SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

7

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS

Fours, sécheurs et fours de cuisson

TJ
163.4
C2
A614
no. 7

This document was produced
by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une
numérisation par balayage
de la publication originale.

Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada

Canada

TJ
163.4
C2
A614
no.7

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé à donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

À la demande du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

La Division de la gestion de l'énergie dans les
entreprises et dans le secteur gouvernemental
Direction des économies d'énergie
Énergie, Mines et Ressources Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Comptabilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
1 Isolation thermique des équipements
2 Éclairage
3 Électricité
4 Moteurs électriques économiseurs d'énergie
5 Combustion
6 Appareillage de chaufferie
7 Fours, sécheurs et fours de cuisson
8 Réseaux de vapeur et de condensat
9 Chauffage et refroidissement (vapeur et eau)
10 Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
11 Refroidissement et pompes à chaleur
12 Réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé
13 Ventilateurs et pompes
14 Compresseurs et turbines
15 Mesures et contrôle
16 Régulation automatique
17 Manutention des matériaux et transport sur place
18 Point de vue architectural
19 Accumulation thermique
20 Guide de planification et de gestion

emmic - cimme
Natural Resources Canada/Ressources Naturelles Canada
Energy, Minerals and Metals Information Centre
Centre d'information sur les minéraux, les métaux et l'énergie
580 rue Booth St., Ottawa, Ontario. K1A 0E4

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M91-6/7F au Canada: $3.75
ISBN 0-662-93329-X à l'étranger: $4.50

Prix sujet à changement sans préavis

Tous droits réservés. On ne peut reproduire aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (électronique, mécanique, photographique) ni en faire un enregistrement sur support magnétique ou autre pour fins de dépistage ou après diffusion, sans autorisation écrite préalable des Services d'édition, Centre d'édition du gouvernement du Canada, Ottawa, Canada K1A 0S9.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
Objectif	1
Contenu	1
NOTIONS DE BASE	3
Généralités	3
Système d'alimentation en combustible	3
Système de combustion d'air	4
Excès d'air	6
Analyse des gaz de combustion	7
Détermination de l'excès d'air	7
Pertes de chaleur	9
Perte de chaleur dans les gaz de combustion	9
Perte par rayonnement et convection	11
Bilan calorifique	11
Transfert de chaleur	13
Conduction	13
Convection	14
Rayonnement	15
Récupération de la chaleur	17
Échangeurs de chaleur	17
Récupérateurs	20
Économiseurs	20
Chaudières de récupération de chaleur	21
Régulation de la température du produit	21
Mesures de sécurité	21
Possibilités de gestion d'énergie	21
Analyse énergétique	24
APPAREILLAGE	25
Fours	25
Fours à charges	25
Fours continus	26
Fours à combustion directe	26
Fours à combustion indirecte	26

Sécheurs 27

Fours de cuisson 27

Brûleurs 28

Régulateurs de brûleurs 28

Isolation 28

Récupération de la chaleur 29

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE 31

Possibilités de maintenance 31

Exemples concrets de maintenance 31
1. Réglages appropriés du brûleur 31
2. Vérification de l'excès d'air et des corps combustibles dans les gaz de combustion 31
3. Nettoyage des surfaces de l'échangeur de chaleur 31
4. Remplacement ou réparation d'isolants manquants ou endommagés 32
5. Remise en place des portes ou des couvercles 32
6. Vérification périodique de la pression du four 32
7. Planification de la production pour maximiser le rendement des fours 32

Possibilités d'amélioration de coût modique 32

Exemples concrets d'amélioration de coût modique 32
1. Remplacement des portes ou des couvercles tordus ou endommagés 32
2. Installation d'un appareillage de surveillance approprié 33
3. Récupération de la chaleur transmise à l'eau de refroidissement de l'équipement 33
4. Nouvel emplacement de la prise d'air de combustion pour récupérer de la chaleur au sein du bâtiment 33

Possibilités de rénovation 33

Exemples concrets de rénovation 34
1. Installation d'un échangeur de chaleur dans la sortie des gaz de combustion 34
2. Nouvelle isolation de l'enceinte du four 35
3. Remplacement de l'ensemble du brûleur 36
4. Installation d'un nouveau système de régulation 36

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes

INTRODUCTION

L'usage des fours, des sécheurs et des fours de cuisson est très courant dans l'industrie pour la fusion et le chauffage du métal, l'évaporation de l'eau ou de solvants et la fabrication de la chaux dans les industries du ciment et des pâtes et papiers. La plupart de ces équipements ont été installés lorsque le coût du combustible était relativement bas, sans tenir compte des possibilités de gestion de l'énergie. Même aujourd'hui les coûts d'exploitation et le rendement de la production demeurent souvent le premier critère de sélection de l'équipement, sans souci des économies d'énergie.

De nos jours, des techniques de gestion de l'énergie applicables aux installations nouvelles ou déjà existantes s'avèrent de plus en plus profitables en raison du coût élevé des combustibles. En effet, l'application de ces techniques peut entraîner des économies importantes et, dans la plupart des cas, la mise de fonds est récupérée dans un délai relativement court. Souvent, la mise en oeuvre de possibilités de gestion de l'énergie représente l'un des investissement les plus rentables pour une industrie.

Le présent module expose la mise en application de techniques de gestion de l'énergie susceptibles de réduire les coûts d'installation et d'exploitation des fours, des sécheurs et des fours de cuisson.

Objectif

L'objectif du présent module se résume comme suit:

- Décrire sommairement le fonctionnement des fours, des fours de cuisson et des sécheurs utilisés dans l'industrie.
- Sensibiliser l'industrie aux économies de coût et d'énergie potentiels grâce à la mise en oeuvre de possibilités de gestion de l'énergie.
- Exposer, à l'aide d'exemples, les méthodes de calcul utilisées pour déterminer les économies de coût et d'énergie.
- Suggérer des possibilités de gestion de l'énergie pouvant faire l'objet d'étude pour déterminer les économies éventuelles d'énergie.

Contenu

Le présent module comprend les 3 chapitres suivants.

- Le chapitre *Notions de base* décrit sommairement les fours, les sécheurs et les fours de cuisson. On y décrit le procédé de combustion et la transmission de chaleur de la source d'énergie au produit. On y traite également du calcul des pertes d'énergie, de la mesure des pertes et des gains d'énergie, ainsi que des systèmes de régulation et de leur fonction dans le cadre de la gestion de l'énergie. De plus, on expose le principe de l'évaluation de la consommation énergétique et on propose des objectifs ainsi que des méthodes de mise en oeuvre de possibilités de gestion de l'énergie.
- Le chapitre *Appareillage* décrit les types de fours, de sécheurs et de fours de cuisson à combustible et électriques. On y identifie les différents types de possibilités de gestion de l'énergie.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* présente une série de possibilités de gestion de l'énergie. De plus, on y explique à l'aide d'exemples comment calculer les économies d'énergie de même que la rentabilité des investissements nécessaires.

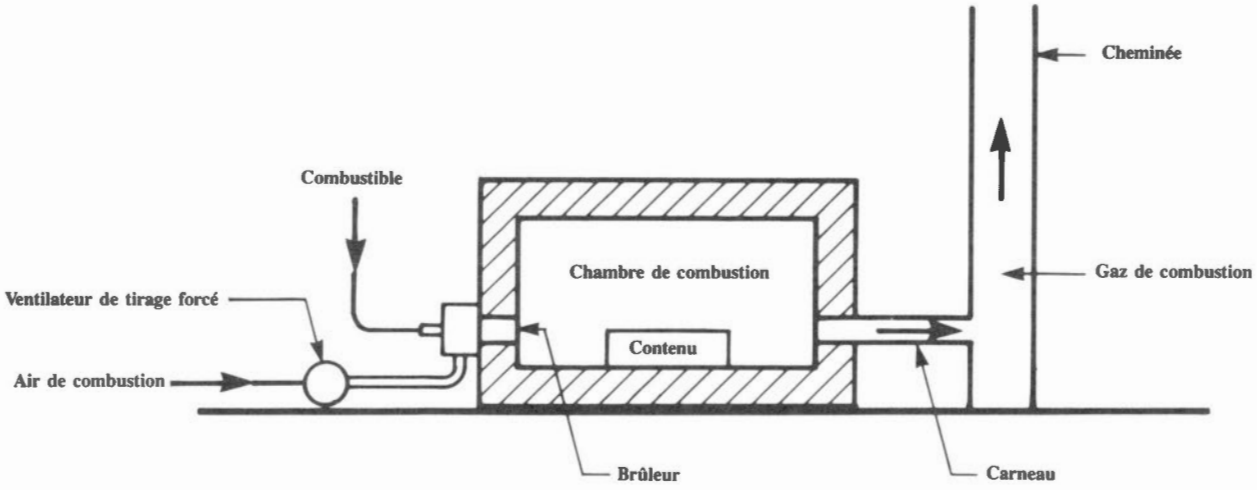
NOTIONS DE BASE

Les fours, les sécheurs et les fours de cuisson sont utilisés dans plusieurs industries pour une vaste gamme d'applications où la chaleur joue un rôle important. Voici une sélection de ces applications:

- Le chauffage des métaux pour le traitement thermique et le forgeage.
- La fusion des métaux pour le moulage.
- La fabrication des briques et de la céramique.
- L'évaporation de l'eau pour le séchage du bois, du malt et d'autres produits.
- L'évaporation des solvants pour la fabrication de produits tels que les électrodes chimiques et de charbon, ainsi que pour le séchage de la peinture.
- La fabrication de la chaux par le chauffage du calcaire.

Généralités

On retrouve les éléments de base d'un four à combustible dans la figure 1.



Four à combustible
Figure 1

Système d'alimentation en combustible

Dans toutes les applications, la chaleur des fours, des sécheurs et des fours de cuisson est produite par combustion ou par électricité. Cette chaleur est ensuite transmise au produit pour qu'il réponde aux exigences préalablement spécifiées. Il peut s'agir du chauffage du métal à une température précise, de la fusion complète du métal sans surchauffage, de l'évaporation de l'eau pour obtenir un séchage à un pourcentage spécifique ou de la transformation complète du calcaire en chaux.

Lorsque la chaleur est produite par combustion, le four, le sécheur ou le four de cuisson est équipé d'une chambre de combustion dans laquelle brûle un combustible. Ce dernier, admis au niveau du brûleur, est mélangé avec de l'air puis est allumé. Il s'agit habituellement de gaz naturel ou de mazout mais on peut également utiliser du gaz de coke ou de raffinerie produit dans une autre partie d'une usine. Le produit peut être exposé directement à la chaleur générée dans la chambre de combustion ou indirectement par le biais d'un échangeur de chaleur pour éviter une exposition directe au gaz de combustion.

Les fours électriques génèrent de la chaleur en faisant passer de l'électricité par une série de résistances. Comme il n'y a pas de combustion, et donc de gaz de combustion, le four peut être complètement recouvert pour réduire les pertes de chaleur. On peut facilement régler la chaleur transmise par la mise sous tension et hors tension des résistances. Les coûts de l'électricité et des combustibles tels que le mazout et le gaz varient beaucoup; lorsqu'on compare les sources d'énergie, il faut tenir compte, en plus de ces coûts, de l'efficacité du procédé générateur de chaleur. Le système de brûleurs est conçu de manière à assurer le mélange approprié de combustible et d'air de combustion et une allure de flamme conforme à la construction du four. On peut également installer des brûleurs multiples qui assurent une distribution uniforme de la température à l'intérieur du four. Par exemple, un four de réchauffage de grosses billettes en acier peut être divisé en zones de préchauffage, de chauffage et d'égalisation dont la température de chaque zone diffère.

L'allure de la flamme du brûleur est une bonne indicatrice des conditions de combustion et par conséquent, elle peut servir à corriger ces conditions. La mise au point du brûleur exige cependant une certaine expérience. Une fois qu'un technicien en chauffage a réglé l'allure de la flamme, on doit se servir de ce réglage pour fins de référence future. En général, une flamme de gaz naturel est transparente ou bleutée alors qu'une flamme de mazout est brun pâle ou jaunâtre. Lorsque la flamme a l'aspect d'un chalumeau, il y a une trop grande quantité d'air; lorsqu'elle est fuligineuse et longue, il y a trop peu d'air. Cependant, ces observations peuvent être modifiées lorsque l'application du four exige des conditions inhabituelles de combustion.

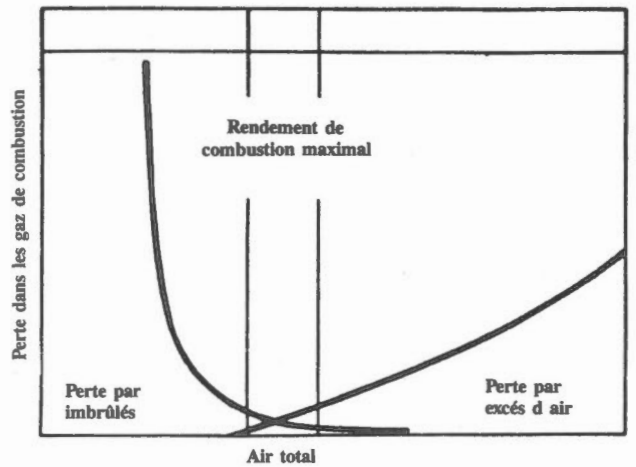
La quantité de combustible requise pour générer une quantité précise de chaleur est fonction directe du pouvoir calorifique du combustible. La valeur calorifique est égale à la quantité de chaleur émise lorsqu'une quantité fixe de combustible est complètement brûlée. Les unités de mesure courantes sont les mégajoules par mètre cube (MJ/m^3) pour les combustibles gazeux, les mégajoules par litre (MJ/L) pour les combustibles liquides et les mégajoules par kilogramme (MJ/kg) pour les combustibles solides. On obtient habituellement ces données du fournisseur de combustible. Si elles ne sont pas disponibles, le lecteur peut utiliser celles indiquées à l'annexe C qui sont suffisamment précises pour la plupart des applications.

Système de combustion d'air

L'air stoechiométrique représente la quantité d'air exacte nécessaire à la combustion complète d'un mélange parfait de combustible et d'air. L'air stoechiométrique est quelquefois appelé air théorique. Lorsqu'on obtient un mélange parfait, chaque molécule de combustible et d'air prend part au procédé de combustion. On doit fournir un excès d'air pour assurer la combustion complète car le mélange de combustible et d'air n'est jamais parfait. Le pourcentage d'excès d'air représente la quantité totale d'air de combustion fourni en excès de l'air stoechiométrique, exprimé en pourcentage d'air stoechiométrique.

$$\text{Air total} = \text{air stoechiométrique} \times \left(1 + \frac{\%\ \text{d'excès d'air}}{100}\right)$$

La quantité d'excès d'air minimale nécessaire varie selon le combustible utilisé et selon l'efficacité du mélange de l'air avec le combustible. Si l'on fournit une quantité inférieure au volume minimal d'air, une certaine quantité de combustible ne brûle pas complètement et il y a gaspillage d'énergie. Une combustion incomplète se signale habituellement par la présence de monoxyde de carbone (CO) dans les produits de combustion. On peut vérifier la présence de CO dans les gaz de combustion à l'aide d'un analyseur de gaz en continu ou d'un appareil d'Orsat.



Zone de rendement de combustion maximal
Figure 2

Un excès d'air gaspille également de l'énergie. Les gaz qui s'échappent du four sont chauds et renferment de l'énergie calorifique. Si le four est suralimenté en air, cet air supplémentaire est également chauffé. L'effet sur les pertes de chaleur de différents volumes d'air est illustré dans la figure 2. Les pertes minimales surviennent lorsque la quantité d'air fourni est légèrement plus élevé que la quantité d'air stoechiométrique.

Il faut connaître le poids ou le volume de chaque élément ou composé du combustible pour déterminer l'air stoechiométrique. Le lecteur pourra se référer au module 5 pour de plus amples détails. Il est souvent difficile de déterminer l'air stoechiométrique de cette façon puisque la composition précise du combustible est souvent difficile à déterminer ou variable. La détermination de la quantité d'air par unité de chaleur dans le combustible, soit les kilogrammes d'air par gigajoule de chaleur dans le combustible tel que brûlé (kg/GJ) est une méthode plus pratique. Exprimée de cette façon, la quantité d'air stoechiométrique nécessaire aux types courants de combustible est presque constante. La table 1 donne les valeurs pour les différents types de combustibles utilisés dans les fours.

Il se peut que tenant compte de la ventilation, les volets d'admission d'air, du réseau de gaines ou du système de régulation de débit d'air soient inappropriées: il faut donc connaître la quantité requise d'air de combustion du four pour vérifier si système d'alimentation en air est adéquat. Les besoins en air de combustion peuvent être calculés puis comparés à la capacité du système d'alimentation en air.

Exemple: Les besoins totaux en air de combustion d'un four utilisant 150 m^3/h de gaz naturel à 10% d'excès d'air peuvent être calculés comme suit:

Selon la table 1, l'air de combustion nécessaire à 0% d'excès d'air est de 318 kg/GJ.

Selon l'annexe C, le pouvoir calorifique du gaz naturel est de 37,2 MJ/m^3.

Le débit calorifique total = consommation de combustible × valeur calorifique du combustible

$$= 150\ m^3/h \times 37{,}2\ MJ/m^3$$

$$= 5\ 580\ MJ/h$$

$$= 5{,}58\ GJ/h$$

Le besoin en air de combustion à 0% d'excès d'air est la quantité d'air nécessaire par unité de débit calorifique multipliée par le débit calorifique.

Air de combustion nécessaire à 0% d'excès d'air = 318 kg/GJ × 5,58 GJ/h

$$= 1\ 774\ kg/h$$

Air de combustion nécessaire à 10% d'excès d'air = $1\ 774\ kg/h \times \left(1 + \frac{10}{100}\right)$

$$= 1\ 951\ kg/h$$

On exprime habituellement les débits d'air et de gaz en unités volumétriques de mètres cubes par heure (m^3/h). Puisque la densité relative de l'air et du gaz varie selon la température et la pression, il faut préciser des conditions standard pour effectuer la conversion de l'écoulement massique en écoulement volumétrique. Dans le système SI, les conditions standard sont 20°C et 101,325 kPa(abs.), et la masse volumique de l'air est de 1,204 kg/m^3.

$$\text{Air de combustion} = \frac{1951\ kg/h}{1{,}204\ kg/m^3}$$

$$= 1\ 620\ m^3/h \text{ aux conditions standard}$$

Exemple: On peut calculer les besoins en air de combustion d'un four utilisant 700 L/h de mazout n° 6 à 15% d'excès d'air. Selon la table 1, l'air de combustion théorique est de 327 kg/GJ. Selon l'annexe C, la valeur calorifique du mazout n° 6 avec 2,5% de soufre est de 42,3 MJ/L (la teneur en soufre est habituellement donnée par le fournisseur de combustible).

$$\text{Besoins en air de combustion} = \frac{700\ \text{L/h} \times 42{,}3\ \text{MJ/L} \times 327\ \text{kg/GJ} \times 1{,}15}{1\,000\ \text{MJ/GJ}}$$

$$= 11\,135\ \text{kg/h}$$

$$\text{ou} = \frac{11\,135\ \text{kg/h}}{1{,}204\ \text{kg/m}^3}$$

$$= 9\,248\ \text{m}^3\text{/h aux conditions standard}$$

L'alimentation en air de combustion peut provenir de systèmes à tirage naturel ou forcé. Les systèmes à tirage naturel utilisent la pression négative produite par la cheminée du four pour tirer l'air de combustion dans celui-ci et en évacuer les gaz de combustion. L'exemple le plus courant de ce type de système est l'appareil de chauffage au gaz résidentiel. Le tirage naturel ne s'applique habituellement qu'aux petits appareils de chauffage dont le débit calorifique est inférieur à environ 1 GJ/h.

Le chauffage par tirage naturel présente un certain nombre de désavantages. Le volume d'air de combustion tiré dans le four ne peut être réglé avec précision et le mélange combustible-air est inefficace. Par conséquent, des niveaux plus élevés d'excès d'air doivent être maintenus pour assurer la combustion complète dans toutes les conditions de service. Comme la pression du four est toujours négative, de l'air s'infiltre dans le four, ce qui crée un plus grand volume de gaz de combustion et des pertes de chaleur.

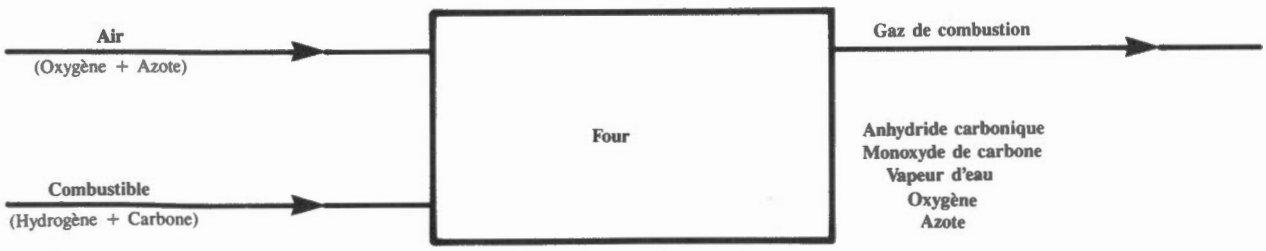
Un système de chauffage à tirage forcé est doté d'un ventilateur qui alimente l'équipement en air de combustion. Des registres règlent le débit d'air et assurent ainsi une régulation précise de la proportion d'air et de combustible en fonction des taux de combustion. Pour obtenir cette précision de régulation, on installe généralement un accouplement mécanique entre la vanne d'alimentation et le registre. Une came réglable varie les positions de la vanne d'alimentation et du registre et assure ainsi le rapport air-combustible approprié pour tous les taux de combustion.

Le ventilateur d'air de combustion assure également un meilleur mélange du combustible et de l'air. L'air est introduit dans le four autour du (ou des) brûleur(s) et des ailettes produisent des tourbillons d'air qui provoquent une turbulence à l'entrée du four. Un système à tirage forcé est nécessaire pour provoquer une grande chute de pression entre le système d'alimentation d'air et le four afin de produire la turbulence désirée. Ainsi, comme l'excès d'air d'un système à tirage forcé peut être inférieur à celui d'un système à tirage naturel, il y a moins de pertes de chaleur dans les gaz de combustion.

Le chauffage par tirage forcé permet une pression légèrement positive du four en tout temps. Les fuites s'échappent alors vers l'extérieur du four, ce qui peut provoquer une situation dangereuse lorsque la porte du four est ouverte. Il faut régler la pression du four à une valeur légèrement positive inférieure ou égale à environ 10 pascals. Pour ce faire, on installe et on ajuste un registre dans la culotte de cheminée entre la sortie des gaz de combustion et la base de la cheminée. Il peut être impossible de maintenir la pression du four aussi basse que désirée si l'appareil de récupération de chaleur est installé dans le tuyau d'évacuation des gaz de combustion ou si la cheminée ne tire pas suffisamment.

Excès d'air

Le pourcentage réel d'excès d'air fourni au four est un des renseignements les plus précieux pour l'opérateur du four. La valeur la plus précise s'obtient par l'analyse des gaz de combustion qui s'échappent du four.



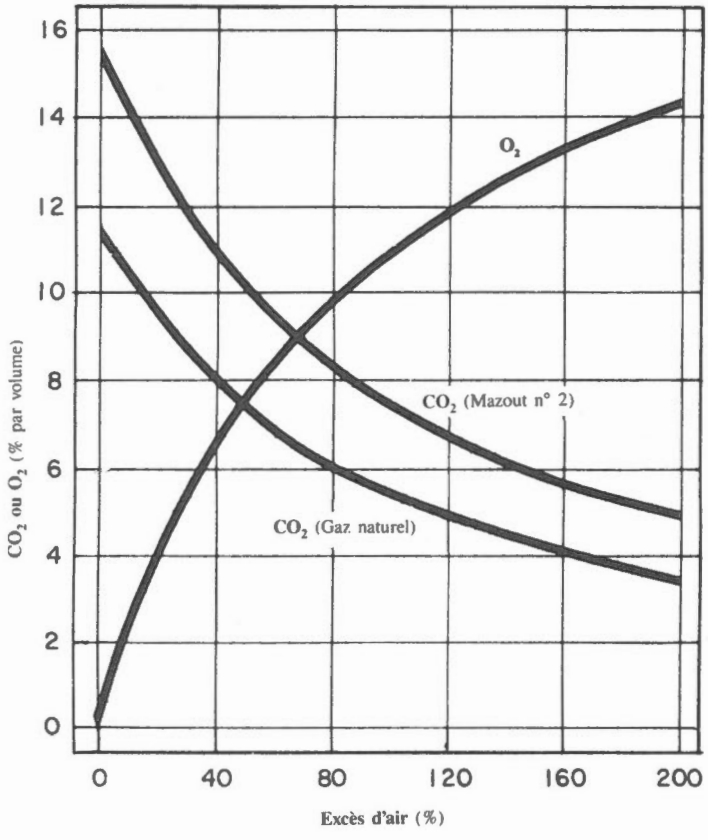
Procédé de combustion
Figure 3

Analyse des gaz de combustion

Lorsque la chaleur d'un four est produite par combustion, on peut considérer le combustible et l'air de combustion comme les entrées et les gaz de combustion, comme la sortie (figure 3). Presque tous les combustibles utilisés dans les fours sont des hydrocarbures contenant de l'hydrogène et du carbone. Quoique certains combustibles comprennent d'autres composés, ils importent peu dans le procédé de combustion. L'hydrogène du combustible brûle pour former de la vapeur d'eau et le carbone brûle pour former de l'anhydride carbonique (CO_2) ou un mélange d'anhydride carbonique et de monoxyde carbone (CO). L'air contient de l'azote (N_2) et de l'oxygène (O_2). Le N_2 ne participe pas au procédé de combustion sauf pour la formation de petites quantités d'oxydes d'azote (NO_X).

Les principaux constituants des produits de combustion sont la vapeur d'eau, le CO_2, le CO, le N_2 et tout O_2 en excès. Tous ces éléments ne sont pas nécessairement présents en tout temps. La présence de CO indique une combustion incomplète.

On peut analyser les gaz de combustion à l'aide d'un analyseur en continu ou par échantillonnage périodique. L'échantillon doit être prélevé le plus près possible de la sortie du four pour minimiser les erreurs d'infiltration d'air. Les analyseurs en continu mesurent la teneur en O_2 et enregistrent ou indiquent les résultats. D'autres analyseurs en continu mesurent la teneur en corps combustibles dans les gaz de combustion; il s'agit la plupart du temps de CO ou de combustible imbrûlé sous forme gazeuse. Si un analyseur en continu n'est pas disponible, on peut prélever un échantillon de gaz de combustion et l'analyser avec un appareil d'Orsat. Cet appareil y détermine le pourcentage par volume de O_2, CO_2 et CO. On suppose que le gaz restant se compose de N_2 et d'une petite quantité de vapeur d'eau non condensée. D'autres analyseurs manuels sont disponibles pour mesurer le CO_2 ou l'O_2 dans les gaz de combustion. Ils sont plus faciles d'utilisation et peuvent servir à contre-vérifier l'appareil d'Orsat.



Excès d'air en fonction de l'analyse des gaz de combustion
Figure 4

Détermination de l'excès d'air

L'analyse des gaz de combustion fournit suffisamment de données pour le calcul de l'excès d'air dans le four. Dans la plupart des fours, la quantité de CO est nulle ou minime à cause du niveau élevé d'excès d'air. Lorsqu'il y a combustion de gaz naturel ou de mazout sans présence de CO dans les gaz de combustion, le pourcentage d'excès d'air peut être déterminé à partir de la figure 4. Si l'on utilise d'autres combustibles ou s'il y a présence de CO, on peut se servir de l'équation suivante:

$$\text{Excès d'air} = \frac{O_2 - 0{,}5CO}{0{,}2682N_2 - (O_2 - 0{,}5CO)} \times 100$$

où O_2 = oxygène par volume dans gaz de combustion(%)

CO = monoxyde de carbone par volume (%)

N_2 = azote par volume (%)

Exemples: L'analyse des gaz de combustion par volume d'un four à gaz naturel donne les résultats suivants:

O_2 = 9,8%

CO_2 = 6,2%

CO = 0%

Selon la figure 4, l'excès d'air est d'environ 79%. Ce chiffre peut être comparé au calcul suivant:

$$\%N_2 = 100\% - (9{,}8\% + 6{,}2\% + 0\%)$$

$$= 84\%$$

$$\text{Excès d'air} = \frac{9{,}8\% - (0{,}5 \times 0\%)}{(0{,}2682 \times 84\%) - [9{,}8\% - (0{,}5 \times 0\%)]} \times 100$$

$$= 77\%$$

Cette valeur est très élevée pour un four à gaz naturel: il devrait y avoir possibilité de réduction du niveau d'excès d'air.

Voici un autre exemple qui familiarisera le lecteur avec ces calculs. Voici l'analyse des gaz de combustion d'un four brûlant du gaz de coke:

O_2 = 2,1%

CO_2 = 10%

CO = 0%

N_2 = 87,9% (par différence)

L'équation devrait être utilisée pour calculer l'excès d'air puisque la figure 4 ne s'applique pas au gaz de coke.

$$\text{Excès d'air} = \frac{2{,}1\%}{(0{,}2682 \times 87{,}9\%) - 2{,}1\%} \times 100$$

$$= 9{,}8\%$$

Cet excès d'air est acceptable pour un four à gaz de coke.

Voici l'analyse des gaz de combustion d'un four à gaz naturel avec insuffisance d'air:

O_2 = 0%

CO_2 = 11%

CO = 2%

N_2 = 87% (par différence)

La figure 4 ne peut être utilisée à cause de la présence de CO.

$$\text{Excès d'air} = \frac{0 - (0{,}5 \times 2\%)}{0{,}2682 \times 87\% - [0\% - (0{,}5 \times 2\%)]} \times 100$$

$$= -4{,}1\%$$

Donc, il y a une insuffisance d'air d'environ 4% par rapport au calcul théorique pour obtenir une combustion complète. Si le procédé le permet, le monoxyde de carbone devrait être réduit en augmentant l'alimentation en air de combustion.

À l'occasion, le CO se présente en même temps qu'une forte teneur en O_2. Il s'agit habituellement d'un mauvais mélange de combustible et d'air de combustion. On peut quelquefois remédier à la situation en réglant les registres d'admission d'air du brûleur pour créer une plus grande turbulence à l'endroit où le combustible et l'air se mélangent. On peut, en d'autres occasions, devoir remplacer tout l'ensemble du brûleur.

Pertes de chaleur

Perte de chaleur dans les gaz de combustion

La plus grande source de perte de chaleur dans un four à combustible est habituellement la chaleur des gaz de combustion s'échappant du four. Cette chaleur perdue comprend deux éléments principaux: la chaleur dans le gaz sec et celle contenue dans la vapeur d'eau.

La perte de chaleur en vapeur d'eau comprend la chaleur requise pour évaporer l'humidité dans les gaz de combustion. Il n'est habituellement pas possible de récupérer la chaleur d'évaporation puisqu'il faudrait abaisser la température des gaz de combustion à une valeur inférieure au point de condensation de la vapeur d'eau. Cette température peut varier de 40 à 60°C selon le combustible et le niveau d'excès d'air. Cependant, dans certains cas, on peut faire cette récupération en abaissant la température mais les exigences suivantes doivent au préalable être satisfaites.

1. Il y a suffisamment d'espace pour installer un système de récupération de chaleur à condensation et la chaleur ainsi récupérée peut être utilisée.

2. Dans le choix des matériaux de l'échangeur de chaleur et du traitement, il faut tenir compte de la corrosion que peu produire l'eau condensée. Dans cette optique, le gaz naturel crée le moins de problèmes.

On peut analyser les gaz de combustion et en mesurer la température pour calculer la perte de chaleur dans ces derniers. La température devrait être prise à l'endroit de prélèvement de l'échantillon de l'analyseur. On utilise un thermomètre à mercure si la température est inférieure à 300°C et un thermocouple lorsque les températures sont plus élevées.

On peut évaluer les pertes de chaleur du gaz naturel (figure 5) et du mazout (figure 6) transmises aux gaz de combustion si l'on connaît les températures de l'excès d'air et des gaz de combustion. Ce pourcentage combine les pertes en gaz sec et en vapeur d'eau. On retrouve en détail les calculs des pertes de chaleur pour tous les combustibles dans le module 5.

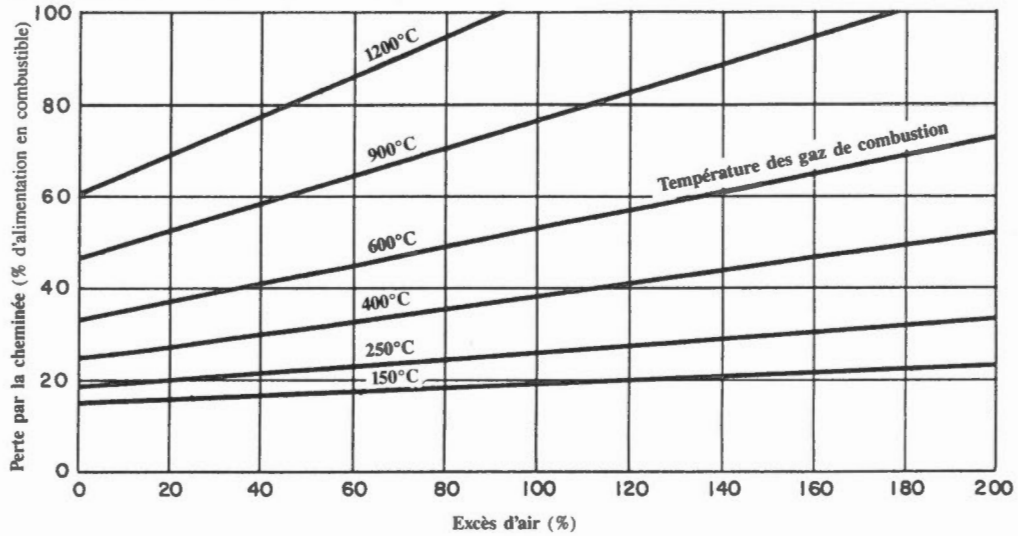
Exemple: Le pourcentage d'excès d'air d'un four à gaz naturel est de 77%. La température des gaz qui s'échappent du four est de 850°C.

Selon la figure 5, la perte de chaleur = 65%.

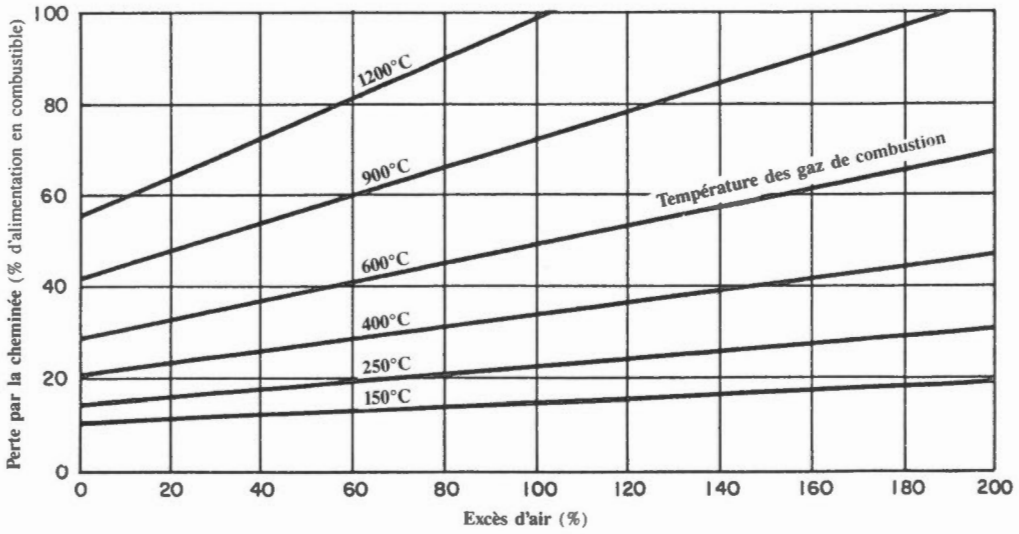
Il s'agit du pourcentage de la perte de chaleur à la cheminée. Mais des pertes additionnelles par les parois et la voûte du four peuvent réduire de 0 à 20% le pouvoir calorifique du combustible. Par conséquent, seulement 15% de la chaleur transmise se transforme en chaleur efficace. Dans ce cas, il y a bonne posibilité de gestion de l'énergie.

Pour certains fours ou sécheurs, le procédé exige une grande quantité d'excès d'air qui ne peut être réduite. La perte de chaleur dans les gaz de combustion est alors très élevée et ne peut être diminuée en réduisant la quantité d'excès d'air. Il est souvent possible dans ces cas d'installer un échangeur de chaleur qui préchauffe l'air d'admission avec les gaz de combustion s'échappant du four ou du sécheur. La perte de chaleur devient ainsi la chaleur transportée dans les gaz de combustion à la sortie de l'équipement de récupération de chaleur. La composition et la température des gaz de combustion doivent être mesurées en aval de cet équipement.

Un exemple de ceci est un sécheur à malt à combustion directe dont la température des gaz de combustion est limitée à 80°C pour éviter d'endommager le malt. L'excès d'air est de plusieurs mille pour cent, soit une quantité de beaucoup supérieure à la valeur requise pour une combustion complète. Dans un tel cas, un appareil d'Orsat n'est pas assez précis pour déterminer l'excès d'air. Lorsque ce dernier est supérieur à environ 200%, il faut mesurer la quantité d'air ou de gaz de combustion directement à l'aide d'un anénomètre à fil chaud ou d'un tube de Pitot. Il est quelquefois plus facile de mesurer l'air de combustion parce qu'il est plus propre et plus froid. Toutefois, comme toutes les infiltrations d'air après le point de mesure ne sont pas mesurées, il se glisse des imprécisions.



Perte dans les gaz de combustion — Gaz naturel
Figure 5



Perte dans les gaz de combustion — Mazout n° 2
Figure 6

Exemple: Un sécheur à malt brûle du gaz naturel à 470 m^3/h. Le mélange d'air de séchage et de gaz de combustion est mesuré à 550 000 kg/h et la température à la sortie du système de récupération de chaleur est de 21°C. La température de l'air d'admission est de 2°C et le pouvoir calorifique du gaz naturel est de 37,2 MJ/m^3. La perte de chaleur dans l'air et les gaz extraits se calcule comme suit:

Chaleur transmise totale = 470 $m^3/h \times 37{,}2\ MJ/m^3$

= 17 484 MJ/h

La perte de chaleur (kJ/h) dans le mélange d'air et de gaz se calcule de la façon suivante:

Perte de chaleur = $c \times DT \times w$

où c = chaleur spécifique du mélange [kJ/(kg·°C)]

DT = différence de température entre l'air d'admission et le mélange d'extrait (°C)

w = débit du mélange (kg/h)

Comme l'excès d'air est très élevé, la chaleur spécifique du mélange d'air et de gaz est supposée identique à l'air, soit 1,01 kJ/(kg·°C).

Chaleur du mélange par rapport aux conditions de l'air d'admission

= 1,01 kJ/(kg·°C) × (21 — 2)°C × 550 000 kg/h

= $10{,}55 \times 10^6$ kJ/h

= 10 550 MJ/h

$$\text{Pourcentage de la chaleur transmise} = \frac{10\ 550\ MJ/h}{17\ 484\ MJ/h} \times 100$$

$$= 60{,}3\,\%$$

Il ne faut pas oublier les pertes de chaleur additionnelles par les surfaces extérieures de l'équipement. Ainsi, moins de 40% de la chaleur du combustible sont utilisés pour le séchage du malt malgré l'installation d'un système de récupération de chaleur.

Pertes par rayonnement et convection

Les autres pertes de chaleur principales d'un four sont par rayonnement et convection à partir des surfaces extérieures de l'enceinte du four. On peut réduire ces pertes en améliorant l'isolation des surfaces extérieures et en s'assurant que les portes du four sont toujours fermées.

Bilan calorifique

La chaleur transmise par le combustible se transforme en chaleur utile au produit et pertes de chaleur dans l'environnement.

Chaleur transmise par le combustible = chaleur utile au produit + pertes de chaleur.

Un bilan calorifique est tout simplement la somme de tous les éléments des deux côtés de l'équation. Le total de chaque côté devrait être identique puisque l'énergie ne peut être créée ou détruite. Pour effectuer des calculs relatifs au four électrique, il faut convertir les unités électriques du gain d'énergie en unités thermiques à l'aide du facteur de conversion 1 kWh = 3,6 MJ.

La «chaleur transmise par le combustible» est habituellement l'énergie du combustible ou l'électricité fournie au four. Cependant il peut y avoir d'autres gains d'énergie. C'est le cas notamment d'un four à traitement thermique, où la température des produits chauffés peut être déjà supérieure à la température ambiante à cause du traitement précédent.

Exemple: Un four à traitement thermique chauffe 1800 kg/h d'acier de 40 à 900°C avec du gaz naturel à un débit de 125 m^3/h. Le pouvoir calorifique du gaz naturel est de 37,2 MJ/m^3. La température des gaz de combustion est de 1 100°C et il y a 15 pour cent d'excès d'air.

Chaleur totale transmise par le combustible = 125 $m^3/h \times 37{,}2\ MJ/m^3$

= 4 650 MJ/h

L'énergie contenue dans le bilan calorifique consiste en la chaleur transmise directement au produit et les pertes de chaleur.

La *chaleur utile* est la chaleur nécessaire, par exemple, pour élever la température de l'acier à 900°C. Selon la table 4, la chaleur spécifique de l'acier est de 0,5 kJ/(kg.°C). La chaleur utile est la masse multipliée par la chaleur spécifique multipliée par la hausse de température.

$$\text{Chaleur utile} = \frac{1\,800 \text{ kg/h} \times 0{,}5 \text{ kJ/(kg.°C)} \times (900 - 40) \text{ °C}}{1\,000 \text{ kJ/MJ}}$$

$$= 774 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Pourcentage de chaleur utile} = \frac{774}{4\,650} \times 100$$

$$= 16{,}6\%$$

Dans certains cas, une partie du pouvoir calorifique peut provenir du produit même. Dans un four de cuisson à électrodes de charbon par exemple, des quantités appréciables de vapeurs d'hydrocarbures sont générées à partir du brai utilisé comme agglomérant. Les vapeurs sont partiellement brûlées à l'intérieur du four et produisent ainsi la chaleur utile.

Les pertes de chaleur représentent la somme des pertes dans les gaz de combustion, les pertes par rayonnement et convection. Les pertes de chaleur dans les gaz de combustion sont la principale source de perte d'énergie. Les pertes par rayonnement et convection dans l'enceinte du four sont très difficiles à mesurer avec précision; elles sont habituellement calculées comme la différence entre la chaleur totale transmise et la somme de la chaleur utile au produit et les pertes dans les gaz de combustion.

Dans la figure 5, la perte dans les gaz de combustion à 1100°C et 15% d'excès d'air représente 62% de l'alimentation en combustible.

$$\text{Perte de chaleur totale dans les gaz de combustion} = 4\,650 \text{ MJ/h} \times \frac{62}{100}$$

$$= 2\,883 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Pertes par rayonnement et convection} = 4650 - (774 + 2\,883)$$

$$= 993 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Pertes par rayonnement et convection en \%} = \frac{993}{4\,650} \times 100$$

$$= 21{,}4\%$$

On peut maintenant préparer le *bilan calorifique* du four.

Chaleur transmise		Chaleur émise		
Gaz naturel	4 650 MJ/h	Chaleur utile au produit	774 MJ/h	16,6%
		Perte dans les gaz de combustion	2 883	62,0
		Pertes par rayonnement et convection	993	21,4
Totaux	4 650 MJ/h		4 650 MJ/h	100%

On en conclut que la plus grande perte de chaleur se produit dans les gaz de combustion. Le pourcentage d'excès d'air de 15% est relativement bas. Il est possible de récupérer une certaine quantité de chaleur dans les gaz de combustion en installant un équipement de récupération de chaleur.

Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur de la flamme du brûleur au produit peut s'effectuer par conduction, par convection ou par rayonnement et, dans la plupart des cas, par la combinaison des trois.

Conduction

Le transfert de chaleur au produit par conduction n'est important que lorsqu'il s'agit d'équipement à combustion indirecte dans lequel le produit est isolé de la flamme par la surface de l'échangeur de chaleur. Les fours à moufle et à tubes radiants (figures 7 et 8) sont des exemples de systèmes à combustion indirecte. On peut calculer la conduction de la chaleur à travers un solide.

$$Q = \frac{k \times A \times DT \times 3{,}6}{t}$$

où Q = chaleur de conduction (kJ/h)

k = conductivité thermique du solide [W/(m·°C)]

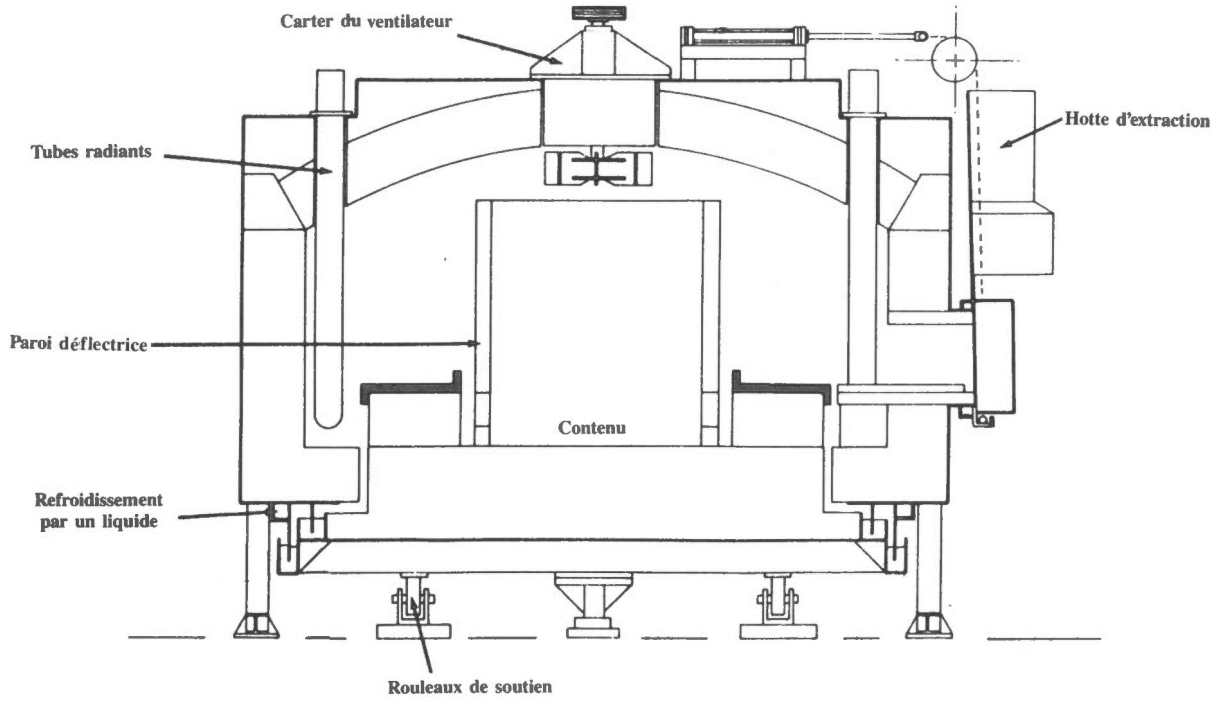
A = surface (m^2)

DT = différentiel moyen de température à travers le solide (°C)

t = épaisseur du solide (m)

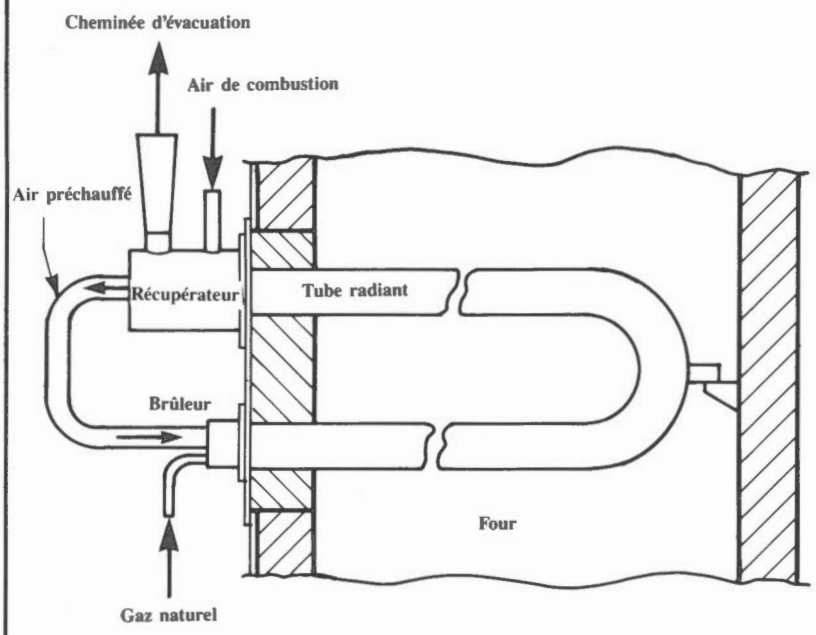
3,6 = facteur de conversion des watts en kilojoules par heure

On donne les valeurs k types pour différents matériaux à la table 2. L'équation démontre que le débit de transmission thermique augmente en proportion avec la surface et le différentiel de température à travers le four et qu'il est inversement proportionnel à l'épaisseur du matériau.

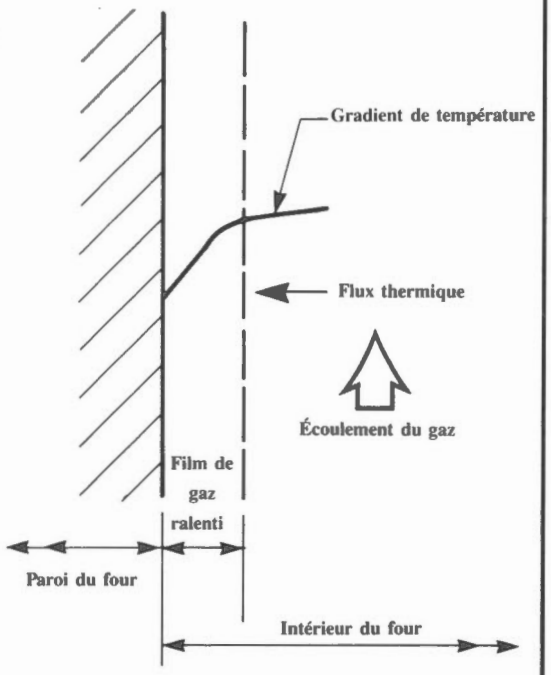


Four rotatif à gaz à tubes radiants
Figure 7

Gracieuseté de CAN-Eng



Récupérateur boulonné pour four à traitement thermique
Figure 8



Flux thermique par convection
Figure 9

Exemple: L'enceinte d'un four à moufle est à haute teneur en acier au nickel de 10 mm d'épaisseur et sa surface est de 55 m^2. La chaleur utile au produit, entièrement transmise par le mur, est de 1,9 GJ/h. Selon la table 2, la conductivité thermique de l'acier à forte teneur en nickel est de 31 W/(m·°C). On peut déterminer la chute de température à travers la paroi du moufle comme suit:

$$\text{Chaleur de conduction} = \frac{31\ \text{W/(m.°C)} \times 55\ \text{m}^2 \times \text{DT} \times 3{,}6}{0{,}01\ \text{m}}\ \text{kJ/h}$$

La chaleur de conduction est de 1,9 GJ/h ou $1{,}9 \times 10^6$ kJ/h.

Cette équation peut être transformée ainsi:

$$\text{DT} = \frac{1{,}9 \times 10^6 \times 0{,}01}{31 \times 55 \times 3{,}6}$$

$$= 3{,}1\ °\text{C}$$

La chute de température à travers l'enceinte est de 3,1°C au taux de transmission thermique spécifié.

Convection

Le transfert de chaleur par convection survient au point de contact d'un mur solide et d'un gaz ou d'un liquide. Le mélange s'effectue entre la couche stagnante du fluide au niveau du mur et le courant du fluide près de la couche stagnante (figure 9). Ce type de transfert de chaleur est plus important dans les fours dont les températures sont relativement basses, soit inférieures à 600°C. Des essais de taux de transfert de chaleur par convection ont démontré

que le taux est proportionnel à la surface et au différentiel de température entre le solide et le fluide. De plus, il augmente au fur et à mesure que la vitesse du fluide au-dessus de la surface de la paroi augmente mais de façon non proportionnelle. L'équation approximative suivante peut être utilisée pour les gaz:

$$Q = 23{,}46 \times A \times DT \times V^{0,78} \times d$$

où Q = chaleur transmise (kJ/h)

A = surface de transmission thermique (m^2)

DT = différentiel de température entre le solide et le fluide (°C)

V = vitesse du fluide (m/s)

d = densité du gaz (kg/m^3)

Exemple: Supposons un four de 3 mètres de long dont la coupe transversale est de 1 mètre sur 1 mètre. Les gaz de combustion traversent le four à une vitesse moyenne de 0,5 m/s et la température des gaz est de 500°C. Le différentiel de température entre les parois du four et les gaz de combustion est d'environ 150°C. Pour simplifier, on peut utiliser la densité relative de l'air pour les gaz de combustion. Selon des références standard, la densité de l'air à 500°C est de 0,458 kg/m^3. Le débit de transmission de chaleur moyen par convection vers les parois, le plancher et la voûte peut être calculé comme suit:

Surface du four balayé par les gaz de combustion = (1 + 1 + 1 + 1) m × 3 m

$$= 12 \text{ m}^2$$

$$Q = 23{,}46 \times 12 \text{ m}^2 \times 150°C \times (0{,}5 \text{m/s})^{0,78} \times 0{,}458 \text{ kg/m}^3$$

$$= 11\,263 \text{ kJ/h}$$

Rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement devient significatif lorsque les températures du four s'élèvent au-dessus de 600°C. Tout corps chaud émet des radiations thermiques pouvant être reçues par un autre corps solide se trouvant à la portée du rayonnement. Dans un four électrique, les parois chauffées par électrodes émettent des radiations au contenu du four. A son tour, le contenu du four émet des radiations vers les parois.

La quantité de chaleur émise par un corps solide est proportionnelle à la quatrième puissance de sa température absolue et est directement proportionnelle à son émissivité. La température absolue est le nombre de degrés au-dessus du zéro absolu mesuré en degrés Kelvin (K). Pour obtenir des degrés Kelvin, on additionne 273° aux degrés Celsius.

L'émissivité est la mesure de chaleur émise par un objet comparée à celle émise par un «corps noir» de dimensions similaires, à la même température. La valeur maximale d'émissivité est celle d'un «corps noir», soit 1. Les valeurs d'émissivité types des parois d'un four et de l'acier oxydé sont de 0,8 à 0,9. Puisque le corps chaud (paroi du four) et le corps froid (contenu du four) émettent tous deux des radiations, la quantité totale nette de chaleur reçue par le contenu est égale à la différence entre les émissions de chaleur des deux corps. L'équation est la suivante:

$$Q = K \times F \times \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

où Q = chaleur émise (kJ/h)

K = coefficient du «corps noir» (20,6)

F = facteur de rayonnement de l'ensemble selon l'émissivité et les surfaces de l'émissivité et les surfaces des parois et du contenu du four.

T_1, T_2 = températures absolues respectives des corps chaud et froid respectivement (K)

$$F = \frac{A_1}{\frac{1}{e_1} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{1}{e_2} - 1\right)}$$

où A_1 = surface du contenu du four exposé aux parois (m^2)

A_2 = surface des parois du four (m^2)

e_1 = émissivité du contenu du four

e_2 = émissivité des parois du four

Les valeurs d'émissivité sont données à la table 3.

Exemple: Un four dont la coupe transversale est de 1 mètre sur 1 mètre chauffe des billettes en acier au carbone de 100 mm sur 100 mm. La température de la paroi du four est de 1000°C. Le plancher du four n'émet pas de chaleur. Selon la table 3, l'émissivité d'une paroi de four en briques réfractaires est de 0,75 et l'émissivité de l'acier au carbone oxydé est de 0,80. La chaleur transmise aux billettes par mètre de longueur lorsque l'acier est chauffé à 650° se calcule comme suit:

$$A_1 = (0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}1) \times 1$$

$$= 0{,}3 \text{ m}^2$$

$$A_2 = (1 + 1 + 1) \times 1$$

$$= 3 \text{ m}^2$$

$$F = \frac{0{,}3}{\frac{1}{0{,}8} + \left(\frac{0{,}3}{3}\right)\left(\frac{1}{0{,}75} - 1\right)}$$

$$= 0{,}234$$

$$T_1 = 1\,000°\text{C} + 273°$$

$$= 1\,273 \text{ K}$$

$$T_2 = 650°\text{C} + 273°$$

$$= 923 \text{ K}$$

$$\text{Chaleur émise / mètre de longueur} = 20{,}6 \times 0{,}234 \times \left[\left(\frac{1\,273}{100}\right)^4 - \left(\frac{923}{100}\right)^4\right]$$

$$= 91\,604 \text{ kJ/h}$$

Les gaz chauds émettent également de la chaleur au contenu du four. Ce type de transmission de chaleur ne se produit pas de la même façon que le rayonnement par un corps solide. Le rayonnement d'une flamme éclairante est plus élevé que celui d'une flamme transparente ou des gaz chauds.

Récupération de la chaleur

Échangeurs de chaleur

Comme la plupart des pertes de chaleur d'un four à combustible sont dans les gaz de combustion, la récupération de cette chaleur peut entraîner de grandes économies d'énergie. La méthode courante pour ce faire, est l'installation d'un échangeur de chaleur à la sortie du four. Un échangeur de chaleur peut être utilisé pour transmettre la chaleur des gaz chauds de combustion à l'air de combustion d'admission ou encore pour chauffer l'eau utilisée ailleurs dans l'usine. Le débit de transmission de chaleur est proportionnel à la surface de l'échangeur de chaleur et au différentiel de température entre les gaz de combustion et l'air de combustion.

$$Q = k \times A \times LMTD \times 3{,}6$$

où Q = débit de transmission de chaleur (kJ/h)

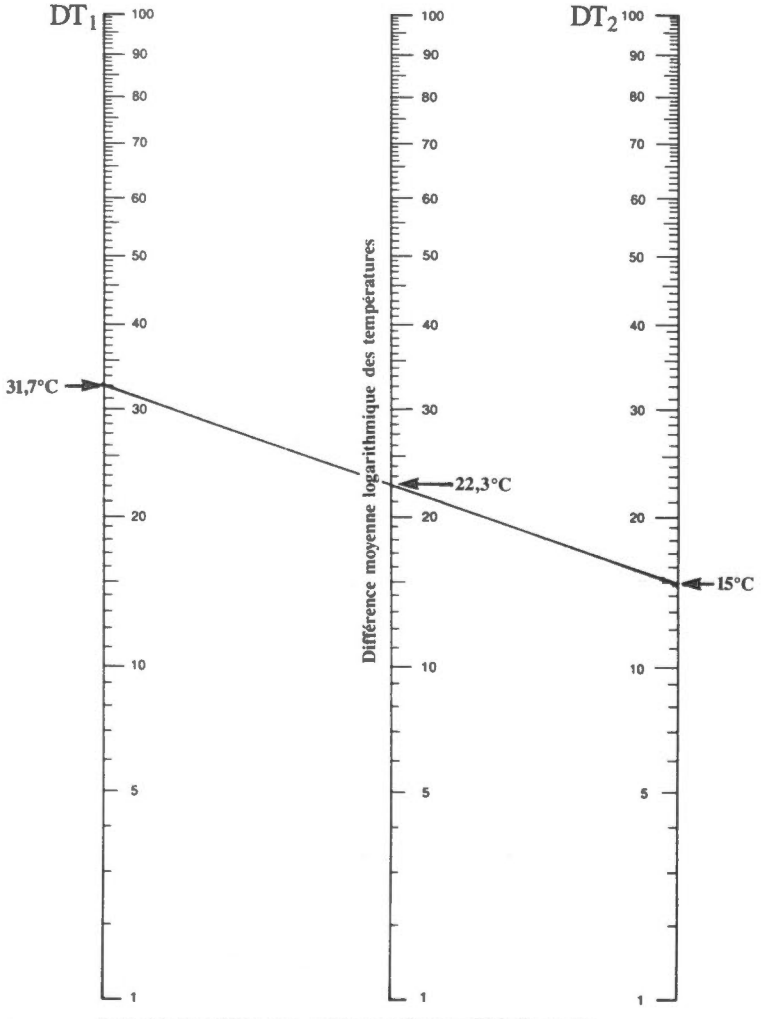
k = coefficient de transmission de chaleur de l'échangeur de chaleur [W/(m^2·°C)]

A = surface de l'échangeur de chaleur (m^2)

LMTD = différence moyenne logarithmique des températures (°C)

3,6 = facteur de conversion des watts en kilojoules par heure

On peut calculer la différence moyenne logarithmique des températures (LMTD) ou la repérer dans la figure 10.



Se réferer à l'exemple page 19
DT_1 = 31,7°C
DT_2 = 15°C
Dessiner la ligne tel qu'indiqué.
LMTD est obtenu à l'intersection de l'échelle centrale.
LMTD = 22,3°C

Abaque pour calculer la différence moyenne logarithmique des températures pour procédés de chauffage et de refroidissement
Figure 10

$$LMTD = \frac{DT_1 - DT_2}{\ln\left(\frac{DT_1}{DT_2}\right)}$$

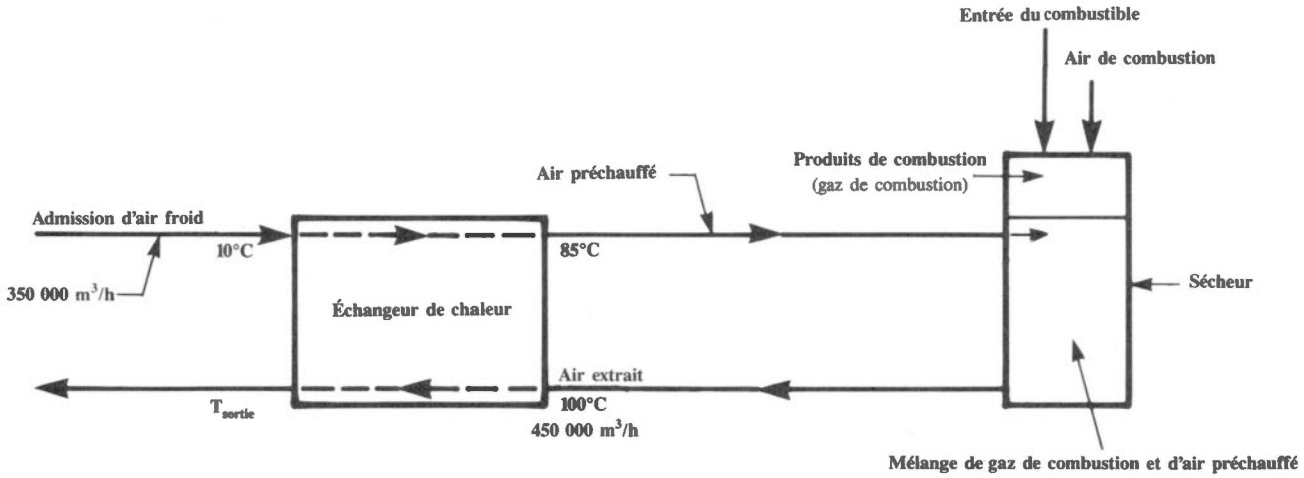
où LMTD = différence moyenne logarithmique des températures (°C)

DT_1 = plus grande différence de température entre les gaz de combustion et l'air ou l'eau chauffé (°C)

DT_2 = plus petite différence de température entre les gaz de combustion et l'air ou l'eau chauffé (°C)

«ln» est le logarithme népérien.

Si l'on utilise un échangeur de chaleur pour chauffer l'eau avec la chaleur des gaz de combustion, il faut tenir compte de la différence de température entre l'eau chauffée et le gaz chaud admis dans l'échangeur. Il est impossible de chauffer le fluide à une température au-dessus de la température des gaz chauds d'admission, indifféremment des débits relatifs du fluide et des gaz chauds. De petits différentiels de température nécessitent de grandes surfaces d'échange de chaleur. L'exemple suivant démontre ce principe.



Échangeur de chaleur à air de revenu
Figure 11

Exemple: On doit ajouter un échangeur de chaleur à un sécheur qui évacue 450 000 m^3/h d'air humide à 100°C. L'air extrait est utilisé pour chauffer 350 000 m^3/h d'air d'admission à partir d'une température ambiante de 10 à 85°C soit à une valeur inférieure à 15°C de l'air chaud extrait (figure 11). D'après la construction de l'échangeur de chaleur, le coefficient de transmission de chaleur confirmé par le fabricant est de 28 $W/(m^2.°C)$. La chaleur dissipée par l'air extrait est égale à la chaleur récupérée par l'air d'admission puisqu'il n'y a pas de perte de chaleur importante dans ce type d'échangeur de chaleur. La masse volumique de l'air à des conditions standard est de 1,204 kg/m^3 et la chaleur spécifique est del,006 kJ/(kg.°C). On peut calculer la surface requise de l'échangeur de chaleur comme suit:

Gain de chaleur de l'air froid (Q) = écoulement volumétrique × masse volumique × chaleur spécifique × hausse de température

= 350 000 m^3/h × 1,204 kg/m^3 × 1,006 kJ(kg.°C) × (85 — 10)°C

= 31,79 × 10^6 kJ/h

Perte de chaleur de l'air extrait = écoulement volumétrique × masse volumique × chaleur spécifique × chute de température

= 450 000 × 1,204 × 1,006 × (100°C — T_{sortie}) kJ/h

Gain de chaleur de l'air froid = perte de chaleur de l'air extrait

Ceci peut être exprimé comme suit:

$$31{,}79 \times 10^6 = 450\,000 \times 1{,}204 \times 1{,}006 \times (100°C - T_{sortie})\ kJ/h$$

L'équation peut se transformer ainsi:

$$(100°C - T_{sortie}) = \frac{31{,}79 \times 10^6}{450\,000 \times 1{,}204 \times 1{,}006}$$

$$= 58{,}3°C$$

Température d'extraction de l'échangeur de chaleur:

$$T_{sortie} = 100°C - 58{,}3°C = 41{,}7°C$$

Différentiel maximal de température: $DT_1 = 41{,}7°C - 10°C$

$$= 31{,}7°C$$

Différentiel minimal de température: $DT_2 = 100°C - 85°C = 15°C$

Différence moyenne logarithmique des températures:

$$LMTD = \frac{31{,}7°C - 15°C}{\ln\left(\frac{31{,}7°C}{15°C}\right)}$$

$$= 22{,}3°C$$

Gain de chaleur de l'air froid: $Q = 31{,}79 \times 10^6\ kJ/h = 28\ W/(m^2 \cdot °C) \times A \times 22{,}3°C \times 3{,}6\ kJ/h$

$$\text{Surface, } A = \frac{31{,}79 \times 10^6}{28 \times 22{,}3 \times 3{,}6}$$

$$= 14\,142\ m^2$$

Si l'air froid est chauffé jusqu'à 5°C de l'air humide extrait au lieu de 15°C, les dimensions de l'échangeur de chaleur augmentent de façon considérable:

Température de l'air chauffé = 100°C — 5°C

$$= 95°C$$

Gain de chaleur de l'air froid = $350\,000\ m^3/h \times 1{,}204\ kg/m^3 \times 1{,}006\ kJ/(kg \cdot °C) \times (95 - 10)°C$

$$= 36{,}03 \times 10^6\ kJ/h$$

$$(100°C - T_{sortie}) = \frac{36{,}03 \times 10^6}{450\,000 \times 1{,}204 \times 1{,}006}$$

$$= 66{,}1°C$$

$$T_{sortie} = 100°C - 66{,}1°C$$

$$= 33{,}9°C$$

$$DT_1 = 33{,}9°C - 10°C$$

$$= 23{,}9°C$$

$$DT_2 = 100°C - 95°C$$

$$= 5°C$$

$$LMTD = \frac{23{,}9°C - 5°C}{\ln\left(\frac{23{,}9°C}{5°C}\right)}$$

$$= 12{,}1°C$$

$$\text{Surface, } A = \frac{36{,}03 \times 10^6}{28 \times 12{,}1 \times 3{,}6}$$

$$= 29\ 541\ m^2$$

Il est à noter que lorsque le différentiel de température est réduit à 5°C, la surface de l'échangeur de chaleur augmente du double ou à peu près. Lorsqu'on augmente la température nominale de l'air d'admission de (85°C — 10°C) = 75°C à (95°C — 10°C) = 85°, on obtient une augmentation dans la récupération de chaleur de

$$\frac{(85°C - 75°C)}{75°C} \times 100 = 13\%$$

Il importe d'effectuer une analyse détaillée des coûts d'immobilisation et des économies en combustible pour les différentes dimensions d'échangeurs de chaleur.

Récupérateurs

Les échangeurs de chaleur qui transmettent la chaleur des gaz chauds de combustion à l'air de combustion sont quelquefois appelés récupérateurs. Les gaz chauds circulent à l'intérieur de tubes disposés en faisceaux. L'air de combustion est projeté sur l'extérieur de ces tubes à l'aide d'une batterie de déflecteurs.

Les régénérateurs dotés de deux ensembles distincts de briques réfractaires sont une autre forme d'échangeurs de chaleur gaz-air. Le premier ensemble de briques est chauffé par les gaz chauds de combustion et refroidi par l'air de combustion. À intervalles réguliers, des registres dévient automatiquement les gaz chauds et l'air froid d'un ensemble de briques à l'autre. Par conséquent, un ensemble de briques est chauffé par les gaz chauds alors que l'autre ensemble chauffe l'air de combustion. Grâce à ces régénérateurs, du gaz à température très élevée peut être manipulé sans devoir utiliser de la tuyauterie à parois minces en acier inoxydable ou autres matériaux ignifuges à coût élevé.

Économiseurs

Les économiseurs sont des échangeurs de chaleur qui utilisent les gaz de combustion pour chauffer l'eau. Les économiseurs s'avèrent un excellent choix lorsque de l'eau chaude est nécessaire pendant le fonctionnement du four. Si l'utilisation de l'eau chaude et le fonctionnement du four ne sont pas simultanés, il peut être commode d'installer un réservoir de stockage d'eau chaude isolé pour niveler l'effet des variations de l'approvisionnement et de la demande en eau chaude.

L'eau chauffée circule à l'intérieur de tubes métalliques disposés en faisceaux. Les gaz chauds de combustion passent à l'extérieur de ces tubes qui sont habituellement à ailettes pour faciliter la transmission de la chaleur du gaz à l'eau. La température du métal des tubes est très près de celle de l'eau. Les économiseurs peuvent ainsi extraire de la chaleur des gaz à très haute température sans nécessiter un tube d'alliage d'acier à coût élevé. Il faut s'assurer que le débit d'eau soit assez élevé pour éviter l'ébullition de l'eau à l'intérieur des tubes. Lorsqu'il y a ébullition, les tubes surchauffent et pourraient être endommagés.

Il y a contre-courant dans l'économiseur pour que le gaz quittant l'économiseur puisse être refroidi à la température la plus basse possible par l'eau froide admise dans l'économiseur. Cette méthode assure l'utilisation la plus efficace de la chaleur des gaz de combustion.

Chaudières de récupération de chaleur

Les chaudières de récupération de chaleur utilisent les gaz de combustion pour produire de la vapeur. Dans la plupart des cas, on installe un collecteur de vapeur commun dans lequel sont raccordées les chaudières de récupération et les chaudières à combustible. Ces dernières fournissent ainsi la différence entre la demande de vapeur et la vapeur fournie par la chaudière de récupération de chaleur.

On combine souvent des économiseurs et des chaudières de récupération pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière. Les gaz de combustion circulent alors à travers la chaudière avant d'atteindre l'économiseur.

Régulation de la température du produit

Le contrôle de la température du produit est important dans les fours à traitement thermique et à applications similaires. Les hautes températures peuvent entraîner l'oxydation ou la carbonisation du contenu du four alors que des températures trop basses entraînent un durcissement ou une recuisson inappropriée. L'emplacement du point de mesure de la température est aussi important; l'élément de mesure ne doit pas être exposé au rayonnement de la flamme ni être trop rapproché de la paroi du four. On varie habituellement le taux auquel la chaleur est introduite dans le four pour maintenir la température des gaz du four à une valeur appropriée. Dans les fours de grandes dimensions, il est important de maintenir une température uniforme. Dans certains fours continus, on retrouve des zones de chauffage multiples, chacune ayant une batterie de brûleurs et un régulateur de température. Le rapport combustible-air de combustion doit être surveillé attentivement pour maintenir l'excès d'air à un faible niveau.

Mesures de sécurité

Certaines mesures de sécurité doivent être observées lors de la mise en oeuvre des possibilités de gestion de l'énergie. L'ajout d'un échangeur de chaleur pour la récupération de la chaleur des gaz de combustion dans le but de préchauffer l'air de combustion signifie que la température du réseau de canalisations d'air au brûleur peut s'élever à 400°C. La température maximale à laquelle devrait être exposé le personnel d'exploitation est de 50°C. En conséquence, le réseau de canalisations d'air doit être isolé pour protéger le personnel. Comme cette mesure entraîne également des économies de chaleur, il serait même préférable d'étudier la possibilité d'isoler toutes les canalisations d'air chaud.

Possibilités de gestion de l'énergie

La première étape dans l'élaboration d'un programme de gestion de l'énergie est la prise de connaissance des possibilités d'économie d'énergie.

Il est intéressant de comparer le débit calorifique réel et l'énergie appliquée au produit de manière utile. On peut obtenir le débit calorifique du mazout ou du gaz à l'aide d'un appareil qui mesure la consommation de combustible. Si un appareil de ce type n'est pas déjà installé, on peut utiliser un compteur volumétrique temporaire. On doit s'assurer que l'appareil de mesure choisi assure une assez grande précision. Il devrait être possible de mesurer avec une précision de moins de 1%.

Le débit calorifique d'un four électrique doit être mesuré par un wattmètre qui exige une mesure de tension et de courant de deux des phases d'une alimentation triphasée. Si le chauffage est assuré par une résistance et qu'il n'y a pas de variation de tension, on peut utiliser une pince ampèremétrique qui donne la lecture instantanée du débit calorifique.

Exemple: Un four électrique à résistance fonctionne sous 550V et le courant moyen par phase de son alimentation triphasée est de 200A. Si les phases sont équilibrées de manière raisonnable, l'alimentation électrique peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$\text{Alimentation} = \frac{1{,}732 \times \text{Volts} \times \text{Ampères} \times \text{facteur de puissance}}{1\,000 \text{ W/kW}}$$

Puisqu'il s'agit d'une charge résistive, le facteur de puissance est de 1,0.

$$\text{Alimentation} = \frac{1{,}732 \times 550 \times 200 \times 1{,}0}{1\,000}$$

$$= 190{,}5 \text{ kW}$$

Comme un kW = 3,6 MJ/h, le débit calorifique est de 190,5 × 3,6 = 685,8 MJ/h

Il faut prendre en considération les coûts de puissance électrique demandée lorsqu'on exploite un four électrique. Les utilisateurs de grandes quantités d'électricité paient pour la charge de pointe, mesurée en kilowatts pour chaque mois en plus de la consommation électrique mesurée en kilowattheures. Certains distributeurs d'électricité mesurent la charge de pointe des 12 mois précédents pour calculer le coût de la puissance demandée. Ces primes peuvent être réduites en mettant automatiquement hors tension (délestage) toutes les charges électriques inutiles lorsqu'approche une nouvelle pointe. On peut également diminuer la charge de certains fours pour réduire la puissance maximale demandée. Les régulateurs de puissance entraînent généralement d'importantes économies en électricité.

Pour calculer l'énergie appliquée utilement au produit, il faut connaître le poids du produit traité par unité de temps. Si le four chauffe ou fait fondre des métaux, on doit connaître la chaleur spécifique et la chaleur nécessaire à la fusion. Les valeurs types sont données à la table 4.

Exemple: Un four fond de l'aluminium à un débit de 4 000 kg/h. Selon la table 4, la chaleur de fusion est de 1 095 kJ/kg. On peut déterminer la chaleur utile appliquée au produit de la manière suivante:

Chaleur transmise au produit = 4 000 kg/h × 1 095 kJ/kg

= 4,38 × 10^6 kJ/h

= 4 380 MJ/h

Pour calculer l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau ou des solvants, on doit connaître l'indice d'humidité initial et final ainsi que la quantité évaporée. Les valeurs types de chaleur de vaporisation sont données à la table 5. Il est à noter que certains solvants sont combustibles et fournissent de l'énergie au sécheur.

Exemple: Un sécheur de bois réduit l'humidité de 60 à 20%. Le séchage de chaque lot de trois tonnes prend 10 heures. La chaleur utile appliquée au produit se détermine comme suit:

$$\text{Humidité du lot} = 3 \text{ tonnes} \times \frac{60}{100}$$

= 1,8 tonne d'eau

Bois séché au four = 3 tonnes — 1,8 tonne

= 1,2 tonne

Le produit final contient 1,2 tonne de bois séché au four comprenant 20% d'humidité et 80% de bois sec.

$$\text{Poids total du bois à 20\% d'humidité} = \frac{1{,}2 \text{ tonne}}{0{,}8}$$

= 1,5 tonne

Humidité dans le produit final = 1,5 — 1,2 tonne

= 0,3 tonne

Quantité totale d'humidité évaporée = 1,8 — 0,3 tonne

= 1,5 tonne

Selon la table 5, la chaleur d'évaporation de l'eau est de 2 450 kJ/kg

Chaleur requise pour évaporer l'humidité du produit = 1,5 t × 1 000 kg/t × 2 450 kJ/kg

$= 3{,}675 \times 10^6$ kJ

ou 3,675 GJ

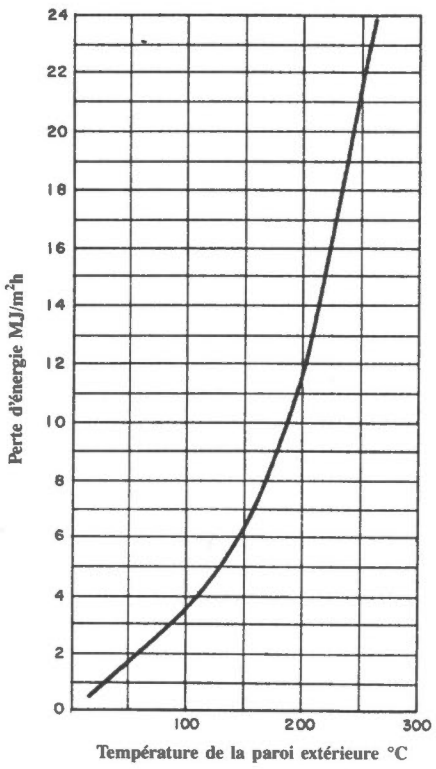
Débit calorifique moyen pour 10 heures $= \frac{3{,}675}{10}$

= 0,3675 GJ/h

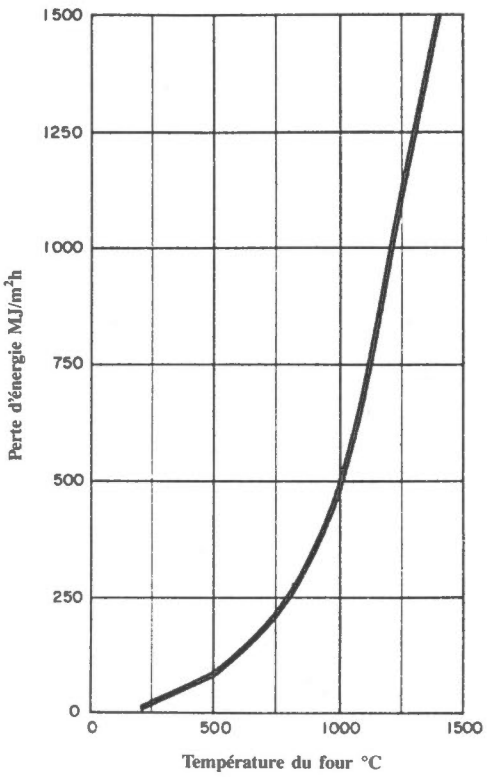
ou = 367,5 MJ/h

Le calcul des pertes de chaleur dans les gaz de combustion a été traité dans la section sur le procédé de combustion. Il s'agit d'une perte importante dans les fours à combustible. Dans les fours électriques, c'est la chaleur perdue à travers les parois et les canalisations du four qui constitue la perte la plus importante. Les pertes de chaleur à travers l'enceinte du four peuvent être calculées par différence, quoiqu'il soit utile d'en évaluer directement la quantité pour pouvoir déterminer les possibilités d'économie d'énergie en isolant davantage.

La perte de chaleur de l'enceinte du four augmente à mesure que s'élève la température de la surface extérieure en contact avec l'atmosphère. La figure 12 illustre la courbe de perte de chaleur par mètre carré en fonction de la température de surface. La courbe s'applique lorsque le four est installé à l'intérieur et que les températures ambiantes sont normales.



Perte d'énergie par les parois du four en fonction de la température des parois extérieures
Figure 12



Perte d'énergie par rayonnement à travers les ouvertures en fonction de la température du four
Figure 13

Les ouvertures dans l'enceinte du four constituent une source importante de perte de chaleur. On peut évaluer les pertes de chaleur par rayonnement à travers les ouvertures (figure 13). La courbe ne comprend pas les pertes occasionnées par les infiltrations d'air ni les fuites de gaz. La régulation de la pression du four est la façon la plus efficace de réduire ces pertes.

Exemple: Un four a une ouverture de 2 m de long sur 150 mm de haut et fonctionne à 1 200°C. Selon la figure 13, la chaleur émise est de 910 MJ/(m^2·h). On peut calculer la chaleur émise par l'ouverture de la manière suivante:

$$\text{Chaleur émise par l'ouverture} = 2\ \text{m} \times 0{,}15 \times 910\ \text{MJ/(m}^2\cdot\text{h)}$$

$$= 273\ \text{MJ/h}$$

Le four fonctionne 2 000 heures par année et le coût du combustible est de 5$/GJ.

$$\text{Perte de chaleur annuelle} = \frac{273\ \text{MJ/h} \times 2\,000\ \text{h/an} \times 5\$/\text{GJ}}{1\,000\ \text{MJ/GJ}}$$

$$= 2\,730\$$$

Analyse énergétique

Plusieurs possibilités de gestion de l'énergie relatives à l'exploitation des fours, des sécheurs et des fours de cuisson peuvent être identifiées au cours d'une analyse au passage. Il est souvent très utile de mener cette étude avec la collaboration d'une personne qui n'est pas normalement associée à l'exploitation de l'usine. Un nouveau regard permettra de faire ressortir des éléments qui avaient toujours été négligés dans le passé. Parmi les sources de gaspillage les plus souvent relevées au cours d'une analyse au passage, mentionnons des portes de four ouvertes ou manquantes, la détérioration des isolants et un équipement sous-utilisé ou surchargé.

Certaines sources de gaspillage relevées au cours d'une analyse au passage ne sont pas aussi faciles à analyser que celles que nous venons de mentionner. On peut avoir noté par exemple, que la température des gaz de combustion qui s'échappent d'un four est très élevée. Cependant, les mesures à prendre pour récupérer cette énergie ne sont pas toujours évidentes et doivent être analysées de manière détaillée. On doit se poser les questions suivantes:

- Quelle quantité d'énergie est disponible dans l'écoulement du gaz?
- Cette énergie peut-elle être utilisée?
- Quelle est la mise de fonds nécessaire pour l'achat et l'installation de l'équipement de récupération de cette énergie?
- Quelles sont les économies en énergie et est-ce que la réduction des coûts permettra l'amortissement des frais d'installation de cet équipement?

Il faut procéder à une analyse de diagnostic pour répondre à ces questions et déterminer avec précision s'il est financièrement opportun d'exploiter cette possibilité.

APPAREILLAGE

Fours

La fonction d'un four de fabrication est d'appliquer une chaleur réglée à son contenu. Le four peut être utilisé pour le chauffage des métaux à une température précise pour le traitement thermique ou la fusion. Il existe une vaste gamme de dimensions et de types de fours dont quelques-uns sont décrits dans la présente section.

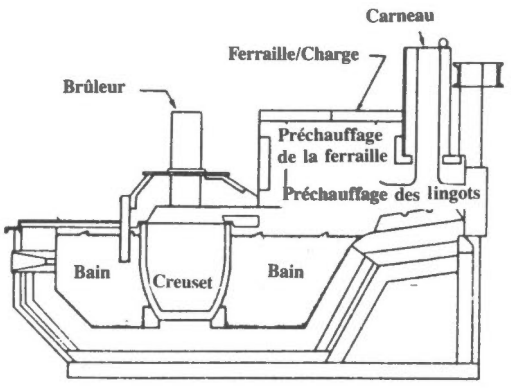
Les fours sont de type à charges ou continu. Ils génèrent de la chaleur en brûlant du combustible et peuvent être à combustion directe ou indirecte. Les fours peuvent également être chauffés par des résistances électriques.

Fours à charges

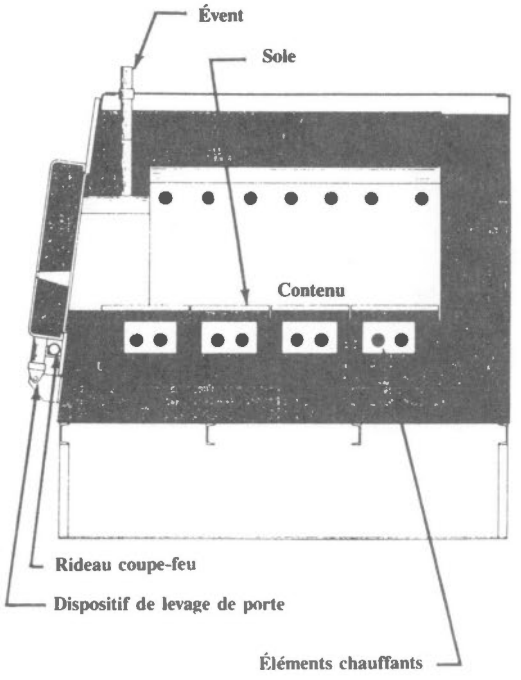
Les fours à charges traitent le produit en lots, ce qui entraîne l'ouverture et la fermeture des portes du four au début et à la fin de chaque cycle. Comme il s'agit d'une source importante de perte d'énergie, les périodes de chargement et de déchargement doivent être réduites. Il importe, en outre, de charger le four à sa pleine capacité pour minimiser la perte d'énergie par unité de produit. Des exemples de fours de ce type sont illustrés dans les figures 14 et 15.

Dans la figure 14, un four de fusion à creusets traite les métaux non ferreux. Des détritus métalliques non-ferreux sont chargés dans le four et la fonte liquide est coulée au besoin.

Dans la figure 15, un four électrique à haute température est utilisé pour le traitement thermique de l'acier.



Four de fusion à creusets
Figure 14

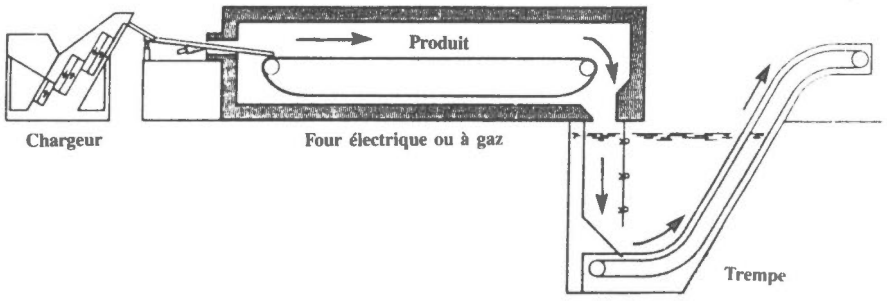


Four électrique à moufle à haute température
Figure 15

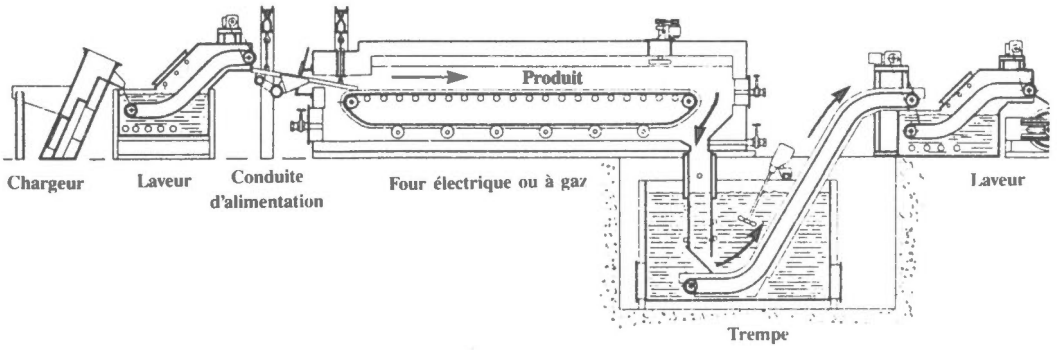
Gracieuseté de CAN-Eng

Fours continus

Dans les fours continus, le produit est traité continuellement et se déplace dans les zones de chauffage sur une chaîne ou un convoyeur. Comme les portes de chargement et de déchargement sont ouvertes pendant toute la période ou une partie de la période de service, il y a une perte importante de chaleur par ces ouvertures. Les fours continus peuvent également perdre une quantité importante de chaleur en raison du chauffage simultané de la bande transporteuse et du produit à la température désirée. Si le convoyeur se refroidit à l'extérieur du four avant sa nouvelle entrée dans la zone de chargement, l'énergie requise pour chauffer le convoyeur n'est pas utilisée de façon efficace. Aussi, il est préférable que le convoyeur demeure à l'intérieur de la zone de chauffage du four. Des exemples de ce type de four sont illustrés dans les figures 16 et 17.



Four atmosphérique avec convoyeur Gracieuseté de CAN-Eng
Figure 16



Four à tremper continu avec convoyeur Gracieuseté de CAN-Eng
Figure 17

Fours à combustion directe

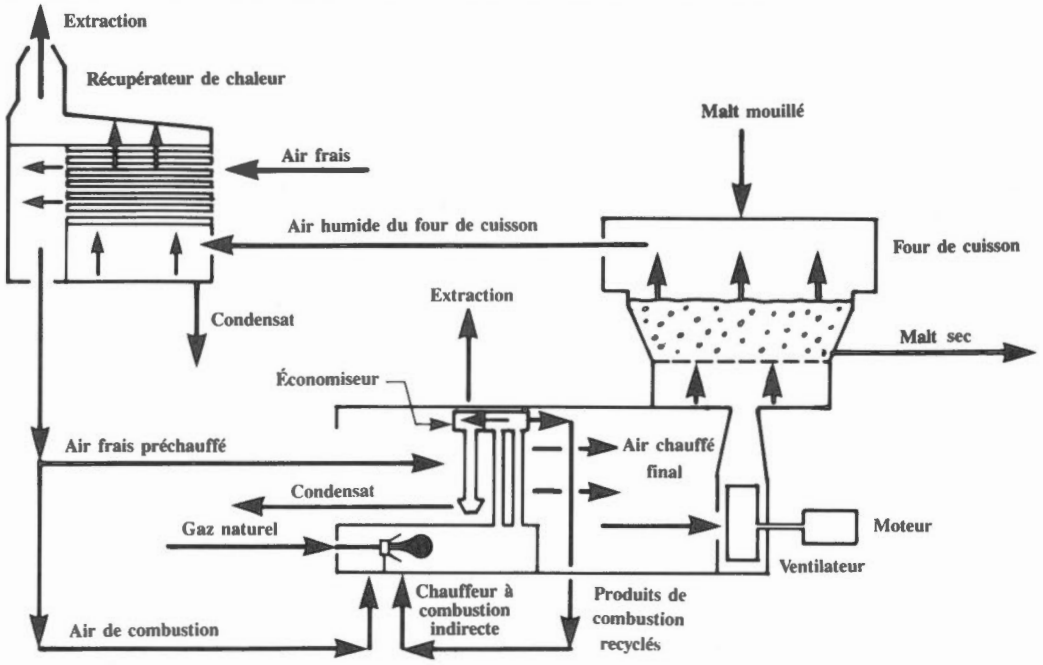
Dans ce type de four, les produits de combustion sont en contact direct avec le produit chauffé. La transmission de chaleur de la flamme au produit est plus efficace que dans le four à combustion indirecte où les gaz de combustion ne sont pas en contact direct avec le produit. Le taux de transmission de chaleur plus élevé produit par les fours à combustion directe peut provoquer une surchauffe de la surface du produit à moins de régler la température du four de manière appropriée.

Fours à combustion indirecte

Dans le four à combustion indirecte, les produits de combustion ne sont pas en contact direct avec le produit chauffé (figure 7). La chaleur est transmise par le biais d'un échangeur de chaleur.

Ce type de four peut assurer une atmosphère réglée pour l'oxydation et la réduction par une atmosphère artificielle indépendante du procédé de combustion. Puisque la transmission de chaleur de la flamme au produit n'est pas aussi efficace que dans un four à combustion directe, on peut s'attendre à une température de gaz de combustion plus élevée et, par conséquent, à de plus grandes pertes de chaleur, à moins d'utiliser un récupérateur de chaleur.

Quelques facteurs caractéristiques des fours à combustion indirecte affectent les calculs du bilan thermique. Si l'on maintient une atmosphère réglée dans le four, le débit et la puissance calorifiques du gaz qui est introduit dans le four et qui s'y échappe doivent être pris en compte dans le calcul du bilan thermique. Si la préparation de l'atmosphère nécessite de la chaleur, l'énergie requise dans le générateur de gaz doit être calculée comme faisant partie de la chaleur totale transmise au four. L'énergie électrique utilisée pour le refroidissement ou d'autres fonctions du générateur de gaz doit également être calculée.



Sécheur à malt
Figure 18

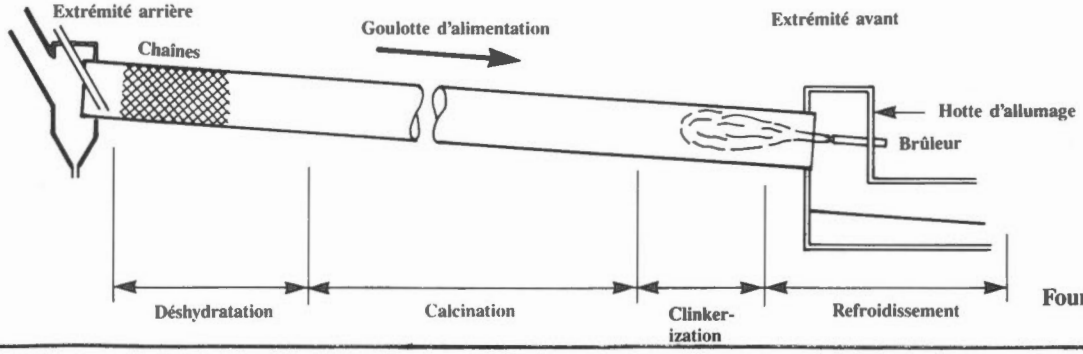
Sécheurs

Les sécheurs utilisent la chaleur pour évaporer l'eau ou les solvants de matériaux tels que le bois de construction, les grains, la céramique, la peinture et les électrodes de charbon. Les mêmes principes de gestion de l'énergie déjà mentionnés pour les fours s'appliquent aux sécheurs et ceux-ci utilisent le même genre d'équipements. La différence majeure réside dans la température de service qui est généralement beaucoup plus basse que celle des fourneaux et ceci pour éviter d'endommager le produit. Par conséquent, les générateurs à combustion directe doivent fonctionner avec un pourcentage élevé d'excès d'air qui ne peut être réduit dans un but d'économie d'énergie. Les sécheurs à combustion indirecte peuvent fonctionner à un pourcentage normal d'excès d'air à l'intérieur de la chambre de combustion. Dans les générateurs à combustion directe et indirecte, l'air extrait comporte une grande quantité de chaleur sous allure d'eau ou de solvants évaporés. Il faut souvent incinérer le solvant avant de l'évacuer à l'atmosphère en brûlant du combustible supplémentaire et en élevant la température à environ 900°C. On peut récupérer la chaleur à l'aide d'un échangeur de chaleur qui préchauffe l'air d'admission pour le séchage dans les sécheurs à combustion indirecte ou l'air de combustion dans les sécheurs à combustion directe. Un sécheur à malt à combustion indirecte de brasserie est illustré dans la figure 18.

Fours de cuisson

Du point de vue de la gestion de l'énergie, il n'y pas de différence fondamentale entre les fours et les fours de cuisson. Les industries de la céramique et des briques utilisent des fours de cuisson fixes alors que les fours de cuisson rotatifs sont utilisés dans l'industrie du ciment et des pâtes et papiers (figure 19).

Certains fours de cuisson rotatifs brûlent du charbon pulvérisé ou des combustibles provenant de rebuts. La grande quantité de chaleur transmise aux fours rotatifs offre des possibilités d'installation d'échangeurs de chaleur pour la récupération de la chaleur des gaz de combustion.

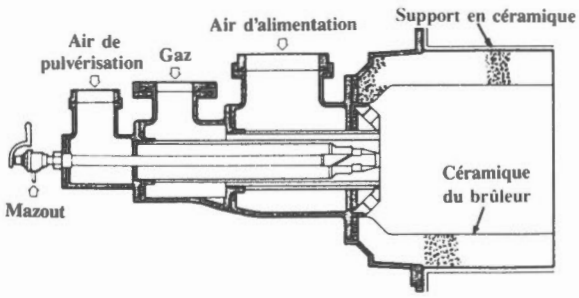


Four de cuisson rotatif
Figure 19

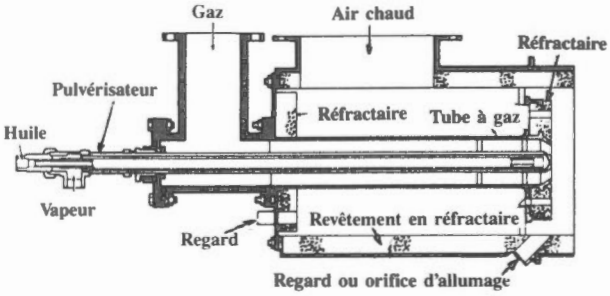
Brûleurs

Les brûleurs sont conçus pour bien mélanger le combustible et l'air de combustion et, lorsque les combustibles sont liquides, les pulvériser pour l'allumage. Un bon mélange de combustible et d'air s'obtient en créant de la turbulence à la sortie du brûleur. Il faut pour cela produire une chute de pression entre la gaine d'alimentation en air du brûleur et la sortie du brûleur au four. Des buses ou des registres installés dans l'équipement du brûleur provoquent cette chute de pression. Le brûleur assure également l'allure de la flamme requise par le four. Des brûleurs types sont illustrés dans les figures 20 et 21.

Les brûleurs peuvent être conçus pour brûler un ou plusieurs types de combustible à la fois. La combustion de plusieurs combustibles peut être utile lorsque l'on peut utiliser du combustible (récupéré à partir d'autres procédés, ou à partir de rebuts) dont la quantité n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins énergétiques totaux.



Brûleur mixte au gaz ou au mazout
Figure 20



Brûleur mixte avec air prechauffé jusqu'à 600°C
Figure 21

Gracieuseté de North America Mfg. (Canada) Inc.

Régulateurs de brûleurs

Une bonne installation assure la combustion efficace du combustible en maintenant la quantité minimale d'excès d'air sans présence importante de corps combustibles dans les gaz de combustion, à tout taux de combustion.

Une bonne régulation du rapport combustible-air des fours à combustible minimise les pertes dans les gaz de combustion. Pour obtenir un bon rapport, il suffit d'installer une vanne d'alimentation et des registres d'air de combustion asservis à un régulateur commun. Si l'accouplement de réglage est mécanique, les positions relatives de la vanne d'alimentation en combustible et des registres d'air peuvent être modifiées à l'aide d'une came ou d'une biellette réglable. S'il s'agit d'un système pneumatique ou électronique, on peut régler le rapport combustible-air à distance à partir du panneau de commande du four.

La puissance calorifique du four, la pression du combustible, le rendement du ventilateur ou d'autres conditions peuvent entraîner des variations indésirables dans le rapport combustible-air que l'on tente de contrôler par le système de régulation. On peut régler le rapport de manière plus précise en mesurant les débits réels du combustible et de l'air aux brûleurs et en utilisant ces mesures pour régler de nouveau le débit d'air et maintenir automatiquement le rapport désiré.

Une autre méthode consiste à mesurer de manière continue la teneur en oxygène dans les gaz de combustion. Le débit d'air est réglé automatiquement pour maintenir une quantité déterminée d'oxygène dans ceux-ci. On obtient par cette méthode un pourcentage constant d'excès d'air aux brûleurs. Dans certains cas, il peut être avantageux de mesurer la teneur en combustibles des gaz de combustion et de maintenir les combustibles à un très bas niveau, soit à environ 100 à 200 mg/kg.

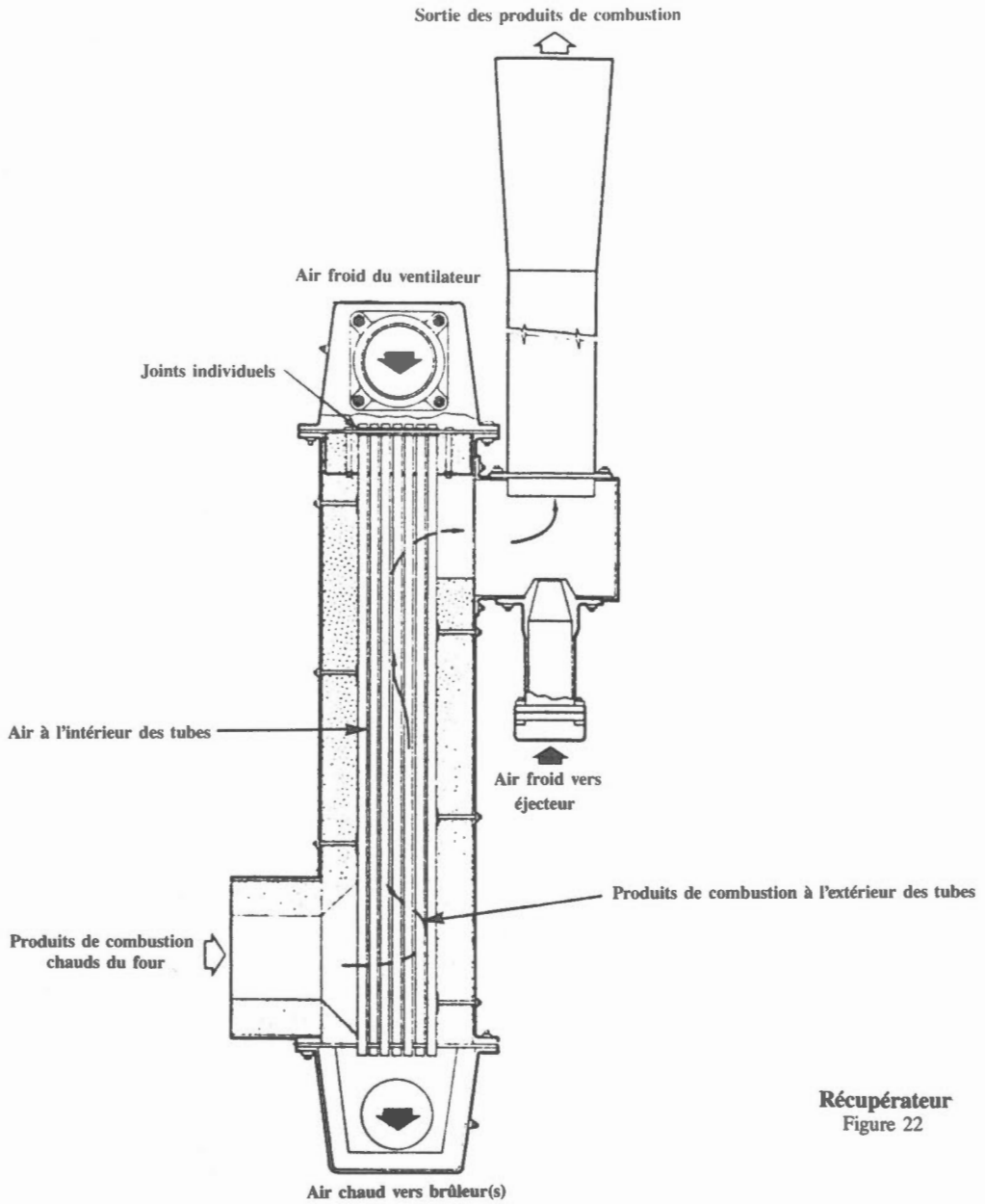
De nos jours, les systèmes de régulation sont plutôt électroniques que pneumatiques ou mécaniques. Toutefois, comme la technologie évolue rapidement dans ce domaine, on prévoit l'installation de systèmes commandés par microprocesseur.

Isolation

L'isolant empêche la chaleur de s'échapper de l'enceinte du four. On utilise aujourd'hui des isolants en fibre de céramique qui isolent mieux que le matériau réfractaire solide et qui demandent moins de chaleur pour atteindre la température de service. Ce matériau présente toutefois des désavantages: son coût initial est plus élevé et sa résistance aux dommages physiques est plus faible. On installe habituellement une couche de réfractaire sur le plancher du four et à d'autres endroits pouvant être endommagés pour protéger la fibre de céramique. D'autres couches de fibre de céramique peuvent être installées à l'extérieur de la couche de réfractaire au besoin.

Récupération de chaleur

De grandes quantités de chaleur sont perdues dans les gaz de combustion, même lorsque l'excès d'air est réglé à une valeur minimale. La façon la plus efficace de récupérer cette chaleur est d'installer un échangeur de chaleur à la sortie des gaz du four pour récupérer la chaleur dans les gaz de combustion. La température de l'air de combustion est habituellement limitée à 400°C dans un brûleur rénové parce que lorsque la température est plus élevée, le brûleur et les composants du réseau de gaines d'air doivent être fait d'un alliage. Les échangeurs de chaleur sont fait d'un alliage ou d'acier inoxydable pouvant tolérer des températures de gaz allant jusqu'à 900°C. Au-delà de cette température, des échangeurs de chaleur en céramique beaucoup plus coûteux sont requis. Dans certains cas, il peut être souhaitable d'introduire de l'air dans les gaz de combustion avant l'échangeur de chaleur pour permettre l'utilisation de matériaux métalliques moins coûteux. Les échangeurs de chaleur qui récupèrent la chaleur dans les gaz de combustion pour chauffer l'air de combustion sont habituellement appelés récupérateurs. Des récupérateurs types sont illustrés dans les figures 8 et 22. La chaleur récupérée peut également être utilisée pour chauffer l'air ambiant, l'eau pour les procédés ou pour produire de la vapeur.



Récupérateur
Figure 22

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Lorsque l'on parle de gestion de l'énergie, on parle en fait des différentes façons d'utiliser rationnellement l'énergie pour réduire les coûts d'exploitation. Dans le présent chapitre, plusieurs exemples-types de possibilités sont donnés, ainsi que des exemples concrets illustrant les possibilités d'économie d'énergie et d'argent. On n'énumère cependant pas de façon exhaustive toutes les techniques existantes relatives aux fours, sécheurs et fours de cuisson. Le chapitre est destiné à stimuler la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités de gestion d'énergie. Il n'y a pas de feuilles de travail annexées à la section en raison de la diversité de conception des fours, des sécheurs et des fours de cuisson, ainsi que de leurs potentiels d'économies d'énergie respectives.

Les possibilités de gestion de l'énergie se divisent en trois catégories, soit les Possibilités de maintenance, les Possibilités d'amélioration de coût modique et les Possibilités de rénovation.

Possibilités de maintenance

Les possibilités de maintenance sont des initiatives d'économie d'énergie exécutées de façon périodique, au moins une fois par année. En voici quelques exemples:

1. Réglages appropriés du brûleur.

2. Vérification de l'excès d'air et des corps combustibles dans les gaz de combustion.

3. Nettoyage des surfaces de l'échangeur de chaleur.

4. Remplacement ou réparation d'isolants manquants ou endommagés.

5. Remise en place des portes ou des couvercles.

6. Vérification périodique de la pression du four.

7. Planification de la production pour maintenir le rendement des fours.

Exemples concrets de maintenance

1. Réglages appropriés du brûleur

On recommande que le réglage du brûleur soit effectué par un représentant d'expérience du manufacturier de brûleurs. Les opérateurs de four sont alors en mesure d'identifier l'allure appropriée d'une flamme de brûleur pour fins de référence. L'allure de la flamme devrait être vérifiée à intervalles réguliers et lorsque surviennent de nouvelles conditions de service pouvant affecter le combustible, le débit de l'air de combustion ou la pression du four.

2. Vérification de l'excès d'air et des corps combustibles dans les gaz de combustion.

La meilleure façon d'effectuer cette vérification est d'utiliser un analyseur d'oxygène et de corps combustibles en continu, mais son coût est élevé. Une méthode fiable qui identifie bien les conditions appropriées de combustion consiste à prélever des échantillons à l'aide d'un appareil d'Orsat ou d'un autre analyseur chimique. Un nouveau réglage du rapport combustible-air devrait être effectué rapidement au besoin.

3. Nettoyage des surfaces de l'échangeur de chaleur

Les surfaces de l'échangeur de chaleur des fours à mazout nécessitent de fréquents nettoyages. On recommande dans ce cas, l'installation permanente de soufleurs de suie à vapeur ou à air.

4. Remplacement ou réparation d'isolants manquants ou endommagés

Le rayonnement émis par un four dont la matière isolante est inappropriée est facilement décelable lors d'une visite de l'usine pour vérification énergétique.

5. Remise en place des portes ou des couvercles

On remarque l'absence d'une porte de 0,25 m^2 d'un four qui fonctionne à 900°C. La chaleur émise à travers l'ouverture est de 400 MJ/(m^2·h) (figure 13). Le four fonctionne 4000 heures par année et le coût du combustible est de 5 $ par GJ.

Perte de chaleur annuelle = 0,25 m^2 × 400 MJ/(m^2·h) × 4 000 h

= 400 000 MJ/an

= 400 GJ/an

Économies annuelles = 5$ × 400

= 2 000$

Ces économies sont quelque peu réduites par la perte de chaleur qui se produira à travers la porte fermée. On peut minimiser ces pertes en éliminant l'infiltration d'air ou les fuites de gaz qui se produisent lorsque la porte est fermée.

6. Vérification périodique de la pression du four

On peut contrôler les infiltrations d'air ou les fuites de gaz d'un four en maintenant la pression du four légèrement positive. Il faut régler de nouveau le registre du réseau de conduites de gaz de combustion du four ou l'appareil de régulation si la pression du four n'est pas à la valeur appropriée.

7. Planification de la production pour maximiser le rendement des fours

Il peut être possible de faire fonctionner le four à une charge maximale un jour sur deux, au lieu de le fair fonctionner continuellement avec une charge de 50 pour cent. Autrement, le traitement pourrait aussi s'effectuer dans un four de plus petites dimensions qui fonctionnerait continuellement à pleine charge.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les possibilités d'amélioration de coût modique sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées en une seule fois et dont le coût n'est pas élevé. En voici quelques exemples:

1. Remplacement des portes ou des couvercles tordus ou endommagés.

2. Installation d'un appareillage de surveillance approprié.

3. Récupération de la chaleur transmise à l'eau de refroidissement de l'équipement.

4. Nouvel emplacement de la prise d'air de combustion pour récupérer de la chaleur au sein du bâtiment.

Exemples concrets d'amélioration de coût modique

1. Remplacement des portes ou des couvercles tordus ou endommagés

Les portes ou les couvercles tordus ou endommagés peuvent entraîner d'importantes infiltrations d'air ou fuites de gaz. Ces portes ou couvercles devraient être remplacés par des portes ou couvercles équipés de joints étanches. D'autre part, on peut améliorer davantage la situation en installant des servomoteurs sur les portes, ce qui minimise le temps d'ouverture de celles-ci et facilite le travail des opérateurs.

2. Installation d'un appareillage de surveillance approprié

À tout le moins, cet appareillage doit pouvoir déterminer l'énergie utilisée par unité de production pour pouvoir identifier les déviations importantes et prendre des mesures correctrices. Le wattmètre (dans le cas d'un four électrique) ou un débitmètre (pour le combustible) peut être portatif et utilisé sur plusieurs fours. Par contre, l'identification des pertes pour un four en particulier nécessiterait un appareillage supplémentaire. On peut mesurer la température des gaz de combustion et leur teneur en oxygène pour connaître les pertes dans les gaz de combustion. Si un échangeur de chaleur est utilisé pour récupérer la chaleur dans les gaz de combustion, on peut mesurer la température du gaz et de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur pour vérifier le rendement de ce dernier.

3. Récupération de la chaleur transmise à l'eau de refroidissement de l'équipement

On peut souvent utiliser l'eau tiède évacuée par les refroidisseurs d'équipements pour le lavage, par exemple. Dans certains systèmes, lorsque l'eau évacuée est trop froide pour être utilisée, il peut être pratique d'installer une vanne de réglage du débit d'eau et un régulateur de température. Le débit d'eau est réglé automatiquement en fonction de la température de l'eau de sortie du refroidisseur, ce qui assure une bonne température de l'eau tout en maintenant le refroidissement approprié. Le système de régulation réduit également la quantité d'eau utilisée.

4. Nouvel emplacement de la prise d'air de combustion pour récupérer de la chaleur au sein du bâtiment

L'air chaud à l'intérieur de l'usine tend à monter naturellement, ce qui entraîne des différences de température importantes entre le plancher et le plafond. Si le four est équipé d'un ventilateur de tirage forcé, il y a souvent possibilité d'installer un réseau de gaines à partir du plafond jusqu'à la prise d'air du ventilateur. D'autre part, si une grande quantité de chaleur est simultanément générée et pulsée vers l'extérieur, le réseau de gaines peut être acheminé vers un atelier adjacent. Il faut s'assurer de bien choisir la dimension des gaines pour minimiser la chute de pression.

Un four qui utilise 5 000 kg/h d'air de combustion tire de l'air ambiant d'une température moyenne de 20°C. L'installation d'une gaine au plafond augmente la température moyenne de l'air à 30°C.

$$\text{Chaleur récupérée} = 5\,000 \text{ kg/h} \times (30 - 20)°\text{C} \times 1{,}006 \text{ kJ/(kg.°C)}$$

$$= 50\,300 \text{ kJ/h}$$

Le four fonctionne 6 000 heures par année et le coût du combustible est de 5$/GJ.

$$\text{Économies de combustible annuelles} = \frac{50\,300 \times 6\,000 \times 5\$}{10^6}$$

$$= 1\,509\$ \text{ par année}$$

Le coût du réseau de gaines est de 1 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{1\,500\$}{1\,509\$}$$

$$= 1{,}0 \text{ an}$$

Possibilités de rénovation

Les projets de rénovation sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois et dont le coût est important. En voici quelques exemples.

1. Installation d'un échangeur de chaleur dans la sortie des gaz de combustion.

2. Nouvelle isolation de l'enceinte du four.

3. Remplacement de l'ensemble du brûleur.

4. Installation d'un nouveau système de régulation.

Exemples concrets de rénovation

1. Installation d'un échangeur de chaleur dans la sortie des gaz de combustion.

Le coût des échangeurs de chaleur est fonction directe de la température des gaz admis dans l'échangeur. Dans certains cas cependant, il serait bon d'étudier la possibilité d'introduire, s'il y a lieu, de l'air froid dans le courant de gaz pour abaisser suffisamment la température du gaz de manière à utiliser des matériaux économiques. L'acier inoxydable ou un alliage ne peut être utilisé à des températures supérieures à 950°C.

Si la chaleur récupérée est utilisée pour préchauffer l'air de combustion, on doit consulter le constructeur de brûleurs pour connaître la température maximale admissible de l'air. Cette température est souvent assez basse, soit 250°C. Elle ne peut être supérieure à 400°C puisque le brûleur devrait alors être construit en alliage au lieu d'en acier au carbone. S'il ne s'avère pas pratique de chauffer l'air de combustion, il peut être possible de chauffer l'eau de procédé ou d'installer une chaudière de récupération de chaleur pour utiliser l'énergie calorifique des gaz de combustion.

L'échangeur de chaleur augmente la chute de pression dans le réseau des gaz de combustion et, par conséquent, entraîne une réduction de la capacité du ventilateur d'air de combustion. Il peut être nécessaire d'installer un nouveau ventilateur ou un nouveau rotor et moteur. La pression du four pourrait augmenter à moins qu'il n'y ait suffisamment de tirage dans la cheminée pour compenser la résistance additionnelle à travers l'échangeur de chaleur. À cause de ces complications et des autres problèmes éventuels, on suggère de consulter le constructeur du four ou un consultant spécialisé dans ce domaine pour l'évaluation des différentes possibilités.

L'analyse économique et technique suivante est basée sur l'installation réelle de récupérateurs en alliage à haute teneur dans un four à traitement thermique continu à combustion indirecte. Un récupérateur spécial à trois passes était boulonné au montant d'évacuation de chacun des 24 tubes radiants du four et chaque brûleur à tirage induit a été remplacé par un brûleur étanche à pression. Par ailleurs, on a installé un système de ventilation pour l'alimentation en air de combustion, et on a amélioré les appareils de régulation pour réduire l'excès d'air de 15 à 20% (avant la conversion) à 8 à 10%. Le coût total du projet était de 120 000$.

Avant la conversion, la consommation de combustible par brûleur était de 193 000 kJ/h ou 4,63 GJ/h lorsque tous les brûleurs fonctionnaient. Le four fonctionne 6 jours sur 7, 24 heures sur 24 et un facteur de 15 % est alloué pour les temps d'arrêt ou le fonctionnement à charge partielle. Le coût du gaz est de 4,24$ par gigajoule.

$$\text{Coût annuel du combustible avant la conversion} = \frac{(100\text{-}15)}{100} \times 24\text{h/j} \times 6\text{j/sem.} \times 52\,\text{sem./an} \times 4{,}63\,\text{GJ/h} \times 4{,}24\$/\text{GJ}$$

$$= 124\ 949\$$$

Pour évaluer les économies, il faut déterminer le rendement du récupérateur. Les gaz de combustion s'échappent des tubes radiants à 1 100°C et entrent dans le récupérateur à la même température. Le gaz s'échappe du récupérateur à 650°C et l'air de combustion est chauffé à partir de la température ambiante à 500°C.

Pour déterminer le rendement propre au récupérateur, on suppose que le pourcentage d'excès d'air avant et après la conversion demeure à 20%. L'intersection du 20% d'excès d'air et de 1 100°C dans la figure 5 indique que 64% de la chaleur fournie dans le combustible sont perdus dans les gaz de combustion.

$$\text{Perte de chaleur dans les gaz de combustion/brûleur} = \frac{64}{100} \times 193\ 000$$

$$= 123\ 500\ \text{kJ/h}$$

Le reste, ou 69 500 kJ/h, entre dans le four par le tube radiant.

Après la conversion, la température du gaz de la cheminée est réduite à 650°C. Selon la figure 5, 20% d'excès d'air et une température de gaz de combustion de 650°C indiquent que 40% de la chaleur fournie est perdue et que par conséquent 60% entre dans le four. Il est raisonnable de supposer que la quantité de chaleur admise dans le four à travers chaque tube radiant ne change pas lorsqu'on installe un récupérateur puisque la température du gaz qui s'échappe du tube demeure à 1 100°C. 60% de la chaleur fournie par brûleur après la conversion équivaut à 69 500 kJ/h.

$$\text{Énergie du brûleur} = \frac{69\,500}{0{,}6} = 115\,800 \text{ kJ/h}$$

Perte de chaleur dans les gaz de combustion/brûleur = 115 800 — 69 500

= 46 300 kJ/h

Économies d'énergie = 24 (brûleurs) × (123 500 — 46 300)

= 1 852 800 kJ/h

= 1,85 GJ/h

$$\text{Économie} = \frac{1{,}85}{4{,}63} \times 100$$

= 40%

Les économies réelles en combustible sont de 48%. Les valeurs ne concordent pas parce qu'il est difficile de mesurer avec précision les températures et les débits d'air des gaz de combustion et, par conséquent, les quantités d'excès d'air. La modification a entraîné deux autres possibilités d'économies d'énergie. En améliorant la régulation du débit d'air, l'excès d'air est réduit à 8%. Lorsqu'on évalue la réduction à partir de la figure 5, on obtient une économie de près de 2 à 3%. D'autres économies difficiles à évaluer proviennent des modifications apportées au système de régulation. Avant la conversion, les brûleurs fonctionnaient à un point de consigne constant et la température du four était réglée en allumant et en éteignant certains brûleurs. Il y avait une de perte de chaleur par les tubes radiants lorsqu'ils ne fonctionnaient pas en raison de la convection naturelle de l'air extérieur à travers ceux-ci. Le nouveau système de régulation à modulation a éliminé cette perte.

Les économies annuelles en combustible étaient égales à 48% de 124 949$ ou à environ 60 000$. Si l'on se base sur la mise de fonds de 120 000$, la période de rentabilité de ce projet était de 2 ans.

2. Nouvelle isolation de l'enceinte du four

Le revêtement des fours plus anciens pouvait être composé de briques réfractaires. Si le four doit être rebâti, il est souvent économique d'utiliser de la fibre de céramique comme isolant. Si l'on doit utiliser de la brique réfractaire pour un service intensif, celle-ci peut être recouverte de fibre de céramique. Comme la fibre de céramique isole beaucoup mieux que la brique réfractaire, il faut éviter le surchauffage de la couche intérieure de réfractaire car sa température moyenne sera plus élevée.

Lors d'une visite d'usine, on remarque que le four semble émettre des quantités importantes de chaleur. La température moyenne de surface des murs et de la voûte était de 200°C et de 250°C respectivement. Les dimensions extérieures du four sont 2 m sur 2 m sur 6 m de long. On décide d'isoler de nouveau le four pour obtenir une température maximale de surface de 50°C afin de protéger l'opérateur et d'économiser de l'énergie.

Selon la figure 12, les pertes de chaleur sont de 21,5 MJ/(m^2·h) à 250°C, 11,6 MJ/(m^2·h) à 200°C et 1,7 MJ/(m^2·h) à 50°C.

Surface du toit = 2 m × 6 m

= 12 m^2

Surface des parois = (2 m × 6 m × 2) + (2 m × 2 m × 2)

= 32 m^2

Perte de chaleur avant la nouvelle isolation = [21,5 MJ/(m^2·h) × 12 m^2] + [11,6 MJ/(m^2·h) × 32 m^2]

= 692,2 MJ/h

Perte de chaleur après la nouvelle isolation = 1,7 MJ/(m^2·h) × (12 m^2 + 32 m^2)

= 74,8 MJ/h

Il est à remarquer que la perte de chaleur au plancher n'est pas importante.

Économies d'énergie = 692,2 MJ/h — 74,8 MJ/h

= 617,4 MJ/h

Le four fonctionne 4 000 heures par année et le coût du combustible est de 5$/GJ.

$$\text{Économies annuelles} = \frac{617{,}4 \text{ MJ/h} \times 4\,000 \text{ h/an} \times 5\$/\text{GJ}}{1\,000 \text{ MJ/GJ}}$$

= 12 348$/an

3. Remplacement de l'ensemble du brûleur.

L'installation d'un équipement de brûleur moderne peut permettre un fonctionnement à des valeurs inférieures d'excès d'air et diminuer les pertes à la cheminée. Le nouvel équipement peut également commander un démarrage et un arrêt automatiques. Dans une installation à brûleurs multiples, l'automatisation du démarrage et de l'arrêt des brûleurs en fonction des charges évite de moduler la charge sur des brûleurs individuels. En général, les brûleurs fonctionnent plus efficacement lorsque les charges sont élevées. On peut ainsi économiser davantage à charge partielle si certains brûleurs sont éteints. L'air de combustion aux brûleurs éteints devrait être coupé pour éviter les pertes dues à l'admission d'air inutile au procédé de combustion.

4. Installation d'un nouveau système de régulation

Selon le type d'installation déjà existante, on peut économiser de grandes quantités de combustible en modernisant les appareils de régulation.

Un système utilisant des régulateurs de combustible et d'air en parallèle et qui n'est pas réglé en fonction des débits mesurés de combustible et d'air ou de l'analyse des gaz de combustion, fonctionne habituellement avec un excès d'air à pourcentage élevé. L'installation de débit-mètres pour la mesure du combustible et de l'air assure une régulation plus précise dans des conditions de charges variables et permet un fonctionnement avec un excès d'air à pourcentage plus faible. L'ajout d'un régulateur de débit d'air par détection d'oxygène compense les variations de combustible et d'air de combustion et assure le fonctionnement à des niveaux plus bas d'excès d'air. Il est à noter que les analyseurs de gaz de combustion nécessitent un entretien et un étalonnage à intervalles réguliers. L'analyseur muni d'un capteur placé directement dans le courant des gaz est généralement plus fiable que les appareils qui nécessitent le prélèvement continu d'échantillons dans le système des gaz de combustion.

On peut réaliser d'importantes économies d'énergie en réduisant l'excès d'air grâce à un meilleur système de régulation.

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes

Glossaire

Air stoechiométrique— Volume d'air théorique nécessaire à la combustion complète sans manque ni excès. En pratique, il est toujours nécessaire de fournir un excès d'air pour obtenir la combustion complète du combustible.

Appareil d'Orsat— Analyseur manuel de gaz de combustion (gaz de cheminée) qui détermine par absorption chimique la teneur en monoxyde de carbone, en anhydride carbonique et en oxygène.

Chaleur de vaporisation— Chaleur requise pour évaporer complètement une unité de poids d'une substance. «Évaporer» dans ce contexte, signifie la transformation du liquide en vapeur. La chaleur de vaporisation est exprimée en mégajoules par kilogramme (M/kg).

Chaleur spécifique— Quantité de chaleur requise pour élever la température de l'unité de masse d'une substance d'un degré de température. Les unités de mesure sont habituellement les kilojoules par kilogramme par degré Celsius, kJ/(kg·°C).

Combustion— Combinaison chimique rapide d'un combustible avec l'oxygène pour générer de la chaleur. Dans la plupart des applications, on obtient l'oxygène à partir de l'air.

Corps combustible— Tout composant gazeux présent dans un produit de combustion et ayant la propriété de brûler. Le monoxyde de carbone est le corps combustible que l'on retrouve le plus souvent dans les gaz de combustion.

Corps noir— Corps qui absorbe complètement toutes les radiations qu'il reçoit et qui, lorsque chauffé, émet plus d'énergie que tout autre corps.

Émissivité— Rapport de l'énergie émise par un corps chauffé et de l'énergie émise par un corps noir de dimensions similaires chauffé à la même température. La valeur est toujours inférieure à 1.

Gaz de combustion— Produits gazeux créés par la combustion d'un combustible et qui s'échappent de la chambre de combustion.

Microprocesseur— Petit ordinateur dont les fonctions principales peuvent être fixées sur une seule puce.

Oxydation— À l'intérieur du four, état qui permet la formation d'oxydes sur la surface du produit.

Réduction— À l'intérieur du four, état qui convertit les oxydes sur la surface du produit en métal de base ou empêche la formation d'oxydes.

Température absolue— Température mesurée en degrés Kelvin. Une température de 0°C est égale à 273 K.

Valeur calorifique plus élevée— La quantité de chaleur produite par la combustion complète d'une unité de combustible lorsque les produits de combustion sont refroidis à la température ambiante. La valeur comprend la chaleur latente de la vapeur d'eau dans les produits de combustion qui, en général, ne sont pas récupérés.

Wattmètre— Appareil qui mesure la puissance électrique consommée en watts ou en kilowatts.

EXIGENCES EN AIR DE COMBUSTION

TABLE 1

Combustible	Air stoechiométrique kg/GJ tel que brûlé	Excès d'air type (minimum)	Air total kg/GJ tel que brûlé
Gaz naturel	318	5%	334
Mazout n° 2	323	10%	355
Mazout n° 6	327	10%	360
Gaz de coke (1)	295	15%	340
Gaz de raffinerie (2)	312	10%	343
Propane	314	5%	330

(1)	Analyse par volume	CO	12%
		H_2	42%
		CH_4	37%
		C_2H_4 et supérieur	5%
		CO_2	Restant
(2)	Analyse par volume	CH_4	31%
		C_2H_6	20%
		C_3H_8	38%
		H_2	5,6%
		C_4H_{10} et supérieur	1,0%
		Gaz inertes	Restant

VALEURS DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE TYPES

TABLE 2

Matériaux	Conductivité thermique W/(m·°C)
Cuivre	361
Aluminium	217
Laiton	111
Fonte	40
Acier au carbone	36
Alliage à faible teneur en nickel	25
Alliage à forte teneur en nickel	31
Carbure de silicium	14

VALEURS D'ÉMISSIVITÉ TYPES
TABLE 3

Matériaux	Émissivité
Fonte	0,72
Acier au carbone	0,80
Alliage à faible teneur en nickel	0,73
Alliage à forte teneur en nickel	0,90
Carbure de silicium	0,90
Brique réfractaire	0,75
Brique silico-alumineuse	0,30

VALEURS DE CHALEUR SPÉCIFIQUE ET DE CHALEUR DE FUSION TYPES
TABLE 4

Matériaux	Chaleur spécifique kJ/(kg·°C)	Chaleur de fusion à partir de 0°C kJ/kg
Fer et acier à faible teneur	0,5	1360
Aluminium	0,92	1095
Cuivre	0,40	710
Verre	0,84	Note (1)
Eau	4,19	755
Zinc	0,39	300
Plomb	0,13	70
Etain	0,23	130
Laiton	0,39	595

(1) Aucun point de fusion défini

VALEURS DE CHALEUR DE VAPORISATION TYPES

TABLE 5

Matériaux	Chaleur de vaporisation kJ/kg
Eau à 20°C	2450
Trichloréthylène	230
Acétone	510
Alcool éthylique	860
Alcool isopropylique	675
Benzène	400
Toluène	350
Térébenthine	290
Naphte	240
Kérosène	200
Tétrachlorure de carbone	195

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres	1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)	1 Newton	= 1 Kg-m/s^2
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts	1 thermie	= 10^5 Btu
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure	1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts	1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 joule	= 1 N-m	1 watt	= 1 joule/seconde
Kelvin	= (°C + 273,15)	degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes	**Carrés**
1 v^3 = 27 pi^3	1 v^2 = 9 pi^2
1 pi^3 = 1728 po^3	1 pi^2 = 144 po^2
1 cm^3 = 1000 mm^3	1 cm^2 = 100 mm^2
1 m^3 = 10^6 cm^3	1 m^2 = 10000 cm^2
1 m^3 = 1000 L	

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
déca	da	10	10^1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	u	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm^2	ampère/pouce carré	A/po^2	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm^3	pouce cube	po^3	0,06102
mètre cube	m^3	pied cube	pi^3	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi^3	0,06243
joule	J	Btu	Btu	$9,480 \times 10^{-4}$
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	$3,73 \times 10^{-7}$
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	$9,842 \times 10^{-4}$
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	$1,102 \times 10^{-3}$
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	$9,87 \times 10^{-3}$
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po^2	0,1450
kilowatt	kW	pied-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pied cube	pi^3	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,2642
litre/seconde	L/s	pied cube/minute	pi^3/min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m^2	lumen par pied carré	lm/pi^2	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	pied bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pied	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm^2	pouce carré	po^2	0,1550
mètre carré	m^2	pied carré	pi^2	10,764
mètre carré	m^2	verge carré	v^2	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po^2	A/po^2	ampère/cm^2	A/cm^2	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	$2{,}928 \times 10^{-4}$
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi^3	mètre cube	m^3	0,02832
pied cube	pi^3	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi^3/m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F-32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/ mètre carré	lx, lm/m^2	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	$1{,}356 \times 10^{-3}$
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	$2{,}684 \times 10^{6}$
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,183
lumen/pied carré	lm/pi^2	lumen/mètre carré	lm/m^2	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mile	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,721 \times 10^{-11}$
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5,745 \times 10^{-11}$
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4532 \times 10^{-12}$
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1,4593 \times 10^{-12}$
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	$4,536 \times 10^{-4}$
livre/pied cube	lb/pi^3	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po^2	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi^2	mètre carré	m^2	0,09290
pouce carré	po^2	centimètre carré	cm^2	6,452
verge carré	v^2	mètre carré	m^2	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairement.

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	$25{,}0 \times 10^6$ BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	25.8×10^6 BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	$27{,}6 \times 10^6$ BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	$19{,}0 \times 10^6$ BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	$14{,}4 \times 10^6$ BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	$26{,}0 \times 10^6$ BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	$20{,}0 \times 10^6$ BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	$28{,}0 \times 10^6$ BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	$32{,}0 \times 10^6$ BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	$5{,}8 \times 10^6$ BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	$5{,}88 \times 10^6$ BTU/baril $0{,}168 \times 10^6$ BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	$6{,}04 \times 10^6$ BTU/baril $0{,}173 \times 10^6$ BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5% soufre	42,3 mégajoules/litre	$6{,}38 \times 10^6$ BTU/baril $0{,}182 \times 10^6$ BTU/GI
— 1,0% soufre	40,5 mégajoules/litre	$6{,}11 \times 10^6$ BTU/baril $0{,}174 \times 10^6$ BTU/GI
— 0,5% soufre	40,2 mégajoules/litre	$6{,}05 \times 10^6$ BTU/baril $0{,}173 \times 10^6$ BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	$0{,}167 \times 10^6$ BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	$0{,}172 \times 10^6$ BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	$0{,}156 \times 10^6$ BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m^3	$1{,}00 \times 10^6$ BTU/M pi^3
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	$0{,}02165 \times 10^6$ BTU/lb $0{,}1145 \times 10^6$ BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	$0{,}003413 \times 10^6$ BTU/kWh