). Capacité : 200 kg ; P = 65 kW ; cons. d'énergie : 230-300 kWh : t.
- 6) Chauffage de pièces dans un four à sole tournante : d = 6 600 mm ; production normale : 3 t : h ; P = 780 kW ; cons. d'énergie : donnée par le tableau suivant :

Production en t:h	1	1,5	2	2,5	3
Cons d'énergie en kWh:t.	380	300	270	260	255

- 7) Chauffage de lingots. Four de 900 × 1 500 × 2 400 mm ; résistance en grains de carbone disposés dans des logettes en carbure de silicium (four Bailey) ; traitement simultané de 2 lingots de 3,1 ou 3,45 t enfournés à une température superficielle de 900°C ; marche discontinue ; chauffage à 1 270°C en 2 heures ; cons. d'énergie : 80,4 kWh : t.

2° Machines à chauffer.

Trois types : chauffe-rivets, machines à chauffer (simples ou continues), machines à refouler (simples ou à recul). Chauffage par résistance.

α) Chauffe-rivets.

Avantages particuliers : simplicité et robustesse ; économie (rendement élevé, pas de rivets brûlés, piqués ou encrasés) ; rivetage supérieur (chauffage plus favorable, ni oxydation, ni piqûres) ; sécurité ; mise en route immédiate.

Admettre environ 1 kWh par 2,5 à 4 kg de rivets chauffés, soit 250-400 kWh : t.

Caractéristiques des chauffe-rivets usuels.

Nombre de têtes.	Puis. totale kW	Nombre de rivets chauffés par heure suivant les dimensions						Poids max. horaire de métal chauffé kg	
		8×25	12×35	16×60	18×60	22×80	25×80		32×180
1	6	240 *	100 *		-	-	-	-	-
1	8	250 *	150 *	90 *		-	-	-	-
1	8	260	150	90 *		-	-	-	11
2	16	520	300	180 *		-	-	-	22
2	20	520	300	200	160 *	-	-	-	27
3	30	780	450	300	240 *	-	-	-	40
2	22	520	300	200	170	90 *	-	-	30
3	33	780	450	300	255	135 *	-	-	45
2	30	-	300	200	170	120	100 *	-	45
3	45	-	450	300	255	180	150 *	-	67
2	40	-	300	200	170	130	120	40 *	60
3	60	-	450	300	255	200	180	60 *	90

Les appareils ci-dessus sont alimentés en courant monophasé, triphasé ou diphasé. Ils sont à refroidissement naturel. Dans certains cas très rares, on a recours au refroidissement par eau. Les productions marquées d'un astérisque correspondent à des fonctionnements intermittents ; les autres à une marche semi-continue (pendant 8 h. par ex.).

A titre indicatif, signalons certains appareils à 3 têtes destinés au chauffage de blocs en acier de 45 mm de diamètre et 60 mm de hauteur (P = 45 kVA par tête).

β) Machines à chauffer proprement dites.

Avantages particuliers :

Possibilité de faire des machines travaillant en atmosphère neutre (chauffage de l'acier avant matricage ; pièces blanches, brillantes, précises) ; surface non piquée ni oxydée.

Machines à chauffer simples.

Généralement : chauffe-barres destinés à traiter des pièces de matricage, de forge, et éventuellement à effectuer un traitement thermique (trempe, recuit), alimentation en courant monophasé ou triphasé.

Machines à chauffer en bout de barres pour pièces de matricage, boulons, arbres, ou pour recuit de pièces (bouts de soupape par exemple). Puissance réglable, en général de 5 à 45 kVA, pour le traitement des tiges de 6 à 20 mm de diamètre, de 20 à 100 mm de longueur chauffée, avec durée de chauffage de 5 à 20 s. Ex. : Machine pour chauffage d'extrémités de barre en atmosphère spéciale, pour matricage de très grande précision ; 40 kVA ; deux électrodes dont l'une est constituées par deux mâchoires ; barres jusqu'à 25 mm de diamètre ; atmosphère d'ammoniaque craqué ; contrôle de la temp. par cellules photoélectriques.

Machines à chauffer en milieu de barres pour barres rectangulaires devant être matricées. Ex. : Machine triphasée de 90 kVA pour production horaire de 400 à 500 pièces de 65 à 600 mm² de section, de 60 mm de longueur chauffée et de 200 mm de longueur maximum.

Machines à chauffer des cercles. Ex. : Machine de 18 kVA, pour frettes circulaires de tambour de frein, de 300-400 gr, avec durée de chauffage de 15 à 20 s.

Pinces à chauffer portatives pour chauffage d'une portion de tige.

2. Machines à chauffer continues.

Machines pour chauffage de barres en extrémité ou en milieu. Ex. : Machine monophasée de 40 kW pour production horaire de 400 pièces de 45 à 65 mm de diamètre, de 45 à 65 mm de longueur chauffée.

γ) Machines à refouler.

Avantages particuliers :

Homogénéité de la température (métal aussi chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur), donc répartition de température supérieure à celle que donne la forge.

1. — Machines simples.

(En bout ou en milieu de barres). Electrodes fixes. Ex. : pour l'acier doux, temp. de 900°C, pression de 8 à 10 kg : mm²

Machines à refouler en bout de barres. Ex. : 30 kW ; diamètre jusqu'à 20 mm pour l'acier doux et 16 mm pour l'acier spécial à soupapes ; production maximum de 2 250 kg ; longueur de refoulement maximum de 250 mm.

Machines mixtes (bout ou milieu, à volonté).



2. — Machines à recul.

Une électrode mobile par rapport à l'autre.

Machines à refouler à recul : Ex. : 35 kVA ; longueur refoulée maximum de 300 mm ; possibilité de refouler des barres jusqu'à 20 mm en acier spécial ; pression maximum de 4 200 kg.

Machines à têtes multiples, pour travaux de grande série, 3 × 30 kVA (triphases). Production horaire de 450 à 750 soupapes suivant la nature du métal.

δ) Appareils spéciaux.

Chauffage par résistance, quelquefois par induction.

1° Chauffage par résistance.

Quelques exemples :

Chauffage préalable des cylindres de laminoirs à tôles fines. Emploi d'un équipement spécial de résistances susceptible d'être disposé dans la cage du laminoir. Temp. de 150°C aux extrémités des cylindres et 270°C au milieu. Avantages principaux : répartition convenable de la chaleur dans le sens longitudinal, facilité d'obtenir des temp. assez élevées, aucune action magnétique si certaines précautions sont prises ; pas de ruptures de cylindres à craindre.

Dimensions des cylindres en mm		Puissance kW	Cons. d'én. él. en 8 h kWh
diamètre	longueur		
620 - 650	800 - 1 025	42	336
—	1 200 - 1 500	70	560
660 - 690	900 - 1 025	45	360
—	1 500 - 1 700	81	648
695 - 725	900 - 1 025	45	360
—	1 200 - 1 500	75	600
—	1 500 - 1 700	90	720
800 - 830	1 200 - 1 500	80	640
—	1 500 - 1 700	98	784

Chauffage de bandages de véhicules, de chemins de fer et de tramways.

Emploi de transformateurs spéciaux.

Puissance kVA	Diamètre des bandages mm	Durée de chauffage mm	Cos φ
25	600 à 800	20 à 25	0,65
45	1000 à 1900	25 à 40	0,67

Avantages : chauffage uniforme, propreté (pas de nettoyage ultérieur à prévoir).

Montage à chaud de grandes pièces de machines.

Fixation sur les bouts d'arbre, des demi-carasses d'un rotor de gros moteur de laminoir : dilatation obtenue par chauffage par induction à 200-220°C au moyen d'enroulements électriques, 50 kW, durée de la mise en température : 16 h par demi-carasse.

Chauffage des masselottes des lingots.

But : réduire la perte de métal que donne le creux du retrait (nickel et monel) ; on fait passer le courant directement dans la région malsaine ; cons. d'én. él. de 900 kWh : t.

2° Chauffage par induction.

Ex. : Frettage des bandages. Chauffage par induction, le bandage formant secondaire ; P = 60 kW par ex.

b) Alliages cuivreux.

En principe, fours à résistance.

Quelques températures usuelles :

Métal	Machine	Température en °C
Cuivre	presse	800-900
Laiton à cartouches (78-28)	presse	700-750
Cuivre	forge	800-900
Bronze	forge	700-800
Cuivre.	laminoir	900
Laiton à cartouches (78-28)	laminoir	750
Cupro-nickel (75-25)	forge	600-900

En principe, chauffage dans un four à atmosphère avant passage dans la machine.

Ex. : chauffage à 700°C avant filage de billettes en laiton (d = 160 mm, L = 700 mm) ; four continu à sole inclinée ; longueur chauffée : 9 mm ; puissance : 390 kW ; production : 3 200 kg : h. ; cons. d'én. él. : 112 kWh : t.

c) Alliages de l'aluminium.

Quelques températures usuelles en °C :

Métal	Laminage et forgeage			Filage opt.
	min.	opt.	max.	
Aluminium pur.	350	475	550	450
Duralumin ..	360	440	450	425
Duralinox.	360	430	450	425

En principe, chauffage (par résistance) dans un four ordinaire ou à bains de sels.

Quelques résultats industriels :

1) Chauffage avant filage de billettes en duralumin. Dimensions des billettes : $L = 400$ mm, $d = 110$ mm ; four continu à chaîne ; L chauffée : 3 700 mm ; 35 kW ; 450°C ; 150 kg : h ; 150 kWh : t.

2) Chauffage avant filage de billettes en duralumin. Dimensions des billettes : $L = 500$ mm, $d = 190$ mm ; four continu à pousseuse avec chauffage par groupe aérotherme ; 190 kW ; 900 kg : h ; 190 kWh : t.

3) Chauffage avant filage de lingots d'aluminium et de magnésium. Dimensions des rondins : $L = 600$ mm, $d = 210$ mm ; four continu à pousseuse, avec ventilation forcée ; dimensions intérieures du four : L chauffée = 6 400 mm, $lu = 1 800$ mm, $hu = 2 000$ mm ; 480 kW ; charge de 9 t ; mise en temp. à 500° C en 4 h.

4) Chauffage avant matriçage de petits lopins en duralumin pour robinetterie. Four à plateau tournant avec ventilation ; diam. du plateau : 250 mm, hauteur utile : 150 mm ; 9 kW ; 440°C ; 20 kg : h ; 250 kWh : t.

d) Alliages du magnésium.

Températures usuelles pour laminage, forgeage, matriçage, filage :
de 300 à 450 °C

Fours à convection forcée (précision de temp.).

Ex. : chauffage avant filage de billettes de magnésium. Dimensions des billettes : $L = 550$ mm, $d = 150$ mm ; four continu à pousseuse ; 100 kW ; 420°C ; 500 kg : h. ; 180 kWh : t.

e) Autres métaux et alliages.

Métal	Température en °C	
	forgeage	laminage
Nickel	1 200	—
Monel (60 o/o Ni)	600-900	—
Zinc.. .. .	—	100-150
Platine iridié.	—	600-800

En principe, chauffage dans un four à résistances.

B². AUTRES SUBSTANCES

Le plus souvent, chauffage pour mise en forme de matières plastiques : carton, caoutchouc, produits nécessitant généralement une modification chimique corrélative au chauffage (bakélite, résine synthétique, etc.) ou pour marquage sur certaines substances (bois, cuir, etc.).

Principaux avantages du chauffage él. : variété des appareils ; simplicité ; commodité d'emploi ; précision, réglage facile et automatique de la temp. pour certains appareils.

Principaux appareils : presses ; étuves ; tables, plaques, cylindres et manchons chauffants.

Temp. usuelle ne dépassant généralement pas 200°C.

La cons. d'énergie él. rapportée à un poids donné ou à l'objet est souvent difficile à déterminer, étant donné les conditions habituelles de travail. La connaissance de cette cons. est d'ailleurs secondaire dans bien des cas.

En général, *chauffage par résistance* ; exceptionnellement, *chauffage par induction* (ex. pour certaines presses de matières plastiques).

Cas particulier du bombage de verre par ramolissement (650-700°C).

Tables chauffantes pour matières plastiques.

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Puissance (W)
300	300	1 200
600	300	2 000
1 000	500	3 000

Presses : voir pages 38 et 39.

Étuves : voir page 39.

C. TRAITEMENTS THERMIQUES ET CHIMIQUES; CUISSONS

C¹. TRAITEMENTS THERMIQUES DES METAUX ET DE LEURS ALLIAGES

Par le nombre des appareils en service, c'est la principale application du chauffage électrique industriel : fours à résistance et aussi fours à induction BF et chauffage par induction HF

Principaux avantages : uniformité de la température dans l'espace utile ; constance de la température dans le temps ; réglage certain et automatique de la température ; indépendance de la température et de l'atmosphère, choix de l'atmosphère (tableau de la page 17) ; robustesse, simplicité et facilité de l'installation et de la conduite ; éventuellement, marche automatique et sûre ; excellent rendement thermique. En conséquence : avantages *techniques* (qualité, rebuts moindres ou nuls), *économiques* (qualité supérieure et constante) et *sociaux* (moindre fatigue, hygiène, sécurité).

Cons. d'énergie. — En première et très grossière approximation, on peut adopter les cons. d'énergie él. du tableau ci-dessous pour les traitements les plus courants. Mais il importe de souligner que les cons. réelles sont très variables. Elles dépendent notamment des caractéristiques des pièces traitées et des fours utilisés et des conditions de travail.

Se reporter également au tableau de la page 6 et à la fig. de la page 7.

Nature du traitement	Métal	Cons. en kWh : t
Recuit... ..	aciers	140-250
Trempe jusqu'à 1 000° C	aciers	250
Revenu.. ..	aciers	150
Recuit... ..	laitons	110-130
Trempe et recuit.	alliages légers	200-240

Atmosphère des fours.

Nature des atmosphères spéciales les plus fréquemment utilisées
dans les fours de traitement thermique des métaux

Hydrogène.

Azote.

Amoniaque craqué (H + Az).

Gaz de ville ou d'hydrocarbures (butane, propane, etc.).

Gaz riche de gazogène.

Gaz naturel.

Gaz partiellement brûlés (gaz de ville, gaz de gazogène, gaz provenant de gas-oil).

Vapeur d'eau.

Vapeurs d'alcool méthylique.

a) Alliages ferreux.

1° Trempe, recuit, revenu, etc.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs usuelles des temp. par les traitements les plus courants.

Il est complété par le tableau de la page 18.

Chauffage par résistance ou parfois par induction.

Chauffage par résistance.

Fours à résistances de tous types, de toutes dimensions et de toutes puissances, à résistances métalliques en nickel-chrome jusqu'à 950-1 050°C, en alliage fer-chrome-aluminium jusque vers 1 250-1 300°C, en carbure de silicium de 1 000 à 1 400°C ; fours à atmosphère naturelle ou spéciale, à convection naturelle ou forcée ou fours à bains de métaux ou de sels pour le chauffage avant trempe, le recuit ou le revenu ; bains de trempe (métaux fondus, huile, eau, etc.) éventuellement chauffés. Pour les bains, voir volume II, pages 82 à 86.

Les tableaux des pages 19 et 22 donnent les caractéristiques moyennes de fours courants : fours à chambre à sole horizontale et fours verticaux pour traitements jusqu'à 1 000°C, forces pour traitements jusqu'à 1 350°C.

Les tableaux des pages 20, 21 et 23, donnent, à titre indicatif, quelques résultats d'exploitation industriels qui englobent des cas fréquents.

Températures usuelles de traitement thermique des aciers.

Traitement	Température
Recuit... ..	en général = 650-900 °C
Chauffage avant trempe.	en général = 800-900 °C pour les aciers courants.
Chauffage avant hyper-trempe.....	en général = 1 250-1 350 °C pour les aciers rapides et 1050-1100° C pour les aciers austénitiques.
Revenu... ..	en général = 200-400°C ou 580-750°C.

TEMPÉRATURES USUELLES (°C)
DE TRAITEMENT DES ACIERS

Division	Sub-division	Groupe	Recuit	Trempe ou hyper-trempe	Revenu	
Aciers de construction	aciers d'usage général	aciers au carbone ordinaires	900	780-910	200-600	
		aciers spéciaux trempants ordinaires	800	800-900	200-650	
		aciers spéciaux auto-trempants	800-675	780-900	400-550	
	aciers d'usages particuliers	aciers de cémentation	800-850	900-925 780-800		
		aciers de nitruration	500-550	850-1 150	500-750	
		aciers inoxydables	semi-inoxydables ...	850-950	900	400-600
				600-700		
			intouchables	900-950	950-975	400-800
				750-850		
		inoxydables	inoxydables proprement dits	600-950	1 100-1 150 1 000	700-780
			réfractaires		900-1 250	
		aciers à haute résistance à chaud	850-900	825-1 000	600-750	
		aciers résistant à l'usure ..	760	825-1 000 1 000-1 100	175-500	
		aciers à haute limite élastique	800-900	800-900	200-700	
		aciers à propriétés magnétiques spéciales	amagnétique	à haute perméabilité et haute hystérésis à aimants ..	900-1 150	
800						
650-500 1 150-1 200	800-980				650-750	
Aciers à outils	aciers forgeables	aciers au carbone	700-820	740-840	jusqu'à 650 (200-300 en général) 100-650	
		aciers spéciaux	700-1 200	750-1 050		
		aciers rapides	780-900	pré chauff. 600-875 chauffage 900-1 350	jusqu'à 620	
	aciers et alliages inforgeables	aciers inforgeables	780	920-1 000		Quelquefois 3 opérations: trempe, recuit, trempe.

Fours pour le traitement des aciers jusqu'à 1 000 °C.

Fours à chambre à sole horizontale :

Dimensions utiles en mm			Puissance nominale en kW	Durée de mise en tempér. (800°C) en part. du four vide, en h.		Puissance d'entretien à 800°C (four sec ; port. ferm.) en kW
largeur	hauteur	prof.		froid	tiède (après 12 h. d'arrêt)	
200	150	380	5	2	1	1,5
300	200	550	9	3 1/2	1 1/2	2,5
450	250	930	20	3 1/2	1 1/2	6,5
600	300	1 030	27	3 1/2	1 1/2	8
800	500	1 250	46	3 1/2	1 1/2	11
1 000	500	1 600	72	4	2	14
900	650	2 200	100	4 1/2	2	22
1 000	600	2 930	130	4 1/2	2	30
600	400	7 500	270	6	2	43

Fours cylindriques verticaux :

Dimensions utiles en mm		Puissance nominale en kW	Durée de mise en tempér. (800°C) en part. du four vide, en h.		Puissance d'entretien à 800°C (four sec et fermé) en kW
diamètre	hauteur		froid	tiède apr. 12 h. d'arrêt)	
350	550	9	3 1/2	1 1/2	3
450	1 200	26	3	1 1/2	6,5
800	1 150	42	7	2	15
1 050	1 600	90	5	2	19
700	4 300	160	7	2	33
1 000	7 500	420	4	1 1/2	62
1 100	6 000	350	4	1 1/2	50
1 650	5 800	400	5	2	62
1 200	8 540	500	4	1 1/2	90

Résultats industriels de fours de traitements thermiques d'acier.

Genre de pièces	Nature du traitement	Temp. °C	Cons. d'énergie, kWh : t	Observations
Pièces de fonderie pour automobile ; poids max. 50 kg	Recuit-chauffage à cœur et refroidissement à l'air.	950	550	Four à sole sortante : 520 kW ; 1 200 × 800 × 7 000 mm.
Pièces d'automobiles.	Trempe	850	300	Four tunnels 100 kW ; L = 2000 mm, l _u = 915 mm, h _u = 600 mm ; charge moyenne : 225 — 300 kg : h pour la trempe, 300 kg : h pour le revenu.
Vilebrequins d'automobiles.	Revenu. Trempe.	650 870	290	Four double à soles horizontales ; 600 kW ; trempe : 10 550 × 940 × 1 370 mm ; revenu : 9150 × 940 × 710 mm ; production : 150 pièces : h
Essieux d'automobiles.	Revenu.	425	120	Four continu ; 150 kW ; dim. int. : 5 410 × 1 370 × 500 mm ; production : 900 kg : h.
Engrenages.	Trempe.	840	240	Four continu à transporteur par chaîne ; dim. ext. : 5 050 × 1 600 × 3 360 mm ; 90 kW ; production moyenne : 225 kg : h.
Pièces d'automobiles.	Trempe.	850	{ 200-250 (1) 350 (2)	Four à sole tournante de 150 kW ; d _e = 4 000 mm ; d (moyen — sole) = 1 700 mm ; l. (sole) = 700 mm.
Pièces diverses : d. de 5 à 300 mm	Revenu. Trempe et revenu.	600 900-950	{ 150 (1) 275 (2)	Four à tablier mobile ; 50 kW.
Pièces encombrantes.	Trempe.	850	200-210 400	Four à sole tournante ; 200 kW ; h = 2 300 mm d = 4 800 mm, d (moyen sole) = 2 600 mm l. (sole) = 480 mm, (empilages) = 400 mm

(1) Pièces placées directement sur la sole.

(2) Pièces placées dans les plateaux.

Genre de pièces	Nature du Traitement	Temp. °C	Cons d'én.él. kWh : t	Observations
Barres en acier rapide ; L. max. : 5 500 mm	Recuit.	900	400 (départ four froid)	Four à sole horizontale à chariot ; 200 kW ; 700×900×5 500 mm. ; charge : 5 t.
Barres en acier spécial.	Recuit.	850	300	Four à sole sortante ; 210 kW ; 930×520×5 600 mm ; charge : 2,8 t.
Barres	Recuit.	600-700	280	Four à auge ; 180 kW ; L : 7 000 mm ; charge : 4 t.
Feuillard ; l : 1 000 mm ; ép. moyenne : 0,6 mm	Recuit brillant. Normalisation brillante.	850 925	140	Four tunnel moderne avec récupération de chaleur ; atm. contrôlée ; 300 kW ; long. chauffée : 10 000 mm ; long. totale : 50 000 mm ; production : 2,2 t : h.
Feuillard ; l : 275 mm, ép. : c, 1 à 2 mm.	Trempe brillante.	850	250	Four tunnel ; atm. contrôlée ; 50 kW ; production : 2,50 kg : h.
Fil en couronne	Recuit.	675	167 (par tonne brute) 368 (par tonne nette)	Four à marmites avec atmosphère de gaz d'éclairage ; 30 et 60 kW charges moyennes de 650 kg (poids net du fil) ou 1 400 kg (poids brut : fil + marmite + supports du fil.)
Tubes.	Normalisation.	925	265	Four à passage ; 100 kW ; 5 400 × 100 mm ; production : 300 kg : h.
Bandages de roues de wagons.	Trempe et revenu.	{ 850 { 500	180 90	Four à socles de 200 kW ; d utile = 1 500 mm ; production : 58 t : 24 h.
Bandages de roues de locomotives	Trempe. Revenu.	{ 850 { 500	350	Four à socle ; 270 kW ; d utile = 2 300 mm ; production : 14 t : 24 h.

Fours pour la trempe des aciers rapides.

Fours à une chambre à sole horizontale (1 350°C max.).

Dimensions utiles en mm			Puissance nominale, en kW	Durée de mise en temp. en partant du f. vide et fro°, en h. et m.	Durée de remontée en temp. après 12 h. d'arrêt, en h.	Puissance de maintien à 1 200° C porte fermée, en kW
long.	larg.	haut.				
200	150	100	7	3	1 1/2	3,3
250	150	100	8	3	1 1/2	4
300	150	150	9	3	1 1/2	4,5
300	250	150	13	2 1/2	1 1/4	3
350	250	150	14	2 1/2	1 1/4	5,5
400	250	180	18	2 1/2	1 1/4	6,5

Fours à double chambre à sole horizontale (1 350°C max.).

Dimensions utiles en mm			Puissance nominale, en kW	Durée de mise en temp. en partant du f. vide et fro°, en h. et m.	Durée de remontée en temps après 12 h. d'arrêt, en h.	Puissance de maintien en temp., porte fermée, en kW
long.	larg.	haut.				
<i>Chambre de préchauffage (800° C), résistances métalliques.</i>						
200	150	150	2	2	1 3/4	1,5
250	150	150	4	2	1 3/4	2
300	200	150	5	2	1 3/4	3
400	250	150	6	2	1 3/4	3,5
400	250	180	8	2	1 3/4	5
<i>Chambre de chauffage (1 200° C), résistances non métalliques.</i>						
200	150	80	6	3	1 3/4	3
250	150	100	8	3	1 3/4	3
300	150	150	8	3	1 3/4	4
300	250	150	10	3	1 3/4	5
400	250	180	12	3	1 3/4	7

Autres fours à deux chambres.

Dimensions utiles en mm						Puissance en kW
Chambre de préchauffage (800°-900° C)			Chambre de chauffage (1 400° C max.)			
hauteur	largeur	profondeur	hauteur	largeur	profondeur	
80	150	150	80	100	150	9
170	230	440	150	200	400	18
180	350	500	150	320	420	38

Autres résultats industriels de fours de traitements thermiques d'acier :

Traitement	Temp. (°C)	Cons. d'én. él. (kWh:t)
Recuit de fils et feuillards en marmites avec atm. spécial. Fours de 80 à 90 kW.. ..	800-850 660	220 180
Recuit de feuillards; four de 90 kW; 1,7 t	660	180
Recuit de barres. Four à auge de 180 kW. Capacité de 4 t..	600-700	280
Recuit de barres. Four-tunnel à chariot de 200 kW Capacité de 5-10 t. ..	800	250-300
Recuit de barres; four de 180 kW	600-700	280
Recuit de barres; four à chariot de 200 kW: 5-10 t ..	800	250-300
Recuit de lingots; four à chariot; capacité de 20 t	800	250
Recuit de lingots; four de 350 kW; 20 t. ..	850	250
Recuit en atm. spéciale; four de 110 kW..	650	186-225
Normalisation des tôles; four continu..	925	235
Trempe de pièces d'automobiles de poids variable; four à poussoir de 180 kW; traitement de 825 kg:h ..	675	233

Cas particuliers

1) Soudure des fils métalliques (notamment des fils d'acier), suivie d'un recuit, au moyen d'une machine à souder par rapprochement dont le secondaire alimente deux séries de mâchoires, l'une pour la soudure, l'autre pour le chauffage de la partie soudée par passage direct du courant.

2) Suppression des contraintes internes développées dans les conduites forcées, au cours de la soudure : chauffage au moyen d'une résistance convenablement calorifugée. Ex : éléments de 14 kW ; 530°C, 28 kWh par mètre de conduite.

3) Bleuissage des faux : 270°C. Traitement dans un four-étuve.

Chauffage par induction.

Chauffage par induction à très haute fréquence et éventuellement à haute fréquence.

Chauffage à très haute fréquence.

Principaux avantages : chauffage localisé, donc moindre consommation ; rapidité ; possibilité de graduer la temp. de la surface vers l'intérieur des pièces ; moindre déformation des pièces ; pas de surchauffe superficielle ; en somme homogénéité, constance, rapidité, qualité.

Emploi pour la trempe superficielle des pignons d'engrenage, cames, portées de vilebrequins, roues de wagons, rails, axes, arbres à cames, soupapes, etc.

a) Procédé Tocco : Chauffage réalisé au moyen d'un solénoïde en cuivre, refroidissement par circulation d'eau.

Puissance de l'ordre de 1 kW par cm² de la surface à traiter, la profondeur de trempe étant alors de 0,5 à 3 mm suivant la fréquence, en quelques secondes.

Ex. : 1) Arbres à cames : 820°C, 100 kW, 2 000 pps.
2) Vilebrequins : 216 kVA, 2 250 pps 30 pièces à l'heure, 4 à 8 kWh par vilebrequins. 3) Pièces de 50 cm² de surface : 135 kW, soit 2,7 kW : cm², profondeur de trempe de 44,5 mm en 4 sec., 0,003 kWh : cm².

b) Procédé STEL-SFR : Puissance (côté HF) des appareils jusqu'à 300 kW.

Quelques ex. : rotules de direction d'auto. (d = 31 mm ; 90 kW ; 5 sec. ; e = 0,96 à 0,99), croisillons de cardan (70 kW ; 1 sec. ; e = 1,5 à 0,8 mm), culbuteurs (45 kW ; 2 sec. ; e = 1 mm), couronnes de démarreur (30 kW ; 4 sec. ; e max. 3 mm).

Chauffage à haute fréquence.

Ex. : trempe de lames de rasoir : 670-820°C, 4 800 pps, 41,7 kg : h.

2° Cémentation et procédés analogues de modification de l'état de surface.

Fours à résistance du même modèle que ceux qui sont utilisés pour la trempe à une temp. maximum de 1 000°C :

à chambre à sole horizontale pour la cémentation proprement dite (cément solide ou cémentation gazeuse) et la shérardisation ;

à creuset à bain de cyanure pour la cyanuration (cémentation liquide) ; voir volume II, page 84.

Quelques résultats pour les ciments solides :

Nature du traitement	Temp. °C	Genre de pièces	Caractéristiques du four	Marche	Cons. d'en. él. kWh par t. de pièces (1)
Cémentation en caisses avec ciment granulé (durée: 15 h.)	930	Pièces de moteurs d'avion (arbres à cames, pignons, etc.)	Four à sole horizontale; 1 000 × 900 × 2 400 mm; 100 kW	Discontinue	1 500
Cémentation en caisses avec ciment solide (durée: 7 h.)	900	Pièces de vélos et motos	Four à sole horizontale; 680 × 450 × 1 600 mm; 60 kW	Discontinue	1 000
Cémentation en caisses avec ciment solide (durée: 24 h.)	925	Pièces d'automobiles	Four à 2 tunnels; L = 13 000 mm, l = 500 mm (pour chaque tunnel); 130 kW	Continue ou discontinue	830-900
Shérardisat sm en caisses avec ciment solide (durée: 50 mn)	400	Soupapes de moteurs d'automobiles	Fours à cylindre tournant; L = 1 400 mm, l = 280 mm, h = 300 mm; 15 kW	Discontinue	1 100
Cémentation en caisses avec ciment solide (durée: 9 h.)	950	Pièces d'automobiles	Fours-tunnels: L = 2 000, l _u = 715 mm; h = 600 mm; 100 kW; charge moy. utile: 450 kg (s ^m 50 kg; h); charge tot.: 690 kg	Discontinue	1 000
Cémentation gazeuse suivie de trempe (durée: 1 h. 1/2)	830 × 860	Douilles et axes de chaînes	Four à cornue rot. hélicoïdale, à axe horizont.; Cornue: d = 250 mm, L = 1 000 mm; 42 kW	Continue	1 250
Nitruration (durée: 75 h.)	520-535	Pièces d'automobiles	Fours à cuve; L _u = 2 300 mm, l _u = 1 500 mm, h _u = 700 mm; 43 kW; cuves de L = 1 600 mm; l = 1 200 mm, h = 400 mm; charge utile: 500 kg; h	Discontinue	200

(1) Défalcation faite des boîtes et du ciment.

b) Alliages cuivreux.

Le tableau suivant donne les valeurs usuelles des températures de traitement.

Métal ou alliage	Traitement	Temp. en °C	
Cuivre	recuit.	400-700	
Laitons ordinaires. . .	recuit.	400-600 (1)	
Bronzes	recuit.	700-800	
Bronze d'aluminium.	trempe.	850-875	
Bronze d'aluminium. . .	vieillessement.	env. 350	
Bronze au glucinium..	trempe.	800-850	
Bronze au glucinium.. . . .	vieillessement.	env. 350	
Cupro-nickel (75/25).... .	recuit.	env. 650	
Maillechorts	8-12 p. 100 Ni	recuit.	700-750
	15-22 p. 100 Ni	recuit.	750-800
	22-30 p. 100 Ni	recuit.	800-850
	> 30 p. 100 Ni	recuit.	900 max.

Tendance actuelle à traiter à basse température pour éviter ou limiter le départ de zinc (recuit blanc).

Fours à résistances de tous types, de toutes dimensions et de toutes puissances, à atmosphère naturelle ou spéciale. Se reporter aux tableaux précédents des fours de traitement des aciers et également au deuxième tableau de la page 31.

Egalement fours à induction dans certains cas.

Chauffage par résistance.

Les tableaux des pages 27 et 28-29 donnent quelques indications sur les cons. d'én. él. que l'on rencontre fréquemment dans l'industrie.

D'autres résultats sont donnés dans le tableau de la page suivante.

Chauffage par induction.

A titre d'exemple, citons le cas du recuit des étuis de cartouches :

1) Fours tournants à rampe hélicoïdale. Ex. : diamètre de 450 mm, longueur de 5 000 mm ; production de 700 kg à l'heure ; puissance de 120 kW.

2) Machines rotatives à recuire comportant plusieurs fours à induction, le secondaire étant constitué par la partie à traiter : $f = 1\ 000$ pps.

Ex. : premier recuit partiel par une machine à 6 fours, vitesse de rotation de 15 t : mn ; production horaire de 5 400 étuis, puissance de 1,65 kW, $\cos. \varphi = 0,58$;

deuxième recuit partiel par une machine à 5 fours, vitesse de rotation de 18 t : mn, production horaire de 5 400 étuis, puissance de 1,10 kW, $\cos. \varphi = 0,40$.

Traitement	Temp. en °C	Cons d'én. él. kWh:t
Recuit de cuivre rouge..	850	130
Recuit de fils de cuivre.	600	100
Recuit blanc de cuivre..	600	100-120
Recuit blanc de cuivre..	800	140
Recuit de laiton.	650-750	100
Recuit de laiton.. ..	650	125
Recuit de feuillards et fils de laiton	800	140
Recuit de bandes et de rouleaux de laiton.. ..	650-700	162

c) Alliages de l'aluminium.

Ces alliages sont fréquemment dénommés « alliages légers ».

Valeurs usuelles des températures.

Traitement (1)	Temp. en °C
Recuit.....	350-450
Chauffage avant { pièces de forge..	450-540
trempe { pièces de fonderie.	400-540
Revenu.. ..	150-200

(1) Pour mémoire, signalons aussi la maturation (vieillessement du duralumin et de l'alumasilium, soit à froid, soit à chaud, par ex. dans l'eau bouillante à 100° C).

Fours utilisés.

Fours à résistances à convection naturelle et de plus en plus à convection forcée (afin d'obtenir une température rigoureuse et égale en tout point et constante) pour les alliages légers et fours à bains de sels (voir volume II, page 83 et 85).

Les tableaux des pages 30 et 31 donnent des indications sur certains types de fours à atmosphère fréquemment utilisés.

Résultats Industriels de fours de traitements thermique d'alliages cuivreux.

Genre de pièces	Nature du traitement	Temp. °C	Cons. d'énergie. kW/h : t	Observations
Feuillard de laiton enroulé; d: 700 mm; h: 500 mm.	Recuit	570	155	Four à sole horizontale, à circulation méthodique de l'air; 190 kW; 1,400 × 700 × 650 mm; charge: 8 t.
Feuillards et fils de laiton	Recuit blanc	800	140	Four à marmites; 120 kW; charge: 0,8 t.
Bandes de laiton; l: 720 mm. max.; ép.: 0,1 à 1,3 mm.	Recuit, décapage et séchage	650	120	Four de recuit de 90 kW, L = 10000 mm; l = 850 mm; décapage: 30 kW; séchage 15 kW.
Bandes de laiton	Recuit	650-700 750	115-120 135	Four à sole: 200 kW; L = 4000 mm, l = 1000 mm, h, 700 mm; charge: 2 - 4 t.
Bandes à cartouches de 5,2 et 4 mm.	Recuit	650	115	Même four que le premier; charge: 7,4 t.
Bandes de cartouches	Recuit	630	100	Four à sole; 17 kW; L = 1140 mm; l = 500 mm; h = 200 mm.

Genre de pièces	Nature du traitement	Temp. °C	Cons. d'én. él. kWh : t	Observations
Bandes de cartouches (*) et planches (**)	Recuit ₂	600	110-110 (*) 140 (**)	Four à sole mobile (chariot) ; 94 kW ; L = 2 200 mm, l = 750 mm, h = 500 mm ; charge : 1,4 — 2 t.
Planches et bandes de laiton	Recuit	600	140-150	Four à sole mobile (chariot) ; 90 kW ; L = 3 100 mm, l = 1 100 mm, h = 500 mm ; charge : 1,35 t.
Tubes de laiton	Revenu	300	80	Four à sole mobile (chariot) ; 80 kW ; L = 7 300 mm ; charge : 1 t.
Tubes de cuivre (*) laiton (**) et cupro-nickel (**)	Recuit	5 ⁵⁰ (*) 600-650 (**) 700-750 (***)	130-150 (**) 1.0-1.0 (***)	Four à sole mobile (chariot) ; 280 kW ; L = 7 500 mm, l = 1 800 mm, h = 750 mm ; charge : 3 t.
Couverts en maillechort	Recuit brillant	750	190	Four continu à tablier à atmosphère contrôlée ; 17 kW ; L = 1 000 mm ; production : 70 kg : h ; four utilisé aussi pour le brasage.
Couverts en maillechort	Recuit brillant	750	190	Four continu à tablier à atmosphère contrôlée ; 75 kW ; L. chauffée = 3 800 mm ; production : 300 kg : h.



Cons. d'én. él.

Le tableau de la page 32 donne, à titre indicatif, quelques résultats d'exploitation.

Fours à convection naturelle pour le traitement des alliages légers.

Fours à chambre à sole horizontale (alliages légers et ultra-légers) :

Dimensions utiles en mm			Puis- sance nominale kW	Durée de mise en température (500° C) en partant du four vide et froid, en h	Puis- sance d'entret. à 500° C (four sec et fermé) en kW
largeur	hauteur	profond.			
400	400	400	9	3	4,5
400	400	1 000	20	3	10
600	600	1 500	32	3	16
600	600	2 000	38	3	19
500	500	1 200	24	3	12
800	800	1 600	40	3 ½	20
800	800	5 000	60	3 ½	30
800	800	7 000	80	3 ½	40
1 000	1 000	2 000	48	3 ½	24
1 200	1 200	2 400	60	4	30
1 200	1 200	3 000	75	4	37
1 250	600	3 000	60	4	30
1 750	1 180	2 400	80	4	40
2 250	1 700	3 400	120	4	60

Autres fours à chambre à sole horizontale :

Dimensions utiles en mm.			Puis- sance nominale kW	Durée de mise en tempé- rat. (500° C) en partant du four vide et froid h	Puis- sance d'entr. à 500° C four sec et fermé kW
largeur	hauteur	profon- deur			
300	300	700	7	2	1,8
500	500	900	12	2 1/2	4,5
800	450	1 500	28	2 1/2	7
1 200	500	2 300	50	3	12
1 500	1 000	3 000	90	3	18
1 500	600	3 200	120	3	17
1 400	700	6 500	190	3	38

Fours à convection forcée pour le traitement des alliages légers.

Fours cylindriques verticaux à convection forcée :

Dimens. utiles en mm.		Puissance nominale en kW	Durée de mise en temp. en partant du four vide et froid, en h	Puissance d'ent. (four sec et fermé) en kW
diamètre	hauteur			
260	268	7	3	3,5
255	160	8	3	4
300	400	12,5	3 1/2	6
400	300	12,5	3 1/2	6
400	450	18	3 1/2	9
500	600	24	3 1/2	12
800	1 000	50	4	25
980	900	80	4	40

Fours verticaux à paniers amovibles et à circulation d'air forcée. (Recuit de lait et revenu d'alliages légers) :

Dimensions intérieures en mm.				Puissance en kW			
chamb. de chauffe		panier amovible		nominale (mise en temp.)		maintien en températ.	
dia- mètre	profon- deur	dia- mètre	profon- deur	700° C	500° C	400° C	250° C
300	300	250	150	7,2	1,15	3,6	0,35
375	375	325	225	9,6	1,25	4,8	0,40
450	450	400	300	12,5	1,57	6,25	0,49
525	525	475	375	15,3	1,65	7,65	0,51
600	600	550	450	19,7	1,98	9,85	0,61
675	675	625	500	24	2,09	12	0,65
750	750	700	550	28	2,49	14	0,78
825	825	775	625	33	2,49	16,5	0,78
900	900	850	700	38	2,86	19	0,87

Fours basculants à convection forcée (Trempe des profils en alliages légers à 520°C max.) :

Dimensions utiles en mm		Longueur chauffée en mm	Puissance nominale en kW
longueur	diamètre		
2 500	400	2 900	25
5 500	350	5 900	40
5 750	500	6 400	42
6 500	350	6 900	45
6 500	400	6 900	54
8 000	450	8 400	65
8 000	650	8 700	93

N. B. — 1) Ex. : montée en temp. en 2 h. 25 mn à 490 °C en partant du four (60 kW) froid et chargé, en 1 h. 30 mn en partant du four chaud, après 12 h. d'arrêt.
2) Cons. de 550 kWh : t pour des charges de 10 à 30 kg ; de 330 kWh : t pour 50 à 100 kg ; de 300 kWh : t pour 100 à 150 kg ; pour 480-490 °C.

Résultats industriels de fours de traitement thermique d'alliages légers.

Genre de pièces	Nature du traitement	Temp. °C	Cons. d'énergie kWh : t	Observations
Profilsés en durallumin.	Trempe.	490	300 (1)	Four basculant à circulation méthodique de l'air ; 45 kW ; L = 8 000 mm ; dext. = 1 000 mm ; charges : de 110 à 150 kg.
Barres et profilés en durallumin.	Trempe.	500	180	Four cylindrique basculant ; L = 7 600 mm, d = 500 mm ; 65 kW ; production : 350 kg : h.
Planches de 2 000 x 1 000 mm ép. : 2 mm	Recuit final.	400	140	Four-tunnel ; L chauffée : 300 mm ; 120 kW ; production : 700 kg : h.
Plateaux en durallumin.	Recuit.	400	160	Four continu à chaîne ; L = 8 000 mm ; 100 kW production : 500 kg : h.
Feuillards en rouleaux, en avial	Recuit.	400	120	Four à sole horizontale, à circulation méthodique de l'air ; 190 kW ; 1 400 x 700 x 6 500 mm ; charge : 1,5 t.
Fils d'aluminium en boîtes.	Recuit.	500	180	Four vertical à élévateur ; d = 1 200 mm, h = 2 200 mm ; 80 kW ; production : 250 kg : h.
Culasses de moteurs en alpez.	Trempe.	540	175	Four continu à chaîne ; L = 4 000 mm ; 70 kW ; production : 400 kg : h.
Culasses et carters de moteurs en avial.	Recuit.	400	180	Four à plateau tournant ; d = 1 400 mm ; 18 kW ; production : 70 kg : h.
Papier d'aluminium.	Recuit.	525	350	Four à sole horizontale ; traitement en caisses sous graphite ; L = 2 600 mm, l = 1 800 mm, h = 2 000 mm ; 120 kW ; production : 110 kg : h.

(1) Cons. moyen pour des charges de 135 kg. de profilés de 5 mm d'ép. demandant un chauffage assez long (3 h pour l'égalisation de la temp. dans toute la masse du métal), compte tenu des pertes thermiques au moment du chargement.



d) Alliages du magnésium.

Ces alliages sont fréquemment dénommés « alliages ultra-légers ».

Températures usuelles de traitement (pièces de fonderie)

Nature du traitement	Temp. en °C	Durée en h (2)
Recuit.....	300	2 à 4
Homogénéisation...	350-405 (1)	24 à 72
Revenu...	120-180 (1)	de 20 à quelques centaines

(1) Valeurs extrêmes. (2) ordre de grandeur.

Le tableau suivant donne la valeur des températures usuelles pour les alliages faisant généralement l'objet de traitements thermiques.

Alliage	Traitement	Temp. en °C	Durée en h	
FT	homogénéisation (suivie d'une trempe à l'air)	atmosph. ordinaire	max. 380	72 8 10 6 } total : 24
		atmosph. inerte	390	
		(SO ² ou CO ²)	400 410	
	revenu (1)		min. 120 max. 145	
FI	homogénéisation (2) en atm. inerte (SO ²) (suivie d'une trempe à l'air ou à l'eau)	chauffage progressif de	350 à 405	
		revenu (2)		165

(1) Peu usité (2) Cas particuliers

Principaux avantages des fours électriques : précision de la temp. et facilité de réaliser des paliers de temp. ; uniformité de la temp. ; facilité de recourir à des atmosphères spéciales.

Fours électriques utilisés :

Fours à atmosphère inerte (SO^2 ou CO^2) ou à atmosphère naturelle.

Consommation d'énergie électrique

(four à convection)

Puissance du four kW	Charge kg	Cons. d'én. él. en kWh : t	
		homogénéisation	homogénéisation et revenu
100 à 200	500 à 1 000	200	250

e) Autres métaux et alliages.

Métal	Temp. pratique de recuit en °C
Tungstème, molybdène ..	1 100
Nickel	700-950
Métal monel (60% Ni)	800-950
Alliages d'argent (0,800 et 0,900)	750-780
Autres alliages d'argent	600-700
Or (18 et 22 carats)	750-800
Alliages d'or	650-300
Platine.. .. .	700-750
Platine irridié.	800-850
Zinc..	150

Fours normaux ou, le plus souvent, fours spéciaux.

Exemples : 1° Fours à atmosphère d'hydrogène pour le recuit de fils de Tu ou Mo avec désoxydation superficielle et modification de l'allongement.

2° Fabrication des filaments de lampes : temp. de 1 700 ° C obtenue en faisant passer le courant dans le filament.

C². TRAITEMENTS THERMIQUES DU VERRE

Températures courantes :

Recuisson : 450-600°C.

Trempe : 500-700°C.

La zone de temp. dépend de la composition du verre, par ex. recuit de 440 à 500°C pour des flints ou de 525 à 590°C pour des crowns.

Difficultés du chauffage : ne pas dépasser la température de ramollissement, se maintenir pendant un certain temps au voisinage de cette température (recuit).

Principaux avantages du chauffage électrique : précision de la température ; régulation sûre et automatique de la temp. ; facilité de la conduite et du contrôle ; suppression ou réduction des rebuts ; pas de moufle ; atmosphère propre.

Fours usuels :

1) Pour la recuisson (ou recuit), fours fixes du genre des fours de céramique (voir page 41) ou fours continus (arches) à tablier ou à balancelles ;

2) Pour la trempe, fours fixes ordinaires ou spéciaux (ex. : verre de sécurité) ou fours continus.

Consommation d'énergie électrique :

Nature et conditions du traitement	Ordre de grandeur de la cons. d'énergie en kWh:t
<i>Recuisson</i>	
Objets divers au four fixe	60-180
Grandes séries à 500°C	{ enfournement à 500°C. 15-25
	{ enfournement à 450°C. 40-50
Arche horizontale à bouteilles	{ à tablier à bande transporteuse 15-25
	{ à tablier sans fin . 50-60
<i>Trempe</i>	
Glaces (verre de sécurité) au four fixe (enfournement à froid)	1 000
Gobelets au four continu (enfournement à chaud)	500



La cons. d'én. él. des fours continus varie essentiellement avec la temp. de recuit, le poids de verre chargé, la temp. des objets à l'enfournement, la vitesse de passage et la forme des objets. Les fours continus sont en général de grande longueur (de quelques dizaines de mètres à 200 m ou davantage).

A titre d'exemple, les deux tableaux suivants se rapportent à une flaconnerie (four continu déjà ancien) :

Nombre d'objets	Poids recuit par 24 h t.	Poids moyen des objets kg	Cons. d'én. él.	
			kWh : t	kWh : h
58 700	4,30	0,73	93,7	16,7
75 000	7,68	1,02	41,3	13,3
53 500	9,74	1,82	32,3	13,1
81 000	10,54	1,30	15,6	6,9
73 500	11,00	1,50	19,5	8,9
76 200	11,81	1,55	25,5	12,5
66 200	14,22	2,30	20,8	12,3
66 900	16,74	2,50	11,4	7,9

Quinzaine	Poids total recuit par quinzaine kg	Cons. d'én. él.		
		tot. kWh	kWh : t	kWh : h
1 ^{re}	149	5 629	37,9	15,7
2 ^e	173	3 768	21,8	9,7

Avec un four moderne, on pourrait obtenir des cons. encore moindres.

Le tableau suivant montre l'influence de la temp. du verre à l'enfournement et de la charge.

Temp. en °C	Consommation en kWh	
	Charge de 638 kg : h	Charge de 273 kg : h
600	24	88
550	38	103
500	49	113
400	60	122

Les nombres qui suivent se rapportent à une arche horizontale pour recuisson de bouteilles (se rappeler qu'à vrai dire une telle arche est plutôt un « four de refroidissement retardé ») avec alimentation à chaud :

$L = 25\ 000\ \text{mm}$, $l = 1\ 400\ \text{mm}$; $P = 60\ \text{kW}$; temp. = 515°C ; production max. : $16\text{-}18\ \text{t}$: $24\ \text{h}$; production moyenne : $11,8\ \text{t}$: $24\ \text{h}$; cons. de $5,6$ à $11,7\ \text{kWh}$: tonne.

La cons. d'énergie des arches est très variable ; elle dépend essentiellement de la nature (bouteilles lourdes, ampoules, etc.) et de l'importance de la charge (capacité calorifique plus ou moins importante) ; la cons. horaire varie en général de 0 à $25\ \text{kWh}$; elle sera par ex. de $2\ \text{kWh}$, cons. correspondant à la simple neutralisation des pertes thermiques de l'arche ; pour une charge suffisante, elle sera même nulle (« autocuisson »). En somme, la puissance nominale du four ne sera nécessaire que pour le démarrage ; la cons. pourra devenir ensuite négligeable ou nulle.

Signalons, à titre documentaire, le refroidissement lent et contrôlé de lunettes astronomiques et de miroirs de télescopes ; chauffage par résistance. Ex. : pour un disque de verre de $20\ \text{t}$, refroidissement à partir de 530°C en 10 mois, $3 \times 176\ \text{kVA}$ (montage spécial).

C³. TRAITEMENTS CHIMIQUES DE DIVERSES SUBSTANCES

Traitements chimiques divers (polymérisation, oxydation, etc.) accompagnés le plus souvent d'une mise en forme. Exemples : traitements des matières plastiques (bakélisation, vulcanisation, etc.).

Températures habituelles :

Traitement	Température en °C
Bakélisation.	185
Vulcanisation.	160
Moulage de presspahn.	-120-130
Mise en forme de cachets pharmaceutiques.	120
Mise en forme d'empreintes en carton.	70-180
Pollopas } préchauffage avant moulage	100
	moulage (pièces minces. (cuisson) / pièces épaisses.
Traitements chimiques divers. . .	130-135
	généralement <250



Principaux avantages : précision de la température, facilité et automaticité du réglage de la température, commodité et souplesse d'emploi, propreté.

Appareils utilisés : presses à plateaux chauffés électriquement, moules chauffés électriquement, plateaux et plaques, cylindres, manchons, étuves, appareils spéciaux.

Chauffage par résistance, quelquefois par induction B.F. ou H.F., ou par rayons infra-rouges.

Caractéristiques habituelles des plateaux de presse pour matières plastiques (190-210°C) :

Force habituelle des presses : 60, 100, 150, 200, 300 tonnes.

Dimensions habituelles des plateaux (carrés) : 300, 450, 500, 600 ; 800 mm.

Dimensions des plateaux en mm	Puissance par plateau en kW
300 × 500	2
450 × 450	3,6
500 × 500	5
600 × 600	7

Le tableau suivant se rapporte à une série de presses à 2 plateaux.

Force t	Dimensions des plateaux en mm	Puissance par plateau en kW
26	330 × 330	3
40	370 × 350	4,5
60	450 × 400	5
100	500 × 450	7,2
140	550 × 550	8,4
200	600 × 600	} (en général, chauffage des moules)
320	700 × 700	

La cons. horaire d'én. él. a généralement pour valeur le quart de la puissance installée, par ex. : 1,5 kWh pour une presse à deux plateaux de 330 × 330 mm.

Elle varie évidemment avec la nature et l'importance des pièces, les caractéristiques des plateaux, le mode de chauffage, l'isolement thermique et les conditions de travail.

Ex. : presse de 40 t ; plateaux de 420 × 350 mm ; plat en bakélite de 26 g ; 190-210 C ; 10 kW ; mise en temp. en 35 mn, soit 5,85 kWh ; cons. de 2,5 kWh : h pour une production horaire de 40 pièces.

On a quelquefois recours à l'induction B.F pour le chauffage des moules. Ex. : P de 6 à 10 kWA pour des moules de 10 à 40 kg.

Boudineuses à vis pour matières plastiques :

Caractéristiques des vis	Puissance en kW
40 mm	2,5
60 mm	5,5
90 mm	8

Etuves pour façonnage de produits plastiques (max. 250°C) :

Dimensions utiles en mm			Puissance en kW
hauteur	largeur	profondeur	
570	400	400	2
600	500	500	5
750	750	750	6
900	600	500	6

Caractéristiques de vulcanisateurs pour pneus (de 11,5 à 16,6 cm) et chambres à air, type artisanal (150°C) :

Nature de la réparation	Partie chauffante	Puissance kW	Durée du chauffage mn	Cons. d'én. él. kWh
Externe (pneu)	moule (auge)	3,2	préchauffage du moule : 50	2,7
			chauffage du pneu : 30-45	
Interne (pneu)	mandrin	1,5	préchauffage du mandrin : 40	1,3
			chauffage du pneu : 25-40	
Chambre à air	plaque	1,3	préchauffage de la plaque : 40 chauffage de la chambre : variable	0,9 variable



C⁴ CUISSON DE LA CERAMIQUE

En principe, opérations de longue durée (de quelques heures à quelques jours pour la cuisson et le refroidissement).

Températures :

Nature de la céramique	Temp. en °C	
Poteries poreuses :		
tuiles et briques ordinaires. . .	800-1 100	
briques réfractaires	{ silice	1 500
	{ silicate d'aluminium.	min. 1 200
	{ magnésie.	1 700
poteries	{ première cuisson.	1 000-1 100
	{ cuisson de la couverte	inférieure à la précédente.
Céramiques non poreuses :		
faïence commune (pâte colorée, couverte opaque).	{ première cuisson.	1 000-1 250
	{ cuisson de la couverte	inférieure à la précédente (ex. 1 100)
faïence fine (pâte blanche, couverte transparente).	{ première cuisson (biscuit)	1 300
	{ deuxième cuisson (vernissage)...	inférieure à la précédente (ex. 1 200)
grès.	1 000 1 300	
porcelaine dure (dégourdi, puis glaçage)	1 450	
porcelaine dentaire...	1 380-1 400	
porcelaine tendre	1 280-1 400	
céramique d'art..	1 000-1 250	

Principaux avantages : atmosphère propre (ni impuretés, ni poussières) ; température précise et réglée automatiquement ; conduite très simple ; pas de surveillance ; chauffage de nuit sans contrôle (gain de temps et de main-d'œuvre) ; aucune fatigue ; propreté ; réduction considérable des frais ; amélioration de la qualité ; réduction ou suppression des rebuts.

Fours usuels :

Artisanat et petite industrie (céramique artistique) :

— jusqu'à 1 000°C, fours à chambre horizontale, à résistances de Ni-Cr à 80/20, de toutes capacités et notamment celles qui figurent dans le tableau ci-dessous ; également, fours à cloche ;

— jusqu'à 1 100°C-1 200°C, fours à chambre analogues aux précédents, à résistances Fe-Cr-Al ;

— jusqu'à 1 300°C, voire un peu au delà, fours à chambre horizontale, à résistances en carbure de silicium.

Dans certains cas, on prévoit un refroidissement accéléré (four à chemise d'air).

Industrie :

— jusqu'à 1 200°C environ, fours-tunnels de grande longueur à wagonnets et à marche continue, avec résistances métalliques (Ni-Cr à 80/20 jusqu'à 1 000°C et Fe-Cr-Al pour des températures supérieures).

Au-dessus de 1 100°C environ, fours-tunnels analogues aux précédents, avec résistances en carbure de silicium et atmosphère spéciale.

A notre connaissance, le four électrique n'est pas utilisé pour la fabrication des tuiles et des briques (coût trop élevé).

Fours à chambres ordinaires.

Caractéristiques usuelles des fours à chambre ordinaire (1 000°C max.) :

Dimensions utiles l × h × p mm	Vol. approx. m ³	Puiss. kW	Poids moyen enfourné kg	Cons. d'én. él. p. cuis-son kWh	Cons. moy. d'él. él. p. kg. enf. kWh
550 × 600 × 550	0,120	10-12	80	60-85	1
600 × 900 × 600	0,330	17-18	120	110-120	0,9-1
600 × 900 × 700	0,380	18-20	150	130-170	0,8-0,9
680 × 940 × 940	0,630	20-22	250	200-220	0,8
900 × 1 050 × 940	0,900	30-35	450	300-330	0,7-0,75
900 × 1 200 × 940	1,000	35-40	500-550	330-350	0,65-0,70
850 × 1 200 × 1 400	1,400	45-50	600	380-400	0,6
850 × 1 400 × 1 400	1,650	50-55	900	450-500	0,55
1 000 × 1 300 × 2 000	2,650	80-90	1 500-1 600	800-850	0,55
850 × 1 400 × 2 800	3,300	100-110	1 800	900-950	0,4-0,5

Pour les fours les plus courants, la cons. varie de 400 à 1 000 kWh par tonne de produits enfournés, compte tenu par conséquent des supports ; la durée de chauffage est géné-



ralement assez élevée : de l'ordre de 8 à 10 heures par ex. (chauffage de nuit avec, éventuellement, séchage de deux heures à puissance réduite pendant les heures creuses de midi).

La température de cuisson est de 925-1 000°C.

Il n'y a pas besoin de cassettes et le poids des supports est aussi réduit que possible.

Le tableau suivant se rapporte à des fours de construction étrangère :

Dimensions utiles lxhxp mm	Capacité utile m ³	Puissance kW	Cons. moyenne d'én. él. (1) par journée kWh
600 × 600 × 600	0,22	12	75
600 × 900 × 600	0,33	15	100
600 × 900 × 900	0,5	18	135
850 × 1 200 × 1 000	1	30	230
850 × 1 200 × 1 250	1,25	35	280
1 000 × 1 200 × 1 250	1,5	44	315
1 000 × 1 200 × 1 650	2	50	400
1 200 × 1 500 × 1 650	3	70	550
1 200 × 1 500 × 2 200	4	90	710
1 200 × 1 700 × 3 000	6	120	1 020

(1) Cons. basée sur 300 kg. par m³ de volume utile ; temp. de 950° C.

Le tableau suivant est également relatif à des fours étrangers :

Type du four	Dimensions utiles (Lxlxh) mm	Charge kg	Puiss. kW	Durée de la cuisson h
A cloche	min. 700 × 700 × 500	125	20	6
	max. 2 000 × 1 250 × 1 250	1 500	110	8
A wagonnet (formant sole et porte)	min. 700 × 700 × 500	125	20	6
	max. 1 250 × 1 250 × 1 250	1 000	80	8

Fours de porcelaine dentaire : voir volume I, page 57.

Fours-Tunnels.

Quelques résultats :

Nature de la céramique	Type de four	Cons. d'én. él. kWh : t
Faïence stannifère (950°C)	four à passage	750
Grès sanitaire	four à double tunnel	870 (1)
Porcelaine électrother- mique.	four à double tunnel	4 000 : 1 000 (2)
Porcelaine (dégourdi à 750°C.)	four-tunnel	250
Carreaux émaillés (cuis- son du carreau et de l'émail - 950°C). . .	four-tunnel	480

(1) Four de 400 kW ; L = 110 m ; production nette : 12 t par 24 h.
 (2) Four de 600 kW ; L = 90 m ; production = 3,5 t par 24 h ; dégourdi à 900 - 1000°C ; temp. cuisson = 1 380 - 1 400°C ; atmosphère réductrice dans la zone centrale ; 1 kWh : kg de charge des wagonnets ; 3 kg d'encastage par kg de porcelaine ; 4 kWh : kg de porcelaine net.

N. B. — Caractéristiques des grands fours industriels = L : de 70 à 100 m ; P : de 300 à 800 kW.

Le tableau suivant groupe les résultats d'une enquête faite à l'étranger (cuisson de porcelaine dans des fours-tunnels).

Temp. ° C	Durée de l'opération (cuisson et refroidissement) h	Utilisation de l'espace utile de la chambre de chauffe kg : m ³	Cons. d'én. él. kWh : kg net
1 350	20-30	100-150	1,5-2 (four à double tunnel) 2,5-3 (four à simple tunnel)
800 (dégourdi)	6-8	100-150	0,4-06

Fours pour **stabilisation d'abrasifs.** Ex. : four-tunnel, 20 kW, 20 kg : h, 750°C.

C⁵. CUISSON DES DECORS

a) Décors sur céramique.

Températures de cuisson inférieures à 1 000°C en général. Dans certains cas, le décor est cuit en même temps que la céramique; dans d'autres cas, il est cuit séparément; le même sujet peut faire l'objet de plusieurs cuissons (ex. : décor sur vaisselle ou sur vases).

Fours utilisés : fours fixes de céramique (voir page 41) avec résistance en Ni-Cr et mêmes avantages ; fours-tunnels continus.

Quelques résultats de fours-tunnels :

Conditions de travail	Cons. d'én. él. en kWh : t
Décor sur porcelaine : L = 14 m ; P = 130 kW ; temp. = 96°C ; prod. = 3-4 t : 24 h.	700
Décor sur porcelaine : L = 14,2 m ; P = 63 kW ; temp. = 830°C ; prod. = 2,5 t : 24 h.	250
Email sur carreaux de faïence : L = 8 m ; P = 70 kW ; temp. = 1 000°C ; prod. = 6 940 carreaux de 150×150×4 mm par 24 h.	210
Email sur carreaux de faïence : L = 40 m ; P = 400 kW ; temp. = 1 070°C ; prod. = 60.000 carreaux de 150×150×8 mm par 24 h ; poids moyen d'un car- reau de l'ordre de 0,4 kg ; cons. 1 kWh par 10 carreaux.	250
Email sur carreaux de faïence : L = 10 m ; P = 55 kW ; temp. = 1 100°C ; production = 11.000 à 12.000 carreaux de 150×150 mm, 320 g. par 24 h.	300