

MÉMENTO DU CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

Par R. GAUTHERET et Th. TOURNIER

Premier volume :

Applications domestiques, agricoles, commerciales et artisanales

Deuxième et troisième volumes :

Applications industrielles

II

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

II

Deuxième volume :
Applications industrielles

SOMMAIRE DU MÉMENTO

	Volume
Rappel des notions élémentaires d'électrothermie..	I
Applications domestiques.....	I
Applications agricoles.....	I
Applications commerciales artisanales.....	I
Applications industrielles	{ Electrochimie et électrometallurgie... 11 { Autres applications.... 11 et 111

ABRÉVIATIONS

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

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

SOMMAIRE DU PRÉSENT VOLUME

	PAGES
<i>Remarques essentielles.....</i>	4

QUATRIÈME PARTIE

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

<i>Electrochimie et électrometallurgie</i>	5
Principales fabrications.....	7
Tableau des consommations.....	9
Electrodes	14

Autres applications industrielles.

Chauffage des solides. — Fusion.

Métaux et alliages	}	aciers et fontes	16
		nickel et alliages Ni-Cr.....	31
		cuivre et alliages cuivreux	32
		alliages de l'aluminium	34
		alliages du magnésium	48
		autres métaux blancs.....	59
		métaux spéciaux.....	62
		métaux précieux.....	63
		soudage à l'arc.....	67
		soudage par résistance.....	71
		brasage (soudure forte).....	76
		soudure ordinaire (soudure tendre).....	78
		découpage et métallisation.....	79
		Verre	80
Sels et mélanges de sels.....	82		
Substances diverses.....	87		

(Suite et fin dans le troisième volume.)

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.

Etant 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° la technique industrielle est constamment en voie d'évolution;

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

— 3° la comparaison de deux bilans thermiques est insuffisante pour se faire une idée exacte de deux procédés. Ce qui importe, c'est de compiler 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.

IV. Applications industrielles

Nous considérerons séparément l'électrochimie et l'électrometallurgie, puis les autres applications.

IV a. Electrochimie et Electrometallurgie

Ce sont des industries très importantes qui nécessitent des consommations d'énergie électrique considérables. Elles sont généralement alimentées par des centrales hydro-électriques particulières, reliées pour la plupart au Réseau Général Français de Transport et de Distribution de l'Energie Electrique auquel elles peuvent, suivant les périodes ou les circonstances, soit fournir, soit demander du courant.

Etant donné cette situation très spéciale et le fait que ces industries sont mal définies, nous ne retiendrons comme telles que les « activités principales dans lesquelles l'emploi de l'électricité joue un rôle essentiel dans l'élaboration des produits », ce qui exclut la fusion proprement dite, la fabrication des piles et des accumulateurs.

Le tableau des pages 9 à 13 donne l'ordre de grandeur des consommations d'énergie électrique habituelles; il ne faut pas oublier que les valeurs réelles sont souvent très variables; pour plus de simplicité et pour faciliter les comparaisons, nous avons ramené en principe les consommations à la tonne de produit fabriqué; dans quelques cas, cependant, les productions annuelles sont relativement faibles et les consommations auraient pu être évaluées plus justement en kWh par kg.

L'électrochimie et l'électrometallurgie font appel :

- soit à l'électrolyse,
- soit à l'électrothermie.

On distingue :

1° L'électrolyse aqueuse (ou par voie humide) utilisée notamment en électrochimie pour la préparation de l'hydrogène et de l'oxygène, de la soude, de la potasse, du chlore et des chlorates; des persulfates, etc., et de l'eau oxygénée, et en électrometallurgie pour le raffinage des métaux (cuivre par exemple) ou leur obtention directe à partir des minerais (cuivre, zinc, fer, nickel, plomb, étain, métaux précieux, etc.);

2° L'électrolyse ignée (ou à l'état fondu ou par voie sèche) utilisée essentiellement pour la production de l'aluminium, du magnésium et du sodium; le courant a alors une double action électrolytique et thermique (fusion de l'électrolyte).

En électrolyse, l'anode est soit soluble (ex. : dissolution de l'anode en cuivre dans le raffinage de ce métal), soit insoluble (ex. : électrolyse du sulfate de zinc).

L'électrothermie a recours au four électrique pour la fabrication du carbure de calcium et de la cyanamide calcique; des ferro-alliages (de désoxydation ou d'addition) et de la fonte synthétique; d'autres produits tels que : plomb, zinc, carbure de silicium, graphite, céruse, et aussi pour la transformation des gaz (production de l'acide nitrique, obtention de l'ozone).

Nous avons fait figurer également dans le tableau précité les consommations usuelles se rapportant à des opérations électrolytiques par voie humide, à seule fin de comparaison, bien qu'il ne s'agisse pas en l'occurrence de chauffage.

En principe, on emploie des électrodes en graphite pour l'électrolyse aqueuse, des électrodes en carbone amorphe ou en graphite pour l'électrolyse ignée, des électrodes en graphite ou en carbone amorphe (électrodes ordinaires, Söderberg, Miguet) pour les fours à arc ou les fours à résistance dits à « électrodes ». Dans certains cas, les électrodes ne sont pas en carbone, mais en métal (électrolyse par voie humide).

A titre indicatif, les consommations des principales industries électro-chimiques et électro-métallurgiques ont été les suivantes en France pour l'année 1939 (1).

Groupe de produits	Consommation annuelle en millions de kWh
Aluminium et magnésium	1 400
Carbure de calcium	600
Ferro-alliages.....	400
Hydrogène électrolytique	250
Chlore.....	150
Chlorates, sodium, eau oxygénée, abrasifs, phosphore, divers.....	250
Raffinage électrolytique des métaux .	200
Production d'acier électrique.....	370
Total.....	3 620 (1)

(1) Soit 17,9 p. 100 de la production totale d'énergie électrique de la France en 1939 (20 227 millions de kWh).

(1) D'après le rapport de M. Jean Gall aux Journées Syndicales de 1943 du Syndicat des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique.

PRINCIPALES FABRICATIONS ELECTROCHIMIQUES ET ELECTROMETALLURGIQUES

ELECTROCHIMIE

Electrothermie	Métalloïdes	}	graphite (carbone), phosphore, silicium.
	Composés métalloïdes	}	acide nitrique, acide phosphorique, carborundum, verre de silice, sulfure de carbone.
Electrolyse par voie humide (solutions aqueuses)	Décomposition de l'eau et des solutions salines.		
	Préparation du chlore et de ses dérivés.		

ELECTROMETALLURGIE :

Electrothermie	Métaux ferreux	}	acier, ferro-alliages, fonte-synthétique.
	Métaux non ferreux	}	magnésium, manganèse, étain, zinc.
	Composés métalliques	}	carbure de calcium, cyanamide calcique, ciment, corindon.
Electrolyse par voie sèche (électrolyse ignée)		}	aluminium, calcium, cérium, magnésium, sodium.
Electrolyse par voie humide		}	affinage des métaux (Cu, Zn), électroplastie.

Les puissances mises en jeu sont variables. La puissance maximum unitaire des appareils utilisés est à notre connaissance de 25 000 kW (four à électrodes pour carbure de calcium). Dans certains cas, la fabrication est continue et la puissance prise est régulière (ex. : aluminium).

Le tableau ci-dessous (1), relatif aux métaux du commerce obtenus par électrolyse, complète celui des pages 9 à 13.

Les dimensions des électrodes pour l'électrochimie et l'électrometallurgie et aussi pour les fours à arc de fusion sont indiquées dans le tableau de la page 14.

Métal	Pureté en p. 100	Consommation en kWh : t	
		obtention à partir de solution ou de fonte	raffinage
Aluminium...	96,5	—	21 000
Aluminium...	99,99	25 000	—
Antimoine....	99,9	320	—
Argent.....	99,95 - 99,99	500	—
Bismuth.....	99,95	120	—
Cadmium.....	99,98	—	2 250
Cuivre.....	99,95 - 99,999	180 - 270	2 000
Etain.....	99,9	190	—
Magnésium...	99,92	—	20 000 - 30 000
Manganèse...	99,95	—	8 000
Nickel (cobalt inclus).....	99,9	2 800	—
Or.....	99,93 - 99,99	300	—
Plomb.....	99,99	130	—
Zinc.....	99,975 - 99,99	—	3 250

(1) D'après Revue Electricité, juin 1944, page 120.

N. B. — Le tableau qui suit donne l'ordre de grandeur des cons. d'énergie él. que l'on rencontre habituellement pour l'obtention des produits électrochimiques et électrometallurgiques par les procédés indiqués.

Produits obtenus (1)	Nature de l'opération	Ordre de grandeur de la cons. d'én. élec.
Acide nitrique	Combinaison dans un four électrique spécial à arc long des éléments de l'air (Az et O) donnant des oxydes d'azote, puis absorption par l'eau. Température de la flamme de l'arc : 3.000-3.500°C. Temp. de sortie des gaz : 850-1.200°C.	13 500-16 000 kWh par tonne d'acide.
Aluminium (production)	Electrolyse ignée de l'alumine dans la cryolithe avec additions éventuelles. Temp. : 950°C environ. Electrodes en matières carbonées.	22 000-25 000 kWh par tonne d'aluminium.
Aluminium (raffinage)	Electrolyse ignée de l'aluminium. Temp. : 700-750°C. Electrodes en carbone.	30 000-35 000 kWh par tonne d'aluminium (à partir d'aluminium à 99,5 p. 100 de pureté).
Azoture d'aluminium	Action de l'azote sur un mélange d'alumine et de charbon dans un four électrique tournant spécial. Temp. : 1.800°C.	11 000 kWh par tonne d'azoture.
Azoture de magnésium	Fixation dans un four électrique de l'azote atmosphérique au moyen de magnésium préparé par voie électrolytique.	10 000 kWh par tonne d'azoture (traitement thermique et électrolyse).
Cadmium	Electrolyse du sulfate de cadmium avec anode en plomb et cathode en aluminium.	1 700-2 000 kWh par tonne de cadmium.
Calcium	Electrolyse ignée du chlorure de calcium. Temp. : 800°C. Electrodes en graphite.	50 000-60 000 kWh par tonne de calcium.
Carbure de calcium	Réduction de la chaux par du carbone dans un four à électrodes (en principe, chauffage par résistance). Temp. : 2.400-3.000°C. Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg ou Miguet.	3 500-4 500 kWh par tonne de carbure.
Carbure de silicium (carborundum)	Traitement dans un four électrique spécial (à résistance) d'un mélange de sable siliceux, de coke, de pétrole, de sciure de bois et de sel marin. Temp. : 2.000-2.400°C. Aménées de courant en graphite.	7 000-15 000 kWh par tonne de carborundum.

(1) Classement par ordre alphabétique.

Produits obtenus	Nature de l'opération	Ordre de grandeur de la cons. d'én. élec.
Céruse	Electrolyse d'une solution de chlorate et de carbonate alcalins avec anode soluble en plomb.	3 500-4 000 kWh par tonne de céruse.
Chlore	Electrolyse d'un chlorure alcalin. Temp. : 50-60°C. Electrodes en graphite.	5 500 kWh par tonne de chlore (1).
Chlorate de potasse et chlorate de soude	Electrolyse d'une solution de chlorure alcalin. Electrodes en graphite.	8 000-10 000 kWh par tonne de chlorate.
Ciment électro-fondu	Traitement au four à électrodes d'un mélange d'alumine, de chaux, d'oxyde de fer et de silice. Temp. : 1.400°C. Electrodes en carbone.	700-800 kWh par tonne de klinkers de ciment.
Corindon	Traitement de bauxite contenant une proportion déterminée de carbone dans un four à électrodes (résistance). Electrodes en carbone amorphe en général.	4 000-5 000 kWh par tonne de corindon.
Cuivre (production)	1° Electrolyse d'une dissolution de cuivre dans l'acide sulfurique, avec anode insoluble. 2° Fusion du minerai au four électrique à résistance avec électrodes Söderberg (Finlande).	2 200-3 000 kWh par tonne de cuivre. 500 kWh par tonne de charge solide.
Cuivre (Raffinage)	Electrolyse d'une solution de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique, avec anode soluble en cuivre.	200-400 kWh par tonne de cuivre.
Cyanamide calcique	Action de l'azote pur et sec sur du carbure de calcium dans un four électrique à résistance hermétiquement clos. Temp. : 1.000°C. Baguette chauffante en carbone.	300 kWh par tonne de cyanamide en partant du carbure.
Fer électrolytique	Electrolyse de sels de fer (chlorure ferreux, sulfate ferreux, sulfates doubles de fer et d'ammoniaque, etc.) avec anode soluble.	1 600-7 300 kWh par tonne de fer.
Fero-chrome carburé	Réduction au four électrique à résistance (four à électrodes) d'un mélange de minerai de chrome, de coke et de fondants (spath-fluor, chaux ou silice). Electrodes en carbone amorphe ou en graphite.	6 000-8 000 kWh par tonne de ferro.

(1) Avec production concomitante de 1 120 kg. de soude.

Produits obtenus	Nature de l'opération	Ordre de grandeur de la cons. d'én. élec.
Ferro-chrome raffiné ou suraffiné	Préparation à partir d'un silico-chrome produit dans un four à résistance (à électrodes) avec affinage ultérieur dans un four à arcs.	10 000-13 000 kWh par tonne de ferro-affiné. 12 000-16 000 kWh par tonne de ferro suraffiné.
Ferro-manganèse	Réduction au four à électrodes du minerai de manganèse par du carbone (coke, houille, lignite, charbon de bois); fondant: castine ou chaux. Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg.	5 000 kWh par tonne (ferro de 75 p. 100 de Mn). 3 000-3 500 (50 p. 100 de Mn). 1 500 - 2 500 (spiegels ou fonte de 4 à 25 p. 100 de Mn).
Ferro-molybdène	Réduction de l'acide molybdique par du ferro-silicium dans un four à résistance (à électrodes). Electrodes en carbone amorphe.	10 000-15 000 kWh par tonne de ferro.
Ferro-silicium	Réduction au four à électrodes de la silice (quartz, quartzite) par du carbone (coke, charbon de bois) en présence de fer (tournures d'acier). Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg.	Très variable par exemple : 2 000-8 500 kWh par tonne pour des teneurs en Si inférieures à 50 p. 100. 9 000-16 000 pour des teneurs en Si de l'ordre de 75 p. 100. 22 500-25 000 pour des teneurs en Si de 90 à 95 p. 100.
Ferro-titane carburé et silico-titane	Réduction dans un four à résistance (à électrodes) d'un mélange d'ilménite et de coke en présence de quartz dans le cas du silico-titane. Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg.	5 000-8 000 kWh par tonne.
Ferro-tungstène	Réduction au four à électrodes du minerai de tungstène. Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg.	6 000-10 000 kWh par tonne pour la réduction.
Fonte	r) Réduction du minerai par du carbone (coke) au haut fourneau électrique ou dans un four spécial de réduction. Electrodes Söderberg ou en carbone amorphe.	4 300-2 600 kWh par tonne de fonte pour la fonte ordinaire. 2 800-3 000 kWh par tonne pour la fonte au silicium.

Produits obtenus	Nature de l'opération	Ordre de grandeur de la cons. d'én. élec.
Fonte	2°) Carburation d'acier (ribbons) : fonte synthétique dans un four à rayonnement. 3°) Fusion de fonte de qualité (fonte hématite) avec additions au moment de la coulée, au moyen d'un four à rayonnement.	700 kWh par tonne. 550-660 kWh par tonne
Graphite	Traitement dans un four électrique spécial (à résistance) d'un mélange de carbone amorphe (coke, anthracite) et d'un oxyde (alumine, silice, oxyde de fer). Temp. : 2.200°C. Amenées de courant en graphite.	8 000-16 000 kWh par tonne.
Hydrogène	Electrolyse d'une solution alcaline (par ex. : potasse ou soude caustique). Electrodes métalliques.	4 000-6 300 kWh pour 1000 m ³ d'hydrogène.
Magnésium	Electrolyse ignée du chlorure de magnésium. Temp. : 800°C. Electrodes en graphite.	22 000-25 000 kWh par tonne de Mg (sel anhydre). 30 000-33 000 kWh par tonne de Mg (sel partiellement déshydraté).
Manganèse	Electrolyse d'une solution d'un sel de manganèse avec anode en plomb et cathode en acier inoxydable (actuellement, du domaine du laboratoire).	5,5-7,5 kWh par kg de Mn
Nickel	1°) Préparation du ferro-nickel dans un four Héroult. 2°) Electrolyse d'une solution de sels de nickel avec anodes riches en nickel.....	1 300-1 400 kWh par tonne de Mn à 50 p. 100 de Ni traitée ; soit 400 kWh par tonne de Ni. 1 000 kWh par tonne.
Oxygène	Electrolyse d'une solution alcaline (par ex. : potasse ou soude caustique). Electrodes métalliques.	8 000-12 600 kWh pour 1000 m ³ d'oxygène.
Perborate de soude	Oxydation anodique d'un électrolyte contenant du borax et du carbonate de soude.	6 000 kWh par tonne de perborate.
Perchlorate de soude	Electrolyse d'une solution de chlorate de soude.	3 500 kWh par tonne de perchlorate.
Persulfate d'ammonium	Electrolyse d'une solution de sulfate d'ammonium et d'acide fluorhydrique.	2 500 kWh par tonne de persulfate.

Produits obtenus	Nature de l'opération	Ordre de grandeur de la cons. d'én. élec.
Phosphore	Réduction du phosphate tricalcique par le carbone en présence de silice, au four électrique. Electrodes en carbone amorphe ou en graphite.	12 000 kWh par tonne de phosphore.
Potasse	Electrolyse d'un chlorure alcalin. Electrodes en graphite.	3 500 kWh par tonne de potasse. (1)
Sodium	Electrolyse de la soude caustique fondu ou du chlorure de sodium fondu. Electrodes en graphite.	20 000 kWh par tonne de sodium.
Soude	Electrolyse d'un chlorure alcalin. Electrodes en graphite.	5 000 kWh par tonne de soude (2).
Silice fondue	Fusion au four électrique de sable de quartz. Résistance en graphite.	1 500 kWh par tonne de silice.
Silico-aluminium	Réduction au four à électrodes d'un mélange de silice, d'alumine et de fer par du carbone. Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg.	15 000-20 000 kWh par tonne d'alliage.
Silico-Manganèse	Réduction au four à électrodes d'un minerai silicaté de Mn ou d'un mélange de minerai de Mn et de quartz, au moyen de carbone (coke, anthracite). Electrodes en carbone amorphe ou Söderberg.	très variable ; par exemple : 5 000-10 000 kWh par tonne d'alliage pour une teneur en Mn supérieure ou égale à 70 p. 100. 2 300-3 000 pour les silico-spiégels, alliages pauvres en Si et Mn
Zinc	1 ^o) Electrolyse d'une solution de sulfate de zinc avec anodes insolubles. Temp. max. : 50°C. 2 ^o) Four à résistance constituée pour la charge ou four à arc (essais en Suède).	3 000-4 500 kWh par tonne de zinc. 2 500 kWh par tonne de zinc ou 1 300 kWh par tonne de concentrés.

(1) Avec production concomitante de 620 kg. de chlore.
(2) Avec production concomitante de 890 kg. de chlore.

N. B. — Insistons sur le fait que les nombres figurant dans le tableau précédent donnent des ordres de grandeur et ne doivent pas être pris en valeur absolue. Ils dépendent essentiellement de la nature des produits traités et de plusieurs autres facteurs (quantité des produits traités, nature des opérations effectuées, type et caractéristiques de l'appareil utilisé). En particulier, on a pu réduire sensiblement les consommations d'énergie électrique en employant des fours électriques plus puissants et plus perfectionnés et en les utilisant différemment. A titre d'exemple, la cons. pour la production de l'aluminium qui était autrefois de l'ordre de 33 000 kWh/t a été ramenée à 22 000-25 000 kWh/t.

CARACTERISTIQUES DES ELECTRODES USUELLES

ELECTRODES EN CARBONE AMORPHE

a) *Ordinaires.*

Section carrée	} côté de 250 à 600 m.
Section rectangulaire	
	} côtés de 350 × 250 mm (section minimum usuelle). côtés de 500 × 450 mm (section maximum usuelle).
Section circulaire	
	} diamètre de 90 à 750 m.
Longueur habituelle	
	} de 2 000 à 2 400 mm pour électrodes sans raboutage par nipples. 1 500 mm pour électrodes à jonction conique ou à raboutage par nipples.

b) *Söderberg.*

Section circulaire	} diamètre minimum usuel : 500 mm. diamètre maximum usuel : 2500 mm.
Section rectangulaire	
	} surface de 3 à 4 m ² .

A l'étranger, on signale des électrodes circulaires de 4,50 m. de diamètre.

c) *Miguet.*

Secteurs de 1 300 mm (8 secteurs) à 2 750 mm (20 secteurs).

ELECTRODES EN GRAPHITE

a) *Fours électriques.*

Electrodes filetées et nippées (fours à électrodes)	} diamètres usuels : de 50 à 400 mm. longueurs usuelles : 750, 1 000-1 200, 1 500 mm	} diamètres maxima	} actuellement prévus (France) : 500 mm. existants (étranger) : 750 mm.
Baguettes et tubes (fours à résistance à rayonnement)	} baguettes : diamètre normal de 40 à 72 mm. tubes : diamètres (extérieur et intérieur) de 50/25 à 110/55 mm.		

b) *Electrolyse.*

Electrodes	} magnésium	} épaisseur : 100 mm. largeur : 200-250 mm. longueur : 1 500-1 600 mm.	} électrolyseur à mercure :	} e = 30-40 mm. l = 50-150 mm. L = 500 mm.			
					} chlore	} électrolyseur à diaphragme :	} e = 32-70 mm. l = 100-180 mm. L = 600-1100 mm.
	} barres rondes						

Amenées de courant } diamètre de 28 à 50 mm.

PRINCIPAUX METAUX CLASSES PAR ORDRE
DES TEMPERATURES DE FUSION DECROISSANTES

Métal	Température en °C (1)	Métal	Température en °C (1)
Tungstène.....	environ 3 400	Zirconium.....	1 500
Tantale	2 900-2 700	Cobalt.....	1 477
Osmium.....	2 700	Nickel.....	1 451
Titane	2 700	Manganèse.....	1 240
Molybdène.....	2 650	Cuivre.....	1 082
Ruthénium...	2 450	Or.....	1 064
Iridium.....	2 350	Argent.....	942
Rhodium.....	1 965	Aluminium.....	657
Titane.....	1 800	Magnésium.....	650
Platine.....	1 775	Antimoine	631
Vanadium.....	1 700	Zinc.....	420
Chrome.....	1 615	Plomb.....	327
Palladium.....	1 554	Cadmium.....	320
Fer.....	1 520	Bismuth.....	269
		Étain.....	232

(1) Rappelons que certaines températures restent assez mal connues et que leurs valeurs diffèrent plus ou moins suivant les auteurs.

PRINCIPAUX ALLIAGES METALLIQUES
CLASSES PAR ORDRE DES TEMPERATURES DE FUSION

Alliage	Température en °C (1)	Alliage	Température en °C (1)
Platine irradié.	2 150	Bronzes.....	1 080-700
Fer-chrome-aluminium..	1 540-1 500	Cupro-aluminium.....	1 080-600
Aciers.....	1 520-1 450	Alliages légers.	650-540
Nickel-chrome.	1 475-1 400	Alliages - cadmium-zinc à 60/40.....	300
Métal monel..	1 360	Alliages zinc-étain à 70/30.	260
Alliages de l'or.	1 350-1 110	Alliages plomb-étain à 70-30.	260
Fontes.....	1 200		
Cupro-nickel..	1 200		
Laitons.....	1 080-890		

(1) Températures approximatives.

IV b. Autres applications

On peut distinguer :

- le chauffage des solides,
- le chauffage des liquides,
- le chauffage des gaz.

IV b1. Chauffage des solides

C'est l'application de beaucoup la plus importante.

On peut se proposer :

- de fondre ou de ramollir le corps (fusion, soudure),
- d'en changer simplement la forme,
- d'en modifier les propriétés physiques ou chimiques,
- de le chauffer en vue d'assurer un simple transport de calories.

A. FUSION

A¹. METAUX ET ALLIAGES

Principale application dans le domaine de la fusion, par le nombre des appareils, l'importance des puissances et des consommations mises en jeu : fours à arcs, fours à résistance, fours à induction.

a) Alliages ferreux : aciers et fontes.

Température de fusion du fer = 1 520°C.

Températures usuelles de coulée: aciers = 1 600 — 1 700°C;
fontes = 1 400 — 1 450°C.

Fours les plus fréquents : aciers = à arcs, à induction HF;
fontes = à arcs, à résistance.

Charge froide ou charge liquide (marche en duplex).

La tendance semble être actuellement la suivante :

Nature du métal	Fours adoptés de préférence
Fontes et aciers ordinaires...	fours à arcs.
Fontes spéciales. } charge solide... } duplex.....	fours à arcs, à résistance ou à induction H. F. cubilot et four à arcs combinés.
<i>du point de vue général.</i>	
grosses capacités...	fours à arcs ou à induction H. F.
petites capacités...	fours à arcs, à induction H. F. ou à résistance.
si affinage nécessaire	fours à arcs.
<i>suivant la nature du métal.</i>	
Aciers spéciaux } aciers à haute teneur en Si.....	fours à arcs.
} aciers au manganèse.	fours à arcs, à résistance ou à induction H. F.
} aciers au chrome...	fours à arcs.
} aciers au molybdène et au tungstène...	fours à induction H. F. ou à résistance.
} aciers au vanadium et à l'aluminium..	fours à arcs, à induction H. F. ou à résistance.
} aciers au nickel et aciers à coupe rapide (au chrome-tungstène).....	fours à induction H. F.

1° Fours à arc.

Avantages : température élevée assurant une grande rapidité de la fusion, une fluidification aisée des laitiers, l'efficacité de la désulfuration (dans le cas d'un revêtement basique) ; atmosphère non oxydante ; moindre occlusion de

gaz dissous ; faibles pertes à la fusion ; facilité d'effectuer les additions ; consommation réduite en ferro-alliages de correction ; possibilité de partir de matières premières de qualité médiocre (riblons, tournures, ferrailles quelconques) et d'obtenir cependant des aciers de qualité (seul, le four électrique permet d'opérer par fusion de charges quelconques) ; grande souplesse de marche ; rapidité du chargement et de la coulée (chargement normal, automatique, duplex) ; commande et régulation facile et automatique ; possibilité de réaliser de grosses unités ; faibles prix d'installation et de revient ; qualité supérieure des aciers (« aciers électriques »), réduction des masselottes, plus grande facilité de réaliser des moulages minces.

Type : généralement, fours triphasés Héroult, avec régulation automatique (hydraulique ou électrique) des électrodes ; également, fours monophasés oscillants à tambour horizontal pour les petites capacités. Alimentation par transformateurs spéciaux.

Electrodes : le plus souvent en graphite, quelquefois en carbone amorphe.

Capacités les plus courantes :

Charge froide de 3 à 15 t ; actuellement le plus souvent 3 t ; max. 30 t.

Duplex : de 20 à 30 t ; max. 40 t.

A notre connaissance, le four le plus gros qui ait été construit jusqu'alors a les caractéristiques suivantes : 100 t, 6 électrodes de 450 mm de diamètre, 15 000 kW, 1 700°C, poches de coulée de 30-40 t.

L'aciérie électrique la plus importante de France compte 7 fours à arc d'une puissance globale de 26 000 kVA et 2 fours à induction HF d'une puissance globale de 650 kVA, soit au total 26 650 kVA (compte non tenu des fours à résistance pour les divers traitements thermiques).

Sole :

Basique (magnésie, dolomie).

Acide (pisé siliceux damé).

Double tendance actuelle :

- gros fours pour les productions importantes, plus exactement pour les lingots de forge et de laminage (20 à 30 t) ;
- petits fours multipliés pour les petites productions d'aciers de nuances diverses, notamment pour les aciers spéciaux (fours tri ou monophasés de 0,5 à 1 t) dans les aciéries moyennes et petites.

α) Fours triphasés

Les puissances indiquées dans le tableau des pages 20 à 22 sont des moyennes ; certains constructeurs adoptent des puissances plus faibles pour les petites capacités et des puissances plus élevées pour les grandes capacités.

Il semble que les dimensions suivantes tendent à être normalisées :

Charges nominales en t :											
0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	10	15	20	28

Diamètre des électrodes (graphite) en mm et intensités approximatives du courant de régime en A :

Diamètre :									
130	150	175	200	225	250	300	350	400	
Intensité :									
2500	3150	4000	5000	6300	8000	11500	16000	20000	

La densité de chargement moyenne semble devoir être normalisée à 1,3 t : m³.

La cons. d'eau, pour le refroidissement des électrodes, des portes et des pinces d'électrodes, varie de 5 à 2 m³ : h. ; elle est inversement proportionnelle à la capacité du four. L'eau nécessaire pour la régulation des électrodes circule en circuit fermé (seules, les fuites sont à compenser).

Le facteur de puissance moyen est généralement de l'ordre de 0,85 en marche solide et de 0,92 en marche liquide.

La cons. d'én. él. dépend évidemment de la capacité et de la puissance du four, de la nature et de la pureté de la charge, de la nature des opérations effectuées, des temp. de coulée et de la charge introduite, des conditions de chargement et de coulée ; en bref, des caractéristiques du four et de la charge et des conditions de travail.

Le tableau suivant montre comment varie la cons. en marche discontinue, pour un four de 3 t (four le plus fréquent), 1400 kVA, pour une série de coulées successives d'acier, chargement solide, départ en four froid.

Numéro de la coulée	1 ^{re}	2 ^e	3 ^e	4 ^e et suivantes
Durée de la fusion en mn.....	160	130	110	110
Cons. d'én. él. en kWh:t.	1050	900	800	800

CARACTERISTIQUES DE FOURS TRIPHASES TYPE HEROULT POUR UNE MARCHE CONTINUE
 (Acier à 1 700°C)

Capacité en tonnes		1	2	3	4	6	10	15	20	25	30	
Puissance du transformateur en kVa	fusion (charge solide froide)	chargement manuel (1)	700	1 200	1 400	1 800	2 100	3 500	4 750	6 200	7 500	8 800
			chargement automatique			1 700	2 000	2 400	4 100	5 800	7 500	9 300
	affinage (duplex; charge liquide)								2 500	3 500	4 400	5 400
Diamètre des électrodes (graphite) en mm	charge solide	chargement manuel	150	175	200	200	225	300	350	400	400	400
		chargement automatique			225	225	250	300	350	400	400	400
	charge liquide							250	300	300	350	350
Section des électrodes en cm ²	charge solide	chargement manuel	177	240	314	314	400	705	956	1 256	1 256	1 256
		chargement automatique			400	400	490	705	956	1 256	1 256	1 256
	charge liquide							190	705	705	956	956
Densité de courant en A : cm ²	charge solide	chargement manuel	15,2	17,5	14,4	17,6	15	13	11,4	10,3	11,5	12,6
		chargement automatique			13,8	15,3	14,3	15,3	14,5	12,6	14,3	15,8
	charge liquide							15,1	13	15	12,2	13,5

1. Pendant la durée de la fusion, le transformateur peut être surchargé de 10 à 15 p. 100.

Capacité en tonnes		1	2	3	4	6	10	15	20	25	30	
Nombre d'opérations complètes par 24 heures (8)	charge solide	chargement manuel	7-8	6-7	6-7	5-6	4-5	4-5	4-5	3-4	3-4	3-4
		chargement automatique			7-8	7-8	5-6	5-6	5-6	4-5	4-5	4-5
	charge liquide (duplex)						10-11	10-11	9-10	9-10	9-10	
Consommation d'énergie électrique en marche continue (charge solide) en kWh : t (9)	four basique	910	830	800	770	755	705	680	670	665	660	
	four acide	620	555	530	505	495	470	455	450	445	440	
Consommation d'énergie électrique en marche continue (charge liquide introduite à 1450°C environ, four basique) en kWh : t (10)		285	270	265	255	290	225	220	210	205	205	
Consommation d'électrodes (graphite) en kg : t (11)		5,45 à 6,35	5 à 5,8	4,8 à 5,6	4,6 à 5,4	4,5 à 5,3	4,2 à 4,9	4,1 à 4,5	4 à 4,7	4 à 4,65	3,95 à 4,6	

8. Opération complète : chargement + fusion + affinage + coulée (en charge solide);
chargement + affinage + coulée (en charge liquide).

9. Valeurs se rapportant au chargement manuel et données à ± 5 p. 100, tant pour charge solide que pour charge liquide. Pour les fours à chargement automatique (charge solide), diminuer les consomm. de 50 à 70 kWh : t. En gros, l'affinage représente à peu près le 1/3 de la consommation; celle-ci est évidemment fonction de la durée de l'affinage et le rapport précédent ne doit pas, bien entendu, être pris d'une façon absolue. Pour les fours acides, pas d'affinage; les nombres donnés sont plus théoriques que pratiques (peu de fours en service); mais ils donnent un ordre de grandeur.

10. La remarque (9) s'applique ici. Pratiquement, la temp. de la charge est de 1450-1550°C et on l'élève jusqu'à 1600°C par ex., pour la coulée; les nombres donnés correspondent à la montée à la temp. désirée pour la coulée et aux pertes thermiques (maintien de la charge en temp.).

11. Compter en moyenne de 6 à 7 kg : 1000 kWh.

CARACTÉRISTIQUES DE FONCTIONNEMENT
D'UN CERTAIN NOMBRE DE FOURS TRIPHASÉS,
EN SERVICE POUR FUSION D'ACIER

Capacité t	Puissance individuelle kVA	Tension secondaire V	Intensité usuelle A	Nature des élec- trodes	Diamètre des élec- trodes	Cons. d'électrodes kg : t (1)	Cons. d'én. él. kWh : t
2 × 10 à 12	2 × 2800	63 - 78	10 000	S	450	13,5	900
3 à 4		65 - 145	4 500 - 4 800	G	200	8	1 050 - 1 300
3,5	1 200	63 - 140	—	G	200	5,7	765
0,5 - 1,5	250 - 350	90 - 100	2 000 - 3 000	G	130	6	1 000
1,5		80 - 100	3 000	G	150	6	500
3 à 4	750	100 - 110	5 000	A	360	25	650
10 à 12	3 100	70 - 180	10 000	G	300	6,7	700
3		130	6 000	A	300	20	750
1,5	600	69 - 102	3 000	G	130	8,5 - 9,5	800 - 900
7 à 10				S	500	16 - 17	900 - 1 000
12 à 15 (2)	4 000 - 4 500	110 - 175	—	G	350	2 - 2,2	190 - 200
3	1 000	56 - 194	4 000 - 5 000	G	200	5,5 - 7,5	800 - 1 100
20		88 - 210	15 000	G	400	7 - 8	
13		75 - 180	11 300	G	300	9	1 040
1	700	90 - 125	3 600	G	150	7	1 050
6 à 7	1 800	70 - 165	8 000	G	250	5 - 7	875
10		92 - 140	8 000	G	300	5 - 6	850
20		220 max.		G	400	8	645
20 (2)	4 500	132	12 000	G	350	2 - 2,5	200 - 250
4				G	200	8	800
0,3	150	32 - 40	2 000 - 2 400	G	100	6	900
6	1 800	156	7 000	G	225	7	685
4	700	142 - 165	10 000	G	225	5 - 5,5	
3	1 200	60 - 140	5 000 - 6 000	G	200	5,5	725
3	1 200	80 - 172	5 000	G	200	7,5	870
1 à 1,5	550	42 - 112	4 000	G	150	6	1 000
4	800	63 - 135	4 500	G	175	6	865
4				G	200	6	750 - 780
2	850	90 - 110	4 500	G	150	12	880
20 (2)	4 200	74 - 190		G	350	2,5 - 3	435
1	500	90 - 160	2 000	G	150	3 - 4	870
4 à 5	1 400	87 - 165	5 000	G	200	7	900
3 à 4	650			G	300	8	
4 à 5	1 400	60 - 180		G	250	7,5	850 - 925
3 à 4	750			A	360	22	
1,2		110 - 180	4 000	G	200	8	750
20 ²				G	400	2,5 - 2,8	250
5	1 500	90	4 000	G	225	7,2 - 9,4	600 - 780
3	900	90 - 130	5 500	G	200	7 - 9	1 200

(1) G = graphite, A = amorphe, S = Söderberg.

(2) Charge liquide.

Capacité en tonnes		1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	
Tension maximum (secondaire du transformateur) en V (1)	four basique	marche solide (2)	150	165	180	190	200	220	250	275	300	320
		marche liquide (3)						195	220	240	265	280
	four acide (4)	190	205	220	235	245	270	300	325	350	370	
Intensité du courant dans le four en A	charge solide (5)	chargement manuel	2 700	4 200	4 500	5 500	6 000	9 200	11 000	13 000	14 500	16 000
		chargement automatique			5 500	6 100	7 000	10 800	13 400	15 800	18 000	20 000
	charge liquide						7 400	9 200	10 600	11 800	13 000	
Durée habituelle de la fusion (en partant d'une charge froide, four chaud) en marche continue en mn (6)	chargement	manuel	95	105	110	120	130	150	160	170	180	190
		automatique			98	96	105	120	125	130	135	140
Durée habituelle de l'affinage en marche continue four chaud en mn (7)	charge	solide	60	60	65	70	75	95	110	115	120	120
		liquide (duplex)						95	110	115	120	120

2. 10 à 12 tensions secondaires.

3. 6 tensions secondaires.

4. 8 à 12 tensions secondaires ; le four acide est peu répandu jusqu'à présent.

5. Valeurs nominales ; pendant la fusion, les transformateurs sont capables d'une surcharge de 10 à 15 p. 100.

6. Valeurs approximatives ; les durées réelles dépendent en particulier de la constitution de la charge.

7. Durée très variable en pratique, car elle dépend de la nature de l'affinage.

(Suite page 22.)

En première approximative, on peut admettre les cons. moyennes suivantes pour les fours usuels :

Métal (charge solide)		Cons. d'én. él. en kWh : t	Cons. d'élec. (graphite) en kg. : 1000 kWh
acier	fusion et affinage...	650-950	6-7
	fusion seule.....	550-650	
	affinage seul (consommation par heure)...	100	
fonte		500-600	6-7

Pour les fours à charge solide et à chargement rapide, les cons. sont moindres (diminution de 50 à 70 kWh : t pour l'acier).

Il est préférable d'évaluer la cons. d'électrodes en kg par 1 000 kWh, cette cons. étant assez bien déterminée (67 kg par 1 000 kWh) ; par contre la cons. en kg par tonne de métal coulé dépend essentiellement de la nature du métal traité.

La durée des voûtes (silice) dépend beaucoup des conditions de travail ; elle est de l'ordre de :

- pour les fours basiques (déchets d'acier de toute nature) : 100 à 250 coulées pour les fours à charge manuelle et 50 à 100 coulées pour les fours à chargement automatique.
- pour les fours acides (déchets d'acier de qualité) : 200 à 300 coulées.

Les pertes à la fusion peuvent être évaluées comme suit :

au cubilot	20 p. 100
au four Martin	6 p. 100
au four à arcs	3 p. 100

en partant de charges à base de riblons.

Nous donnons, à titre indicatif, dans le tableau de la page 23, les caractéristiques de fonctionnement d'un certain nombre de fours à arcs triphasés type Héroult à marche continue, pour fusion d'acier, en service en France. Il apparaît nettement que les résultats sont assez variables et dépendent non seulement des caractéristiques et de l'ancienneté des fours, mais encore essentiellement des conditions de travail.

Le nombre des fours à arcs triphasés d'électrosidérurgie en service en France fin 1944 est de l'ordre de 135 (compte non tenu des fours pour les ferros spéciaux) tant pour l'acier que pour la fonte.

β) Fours monophasés.

Ces appareils sont, en général, d'utilisation relativement récente en France.

Tableau de la page 25.

CARACTERISTIQUES HABITUELLES DES FOURS
 MONOPHASES A TAMBOUR OSCILLANT (ACIER),
 AVEC DEUX ELECTRODES AXIALES EN REGARD :

Capacité en kilos...	80	125	250	500	1 000	1 500
Puissance du transformateur en kVA.	115	150	240	400	630	825
Diamètre des électrodes (graphite) en mm.	75	100	130	150	175	200
Section des électrodes en cm ²	44	78	132	177	240	314
Densité de courant en A:cm ²	14	12,5	14	15,2	15,4	14,7
Tension secondaire en V.....	110	120	130	150	170	180
Intensité du courant en A.....	1 045	1 250	1 845	2 700	3 700	4 600
Durée d'une fusion (en partant d'une charge froide, four chaud) en marche continue, en mn..	50	70	80	90	110	130
Durée de l'opération (duplex) en marche continue, en mn..	30	30	30	30	30	—
Nombre d'opérations complètes par 24 heures.....	20	18	12	10	8	7
Cons. d'én. él. en marche continue (charge froide) en kwh:t.....	850	800	780	750	700	650
Cons. d'én. él. en marche continue (duplex ; acier liquide à 1 450° C environ) en kwh:t.	—	—	200	180	150	150
Cons. d'électrodes en kg:1 000 kwh..	6	6	6	6	6	6
Cons. de pisé (sillimanite ou magnésie ordinaire) en kg:t.....	50 100	50 100	50 100	50 100	50 100	50 100

La consommation d'eau de refroidissement est de 150 à 200 litres par heure.

Le facteur de puissance moyen est de l'ordre de 0,85.

Pour la fonte, les puissances sont à diminuer d'environ 20 p. 100 et les consommations d'énergie électrique et d'électrodes sont à réduire à peu près dans le même rapport.

En résumé, on peut adopter en première approximation les valeurs moyennes suivantes :

Métal	Cons. d'én. él. (1) kWh: t	Cons. d'électrodes kg: t	Cons. de pisé	
			sillimanite ou neutre kg: t	ordinaire kg: t
Acier	750	4	50	100
Fonte	600	3,3	30	50
Acier ou fonte (duplex)	150-200	0,5-2	10-25	—

(1) Avec four chaud. Pour un départ avec four froid, ajouter environ 50 p. 100 pour la première fusion.

La durée du revêtement est de l'ordre de 180 à 200 coulées pour l'acier et de 200 à 300 coulées pour la fonte. Le revêtement peut être basique ou acide.

Les pertes au feu sont de l'ordre de 3 p. 100.

Le nombre de fours de ce type en service en France fin 1944 est de l'ordre de 25 tant pour l'acier que pour la fonte, en général d'une puissance unitaire de 400 kVA. (500 kg.)

2° Fours à induction avec noyau magnétique fermé. (basse fréquence).

a) Fours à canal horizontal.

Peu utilisés en France ; pratiquement, on n'en construit plus.

Inconvénients : obligation de démarrer avec une première charge liquide ; durée très longue des opérations ; mauvais rendement ; faible facteur de puissance ; frais de premier établissement élevés (convertisseur de fréquence coûteux) ; nécessité de maintenir un anneau de métal liquide ; activité chimique médiocre du laitier ; décrassage incommode ; difficulté d'obtenir dans certains cas la température optimum (coulée d'acier doux).

Avantage : consommation d'énergie électrique moindre qu'avec le four à arcs (10 à 15 p. 100 en moins).

Caractéristiques données ci-après pour mémoire :

Capacité (1) t	Puissance kW	Fréquence pps	Cos φ
0,6	145	50	0,53
1,2	225	25	0,66
2	320	15	0,70
3	420	12	0,70
6	690	8	0,68
10	1 020	6	0,67

(1) On a construit des fours de 15 à 20 t.

β) Fours à canal submergé.

Non utilisés industriellement (recherches en cours pour l'affinage de la fonte liquide : demanderaient seulement 60-80 kWh : t de métal surchauffé de 200°C et assureraient une grande précision de la composition chimique du métal).

3° Fours à induction sans noyau magnétique fermé.
(haute fréquence).

α) Fours avec générateur à alternateur.

Avantages : rapidité de la fusion ; homogénéité de l'alliage (effet du brassage électromagnétique) ; contrôle précis de la température ; possibilité d'obtenir des aciers à faible teneur en carbone ; réduction des pertes au feu ; souplesse de marche (marche discontinue sans inconvénient) ; faible consommation (moindre qu'avec les autres fours) ; faible dépense d'exploitation (énergie électrique, réfractaires, main-d'œuvre) ; carburation non à craindre (pas d'électrodes) ; par contre, laitiers moins chauds.

Utilisés surtout pour les aciers dits « au creuset » et les aciers inoxydables.

Caractéristiques des fours industriels usuels :

Capacité kg	Puissance kW	Fréquence pps	Durée de l'opération h	Cons. d'én. élec. kWh : t
250	150	2 200	1	600-800
500	150	1 000	2 1/2	600-800
500	300	1 000	1	600-750
1 000	300	1 000	2 1/2	575-750
1 500-2 000	400	1 000	2 3/4	550-700
5 000	1 250	1 000	3	530-700

Le tableau suivant donne un relevé de marche d'un four de 500-600 kg, avec générateur à alternateur de 300 kW, pour six opérations avec départ à froid (2 coulées d'acier au carbone et 4 coulées d'acier rapide au tungstène) :

Poids d'acier kg	Durée de l'opération mn (1)	Cons d'én. él. kWh:t
500	93	620
500	70	604
627	77	555
627	78	572
627	73	563
627	70	545

(1) Les temps morts entre les opérations successives sont de l'ordre de 9 à 14 mn (moyenne de 11 mn).

Le facteur de puissance est amené à l'unité au moyen de condensateurs statiques.

A notre connaissance, le four HF le plus important qui ait été construit jusqu'à présent a une capacité de 10 t. En France, on signale des fours de 6-7 t, 1 600 kW ; l'installation des fours à induction les plus importants comporte actuellement 10 fours d'une puissance globale de 3 950 kVA pour la fusion d'aciers spéciaux. (L'aciérie considérée dispose aussi de 2 fours à arcs — 7 000 kVA).

Le nombre de ces fours en service en France, fin 1944, pour la fusion des alliages ferreux est d'environ 60.

β) Fours avec générateur à éclateur.

Avantages : possibilité d'obtenir des fréquences élevées, interchangeabilité facile des fours, simplicité et robustesse, économie de premier établissement ; d'où emploi dans les laboratoires.

Caractéristiques de quelques fours (pour tous essais de laboratoires).

Capacité kg	Puissance kW	Durée de la coulée h	Ordre de grandeur de la fréquence pps
6	12,5	1	60 000
10	20	1	40 000
25	30	1 1/2	30 000
40	50	1 3/4	20 000

Le nombre des appareils en service en France, fin 1944, pour tous essais et recherches de laboratoires, est d'environ 80.

4° Fours à résistance.

Principaux avantages : commodité d'emploi ; facilité de conduite ; faible consommation d'énergie électrique (intérêt pour les petites et moyennes capacités) ; pas d'à-coups de courant ; facteur de puissance excellent.

Type : Pratiquement, fours à rayonnement à tige axiale de graphite, à tambour oscillant, alimentés par transformateurs spéciaux, d'utilisation généralement récente et dont les caractéristiques usuelles sont données dans le tableau ci-après :

Capacité kg	Puissance maximum kVA	Durée de la fusion mn	
		aciers	fontes
100	100	50	40
200	175	55	40
300	225	60	50
500	325	70	55
1 000	525	85	65

Consommations : Les cons. sont les suivantes, pour une marche continue (four chaud) avec charges froides :

Métaux	Aciers	Fontes
Tem. max. de coulée en ° C.....	1 700	1 500
Cons. d'énergie élect. en kWh:t...	800-900	500-600
Cons. d'électrodes en kg:t.....	2-2,5	1,5
Cons. de pisé d'usure zirconal en kg:t.	15-20	8-10

Pour la marche en duplex, surchauffe seulement, sans addition d'autres métaux, les données sont les suivantes :

Temp. de coulée.....	1 450°C
Temp. du métal introduit	1 200°C
Cons. d'én. él.	= 150 kWh : t
Cons. d'électrodes	= 0,5 kg : t
Cons. de pisé	= 4-6 kg : t

Pour une marche discontinue, prévoir une augmentation de :

Métal	Nombre de fusions par jour	Augmentation en kWh : t
Acier	6	80-90
	8	60-75
Fonte	6	60-70
	8	40-50

La cons. d'eau dépend essentiellement de la capacité du four et surtout de la temp. de l'eau à l'entrée. Compter sur :

300 l : h pour les fours de 100 kg

1 200 l : h pour les fours de 1 000 kg.

Les pertes au feu sont pratiquement négligeables dans le four, sauf pour le manganèse sur pisé neutre (800 gr : t d'alliage au Mn enfourné).

Le facteur de puissance est voisin de l'unité.

La durée du revêtement est de l'ordre de 300 coulées pour l'acier et de 500 coulées pour la fonte.

La nature du pisé a une grande importance selon les métaux à obtenir ; par ex., pour les aciers à 14 p. 100 Mn, la durée sera de plus de 100 coulées pour le pisé basique et de 80 coulées pour le pisé acide.

Quelques données particulières :

Alliage	Capacité kg	Puis- sance de régime kVA	Temp. de coulée °C	Cons. d'én. él. kWh : t	Cons. de graphite (électrode, pièces d'usure) kg : t	Pertes au feu p. 100
Fonte malléable : C = 2,45 ; Si = 1,14 ; Mn = 0,41	1 600	500	1 520	650	2	1
Fonte pour segments d'aviation : Ni - Cr - Cu	500	260	1 430	580	2	1,2
Fonte à segments : C = 3,2	300	180	1 400	520	2	1,5
Spiegel : Mn = 8-10 ..	500	260	1 300	460	1,8	2
Acier réfractaire de moulage : C = 0,20 ; Cr = 30	1 000	460	1 700	960	3	1,5
Aciers divers	1 000	375	1 600	850	2,8	1,5
Aciers divers	300	180	1 600	840	3	1,3
Acier rapide : C = 1 ; Cr - Va - Cu	1 600	110	1 600	900	2	1

Le nombre de fours de ce genre en service en France, fin 1944, pour la fusion des alliages ferreux, est de l'ordre de 25.

5° Appareils spéciaux.

Découpage électrique. Voir pages 78 et 79.

Cas particuliers. Ex. : Coupure de câbles métalliques (dans l'industrie automobile par ex.) au moyen d'une machine par rapprochement: on chauffe le métal à l'endroit à couper, jusqu'à fusion ; on évite ainsi le déroulement des brins du câble, après sectionnement.

b) Nickel et alliages nickel-chrome.

Aux aciers se rattachent les alliages de nickel et de chrome, avec ou sans fer.

Températures de fusion	}	fer	: 1 520 °C.
		nickel	: 1 451 °C.
		chrome	: 1 553 °C.
		cobalt	: 1 477 °C.
		nickel-chrome	: 1 350-1 475 °C.
		fer-chrome-aluminium	: 1 500-1 540 °C.
		inconel	: 1 390 °C.

Températures usuelles de coulée	}	nickel	: 1 500 °C.
		nickel-chrome	: 1 550 °C.
		fer-chrome-aluminium	: 1 625 °C.

Fours usuels : fours à arcs et fours à induction HF.

Avantages: absence d'impuretés sulfureuses (Ni), élaboration de produits bien désoxydés et très homogènes (étriage de fils fins), fusion sous vide éventuellement (four à induction).

Quelques données :

Métal	Nature du four	Capacité du four kg.	Cons. d'én. él. kWh:t
Nickel.....	induction HF....	200-300	700
Nickel.....	arc.....	—	900
Nickel.....	arc (mono) (1)...	500	625
Nickel.....	arc (anc. modèle)	300	900-960 (2)
Nickel-chrome	induction HF (3).	180	640
Nickel-chrome	arc.....	—	700
Métal monel..	arc.....	100	700-800
Métal monel..	arc (mono) (4)...	500	570

(1) Cons. pour chargement en four chaud; cons. d'électrodes (graphite) = 4 kg:t; cons. de sillimanite : 50 kg:t.

(2) 900 (marche continue); 960 (marche intermittente).

(3) Puissance : 150 kW.; temp. : 1 650 °C.

(4) Cons. pour chargement en four chaud; cons. d'électrodes (graphite) = 3,5 kg:t; cons. de sillimanite : 40 kg:t.

c) Cuivre et alliages cuivreux.

Composition des principaux alliages.

Désignation	Constituants essentiels
Laiton.....	Cuivre-zinc
Bronze.....	Cuivre-étain
Cupro-aluminium.....	Cuivre-aluminium
Cupro-nickel.....	Cuivre-nickel

Aux alliages binaires précédents correspondent des alliages spéciaux ternaires ou plus complexes obtenus en ajoutant aux deux métaux de base un ou plusieurs autres corps. Ex. : laitons au plomb. Il existe également d'autres alliages industriels : cuivre — or ; cuivre — argent ; cuivre — nickel — zinc (mailechort); etc.

Composition en p. 100 des principaux alliages industriels.

Métaux de base	Désignation de l'alliage	Composition en p. 100 (1)
Cu + Zn	laitons ordinaires } barres et fils planches tubes pièces moulées brasure	de 90/10 à 58/40 (avec 2 Pb). de 72/28 à 60/40, notamment 67/33 et 60/40. 65/35 et 70/30. de 90/10 à 63/37. de 67/33 à 40/60.
	laitons spéciaux } à l'étain au manganèse à l'aluminium au fer au nickel	Cu: 62-62, Zn: 37-36,5, Sn: 1-1,5. Cu: 60-56, Zn: 39-40, Mn: 1-4. Cu: 69-65-60, Zn: 29-32-39, Al: 2-3-1. Cu: 60-55, Zn: 38-43, Fe: 2-2. Cu: 50-46-40, Zn: 43-43-45, Ni: 7-11-15.
Cu + Sn	bronzes ordinaires } valeurs extrêm. pièces de décol- letage pièces de méca- nique robinetterie	de 97/3 à 65/35. 95/5. 90/10. 87/13.
	bronzes spéciaux } au plomb au phosphore au zinc	Cu: 84 à 68, Sn: 8 à 2, Pb: 8 à 30. Cu: 95 à 82, Sn: 5 à 18, P (traces). Sn: de 2-10 (mécanique) à 27 (statues).

(1) Sauf indication contraire, le premier nombre se rapporte au Cuivre, le second au deuxième métal de base (Zn ou Sn).

Métaux de base	Désignation de l'alliage	Composition en p. 100
Cu + Al	bronzes d'aluminium à haute teneur en Cu	Cu au-dessus de 88.
	cupro-aluminium à basse teneur en Cu	(voir alliages légers).
	bronzes d'aluminium spéciaux	avec Mn (jusqu'à 3,78) ou Fe (jusqu'à 4).
Cu + Ni	cupro-nickels ordinaires constantan	Cu : 98-70, Ni : 2-30. Cu : 60-45, Ni : 40-55.
	alliages cuivre-nickel-aluminium	Cu : 79-82, Al : 2,5-11, Ni : 5-14,5.
	maillechorts (Cu + Ni + Zn)	Cu : 60-50, Ni : 20-18, Zn : 20-32.
Cu + Mn	maillechorts complexes (vaisselle de luxe)	Ag ou Zn et éventuellement Fe, Sn, Tu.
	métal monel	Cu : 28-30, Ni : 66-67, Fe : 3.
	cupro-manganèse	Cu : 70-65, Mn : 30-35.
résistances électriques		Cu : 70, Mn : 30, Fe : 0,3-1.
		Cu : 48, Mn : 10, Ni : 39.
	manganine	Cu : 70-85, Mn : 12-25, Ni : 2-5.

(1) Sauf indication contraire, le premier nombre se rapporte au cuivre, le second au deuxième métal de base (Zn ou Sn).

Température de fusion des principaux constituants (°C) :

cuivre	1 082	argent	962	chrome	1615-1553
zinc	419	platine	1780-1775	cadmium	322
étain	232	magnésium	650	silicium	1 420
aluminium	657	manganèse	1240-1228	cobalt	1 477
nickel	1 451	fer	1 520	arsenic	850
or	1 064	plomb	327	phosphore	44

Températures théoriques de fusion des principaux alliages.

Laitons ordinaires industriels (minimum de 55 p. 100 de Cu).....	890-1 082 °C
Bronzes ordinaires industriels (minimum de 75 p. 100 de Cu).....	790-1 082 °C
Cupro-aluminiums (minimum de 88 p. 100 de Cu).....	1 031-1 082 °C
Cupro-aluminiums (maximum de 20 p. 100 de Cu).....	600- 650 °C
Cupro-nickels (75-80 p. 100 Cu + 25-20 p. 100 de Ni).....	environ 1 200 °C
Métal monel.....	1 360 °C.

Températures usuelles de coulée.

Cuivre : supérieure à 1 100 °C

Laitons : supérieure à 1 050 °C

Bronzes : 1 250 °C, voire davantage.

Maillechorts : jusqu'à 1 300 °C (pour 20 p. 100 de Ni)

Cupro-Nickel : jusqu'à 1 300 °C (pour 70/30 et 75/25)

Métal monel : 1 500 °C

Fours les plus fréquents.

Cuivre : fours à induction BF, fours à résistances

Laitons : fours à induction BF

Bronzes : fours à résistances, fours à induction BF ou HF

Maillechorts : fours à induction HF et BF

Cupro-nickels : fours à arcs, fours à induction HF

On a surtout recours à des fours à induction BF à canal submergé qui supplantent de plus en plus les fours à arcs. En laitonnerie, le four BF est l'appareil idéal et il tend à être le seul four employé. Pour les bronzes et les cupro-nickels, il y a concurrence entre le four à résistances, le four à induction HF et le four à arcs.

1° Fours à induction à noyau magnétique fermé.

(Basse fréquence: 50 pps).

Principaux avantages : réduction importante des frais de main-d'œuvre ; réduction considérable des pertes au feu (pas de surchauffe) ; réduction des dépenses de réfractaire ; réduction de la consommation d'énergie électrique ; grande facilité de conduite.

Inconvénients : sujétion de maintenir un canal liquide (ceci n'est pas gênant en marche continue pour la production d'alliages de titre constant = cas des laitonneries en général) ; tenue délicate à assurer pour le réfractaire aux hautes températures (bronzes par ex.).

Four parfait pour le laiton (longues campagnes de production avec un titre donné, généralement 60/40, 67/33, 78/22) ; récemment adopté pour le bronze (surtout à l'étranger).

Pisé siliceux (laitons de décolletage), extra-siliceux (laitons de premier titre), alumineux (bronzes et cuivre).

Caractéristiques usuelles des fours de laitonerie utilisés en France :

Capacité (kg)	Puissance (kW)	Cos φ
150	40	0,80
300	60	0,80
600	120	0,75
1 200	240	0,75

Puissance nécessaire pour la marche en veilleuse (entretien du canal liquide) = 10 à 15 p. 100 de la puissance nominale.

Pour la production continue de laiton au moyen des fours les plus courants (300 et 600 kg), on peut admettre en première approximation :

une cons. d'énergie électrique de 200 à 240 kWh : t
 un garnissage réfractaire par 1 000 tonnes de métal fondu.

La durée de fusion en marche continue est de l'ordre de 50 à 70 mn.

La cons. d'énergie électrique dépend évidemment de la capacité du four, du titre de l'alliage et des conditions de travail. A titre d'exemples comparatifs, on a donné les nombres suivants pour du laiton à 60/40 :

350 kWh : t pour une marche discontinue,

235 kWh : t pour une marche continue (four de 250 kg),

220 kWh : t pour une marche continue (four de 1 000 kg).

Le tableau suivant, relatif à du laiton jaune et à un certain type de fours, complète les indications précédentes =

Capacité kg	Puis. kW	Cos φ	Nature du courant (1)	Production (2) de laiton en kg pour un travail quotidien de		Cons. d'én. él. pour un travail continu kWh : t (3)
				8 h	24 h	
100	30	0,85	M	600	2 000	230
300	60	0,80	M	1 800	6 000	220
600	120	0,75	T	3 600	12 000	210
1 000	180	0,70	T	6 000	20 000	200
1 500	300	0,70	T	9 000	30 000	190
2 000	400	0,65	T	12 000	40 000	180

(1) M = monophasé, T = triphasé.
 (2) Durée de fusion de 50 — 60 mn.
 (3) Cons. à augmenter de 15 p. 100 pour du laiton rouge, de 25 p. 100 pour du bronze et de 35 p. 100 pour du cuivre.

On a publié les résultats ci-après :

Métal	Cons. d'én. él. (kWh : t)	Nomb. de coulées en 24 h.	Durée du revêtement (nombre de coulées)	Pertes par volatili. p. 100
Cuivre	315-330	14-16	600-800	—
80 p. 100 Cu - 20 p. 100 Ni	350-400	14-16	600-800	—
85 p. 100 Cu - 15 p. 100 Zn	260-270	17-18	2 000	—
72 p. 100 Cu - 28 p. 100 Zn	210-225	18-20	2000-3000	0,5 - 0,8
63 p. 100 Cu - 37 p. 100 Zn	200-215	20-21	2000-3000	0,5 - 0,8
58 p. 100 Cu - 40 p. 100 Zn 2 p. 100 Pb	190-200	20-22	2000-3000	0,8 - 1
62 p. 100 Cu - 22 p. 100 Ni 16 p. 100 Pb	300-320	14-16	600	1
96,9 p. 100 Cu - 3 p. 100 Zn 0,05 p. 100 Pb	315	15	600-800	—

Le tableau suivant se rapporte à des charges de 300 kg :

Métal	Produits fabriqués	Cons. d'én. él. kWh : t	Puissance en veilleuse kW	Pertes ou feu p. 100
Bronze 85-5-5-5	robinets	225	12	0,4
Laiton 67-33	billettes	200	8	0,3 - 0,6
Maillechort	planches	300	13	0,6
Laiton 75-20-2-3	robinets	210	8	0,5
Bronze 95-5	barres	290	12	0,7
Cuivre pur	billettes	320	14	néglige.

A notre connaissance, le nombre de fours BF en service en France pour la fusion des alliages cuivreux est actuellement (fin 1944) d'environ 170.

A notre connaissance également, l'installation de fusion de laiton actuellement la plus importante de France comporte 17 fours d'une puissance totale de 1 725 kVA environ.

2° Fours à induction sans circuit magnétique fermé. (Haute fréquence).

Principaux avantages : très grande rapidité de la fusion (diminution des risques d'oxydation) ; homogénéité de l'alliage (effet du brassage électromagnétique) ; contrôle précis

de la température ; réduction des pertes au feu ; souplesse de marche (marche discontinue sans difficulté) ; réduction des dépenses de réfractaire et de main-d'œuvre ; réduction de la consommation d'énergie électrique.

Inconvénient : prix d'achat relativement élevé.

Adoptés notamment pour les cupro-nickels, les bronzes au plomb et à l'aluminium (rapidité de la fusion, brassage, temp. élevée).

Quelques données pratiques :

Métal	Ordre de grandeur de la fréquence pps	Capacité du four kg	Puissance du four kW	Durée de la fusion mn	Cons. d'én. él. kWh : t
Cupro-nickel (70/30 et 75/25) et métal monel.....	2 000	250	150	60	600
Bronze au plomb...	2 000	4	40	4	400
Bronze d'aluminium	1 000	500	150	90	500

Les fours HF sont moins répandus que les fours BF pour la fusion des alliages cuivreux ; à notre connaissance, il y a actuellement (fin 1944) en France une dizaine de fours en service pour cet usage.

3° Fours à arc.

Les fours à arc sont à déconseiller pour les fusions des alliages ayant une forte proportion (par exemple 15 p. 100 et au-dessus) de métal très volatil (zinc, étain, plomb), même compte tenu de l'interposition d'une couche de scories ; de plus, la fusion sur sole se prête mal aux changements de titres.

On n'utilise guère en France que deux types de fours à arc dans ce domaine :

le four fixe diphasé à arc en « fleur de lis »,

le four à arc rayonnant monophasé, oscillant.

D'autres types de fours ont été utilisés et le tableau de la page 38 donne quelques indications à ce sujet.

Quelques consommations pour des cas particuliers, renseignements donnés à titre documentaire :

Métal	Consom. kWh:t	Marche	Type de four	Observations
Cuivre pur	420	intermittente	ordinaire (300 kg)	(1)
Cuivre pur	380	continue	ordinaire (300 kg)	(1)
Cuivre	300	continue	oscillant (800 kVA)	
Laiton 60/40	400	intermittente	ordinaire	
Laiton 78/28	390	intermittente	ordinaire (300 kg)	(1) (2)
Laiton 78/28	350	continue	ordinaire (300 kg)	(1) (2)
Laitons	230	continue	ordinaire (1000 kg)	
Laitons	225	continue	ordinaire (170 kg)	
Bronzes 82/12	320	four chaud	mono. oscillant (500 kg)	(3)
Bronzes	350	intermittente	arc en fleur de lis (600 kg)	(4)
Bronzes	280-325	continue	oscillant (800 kVA)	(5)
Bronzes au Pb et Zn	275-320	intermittente	mono. oscillant (150 et 450 kg)	(6)
Bronzes 85-15	390	intermittente	ordinaire (300 kg)	(1) (7)
Bronzes 85-15	350	continue	ordinaire (300 kg)	(1) (7)
Cupro-nickel à 25 p. 100 Ni	450	four chaud	mono. oscillant (500 kg)	(8)
Cupro-nickel à 25 p. 100 Ni	650	intermittente	ordinaire (300 kg)	
Cupro-nickel à 25 p. 100 Ni	700	intermittente	ordinaire (300 kg)	(1)
Cupro-nickel à 25 p. 100 Ni	650	continue	ordinaire (300 kg)	(1)
Cupro-nickel à 40 p. 100 Ni	750	intermittente	ordinaire (300 kg)	(1)
Cupro-nickel à 40 p. 100 Ni	700	continue	ordinaire (300 kg)	(1)
Maillechort 60/22/18	550	intermittente	ordinaire (300 kg)	
Maillechort 60/20/20	600	intermittente	ordinaire (300 kg)	(1)
Maillechort 60/20/20	550	continue	ordinaire (300 kg)	(1)

(1) Four d'un type ancien, horizontal, à 2 électrodes réglables et 1 électrode fixe en contact direct avec le bain de métal.

(2) Fusion des métaux composants. Pour fusion de déchets, les cons. deviennent respectivement 430 et 390 kWh:t.

(3) Cons. de 2 kg d'électrodes en graphite et de 30 kg de pisé ordinaire par tonne de métal fondu.

(4) Bronzes de coussinets et de robinetterie; cons. de 4 kg d'électrodes pour 1000 kWh; durée de 250 fusions pour les voûtes en briques de silice.

(5) Cons. d'électrodes de 4 à 5 kg:t de métal fondu.

(6) Alliages 80 p. 100 Cu + 2 p. 100 Sn + 10 p. 100 Pb + 8 p. 100 Zn et 82 p. 100 Cu + 4 p. 100 Sn + 9 p. 100 Pb + 5 p. 100 Zn. Dans les mêmes conditions, on a une cons. de 340 kWh : t pour l'alliage : 79 p. 100 Cu + 2,25 p. 100 Sn + 10 p. 100 Pb + 8 p. 100 Zn + 5 p. 100 Ni.

(7) Fusion des métaux composants. Pour fusion de déchets, les cons. deviennent respectivement : 400 et 360 kWh:t.

(8) Cons. de 2,8 kg d'électrodes en graphite et de 40 kg de pisé sillimanite par tonne de métal fondu.

A titre indicatif, le tableau ci-après donne quelques caractéristiques de fours à tambour horizontal, à électrodes axiales.

Capacité kg	Puissance kVA	Production en 24 h. kg	Cons. d'én. él. kWh:t (1)
50	75	1 250	330
150	100	3 750	320
250	150	5 500	300
500	200	10 000	280
1 000	350	18 000	270

(1) Pertes au feu de l'ordre de 0,7 — 1,5 %

4° Fours à résistances.

α) Fours à rayonnement à tige de graphite.

Four à rayonnement monophasé à tige axiale de graphite, à tambour oscillant, alimenté par transformateur spécial; employé surtout pour le bronze.

Capacité kg	Puissance maximum kW	Durée de la fusion (bronze à 1300° C) mn
100	80	30
200	130	37
300	150	50
500	200	60
1000	325	60

Cons. d'én. él. : 240-300 kWh : t.

Cons. d'électrodes (graphite) : 0,75 kg : t.

Cons. de pisé d'usure zirconal : 3-4 kg : t.

Un garnissage permet d'effectuer en moyenne 1 000 coulées ;

Cas particuliers : 1° Fusion de bronze au phosphore 87,5 — 12 — 0,5 ; four de 600 kg ; 310 kWh : t ; 1,25 kg de graphite par t ; 4 kg de réfractaire par t ; 1 015 coulées par garnissage ; pertes au feu de 0,6 p. 100.

2° Fusion de bronze au glucinium ; four de 1 t ; 400 kW ; 1 250°C ; 290 kWh : t ; 1,6 kg de graphite par tonne ; pertes au feu de 1,5 p. 100.

Ces fours sont également utilisés pour le cuivre et le laiton. Pour le laiton à 60/40, admettre une cons. de 600 kWh : t en marche continue et de 410-440 kWh : t en marche discontinue, pour un four de 1 000 ou de 250 kg.

Fin 1944, 4 fours de ce type sont en service en France pour la fusion des alliages cuivreux.

β) Autres types de fours.

Nous les indiquons pour mémoire, car ils sont peu ou pas utilisés en France et tendent, semble-t-il, à disparaître à l'étranger.

Four Baily (résistor constitué par des morceaux de charbon) :

Capacité (kg)	Puissance (kW)
250	50
375	75
750-1 000	105

Four Morgan (creuset chauffant en aggloméré à base de carbone, — 16-32 V).

Ex. 1° Capacité de 75 à 100 kg de laiton ; puissance de 30 kW ; tension de 30 à 15 V ; première fusion en 90 mm, deuxième en 75 mm, suivantes en 60 ou 50 mm ; 570 kWh : t ; durée du creuset : 75 fusions.

2° Fusion de bronze ; 30 kW ; durée du creuset : 60 coulées (marche continue), 45-50 coulées (marche discontinue).

Four Hopskins (résistance en plaques de graphite) pour petites quantités de métal.

Les tableaux comparatifs suivants complètent les indications précédentes :

Fours	Cons. d'én. él. pour laiton kWh : t		Pertes max. à la fusion p. 100
	marche continue (24 h : j)	marche discontinue (8-10 h : j)	
Baily	440	600	1,5
Morgan	475	570	1,5
Ind. BF	275	350	0,5
Arc mouv. oscillant ou rotatif	350	400	1-2
Arc triphasé fixe (ancien modèle) ...	400	430	2

Four	Pertes à la fusion (1) p. 100
A résistance auxiliaire.....	1,4
A arc libre.....	1,4
A arc sur métal.....	2
A induction BF.....	0,7

(1) Pour du laiton 60/40.
N. B. — Cons. d'électrodes en graphite de 1,7 kg:t.

Four (1)	Cons. d'én. él. (2) kWh:t
Baily.....	410
Ind. BF.....	225-250
Arc (four rotatif).....	250
Arc (four oscillant).....	220

(1) Capacité de 1000 kg.
(2) Pour du laiton.

d) Alliages légers (Alliages de l'aluminium).

Métal de base : aluminium.
Temp. de fusion : 657-660°C.

Température de fusion des alliages légers.

Métal	Température ou intervalle de fusion (°C)
Aluminium pur (99,99).....	660
Alpax (eutectique Al-Si).....	575
A P M-duralumin.....	540-650
All. à 8 p. 100 Cu.....	540-635
G 7 (7 p. 100 Mg).....	545-600
4I SM.....	575-630

N. B. — Temp. de fusion du glucinium : 1278 : C.

Nature de l'alliage	Symbole	Désignation commerciale	Éléments d'addition						Divers et Impuretés (Maximum)	
			Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Ni		
Alliages de Fonderie	alliages au cuivre	A-U 2 S	RR 53	1,20-1,60	1-1,50	1,60-2,40	1,40-1,80	—	1-1,50	0,35
		A-U 4 N	Alliage Y	≤ 0,80	≤ 0,80	3,60-4,50	1,20-1,80	—	1,70-2,30	0,50
		A-U 5 GT	APM, W 41	≤ 0,35	≤ 0,40	4,20-5	0,18-0,40	—	—	0,55
		A-U 8	all. à 8% Cu	≤ 0,80	≤ 0,80	7-9	—	—	—	0,50
	alliages au silicium	A-S 4 G	41 S M	≤ 0,60	3,50-4,50	—	0,54-0,80	0,50-0,90	—	0,20
		A-S 13	alpax ordinaire	≤ 0,75	12,2-13,70	—	—	—	—	0,20
		A-S 13 G	alpax gamma	≤ 0,75	11,75-12,75	—	0,15-0,35	0,40-0,60	—	0,20
		A-S 10 G	non dénommé	≤ 0,75	9,25-10,75	—	0,15-0,35	0,40-0,60	—	0,20
		A-S 12 U ₂ N	central A	≤ 0,75	11,5-12,5	2,3	1-1,5	1,10-1,40	2-3	1,50
		A-S 12 U N	novasil	≤ 0,75	11,5-13,50	0,50-1,50	0,80-1,50	—	0,50-1,50	0,20
A-S 20 U	all. hypersilicié	≤ 0,80	18-22	3-1	—	—	—	0,20		
alliages au magnésium	A-G 3	G3, alumag 35	≤ 0,40	≤ 0,40	—	2,5-3,5	≤ 0,5	—	0,20	
	A-G 6	G6, alumag 60	≤ 0,40	≤ 0,40	—	5-7	≤ 0,5	—	0,20	
	A-G 10	G 10	≤ 1	≤ 0,40	—	10 ± 1	≤ 0,5	—	0,20	
alliages au cuivre	A-U 2 N	avial 1, dur. RF, RR 56	1,2-1,5	≤ 0,9	1,8-2,2	0,7-1	—	1-1,15	0,1	
	A-U 2 GN	RR 59	1,2-1,5	≤ 0,9	2,2-2,4	1,2-1,7	—	1-1,5	0,12	
	A-U 4 N	alliage Y, avial 5	≤ 0,6	≤ 0,6	3,5-4,5	1,2-1,7	—	1,8-2,3	—	
	A-U 4 G	alferium, alnélium, avial carbiun 10, duralumin, dureilium, fortal	≤ 0,5	0,1-0,7	3,7-4,7	0,4-1,1	0,3-0,8	—	—	

Aluminium et Alliages Corroyés	alliages au silicium	A-S G	almasilium, alrétel 507, alrétel 913, carbinox 4, ampérium, inoxalium, silalium, vival,	≤ 0,5	0,8-1,5	≤ 0,1	0,7-1,3	≤ 1	—	—
		A-GS	almélec	≤ 0,35	0,6 ± 1	—	0,7 ± 0,1	—	—	—
		A-G 1	non dénommé, alliage pour placage du A-44 G	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,05	0,7	1 ± 0,3	—	—
	alliages au magnésium	A-G 2	alumag - 15	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,1	1,5-1,8	—	—	—
		A-G 3	alumag 25, alumag 35 carbinox 3, duralinox H 320 scléral 3, VB 3	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,1	2,5-3,7	0,2-0,5	—	—
		A-G 5	alumag 50, carbinox 5 duralinox H 530, scléral 5, VB 5	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,1	4,5-5,7	0,2-0,5	—	—
		A-G 7	alumag 65, carbinox 7, duralinox H 732, scléral 7, VB 7, virgalium	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,1	6-7	0,2-0,8	—	—
	A-G 9	carbinox 11, duralinox P 40, scléral 9, super - alumag, VB 9	≤ 0,5	≤ 0,25	≤ 0,1	7,5-9,5	0,4-0,8	—	—	

Composition des principaux alliages légers.

Se reporter au tableau des pages 42 et 43 qui, outre les désignations commerciales usuelles, donne les nouveaux symboles adoptés pour les alliages les plus courants.

Températures usuelles de coulée.

Aluminium = 750-780°C.

Alliages = 700-750°C.

Température maximum de coulée ou de chauffage : 800-850°C en général.

Fours les plus fréquents.

Pour l'aluminium et les alliages, on a eu, jusqu'ici, presque uniquement recours à des fours à résistances, tant pour la fusion proprement dite que pour le maintien en température (mijotage) ; depuis quelques années cependant, on poursuit la mise au point de fours à induction BF qui semblent susceptibles d'un développement ultérieur intéressant.

1° Fours à résistance.

a) Fours à résistances métalliques.

Principaux avantages : précision de la température, réduction des inclusions de gaz, atmosphère favorable (pas de gaz sulfureux), qualité du métal, réduction des pertes, commodité d'emploi, propreté.

Inconvénient : fusion lente dans certains cas.

Capacité en tonnes	0,5	1	2	3	5	8	10
Puissance en kW.	100	150	240	300	380	500	600
Durée d'une fusion en h.....	4	5	6	6	8	12	15
Production quotidienne en t....	1,5	2	3,5	5	8	12	15 max.
Cons. d'én. él. en kWh : t.....	600	600	575	550	525	500	450

Données pratiques : 1° Pour les *grosses quantités*, four à bassin et à réverbère, avec résistance métallique (ni — cr ou fe — cr — al), avec ou sans basculement autour d'un axe horizontal, marche continue. Les caractéristiques de tels fours sont données dans le tableau de la page 44, relatif à la fusion d'aluminium en marche continue.

Capacité max. 12 t (fours de fusion) et 15 t (fours mélangeurs).

Pour les capacités usuelles (1 à 8 t), compter pour l'aluminium sur une cons. d'én. él. de 450-500 kWh : t pour la fusion seule et de 550-650 kWh : t, compte tenu des temps de coulée (pour une marche continue) pour des fours fonctionnant dans des conditions optima (voûtes en bon état). En pratique, les cons. réelles moyennes sont généralement un peu supérieures aux précédentes et de l'ordre de 700-750 kWh.

Pour les alliages aluminium-cuivre, compter sur 600 kWh : t et pour l'alpax sur 650-700 kWh : t. Toutefois, les cons., dans les fours récents, sont sensiblement les mêmes qu'il s'agisse d'aluminium ou d'alliages aluminium-cuivre.

Les pertes au feu sont de l'ordre de 0,5-1 p. 100 pour l'aluminium et en général de 0,5-1,5 p. 100 pour les alliages aluminium-cuivre-magnésium.

La durée de la fusion dépend, bien entendu, de la puissance du four, celle-ci pouvant varier par ex. dans le rapport de 1 à 2 (110 ou 200 kW pour un four de 150 kg : h).

2° Pour les *quantités moyennes* d'alliages légers, on fait actuellement appel le plus souvent :

- soit à un important four-mère, électrique (du type précédent) ou à combustible, et à des fours électriques de maintien du type « à creuset », malgré l'inconvénient du transvasement (mais meilleure utilisation du matériel) ;
- soit à des fours fixes ou basculants à bassin assurant, suivant le cas, la fusion et le maintien ou la fusion et le mélange.

3° Pour les *petites quantités* d'alliages légers, cas fréquent dans les fonderies de deuxième fusion et de fabrication de pièces telles que pistons, etc., où l'on traite de plus en plus des alliages de titres divers, on a recours au four à creuset, fixe ou basculant, assurant la fusion et le maintien, fermé ou avec hotte (réduction des pertes thermiques et des pertes de métal); généralement, creusets en fonte poteyés ou creusets en graphite.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des fours à creuset pour alliages légers :

Dimensions utiles du creuset		Capacité du creuset		Nature du creuset	Puissance maximum kW	Puissance pour le maintien en température (750°C) kW	Production horaire kg	Durée de la première fusion (1) h
diamètre mm	hauteur mm	points	kg					
200	400	100	30	fonte	10	3	22	4
250-350	450	150	45	graphite	22	5	25	4
300	500	300	90	fonte	20	5	50	5
350-400	530	350	100	fonte	24	6	60	5
450	700	800	240	fonte	40	7	100	5 1/2 (2)
360	645	200	60	fonte	27	8	40	3
400	825	400	120	fonte	50	14	70	3
450	900	600	180	fonte	65	21	100	3

(1) En partant du four froid. Valeurs approximatives.
(2) Avec 150 kg de métal.

On peut compter sur une puissance de 20 à 70 kW et une cons. d'én. él. de 650-750 kWh : t en service continu, pour creusets de 25 à 100 kg, la durée de fusion étant de l'ordre de 1 h. à 1 1/2 h.

La cons. d'én. él. pour le mijotage est par ex. de l'ordre de 12 kWh : h.

β) Fours à résistances non métalliques.

Pour mémoire : on a utilisé ou cherché à utiliser certains types de fours à résistances non métalliques.

Four Baily (morceaux de charbon) : cons. de 500 à 600 kWh : t en marche continue, dans un four à bassin de 500 kW.

Four Fenwick (à tige de graphite) : cons. de 470 à 520 kWh : t pour fusion d'aluminium dans un four de 500 kg; probablement intéressant pour l'élaboration d'alliages à haute teneur en silicium (25 p. 100 par ex. ; température élevée, de l'ordre de 1 000°C) pour lesquels des essais de mise au point se poursuivent.

Four Morgan (creuset en composé de carbone) : cons. de 970 kWh : t avec fusion en four froid en 80 mn et 590 kWh : t avec fusion en four chaud en 50 mn, pour une capacité de 40 kg ; durée du creuset : 40-50 fusions en marche discontinue.

2° Fours à induction.

α) Four à induction avec noyau magnétique fermé (basse fréquence).

Type à canal submergé.

Avantages : homogénéité des produits ; faibles pertes au feu (0,8 p. 100 par ex. contre 1,2 p. 100 au four à résistances) ; consommation réduite d'énergie électrique ; possibilité d'emploi de flux pour l'affinage des métaux ; encombrement réduit.

Inconvénient : risques d'obturation du canal (formation d'oxydes métalliques). On pallie cette difficulté par des dispositions particulières ou par l'emploi d'un four à deux chambres (fusion et coulée), solution qui a déjà fait l'objet d'assez nombreuses réalisations à l'étranger.

Ces fours sont encore peu employés en France et leur évolution continue.

Quelques données provisoires :

Nature : monophasés, di ou triphasés.

Capacités : de 250 à 3 000 kg.

P : de 100 à 800 kVA.

Cons. d'én. él. : de 450 à 520 kWh : t, moyenne de 500 kWh : t.

Pertes à la fusion : 0,5 p. 100 pour le duralumin, l'alpax et les alliages au Mg ; 0,4 p. 100 pour l'aluminium pur.

β) Four à induction à noyau magnétique fermé (haute fréquence).

Avantage : facilité de modifier fréquemment la composition des alliages (pas de canal liquide comme dans les fours BF).

Inconvénient : cons. d'én. él. plus élevée.

Pour mémoire = préparation d'alliages divers (Al — Mg) dans un four de 250 kg, 150 kW, 2 000 pps ; 600 kWh : t.

γ) Four à induction mixte (basse fréquence).

Pour mémoire = Four à chauffage indirect, de 20 kg ; 10 kW, production de 15 à 18 kg : h, 650 à 550 kWh : t.

e) Alliages ultra-légers (Alliages du magnésium).

Métal de base : magnésium.

Temp. de fusion : 650°C.

Composition des principaux alliages ultra-légers.

Ces alliages sont également dénommés « électrons » (terme générique dans certains pays).

Nature de l'alliage	Symbole	Désignation commerciale	Eléments d'addition (moyennes arrondies)		
			Al	Zn	Mn
Alliages de fonderie	G - A ₆ Z ₃	F ₁	6	3	0,3
	G - A ₄ Z ₃	F ₂	4	3	0,3
	G - A ₃ Z ₁	F ₃	3	1	0,3
	G - A ₁₀ Z ₁	F ₅	10	—	0,3
	G - A ₉	F ₁₀	9	1	0,3
	G - A ₉	FT	8,5	0,5	0,3
Alliages corroyés	G - M ₂	T ₂	—	—	2
	G - A ₃ Z ₁	F ₃	3	1	0,3
	G - A ₆ Z ₁	M ₁	6	1	0,2
	G - A ₇ Z ₁	M ₃	7	1	0,2

Intervalle de fusion des alliages ultra-légers :

500-650 °C, voire 450 °C pour des alliages à additions importantes.

Température de coulée :

700-800 °C, voire davantage.

Fours utilisés :

Fours à résistances ou fours à induction. Pratiquement, les fours électriques sont encore peu utilisés (fin 1944) et font l'objet, en France et à l'étranger, d'essais nombreux dont les résultats ne sont pas encore tous connus, sauf toutefois pour les fours de maintien en température (les fours à résistances métalliques s'imposent dans ce cas).

1° Fours à résistances.

a) Fours à résistances métalliques.

Résistances en Ni-Cr à 80/20 ou en Fe-Cr-Al.

Principaux *avantages* : précision de la température (pas de surchauffes locales) ; pas d'altération du métal. Rappelons que la fusion du Mg se fait avec emploi d'un flux (mélange

de chlorure de Mg et de fluorures alcalins ou alcalino-terreux) en vue de réduire les pertes (grande affinité du Mg pour l'oxygène, combinaison à chaud du Mg avec l'azote, décomposition à chaud de la vapeur d'eau avec formation d'hydrogène et de magnésie).

Inconvénient : longue durée de la fusion.

β) Fours à résistances non métalliques.

Résistances en carbure de silicium.

Montée en température plus rapide, d'où réduction de la consommation de fondant de protection.

Pratiquement, jusqu'à ce jour, fours à creuset (tôle d'acier emboutie ou fonte) de petite ou de moyenne capacité, fixes à creuset amovible ou basculants à creuset fixe. En principe, 1 kW par kg de métal, quelquefois un peu plus.

Caractéristiques des fours usuels :

Capacité de 50 kg ; P de 40-50 kW ; temps d'affinage : 760°C ; temp. de surchauffe : 850-900°C ; temp. de coulée : 730-750°C ; montée en temp. en 50-60 mn ; cons. théorique : 360 kWh : t de métal porté à 850°C.

2° Fours à induction.

α) Fours avec noyau magnétique fermé

(basse fréquence).

Principaux avantages : forme avantageuse du récipient de fusion; possibilité d'utiliser des récipients de grande capacité; métal bien homogène ; pas de surchauffe.

Difficultés : encrassage du canal ; obligation de maintenir l'anneau liquide pendant les temps d'arrêt ; destruction de la croûte du flux protecteur par le brassage trop intense du bain.

A notre connaissance, fours utilisés seulement à l'étranger jusqu'à présent : appareils mono ou diphasés (montage Scott); capacité jusqu'à 2 000 kg ; cons. 500 kWh : t.

Essais en cours en France.

β) Fours sans noyau magnétique fermé

(haute fréquence).

Quelques cas isolés à l'étranger : prix, encombrement et consommation élevés ; brassage du bain trop énergique (inclusion de fondant dans le métal ; on peut y remédier par emploi de fours à 2 chambres : induction HF dans la première ; résistance pour l'affinage dans la deuxième). En France, des essais sont en cours : utilisation d'un creuset métallique permettant d'atténuer le brassage.

f) Autres métaux blancs.

Température de fusion des métaux de base.

Antimoine	631°C
Bismuth	269°C
Cadmium	320°C
Etain	232°C
Plomb	327°C
Zinc	420°C

Principaux alliages industriels du plomb.

Métaux de base	Désignation de l'alliage	Composition en p. 100		
		Pb	Sn	Sb
Pb+Sn	Alliage pour jouets.....	96	4	-
	Antifriction	83-88	17-12	-
	Soudure des zingueurs..	60	40	-
	Soudure des ferblantiers.	55	45	-
	Soudures faibles.....	30-40	70-60	-
	Soudure vaisselle d'étain.	20-15	80-85	-
Pb+Sb	All. pour plaques d'accumulateurs.....	94-92	-	6-8
	Régule.....	84-88	-	16-12
	Antifriction	80-76-42	12-14-42	8-10-15
Pb+Sn+Sb (Imprimerie)	Caractères de fonderie...	55 à 73	4 à 25	16 à 30
	Linotypes	82 à 88	2 à 5	10 à 13
	Monotypes	72 à 82	5 à 9	14 à 19
	Clicherie	65 à 83	3 à 11	13 à 30

Ajoutons les antifrictions suivants :

Pb = 81,5 ; Sb = 17 ; Cu = 1,7

Pb = 73-63 ; Sb = 15-15 ; Sn = 10-20 ; Cu = 2-2

Pb = 65 ; Sb = 25 ; Cu = 10

et les alliages à bas point de fusion :

Alliage	Fb	Sn	Bi	Cd	Temp. de fusion °C
Darcet	25	25	50	-	94
Darcet	5	3	8	-	94
Darcet	3	2	5	-	90
Lipowitz.....	8	4	15	3	70
Wood	4	2	5	2	71

Principaux alliages industriels du zinc.

Composition en p. 100				
Zn	Cu	Al	Sn	Mg
93-94	3	4-5	—	—
92,9	3	4	—	0,1
92	4	4	—	—
87,5	6	0,5	6	—

Principaux alliages industriels de l'étain.

Métaux de base	Observations
Sn + Cu	voir bronzes — page 32
Sn + Pb	voir alliages du plomb — page 50
Sn + Pb + Sb	— id. —
Sn + Sb	80 Sn + 14-20 Sb (poterie, robinetterie)
Sn + Cd + Zn	50 Sn + 50 Zn (soudure pour Al)
	50-30 Sn + 50-70 Cd (antifriction)
	30 Sn + 50 Cd + 20 Zn (brasure pour Al)

Principaux alliages industriels de l'antimoine.

Se reporter aux tableaux précédents.

Principaux alliages industriels du cadmium.

En particulier avec Pb, Sn, Zn : notamment soudures et brasures et fusibles thermiques.

Quelques températures de fusion.

Métal	Temp. de fusion °C
Eutectique (37 p. 100 Pb + 63 p. 100 Sn).....	182
Alliages (Pb-Sn) à moins de 37 p. 100 Pb.....	182-232
Alliages (Pb-Sn) à plus de 37 p. 100 Pb.....	182-327
Soudure des ferblantiers (55 p. 100 Pb + 45 p. 100 Sn)	220
Soudure des zingueurs (60 p. 100 Pb + 40 p. 100 Sn)	240
Alliages (20-30 p. 100 Pb + 80-70 p. 100 Sn).....	190-200
Eutectique (67 p. 100 Pb + 13 p. 100 Sb).....	249
Alliages (Pb-Sb) à moins de 67 p. 100 Pb.....	249-631
Alliages (Pb-Sb) à plus de 67 p. 100 Pb.....	249-327
Métal pour plaques d'accumulateurs.....	270-320

Températures usuelles de coulée ou de travail.

Deux cas :

simple fusion du métal avec surchauffe appropriée, en vue de son utilisation immédiate (étamage, fabrication de caractères ou de lignes d'imprimerie ou de lingots, galvanisation, réglage);

fusion du métal congelé et maintien à une température bien déterminée dans le cas d'un bain de métal (ex. : four de trempe à bain de plomb).

Traitement	Température °C
Fusion d'étain (étamage)	300
Fusion de plomb (fabrication des tubes) ...	600
Fusion de plomb (fabrication des câbles électriques)	380-420
Bain de plomb pour chauffage avant trempe.	850-900
Bain de plomb pour patentage	450-550
Fusion de plomb antimonié (imprimerie) {	
lingots	290-410
linotypes	325
monotypes ...	455
Fusion de plomb antimonié (accumulateurs)	600
Fusion de zinc	460-470
Bain de galvanisation	440-450
Bain d'étain	300-500
Fusion de régule (régulage)	250
Dérégulage	250-400

Avantages essentiels.

Fusion de plomb et de métal d'imprimerie : température constante (lignes parfaitement coulées, meilleure qualité des plaques); meilleures conditions d'hygiène et de travail (pas de poussières ni de suie, pas de gaz nocifs : à 290°C, le métal donne de l'oxyde de plomb vénéneux, dangereux et inutilisable).

Fusion d'étain, de régule, de zinc : température constante.

Bains de métaux fondus (plomb, zinc) : température constante.

Fours de galvanisation : réduction importante des mattes; durée plus grande des cuves; température constante; répartition uniforme de la temp.; traitement uniforme et économique; réduction des frais d'entretien; simplicité de la

commande ; sécurité de fonctionnement ; conditions de travail améliorées ; réduction de la consommation de zinc ; possibilité de travailler à bain découvert (basse température).

Appareils utilisés.

Le plus souvent, fours à résistances et appareils chauffés par résistance ; quelquefois, fours à induction BF, voire même fours à arcs.

Les cons. d'én. él. théoriquement nécessaires pour amener les métaux de base du commerce de l'état solide à 20°C à l'état liquide à la température de fusion (cons. d'én. él. correspondant aux calories nécessaires) sont les suivantes :

Métal	Température °C	Cons. d'én. él. kWh : t
Etain.....	232	30-40
Plomb.....	327	10-20
Zinc.....	420	50-80

Les cons. usuelles sont très variables, car elles correspondent à des conditions de travail très diverses et dépendent évidemment des appareils utilisés. Les données qui suivent se rapportent soit à des fours courants, soit à des cas particuliers :

1° Chauffage par résistance.

a) Fusion de plomb.

Fours de fusion de plomb, fours à bain de plomb, fours de plombage, bains de plomb pour patentage, fours de fusion d'alliages d'imprimerie.

1. Fours de fusion de plomb (400-500° C).

Quelques données :

Capacité en kg...	110	200	360	680	600
Puissance en kW.	10	20	30	40	18-21 (1)

(1) Production horaire de 300 kg avec 18 kW et de 500 kg avec 21 kW.

Caractéristiques d'autres fours de fusion de plomb.

Capacité en kg.....	300 à 700	3000	4000
Puissance en kW.....	15 à 20	50	90
Production horaire en kg.	125 à 200	1400	2500
Cons. en kWh : t.....	30 à 100	35	35

2. Fours à bain de plomb.

Caractéristiques de quelques fours à creuset prévus jusqu'à 950°C.

Dimensions intérieures utiles en mm			Epais. en mm de la cuve (acier inoxydable)	Puissance en kW	
diamètre	haut. totale	haut. du bain		nomi- nale	maintien à 900°C
200	320	380	14	14	4,7
250	380	450	16	20	5,5
300	420	500	18	25	6,3
400	560	650	20	45	9
500	800	900	26	70	15

N. B. — Mise en temp. (900°C) en partant du four froid en 3 h. 20 mn ; remontée en temp. (900°C) après un arrêt de 12 h. en 2 h. 30 mn.

Autres caractéristiques de fours à bain de plomb prévus jusqu'à 850°C.

Dimensions utiles en mm		Puissance kW
diamètre	profondeur	
150	300	6
250	500	15 (1)
300	600	20 (2)
400	600	25 (3)
650	750	60 (3)
700	1 350	90

(1) Trempe d'éprouvettes en acier, préchauffage d'acier rapide.
(2) Revenu d'acier rapide.
(3) Trempe.

Voir aussi tableau, page 83.

3. Fours à passage pour plombage de feuillards.

Dimensions de la cuve en mm			Puiss. kW	Product. kg·h	Temp. °C	Cons. kWh : t
longueur	largeur	profond.				
2 000	400	200	35	200	370	170
2 000	400	300	40	250	400	150
2 500	450	550	70	750	400	90

4. Bain de plomb pour patentage : (500°C).

Ex. : 1° Four de 3 000 × 700 × 700 mm 70 kW, 350 kg : h; la consommation d'énergie électrique se réduit à celle qui est nécessaire pour la mise en temp. (de durée d'ailleurs variable).

2° Installations de patentage comportant un four à 4 tubes mouffes de 4,67 m de longueur chauffée ; 20 kW ; une cuve à bain de plomb de 4 470 × 140 × 140 mm, 25 kW ; un bain de sable non chauffé, pour enlèvement du plomb.

5. Fours de fusion de métal d'imprimerie (300-350°C).

Capacité en kg.....	200	300	500	
Hauteur utile en cm.....	62	70	75	
Diamètre utile en cm.....	54	54	68	
Puissance en kW.....	8,5	10,5	17	
Cons. en Wh : kg {	1 ^{re} fusion.....	43	35	34
	2 ^e fusion.....	27	24	24
	3 ^e fusion.....	25	21	19
Cons. horaire en Wh pour maintien à 270 °C.....	600	700	700	

En première approximation, compter sur une cons. moyenne de 25-27 kWh : t.

Creusets de Stéréotypie (290-410 °C).

Exemples :

Capacité de 7,2 t ; P = 160 kW ; P de maintien : 15 kW pour 325°C et 8 kW (veilleuse) pour 260°C.

Capacité de 8,8 t ; P = 200 kW.

Capacité de 6,3 t ; cons. de 37,5 kWh : t.

Capacité de 7,2 t ; cons. de 44 kWh : t.

Capacité de 8,4 t ; cons. de 26,5 kWh : t.

Capacité de 15 à 300 kg ; production de 0,370 à 11,4 t : h.

Creusets de Linotype (260-290 °C).

Chauffage du creuset et chauffage de la bouche.

Exemple d'un creuset ancien :

P = 1 kW.

Durée de la mise en temp. : 45 mn.

Cons. d'én. él. pour la mise en temp. : 0,750 kWh.

Cons. horaire d'én. él. : 0,550 kWh.

On est parvenu, par une construction plus attentive, à réduire sensiblement la cons. tout en augmentant considérablement la durée des éléments chauffants qui donnent maintenant toute satisfaction.

Type	Capacité kg	Cons. à vide Wh : h
Ancien creuset électrifié..	20-25	500
Creuset électrique.. .. .	12	450
Creuset électrique.....	7-8	350

Ex. : cons. horaire de 450 Wh pour un débit de 1 200 lignes (36 kg).

Machines à composer les titres.

Ex. : creuset de 25 kg ; P max. : 1,2 kW ; P moyenne : 0,5-0,8 kW.

Machines à faire les filets et les interlignes.

Ex. : P = 4,2 kW ; production max. : 100 kg : h ; cons. : 1,4 kWh : h, variable suivant poids coulé à l'heure.

Creusets de Monotype.

Cons. pour la mise en temp. : 2,3 kWh.

Cons. horaire : 1,3 à 1,8 kWh suivant capacité.

En résumé et en première approximation, compter sur :

linotype : 0,5 kWh : h,

intertype : 0,8 kWh : h,

monotype : 1,35 kWh : h.

β) **Fusion de zinc** (450 °C).

Fours de fusion et fours de galvanisation.

1. Fours de fusion.

Fours de fusion, type basculable, analogue aux grands fours à bassin pour l'aluminium. Compter sur 120 kWh : t et 6 p. 100 de pertes au feu.

Cas particuliers :

1° fusion des cathodes de zinc électrolytique : cuve en tôles d'acier de 2 000 × 4 000 × 2 000 mm ; capacité de 20 t ; 550 kW ; production de 70-80 t en 24 h ; cons. d'én. él. de 97 kWh : t.

2° récupération du zinc des piles ; 450°C ; cuve de 400 mm de diamètre et de 600 mm de profondeur ; capacité de 450 kg ; 12 kW ; production de 60 kg : h ; cons. d'én. él. de 200 kWh : t.

2. Fours de galvanisation (440-450°C).

Caractéristiques approximatives de quelques fours usuels :

Dimensions utiles en mm			Puissance en kW
longueur	largeur	profondeur	
2 500	700	700	70
1 750	500	400	50

Compter en première approximation sur une cons. d'énergie él. de 20 kWh par heure et par m² de surface découverte, le bain étant entièrement découvert (cas général de la galvanisation pour les objets) et en plus de 70 kWh par tonne d'acier galvanisé. La cons. est évidemment moindre lorsque le bain peut être couvert (cas de la galvanisation de fils).

Caractéristiques de quelques autres fours usuels :

Dimensions de la cuve en mm			Puissance kW	Production kg : h	Cons. d'énergie électrique kWh : t
long.	largeur	profond.			
6 900	510	1 250	380 (1)	3 000	125
3 250	1 250	1 200	140 (2)	770	135

(1) Galvanisation continue des tubes — 450° C.
(2) Galvanisation d'articles de chaudronnerie — 460° C.

Les renseignements qui suivent se rapportent à des fours étrangers :

Capacité t	Puissance kW	Production d'acier galvanisé t : h	Cons. d'énergie él. par t. d'acier kWh
40	180	0,354	200
30	380	3 à 4	103

La consommation d'énergie électrique dépend essentiellement du poids et des dimensions des pièces.

Nature des pièces traitées	Dimensions intérieures en mm			Puissance kW	Poids d'acier galva. par heure kg.	Poids d'acier galva. par kWh kg	Cons. d'én. élect. par tonne d'acier galva. kWh
	long.	largeur	prof.				
Diverses.....	1 800	760	915	90	226,5	4,8	208
					453	7,1	141
					679,5	8,4	119
Charpente....	4 500	915	915	200	905	6,1	163
					1 360	7,5	133,5
					1 585	8,4	199
Charpente....	9 150	560	1 220	405	1 800	6,95	143,5
					2 700	8,35	120
					3 600	9,45	108

Autres résultats :

1° Cuve de 4 500 × 900 × 900 mm. Bain couvert en dehors des heures de travail.

Capacité de 27,4 t de métal fondu avec 2,7 de plomb.

Production horaire max. prévue : 1,5 t d'acier.

Production horaire pratique en marche discontinue : 0,6 t d'acier.

Poids moyen de zinc (net) par t. d'acier galvanisé : 65,8 kg.

Cons. d'én. él. par t. d'acier galvanisé : 256 kWh.

2° Cuve contenant 17 t de zinc et 2 t de plomb.

Cons. d'én. él. pour la fusion : 154 kWh : t.

Cons. horaire de métal pendant la galvanisation : 0,765 t.

Cons. correspondante d'én. él. : 135 kWh : t.

Cons. horaire pour maintien en temp. :

four ouvert à 437°C = 48,6 kWh
 à 483°C = 57,5 kWh

four clos { à 437°C = 17,6 kWh
 à 483°C = 23,4 kWh

γ) Fusion d'étain (350-650° C).

Petits creusets, cuves de toutes dimensions ou machines spéciales.

1. — Creusets pour étamage.

Contenance		Dimensions en mm			Puis- sance W	Temps max. C
cm ³	g	long.	larg.	profond.		
0,005	35	18	20	14	50	350
0,009	65	20	40	12	100	350
0,140	1 000	100	30-15 (1)	55	350	650
0,240	1 750	52	30-15 (1)	84	400	650
0,375	2 750	86	52	90	500	650
0,500	3 650	120	80	60	1 000	650
0,820	6 000	90	90	100	1 500	650
1,250	9 500	120	120	90	2 000	650

(1) Haut et bas. N. B. Fusion en 10-20 mm.

Voir aussi tableau, page 83 et volume I, page 56.
Autres creusets pour étamage.

Forme	Dimensions en mm			Puissance kW
	longueur ou diamètre	largeur	profondeur	
Cylindrique ..	150	—	300	3
Cylindrique ..	300	—	300	5
Rectangulaire.	480	270	205	20
Cylindrique ..	400	—	500	26
Cylindrique ..	600	—	600	27
Rectangulaire.	500	250	150	6
Rectangulaire.	1 400	150	120	9 (1)

(1) Temp. 600° C pour le dernier appareil; 250° C pour les autres; production continue pour les deux derniers appareils, discontinue pour les autres.

2. — Cuves d'étamage. — Ex. : 75 kW, 65 kWh : t ;
60 kg, 8 kW.

Machine à étamer. Ex. : machine comportant un four d'é-
tamage de 25 kW (creuset en fonte, d=550 mm, p=500 mm,
capacité normale : 500 kg, temp. : 350°C).

δ) **Fusion de régule** (450 °C).

Installations de réglage ou fours de dérégulage.

1. — *Régulage.*

Une installation comporte en principe un creuset d'étaimage (350°C), un creuset de réglage (450°C), un creuset pour bain de dépagage (en général à froid), quelquefois des cuves de dégraissage (80°C) et de rinçage (100°C). Alimentation à tension normale (110-220 V) ou à très basse tension (24 V par ex).

Exemples :

1° Creusets cylindriques ; $d = 150$ mm ; $p = 300$ mm ;
 $P = 2,5$ kW.

2° Creusets cylindriques ; $d = 200$ mm ; $p = 300$ mm ;
 $P = 4$ kW.

3° Creusets de forme sensiblement hémisphérique ; plus grand diamètre : 480 mm ; plus grande hauteur : 200 mm ;
 $P = 7$ kW.

4° Fours basculants de régule de 50 kg, 11 kW, production de 150 kg : h, 500°C.

Se reporter aussi au tableau, page 83.

2. — *Dérégulage.*

Exemples :

1° Four à cuve pouvant contenir 225 kg de pièces ; 20 kW.

2° Four de dérégulage de coussinets (utilisé également pour le préchauffage de pièces à réguler) pouvant contenir 400 kg de pièces ; 34 kW.

2° Chauffage par induction.

- Avantages essentiels : réduction des pertes au feu et de la cons. d'énergie.

Fusion de plomb.

Ex. : Four à induction BF, 550 kg, 20 kW, 125 kg/h, 40 kWh ; t.

Fusion de zinc.

Ex. : Four à induction BF, 600 kg, 60 kW, cons. de 90-100 kWh : t, pertes au feu de 0,25 p. 100.

Fusion de régule.

Ex. : Four à induction BF (enroulement primaire en cuivre ; secondaire constitué par un cylindre en tôles d'acier inoxydable ; cuve en graphite).

Dimensions utiles mm		Contenance kg	Puissance kW	Production horaire kg
diamètre	hauteur			
160	220	25	5	35
400	600	300	10	100

3° Chauffage par arc.

Pour mémoire : fours à arc, en principe abandonnés pour la fusion des métaux considérés.

Ex. : Four à arc triphasé pour fusion de plomb, 300 kg, 60-80 kWh : t.

Four à arc pour fusion de métal blanc :

Alliage	Cons. d'én. él. (kWh : t)	
	marche continue	marche intermittente
(Sn + Cu + Sb) à 78 p. 100 Sn.	70-90	80-100
(Pb + Sn + Sb) à 86 p. 100 Pb.	60-80	60-80

Remarque. — A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne la consommation théorique nécessaire pour réaliser la fusion de certains métaux, calculée en partant des chaleurs spécifiques moyennes et des chaleurs latentes de fusion :

Métal	Cons. en kWh : kg	Métal	Cons. en kWh : kg
Aluminium	0,274	Fer	0,384
Antimoine	0,086	Magnésium	0,291
Argent	0,101	Manganèse	0,318
Cadmium	0,040	Nickel	0,298
Chrome	0,352	Platine	0,106
Cobalt	0,351	Plomb	0,020
Cuivre	0,197	Tungstène	0,236
Etain	0,034	Zinc	0,081

g) Métaux spéciaux.

Pour mémoire, ces métaux étant peu employés à l'état pur, mais plutôt à l'état d'alliages, notamment de ferro-alliages.

Métal	Temp. de fusion °C	Métallurgie (1)
Chrome	1615	ferro-chrome, aciers et fontes chromés.
Manganèse	1240	1) ferro-manganèse, aciers au Mn. 2) purification du Mn aluminothermique dans un four à vide à HF.
Molybdène et Tungstène (wolfram)	2650 env. 3400	1) ferro-molybdène, aciers et fontes au Mo; ferro-tungstène, aciers au Tu. 2) préparation du Mo ou du Tu par réduction de l'oxyde molybdique ou de l'oxyde tungstique par l'hydrogène, au four électrique (tube en acier ou en quartz en général) entre 500 et 900° C; suivie d'une concrétion, transformation de la poudre (comprimée en un barreau que l'on fait traverser par le courant) en un métal homogène dans une cloche à hydrogène, temp. égale à 90 p. 100 de la temp. de fusion.
Tantale	2700-2900	1) ferro-tantale, aciers au Ta. 2) traitement, au four électrique, du carbure de Ta.
Titane	2700	ferro-titane, aciers au Ti.
Vanadium	1700	ferro-vanadium, aciers au Va.
Zirconium	1500	1) aciers au Zr. 2) préparation du Zr par chauffage au four électrique d'un mélange de Mg et de chlorure de K et de Zr.

(1) Pour les ferro-alliages, se reporter page 10 et suivantes.

h) Métaux précieux.

Température de fusion des métaux de base :

Argent = 942 °C

Or = 1 064 °C

Platine = 1 775 °C

Principaux alliages.

Désignation des alliages	Composition	Observations	
Alliages de l'or	or-argent	Au : 70-75 et Ag : 30-25	joaillerie etsoudures
	or-cuivre	Au : 750-840-916-583 et Cu : 250-160-74-417	
	or-argent-cuivre	différents titres : Au : de 750 à 583, Ag et Cu en quantité variable sui- vant teinte	
	or gris	Au + Pd ; Au + Cu + Ni + Zn	
Alliages de l'argent	argent-cuivre	Ag : 950-800 et Cu : 50-200 Eutectique : (800°C) pour Ag : 60 et Cu : 40	bijouterie contacts électriques

Températures de fusion des métaux additifs :

Cuivre : 1 085 °C

Zinc : 419 °C

Nickel : 1 450 °C

Températures de fusion des « platinoïdes » :

Platine : 1 775 °C

Palladium : 1 554 °C

Iridium : 2 350 °C

Rhodium : 1 966 °C

Osmium : 2 700 °C

Ruthénium : 2 450 °C

Températures de fusion habituelles des métaux précieux :

Alliage	Temp. en °C	Observations
Or-Argent	1 200 - 1 250	point de fusion plus élevé si moindre teneur en Ag
Or-Cuivre et Or-Argent-Cuivre	1 175 - 1 225	
Ors gris	1 300 - 1 350	contacts de magnétos
Argent-Cuivre	env. 1 100	
Platine iridié à 25 p. 100 d'ir.	2 150	

Fours adoptés :

Fours spéciaux à résistance, à arc, à induction HF ; petites ou moyennes capacités.

Argent : pour des fours de quelques centaines de kg, à arc ou à induction HF, compter sur 200-260 kWh: t; en première approximation, admettre 250 kWh: t pour l'argent monétaire.

Or : le four HF présente comme avantages principaux la commodité de la manutention et la rapidité de la fusion (1 400°C) ; le four à résistance (carbure de silicium) est utilisé pour l'or et pour les alliages de prothèse dentaire (ex. : Au : 50-80 p. 100 + Pt : 3-30 p. 100 ; 1 315-1 485°C) ; le four électrique paraît intéressant pour l'or gris (réduction des pertes par oxydation ou sublimation de Zn et Ni).

Platine : four à HF avec très petits creusets ; fusion de 1 à 2 kg en 15-20 mn avec 12,5 kW ; les fours à induction HF et à résistance (graphite, kryptol) semblent particulièrement intéressants pour les alliages contenant du palladium ou de l'osmium (fusion éventuelle sous vide).

Remarque : A titre comparatif, nous donnons ci-après quelques points de fusion (valeurs différentes suivant les auteurs) de substances réfractaires.

Substance	Point de fusion °C	Substance	Point de fusion °C
Alumine..	1890-2050	Carbure d'uranium.	2425
Briques avec argile.	1555-1725	Carb. de vanadium.	2750
— bauxite	1565-1785	Chaux	1700-2570
— magnésite	2165	Magnésite	1980-2 00
— silice..	1700	Silice	1625-1850
— chromite	2050	Zircone	2400-2600
Carbure de cérium..	1800		

i) Soudage et brasage.

On peut distinguer deux sortes de soudures :

- la soudure autogène (à l'arc ou par résistance)
- la soudure hétérogène (soudure forte ou brasure, soudure tendre ou au fer chaud).

Seule, la soudure par résistance est littéralement autogène; la soudure par l'arc ne l'est que pour autant que le métal d'apport est de même nature que celui de la pièce traitée.

1° Soudure autogène.

Deux modes de soudage :

- soudage à l'arc (courant continu ou alternatif),
- soudage par résistance (courant alternatif avec ou sans accumulation électrique par self ou condensateur) ;

avec variantes : soudage à l'hydrogène atomique et soudage par flux conducteur.

Procédés	Appareils utilisés	Métaux traités
Par résistance à recouvrement	par points	tous métaux, sauf cuivre rouge; notamment aciers et alliages inoxydables, alliages légers, molybdène, tungstène, nickel, laiton
	par molettes	
par bossages	machines à souder par points machines à souder à molettes presses à souder	
bout à bout ou par rapprochement, avec chauffage	par résistance	résistance et étincelage : tous métaux, notamment fils en aluminium; approches et combiné: surtout aciers doux et rapides
	par étincelage par approches combiné	
A l'arc	groupes rotatifs, redresseurs, p. stat.	surtout aciers et fontes; également alliages légers
A l'hydrogène atomique	postes statiques	surtout aciers; également laitons, bronzes et alliages légers
Par flux conducteur	appareils automatiques seulement	aciers

Les puissances sont mal définies, tout au moins pour les appareils de soudage par résistance, car elles dépendent de la valeur de l'impédance du secondaire (ces appareils sont en somme de simples transformateurs) fermé en court-circuit sur les pièces à souder. Les puissances nominales usuelles sont les suivantes :

Appareils	Puissance kVA	Nature du courant	Tension secondaire	
			à vide V	en charge V
Machines à souder par résistance	15 à 100 (max.)	alt.	max. 15	—
Ap. de soudage à arc	5 à 20	alt. ou cont.	50	25
Ap. de soudage à l'hydr. at.	11 (monophasé) à 30 (triphasé).	alt.	220-300	80-110
Ap. de soudage par flux conducteur.	50	alt.	80	25

Les groupes rotatifs de soudage à l'arc sont généralement polyphasés (triphasés). Les autres appareils (soudeuses par résistances et postes statiques) sont le plus souvent monophasés et peuvent provoquer sur les réseaux des distributeurs d'énergie électrique (« Secteurs ») des dissymétries et surtout des à-coups de tension souvent inacceptables. Il y a donc lieu, notamment dans le cas d'alimentation par un réseau à basse tension, de s'entendre avec le Secteur sur les conditions de raccordement et d'utilisation de ces appareils.

Le facteur de puissance ($\cos. \varphi$) moyen est généralement le suivant :

Appareil		Cos. φ	
Arc	groupe rotatif.....	0,70 — 0,90	
	groupe statique..	{ sans condensateurs..	0,40 — 0,50
		{ avec condensateurs..	0,80
Résistance	soudeuse ordinaire.....	0,50 — 0,70	
	soudeuse à accumu- lation électrique	{ self, condensateur.	0,90 — 1

Le soudage à l'arc est utilisé pour la grosse construction et la réparation ; le soudage par résistance pour la fabrication, notamment pour la fabrication de séries.

Le nombre des appareils de soudure en service actuellement en France semble pouvoir être évalué à :

12 000 appareils, soit 150 000 kVA, pour la soudure à l'arc ;

24 000 appareils, soit 600 000 kVA, pour la soudure par résistance ;

nombre donnés sous toutes réserves.

2) Soudure à l'arc.

Principaux avantages : non obligation de chauffer les pièces à souder ; retrait du métal et déformation des pièces plus faibles ; qualité supérieure des soudures ; résilience et allongement supérieurs ; possibilité de souder avec des électrodes donnant un apport de métal à caractères particuliers (ex. : aciers inoxydables) ; réparation des pièces en fonte dans les meilleures conditions.

1. Soudage manuel à l'arc.

Caractéristiques des groupes rotatifs de soudage à l'arc usuels (courant continu) :

Intensité nominale A	Puissance nominale de la dynamo kVA	Tension de charge V	Limites de réglage A
180	3	25	20-180
250	4,2	25	20-250
300	5	25	20-300
400	6,5	25	30-400
600	10	25	50-600

Caractéristiques des postes statiques monophasés usuels pour soudage à l'arc (courant alternatif) :

Intensité nominale A	Puissance nominale		Tension de charge V	Limites de réglage A
	sans condensateurs kVA	avec condensateurs kVA		
100	4	3	25	20-100
160	7	5	25	20-160
250	12	7	25	20-250
400	18	12	25	20-400

Caractéristiques des postes triphasés-monophasés à rotor :

Intensité nominale A	Puissance nominale kVA	Tension de charge V	Limites de réglage A
160	6	25	20-160

Electrodes de soudure à l'arc.

Deux types :

- Electrodes en charbon (carbone amorphe ; généralement carbone graphitisé ou graphite pur synthétique).
- Electrodes métalliques (nues ou enrobées).

1) Electrodes en graphite :

Employées surtout en soudure automatique.

Résistivité :

1 200-1 500 microhms/cm/cm² pour le carbone graphitisé
800-1 000 microhms/cm/cm² pour le graphite synthétique.

Dimensions usuelles des électrodes en graphite synthétique :

Diamètre en mm	Longueur en mm
3,2-4,8 6-8-10-12-16-18-20-25-30-35	300 300 à 1 000

Généralement diamètre de 6 à 16 mm et longueur de 300 à 1 000 mm.

Intensité à adopter :

Fonction du diamètre et du type des électrodes et de la nature du travail de soudure.

Diamètre des électrodes en mm.	Intensité en A
3,2	de 20 à 40
4,8	de 50 à 100
6	de 75 à 125
8	de 125 à 175
10	de 150 à 200
12	de 200 à 250
16	de 250 à 300

2) Electrodes métalliques enrobées.

Enrobage réfractaire, fusible ou volatil.

C'est le cas le plus fréquent.

Principaux avantages d'ordre électrique (amorçage de l'arc facilité, stabilité de l'arc assurée), métallurgique (rôle passif : protection de la cathode incandescente, du bain de fusion et de la goutte de métal contre l'action de l'atmo-

sphère ; rôle actif : apport d'éléments d'amélioration ou de remplacement des constituants oxydés), mécanique (guidage de l'arc) et physique (action sur les tensions superficielles du métal fondu).

Dimensions usuelles des électrodes enrobées :

Diamètre en mm.	Longueur en mm
1	150
1,5	225
2 — 2,5	350
3,25 — 4 — 5 — 6 — 8	450

Intensité à adopter pour la fusion :

Diamètre en mm	Intensité en A								
	enrobage mince			enrobage semi-épais			enrobage épais		
	I min.	I max.	I normal	I min.	I max.	I normal	I min.	I max.	I normal
2.....	30	50	40	35	55	45	40	70	55
2,5.....	50	75	60	60	85	70	60	100	80
3,25.....	75	115	95	85	125	105	90	140	115
4.....	110	150	130	120	160	140	130	170	150
5.....	140	190	165	150	210	180	160	240	200
6.....	170	240	200	190	280	235	200	320	260
8.....	210	315	260	250	375	310	250	430	340

Poids de métal déposé à l'heure (électrodes enrobées) :

Sensiblement proportionnel au courant. — En moyenne, 1 kg par 100 A pour une utilisation de 100 p. 100 du temps. Cette valeur est à majorer pour les faibles intensités et à réduire pour les fortes intensités.

Temps nécessaire pour exécuter 1 mètre de soudure :

Variable suivant l'utilisation (l'utilisation K étant définie comme suit :

$$K = \frac{\text{temps de soudure.}}{\text{temps total.}}$$

Pour $K = 100$ p. 100, on a les résultats suivants :

Épaisseur à souder, en mm	3	5	10	15	20
Longueur de soudure exécutée à l'heure, en m	8,250	5,000	2,400	1,250	0,900

Consommation d'énergie électrique en kWh par kg de métal déposé :

Fonction du type d'électrodes et de la nature du courant.

En courant continu, elle varie en moyenne entre 4,5 kWh: kg pour les fortes intensités et 5,5 kWh: kg pour les faibles intensités. Ces valeurs doivent être multipliées par un coefficient tenant compte des pertes à vide et de l'utilisation K . Ce coefficient varie de 1,35 à 1,70 suivant le diamètre des électrodes, pour $K = 40$ p. 100 (valeur la plus courante).

En courant alternatif, la consommation est de l'ordre de 3,5 kWh: kg, le coefficient correctif étant de 1,05 quelle que soit l'intensité du courant.

Consommation d'électrodes :

Fonction du poids du métal déposé. Le tableau ci-après donne le poids du métal déposé par diamètre d'électrode ; on peut en déduire le nombre d'électrodes nécessaires pour fondre 1 kg de métal.

Diamètre en mm	2	2,5	3	3,25	4	5	6
Volume en cm^3	1,20	1,85	2,70	3,10	4,85	7,80	10,60
Poids en g	9,5	14,5	21	24,50	38	61	83

Utilisation habituelle (facteur de marche) :

Le coefficient d'utilisation K varie généralement de 25 p. 100 (cas d'un atelier comportant un certain nombre de soudeurs) à 60 p. 100 (cas d'un seul soudeur). Moyenne courante : 40 p. 100.

Consommation d'énergie électrique en kWh par mètre de soudure :

On peut admettre les valeurs suivantes :

Epais. de la tôle d'acier (mm) (1)		4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30
Cons. d'én. él.	{ poste statique mono	1,07	2	4,7	7,65	10,5	14,2	18,4	23	29,5	45	63,5
	{ poste tri-mono. . .	0,15	0,28	0,65	1,1	1,46	2	2,57	3,25	4,15	6,3	9
	{ groupe rotatif et cont.	0,505	0,95	2,2	3,5	4,93	6,7	8,64	10,8	13,9	21	30

(1) Tôles chanfreinées à 60° jusqu'à 6 mm et à 90° au-dessus de 6 mm.

Remarque : Les courants conventionnels de soudure unihoraire normaux tendent à être normalisés comme suit :

125-200-320-500-800-1 250 A

2. Soudage automatique à l'arc.

Deux procédés :

1° l'électrode se déroule sous forme de fil continu assurant l'apport de métal et maintenant l'arc ;

2° l'électrode est une baguette de graphite et, s'il y a lieu, le métal d'apport est fourni par un fil auxiliaire.

Intensité plus importante qu'en soudure manuelle.

Même matériel : pour obtenir des intensités de 1 200 A, on couple généralement deux génératrices de 600 A. Même poids de métal déposé, soit environ 1 kg: 100 A.

Centrales de soudage.

Notamment pour les chantiers navals.

Distribution du courant continu à la tension constante de 40-45 V. La chute de tension nécessaire pour atteindre la tension de soudage de 25 V est obtenue au moyen d'une résistance (en série avec l'arc) par soudeur.

Groupes de 2 000 A, couplés en parallèle s'il y a lieu.

Centrales pouvant atteindre 10 000 A, soit 400-450 kVA.

3) Soudage par résistance.

Principaux avantages : poids de matière chauffée réduit au minimum ; rendement thermique élevé ; cons. d'én. él. très faible ou négligeable ; opération rapide ; oxydation du métal évitée ; conservation des qualités mécaniques du métal.

Puissance des machines à souder par résistance :

Type des machines	Nature des travaux	Puissance en kVA	
		courante	maximum (2)
<i>Recouvrement :</i>			
Machines par points (machines fixes).	tous travaux (1) ..	de 2 à 180	500
Pincés à souder....	tous travaux.....	de 150 à 200	400
Machines continues à molette.....	travaux légers à cadence faible ou moyenne	25-50-75	acier : 150 (300 avec les molettes multiples) ; alliages légers : 300
	travaux légers et à grande cadence..	100-125-200	
	travaux moyens à grande cadence et travaux légers d'alliages non ferreux.....	230-300-400	
Presses à souder...	travaux spéciaux.	100-800 (20-25 kVA par point)	1 250
<i>Rapprochement :</i>			
Toutes machines ...	travaux spéciaux.	de 100 à 300	1 200-1 500

(1) La puissance instantanée réellement prise est indéterminée : par ex : avec une même machine, elle peut varier suivant les conditions de travail de 3 à 20 kVA, de 5 à 50 kVA, de 8 à 80 kVA, de 60 à 180 kVA.
(2) Maximum réalisé jusqu'alors, à notre connaissance.

1. Soudure par recouvrement.

Le tableau des pages 74 et 75, donne, pour les machines à souder ordinaires, les caractéristiques principales approchées de la soudure par points et notamment la puissance maximum et la cons. approximative pour les puissances les plus courantes, en fonction des épaisseurs à souder, du régime de travail et des conditions du circuit secondaire (longueur et écartement des bras).

La pression maximum adoptée pour les électrodes en cuivre est en principe de 6 à 8 kg: mm², tout au moins pour les soudages moyennement rapides; elle peut atteindre 10 et même 12 kg: mm² avec certains alliages de cuivre.

Pour l'acier, la pression choisie (6 à 12 kg: mm²) dépend en particulier de l'épaisseur à souder et des difficultés d'ac-

costage. L'intensité minimum à partir de laquelle on peut souder est de 50 A/mm²; pratiquement, on adopte 80 A/mm² au moins pour les vitesses normales de soudage, 120-150 A/mm² pour les soudages rapides et jusqu'à 300-400 A/mm² pour les soudages ultra-rapides.

La cons. d'énergie est fortement réduite lorsque l'on augmente la vitesse du travail (par ex., la réduction peut atteindre 1/4 pour les jantes de bicyclettes).

Le tableau suivant est relatif à des machines à souder à accumulation par condensateurs :

Nombre et épaisseur des tôles à souder mm	Diam. du point mm	Intensité secondaire A	Long. des bras mm	Ecartement des bras mm	Puissance kW	Capacité des condensateurs μ F
2 \times 0,5	4	18 000	1 000	400	15	25 000
2 \times 1	5	35 000	1 000	400	28	38 000

Le tableau suivant est relatif à des machines à souder à accumulation par selfs :

Nombre et épaisseur des tôles à souder mm	Diam. du point mm	Intensité secondaire A	Long. des bras mm	Ecartement des bras mm	Puissance kW	Cos φ du redresseur (1)
2 \times 0,5	3,5-4	12 000	850	400	15	0,80
2 \times 1	4,5-5	22 000	850	400	30	0,80
2 \times 2	5,5-6	26 000	850	400	40	0,80

(1) Redresseur à vapeur de mercure.

Nombre et épaisseur des tôles à souder mm	Diamètre normal du point mm	Intensité secondaire suivant le régime indiqué A	Longueur des bras de la machine mm	Écartement des bras de la machine mm	Pointe de puissance absorbée		Temps de soudure en périodes	Cos φ approximatif	Cons. d'élect. de courant pour 100 points wh	
					kVA	kW				
<i>1 Acier doux.</i>										
2 × 0,5	3	lent :	300	200	2,5	1,5	18	0,6	15	
			500	250	3	1,6	18	0,5	16	
			1 000	400	5	1,75	18	0,3	17,5	
		moy. :	300	200	5	3	8	0,6	13	
			500	250	6	3,2	8	0,5	14	
			1 000	400	10	3,5	8	0,3	15	
	rapide :	300	200	10	6	3	0,6	10		
		500	250	12	6,4	3	0,5	10,75		
		1 000	400	20	7	3	0,3	11,5		
	2 × 1	4	lent :	300	200	5	3	20	0,6	32
				500	250	6	3,2	20	0,5	34
				1 000	400	10	3,5	20	0,3	36,5
moyen :			300	200	7,5	4,5	10	0,6	25	
			500	250	10	4,8	10	0,5	26,75	
			1 000	400	15	5,25	10	0,3	28,75	
rapide :		300	200	12,5	7,5	5	0,6	20		
		500	250	15	8	5	0,5	21,5		
		1 000	400	25	8,75	5	0,3	23		
2 × 2		6	lent :	300	200	10	6	35	0,6	140
				500	250	12	6,4	35	0,5	150
				1 000	400	20	7	35	0,3	160
	moyen :		300	200	12,5	7,5	25	0,6	100	
			500	250	15	8	25	0,5	107,5	
			1 000	400	25	8,75	25	0,3	115	
	rapide :	300	200	20	12	10	0,6	68		
		500	250	25	12,8	10	0,5	78		
		1 000	400	40	14	10	0,3	80		
	2 × 3	7	lent :	300	200	15	9	50	0,6	250
				500	250	18	9,6	50	0,5	268
				1 000	400	30	10,5	50	0,3	280
moyen :			300	200	20	12	30	0,6	200	
			500	250	25	12,8	30	0,5	215	
			1 000	400	40	14	30	0,3	230	
rapide :		300	200	25	15	18	0,6	150		
		500	250	30	16	18	0,5	160		
		1 000	400	50	17,5	18	0,3	173		
2 × 4		8	lent :	300	200	20	12	80	0,6	600
				500	250	25	12,8	80	0,5	640
				1 000	400	40	14	80	0,3	680
	moyen :		300	200	25	15	60	0,6	500	
			500	250	30	16	60	0,5	535	
			1 000	400	50	17,5	60	0,3	575	
	rapide :	300	200	35	21	35	0,6	400		
		500	250	42	22,4	35	0,5	425		
		1 000	400	70	24,5	35	0,3	460		

Nombre et épaisseur des tôles à souder mm	Diamètre normal du point mm	Intensité secondaire suivant le régime indiqué A	Longueur des bras de la machine mm	Ecartement des bras de la machine mm	Pointe de puissance absorbée		Temps de soudure en périodes	Cos φ approximatif	Cons. d'élect. de courant pour 100 points wh	
					kVA	kW				
<i>1° Acier doux (suite).</i>										
2 × 5	9	lent : 12 000	300	200	20	12	120	0,6	1,350	
			500	250	25	12,8	120	0,5	1,500	
			1 000	400	40	14	120	0,3	1,650	
		moyen : 15 000	300	200	30	18	100	0,6	1,000	
			500	250	36	19,2	100	0,5	1,075	
			1 000	400	60	21	100	0,3	1,150	
	rapide : 18 000	300	200	40	21	60	0,6	800		
		500	250	50	26	60	0,5	860		
		1 000	400	80	28	60	0,3	920		
	<i>2° Laiton.</i>									
	2 × 0,5	2	lent : 5 000	300	200	6,25	3,75	18/50	0,6	40
				500	250	7,5	4	18/50	0,5	43
1 000				400	12,5	4,3	18/50	0,3	46	
moyen : 8 000			300	200	12,5	7,5	8/50	0,6	35	
			500	250	15	8	8/50	0,5	37,5	
			1 000	400	25	8,75	8/50	0,3	40	
rapide : 10 000		300	200	15	9	5/50	0,6	25		
		500	250	18	10,4	5/50	0,5	26,5		
		1 000	400	30	11,5	5/50	0,3	28,7		
2 × 1		3	lent : 8 000	300	200	12,5	7,5	60/50	0,6	240
				500	250	15	8	60/50	0,5	257
				1 000	400	25	8,75	60/50	0,3	275
		moyen : 10 000	300	200	20	12	28/50	0,6	190	
			500	250	24	12,8	28/50	0,5	204	
			1 000	400	40	14	28/50	0,3	218	
rapide : 12 000		300	200	30	18	15/50	0,6	150		
		500	250	36	20,8	15/50	0,5	160		
		1 000	400	60	23	15/50	0,3	172		
<i>3° Aluminium.</i>										
2 × 0,5	2	moyen : 10 000	300	200	15	7,5	6/50	0,5	40	
			500	250	20	8	6/50	0,4	42,5	
			1 000	400	35	8,6	6/50	0,3	46	
		rapide : 14 000	300	200	30	9	3/50	0,3	30	
			500	250	45	10,4	3/50	0,2	32	
			1 000	400	80	11,5	3/50	0,2	34,5	
	2 × 1	3	moyen : 18 000	300	200	40	18	20/50	0,5	200
				500	250	60	19,2	20/50	0,4	215
				1 000	400	115	20,7	20/50	0,3	230
		rapide : 25 000	300	200	85	22	10/50	0,3	150	
			500	250	140	23,5	10/50	0,2	160	
			1 000	400	220	25,2	10/50	0,1	173	

2. Soudure par rapprochement.

Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur des puissances adoptées en général :

Mode de soudage	Puissance en kVA : mm ²
Résistance directe.....	minimum : 0,025 normale : 0,04-0,06 très rapide (1) : 0,5
Étincelage direct	soudage manuel.. } normale : 0,06 soudage automatique..... } minimum : 0,1 tôles : 0,4-0,5 très rapide : 0,8

(1) Sur pièces très propres, parfaitement dressées et préparées, et de faible section.

Comme limites extrêmes de la soudure bout à bout, signalons la soudure de fils de 0,3 mm de diamètre et celle de barres de 36 mm² de section.

2° Soudure hétérogène.

α) Brasage.

Métal à braser	Métal d'apport
Aciers.....	laiton à 60 p. 100 de cuivre pur cuivre pur alliage cuivre-étain à 10 p. 100 de Sn alliages cuivre-argent (1)
Cuivre.....	laiton alliages cuivre-argent-zinc (2)
Laitons....	alliages cuivre-argent (3) alliages cuivre-argent-zinc (2)
Bronzes.....	laiton alliages cuivre-argent-zinc (2) alliages cuivre-étain à forte teneur de Sn

(1) Ex : 50 p. 100 Cu + 50 p. 100 Ag (800° C);
 (2) Ex.: 1/3 Cu + 1/3 Ag + 1/3 Zn (740° C); autre ex. : 24,2 Cu + 65,8 Ag + 10 Zn (715° C);
 (3) Ex. : 85 p. 100 Cu + 15 p. 100 Ag, avec addition de 5 p. 100 P (800° C).

Temp. de brasage (temp. des métaux ou alliages de brasure) :

Cuivre	: 1100 — 1130° C
Laitons	: 900 — 1050° C
Brasures tendres	{ 650 — 850° C (fusion)
	{ 675 — 900° C (traitement)

En principe, la temp. de brasage est de 20 à 100 °C supérieure au point de fusion (liquidus) du métal ou de l'alliage de brasure.

En résumé, les temp. de brasage varient de 675 à 1100 °C environ, ce qui permet de réaliser les brasures des métaux suivants : aciers doux et dur, aciers inoxydables, fontes, carbure de tungstène, cuivre, laitons, maillechorts, bronzes, nickel, etc.

Principaux avantages : précision de la température ; possibilité de recourir à des atmosphères spéciales ; facilité du travail.

Appareils usuels : fours et machines à braser.

1. Fours pour brasage.

Ex. d'application ; outils en carbure de tungstène ou en acier rapide rapportés ; contacts en tungstène rapportés ; petites pièces de machine à coudre (cuivre en cordon appliqué sur le joint avant mise au four) :

Emploi de fours fixes ou continus, avec atmosphère protectrice, notamment hydrogène et azote.

Ex. de fours continus à tablier à atmosphère contrôlée :

Nature des pièces	Temp. ° C	Longueur du four chauffé mm	Puissance kW	Production kg : h
Manches de couteaux	850	1100	17	19
Boîtiers de montres	900	700	17	12
Petites pièces de 40 et 90 gr.	1050	1100	18	16

2. Machines à braser.

Exemples :

1° Brasage des éléments en cuivre (barreaux et anneaux) des cages d'écureuil des moteurs électriques (brasure à l'argent), au moyen d'une machine à chauffer avec électrodes en charbon.

2° Machines à braser (type machines à souder) pour fils de 1 à 5 mm de diamètre, pour fils de 25/10 mm, pour pla-

quettes de carbure de tungstène ou d'acier rapide sur supports en acier ordinaire. (Brasure d'argent ou de cuivre en lamelle intercalée entre le corps de l'outil et le métal à rapporter. Avantage : chauffage de la plaquette seulement par son contact avec le corps auquel aboutissent les deux électrodes d'aménée de courant).

Section brasée au minimum en mm	500	800
Puissance en kVA	7,5	15

g) Soudure ordinaire (soudure tendre).

Cette soudure est réalisée notamment sur les métaux suivants : fers blanc et galvanisé, cuivre, alliages cuivreux, plomb, étain, zinc.

Métal d'apport : alliage d'étain et de plomb (voir page 50).

Point de fusion inférieur à 400°C.

Emploi de *fers à souder* (voir volume I, page 56) ou de *machines spéciales* :

Exemples :

1° Machine à souder assurant le chauffage localisé en vue d'un soudage à l'étain (ex. : soudage à l'étain des deux tubes et de la languette longitudinale intermédiaire des fusils de chasse, tubes et languettes étant chauffés au moyen d'une machine à souder).

2° Machine automatique à souder à l'étain pour fils de connexion en cuivre ou en laiton sur le zinc des piles ; électrode en charbon (chauffage indirect) ; production de 20-30 zincs à la minute ; 2 kVA.

j) Applications particulières.

1° Découpage électrique.

Notamment, découpage du fer, de l'acier et de la fonte. Procédé analogue à celui de la soudure à l'arc. Employé en particulier dans les cas où l'on ne peut avoir recours au découpage oxy-gaz.

Electrodes enrobées (donnant des scories très fluides) pour le découpage à l'air.

Electrodes creuses traversées par un jet d'oxygène sous pression pour le découpage sous l'eau (jusqu'à 40 m. de profondeur).

Exemples :

1° Découpage de tôles d'acier avec électrodes en charbon,

Epaisseur mm	Vitesse de coupe m:h	Cons. d'én. él. kWh:h
6	16	11
12	12	15
25	6,5	16

2° Découpage de tôles d'acier de 10 mm à la vitesse de 6 m à l'heure avec des électrodes métalliques de 5 mm de diamètre, cons. de 3,5 kWh:h pour l'arc, soit environ 7 kWh:h compte tenu du rendement du transformateur de soudure.

2° Gravure électrique.

Emploi de *machines à graver*.

Ex. : Petit transformateur (1,5 kVA) à tension secondaire réglable avec 2 électrodes dont l'une est une simple amenée de courant et l'autre un crayon avec pointe en tungstène de 1,5 à 3 mm de diamètre que l'on promène sur la pièce, d'où fusion locale du métal. Emploi pour le numérotage des pièces mécaniques.

3° Métallisation au pistolet.

Procédé de recouvrement (shoopage) des surfaces par du métal volatilisé au moyen d'un *pistolet* à air comprimé et à chauffage électrique (courant continu de préférence).

Métal	Zinc	Aluminium	Fer	Laiton
Diamètre du fil en mm	1,5	1,5	0,8	0,8
Avance du fil en m:mm	2 à 5	2 à 5	2 à 4	3 à 5
Tension en V.....	20	20	25	35
Intensité en A	45	45	60	40 à 70

A². VERRE

Temp. approximatives de *vitriification* à partir des constituants (temp. suffisante pour qu'il n'y ait pas d'infondus) :

Substance	Temp. (° C)
Verres ordinaires	I 200-I 250
Verres durs (genre Pyrex)	I 350-I 400
Silice pure.....	I 800
Silice opaque.....	2 000
Rubis de synthèse.....	2 050

Temp. d'*élaboration* y compris l'affinage :

Opération	Temp. °C	
Fonte et affinage {	cristal.....	I 300
	verre ordinaire (1).....	I 420-I 450
	verre dur (2).....	I 550-I 580
Travail pour verre courant	I 050-I 150	
(1) Bouteilles, vitres, glacerie.	(2) Genre Pyrex.	

Chauffage adopté : par résistance, par induction.

1° Fours à résistance.

Chauffage direct.

Fours à bassin à électrodes (day-tanks ou fours continus), en général de grande capacité.

Temp. en °C	Résistivité en ohms/cm/cm ² (1)
I 200	4,5
I 300	3,5
I 400	3
I 450	2,8
(1) Verre sodocalcique.	

La résistivité du verre diminue rapidement à chaud, par ex. d'environ $100 \cdot 10^6$ ohms : cm² : cm² à froid, à 5 ohms : cm : cm² à 1 200°C, le verre devenant pratiquement conducteur vers 210°C par ex. Se reporter au tableau de la page 80.

Electrodes en fer ou en carbone.

Chauffage *transversal* par rapport au cheminement du verre (four Sauvageon ; four Raeder, 5 t/j, cons. un peu supérieure à 1 kWh : kg de verre fondu ; four Cornélius, cons. inférieure à 1 kWh : kg), *longitudinal* (four Sauvageon deuxième type, four Raeder deuxième type, four Grebertchikoff, four Hitner, four Borel-Electroverre Romont-Saint-Gobain) ou *spécial* (four Souchon-Neuvesel).

Day-tanks : en général 150-250 kW, production de 1 t : jour.

Fours continus : de 1 000 à 3 000 kW, production de 12 à 25 t : j, cons. de 2,5 à 1,5 kWh : t. Exemples : fours à moulages ou à flaconnages, 1 000 kW, 12-14 t : j ; four de verre à vitres, 1 500 kW, 12 t : j ; four à coulée continue de verre, 2 200 kW, 30 t : j.

Technique en cours d'évolution ; il semble que l'on s'oriente, tout au moins dans les régions où le prix du courant n'est pas relativement très bas, vers la fusion mixte (Saint-Gobain) comportant une fonte vers 1 250°C (avec des calories bon marché) suivie d'un affinage vers 1 400°C au four électrique, la cons. devant alors être de l'ordre de 0,2-0,3 kWh : kg.

Chauffage indirect.

Le four à creuset (petite capacité) avec résistances en carbure de silicium semble devoir être abandonné.

Le four à résistance axiale en graphite (type Fenwick-George) est utilisé pour la fabrication du verre de silice : cons. de 1 500 à 10 000 kWh : t (1,5 kWh : kg dans un four centrifuge à 2 000°C).

2° Four à induction.

La HF (four à éclateur avec chauffage indirect) a été utilisée pour obtenir le ramollissement du verre (ex. : fixation d'un pied au calice d'un verre à boire).

La très haute fréquence est adoptée pour certains travaux (ex. : dans la fabrication des lampes de T. S. F.).

A³. SELS ET MELANGES DE SELS

Données générales.

Les sels et mélanges de sels, utilisés dans les bains de sels pour traitements thermiques des métaux, sont généralement les suivants :

Nature des sel de base	Température usuelle d'utilisation du mélange °C
Nitrates et nitrites.....	180- 550
Chlorures et cyanures.....	500- 700
Chlorures et carbonates.....	600- 730
Chlorures, carbonates et cyanures...	600- 950
Chlorures.....	700-1 080
Cyanures (1).....	800- 950
Chlorure et baryum et éventuellement sels spéciaux.....	500- 600
	1 000-1 350

(1) 800-950 °C pour la cémentation liquide ; 500-600 °C pour la nitruration liquide des aciers rapides.

Ils sont utilisés pour les bains suivants :

Nature de l'opération thermique	Températures limites approximatives usuelles °C
Revenu et trempe par étapes des aciers, des aciers de construction et des aciers fondus.....	180- 700
Chauffage avant trempe } de construction et fondus.	700-1 000
avant } inoxydables.....	1 000-1 020
trempe } rapides.....	1 120-1 350
des aciers } rapides.....	800- 950
Cémentation liquide des aciers (1) ..	
Préchauffage avant trempe, trempe par étapes et revenu des aciers rapides.....	500- 600
Nitruration superficielle des aciers rapides.....	550
Recuit des alliages de cuivre ou d'argent.....	700- 800
Chauffage avant trempe des alliages légers.....	480- 520

(1) Les bains correspondants contiennent plus ou moins de cyanure et sont par suite désignés en général sous le nom de « bains de cyanure », l'opération étant alors appelée « cyanuration ».

Pratiquement, recours au *chauffage par résistance* : Les mélanges sont contenus dans des récipients cylindriques ou parallélépipédiques et le chauffage se fait soit au moyen de résistances extérieures ou quelquefois d'éléments immergés, soit par passage du courant dans le mélange lui-même (fours dits « à électrodes »). La température d'emploi est plus ou moins supérieure à la température de fusion du mélange, suivant le cas.

Fours à chauffage extérieur.

Fours cylindriques à bain de sels (550°C max.).

Dimensions utiles du creuset en mm		Puissance en kW
diamètre	profondeur utile	
200	350	5
250	400	7
300	500	9
350	500	12
400	550	15
450	600	18
500	650	21

N. B. Ces fours peuvent être également utilisés pour bains de plomb, d'étain et de régule.

Fours rectangulaires à bain de sels (520°C max.).

Dimensions utiles en mm			Puissance en kW	
longueur	largeur	profondeur	nominale	régime réduit
680	320	400	18	--
1 400	800	1 300	60	30
2 800	750	650	72	36
1 250	1 000	2 000	120	40
8 200	800	700	180	90
5 000	1 200	1 000	200	50
8 600	700	600	220	110

N. B. — Ex. : a) Four de trempe d'alliages légers ds 200 kW, 8 t de sels; mise en temp. à 530 °C en 20 h; production max. à 520 °C de 1 t : h.
 b) Four de trempe d'alliages légers de 60 kW, 3 t de sels; mise en temp. à 500 °C en 11 h; production max. à 500 °C de 0,3 t : h.

Fours cylindriques à bain de sels (950°C max.).

Dimensions du creuset en mm		Puissance en kW		Cons. d'én. él. pour maintien en temp., en kWh:t	
diamètre	hauteur	pour 650 °C	pour 900 °C	à 650 °C	à 900 °C
200	400	9	10	2,5	3
250	500	12	15	3	3,5
300	600	15	20	3,8	4,3
350	600	18	24	4,2	4,7
400	650	22	30	5,5	6
450	700	25	36	6,5	7
500	750	30	44	7	8

N. B. — Ces fours peuvent également être utilisés pour les bains de plomb.

Autres fours cylindriques à bain de sels jusqu'à 900°C.

Dimensions utiles en mm		Puis. en kW	Puis. de maintien en temp., four fermé, en kW	Durée de la mise en temp. (900°C), en h
diamètre	profond.			
200	350	15	3-4	5-6
250	400	18	4-5	5-6
350	500	27	6-7	5-6
400	600	32	7-8	5-6

Fours cylindriques de cémentation liquide (cyanuration)
(900-930°C).

Dimensions utiles en mm		Puissance en kW	Durée de la mise en temp., en h	Puissance de maintien en temp., en kW
diamètre	profondeur			
200	350	16	5	7
250	400	18	5	8
350	400	30	6	14
350	500	32	6	15
400	500	35	4 1/2	12
400	600	40	4 1/2	13
400	600	30	4 (1)	7-10 (1)

(1) 900°C; pour les autres fours : 930°C.

Fours à chauffage par éléments immergés.

Fours à bain de sels à cuve (500°C).

Dimensions en mm			Puis- sance en kW	Pertes à vide à 500° C, en kW	Durée de mise en temp. (à 500°) en h	Production d'alu. en kg : h (chauffage 20 à 500°C)
longueur	larg.	profond.				
800	400	400	22	5	6 ½	80
1 100	500	600	30	7	10	120
2 100	500	600	50	12	13	200
2 500	800	1 200	130	16	16	500
6 200	500	600	150	25	11 ½	540
8 500	600	600	185	32	14 ½	500

Fours à électrodes.

Ces fours sont de deux types, suivant la température d'emploi.

Caractéristiques de certains fours à bain de sels à électrodes :

Dimensions du creuset en mm			Puissance kW
diamètre	hauteur du bain	profond. totale	
<i>Creuset réfractaire (1) 1 350° max.</i>			
80	100	150	10
150	200	250	20
225	300	375	35
300	400	475	60
<i>Creuset métallique (2) 500-1 000° C.</i>			
200	300	400	15-20
300	400	500	25-35
400	500	600	35-60
500	600	700	60-90

(1) Le premier four possède une zone unique de chauffage et de travail; les autres fours sont soit à zone unique, soit à deux zones, les électrodes étant alors groupées à une extrémité du creuset. Tous ces fours sont à creuset hexagonal.

(2) La première valeur indiquée pour la puissance se rapporte à 500° C, la deuxième valeur à 1 000° C.

Caractéristiques d'autres fours à bain de sels à électrodes (1) :

Dimensions en mm			Puissance en kW (2)	Cons. d'én. él. à vide (3) en kWh			Production max. d'acier en kg : h		
longueur ou diamètre	larg.	prof.		à 930 °C	à 800 °C	à 650 °C	à 930 °C	à 800 °C	à 650 °C
35		60	50	15	11	8	140	185	290
35		90	70	20	15	11	210	260	340
140	35	60	130-165	55	41	30	330-460	420-600	700-940
140	35	90	165-210	65	49	37	440-630	550-760	890-1200
200	35	60	165-210	80	60	45	350-570	500-720	840-1150
50		60	85	25	18	12	250	320	500
50		90	105	30	22	16	330	390	620
50		130	130-165	50	37	29	340-500	440-610	700-950
70	70	90	130-170	65	49	37	280-440	380-550	650-900
100	50	60	130-165	50	37	29	340-500	440-610	700-950
100	50	90	165-210	65	49	37	440-640	550-780	900-1200
200	50	60	210-260	90	67	50	520-750	680-920	1120-1450

(1) A double chambre : chauffage et travail — pour cémentation liquide.

(2) Pour certaines dimensions, ces fours se construisent avec l'une ou l'autre des puissances indiquées.

(3) Avec bain recouvert de graphite.

Caractéristiques d'autres fours à bain de sels à électrodes.

Dimensions utiles en mm		Puissance nominale, en kW	Durée de mise en temp. en partant du four froid, sel gelé, en h	Puissance de maint. à 1350°C, sans couvercle, en kW	Production horaire en acier préchauffé à 750°C, en kg
diamèt.	profond.				
150	250	22	1 ½	11	20
200	300	30	2	15	45
250	350	50	2 ½	22	60
300	430	70	3	31	115
350	450	90	3	38	190

N. B. — Il peut y avoir danger d'explosion avec les bains de sels dans deux cas :

1° s'il y a surchauffe, dans le cas des bains à base de nitrates, à partir de 600°C, surtout s'il s'agit de traitement d'alliages légers (à cause de la présence de poussières d'aluminium) ;

2° à n'importe quelle temp. si on mélange des sels oxydants (nitrates par ex.) à des sels réducteurs (cyanures par ex.) ; d'où emploi de bains à faible teneur en cyanure pour le chauffage avant la trempe, lorsque celle-ci s'effectue également au bain de sels (à base de nitrates).

A⁴. SUBSTANCES DIVERSES

Données générales. — Substances solides ou pâteuses à la température ambiante. En pratique, on a généralement recours au chauffage par résistance.

Substances	Températures usuelles de fusion ou de travail (°C)	Nature des appareils
Brai et compound	55-80 (ramollissement) 150-175 (coulée)	cuves : chauffage direct extérieur, chauffage direct par éléments d'immersion, chauffage par bain-marie (temp. variable suivant nature du mélange : brai + huile de lin + colophane).
Cire d'abeille	60-65	cuves chauffées par bain-marie.
Cire de baleine (spermacéti)	49	
Cire de Chine	80	
Cire de Cernauba	83-92	
Cire de palme	100 (minimum)	
Chocolat	30-35	bacs chauffés par bain-marie ; plaques ou tables chauffantes (voir volume I page 49.)
Colle	60-70	pots à chauffage direct ou à chauffage par bain-marie (voir ci-après et également volume I, pages 52 et 53.
Crème de beauté et fards	60-100-150	réipients divers chauffés par bain-marie.
Gélatine	50-60	cuves à chauffage par bain-marie.
Glace (eau congelée)	100	cas des barrages hydrauliques : courant traversant des résistances métalliques prévues à cet effet ; cas des conduites d'eau : courant traversant les tuyaux gelés ou résistances chauffantes disposées autour de la partie gelée (voir ci-après et également volume III, page 71).
Paraffine	50-60	cuves à chauffage par bain-marie.
Produits chimiques divers	250 (maximum en général)	réipients ou appareils divers ; chauffage par bain-marie, résistances extérieures en éléments d'immersion.
Résines	100-105	d. d.
Sucre (caramélisation)	350-400	d. d.
Suifs et graisses d'animaux	45-55	réipients divers.
Vaseline	25-55	réipients divers.

Les renseignements du tableau précédent ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ils n'ont évidemment pas une valeur absolue. Par ex., le point de fusion des résines peut varier de 70-100°C pour la colophane à 240-360°C pour certaines résines (Zanzibar).

Suivant le cas, on adopte le chauffage indirect par bain-marie chauffé lui-même électriquement (notamment pour les chauffages délicats), le chauffage par résistances extérieures ou le chauffage par éléments protégés immergés.

Il existe toutefois des appareils courants (bouilloires, éléments plongeants, tables et plaques chauffantes) auxquels on peut avoir utilement recours. Les puissances mises en jeu sont généralement faibles. Les consommations d'énergie électrique sont très variables et leur connaissance a priori est impossible à fixer ; d'ailleurs, elle ne présente guère d'intérêt, car le chauffage électrique a en l'occurrence de tels avantages de simplicité, de commodité, de précision et de sécurité que les autres facteurs sont secondaires.

On trouvera ci-après des indications sur certains appareils ou pour certains cas particuliers.

Caractéristiques de certains chauffe-colle à bain-marie

(3 allures de chauffe).

Nombre de pots	Capacité I	Forme	Hauteur mm	Diamètre ou longueur mm	Puissance W
1	1	ronde	230	200	300
1	2	»	250	250	600
1	5	»	320	340	1 200
1	10	»	325	420	2 000
2	2 × 1	rect.	260	350	800
2	2 × 2	»	280	450	1 200
3	3 × 1	»	270	350	1 200
3	3 × 2	»	290	450	1 800

Chauffe-paraffine.

Ex. : Forme rectangulaire ; 10 l ; 1 000 W ; 3 allures ; hauteur totale : 320 mm ; longueur : 550 mm ; largeur : 260 mm.

Dégel des conduites.

Emploi d'un transformateur alimentant la partie de la conduite à dégeler.

On peut admettre les valeurs suivantes :

Diamètre de la conduite en mm (1)	19	25,4	38,1	50,8	76,2
Intensité du courant en A	100	200	300	400	500
Puissance en VA du transformateur par m linéaire de canalisation	60	120	180	240	300
Cons. d'én. él. en Wh par m courant de canalisation	75	100	150	200	500

(1) Renseignements d'origine étrangère.

Dégivrage des lignes de transport d'énergie électrique.

Chauffage par mise sous tension de la ligne disposée en court-circuit.

Dégivrage des ailes d'avion.

Chauffage par résistances superficielles souples constituées par un dépôt de graphite lamellaire obtenu par projection d'un enduit colloïdal contenant en suspension le graphite, sur une surface isolante (papier en amiante).

Appareils pour fusion de neige et de glace.

Fusion de neige et de glace au voisinage des aiguilles de voies ferrées pour éviter les fonctionnements défectueux — P de 1,10 à 1,25 kW.

Chauffage de gomme.

Gomme organique recouvrant le fil de soie naturelle à son arrivée au métier à tisser. On trempe le fil dans un bain d'eau à 74°C.

Chauffage de pièces dans les machines à tricoter.

Chauffage des canaux où passent les aiguilles.

Chauffage des plaques qui portent lesdits canaux, en vue de fluidifier les croûtes (paraffine, huile, produits colorants, débris de fils) qui se forment dans ces canaux.

Vulcanisateur pour câbles électriques (réparation).

Appareil de $L = 900$ mm, $l = 230$ mm, $p = 150$ mm ; contenance : 2,5 à 3 kg de composé spécial à fondre ; 0,5 kW ; temp. : 130°C ; durée d'une opération : 25 mn.

Préchauffage des matières plastiques.

Étuves à résistances (60-70 °C) ou appareils THF (rapidité, temp. plus homogène dans la masse, moindres rebuts; solution très récente).

Fin du deuxième volume.

(Suite et fin dans le troisième volume.)

Note.

La publication du présent mémento ayant été retardée pendant plusieurs années, le texte et les tableaux ont été remis à jour en juin 1945. Le lecteur pourra indiquer ci-après tous renseignements complémentaires qui pourraient lui parvenir.

Pages	Renseignements complémentaires

Pages	Renseignements complémentaires



XXXIII-1945

La Société pour le Développement des Applications de l'Électricité APEL, créée avec le patronage du Groupement des Secteurs Français, a pour objet l'amélioration et la vulgarisation des appareils électriques d'applications diverses.

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