



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

20804

Distr.
RESTREINTE

ITPD/R.1
2 février 1994

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

FRANCAIS
Original : ANGLAIS

MANUEL PRATIQUE

SIDERURGIE

Résultats d'un séminaire sur la conservation
de l'énergie dans la sidérurgie*

1992

Malaisie Indonésie

parrainé par

l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

et par

le Ministère japonais du commerce international et de l'industrie

organisé par

le Centre japonais de conservation de l'énergie (ECC)

* Le présent document est une traduction non officielle d'un texte n'ayant pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

Préface

La conservation de l'énergie est une mesure essentielle qui permet de surmonter les problèmes découlant de la crise énergétique et de la dégradation environnementale dans le monde. Les pays en développement en particulier veulent faire prendre conscience davantage de la manière inefficace de laquelle l'énergie est produite et utilisée chez eux. Toutefois, on ne dispose que d'informations limitées en ce qui concerne l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Le savoir-faire concernant les techniques d'économie et de conservation de l'énergie devrait donc être communiqué aux gouvernements et aux directeurs industriels ainsi qu'aux ingénieurs et opérateurs travaillant dans les usines des pays en développement. Il est particulièrement important d'acquérir les connaissances disponibles sur les technologies et les techniques de conservation de l'énergie.

En décembre 1983, l'ONUDI a organisé à l'intention des pays asiatiques une réunion régionale sur la consommation de l'énergie ainsi qu'une réunion d'un groupe d'experts sur la conservation de l'énergie dans les petites et moyennes industries. Au cours de ces réunions, il a été signalé que, dans le cas de certaines industries énergivores, on pourrait réaliser jusqu'à 10% d'économies en apportant des améliorations sur le plan local en ce qui concerne notamment le contrôle et la gestion de l'énergie.

L'utilisation rationnelle de l'énergie nécessite une application étendue des technologies de conservation dans les différents secteurs industriels où l'énergie est gaspillée. Un des secteurs industriels énergivores dont le rendement pourrait être amélioré par le recours aux technologies modernes de conservation de l'énergie est celui de l'acier.

Dans le domaine de l'industrie de l'acier, on pourrait réaliser d'importantes améliorations au niveau du rendement énergétique en utilisant la chaleur perdue provenant des fourneaux, en ajustant le rapport air/combustible dans les brûleurs des fourneaux et des chaudières en utilisant les eaux usées et en éliminant ou en combinant des procédés de fabrication.

Avec l'appui financier du Gouvernement japonais, l'ONUDI est en train de réaliser un programme régional sur la promotion et l'application des technologies d'économie de l'énergie certains pays asiatiques en développement. Ce programme vise à adapter ces technologies innovatrices de conservation de l'énergie mises au point au Japon aux besoins des pays en développement.

Dans le cadre de ce programme, nous considérons que le transfert de ces technologies pourrait être réalisé de la manière suivante:

i) En effectuant des enquêtes sur l'utilisation et le rendement de l'énergie au niveau de l'usine;

ii) En élaborant des manuels sur la gestion de l'énergie et les technologies de conservation et d'économie de l'énergie, sur la base des résultats des enquêtes susmentionnées;

iii) En présentant et en examinant les manuels lors de séminaires organisés à l'intention de représentants des gouvernements et du secteur industriel, de directeurs d'usines et d'ingénieurs;

iv) En distribuant les manuels à d'autres pays en développement pour qu'ils les utilisent dans leur propre secteur industriel.

L'expérience acquise grâce à ce programme sera appliquée dans le cadre d'autres programmes ou projets portant sur d'autres secteurs industriels et concernant d'autres pays et régions en développement.

L'ONUDI a entamé ce programme avec le projet US/RAS/90/075 (utilisation rationnelle des sources d'énergie dans les industries de l'acier et des textiles en Malaisie et en Indonésie).

Le présent manuel pratique a été élaboré par l'ONUDI en collaboration avec des experts du Centre japonais de conservation de l'énergie (ECC) et porte sur les technologies d'économie d'énergie dans le cadre du projet de l'ONUDI sus-mentionné. Il se base sur les résultats des enquêtes menées, les observations à l'usine, les recommandations et suggestions émanant des séminaires sur la conservation de l'énergie dans les industries de l'acier et des textiles tenus au titre du même projet en janvier 1992 à Djakarta, en Indonésie et à Kuala Lumpur, en Malaisie. Le manuel n'intéressera pas uniquement les gouvernements et les représentants du secteur industriel. Il est destiné en particulier aux ingénieurs et aux opérateurs travaillant dans les usines des pays en développement pour les aider à améliorer le rendement énergétique dans le processus de production.

Nous tenons à remercier les établissements suivants de leur précieuse contribution à l'élaboration et à la publication du présent manuel:

Le Ministère malaysien des mines et de l'énergie
Le Ministère malaysien de l'énergie, des télécommunications et des postes
Le Ministère japonais du commerce international et de l'industrie (MITI)
Le Centre japonais de conservation de l'énergie (ECC)

Juin 1992

Table des matières

1. Caractéristiques du manuel	1
2. Processus de production	2
3. Promotion des techniques de conservation de l'énergie	3
3.1 Four à arc	3
3.1.1. Energie calorifique provenant de la fonte de l'acier dans le four à arc	4
3.1.2. Capacité, taille et matériel électrique requis pour le four à arc	5
3.1.3. Procédé de fusion dans le four à arc	5
i) Matière et procédé d'alimentation	5
ii) Fonctionnement du four à arc	7
3.2 Four à réchauffer	14
3.2.1. Spécifications	14
3.2.2. Caractéristiques de l'énergie absorbée	17
3.2.3. Technologies de conservation de l'énergie	18
3.2.4. Bilan thermique	19
3.2.5. Rationalisation de la combustion	26
i) Optimisation du rapport d'air	26
ii) Contrôle de la pression du four	30
3.2.6. Rationalisation du chauffage et du refroidissement	30
i) Charge Chaude	30
3.2.7. Prévention de la perte de chaleur par rayonnement et par transmission	31
i) Prévention de la perte de chaleur par rayonnement à la surface du four	31
ii) Prévention de la perte de chaleur à travers les orifices	35
3.2.8. Récupération de la chaleur perdue	39
i) Préchauffage de l'air de combustion à l'aide d'un récupérateur	40
Conclusion	43

1. Caractéristiques du manuel

Dans le but de promouvoir la conservation de l'énergie dans la sidérurgie, ce manuel propose un certain nombre de mesures qui favorisent une conservation efficace de l'énergie et explique la manière de les appliquer.

Il met l'accent sur les fours à arc et les fours à réchauffer, qui consomment une quantité d'énergie particulièrement importante et qui nécessitent le recours à de nouvelles mesures de conservation de l'énergie.

Le manuel propose des méthodes globales de conservation de l'énergie ainsi que des exemples pratiques et des résultats qui peuvent servir de référence aux ingénieurs qui s'occupent de l'exploitation des laminoirs. Il leur permettra d'adopter des mesures adéquates de conservation de l'énergie dans leurs propres usines.

Nous espérons que ce manuel se vira de guide pour améliorer le rendement énergétique et recourir à des méthodes de gestion plus efficaces dans le domaine de l'industrie du fer et de l'acier.

2. Processus de production

La méthode de production de l'acier dans le four à arc utilise de la ferraille comme matière brute. Cette méthode permet d'économiser de l'énergie car elle nécessite moins d'énergie que celle du haut fourneau convertisseur pour produire une tonne d'acier brut. La figure 1 illustre le processus de production au moyen du four à arc.

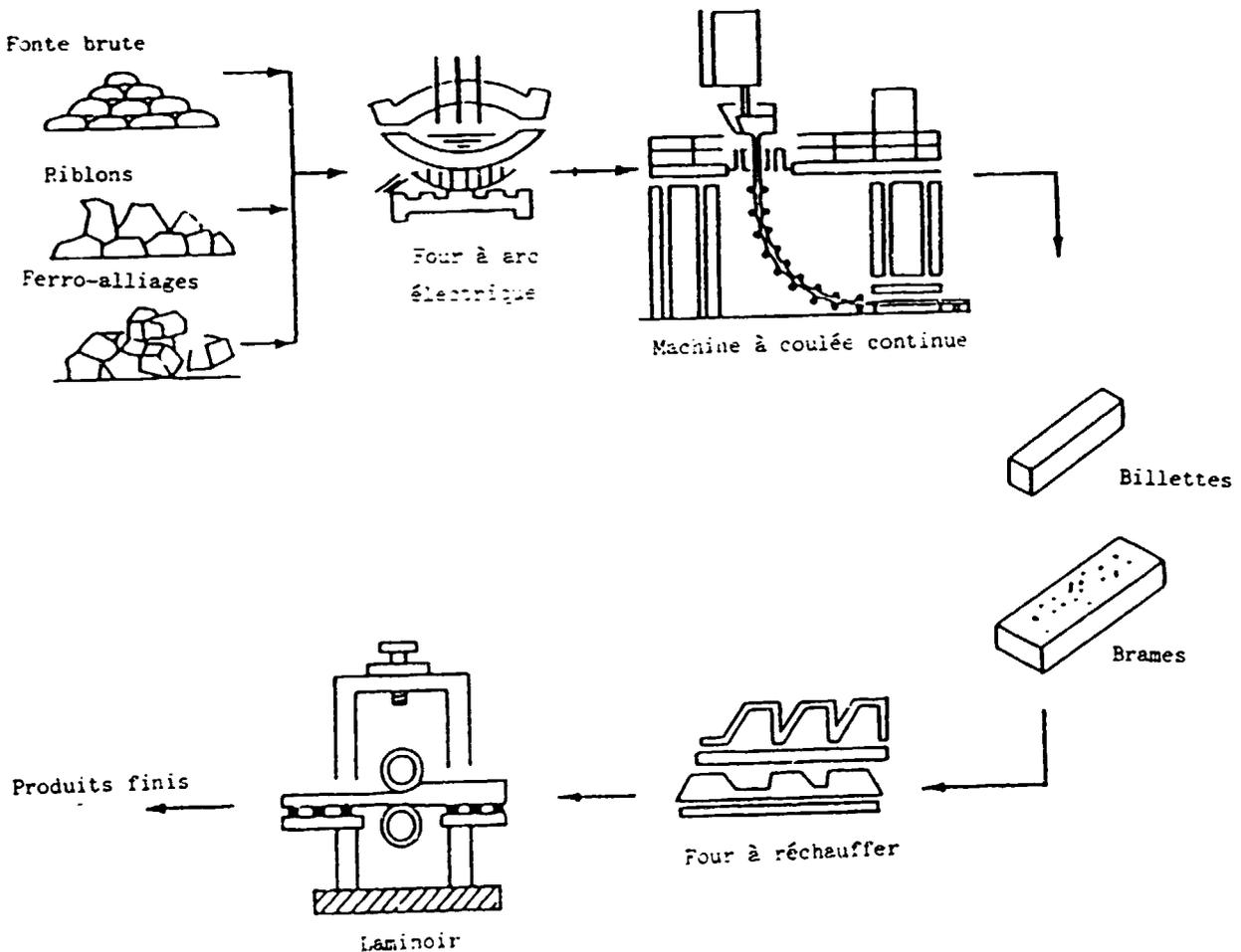


Figure 1 Processus de production de l'acier par la méthode du four à arc

3. Promotion des technologies de conservation de l'énergie

3.1. Four à arc

3.1.1 Transformation de l'énergie calorifique à partir de la fonte de l'acier dans le four à arc

L'électricité est la principale source d'énergie calorifique utilisée pour les fours à arc. En sidérurgie, le four à arc sert principalement à faire fondre l'acier au moyen du chauffage à l'arc et à la résistance électrique et à le débarrasser des éléments indésirables tels que le phosphore, le soufre, l'hydrogène et l'oxygène, au moyen de diverses réactions chimiques, dont la décarburation, la déphosphoration, la désulfuration et la désoxydation, afin de le doter des caractéristiques physiques et mécaniques requises tout en ajustant la composition des principaux éléments tels que le carbone afin d'obtenir de l'acier doté de bonnes propriétés.

Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel que le procédé se déroule aussi rapidement que possible car les réactions mentionnées précédemment risquent de s'inverser si les matières restent longtemps en état de fusion dans le four.

Les principales méthodes utilisées actuellement pour accélérer le processus de fusion et économiser l'énergie électrique nécessaire pour le procédé comprennent le recours à un brûleur à mazout pour activer la fonte dans le four, l'utilisation d'une pipe de lance pour arrêter le débit d'oxygène, le soufflage de l'oxygène dans le bain métallique, et dans certains cas l'utilisation d'un poids lourd pour comprimer les matières d'alimentation encombrantes dans le four.

Mesures à prendre pour économiser l'énergie en exploitant les fours à arc

Pour économiser de l'énergie, il faudrait:

- 1) Réduire le temps de fonctionnement
- 2) Augmenter le temps de soudage par résistance de façon à éviter la consommation inutile d'énergie. Par conséquent, éviter dans la mesure du possible le recours à des matières extrêmement encombrantes, et si cela est nécessaire, les comprimer de sorte qu'elles forment une seule masse.
- 3) Utiliser le soufflage de l'oxygène de manière efficace afin de faire passer rapidement la température à plus de 1600°. L'emploi d'un pique-feu est une des mesure recommandables.
- 4) Etant donné que plusieurs charges arrivent successivement dans le four, il est nécessaire, pour assurer la vitesse de fonctionnement, de coordonner le travail entre l'opérateur de la grue et les autres ouvriers qui reçoivent la charge à l'entrée du four.
- 5) Installer des transformateurs de haute puissance et procéder à une dissolution rapide.

3.1.2 Capacité, taille et matériel électrique requis pour le four à arc

Le tableau 1 illustre les relations entre la capacité, la taille requise et le matériel électrique.

Le taux de fusion dépend largement de la capacité du transformateur comme on le constate dans le tableau 2.

Tableau 1 Relations entre la capacité du four, la taille requise et le matériel électrique

Puissance nominale du four [10 ³ kg]	Diamètre externe du creuse t [m]	Profondeur du bain [mm]	Diamètre de l'électrode [mm]	Puissance du survolteur [MV•A]			Tension induite (four PR) [V]
				PR	HP	UHP	
2	2,178	300	175	1,5	-	-	180/80
5	2,743	400	200 ~ 250	3	5	-	200/100
10	3,353	400	300 ~ 350	5	7,5	-	220/100
20	3,962	450	350 ~ 400	7,5	12	15	240/100
30	4,572	650	400 ~ 450	12	18	22	270/120
50	5,182	750	450 ~ 500	18	25	30	330/130
60	5,486	850	500	20	27	35	400/130
70	5,791	850	500	22	30	40	400/130
80	6,096	900	500	25	35	45	430/140
100	6,400	950	500 ~ 550	27	40	50	460/160
120	6,706	1000	550 ~ 600	30	45	60	500/200
150	7,010	1000	600	30	50	70	500/200
170	7,315	1050	600	35	60	80	500/200
200	7,620	1100	600	40	70	100	560/200
400	9,754	1200	700	-	-	150	

Notes PR: puissance régulière, HP: haute puissance, UHP: ultra-haute puissance

Source: Cast Product Handbook, 4ème éd., éd.: Japan Cast Product Association

Tableau 2 Capacité productive théorique à différents niveaux de puissance électrique (four de 70 tonnes)

	Temps de fusion [min]	Capacité productive théorique [t/m]	Rapport de rendement [%]
PR	159	100	100
HP	105	150	150
UHP	70	230	230

Source: la même que pour le tableau 1

3.1.3 Procédé de fusion dans le four à arc

(i) Matière et procédé d'alimentation

a) Matière d'alimentation

Le choix de la matière utilisée dans le procédé de fusion d'un four à arc dépend du produit qu'on veut fabriquer. Des copeaux, des riblons d'acier comprimés, des riblons d'acier léger et des riblons en acier moulé sont généralement utilisés pour produire des barres et des profilés, alors que des riblons en acier moulé, des riblons en acier léger, des riblons de machines et des riblons en acier moulé sont employés pour la production de moules.

Dans le premier cas, les matières d'alimentation sont encombrantes et ne peuvent pas être enfournées en une fois, nécessitant en général trois étapes ou plus. Dans tous les cas, il est essentiel que la matière d'alimentation ne contienne pas de métaux non ferreux, tels que le cuivre et l'aluminium, ni des substances non métalliques, telles que la rouille et l'huile.

b) Procédé d'alimentation

Des matières d'alimentation en vrac sont utilisées pour la fabrication de produits d'usage général. En règle générale, la verrière est ouverte et un panier de chargement est utilisé pour alimenter le four en plusieurs étapes.

Les figures 2-a, 2-b et 2-c illustrent une séquence typique d'opérations de chargement où une charge de 10 tonnes est alimentée en trois étapes.

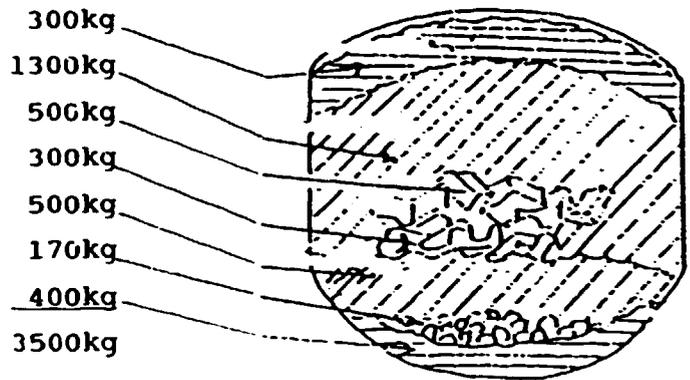
A La première étape, des copeaux de machines sont déposés sur le sol du four, suivis par de la chaux, de la ferraille en acier léger, de la ferraille recyclée, des riblons en acier léger et de copeaux. A la deuxième étape, des riblons d'acier comprimé, des riblons d'acier léger ainsi que des copeaux sont déposés au fond du bain métallique. A la troisième étape, des riblons recyclés, des riblons en acier moulé, des riblons en acier comprimé, des riblons en acier léger et des copeaux sont introduits dans cet ordre du haut du four dans le bain métallique au moyen d'un panier de chargement.

Dans chaque chargement, les matières encombrantes doivent être au fond et les plus légères à la surface. Cela permet une utilisation efficace de l'énergie électrique et empêche l'endommagement des électrodes.

6

1ère charge:

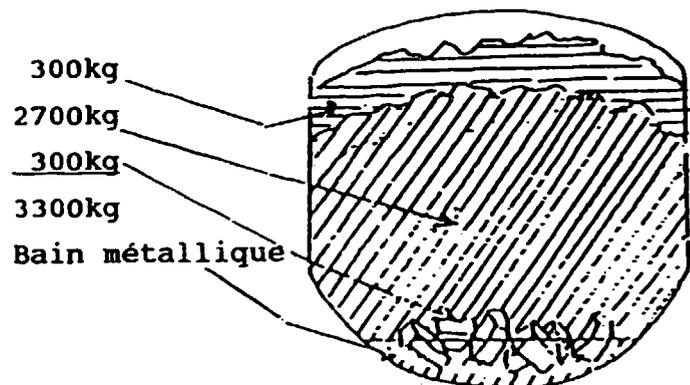
Ribbons d'acier	300kg
Ribbons d'acier léger	1300kg
Ribbons d'acier comprimés	500kg
Ribbons recyclés	300kg
Ribbons d'acier léger	500kg
Chaux	170kg
<u>Copeaux de ribbons d'acier</u>	<u>400kg</u>
Total	3500kg



2-a

2ème charge:

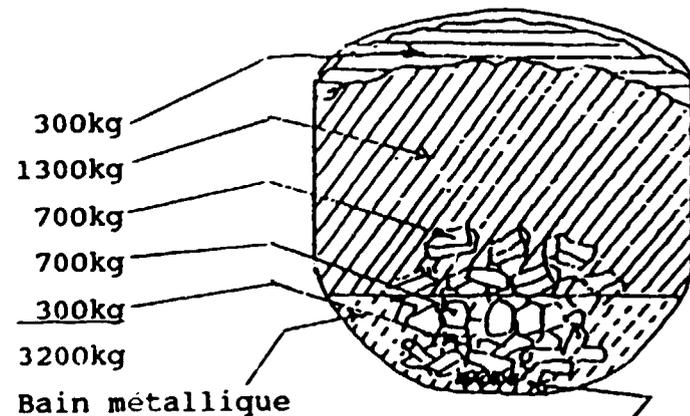
Copeaux d'acier	300kg
Ribbons d'acier léger	2700kg
<u>Ribbons d'acier comprimés</u>	<u>300kg</u>
Total	3300kg



2-b

3ème charge:

Copeaux d'acier	300kg
Ribbons d'acier léger	1300kg
Ribbons d'acier comprimés	700kg
Ribbons en fonte	700kg
<u>Ribbons recyclés</u>	<u>300kg</u>
Total	3200kg



2-c

Foin 40kg

Figure 2 Méthode et séquences d'alimentation du four à arc (en trois étapes)

Une dérivation peut être assurée entre le capteur de poussière et le four où une benne de chargement sera placée pour un préchauffage au gaz de combustion. Cela permettra de réduire la consommation d'énergie de 20 à 50 KWh/t.

(ii) Fonctionnement du four à arc

Après le chargement du four, l'énergie électrique est fournie et les opérations de fusion se déroulent comme dans l'exemple suivant, où le four utilisé a une capacité de huit tonnes (chargement de 10 tonnes).

a) Le temps de fusion

Dans un four à arc, le temps de fusion représente plus de 50% de la consommation totale d'énergie de tout le procédé. Les opérations nécessitent donc une main-d'oeuvre compétente.

a. Le mélange des matières d'alimentation

Il est recommandé d'adopter les compositions et la séquence suivantes:

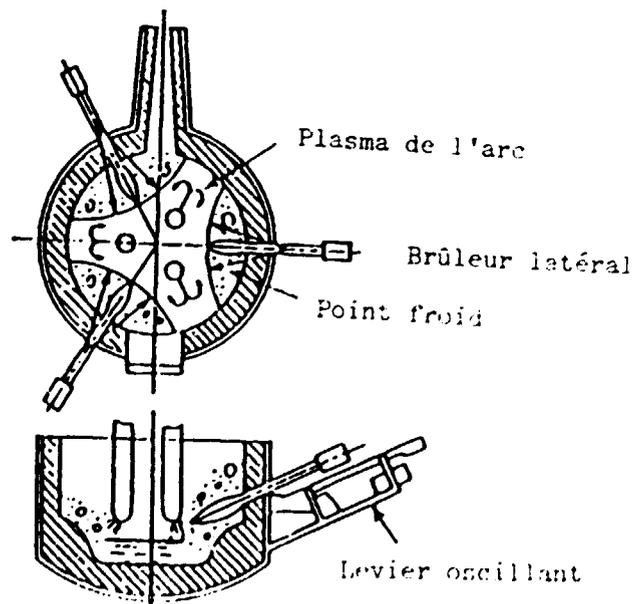
Composition souhaitable

Ribbons en acier léger	60% env.
Ribbons en acier dur	15%
Ribbons en acier comprimés	5%
Ribbons en acier recyclé	5%

Lorsque le chargement est effectué en trois étapes, il est recommandé d'ajuster leur rapport du poids à 45%, 30% et 25%.

b. Le brûleur à mazout

Dans le but d'économiser de l'énergie électrique, un brûleur à pétrole est utilisé pour accélérer la fonte des matières d'alimentation. Dans ce cas, le brûleur est fixé à un point froid du four où les électrodes ne risquent pas d'être brûlées.



Source: Cast Product Handbook, 4ème éd., éd. Japan Cast Product Association

Figure 3 Brûleur à pétrole basculant

c. Spécifications et emploi de la lance à oxygène

Les spécifications souhaitables sont: un diamètre de 20 à 40 mm, une pression de 5 à 10 kg/cm², un écoulement de 20 à 60 m³/mn et une consommation de 5 à 15 m³/t.

L'oxycoupage doit être effectué le long de la paroi latérale du four de telle sorte que cette dernière ne soit pas endommagée (figure 4).

Si l'oxycoupage est nécessaire, il faut le réaliser le plus tôt possible. Ainsi, il doit être commencé environ 15 minutes après le premier chargement, environ 5 minutes après le deuxième et environ cinq minutes après le troisième (le temps étant mesuré après le démarrage de l'alimentation en courant).

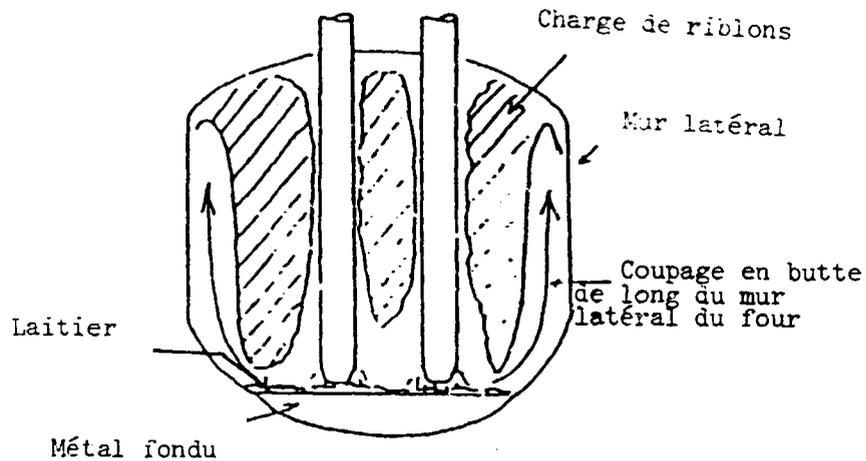
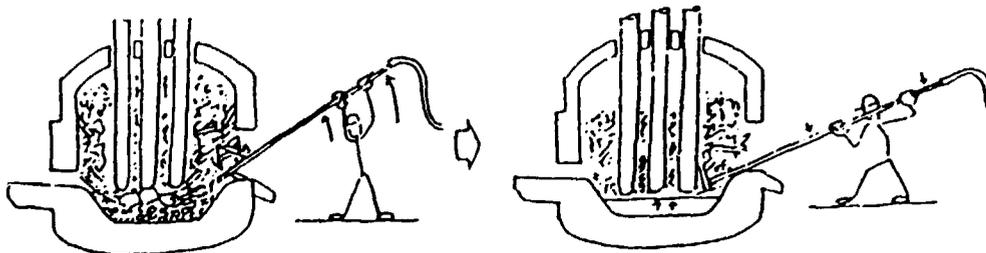


Figure 4 Oxycoupage

Pendant le chauffage, la lance à oxygène doit être introduite profondément dans le métal fondu (50 mm ou plus selon la capacité du four) de sorte que les électrodes ne soient pas endommagées, comme on peut le voir sur les figures 5-a, 5-b et 5-c.



5-a

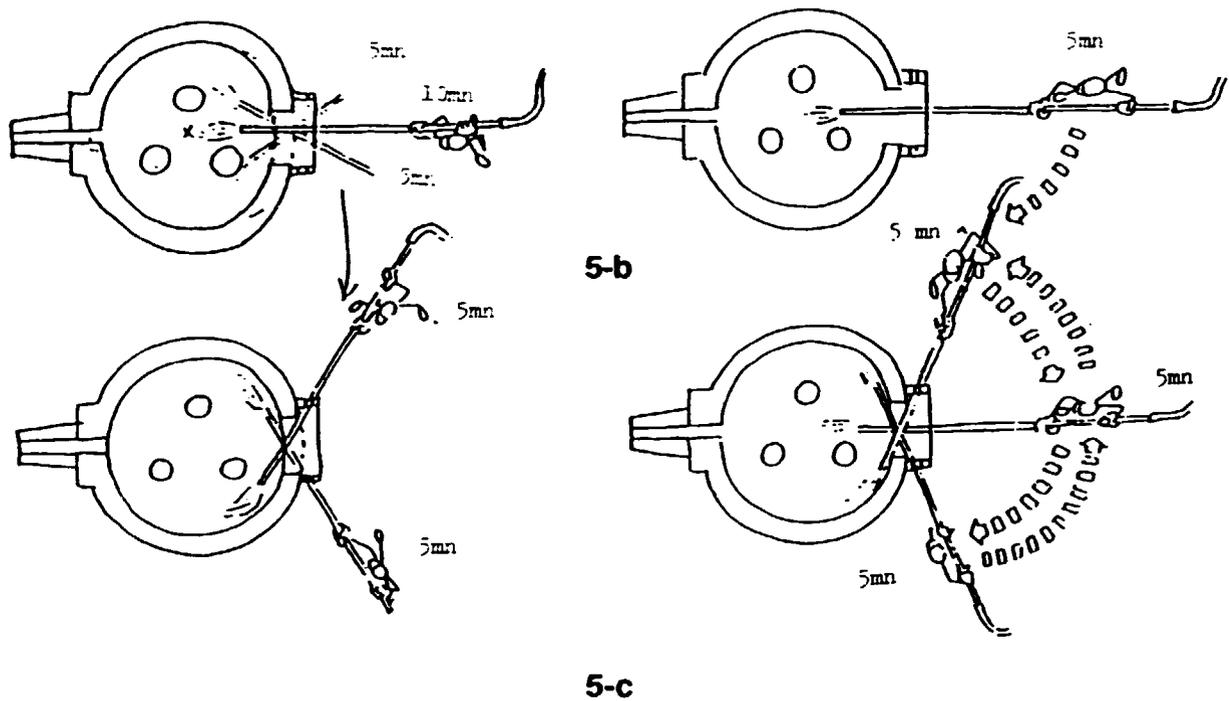


Figure 5 Procédé de soufflage de l'oxygène pendant la période d'oxydation

d. Compression de la matière d'alimentation à l'aide d'un poids

Lorsque la matière en vrac devient légèrement rouge dans le four, la verrière est soulevée et les matières sont comprimées à l'aide d'un poids suspendu à une grue, avec interruption de l'alimentation en électricité afin d'économiser de l'énergie. L'alimentation en énergie est réactivée dès que la compression est terminée. La durée de la compression doit être de l'ordre de 15 à 25 minutes après le démarrage de l'alimentation en énergie selon le poids total de la matière. Cette opération doit être effectuée rapidement et donc en coordination étroite avec la grue.

e. Elimination du laitier après la fusion

Les riblons d'acier qui alimentent le four contiennent souvent des composants indésirables tels que du grès, des pierres, des briques raclées et des débris de béton, laissant de grandes quantités de laitier après la fonte et diminuant la fluidité. Le laitier doit être éliminé le plus rapidement possible.

b) Période d'oxydation

Des échantillons du bain métallique sont prélevés et analysés pour leur teneur en carbone, en silicone, en manganèse et en soufre afin que la composition soit ajustée avant le démarrage de l'oxydation.

La période d'oxydation joue un rôle important dans l'accélération des principaux procédés y compris la déphosphorisation, la désulfurisation, la décarburisation et la désoxydation. Ceci nécessite une température du bain métallique supérieure à

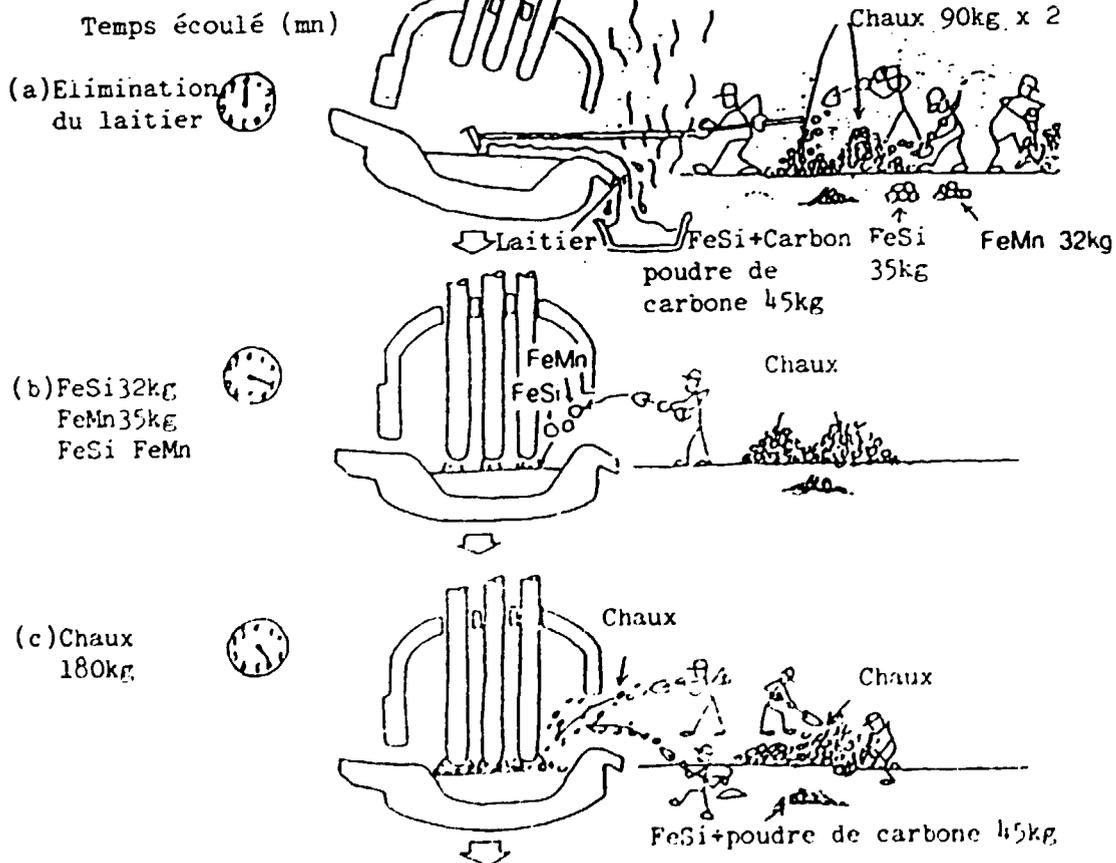
1600°C. Pour y parvenir, on diminue le voltage afin d'intensifier le courant. Le soufflage de l'oxygène à l'aide de la lance est effectué pendant cette période. De plus amples détails concernant cette opération sont fournis dans le paragraphe c. (spécifications et emploi de la lance à oxygène). La température du bain métallique devrait être supérieure à 1620°C à la fin de la période d'oxydation. Le laitier se trouvant à la surface du métal fondu doit être complètement éliminé à la fin de la période d'oxydation.

c) Période de réduction

Pendant la période de réduction, le nettoyage est effectué en présence du laitier basique pour éliminer l'oxygène du bain qui a augmenté pendant la période d'oxydation. La désulfuration se fait en même temps que l'ajustement de la composition et de la température du bain.

Le procédé de désoxydation est une technique de diffusion qui consiste à réduire le laitier et à forcer la désoxydation. L'acier est récupéré lorsque le laitier en réduction est devenu stable après l'augmentation de la température du bain signalant la fin du nettoyage. Ces opérations sont illustrées dans les figures 6-a, 6-b, 6-c, 6-d, 6-e, 6-f, 6-g et 6-h.

Période de réduction



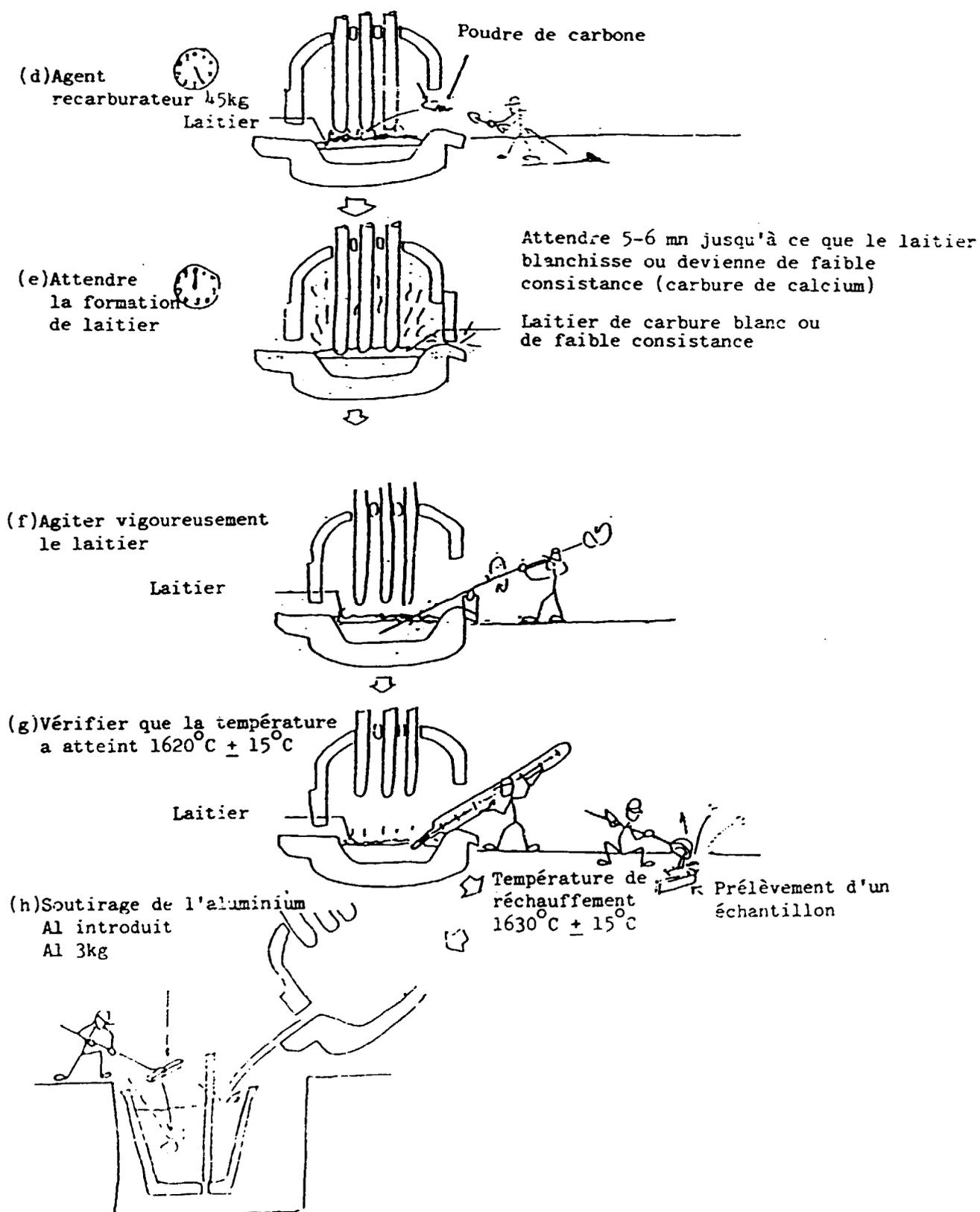


Figure 6 Période de réduction dans un four à arc basique

d) Précautions concernant le fonctionnement du four à arc

Comme indiqué précédemment, le procédé de fabrication de l'acier au moyen de la fusion dans le four à arc vise principalement à extraire les éléments indésirables tels que le phosphore, le soufre, l'hydrogène et l'oxygène, puis à ajuster la composition des divers éléments y compris le carbone. Ces réactions sont très délicates lorsqu'elles sont effectuées en présence d'un laitier de température élevée. Le plus important est donc d'éviter la diffusion de la chaleur hors du four et l'entrée de l'air dans ce dernier. Il est également essentiel d'empêcher le four d'être en état de produire du laitier. En outre, les opérations doivent être effectuées rapidement pour que la qualité du produit ne soit pas affectée.

e) Opérations à effectuer après le soutirage de l'acier et la réduction de la durée

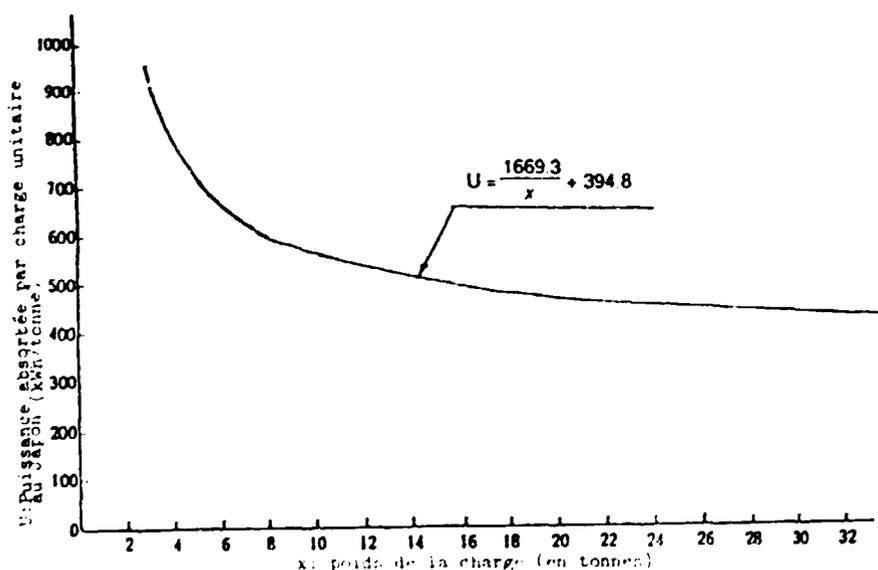
Après le soutirage de l'acier, il est important de réduire la période précédant le démarrage du procédé de fusion suivant afin d'améliorer l'efficacité du soutirage et de diminuer la consommation d'énergie.

Le matériel de réparation du four, les matières d'alimentation, la chaux, etc., doivent être toujours disponibles pour que l'enfournement et la réparation puissent être effectués sans délais. Les opérations coordonnées avec la grue doivent également être réalisées rapidement et de manière systématique. Les ouvriers doivent avoir la formation appropriée pour accomplir cette tâche.

f) Puissance absorbée par le four à arc basique et méthode classique de fusion

Le procédé est décrit dans le chapitre précédent. Le graphique ci-dessous illustre la méthode classique de fusion utilisée dans les fours à arcs basiques du Japon et la puissance absorbée par une unité de production dans le pays.

Le tableau 3 et la figure 7 illustrent le fonctionnement et la puissance absorbée par charge unitaire, respectivement.



Source: Rapport de la Japan Cast and Forged Steel Association sur les résultats des analyses concernant la production unitaire d'acier dans différents fours à arcs(1977).

Figure 7 Consommation normale d'énergie par charge unitaire au Japon (kWh/tonne)

Tableau 3 Fabrication de l'acier dans un four basique

Chargement de matières et d'adjuvants	Procédé	Temps requis [min]	Opérations	Composition chimique [%]				Fusion [°C]
				C	Si	Mn	P, S	
Dolomite Magnésie Acier riblonné CaCO ₃ 10-40kg/t (CaO 5-20kg/t) Recarburant (si nécessaire)	Maintenance	10-20	Alimentation en courant					
	Chargement	5-10						
	Période de fusion	40-60	Oxycoupage					
Minerai de Fe (battiture) CaCO ₃ CaF ₂ O ₂	Période d'oxydation	20-40	Fusion complète	0.40/ 0.60		0.20/ 0.40	±0.070	Hausse de la température
			Affinage par oxydation Pression de l'oxygène 5-10kgf/cm ³ Taux de décarburation 0.04-0.09% C/min					
Si-Mn, Fe-Mn, Fe-Si CaCO ₃ 20-30 kg/t CaO 10-15 kg/t CaF ₂ 4-6 kg/t C-P, Si-P (1,5-2,5) kg/tonne Alliage ferreux Al 0,3 kg/tonne	Ecrémage	5-8	Ecrémage complet	0.10/ 0.15		0.20/ 0.30	P ±0.020	±1600 ±1650
	Période de réduction	20-50	Laitier, Laitier de carbure faiblement basique (2,5-3,0) mesure du degré de réduction					
	Extraction de l'acier	3-5	Extraction de l'acier (Préchauffage de la poche de coulée)	0.20/ 0.30	0.30/ 0.50	0.50/ 0.80	S ±0.020	1600 -1640

Source: Cast Product Handbook, 4ème éd., éd. Japan Cast product Association

3.2 Four à réchauffer

3.2.1 Spécifications

Lorsque les lingots sont roulés dans un laminoir à blooms ou fabriqués par coulée continue, ils passent dans un four à réchauffer pour atteindre la température voulue avant de subir le laminage à chaud qui les transformera en produits finis.

On peut classer les fours à réchauffer en deux catégories: les fours en discontinu et les fours en continu. Les premiers sont surtout utilisés comme équipement auxiliaire pour réchauffer des objets ayant des formes spéciales. Pour la production en masse, on fait appel en général aux fours en continu.

Les fours en continu comprennent les fours poussants, les fours à poutres mobiles et les fours à longerons mobiles. Par le passé, les fours poussants étaient les plus répandus et les fours à poutres étaient utilisés pour des traitements spéciaux. En raison de l'accroissement de leur capacité de chauffe, les fours à longerons sont de plus en plus adoptés. Les figures 8 et 9 illustrent un modèle de four poussant et un modèle de four à poutre mobile. Le tableau 4 propose une comparaison de ces divers types de fours et le tableau 5 offre un schéma des différents fours à réchauffer.

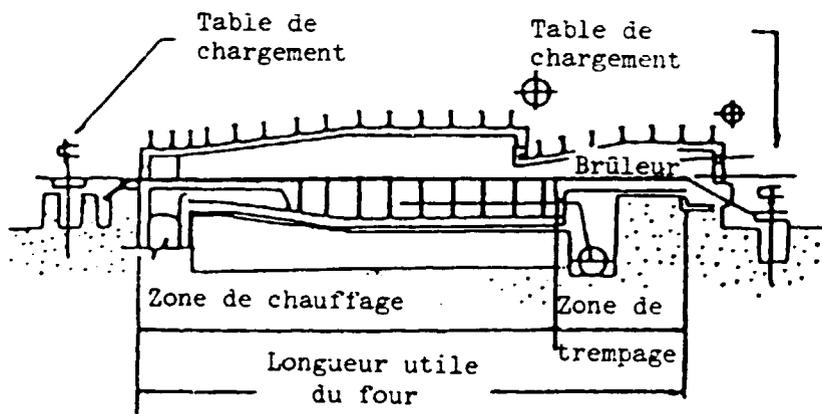


Figure 8 Four poussant à 3 zones

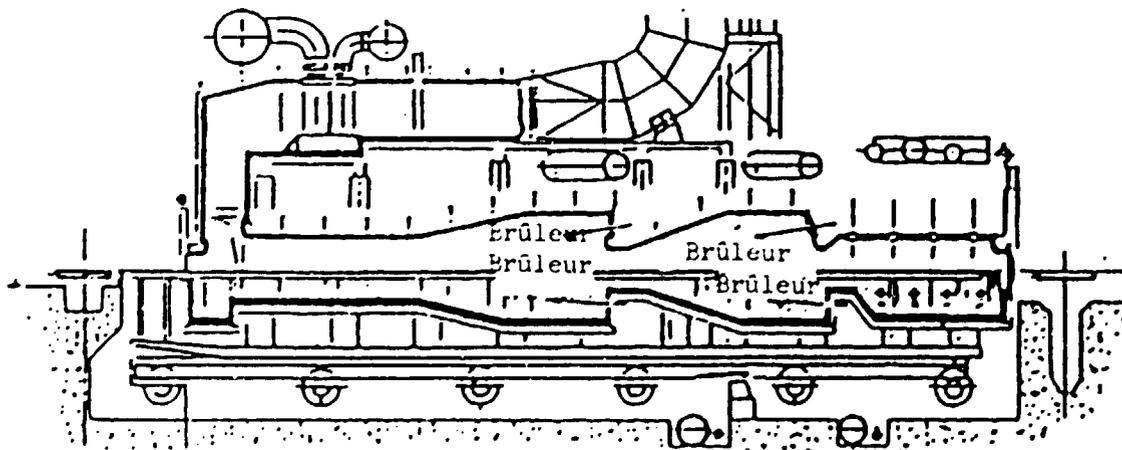
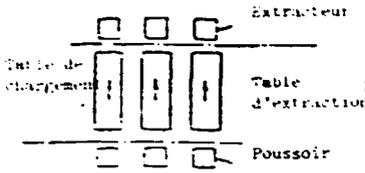
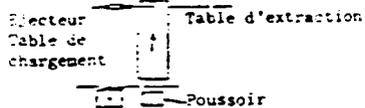
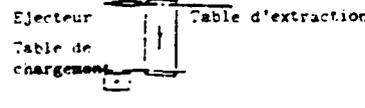


Figure 9 Four à longerons mobiles

Tableau 4 Comparaison entre divers types de fours

Type de four	Avantages	Inconvénients	Applications
Four poussant	<ol style="list-style-type: none"> 1. Frais d'installation moins élevés que les autres types. 2. Chauffage à double face possible. 3. Grande puissance. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Traces de glissières et éraflures. 2. Il y a une limite à la longueur du four. 3. L'épaisseur des matériaux ne peut pas être modifiée rapidement. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Production en masse 2. Très utilisé dans plusieurs laminoirs. Est en train d'être remplacé par le four à longerons mobiles.
Four à sole mobile	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pas de traces de glissières. 2. Pas d'éraflures. 3. Le four peut se vider tout seul. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le four est long en raison du chauffage unilatéral. 2. La décharge des battitures dans la sole est compliquée. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilisé pour chauffer et traiter des matériaux fins, des billettes rondes et des tubes d'acier noir.
Four à longerons mobiles	<ol style="list-style-type: none"> 1. La longueur du four n'a pas de limites. 2. Les traces laissées par les glissières sont minimales, et pas d'éraflures. 3. Grande puissance. 4. Le four peut se vider tout seul. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Frais d'installation légèrement plus élevés. 2. Glissières nombreuses et perte par l'eau de refroidissement plutôt élevée. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Production en masse 2. Utilisé pour les billettes aux formes grossières qui ne passent pas dans les fours poussants et pour fabriquer des produits d'excellente qualité.

Tableau 5 Plan d'installation d'un four à réchauffer

Méthode de chargement et d'extraction	Plan d'installation du four	Caractéristiques
Chargement à l'arrière, extraction à l'avant		<ol style="list-style-type: none"> 1. Il est facile de charger et d'extraire de grandes billettes. 2. Le plan d'installation est facile lorsqu'il s'agit de deux fours ou plus. Ainsi, cette méthode est utile dans le cas d'installations de grande capacité telles que les trains à feuillards à chaud et les laminoirs à brames. 3. Les ouvertures destinées au chargement et à l'extraction sont larges ce qui entraîne de grosses pertes de chaleur par rayonnement thermique ou par intrusion de l'air. 4. L'extraction est effectuée en poussant c_{11} à l'aide d'un extracteur.
Chargement à l'arrière, extraction par le côté		<ol style="list-style-type: none"> 1. Les billettes peuvent rester chaudes pendant le laminage grâce à la proximité du laminoir et du four à réchauffer. 2. La perte de chaleur par rayonnement thermique à la sortie est minime 3. L'extraction est effectuée à l'aide d'éjecteurs ou de roulettes. Le recours aux roulettes qui doivent être refroidies à l'eau entraîne toutefois de grosses pertes de chaleur.
Chargement par le côté, extraction par le côté		<ol style="list-style-type: none"> 1. La perte de chaleur est limitée à l'entrée comme à la sortie. Cette méthode est très avantageuse pour les fours à réchauffer destinés aux longues billettes.

La disposition des brûleurs a une grande influence sur les caractéristiques calorifiques du four. Selon la position des brûleurs par rapport au four, on distingue trois méthodes de brûlage: le brûlage à flux axial, le brûlage latéral et le brûlage en voûte. Chaque méthode a ses propres caractéristiques. On choisit une méthode en fonction des avantages qu'elle présente pour un four. Dans certains cas, on peut combiner plusieurs méthodes de brûlage dans le même four. Le tableau 6 présente une comparaison entre ces diverses méthodes.

Tableau 6 Comparaison des méthodes de brûlage dans les fours à réchauffer

Elément	Brûlage à flux axial	Brûlage latéral	Brûlage en voûte
1. Position des brûleurs par rapport au four			
2. Combustible	2. Huile lourde, gaz C, gaz M, etc.	2. Huile lourde, gaz C, Gaz M, etc.	2. Kérosène, gaz C, gaz M, etc.
3. Type de flamme	3. Longue flamme	3. Courte flamme (type variable)	3. Brûlage aux rayonnements
4. Réglage de la quantité de combustible	4. Grandes possibilités de réglage	4. Possibilités limitées de réglage.	4. Assez grandes possibilités de réglage
5. Charge thermique	5. Peut être grande dans le cas de brûleurs de grande capacité	5. Peut être grande dans le cas de brûleurs de grande capacité	5. Pas si grande dans le cas des petits brûleurs
6. Limitation due à la taille du four	6. Limitation de la longueur par zone dans le sens de la longueur du four	6. Limitation dans le sens de la largeur du four	6. Pas de limitation. La sous-cuisson est impossible.
7. Débit du gaz combustible dans le four	7. Débit uniforme tout le long du four	7. Possibilité de migration, les brûleurs et la longueur du four formant un angle droit	7. Débit uniforme la plupart du brûlage ayant lieu dans le briquetier.
8. Structure des brûleurs par rapport au creuset	8. Museaux indispensables et structure du creuset compliquée	8. Pas de museaux et structure du creuset simple	8. La structure est simple, mais la disposition des tubes est compliquée vu le grand nombre de brûleurs.
9. Uniformité du flux de chaleur	9. Est facilement réalisable dans le sens de la largeur du four. La température tend à baisser dans le sens de la longueur du four.	9. Faible dans le sens de la largeur du four. Facile à réaliser dans celui de la longueur.	9. Facile à réaliser dans les deux sens.
10. Rendement	10. Relativement bon sauf autour des brûleurs là où la température est élevée	10. Bon rendement	10. Plutôt faible avec une température relativement élevée et un grand nombre de brûleurs

3.2.2 Caractéristiques de l'énergie absorbée

Les taux de consommation de combustible dans les années soixante étaient de 370×10^3 kcal/t à 450×10^3 dans le cas d'un four poussant et de 450×10^3 kcal/t à 590×10^3 kcal/t dans celui d'un four à longeron mobile, où la perte d'eau réfrigérante était importante dans les longerons refroidis à l'eau. De nos jours, les fours à longerons sont plus utilisés que les fours poussants et leurs taux de consommation de combustible variaient en 1989 entre 203×10^3 et 566×10^3 kcal/t, la moyenne étant 267×10^3 kcal/t, grâce à l'amélioration du rendement thermique à laquelle ont abouti les nombreuses mesures décrites plus loin. La propagation du chargement à chaud, qui emploie la température élevée du processus précédent, a également contribué à cette amélioration.

3.2.3 Technologies de conservation de l'énergie

Les concepts de base pour la conservation de l'énergie dans les fours à réchauffer sont la rationalisation de la combustion, du chauffage et du refroidissement, la prévention de la perte de chaleur par rayonnement et par transmission et la récupération de la chaleur perdue. La figure 10 présente un diagramme des caractéristiques de la conservation de l'énergie en ce qui concerne le four à réchauffer et la figure 11 illustre les principaux éléments.

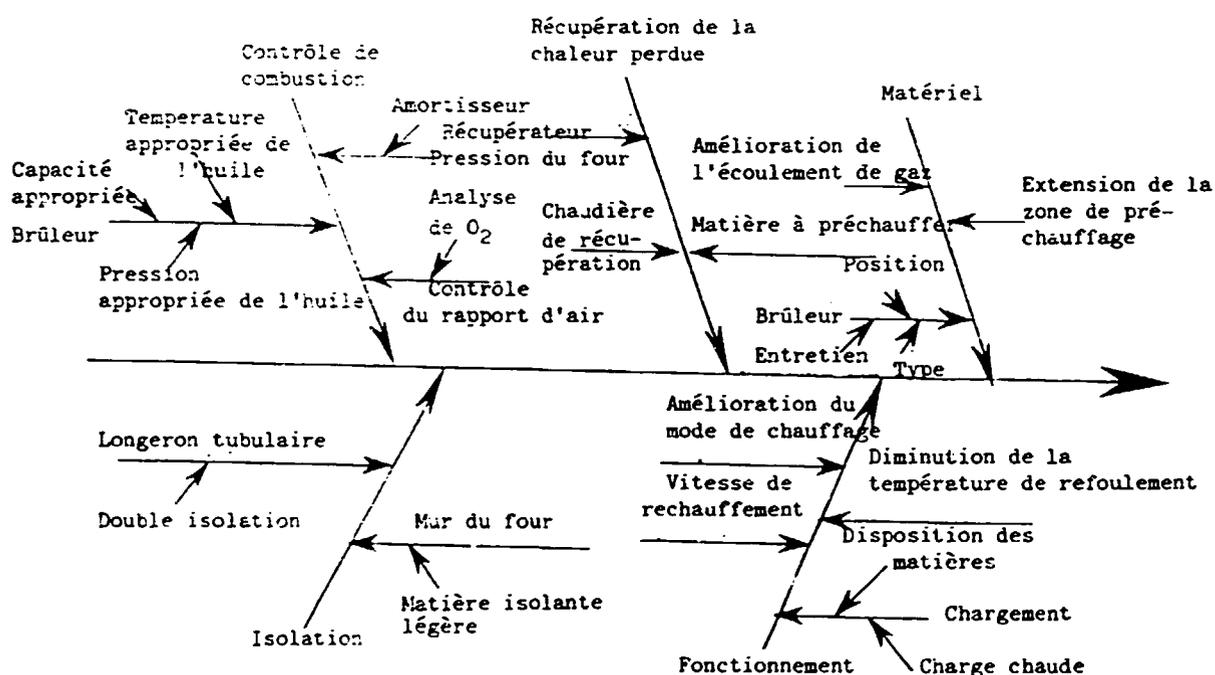


Figure 10 Diagramme des caractéristiques de conservation de l'énergie dans un four à réchauffer

La quantité de combustible est-elle optimale? Le volume d'air est-il optimal? La récupération de chaleur est-elle suffisante? Quelle est la situation du rayonnement dans le creuset du four? Le processus de trempage est-il immodéré? (qu'en est-il du mode de chauffage?) Chaleur sensible du gaz d'échappement (sa température est-elle élevée? Le rapport d'air est-il important?), Effusion de gaz chaud (la pression du four n'est-elle pas trop élevée), N'y a-t-il pas d'infiltration d'air? (la pression du four est-elle suffisante?), qu'en est-il de l'émission de chaleur due au refroidissement de l'eau?

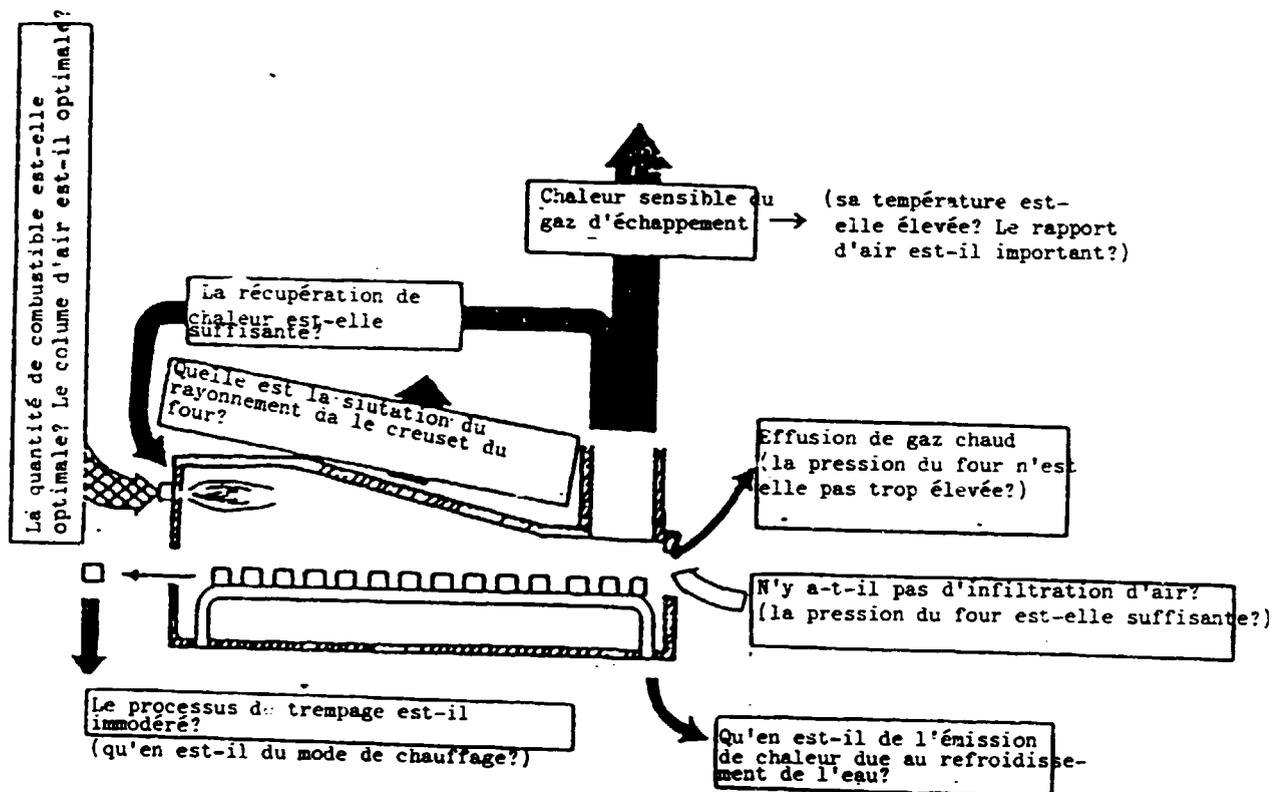


Figure 11 Point de réduction concernant le taux de consommation de combustible

3.2.4 Bilan thermique.

Le bilan thermique constitue un moyen efficace de promouvoir la conservation de l'énergie. Il permet de saisir numériquement la situation actuelle de la perte de chaleur et du rendement thermique. Ensuite, à partir de ces données, on peut parvenir à améliorer les normes et les installations. Ainsi, la mise en application du bilan thermique est une condition préalable de la promotion de la conservation de l'énergie. La Japanese Industrial Standard (JIS) G0702 a publié "la méthode de bilan thermique pour les fours continus en sidérurgie" pour que la perte de chaleur et le rendement du four à réchauffer soient bien assimilés. Le tableau 7 présente les éléments de mesure et les résultats des mesures. Le tableau 8 illustre un bilan thermique.

Tableau 7 Eléments de mesure et résultats

2	Personne chargée de la mesure				
3	Climat	Pression atmosphérique	Temp. atmosph.	Temp. ambiante	Humidité rel.
		mmHg	°C	°C	%
4	Combustible	Zone d'égalisation Consommation	kg/t ou m ³ N/t		
5		Zone sup. de réchauffement Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
6		Zone inf. de réchauffement Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
7		Pression	kgf/cm ² ou mmHg		
8		Température	°C		
9		Composants	%		
10		Valeur calorifique minimale	kcal/kg ou kcal/m ³ N		
11	Atomiseur	Type			
12		Zone d'égalisation Consommation	kg/t ou m ³ N/t		
13		Zone sup. de réchauffement Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
14		Zone inf. de réchauffement Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
15		Pression	kgf/cm ² ou mmHg		
16		Température	°C		
17	Eau de refroidissement	Zone d'égalisation Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
18		Zone sup. de réchauffement Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
19		Zone inf. de réchauffement Consom.	kg/t ou m ³ N/t		
20		Pression	mmHg		
21		Temp. avant le préchauffage	°C		
22		Temp. après le préchauffage	°C		
23		Consommation	t/t		
24		Température d'admission	°C		
25		Température de sortie	°C		
26		Pression	kgf/cm ²		
27	Gaz de combustion	Temp. de l'extrémité du four	°C		
28		Temp. d'admission du réchauffeur	°C		
29		Temp. de sortie du réchauffeur	°C		
30		Composants	%	CO ₂ , O ₂ , CO, (CH ₄ , H ₂)	
31	Cendres	Quantité de combustible	%		
32		Quantité de laitier	kg/kg		
33	Acier chauffe	Dimensions (épaisseur, largeur, longueur)	mm x mm x mm		
34		Poids spécifique	kg		
35		Chargement total	t		
36		Température de chargement	°C		
37		Température de déchargement	°C		
38		Perte de brûlage	kg/t		
39		Temps moyen de séjour dans le four	h		
40	Pression du four	mmHg			
41	Temp. de surface de chaque partie du creuset	°C			

(Remarque) Pour ce qui est de la méthode de mesure de l'élément 41, décrire sur le croquis du four.

Tableau 8 Bilan thermique

Chaleur à l'entrée			Chaleur à la sortie		
Elément	10 ³ kcal/t	%	Elément	10 ³ kcal/t	%
(1) Chaleur de combustion			(8) Quantité de chaleur dans l'acier extrait		
(2) Chaleur sensible du combustible			(9) Chaleur sensible des battitures		
(3) Chaleur sensible de l'air			(10) Chaleur sensible du gaz d'échappement		
(4) Chaleur apportée par l'atomiseur			(11) Chaleur perdue par brûlage incomplet		
(5) Quantité de chaleur dans l'acier chargé			(12) Quantité de chaleur dégagée par l'eau de refroidissement		
(6) Chaleur des battitures			(13) Quantité de chaleur dégagée par l'eau de refroidissement		
(7) Chaleur récupérée par le réchauffeur	()	()			
			(14) Autres pertes de chaleur		
			(15) Chaleur récupérée par le réchauffeur	()	()
Total (1)+(2)+(3) +(4)+(5)+(6)			Total (8)+(9)+(10)+(11) +(12)+(13)+(14)		

Remarques

1. Pour enregistrer la quantité de chaleur, utiliser 10³kcal/t comme unité et arrondir à un chiffre après la virgule.
2. Arrondir dans le pourcentage à un chiffre après la virgule.

Nous vous proposons ci-après un exemple concret du bilan thermique concernant un four à réchauffer l'acier continu.

(1) Mesure du bilan thermique

Le bilan thermique est normalement mesuré pour un chargement d'une tonne d'acier à la température de l'air extérieur et avec du combustible de valeur calorifique minimale pendant l'opération.

(2) Résultats des mesures

(a) Acier

Quantité chargée (t/h)	Température de chargement (°C)	Température de déchargement (°C)	Perte de brûlage (kg/t)
99,6	25	1270	14,2

(b) Combustible

Combustible	Consommation (kg/h)	Composant de l'huile lourde						Valeur calorifique max.	Temp. (°C)
		C %	H %	O %	N %	S %	Eau %		
Huile lourde au carbone	4572	84,7	11,7	0,8	0,4	2,2	0,2	10280	64

(c) Gaz d'échappement provenant de la combustion

Température (°C)	Composition du gaz d'échappement pauvre			
	CO ₂ %	O ₂ %	CO %	N ₂ %
520	12,7	1,8	0,0	85,5

(d) Eau de refroidissement

Quantité d'eau (kg/t)	Température d'admission (°C)	Température de sortie (°C)
5200	34	45

e) Température de l'air pour la combustion 55°C

f) Température de l'air environnant 25°C

(3) Calcul des quantités à l'entrée et à la sortie

a) Quantité à l'entrée

- Acier chargé 1 tonne
- Huile lourde C $4572/99,6 = 45,9 \text{ kg/t}$
- Quantité d'air pour la combustion (A_0)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{100} 8,89 \cdot C + 26,7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33 \cdot S \\
 &= \frac{1}{100} 8,89 \times 84,7 + 26,7 \left(11,7 - \frac{0,8}{8} \right) + 3,33 \times 2,2 \\
 &= 10,7 \text{ m}^3 / \text{kg de combustible}
 \end{aligned}$$

$$= 1,09$$

Quantité d'air par kg de combustible (A)

$$A = mA_0$$

$$m \text{ (coefficient d'air)} = \frac{21}{21 - 79 \frac{(O_2) - 0,5 (CO)}{(N_2)}} = \frac{21}{21 - 79 \frac{1,8}{85,5}}$$

$$= 1,09 \times 10,7 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg de combustible}$$

Ainsi, la quantité d'air nécessaire pour la combustion d'une tonne d'acier est:

$$1,09 \times 10,7 \times 45,9 = 535 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{t}$$

b) Quantité à la sortie

a. Quantité d'acier extrait

14,2 kg étant la perte au brûlage subie par une charge d'une tonne d'acier,

$$1 - 0,0142 = 0,9858\text{t}$$

b. Quantité de battitures

Quand aucune analyse des éléments constituant les battitures n'est effectuée, on suppose que le taux de Fe représente 75% du poids. Ainsi:

$$(\text{Quantité de battitures}) = \frac{(\text{Perte au brûlage})}{(\text{taux de Fe dans les battitures})}$$

$$= \frac{14,2}{0,755} = 18,8 \text{ kg/t}$$

c. Quantité de gaz d'échappement pauvre provenant de la combustion (G')

$$G' = G_0 + (m-1)A_0$$

G_0 : quantité théorique de gaz d'échappement pauvre

$$\begin{aligned} G_0 &= \frac{1}{100} 8,89 \cdot C + 21,1 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33S + 0,8N \\ &= \frac{1}{100} 8,89 \cdot 84,7 + 21,1 \left(11,7 - \frac{0,8}{8} \right) + 3,33 \cdot 2,2 + 0,8 \cdot 0,4 \\ &= 10,1 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg de combustible} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G' &= 10,1 + (1,09 - 1) \times 10,7 \\ &= 11,1 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg de combustible} \end{aligned}$$

Ainsi, la quantité de gaz d'échappement pauvre pour une tonne d'acier est:

$$11,1 \times 45,9 = 509,5 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{t}$$

d. Teneur en vapeur d'eau du gaz d'échappement provenant de la combustion

On peut ignorer l'humidité contenue dans l'air destiné à la combustion.

$$\frac{1}{100} (9H + \text{teneur en eau}) = \frac{1}{100} (9 \times 11,7 + 0,2) = 1,06 \text{ kg de combustible}$$

Pour une tonne d'acier,

$$1,06 \times 45,9 = 48,7 \text{ kg/t}$$

(4) Calcul de la chaleur d'admission et de la chaleur de sortie

a) Chaleur d'admission

a. Valeur calorifique minimale du combustible (H1)

$$H1 = Hh - 600(9H + \text{teneur en eau})$$

Hh: valeur calorifique maximale

$$= 10280 - 600(9 \times 0,117 + 0,002)$$

$$= 9650 \text{ kcal/kg de combustible}$$

Pour une tonne d'acier,

$$9650 \times 45,9 = 442940 \text{ kcal/t}$$

b. Chaleur sensible du combustible

En admettant que la chaleur massique moyenne de l'huile lourde au carbone est de $0,45 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$,

$$45,9 \times 0,45 \times (64 - 25) = 810 \text{ kcal/t}$$

c. Chaleur sensible de l'air

En admettant que la chaleur massique moyenne de l'air est de $0,31 \text{ kcal/m}^3_{\text{N}} \cdot ^\circ\text{C}$,

$$(535 \times 0,31) \times (55 - 25) = 4980 \text{ kcal/t}$$

d. Quantité de chaleur contenue dans l'acier chargé

Etant donné que le chargement de l'acier est effectué à la température de l'air extérieur, la quantité de chaleur qu'il contient est nulle.

e. Chaleur provenant de la formation de battitures

Si aucune analyse des éléments constituant les battitures n'est effectuée, on suppose que la chaleur provenant de la formation de battitures est de $1335 \text{ kcal/kg} \cdot \text{Fe}$ pour chaque kg de Fe contenu dans les battitures.

$$\text{Ainsi, } 1335 \times 14,2 = 18960 \text{ kcal/t}$$

b) Chaleur de sortie

a. Quantité de chaleur contenue dans l'acier extrait

$[1000(\text{kg}) - \text{perte au brûlage du Fe}(\text{kg})] \times [\text{quantité de chaleur contenue dans l'acier à la température de déchargement}(\text{kcal/kg}) - \text{quantité de chaleur contenue dans l'acier à la température de l'air extérieur}(\text{kcal/kg})]$

$$= (1000 - 14,2) \times \{ (200,4 - (-2,9)) \} = 200410 \text{ kcal/t}$$

b. Chaleur sensible des battitures

$0,215 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ étant la chaleur massique moyenne de la battitures, on suppose que la température des battitures à la sortie du four est la même que la température de déchargement de l'acier.

$$18,8 \times 0,215 \times (1270 - 25) = 5030 \text{ kcal/t}$$

c. Chaleur sensible du gaz d'échappement provenant de la combustion

En admettant que la chaleur massique moyenne du gaz d'échappement provenant de la combustion est de $0,33 \text{ kcal/m}^3_{\text{N}} \cdot ^\circ\text{C}$,

$$509,5 \times 0,33 \times (520 - 25) = 83230 \text{ kcal/t}$$

d. Chaleur retenue dans la vapeur d'eau du gaz d'échappement

En admettant que la chaleur massique moyenne de la vapeur d'eau est de $0,45 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$,

$$48,7 \times 0,45 \times (520 - 25) = 10850 \text{ kcal/t}$$

e. Chaleur absorbée par l'eau de refroidissement

En admettant que la chaleur massique moyenne de l'eau est de $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$,

$$5200 \times 1 \times (45 - 34) = 57200 \text{ kcal/t}$$

f. Autres pertes de chaleur

La différence entre la chaleur d'admission totale et la chaleur de sortie totale.

$$(442940 + 810 + 4980 + 18960) - (200410 + 5030 + 83230 + 10850 + 57200) = 110970 \text{ kcal}$$

Le tableau 9 illustre le bilan thermique résumant les résultats ci-dessus.

Tableau 9 Bilan thermique

Chaleur d'admission			Chaleur de sortie		
Élément	10 ³ kcal/t	%	Élément	10 ³ kcal/t	%
(1) Chaleur de combustion	442,9	94,7	(8) Quantité de chaleur dans l'acier extrait	200,4	42,8
(2) Chaleur sensible du combustible	0,8	0,2	(9) Chaleur sensible des battitures	5,0	1,1
(3) Chaleur sensible de l'air	5,0	1,1	(10) Chaleur sensible du gaz d'échappement	94,1	20,1
(4) Chaleur fournie par l'atomiseur	0	0	(11) Chaleur perdue par brûlage incomplet	0	0
(5) Quantité de chaleur dans l'acier chargé	0	0	(12) Quantité de chaleur dégagée par l'eau de refroidissement	0	0
(6) Chaleur des battitures	19,0	4,0	(13) Quantité de chaleur dégagée par l'eau de refroidissement	57,2	12,2
(7) Chaleur récupérée par le réchauffeur	(0)	(0)			
			(14) Autres pertes de chaleur	111,0	23,8
			(15) Chaleur récupérée par le réchauffeur	(0)	(0)
Total (1)+(2)+(3)+(4) +(5)+(6)	467,7	100,0	Total (8)+(9)+(10) +(11)+(12)+(13) +(14)	467,7	100,0

Remarques

1. Pour enregistrer la quantité de chaleur, utiliser 10³ kcal/t comme unité et arrondir à une décimale après la virgule.
2. Arrondir à un chiffre après la virgule dans le pourcentage.

Comme le montre le bilan thermique ci-dessus, 20,1% de la chaleur de sortie est absorbée par le gaz d'échappement et 12,2% par l'eau de refroidissement. On suppose que les "autres pertes de chaleur", qui sont de l'ordre 23,8%, représentent la quantité de rayonnement thermique émanant de la surface du creuset du four. Il est donc nécessaire de les réduire.

3.2.5 Rationalisation de la combustion

(i) Optimisation du coefficient d'air

En ce qui concerne un four à réchauffer, l'optimisation du rapport d'air constitue le moyen le plus pratique et le plus économique de conserver l'énergie. L'effet de cette mesure est d'autant plus grand que la température du four est élevée. Le coefficient d'air est la valeur obtenue si on divise la quantité d'air consommé par la quantité supposée d'air de combustion, et il représente l'ampleur de ce surplus d'air. Au Japon, le coefficient normal d'air pour un four à réchauffer l'acier continu est fixé à 1.25. Il est mesurée à la sortie du four pendant la combustion autour de la charge nominale, après la vérification et la réparation. S'il est trop élevé, la quantité de gaz d'échappement augmente. Ainsi, la perte par échappement de gaz augmente proportionnellement au coefficient d'air, étant donné que la température du gaz est constante. Cette relation est illustrée dans la figure 12.

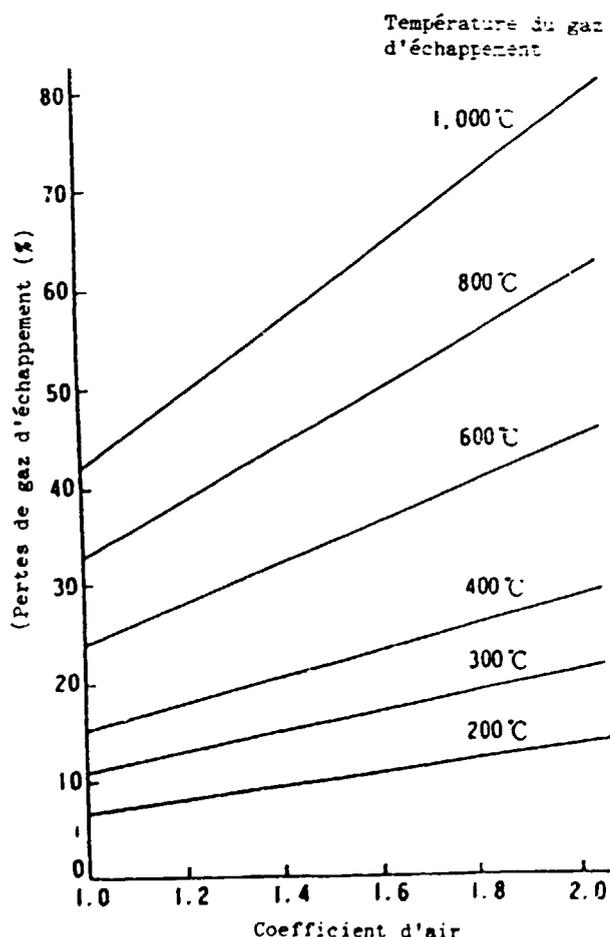


Figure 12 Relation entre le coefficient d'air et la perte de gaz d'échappement

Le tableau 10 montre l'effet de l'amélioration du coefficient d'air sur l'économie de combustible. Les pourcentages de combustible économisé sont calculés selon la formule suivante:

$$S = \frac{L(\mu_1 - \mu_2) \cdot T \cdot C_p}{F - Q - L(\mu_2 - 1) \cdot T \cdot C_p} \times 100(\%)$$

- S: combustible économisé
 L: quantité d'air de la combustion théorique
 μ_1 : rapport d'air avant la correction
 μ_2 : rapport d'air après la correction
 T: température du four
 C_p : chaleur massique de l'air à basse pression kcal/m³_N·°C
 F: valeur calorifique minimale du combustible kcal/kg de combustible
 Q: perte de gaz d'échappement par la combustion théorique kcal/kg de combustible

Tableau 10 Pourcentage de combustible économisé lorsque le taux d'air est ajusté (Cas de l'huile lourde)

Température du four (°C)	Rapport d'air avant la correction	Coefficient d'air après la correction				
		1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
700	1,70	11,6	14,9	17,9	20,8	23,4
	1,60	7,72	11,1	14,3	17,3	20,1
	1,50	3,86	7,43	10,7	13,8	16,7
	1,40	-	3,76	7,27	10,5	13,5
	1,30	-	-	3,65	7,01	10,1
	1,20	-	-	-	3,48	6,74
	1,10	-	-	-	-	3,38
900	1,70	18,7	23,5	27,7	31,5	34,9
	1,60	12,5	17,6	22,2	26,3	29,9
	1,50	6,23	11,7	16,6	21,0	25,0
	1,40	-	5,94	11,3	16,0	20,2
	1,30	-	-	5,66	10,7	15,2
	1,20	-	-	-	5,29	10,1
	1,10	-	-	-	-	5,06
1100	1,70	30,8	37,3	42,6	47,1	51,0
	1,60	20,6	28,0	34,1	39,3	43,7
	1,50	10,3	18,6	25,6	31,4	36,4
	1,40	-	9,43	17,3	23,8	29,4
	1,30	-	-	8,67	15,9	22,1
	1,20	-	-	-	7,91	14,7
	1,10	-	-	-	-	7,36
1300	1,70	55,0	61,9	67,1	70,9	74,0
	1,60	36,7	46,5	53,6	59,1	63,4
	1,50	18,3	31,0	40,2	47,3	52,9
	1,40	-	15,7	27,2	35,9	42,7
	1,30	-	-	13,7	23,9	32,1
	1,20	-	-	-	11,9	21,3
	1,10	-	-	-	-	10,7

Si un four à réchauffer n'est pas équipé d'une commande automatique du rapport air/combustible, il est nécessaire de prélever périodiquement un échantillon de gaz dans le four et d'en mesurer la teneur en O₂ à l'aide d'un analyseur. La figure 13 illustre un modèle typique de four à réchauffer équipé d'une commande automatique du rapport air/combustible

Enregistreur de la pression du four, Enregistreur de la température du four, Indicateur/contrôleur de la température du four, Indicateur de la vitesse d'écoulement du combustible, Régulateur de débit, Indicateur de l'écoulement d'air, Enregistreur de l'oxygène, Transmetteur de l'écoulement, Transmetteur de l'écoulement, Brûleur, Combustible, Capteur de température, Four, Soupape de réglage du débit de combustible, Capteur du débit, Capteur du débit, Air de combustion, Transmetteur de la pression du four, Soupape de réglage de l'écoulement d'air, Analyseur de l'oxygène, Carneau, Amortisseur de la pression du four

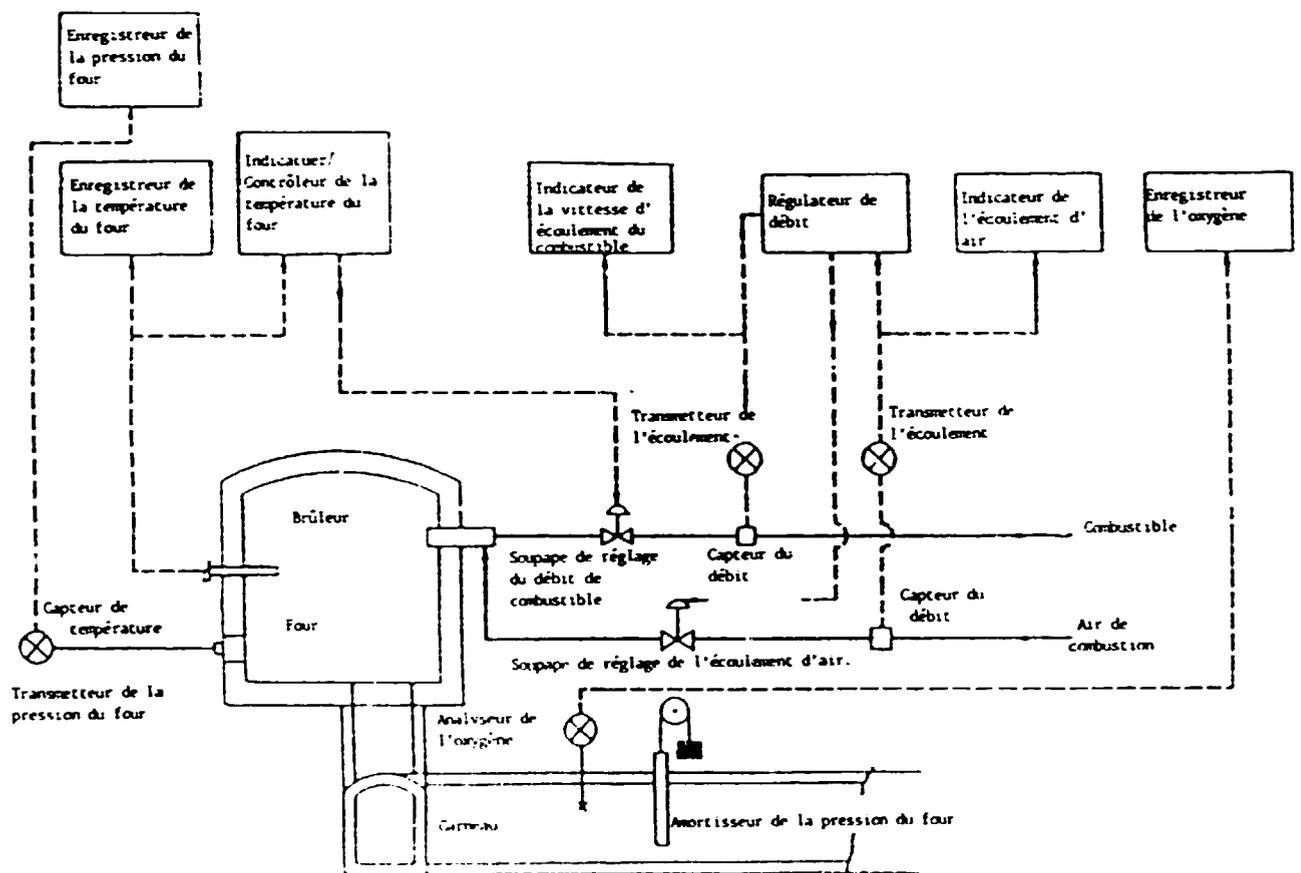


Figure 13 Système de contrôle du rapport air/combustible muni d'un régulateur de débit

(ii) Contrôle de la pression du four

Le contrôle de la pression du four est également important. La cote prescrite concernant la pression du four doit généralement être de 0,2-0,4 mm de H₂O au niveau du creuset où l'acier chauffé est chargé. Les portes du four à réchauffer doivent être ouvertes au moment où l'acier est chargé ou déchargé. Si la pression dans le four était négative, cela entraînerait une intrusion d'air, augmentant la perte de chaleur et rendant inégale la distribution de la température dans le four. D'autres problèmes pourraient en découler, tels que par exemple l'oxydation de l'acier. Comme la pression du four varie selon la position de la mesure, le réglage de la pression du four doit être effectué soigneusement. Dans un four à réchauffer de température élevée, la pression augmente de 1 mm de H₂O chaque fois que la hauteur augmente de 1 m à cause de la poussée du gaz de haute température dans le four. Ainsi, la pression du four est fixée selon la formule suivante pour le poste de mesure indiqué sur la figure 14.

$$P = (0,2 - 0,4) + L(\text{mmH}_2\text{O})$$

P étant la valeur fixée pour la pression du four (mm H₂O)

L, la hauteur séparant le creuset de l'orifice de mesure

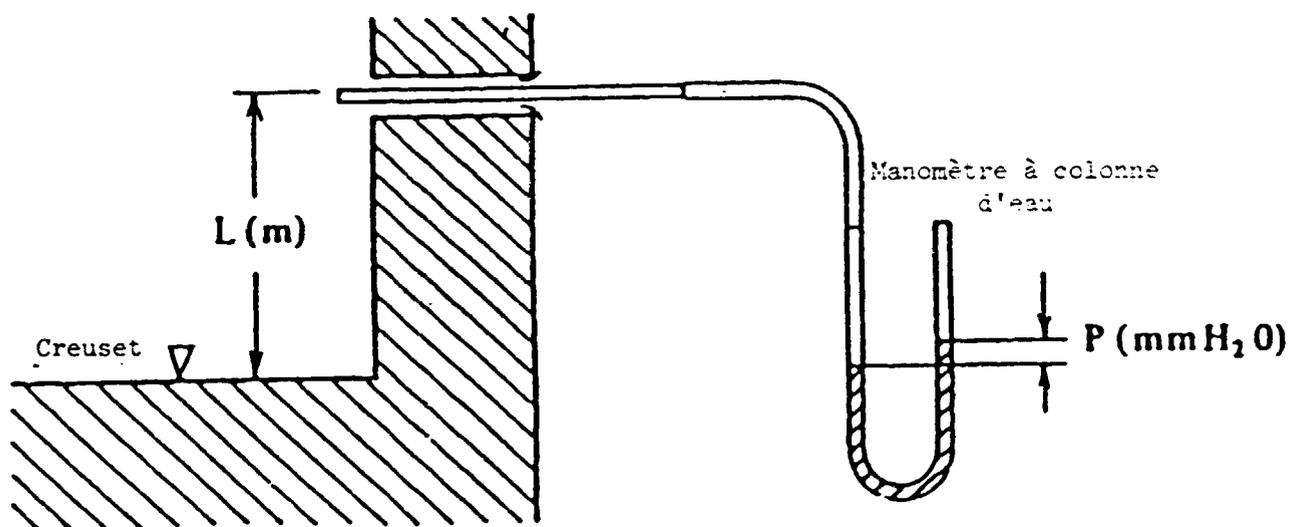


Figure 14 Mesure et réglage de la pression du four

Il est en outre important que les ouvertures soient aussi petites que possible et qu'elles puissent être fermées hermétiquement de manière à éviter les fuites de gaz de haute température, notamment par les portes d'alimentation et de déchargement et par les hublots de regard situés sur les murs ou sur le plafond du four.

3.2.6 Rationalisation du chauffage et du refroidissement

(i) Charge chaude

Quand l'installation de moulage continu et le four à réchauffer du laminoir se trouvent à proximité l'un de l'autre, et que le plan d'installation permet l'utilisation d'une charge chaude, il faudrait adopter cette méthode pour réduire le

taux de consommation de combustible. Cela consiste à alimenter directement le four à réchauffer avec de l'acier ayant une température élevée pour que l'énergie soit conservée. De manière générale, il est toutefois difficile de traiter toute la quantité en raison de la différence de capacité entre le laminoir à coulée continue et la ligne de laminage. Au Japon, le taux de la fournée chaude est de 50% en moyenne et de 80% dans le cas de certains laminoirs; la température de chargement est aux alentours de 500°C en moyenne et peut atteindre jusqu'à 800°C.

Le taux de conservation de l'énergie par la méthode de la fournée chaude est de 20×10^3 kcal/t pour une température de chargement de 100°C. Ainsi, une grande quantité d'énergie peut être économisée si on élève le taux et la température de la fournée chaude.

3.2.7 Prévention de la perte de chaleur par rayonnement ou par transmission

Les pertes de chaleur subies dans un four à réchauffer se répartissent comme suit: 1. perte par rayonnement à travers les orifices et la surface du creuset; 2. perte par refroidissement dans les longerons tubulaires refroidis à l'eau; 3. perte par accumulation de chaleur à cause de l'isolation de la paroi interne et des éléments composant le creuset. On peut ignorer la perte par accumulation de chaleur si l'opération est poursuivie pour une certaine période sans changement sensible de la température comme dans le cas du four à réchauffer continu.

(i) Prévention de la perte de chaleur par rayonnement à la surface du creuset

a) Quantité de chaleur dégagée à la surface du four

La quantité de chaleur dégagée à la surface du creuset est la somme du refroidissement par convection et du rayonnement calorifique. Cette quantité peut être calculée à partir des températures de surface du four qui doivent être mesurées à autant de points que possible et dont on utilise la moyenne. Moins le nombre de points est grand, plus l'erreur devient importante.

La quantité (Q) de chaleur émise par un four à réchauffer installé dans le bâtiment d'une usine est calculée à partir de la formule suivante:

$$Q = a \times (t_1 - t_2)^5 / 4 + 4,88 \varepsilon \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

Dans laquelle

a: facteur concernant la direction de la surface de convection naturelle

plafond = 2,8; parois latérales = 2,2; creuset = 1,5

t_1 : température de la surface externe du mur du four (°C)

t_2 : température de l'air autour du four (°C)

ε : émittance de la surface externe du mur du four

Le premier terme de la formule ci-dessus représente la quantité de chaleur émise par refroidissement naturel et le second représente la quantité de chaleur émise par rayonnement. La figure 15 illustre la relation entre la température de la surface externe du mur et la quantité de chaleur émise calculée sur la base de cette formule.

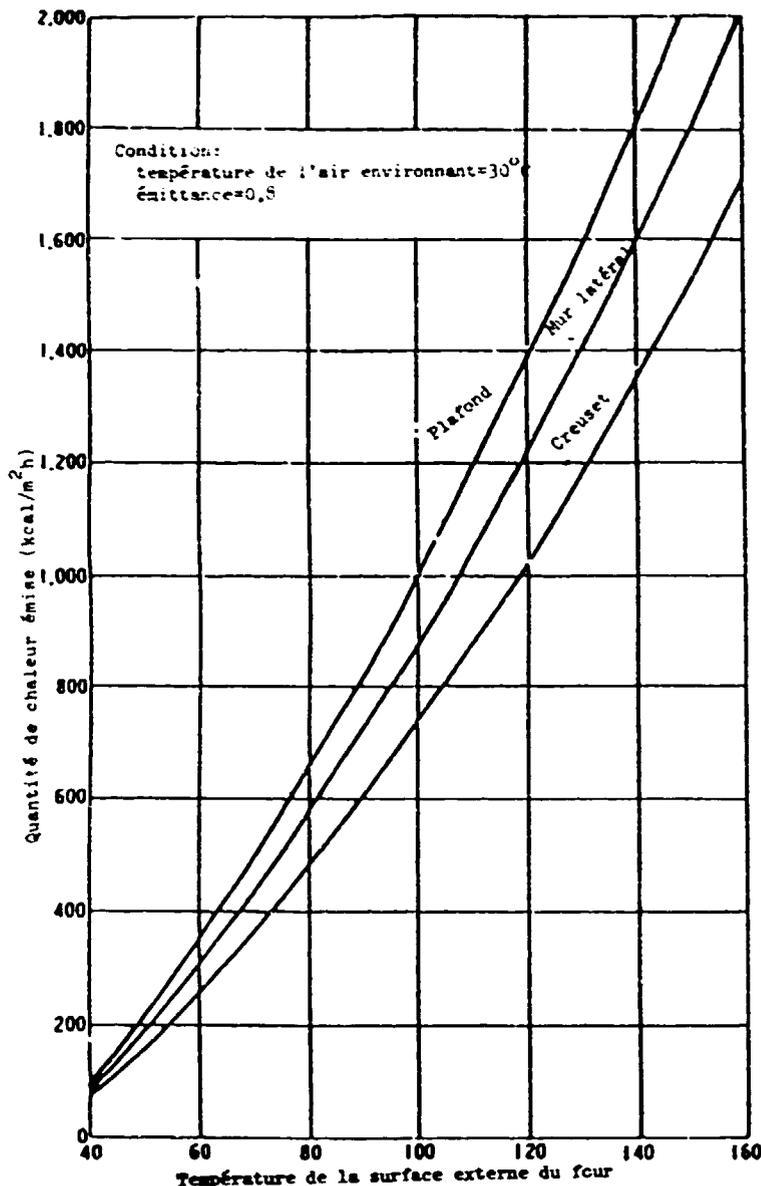


Figure 15 Relation entre la température de la surface externe et la quantité de chaleur émise

Ceci est expliqué dans l'exemple suivant.

Soit un four à réchauffer dont le plafond, les murs latéraux et le creuset ont respectivement 20m², 50m² et 20m² de surface. On mesure leurs températures de surface et leurs moyennes sont 80°C, 90°C et 100°C respectivement. Evaluons la quantité de chaleur émise par la surface totale de ce four. Sur la figure 15, les quantités de chaleur émises par le plafond, les murs latéraux et le creuset par unité de surface sont 650 kcal/m²h, 720 kcal/m²h et 730 kcal/m²h, respectivement. Par conséquent, la quantité totale de chaleur émise est:

$$\begin{aligned}
 Q &= 650 \times 20 + 720 \times 50 + 730 \times 20 \\
 &= 63\,600 \text{ kcal/h}
 \end{aligned}$$

b) Renforcement de l'isolation

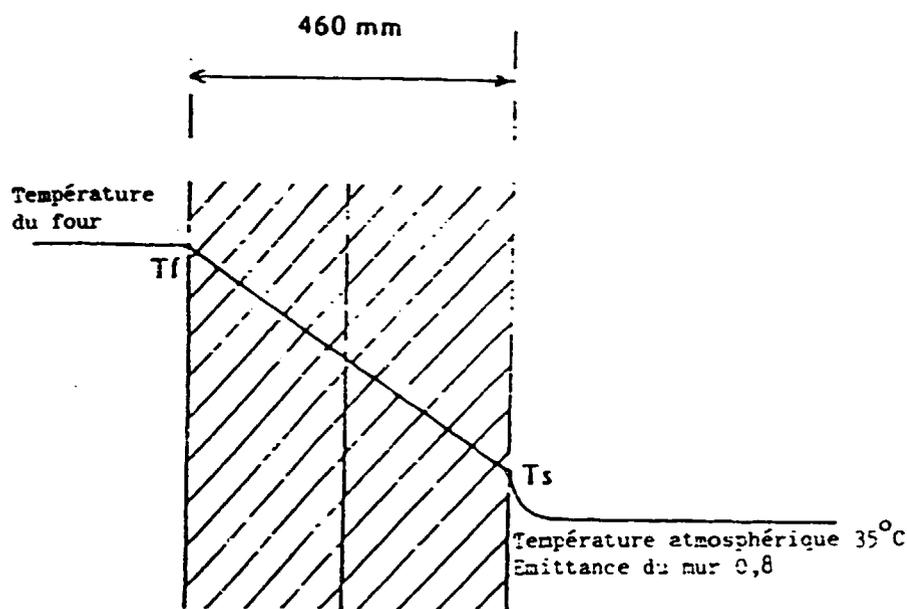
On peut diminuer la perte de chaleur au niveau de la surface du creuset en renforçant le système d'isolation. Il existe deux méthodes. La première consiste à couvrir la paroi interne de fibre céramique, et la deuxième à couvrir la surface externe du même produit ou de laine de roche.

Les figures suivantes illustrent les deux méthodes de renforcement.

La figure 16 illustre les éléments de construction d'un four à réchauffer typique.

Dans ce cas, les murs sont faits uniquement de briques réfractaires, et ont une épaisseur de 460 mm.

Dans l'exemple illustré par la figure 17, on a renforcé l'isolation en posant de la fibre céramique de 50mm d'épaisseur sur la paroi interne du mur du four illustré par la figure 16.



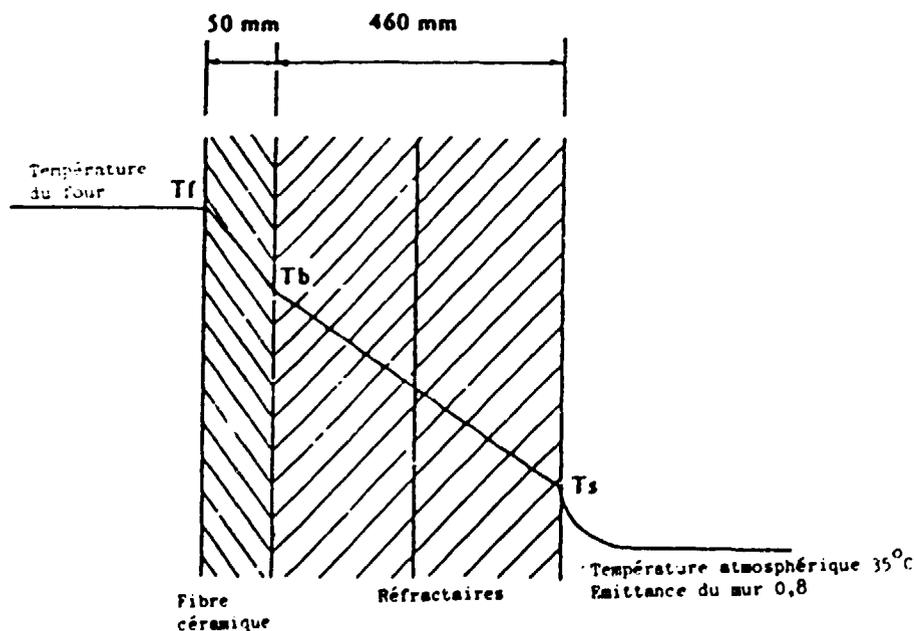
Réfractaires

$$\lambda = 1.2 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$C_p = 600 \text{ kcal/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$$

Température du four	T_f	1300	1200	1000	800	°C
Température de surface	T_s	199	190	170	149	°C
Chaleur rayonnante	Q	2873	2636	2165	1699	kcal/m ² h

Figure 16 Température normale du mur d'un four à réchauffer



$$\lambda = 0.17 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C} \quad \lambda = 1.2 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$C_p = 50 \text{ kcal/m}^3\text{ }^\circ\text{C} \quad C_p = 600 \text{ kcal/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$$

Température du four	Tf	1300	1200	1000	800	°C
Température des bornes	Tb	800	741	621	307	°C
Température de surface	Ts	149	142	128	112	°C
Chaleur rayonnante	Q	1700	1562	1288	1015	kcal/m ² h

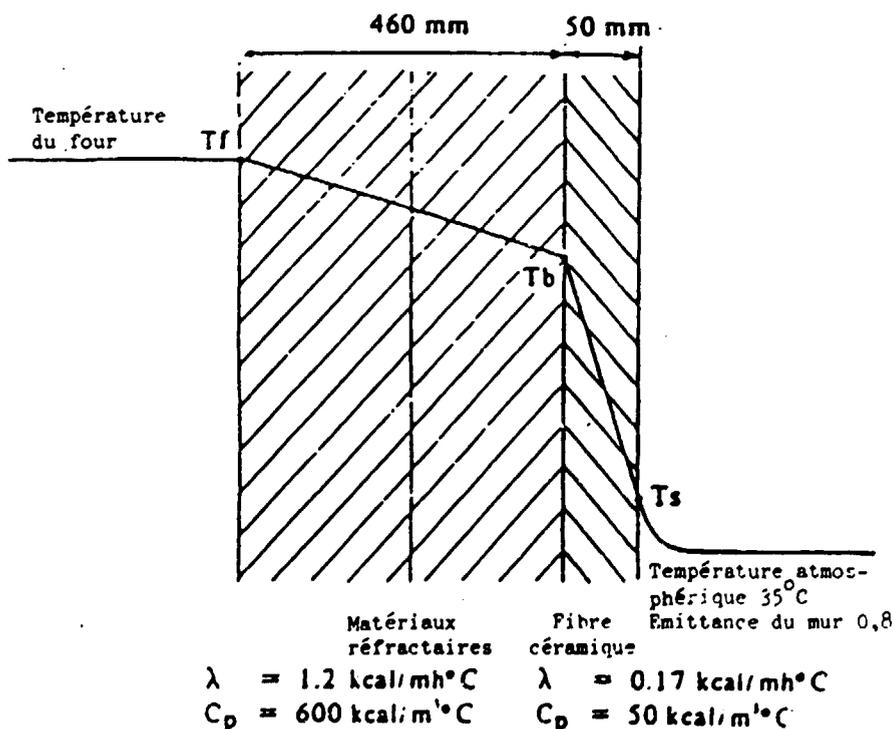
Figure 17 Plan d'amélioration de la composition du mur d'un four à réchauffer

L'énergie économisée grâce à cette amélioration est, comme le montre la figure 11, de l'ordre de 41%, en raison de la diminution de la quantité de chaleur rayonnante qui s'ajoute à une baisse de la température de la surface externe du mur. Couvertes de fibre céramique, qui est dotée d'une forte résistance au feu et d'une excellente capacité d'isolation, les briques subissent une baisse de température et ont une plus longue durée de vie. Toutefois, cette méthode ne peut être appliquée que lorsqu'une réduction du volume du four est possible.

Tableau 11 Effets de l'amélioration de la composition du mur d'un four à réchauffer

	Lorsque la temp. du four est à 1300°C		Effets de l'amélioration
	Avant	Après	
Température de surface	199°C	149°C	Diminution de 25%
Quantité de chaleur rayonnante	2873 kcal/m ² h	1700 kcal/m ² h	Diminution de 41%

La figure 18 illustre un cas où le mur externe du four est couvert de fibre céramique de 50 mm d'épaisseur.



Température du four	Tf	1300	1200	1000	800	°C
Température périphérique	Tb	649	601	506	411	°C
Température de surface	Ts	149	142	128	112	°C
Chaleur rayonnante	Q	1700	1562	1288	1015	kcal/m ² h

Figure 18 Plan de reconstruction du mur inférieur d'un four à réchauffer

Tableau 12 Température normale du mur d'un four à réchauffer japonais

Température de l'infrastructure (°C)	Temp. normale de la surface externe du mur	
	Plafond	Mur latéral
1 300	140°C	120°C
1 100	125°C	110°C
900	110°C	95°C
700	90°C	80°C

Remarques

1. Les valeurs de la température de la paroi externe indiquées dans le tableau ci-dessus sont des valeurs moyennes déterminées pendant le fonctionnement normal à une température atmosphérique de 20°C.
2. Les valeurs indiquées dans le tableau ne s'appliquent pas dans le cas des fours industriels suivants:
 - (1) Ceux ayant un débit normal inférieur ou égal à 200 000 kcal/h
 - (2) Ceux dont les murs sont à refroidissement forcé
 - (3) Les fours annulaires à sole tournante.

Si la surface externe du mur est couverte de tôle, la température s'élèvera si on y ajoute de la fibre céramique et la distorsion par dilatation thermique pourra endommager l'enveloppe du four.

Le tableau 12 indique des températures moyennes des murs externes d'un four à réchauffer japonais.

(ii) Prévention de la perte de chaleur à travers les orifices

Il y a perte de chaleur soit par émission directe soit par échappement du gaz de combustion à travers les orifices.

a) Perte de chaleur par émission directe

Si le creuset d'un four est doté d'une ouverture, la chaleur s'échappe du four par rayonnement.

Dans ce cas, la quantité de chaleur perdue est fonction de l'épaisseur du mur et de la forme de l'ouverture. La figure 19 illustre des quantités de chaleur perdues par émission directe à travers des ouvertures de formes différentes. Chaque quantité est représentée en fonction du facteur de rayonnement de la chaleur émise par un corps noir parfait équivalent à la surface de l'ouverture.

La perte de chaleur est calculé à l'aide de la formule suivante:

où

$$Q = 4,88 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cdot a \cdot A \cdot H$$

T: température absolue(K)

a: facteur de rayonnement total

A: aire de l'ouverture

H: temps (heure)

Cela est expliqué dans l'exemple suivant:

Un four à réchauffer, dont les murs ont une épaisseur de 460mm (X) est doté pour l'extraction des billettes d'une ouverture de 1 m de haut et de 1 m de large. Lorsque la température du four est à 1340°C, la quantité de chaleur rayonnante s'échappant de cet orifice se calcule de la manière suivante:

L'ouverture étant carrée, $D/X = 1/0,64 = 2,17$. Le facteur de rayonnement total étant de 0,7 selon la figure 19, on obtient:

$$Q = 4,88 \times \left(\frac{1340+273}{100} \right)^4 \times 0,71 \times 1 = 234500 \text{ kcal/h}$$

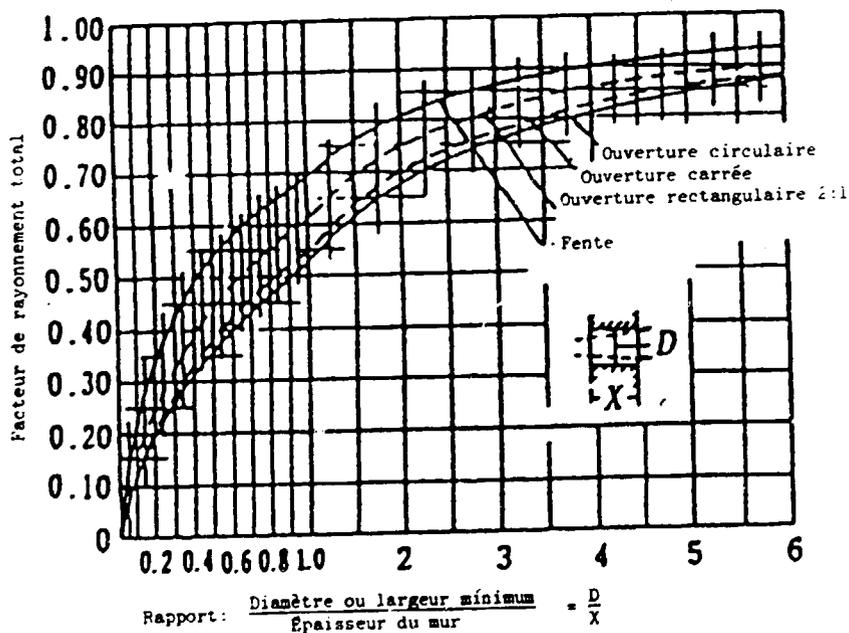


Figure 19 Facteur permettant de déterminer la chaleur s'échappant des ouvertures par rapport à la quantité de chaleur rayonnante émise par un corps noir parfait

- b) Perte de chaleur par combustion du gaz qui s'échappe à travers les orifices
La pression dans un four à réchauffer en fonctionnement étant légèrement supérieure à la pression de l'air extérieur, il est inévitable que le gaz de combustion ne s'échappe à travers les orifices et n'aboutisse à une perte de chaleur.

Cela causerait encore plus de dégâts si l'air extérieur pénétrait dans le four, rendant la température inégale et oxydant les billettes. Comme il a été déjà signalé dans 3.2.5(ii), cette perte de chaleur représente environ 1% de la quantité totale de chaleur produite dans le four, si la pression est bien contrôlée.

- c) Prévention de la perte par l'eau de refroidissement

La perte de chaleur dans les longerons tubulaires refroidis à l'eau dans un four continu peut atteindre 10 à 15% de la consommation de combustible. Un four à longerons mobiles a, de par sa structure, une surface refroidie à l'eau une fois et demie plus grande qu'un four poussant. Le problème de la perte d'eau par refroidissement y est donc plus important. Pour y remédier, on a de plus en plus recours, dans les vieux fours ainsi que dans ceux qui sont nouvellement construits, à la méthode de la double isolation des longerons tubulaires. Cette méthode fait appel à de la fibre céramique couverte de coulables.

La figure 20 illustre un exemple de double isolation et la figure 21 compare les pertes de chaleur par refroidissement (valeurs calculées) dans le cas de l'isolation simple et dans celui de l'isolation double.

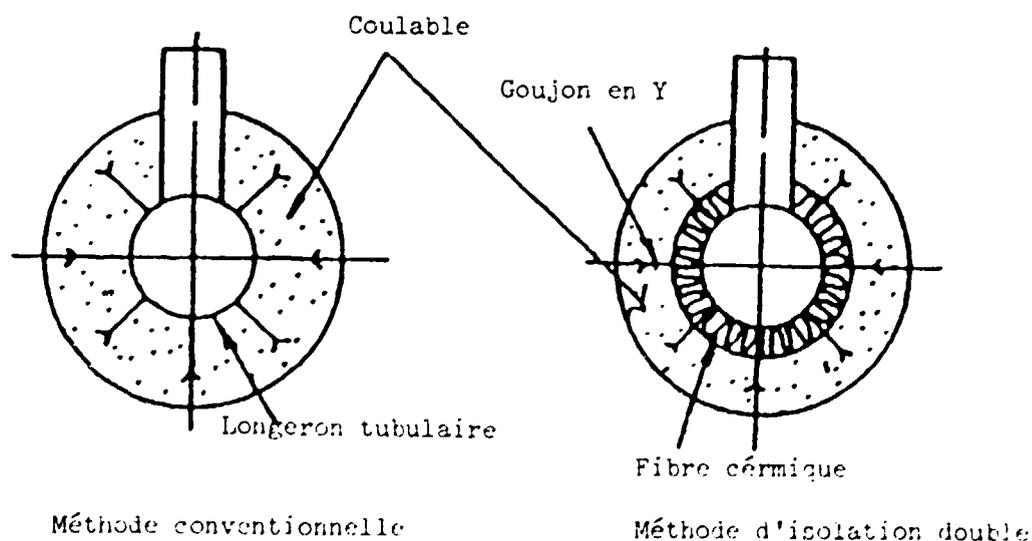


Figure 20 Méthode d'isolation double du longeron

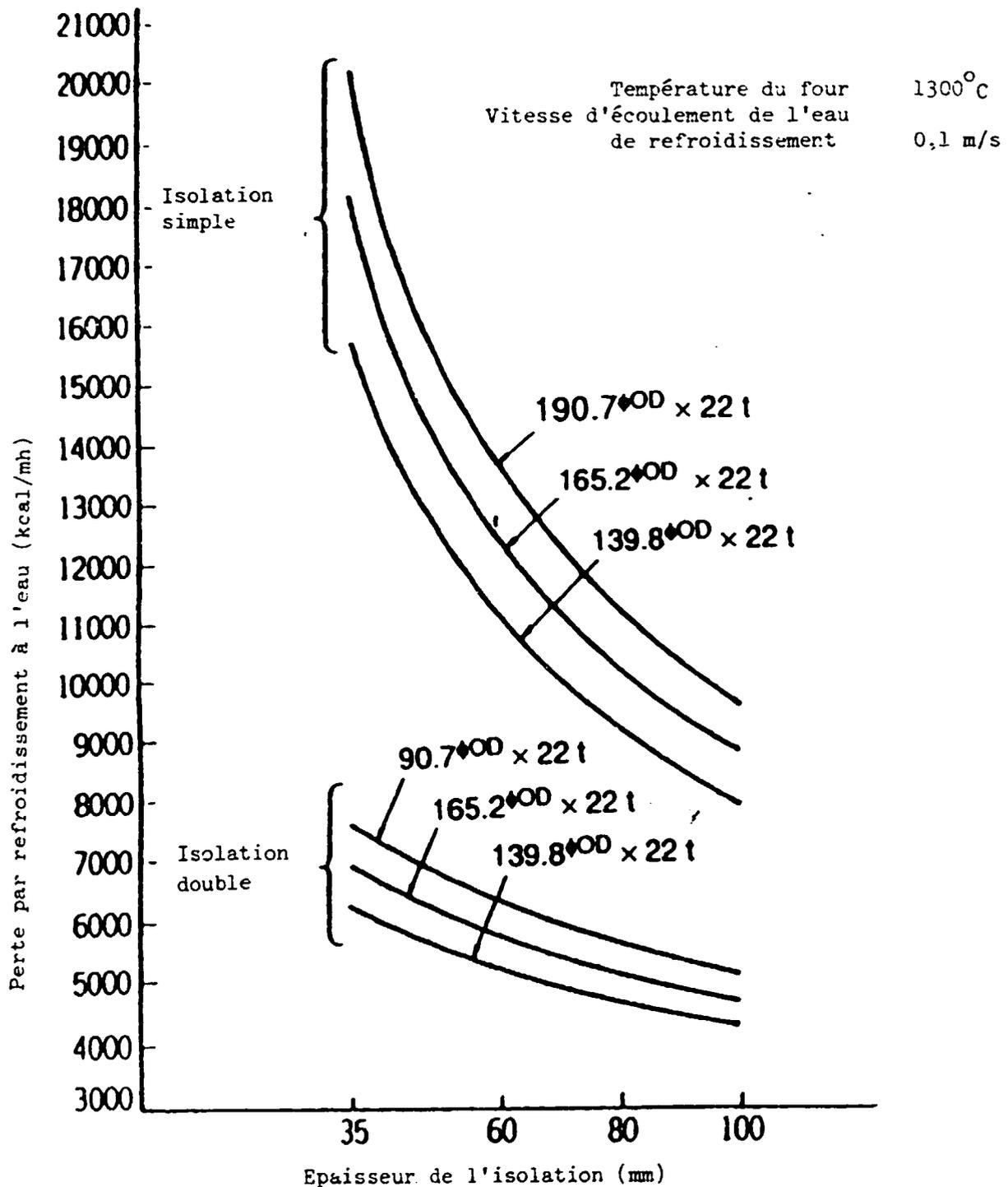


Figure 21 Comparaison des pertes par refroidissement à l'eau (valeurs calculées)

Dans la figure 21, si, dans le cas du tube ayant 165,2mm de diamètre externe, on suppose que la perte par refroidissement à l'eau avec une isolation simple de 60mm est de 100%, la perte avec une double isolation à l'aide de 15mm de fibre céramique et de 45mm de coulable sera de 47%, ce qui se traduira une réduction considérable de la consommation de combustible et d'eau de refroidissement. Un autre avantage de cette méthode est également que les traces de glissières sont petites, la température de la surface de la couche isolante étant inférieure.

3.2.8 Récupération de la chaleur perdue

La quantité de chaleur perdue par le four à réchauffer à cause de la haute température du gaz d'échappement est très grande. Si on peut la réduire, on économise beaucoup de combustible. Il existe deux moyens de le faire. Soit en diminuant le volume du gaz d'échappement, soit en réduisant la température de ce dernier. La première méthode, qui consiste à rationaliser la combustion, est décrite dans le paragraphe 3.2.5(i) et la deuxième consiste à récupérer la chaleur perdue du gaz d'échappement. Pour ce faire, on peut (1) réchauffer l'air de combustion à l'aide d'un récupérateur, (2) produire de la vapeur ou de l'eau chaude à l'aide d'une chaudière de récupération, (3) préchauffer des matières à l'aide du gaz d'échappement et (4) utiliser les cascades comme source de chaleur pour d'autres installations.

Le tableau 13 indique les taux moyens de chaleur récupérée dans les fours industriels japonais.

Tableau 13 Taux moyen de chaleur récupérée dans les fours japonais

Temp. du gaz d'échappement	Classification selon la capacité	Taux moyen de chaleur récupérée	Données de référence	
			Temp. du gaz d'échappement (°C)	Temp. de l'air préchauffé (°C)
500	A-B	20	200	130
600	A-B	20	290	155
700	A	30	300	260
	B	25	330	220
	C	20	370	180
800	A	30	370	300
	B	25	410	250
	C	20	450	205
900	A	35	400	385
	B	25	490	285
	C	20	530	230
1000	A	40	420	490
	B	30	520	375
	C	25	570	315
> 1000	A	40	-	-
	B	30	-	-
	C	25	-	-

(Notes)

1. "Température du gaz d'échappement" signifie la température du gaz d'échappement à la sortie du four.
2. Les fours industriels sont classés en trois catégories:
 - A. Les fours dont la puissance nominale est supérieure à 20MM kcal/
 - B. Les fours dont la puissance nominale est supérieure à 5MM kcal/h et ne dépasse pas 20MM kcal/h
 - C. Les fours dont la puissance nominale est entre 1 et 5MM kcal/h

(Remarques)

1. Les valeurs indiquées dans le tableau sont déterminées en fonction du rapport entre la quantité de chaleur récupérée et la quantité de chaleur sensible dans un gaz d'échappement dégagé du four lorsque la combustion se déroule sous une charge proche de la puissance nominale.
2. Les valeurs moyennes des taux de récupération de la chaleur perdue indiquées dans le tableau ci-dessus serviront de valeurs indicatives pour les fours continus construits à partir du 1er janvier 1990.
3. Les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus ne s'appliquent pas aux fours industriels suivants:
 - (1) Ceux dont la puissance nominale ne dépasse pas 1MM kcal/h;
 - (2) Ceux dont le temps de fonctionnement ne dépasse pas 1000 heures par an.
4. Les valeurs indicatives concernant la température du gaz d'échappement et de l'air préchauffé indiquées sont obtenues après la récupération de la chaleur perdue et le préchauffage de l'air à l'aide de la chaleur récupérée dans les conditions suivantes:
 - (1) La chute de température due à la perte relative de chaleur entre la sortie du four et l'échangeur thermique destiné à réchauffer l'air est de 200°C;
 - (2) Le combustible est liquide;
 - (3) La température atmosphérique est de 20°C;
 - (4) Le coefficient d'air est de 1,2.

(i) Préchauffage de l'air pour la combustion à l'aide d'un récupérateur

Le préchauffage de l'air destiné à la combustion est une mesure courante dans le cas des fours à réchauffer. Un récupérateur est un appareil qui permet de récupérer la chaleur du gaz d'échappement provenant d'un four à réchauffer. Il est doté d'une surface thermoconductrice qui peut être en métal ou en céramique. Lorsque la température du gaz d'échappement est inférieure à 1000°C et que l'air destiné à la combustion est préchauffé, on utilise en général un récupérateur métallique.

Le recours à l'air préchauffé permet d'économiser du combustible. La formule suivante sert à calculer le taux d'économie de combustible:

$$E = \frac{P}{C+P-Q} \times 100(\%)$$

E: taux d'économie de combustible

C: valeur calorifique minimale du carburant (kcal/kg de carburant)

P: quantité de chaleur apportée par l'air préchauffé (kcal/kg de combustible)

Q: quantité de chaleur absorbée par le gaz d'échappement (kcal/kg de carburant)

A l'aide de cette formule, des taux d'économie d'huile lourde et de gaz naturel ont été calculés à différentes températures du gaz d'échappement et de l'air préchauffé. Les résultats sont illustrés par les figures 22 et 23.

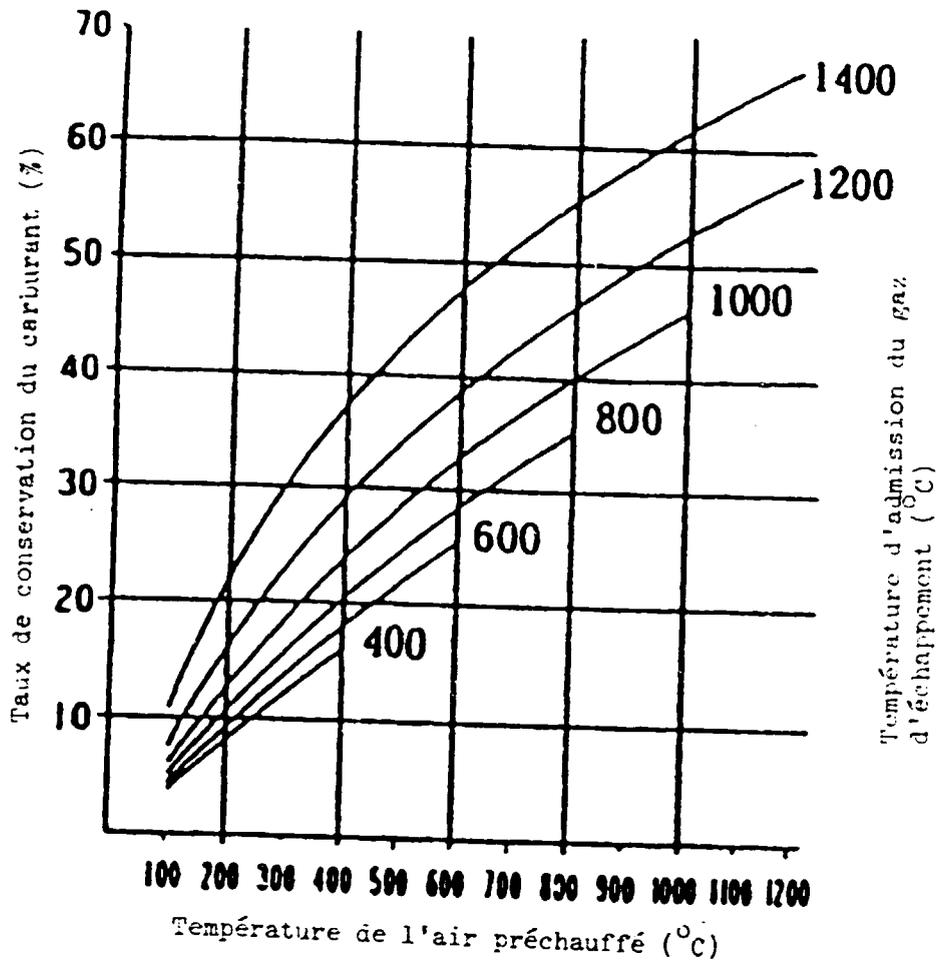


Figure 22 Taux de conservation du carburant dans le cas de l'huile

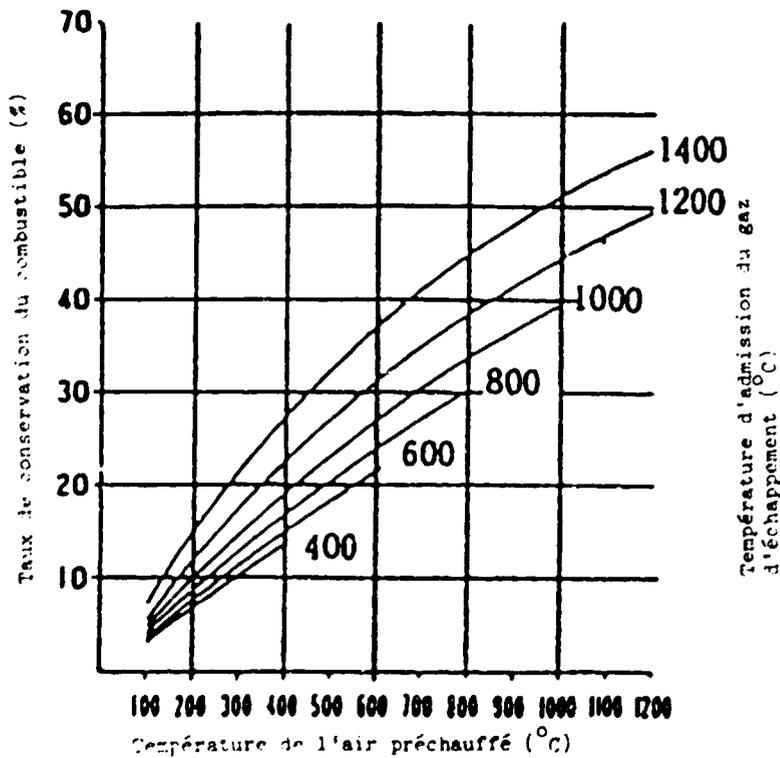


Figure 23 Taux de conservation du carburant dans le cas du gaz naturel

Au moment d'installer un récupérateur dans un four à réchauffer continu, il est important de choisir une température d'air préchauffé qui permette d'établir un équilibre entre les économies réalisées sur le carburant et les frais investis pour le matériel.

En outre, il faudra examiner les questions suivantes:

(1) Le tirage du gaz d'échappement: lorsque le gaz d'échappement traverse le récupérateur, sa résistance au tirage occasionne généralement une perte de pression de 5 à 10 mm de H_2O .

(2) La machine soufflante pour la combustion de l'air: Lorsque l'air traverse le récupérateur, il y a habituellement une perte de pression de 100 à 200 mm de H_2O . Ainsi, il faudrait examiner la pression de décharge de la machine soufflante et rétablir la pression nécessaire à l'aide de brûleurs.

Conclusion

De manière générale, les mesures de conservation de l'énergie dans le secteur industriel peuvent être réparties sur trois phases:

La phase 1 consiste à planifier l'amélioration par étapes de toutes les conditions de fonctionnement en renforçant la gestion de l'énergie sur la base des installations existantes.

La phase 2 consiste à apporter une amélioration partielle aux installations. Elle vise surtout à réduire la consommation d'énergie et à utiliser les émissions de gaz d'échappement de manière plus efficace.

La phase 3 se concentre sur l'élaboration d'un nouveau processus de conservation de l'énergie et sur la planification d'une restructuration du processus de production.

Le présent manuel a surtout porté sur la phase 1. Les mesures décrites sont relativement simples et il existe plusieurs cas où elles ne sont pas très efficaces pour ce qui est de la conservation de l'énergie. Toutefois, les résultats obtenus dans l'ensemble ont dépassé nos espérances. Nous espérons que, grâce à ce manuel, les installations en question seront réexaminées sous un oeil différent et que des mesures concrètes seront mises en application.

En outre, même en ce qui concerne les mesures déjà prises, nous espérons que vous vérifierez si elles ont abouti aux résultats voulus en ce qui concerne l'économie de l'énergie et que vous y apporterez les améliorations nécessaires pour en augmenter l'efficacité.

Références

1. Handbook of Iron and Steel
2. Handbook of Energy Conservation for Industrial Furnaces, Japan Industrial Furnace Association
3. Data Sheet for Energy Management (1), Centre japonais de conservation de l'énergie
4. Iron and Steel, vol.64, no.13 (1978)
5. Refractory Material, no.178, vol.24 (1972)