

SÉRIE  
DE LA GESTION  
DE L'ÉNERGIE

---

A L'INTENTION  
DES INDUSTRIES,  
COMMERCES  
ET INSTITUTIONS

---

# Récupération de la chaleur perdue

TJ  
163.4  
C2  
A614  
no. 23  
c.2

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

## 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



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

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

TJ  
163.4  
C2  
A614  
no.23  
c.2



# TABLE DES MATIÈRES

	page
<b>INTRODUCTION</b>	
<b>Objectifs</b>	1
<b>Contenu</b>	1
<b>NOTIONS DE BASE</b>	
<b>Introduction</b>	3
<b>Principes fondamentaux de l'énergie thermique</b>	3
Chaleur et transmission thermique	3
Qualité et disponibilité	3
Chaleur perdue	3
Cascade	3
<b>Enthalpie des substances</b>	4
Chaleur sensible et chaleur latente	4
Enthalpie	4
Calcul de la transmission de la chaleur sensible	5
Calcul de la transmission de la chaleur latente	6
<b>Mécanismes de transmission thermique</b>	7
Rayonnement	7
Conduction	7
Convection	7
<b>Techniques de récupération de la chaleur</b>	8
L'utilisation directe	8
L'échangeur de chaleur	8
La pompe à chaleur	10
La surcompression de la vapeur	11
Surcompression mécanique	11
Surcompression thermique	12
Opérations à étapes multiples	13
<b>Méthodes de vérification énergétique</b>	13
<b>SOURCES ET APPLICATIONS POSSIBLES DE LA CHALEUR PERDUE</b>	
<b>Introduction</b>	14
<b>Formulation de projets de récupération de la chaleur perdue</b>	14
La compatibilité entre la source et la demande	14
Accessibilité	14
La distance entre la source et la demande	14
La forme et l'état de la source de chaleur perdue	15
Qualité du produit	16
Niveau de réchauffement nécessaire	16
Les aspects réglementaires	16

	page
<b>APPAREILLAGE</b>	
<b>Introduction</b>	17
<b>Matériel d'échange de chaleur</b>	17
Échangeur de chaleur à calandre multitubulaire	19
Chaudières de récupération de chaleur perdue	20
Échangeur de chaleur à tube à ailettes	21
Échangeur de chaleur à serpentin	21
Échangeur de chaleur à tubes concentriques	22
Échangeur de chaleur à plaques	23
Système à fonctionnement circulaire	24
Roues à chaleur	25
Caloducs (échangeurs de chaleur à thermosiphon)	27
<b>Équipement des pompes à chaleur</b>	28
Genres de pompes à chaleur	28
Éléments d'une pompe à chaleur	28
Utilisations des pompes à chaleur	31
<b>Surcompression de la vapeur</b>	31
Surcompression mécanique	32
Surcompression thermique	33
Applications de la surcompression de la vapeur	33
<b>Opérations à étapes multiples</b>	33
Évaporation à effets multiples	33
Vaporisation éclair à étapes multiples	34
Autres opérations à étapes multiples	35
<b>POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE</b>	
<b>Possibilités de maintenance</b>	36
Identification des sources de chaleur perdue	36
Élimination des pertes thermiques	36
Réduction au minimum de la quantité de chaleur contenue dans les rejets thermiques par des mécanismes de contrôle de maintenance	36
Maintenance des appareils mécaniques	37
<b>Possibilités d'amélioration de coût modique</b>	37
<b>Exemples concrets d'amélioration de coût modique</b>	37
Utilisation directe de la chaleur récupérable	37
Utilisation des eaux usées de procédé comme source thermique pour une pompe à chaleur	38
Recyclage des gaz d'échappement (extraction) des sècheurs	39
<b>Possibilités de rénovation</b>	39
<b>Exemples concrets de rénovation</b>	40
Installation d'un échangeur de chaleur	40
Installation d'un caloduc	42

## **ANNEXES**

- A Glossaire**
- B Tableaux**
- C Facteurs de conversion**



# INTRODUCTION



La chaleur perdue peut être perçue comme de la chaleur rejetée par des installations dans l'environnement. La récupération et la réutilisation de cette chaleur offrent la possibilité de réduire les coûts énergétiques et d'améliorer la rentabilité des entreprises canadiennes. Bien que le rythme de croissance des coûts énergétiques ait ralenti au cours des dernières années, la nécessité de réduire la consommation d'énergie persiste. Ce manuel présente une méthode systématique pour définir et réaliser des projets de récupération de la chaleur perdue dans les installations industrielles, commerciales et gouvernementales.

## Objectifs

Les objectifs de ce manuel tiennent dans les points suivants :

- présenter les principes fondamentaux qui touchent la transmission thermique, la disponibilité de la chaleur, la récupération et la réutilisation de la chaleur perdue;
- découvrir les sources possibles de chaleur perdue à récupérer et les domaines d'utilisation possibles;
- discuter des systèmes d'équipement et des techniques disponibles pour la récupération de la chaleur perdue;
- présenter des études de cas et des exemples de récupération de la chaleur perdue.

## Contenu

Le contenu de ce manuel a été subdivisé de la façon suivante :

- les "Principes fondamentaux" traitent de la récupération de la chaleur perdue, incluant les concepts nécessaires pour découvrir la chaleur perdue récupérable, l'échange de chaleur et le pompage de la chaleur, les principes de fonctionnement, les façons de vérifier la récupération de la chaleur perdue, l'équilibre entre la masse et l'énergie, la transmission en cascade et la régénération de l'énergie émanant de la chaleur perdue;
- les "Sources et applications" traitent des sources de chaleur perdue et présentent des suggestions pratiques quant aux applications de la récupération de la chaleur perdue;
- "Appareillage" décrit la théorie, le matériel et les applications de divers systèmes de récupération;
- les "Possibilités de gestion de l'énergie" présentent plusieurs exemples concrets de projets de récupération de la chaleur perdue afin de fournir un aperçu des applications possibles de la chaleur perdue récupérée;
- les "Annexes" contiennent les tableaux, un glossaire et des tables de facteurs de conversion.





# NOTIONS DE BASE



## Introduction

La réduction ou la réutilisation de la chaleur perdue fournissent une excellente occasion d'économiser sur le coût énergétique dans les installations industrielles, commerciales et gouvernementales au Canada. Cette section du manuel vise à fournir ou à remémorer aux lecteurs les termes et outils de base nécessaires à la quantification des possibilités d'économie et à fournir certains renseignements sur le matériel disponible pour réduire ou récupérer la chaleur perdue.

## Principes Fondamentaux de l'Énergie Thermique

### Chaleur et transmission thermique

L'expérience démontre que lorsqu'un objet chaud entre en contact avec un objet froid, l'objet chaud se refroidit tandis que l'objet froid se réchauffe. Cette énergie en transit qui résulte d'un écart de température est appelée "chaleur". Le fait que la chaleur passe toujours d'une température plus élevée à une température plus basse nous amène au principe que la température est l'élément conducteur dans la transmission d'une énergie comme la chaleur.

La "transmission thermique" traite du mécanisme par lequel la chaleur passe d'un endroit à un autre, lorsqu'il existe un écart de température entre deux objets.

La chaleur se mesure en kilojoules (kJ) d'énergie et la chaleur transmise s'exprime habituellement avec une unité de temps, par exemple, kJ/s ou kJ/h.

### Qualité et disponibilité

On peut décrire la "qualité" de l'énergie thermique comme sa capacité de provoquer un changement. En termes de chaleur perdue, c'est la quantité d'énergie utile disponible par rapport à l'énergie thermique totale contenue dans une source de chaleur perdue.

La "disponibilité" est un autre terme utilisé pour décrire la nature d'une source d'énergie. Plus la qualité d'une source d'énergie est élevée, plus son énergie est disponible à l'usage.

Dans le cas d'une source de chaleur, c'est par la température qu'on en mesure la qualité et la disponibilité. Plus la température d'une substance est élevée, plus la quantité d'énergie thermique qu'on peut en extraire est élevée. La plupart des procédés industriels et des usages commerciaux abaissent la température de l'énergie thermique à mesure qu'ils s'en servent, et appauvrissent de ce fait la qualité de la chaleur.

### Chaleur perdue

On peut définir la chaleur perdue comme la chaleur contenue dans une substance rejetée au cours d'un procédé, à une température plus élevée que les niveaux de température ambiante d'une usine. Dans un sens plus large, la chaleur perdue est n'importe quelle source de chaleur rejetée dont une partie pourrait être récupérée et réutilisée d'une façon économique. Comme on le découvrira plus loin dans ce manuel, les sources de chaleur perdue peuvent être sous une forme gazeuse, solide ou liquide.

### Cascade

On peut définir une cascade d'énergie comme l'organisation du flux et la réutilisation de l'énergie au moyen de divers systèmes, procédés et équipement de production, en vue de tirer le maximum d'efficacité de l'énergie utilisée. Essentiellement, il s'agit d'utiliser la quantité maximale d'énergie disponible provenant d'une source donnée. L'efficacité maximale est obtenue par la dégradation séquentielle ou l'appauvrissement de la qualité de l'énergie au cours de l'accomplissement de chaque tâche, de la même façon que l'énergie potentielle de l'eau qui tombe s'amenuise dans les rapides et les cascades d'une rivière. C'est cette comparaison qui a mené à l'adoption du terme cascade pour décrire le concept.

L'économie et l'aspect pratique sont des facteurs cruciaux qui limitent le nombre de cascades qu'on peut réaliser dans un système. Dans la plupart des situations, on peut optimiser l'énergie en cascade grâce à des mesures de modification par lesquelles la chaleur perdue produite lors d'opérations exécutées à une température plus élevée est extraite et réutilisée pour des tâches nécessitant une température relativement plus basse. Le fait d'utiliser les gaz d'échappement de la chaudière comme source d'énergie pour produire de l'eau chaude dans un immeuble à appartements plutôt que d'avoir recours à la combustion directe de combustible, en est un exemple.

## Enthalpie des Substances

Il faut effectuer certains calculs pour déterminer la teneur thermique des sources de chaleur perdue. Les lecteurs trouveront donc plus loin une série d'équations à leur intention. Comme on pourra le constater, la façon d'appliquer l'une ou l'autre de ces équations peut dépendre aussi bien de la nature du matériau que de son état.

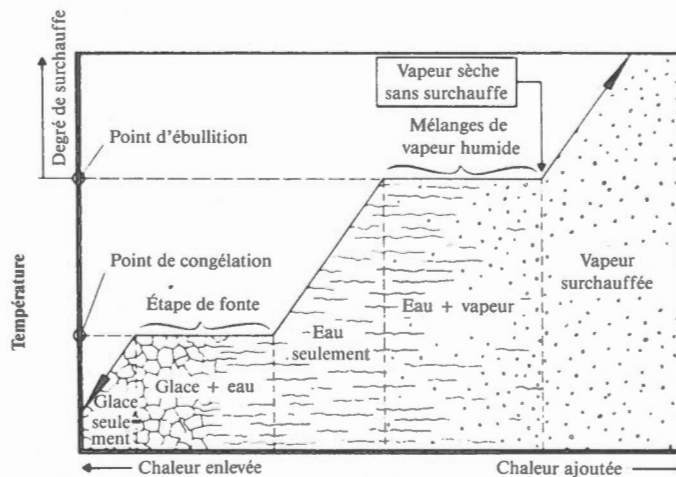
## Chaleur Sensible et Chaleur Latente

Lorsqu'on ajoute ou qu'on retire de l'énergie thermique d'une substance, la température de cette substance change, ou son état se modifie.

On appelle chaleur sensible l'énergie thermique associée à un changement de température. La quantité d'énergie dépend de l'ampleur du changement de température, de la quantité du matériau et de sa chaleur spécifique exprimée en  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

On appelle chaleur latente l'énergie thermique associée à une modification de l'état (ou de la phase). La figure 1 illustre le processus de changement d'état, de la glace à l'eau, puis à la vapeur. Lorsque le changement d'état s'effectue de la vapeur à l'eau, la chaleur latente de la condensation est enlevée. Lorsque le changement d'état se fait de l'eau à la vapeur, la chaleur latente de l'évaporation s'ajoute. Pour un matériau donné, la chaleur latente de l'évaporation est égale à celle de la condensation à une température et à une pression données.

La chaleur latente dépend généralement des propriétés, de la température et de la pression du matériau. Les unités de chaleur latente s'expriment en  $\text{kJ}/\text{kg}$ .



Exemple de changement d'état  
Figure 1

## Enthalpie

La quantité d'énergie thermique dans une substance dépend de sa capacité de réchauffement, du changement de température qu'elle subit et du fait qu'elle passe ou non par un changement de phase. Cette teneur en énergie peut être exprimée quantitativement par l'utilisation d'un terme connu comme "teneur thermique", ou "enthalpie", habituellement codé "h" ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ). Pour faciliter les calculs, on suppose que l'enthalpie de toutes les substances d'un système est de zéro à une température de base. Par exemple, cette température de base est  $0^{\circ}\text{C}$  pour les tables de vapeur. Pour la plupart des tables de réfrigérants, la température de base est  $-40^{\circ}\text{C}$ .

L'enthalpie est une propriété de l'état d'une substance; c'est-à-dire que pour un matériau donné, la valeur est toujours la même, à une température et à une pression données. La modification de l'enthalpie peut se calculer comme suit :

$$Dh = H_{\text{final}} - H_{\text{initial}}$$

- L'enthalpie de l'eau ( $h_f$ ) est une mesure de la quantité d'énergie thermique contenue dans l'eau (chaleur sensible) à une température précise.
- L'enthalpie de l'évaporation ( $h_{fg}$ ) (correctement appelée la chaleur latente de vaporisation) est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour convertir un kilogramme d'eau en un kilogramme de vapeur à une pression donnée.
- L'enthalpie de la vapeur ( $h_g$ ) est l'énergie totale contenue dans la vapeur sèche saturée à une pression donnée. Cette quantité d'énergie est la somme de l'enthalpie du liquide ( $h_f$ ) et de la quantité d'énergie requise pour vaporiser un kilogramme d'eau à une température précise, ( $h_{fg}$ ) et peut être exprimée par l'équation suivante :

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

où  $h_g$  = l'enthalpie de la vapeur sèche saturée (kJ/kg)

$h_f$  = l'enthalpie de l'eau (kJ/kg)

$h_{fg}$  = l'enthalpie de l'évaporation (kJ/kg)

Les enthalpies pour l'eau et la vapeur figurent au tableau 1 de l'Annexe.

#### Calcul de la transmission de la chaleur sensible

On peut déterminer la quantité de chaleur sensible qui est transmise à une substance à l'aide de l'équation suivante :

$$Q = M \times c_p \times DT$$

où  $Q$  = la quantité de chaleur transmise (kJ/h)

$M$  = la masse de la substance (kg/h)

$c_p$  = la chaleur spécifique de la substance (kJ/kg.°C)

$DT$  = le différentiel de température

La "chaleur spécifique",  $c_p$ , d'un matériau est la quantité de chaleur absorbée par masse unitaire de matériau pour une hausse de température unitaire d'un corps, et s'exprime en kJ/kg.°C. Le tableau 2 de l'Annexe donne une liste de valeurs  $c_p$  pour divers matériaux.

On peut utiliser d'autres expressions pour la vitesse d'écoulement, pourvu que des facteurs de conversion appropriés soient incorporés dans l'équation. Par exemple, on peut calculer approximativement la chaleur sensible transmise pour l'air par l'équation suivante :

$$Q_s = f_a \times (T_1 - T_2) \times 4,345$$

où  $Q_s$  = écoulement de la chaleur sensible (kJ/h)

$f_a$  = vitesse de l'écoulement d'air (L/s)

$T_1$  = température plus chaude (°C)

$T_2$  = température plus fraîche (°C)

4,345 = un facteur qui tient compte de la chaleur spécifique de l'air sec et de sa conversion en unités courantes

Le facteur 4,345 serait légèrement augmenté dans le cas d'air contenant de la vapeur d'eau, mais cette valeur est considérée comme assez juste à des fins d'estimation.

*Exemple :* Une installation rejette 10 000 L/h d'eau de procédé à 70 °C. Si l'eau est refroidie à 20 °C, combien de chaleur pourrait être éventuellement récupérée?

$$Q = M \times c_p \times DT$$

$$\text{Masse de l'eau} = 10\,000 \text{ L/h} \times 1 \text{ kg/L}$$

$$c_p \text{ de l'eau} = 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \text{ (tiré du tableau 2)}$$

$$DT = (70 - 20)^\circ\text{C}$$

$$= 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

La quantité de chaleur qui pourrait être récupérée est donc :

$$\begin{aligned} Q &= 10\,000 \text{ kg/h} \times 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \times 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 2\,090\,000 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Comme on peut le constater en comparant les deux équations qui précèdent :

$$h_f = c_p \times DT$$

On peut aussi utiliser l'équation de l'enthalpie pour calculer la chaleur sensible disponible. Dans ce cas :

$$Q = M \times Dh_f$$

$$M = 10\,000 \text{ kg}$$

$$Dh_f = h_{\text{final}} - h_{\text{initial}}$$

$$h_{\text{final}} = 292,97 \text{ kJ/kg} \text{ (tiré du tableau 1)}$$

$$h_{\text{initial}} = 83,86 \text{ kJ/kg} \text{ (tiré du tableau 1)}$$

$$\begin{aligned} Q &= 10\,000 \text{ kg/h} \times (292,97 - 83,86) \text{ kJ/kg} \\ &= 2\,091\,100 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

*Nota :* L'écart dans la chaleur nécessaire, déterminée à l'aide des deux méthodes, découle de l'arrondissement de la valeur du  $c_p$  pour l'eau.

#### Calcul de la transmission de la chaleur latente

On peut calculer la quantité de transmission de chaleur nécessaire pour évaporer un liquide (ou condenser un gaz) à l'aide de la formule :

$$Q = M \times h_{fg}$$

où  $Q =$  la chaleur transmise (kJ/h)

$$M = \text{la masse de la substance (kg/h)}$$

$$h_{fg} = \text{chaleur latente due à l'évaporation (kJ/kg)}$$

Une liste de chaleur de vaporisation pour divers matériaux figure au tableau 3 de l'Annexe. Comme il en a déjà été question, on peut utiliser les tables de vapeur (tableau 1) pour obtenir la chaleur latente de vaporisation de l'eau sous diverses conditions.

Par exemple, l'utilisation d'un procédé amène le rejet d'un surplus de vapeur sèche à 100 °C et à la pression atmosphérique. La quantité de vapeur rejetée est de 1 000 kg/h. La quantité de chaleur latente à l'heure qu'on pourrait récupérer de cette source, si toute la vapeur était condensée en eau, peut se calculer comme suit :

$$\begin{aligned} Q &= M \times h_{fg} \\ M &= 1\,000 \text{ kg/h} \\ h_{fg} &= 2\,257 \text{ kJ/kg (tiré du tableau 1)} \\ Q &= 1\,000 \text{ kg/h} \times 2\,257 \text{ kJ/kg} \\ &= 2\,257\,000 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Il faut noter que le condensat qui est produit à 100 °C offre encore un potentiel de récupération d'énergie.

On peut calculer l'échange de chaleur latente pour l'air à l'aide d'une version modifiée de l'équation qui précède. Cette équation tient compte de l'hygrométrie. Le lecteur trouvera, dans le Manuel 10, une description détaillée du calcul de l'échange de la chaleur latente pour l'air.

## Mécanismes de Transmission Thermique

Les systèmes de récupération de la chaleur perdue comportent la transmission thermique. Il est donc essentiel de bien comprendre les principes de base des mécanismes de transmission thermique pour pouvoir évaluer les avantages de la récupération de la chaleur perdue.

La transmission thermique peut s'effectuer par trois mécanismes différents : le rayonnement, la conduction ou la convection. Ces trois mécanismes sont décrits ci-dessous.

### Rayonnement

Tous les corps chauds émettent un rayonnement sous forme de chaleur qui peut être captée par un autre corps solide se trouvant sur la trajectoire du rayonnement de la chaleur. L'exemple le plus courant de ce mode de transmission de la chaleur par rayonnement est l'énergie que la terre reçoit du soleil.

Pour que la transmission thermique par rayonnement soit importante, la température doit être élevée. Par exemple, la chaleur transmise par rayonnement ne devient importante que si la température des chaudières de procédé dépasse 600 °C. Dans la plupart des cas de récupération de chaleur perdue, la quantité de chaleur transmise par rayonnement est généralement insignifiante.

### Conduction

La conduction est le processus par lequel la chaleur passe d'une zone à température plus élevée à une zone à température plus basse à l'intérieur d'un médium (solide, liquide ou gazeux), ou entre différents média en contact physique direct.

On peut faire une expérience classique de conduction thermique en tenant l'extrémité d'une tige de métal dans la flamme. L'expérience nous démontre que la chaleur se propage dans la barre, de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide, rendant celle-ci trop chaude pour être tenue à la main.

L'effet observable de la conduction thermique est une égalisation de la température entre les corps en contact. Cependant, si les différences de température sont maintenues par l'addition ou le retrait de chaleur à différents points, un flux continu de chaleur s'établira de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide.

La conduction est la seule méthode de circulation de la chaleur à utiliser pour les solides. La conduction est aussi une méthode importante pour les fluides, mais dans les média non solides, elle est habituellement combinée à la convection et, dans certains cas, au rayonnement.

### Convection

Il se produit une transmission thermique par convection lorsqu'un gaz ou un liquide en mouvement entre en contact avec la surface d'un solide d'une température différente. La convection se produit en parallèle avec la transmission thermique par conduction et l'augmente à mesure que le fluide réchauffé (ou refroidi) est chassé de la surface

chaude (ou froide) du solide et qu'un nouveau fluide le remplace. Plus le fluide circule rapidement, plus le rythme de transmission thermique est élevé, à une différence de température donnée. La convection naturelle implique le mouvement du fluide sur la surface chauffante uniquement par l'effet de la chaleur. Un exemple type est le chauffage de l'eau par un chauffe-eau dans lequel un serpentin chauffant est immergé. Dans le cas de la convection forcée, on fait appel à une force motrice, telle qu'une pompe ou un ventilateur, pour faire circuler le fluide.

## Techniques de Récupération de la Chaleur

Il existe quatre techniques généralement utilisées pour récupérer la chaleur perdue. Ce sont :

- L'utilisation directe
- L'échange de chaleur
- La pompe à chaleur
- La surcompression de la vapeur

Les deux premières techniques utilisent la chaleur perdue "telle quelle". Dans de telles circonstances, la chaleur perdue est de qualité suffisante pour être utilisable ailleurs.

La chaleur perdue est souvent disponible à une température plus basse que la charge potentielle requise. "Réchauffer la chaleur perdue" signifie élever le niveau énergétique d'un courant de chaleur perdue afin de s'en servir de façon plus utile qu'autrement. On fait alors appel à des pompes thermiques ou à la compression directe de la vapeur lorsque la chaleur perdue est sous forme de vapeur.

### L'utilisation directe

L'usage direct de la chaleur, comme son nom l'indique, touche l'utilisation des rejets de chaleur perdue "telle quelle". Parmi des exemples types, on trouve :

- l'utilisation des gaz produits par une chaudière pour le séchage;
- l'utilisation comme eau chaude de l'eau de refroidissement "usagée" provenant d'un échangeur de chaleur;
- l'utilisation de l'air chaud provenant du local technique pour le chauffage d'espaces de rangement.

Dans certains cas, de simples modifications minimales peuvent suffire pour pouvoir utiliser les rejets de chaleur perdue. Cependant, il faut faire particulièrement attention à l'état de ces rejets de chaleur perdue, tout spécialement en ce qui a trait aux polluants éventuels, tels que les produits chimiques dangereux ou une humidité indésirable.

### L'échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur constitue un moyen de transmettre la chaleur d'un courant à un autre sans qu'il y ait mélange réel des deux courants. Il peut être nécessaire de séparer les deux courants pour l'une ou l'autre des raisons suivantes :

- pour empêcher un des courants de contaminer l'autre (extrêmement important dans la transformation des aliments, en particulier pour éviter la contamination de l'eau potable ou des denrées alimentaires);
- pour maintenir l'écart de pression qui peut exister entre les deux courants.

Il peut s'avérer nécessaire, dans certains cas, d'utiliser un troisième fluide. Par exemple, on peut utiliser un courant intermédiaire pour transporter la chaleur perdue sur de longues distances, lorsque la source est éloignée de la demande.

Dans un échangeur de chaleur, les deux fluides peuvent circuler :

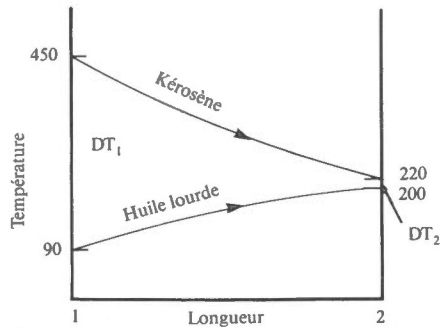
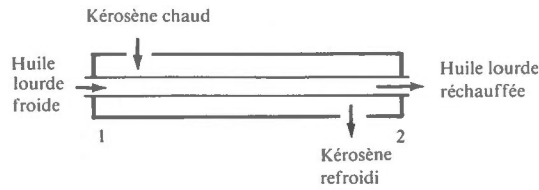
- dans des directions opposées ou "à contre-courant";
- dans la même direction, ou "en courants parallèles";
- l'un perpendiculaire à l'autre, ou "en courants transversaux".

La figure 2 représente les deux premières de ces configurations et illustre les profils de température des fluides chaud et froid au moment où ils traversent l'échangeur de chaleur.

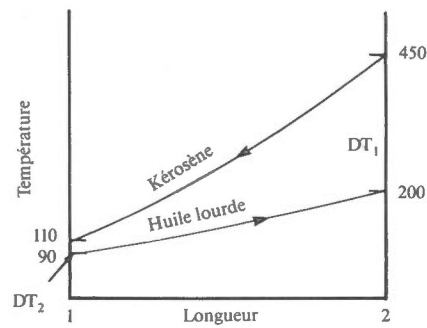
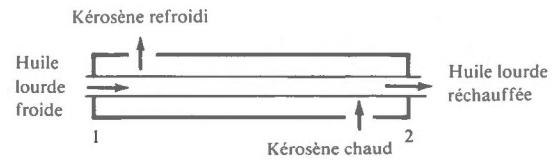
L'équation pour la transmission thermique dans un échangeur de chaleur est :

$$Q = U \times A \times (\text{LMTD})$$

où	Q	= le taux de transmission de la chaleur (kJ/s)
	U	= le coefficient global de transmission de la chaleur (kJ/m <sup>2</sup> ·s·°C)
	A	= la surface de transmission de la chaleur (m <sup>2</sup> )
	LMTD	= écart logarithmique moyen de température (°C)



Échangeur de chaleur à courants parallèles



Échangeur de chaleur à contre-courant

### Profils de température des échangeurs de chaleur

Figure 2

Les valeurs de "U" ont été déterminées pour une série d'applications de l'échange thermique. Le tableau 4 de l'Annexe représente une liste des valeurs pour de nombreuses applications ordinaires. Pour des applications autres que celles qui sont énumérées, des tableaux répertoriant les valeurs "U" ont été publiés.

Comme on peut le voir à la figure 2, les profils de température pour les fluides chaud et froid le long de l'échangeur ne suivent pas des lignes droites. Ainsi, l'écart de température entre les deux courants ne peut se calculer à partir d'une moyenne arithmétique des écarts de température entre l'entrée et la sortie.

Dans ces conditions, on utilise "l'écart logarithmique moyen de température" qui est une représentation précise des conditions réelles dans un échangeur. On le calcule comme suit :

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

où  $DT_1$  = l'écart de température entre les fluides chaud et froid à une extrémité de l'échangeur de chaleur

$DT_2$  = l'écart de température entre les fluides chaud et froid à l'autre extrémité de l'échangeur de chaleur

ln = indique la base de logarithme naturel

Nota : Si  $DT_1 = DT_2$ , alors  $\text{LMTD} = DT_1 = DT_2$ .



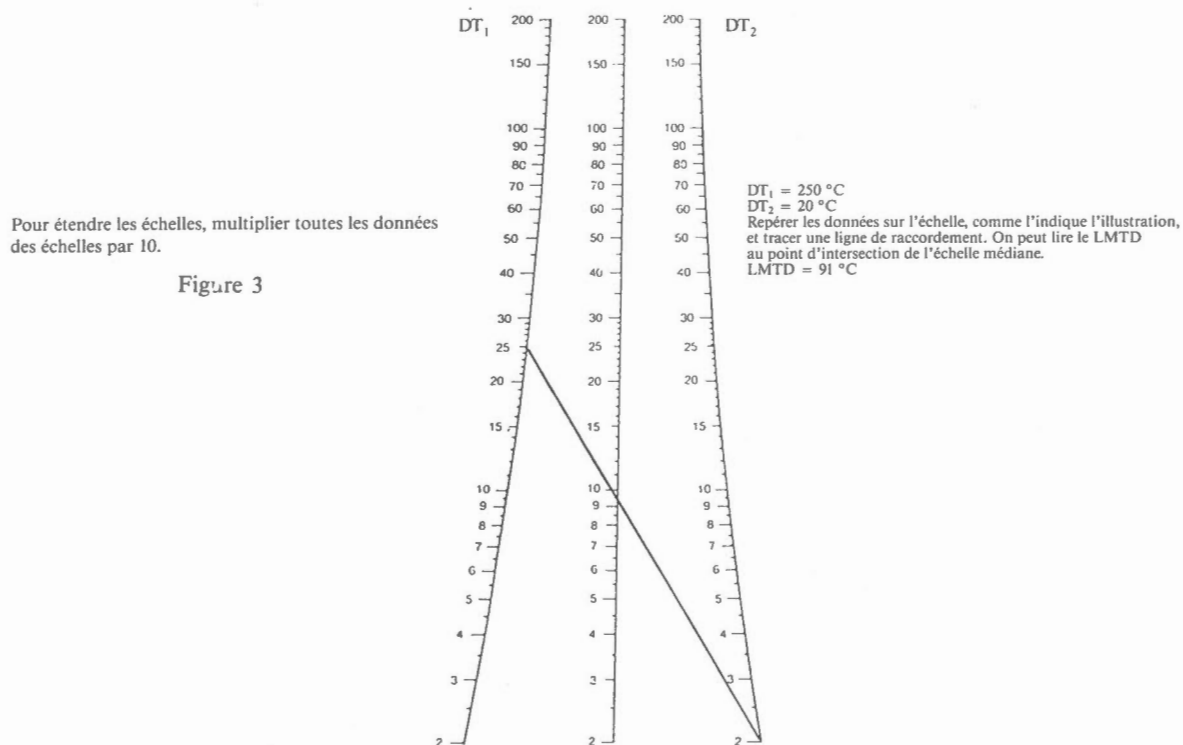
Pour l'exemple illustré à la figure 2b, le LMTD pour l'échangeur de chaleur à contre-courant serait :

$$\text{où } DT_1 = (450 - 200)^\circ\text{C} = 250^\circ\text{C}$$

$$DT_2 = (110 - 90)^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{LMTD} &= \frac{250 - 20}{\ln\left(\frac{250}{20}\right)} \\ &= 91^\circ\text{C} \end{aligned}$$

La figure 3 peut aussi être utilisée pour déterminer graphiquement la valeur LMTD.



Théoriquement, on devrait pouvoir chauffer 10 L/s d'eau de 20 °C à 25 °C en utilisant 10 L/s d'eau chaude à 30 °C, si un échange parfait de chaleur était possible. Cependant, en pratique, c'est impossible. Des facteurs tels que l'inefficacité dans la vitesse de transmission thermique due à l'encrassement, les limites imposées par les dimensions de l'équipement et la perte de chaleur dans l'environnement nécessitent une approche plus pratique.

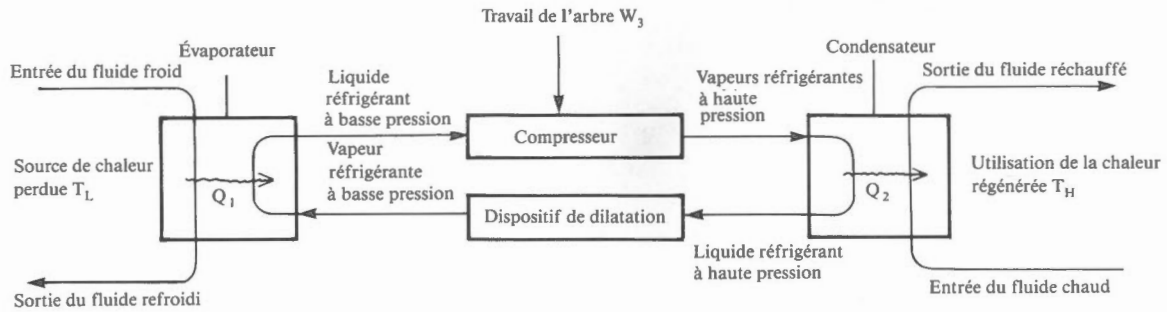
Dans la pratique courante, il faut sélectionner une "température d'approche" raisonnable (l'écart de température entre l'eau de refroidissement et le fluide qui doit être refroidi). Dans le cas d'applications de récupération de la chaleur perdue, une température d'approche de 5 à 10 °C est normale. Pour certains procédés, il peut être nécessaire d'obtenir des températures d'approche de 2 à 5 °C. Cependant, plus la température d'approche est basse, plus l'échangeur thermique doit être grand et, par conséquent, plus le coût sera élevé.

### La pompe à chaleur

La pompe à chaleur constitue un moyen d'élever la température de la chaleur perdue pour la rendre plus utilisable. Par exemple, on peut se servir d'une pompe à chaleur pour récupérer la chaleur des gaz d'échappement d'un bâtiment, élever la température de cette chaleur et la recycler pour le chauffage de ce même bâtiment.

Le Module II, Réfrigération et pompes à chaleur, expose la théorie des pompes à chaleur et des définitions; le lecteur trouvera plus de détails en consultant ce module.

La figure 4 illustre les éléments d'un système de pompe à chaleur. La chaleur perdue à basse température est utilisée pour évaporer un réfrigérant liquide à basse pression dans un évaporateur. Le réfrigérant, sous forme de vapeur, est ensuite comprimé pour hausser sa température, grâce à l'absorption de l'énergie mécanique de la compression. La vapeur à haute température traverse alors le condensateur, où sa chaleur se libère au moment où elle se condense en liquide. Le fluide condensé est ensuite dilaté, ce qui abaisse sa température et sa pression, avant de retourner à l'évaporateur.



Cycle d'une pompe à chaleur  
Figure 4

Pour exprimer le rendement d'une pompe à chaleur, on utilise le terme "coefficient de performance" (COP), qui se définit comme suit :

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W}$$

où  $Q_H$  = la chaleur totale récupérée dans le condensateur (kJ ou W)  
 $W$  = le travail exécuté dans le compresseur (kJ ou W)

La valeur du COP dépend de l'écart qui existe entre la température à laquelle la chaleur est dégagée et celle à laquelle la chaleur est extraite, c'est-à-dire le degré de régénération nécessaire. Plus l'écart est grand, plus la quantité de travail à fournir est grande et plus le coefficient de performance est faible.

En termes pratiques, un COP de 5, par exemple, signifie que pour chaque unité d'énergie utilisée à faire fonctionner la pompe à chaleur, on retirera 5 unités.

### La surcompression de la vapeur

Dans les cas où un courant de chaleur perdue se présente sous forme de vapeurs à basse température, la surcompression est souvent une option valable. La surcompression de la vapeur implique la compression de la chaleur perdue sous forme de vapeur pour en élever la température et la pression afin qu'elle devienne une source d'énergie utilisable. La vapeur comprimée retourne dans le circuit où elle fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation. Le seul apport énergétique est donc l'alimentation du compresseur. Les coefficients de performance des surcompresseurs de vapeur peuvent être très élevés (6 - 10).

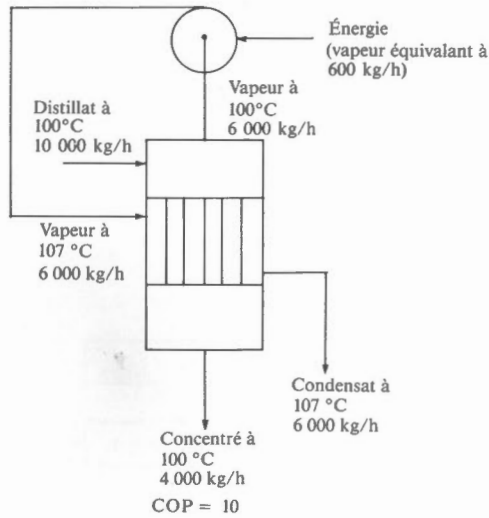
La surcompression de la vapeur peut se faire mécaniquement ou thermiquement.

#### • Surcompression mécanique :

La surcompression mécanique de la vapeur se fait habituellement à l'aide de compresseurs centrifuges et volumétriques. Normalement, les vapeurs comprimées sont recyclées pour être utilisées de nouveau par le dispositif qui produit les vapeurs à basse pression. L'évaporation est une application type de ce procédé.

Les coefficients de performance pour ces systèmes sont très élevés (6-10), étant donné qu'ils nécessitent un niveau relativement faible de régénération d'énergie.

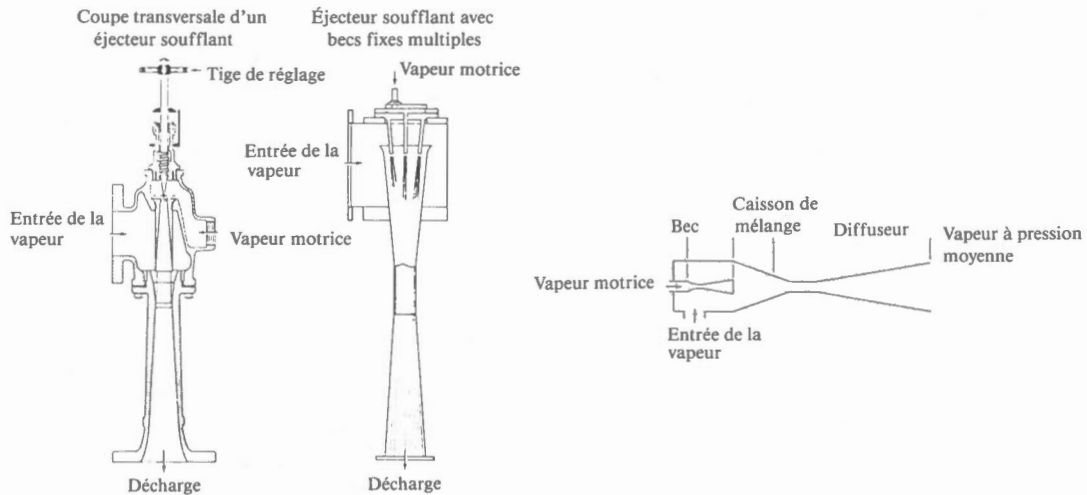
Le principe de la surcompression mécanique de la vapeur est illustré à la figure 5. Le fluide préchauffé entre dans le corps de l'évaporateur à une température voisine de son point d'ébullition et la vapeur est dégagée à 100 °C. Après avoir été comprimée dans une soufflerie centrifuge, cette vapeur retourne à l'évaporateur à une pression absolue de 129 kPa, correspondant à une température de saturation de 107 °C. La vapeur peut alors transmettre sa chaleur à la solution et augmenter la production de vapeur. S'il n'est pas déjà rendu à son point d'ébullition, comme dans l'exemple précédent, le fluide peut être préchauffé à l'aide du condensat et du concentré.



**Principe d'évaporation par compression mécanique de la vapeur**  
Figure 5

• **Surcompression thermique :**

On obtient une surcompression thermique de la vapeur en combinant une vapeur à basse pression à une vapeur à haute pression pour produire une vapeur à pression moyenne. Pour ce faire, on utilise des éjecteurs soufflants. Comme le montre la figure 6, le volume total de la vapeur régénérée et de son enthalpie est égal à la somme des quantités de vapeur à haute et à basse pression et de son enthalpie.



**Éjecteurs classiques utilisés pour la surcompression thermique**  
Figure 6

Le coefficient de performance d'un thermocompresseur est égal à :

$$\text{COP} = \frac{Q_h}{Q_m}$$

où  $Q_h$  = la chaleur dégagée (kJ ou W)  
 $Q_m$  = la quantité de chaleur produite par la vapeur motrice (kJ ou W)

Le COP est élevé lorsque :

- la pression de la vapeur motrice est élevée;
- le degré d'augmentation de température nécessaire est faible.

## Opérations à étapes multiples

Dans bien des cas, on peut diviser un processus de production comportant l'usage de chaleur (ou de refroidissement) en un certain nombre d'étapes en vue d'obtenir une cascade d'énergie. On désigne cette méthode par le nom d'opérations à étapes multiples. Parmi les exemples d'opérations à étapes multiples classiques, on compte :

- l'évaporation à effets multiples
- la vaporisation éclair
- les autres opérations à étapes multiples.

Parmi ces exemples, le dernier est probablement le plus facile à utiliser dans la plupart des situations. Fondamentalement, ces opérations à étapes multiples sont un prolongement ou une application pratique du vaste domaine des techniques de récupération de la chaleur dont il a été question précédemment. Cette technique consiste à interrelier de l'équipement de traitement au moyen d'échangeurs thermiques, de pompes à chaleur, etc.

L'évaporation à effets multiples et la vaporisation éclair sont aussi des opérations à étapes multiples, bien que leurs applications soient quelque peu limitées.

## Méthodes de Vérification Énergétique

Les systèmes utilisés dans les installations industrielles, commerciales et gouvernementales offrent des possibilités de gestion de l'énergie. La première mesure à prendre en vue de réduire la consommation de combustible et d'électricité est de procéder à une vérification énergétique. Ce genre de vérification sert à suivre le cheminement de l'énergie tout au long de son utilisation, de l'entrée à la sortie, et à pointer ultimement les endroits où des économies d'énergie pourraient être réalisées. Les mesures d'économie d'énergie peuvent aller des projets requérant une main-d'oeuvre considérable au simple entretien de routine et aux mesures à faibles coûts. Bon nombre de ces possibilités peuvent être détectées durant une vérification sommaire des installations. La vérification donne de meilleurs résultats si elle est exécutée par "une paire d'yeux neufs", généralement familiers avec la gestion de l'énergie. Les éléments types permettant d'économiser l'énergie, relevés au cours d'une vérification sommaire, sont les chauffe-eau dont la température a été réglée à un degré inutilement élevé et l'isolation thermique endommagée. Une administration et un personnel d'exploitation vigilants, ainsi que de bonnes méthodes d'entretien, peuvent contribuer à réduire la dépense énergétique et à économiser de l'argent.

Mais les points à relever lors d'une vérification sommaire ne sont pas tous aussi faciles à analyser que ceux décrits ci-dessus.

Une vérification de diagnostic permet d'établir mathématiquement le potentiel d'économie d'énergie obtenue à la suite de modifications et de calculer l'argent ainsi économisé. Il est possible de procéder à de simples calculs des sommes récupérées pour établir la viabilité financière de cette solution, une fois que le coût estimatif des modifications est connu.

Pour plus amples renseignements sur la vérification énergétique, se reporter au manuel "Analyse financière énergétique", dans cette série.

Les mesures pour réaliser ces possibilités de gestion de l'énergie peuvent se diviser en trois catégories.

- L'entretien de routine signifie une mesure de gestion de l'énergie qui est répétée de façon régulière, au moins une fois par année. Ce pourrait être, par exemple, la calibration d'instruments importants.
- Le coût modique signifie une mesure de gestion de l'énergie qui est prise une fois et dont le coût n'est pas considéré comme élevé. Un exemple de mesure à coût modique est l'utilisation directe d'une source de chaleur perdue.
- La récupération signifie une mesure de gestion de l'énergie qui est prise une seule fois mais dont le coût est élevé. Un exemple est l'installation d'un économiseur d'énergie pour système de chauffage à eau chaude.

Il faut remarquer que la différence entre le coût modique et la récupération est habituellement fonction de l'importance et de la catégorie de l'organisme, ainsi que de sa situation financière.



# SOURCES ET APPLICATIONS POSSIBLES DE LA CHALEUR PERDUE

## Introduction

Une vérification énergétique peut souvent mener à la découverte de diverses sources d'énergie perdue dans une installation. La réduction ou l'élimination des pertes de chaleur devrait être la préoccupation première. C'est seulement après que des mesures en ce sens ont été prises qu'on peut envisager sérieusement une récupération de la chaleur perdue.

La principale raison d'être de tout projet de récupération de chaleur perdue est l'existence d'une demande pour cette chaleur récupérée. Les utilisations possibles de la chaleur récupérée, qui constituent une partie intégrante du processus de vérification, devraient être évidentes. On peut alors établir une concordance entre la chaleur disponible et la chaleur requise afin de définir un éventail d'options de récupération. Ces options peuvent comporter le recours à des échangeurs de chaleur, des pompes à chaleur, des opérations à étapes multiples ou des vaporisateurs éclairés, dans le but d'optimiser l'usage de l'énergie disponible.

La figure 7 montre des exemples de sources de chaleur perdue et des gammes de températures types, ainsi que des suggestions pour les utilisations de la chaleur récupérée.

## Formulation de Projets de Récupération de la Chaleur Perdue

Un certain nombre de facteurs peuvent avoir une incidence importante sur le succès des projets de récupération de la chaleur perdue. L'examen de ces facteurs permet d'éliminer les options qui ne sont pas viables à une étape préliminaire du processus et d'économiser ainsi temps et argent. Les facteurs à considérer sont :

- **La compatibilité entre la source et la demande** : une bonne concordance dans la quantité et la qualité de la chaleur est souvent le facteur indépendant le plus important pour le succès des projets de récupération de chaleur perdue. La compatibilité est aussi très dépendante des horaires de fonctionnement de l'équipement et du système. Dans ce contexte, il est primordial de tenir compte du besoin d'emmagasiner l'énergie. Les facteurs d'utilisation les plus élevés et, par conséquent, la perspective de rentabilisation la plus acceptable sont généralement indispensables à l'intégration des projets de récupération de chaleur perdue dans un système.

En voici quelques exemples :

- le préchauffage de l'eau d'alimentation ou de l'air de combustion par les gaz d'échappement de la chaudière, l'injection et le condensat;
- la vapeur à basse pression récupérée dans les turbines;
- le préchauffage de l'air d'appoint à partir de l'air d'échappement.

On peut avoir recours à l'accumulation thermique pour augmenter la compatibilité entre une source et la demande lorsque leur horaire de fonctionnement ne coïncide pas. Comme son nom l'indique, l'accumulation thermique comporte la collecte de l'énergie thermique (calorifique ou réfrigérante) en vue d'une utilisation ultérieure. Pour de plus amples renseignements sur le sujet, voir le Module 19, "Accumulation thermique".

- **Accessibilité** : La source de chaleur perdue devrait être facilement accessible. Cela veut dire que le courant de chaleur perdue doit être enfermé ou aussi concentré que possible. La chaleur perdue provenant des gaz d'échappement, par exemple, est facilement accessible étant donné qu'elle est contenue à l'intérieur du corps des cheminées ou des conduits. La chaleur perdue contenue dans l'air d'une pièce est, par contre, moins facile d'accès étant donné qu'il faut plus d'efforts pour l'enfermer et l'extraire.
- **La distance entre la source et la demande** : Plus la distance est courte entre la source et la demande, plus un projet a de chances d'être viable. Le coût d'un système intermédiaire de transmission thermique et les pertes thermiques des tuyaux et des conduits sont des enjeux clés qui peuvent avoir un effet négatif sur la viabilité d'un projet de récupération de chaleur perdue.

Types d'installation	Source de chaleur perdue	Température (°C)	Applications de la chaleur récupérée
		Elevée	
Industrielle	Échappement d'une fournaise électrique réfractaire	1 600 - 2 700	Vapeur de procédé, air de combustion de préchauffage, chauffage de locaux.
	Échappement d'un four d'affinage du nickel	1 375 - 1 550	
	Échappement d'un incinérateur pour les gaz de fumée	650 - 1 550	
	Échappement de l'incinérateur de déchets solides	650 - 1 000	
	Échappement d'un four de réchauffement		
		Moyenne	
Industrielle	Échappement d'une turbine à gaz	375 - 550	Air de combustion de préchauffage, séchage direct, chauffage de locaux, chauffage d'eau de procédé, préchauffage d'eau de chaudière.
	Échappement d'une génératrice diesel	375 - 500	
	Échappement d'une chaudière à vapeur	230 - 250	
Commerciale	Échappement d'un four de séchage et de cuisson	230 - 600	Air de combustion de préchauffage, chauffage d'eau de procédé, préchauffage d'eau de chaudière.
	Échappement d'un séchoir	150 - 230	
	Gaz d'échappement d'un appareil de chauffage	175 - 230	
		Basse	
Industrielle	Échappement d'une chaudière à vapeur	150 - 230	Chauffage de locaux, air de combustion de préchauffage, chauffage de procédé.
	Échappement d'un séchoir	80 - 150	
	Condensats de vapeur de procédé	55 - 95	
	Vapeur éclair de réservoir de condensat		
	Condensats usés de procédé		
	Écoulements chauds de procédé		
	Injections de combustible dans la chaudière		
Eau de refroidissement de génératrice diesel			
Commerciale	Échappement d'une chaudière à vapeur	85 - 1 500	Chauffage de locaux, air de combustion de préchauffage, chauffage de procédé, modération de la température d'air d'aération.
	Échappement d'un séchoir	150 - 230	
	Gaz d'échappement d'un appareil de chauffage		
Gouvernementale	Échappement d'une chaudière à vapeur	150 - 230	Chauffage de locaux, air de combustion de préchauffage, modération de la température d'air d'aération, chauffage d'eau domestique.
	Gaz d'échappement d'un appareil de chauffage	175 - 230	
		Très basse	
Industrielle	Eau de refroidissement venant de compresseurs d'air	25 - 50	Chauffage de locaux, utilisation directe de l'eau (chaude), air de combustion.
	Eau de refroidissement venant de centrales thermiques	15 - 50	
	Air chaud au niveau du plafond	25 - 50	
	Écoulements d'eaux usées de procédé		
	Produits chauds		
Commerciale	Conditionnement de l'air et réfrigération	30 - 45	Chauffage de locaux, chauffage d'eau domestique, modération de la température d'air d'aération.
	Échappement du condensateur		
	Eaux usées de procédé (blanchisserie, etc.)	30 - 45	
Gouvernementale	Conditionnement de l'air et réfrigération	30 - 45	Chauffage de locaux, chauffage d'eau domestique, modération de la température d'air d'aération.
	Échappement du condensateur		
	Échappement de la cuisine		
	Échappement du ventilateur		
	Échappement d'éjecteurs à vide		
Échappement d'une friteuse			

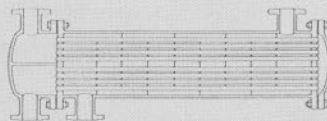
Sources et utilisations possibles de la chaleur perdue  
Figure 7

- **La forme et l'état de la source de chaleur perdue :** Ce point revêt une importance particulière dans les cas où l'on songe à installer des échangeurs de chaleur. Par exemple, la récupération de la chaleur provenant de gaz coûte plus cher que celle de la chaleur provenant de vapeurs ou de liquides, en raison des coefficients de transmission thermique peu élevés. L'encrassement et la corrosion compliquent davantage cette récupération puisqu'il faut tenir compte de l'usure et de la corrosion des échangeurs de chaleur.
- **Qualité du produit :** Si l'on doit récupérer la chaleur d'un produit, il faut tenir compte du risque possible de contamination de ce produit par le fluide de transmission thermique. Ce point est particulièrement important dans les industries alimentaires.
- **Niveau de réchauffement nécessaire :** Lorsqu'on envisage de récupérer la chaleur provenant d'une source dont la température est inférieure à celle qui est nécessaire, le niveau de hausse de température de la chaleur est un facteur extrêmement important à considérer. Il faut aussi tenir compte des capacités de l'équipement de réchauffement disponible dans le commerce lorsqu'on détermine la faisabilité de projets d'augmentation de température de la chaleur.
- **Les aspects réglementaires :** Dans certains cas, les exigences de règlements spéciaux, telles que celles qu'on rencontre dans les industries pharmaceutiques et alimentaires, peuvent influencer sur la nature et le genre des projets de récupération. Par exemple, l'air chaud provenant d'endroits potentiellement contaminés n'est peut-être pas acceptable pour le chauffage direct d'un lieu où l'on transforme les aliments.





# APPAREILLAGE



## Introduction

Cette section du manuel met l'accent sur l'équipement disponible pour les techniques suivantes de récupération et d'utilisation de chaleur perdue :

- l'utilisation directe
- l'échange de chaleur
- la pompe à chaleur
- la surcompression de la vapeur.

L'utilisation directe de la chaleur perdue ne nécessite en soi aucune pièce d'équipement spécialisée. Un réacheminement de la tuyauterie, l'addition de conduits et éventuellement l'installation d'un certain type de système d'accumulation thermique, voilà souvent tout ce qu'il faut. Avec une imagination créatrice et un peu d'ingéniosité, il est possible de tirer parti d'une source de chaleur perdue et de s'en servir d'une façon simple et rentable.

Ce sont les échangeurs de chaleur et les pompes à chaleur qui ont le plus vaste éventail d'applications, quel que soit le genre d'industrie. La surcompression de la vapeur peut être utilisée dans certaines circonstances. Cependant, elle est généralement limitée aux plus grandes usines et aux procédés complexes.

Cette section du manuel se termine par un commentaire sur l'équipement utilisé dans les opérations à étapes multiples.

## Matériel d'Échange de Chaleur

Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour la transmission de l'énergie d'un courant à un autre, à moins que le courant caloporteur puisse être utilisé directement. Leur utilisation par l'industrie est largement répandue et la technologie est bien établie.

Les échangeurs de chaleur sont offerts dans de nombreux modèles et configurations, afin de convenir à une diversité de besoins, de matériaux, de températures et de conditions de fonctionnement et comprennent les éléments suivants :

- calandre multitubulaire
- chaudières de récupération de chaleur perdue
- tube à ailettes
- serpentins
- tubes concentriques
- plaques
- système à fonctionnement circulaire
- roues à chaleur
- thermosiphons.

La figure 8 peut servir de guide général dans la sélection des échangeurs de chaleur pour des applications de récupération de chaleur perdue. Cependant, il faut analyser en détails chaque situation pour s'assurer de faire le choix le plus judicieux. Les conseils d'un expert dans le choix de l'équipement et les contacts avec les fournisseurs en ce qui concerne la disponibilité de l'équipement peuvent se traduire par des économies de temps et d'argent et par un fonctionnement sans problème.

Les caractéristiques de conception, les applications types de la récupération de chaleur perdue et les rendements des récupérateurs de chaleur qui y sont décrits se rapportent aux dispositifs d'échange de chaleur les plus courants. Il existe néanmoins d'autres configurations et d'autres applications.

Matériel commercial d'échange de chaleur	Caractéristiques des unités de récupération												
	Basse température, de moins de 0 à 120 °C	Température moyenne, de 120 à 650 °C	Haute température, 650 °C et plus	Récupération de l'humidité	Grands écarts de température permis	Unités modulaires offertes	Possibilité de modifications	Aucune contamination transmise	Format compact	Échangeur de chaleur gaz-gaz	Échangeur de chaleur gaz-liquide	Échangeur de chaleur liquide-liquide	Gaz corrosifs permis moyennant une construction particulière
Échangeur de chaleur à calandre multitubulaire	●	●			●	●	●	●	●		●	●	
Échangeur de chaleur à tubes à ailettes	●	●			●	●	●	●	●		●		1
Chaudière de récupération de la chaleur perdue	●	●				●	●	●			●		
Échangeur de chaleur à serpents	●	●				●	●	●	●			●	
Échangeur de chaleur à tubes concentriques	●	●			●	●	●	●	●		●	●	●
Récupérateur de chaleur pour l'échangeur à tubes concentriques		●	●		●	2	●	●		●			●
Échangeur de chaleur à plaques	●	●			●	●	●	●		●	●	●	●
Système à fonctionnement circulaire	●	●			●	●	●	●		●	●	●	
Roue à chaleur métallique	●	●		3		●	●	4	●	●			●
Roue à chaleur hygroscopique	●			●		●	●	4	●	●			
Roue à chaleur en céramique		●	●		●	●	●		●	●			●
Thermosiphon	●	●			5	●	●	●	●	●			●

1. Peut être fabriqué de matériaux inoxydables, mais il faut envisager la possibilité de dommages importants à l'équipement en cas de fuites ou de ruptures de la tubulure.
2. Les articles offerts sur stock sont de faible capacité seulement.
3. Sujet controversé. Certaines marques prétendent récupérer l'humidité, mais la prudence est de mise.
4. En ajoutant une section pour la purge, la contamination mutuelle peut être limitée à moins de 1 % de la masse.
5. Les températures permises et les écarts de températures sont limités par les propriétés d'équilibrage des phases du fluide interne.

**Caractéristiques de fonctionnement et d'utilisation des échangeurs de chaleur**  
Figure 8

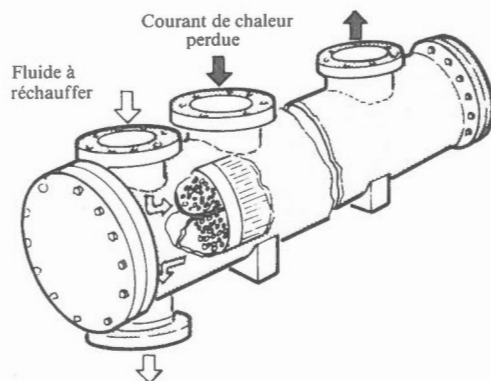
Les rendements des récupérateurs de chaleur sont présentés à titre d'information seulement. Ici encore, les conseils d'un expert sont nécessaires pour établir avec précision la vitesse d'écoulement, les dimensions d'un échangeur de chaleur, etc.

A noter que les échangeurs de chaleur à rendement élevé ne sont pas toujours souhaitables ni nécessaires dans les applications de récupération de chaleur perdue. A moins de pouvoir utiliser toute la chaleur d'un courant de chaleur perdue, un équipement de récupération de chaleur ayant un rendement moindre peut suffire pour répondre à la demande. Un dispositif moins performant peut aussi avoir d'autres avantages tels que des passages plus grands (moins de chutes de pression), un entretien plus facile, etc.

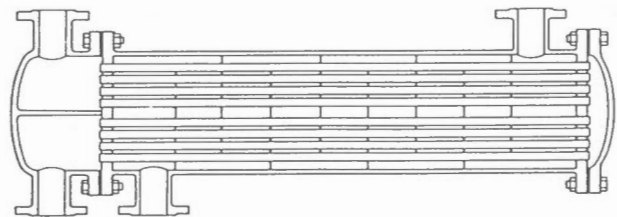
### Échangeur de chaleur à calandre multitubulaire

De tous les échangeurs de chaleur utilisés, l'échangeur à calandre multitubulaire est le plus répandu. Son coût est relativement modique comparativement aux autres genres et on en trouve dans une infinie variété de dimensions, de capacités, de matériaux, etc. C'est pourquoi l'échangeur de chaleur à calandre multitubulaire devrait être l'une des premières configurations à évaluer dans tout projet éventuel de récupération de chaleur perdue.

La figure 9 illustre un modèle classique d'échangeur de chaleur à calandre multitubulaire. Cet échangeur gaz-liquide ou liquide-liquide consiste en un faisceau de petits tubes parallèles contenus à l'intérieur d'une calandre cylindrique. Un des fluides circule à l'intérieur des tubes pendant que l'autre circule sur le faisceau de tubes, à l'intérieur de la calandre. Des chicanes sont placées à l'intérieur de la calandre, comme le montre la figure 10, afin que dans chaque section, le fluide circule à travers le faisceau de tubes en un courant descendant dans la première section, ascendant dans la deuxième, et ainsi de suite. Selon la disposition des distributeurs aux deux extrémités de l'échangeur de chaleur, on peut aménager un ou plusieurs parcours à l'intérieur du tube. Dans le cas d'une disposition à deux parcours, l'entrée du distributeur est divisée de façon que le fluide circulant dans les tubes parcourt la moitié des tubes en un sens, fasse demi-tour et revienne à son point de départ par l'autre moitié des tubes, comme l'illustre la figure 9. On peut obtenir deux, quatre ou six parcours en réaménageant la disposition d'un distributeur.



Échangeur de chaleur à calandre multitubulaire  
Figure 9



Échangeur de chaleur à calandre multitubulaire avec chicanes :  
Tube à deux parcours, calandre à un parcours.  
Figure 10

Il est plus onéreux de concevoir la calandre pour qu'elle résiste à de fortes pressions afin que le fluide à haute pression circule dans les tubes alors que le fluide à basse pression circule dans la calandre. Lorsque la chaleur perdue est sous forme de vapeur, celle-ci se condense habituellement pour céder sa chaleur latente au liquide à réchauffer. Dans cette application, la vapeur est presque toujours contenue à l'intérieur de la calandre. Si on tentait l'inverse, la condensation des vapeurs à l'intérieur des tubes parallèles de faible diamètre entraînerait un écoulement instable.

Les échangeurs de chaleur à calandre multitubulaire sont offerts dans une grande variété de dimensions normalisées et dans de nombreuses combinaisons de matériaux pour les tubes et la calandre. La figure 11 présente un aperçu sommaire des caractéristiques de deux extrêmes dans les échangeurs à calandre multitubulaire qu'on trouve sur le marché afin d'illustrer le large éventail des volumes que ces appareils peuvent traiter.

## SOMMAIRE DE L'ÉVENTAIL DES DIMENSIONS ET DES DÉBITS DES CALANDRES ET DES TUBES

Diamètre de la calandre	Longueur hors tout	Nombre de parcours offerts	Circulation	
			Débit dans les tubes	Débit dans la calandre
100 mm	750 mm	2;4;6	7.5 à 115 L/s	55 à 250 L/s
760 mm	400 mm	2;4;6	950 à 12 000 L/s	750 à 7 300 L/s

Figure 11

Les pressions prévues en fonction de la dimension des tubes pour les échangeurs de chaleur à calandre multitubulaire vont de 860 à 1 050 kPa. Les températures maximales de fonctionnement sont habituellement de 200 °C. La chute de pression dans la calandre est normalement de l'ordre de 3 à 30 kPa. En choisissant les éléments, il est souhaitable de maintenir les vitesses d'écoulement à l'intérieur des tubes à moins de 2,3 m/s. Les raisons sont :

- La circulation de l'eau à une vitesse de 2,3 m/s ou plus peut avoir un effet d'érosion et entraîner une usure rapide de la tubulure.
- Le moindre petit dépôt dans un élément qui a été réglé à une vitesse élevée peut causer une chute très abrupte de la capacité calorifique.
- La chute brutale de pression résultant de vitesses très élevées peut rendre la sélection d'une pompe difficile et coûteuse.

Les vitesses d'écoulement à l'intérieur de la calandre sont normalement inférieures à 1,2 m/s.

Le rendement habituel de la récupération de la chaleur pour ces appareils est de l'ordre de 60 à 80 pour cent.

Les échangeurs à calandre multitubulaire sont généralement difficiles à nettoyer et ne sont pas très indiqués pour les applications en milieu souillé. Les plaques d'extrémités et les têtes peuvent habituellement s'enlever pour permettre le nettoyage des tubes. Un faisceau de tubes amovible facilite le nettoyage de l'intérieur de la calandre, mais il augmente le coût de l'appareil et diminue sa durée de vie utile.

Les applications habituelles comprennent le chauffage des liquides ou des gaz par la récupération de la chaleur des condensats provenant de :

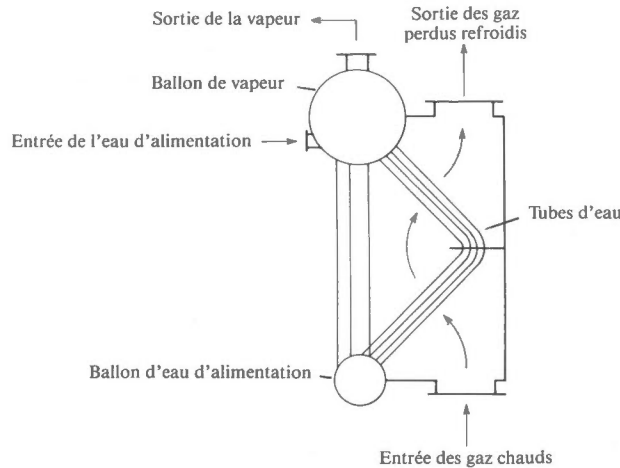
- systèmes de réfrigération et de climatisation;
- vapeur de traitement;
- portes de chaudière, grilles et supports de tube;
- moteurs, compresseurs d'air, paliers, lubrifiants;
- procédés de distillation;
- purge de la chaudière.

### Chaudières de récupération de chaleur perdue

Conçues d'après l'échangeur à calandre multitubulaire, les chaudières de récupération sont utilisées pour récupérer la chaleur perdue provenant des gaz à haute température qui s'échappent des cheminées d'usine. Les chaudières de récupération sont généralement des chaudières munies de tubes d'eau qui utilisent de grands volumes de vapeur à haute température comme source de chaleur à la place du combustible classique. Les sources de chaleur habituelles sont les gaz d'échappement chauds provenant d'installations telles que les turbines à gaz, les incinérateurs, les fours et les moteurs alternatifs. Lorsque la chaleur perdue provenant des gaz d'échappement devient insuffisante pour produire la quantité de vapeur nécessaire aux applications prévues, il est parfois possible d'ajouter des brûleurs auxiliaires. Ces systèmes brûlent du combustible dans la chaudière de récupération, ou une chambre de post-combustion peut être ajoutée au conduit de gaz d'échappement, juste devant la chaudière.

La figure 12 illustre un des dispositifs utilisés, par lequel les gaz d'échappement passent deux fois sur les tubes d'eau avant d'être rejetés dans l'air. Pour gagner de l'espace, on peut utiliser une chaudière d'un format plus compact si les tubes d'eau sont munis d'ailettes pour augmenter le rendement de la surface de transmission thermique du côté des gaz. Le diagramme illustre un tambour d'eau d'alimentation, la tubulure par-dessus laquelle les gaz chauds passent deux fois, et un ballon de vapeur qui emmagasine la vapeur produite au-dessus de la surface de l'eau.

Les chaudières de récupération sont fabriquées dans divers formats dont la capacité peut aller de moins de 500 L/s de gaz d'échappement jusqu'à 500 000 L/s. Les rendements des récupérateurs de chaleur sont habituellement de 40 à 50 pour cent.



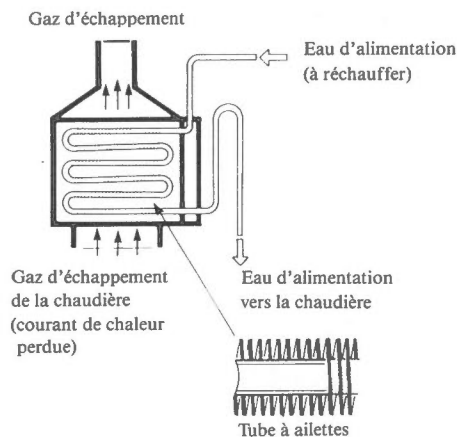
**Chaudière de récupération qui réutilise la chaleur perdue provenant d'une turbine à gaz ou d'incinérateurs**

Figure 12

### Échangeur de chaleur à tube à ailettes

Cet échangeur de chaleur gaz-liquide (figure 13) est constitué d'un long tube en serpentin préformé. Le liquide à réchauffer circule à l'intérieur du tube alors que les gaz d'échappement contenant la chaleur perdue circulent à l'extérieur du tube. Les ailettes fixées sur la paroi extérieure du tube augmentent la surface servant à la transmission de la chaleur, ce qui compense pour les plus faibles coefficients de transmission thermique des gaz.

Ce genre d'échangeur de chaleur est couramment utilisé pour le chauffage de l'eau. Les économiseurs de gaz d'échappement de la chaudière constituent l'application la plus fréquente, et servent normalement à réchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière. L'efficacité est habituellement de 40 à 60 pour cent.



**Échangeur de chaleur à tube à ailettes**

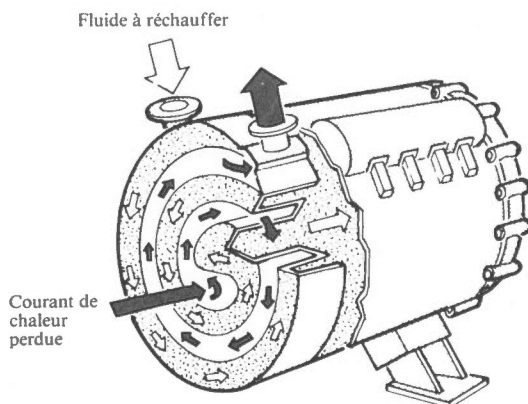
Figure 13

### Échangeur de chaleur à serpentin

Cet échangeur de chaleur consiste en deux bandes métalliques relativement longues qui s'enroulent concentriquement de façon à former une paire de canaux distincts, étanches et disposés en spirale (voir la figure 14). Il est plus compact et est moins sujet à l'encrassement comparativement aux échangeurs à calandre multitubulaire.

Les échangeurs de chaleur à serpentin sont fréquemment utilisés pour les eaux usées de refroidissement et récupèrent efficacement la chaleur dégagée par la vapeur à pression atmosphérique. Par exemple, on pourrait utiliser

un échangeur de chaleur à serpentin pour condenser la vapeur à pression atmosphérique émanant des évaporateurs et s'en servir pour réchauffer l'eau servant au nettoyage. L'efficacité de ce récupérateur de chaleur se situe habituellement entre 60 et 65 pour cent.



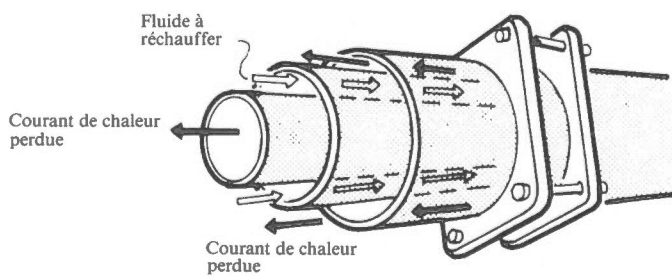
**Échangeur de chaleur à serpentin**  
Figure 14

### Échangeur de chaleur à tubes concentriques

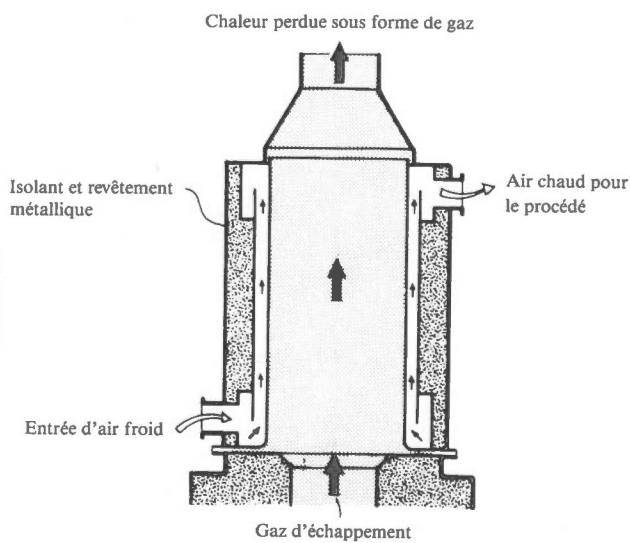
Ce genre d'échangeur de chaleur consiste en deux ou trois tubes concentriques. Le fluide de chauffage ou de refroidissement circule dans le tube intérieur et le produit qui doit être réchauffé ou refroidi passe dans le deuxième tube. Si on utilise un système à trois tubes, le fluide de chauffage ou de refroidissement circule aussi dans le tube extérieur. La figure 15 illustre un échangeur de chaleur comportant trois tubes concentriques.

Les échangeurs de ce genre doivent être entièrement démontés lorsqu'il faut procéder à une inspection pour des fuites ou de l'encrassement. Bien qu'ils puissent être difficiles d'entretien, ils sont faciles à nettoyer sur place. Ce récupérateur de chaleur convient aux utilisations qui impliquent un liquide visqueux ou un liquide contenant des particules en suspension. Lorsqu'il s'agit de liquides, la teneur en particules permise peut atteindre 40 pour cent. Les applications gaz-gaz comportent des récupérateurs à échange par rayonnement, par exemple, le préchauffage de l'air à l'aide des gaz de combustion chauds (figure 16).

Étant donné que les fluides dans ces appareils circulent en sens opposé, l'efficacité de la transmission thermique est élevée, habituellement de l'ordre de 60 à 70 pour cent.



**Échangeur de chaleur à tubes concentriques**  
Figure 15

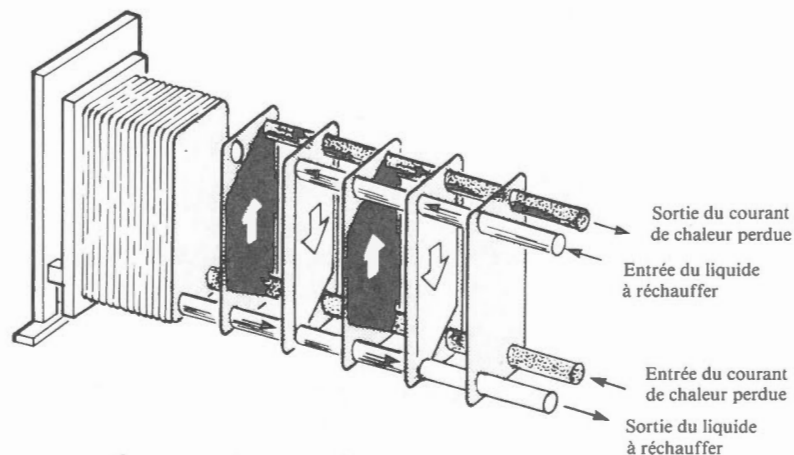


**Récupérateur métallique par rayonnement**  
Figure 16

## Échangeurs de chaleur à plaques

Ces systèmes passifs sont constitués de canaux à l'intérieur desquels des courants chauds et froids circulent en alternance, séparés par une mince cloison de métal ou d'autres matériaux. Selon la configuration, les deux courants peuvent circuler en flux parallèles, opposés ou perpendiculaires, sans se mélanger.

L'échangeur de chaleur à plaques et à châssis est généralement utilisé dans les cas où l'on a besoin d'un échangeur liquide-liquide ou gaz-liquide. Ces appareils sont constitués d'un châssis métallique dans lequel un nombre variable de tôles ondulées sont assemblées par un dispositif de fixation (voir la figure 17). Les deux fluides coulent dans des canaux en alternance entre les plaques, habituellement en sens contraire. L'ondulation des plaques produit une turbulence tout en augmentant la surface de contact, ce qui rend la transmission thermique plus efficace. Les plaques sont généralement fabriquées en titane, en acier inoxydable, en Hastelloy ou en Incoloy. Les plaques voisines sont maintenues espacées et garnies de joints d'étanchéité afin d'empêcher les fuites et le mélange des fluides. Les matériaux constituant les joints d'étanchéité sont le viton, le Buna N, l'EPT ou l'amiante. La surface totale servant à l'échange de chaleur peut facilement être modifiée par l'addition ou la suppression de plaques.



Échangeur de chaleur à plaques  
Figure 17

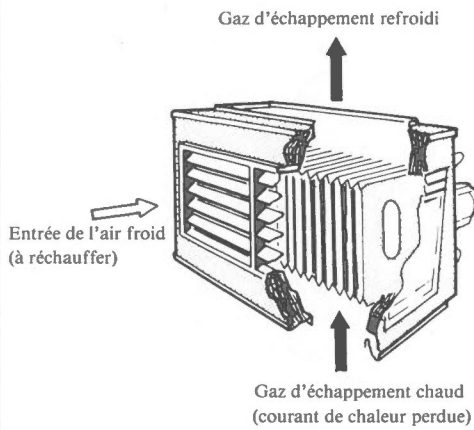
Les échangeurs de chaleur à plaques et à châssis sont simples et faciles à nettoyer, à inspecter et à entretenir étant donné que les surfaces de transmission thermique sont faciles d'accès. On peut les nettoyer facilement sur place en les lavant avec des solutions chimiques. C'est pourquoi ce genre d'échangeur est un choix judicieux pour des applications où l'on traite directement l'eau potable ou des denrées alimentaires. Cependant l'entretien des joints d'étanchéité pose un problème grave. Son utilisation se limite généralement aux liquides contenant moins de 5 pour cent de particules solides ou dont les particules ont moins de 1 mm de diamètre afin de réduire les risques de bouchon.

L'efficacité des échangeurs à plaques pour la récupération de la chaleur est habituellement de l'ordre de 75 à 80 pour cent.

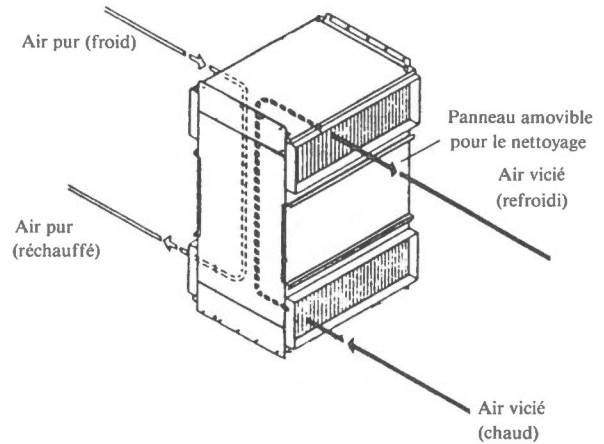
Selon la dimension et le nombre de plaques utilisées, ces échangeurs peuvent avoir un débit allant de 1,0 L/s à plus de 170 L/s. Les chutes maximales de pression dans l'appareil vont habituellement de 1 800 à 3 200 kPa. La limite maximale de température est généralement de 240 °C.

Les échangeurs de chaleur à plaques utilisés dans la plupart des applications gaz-gaz sont désignés comme échangeurs de chaleur du type à ailettes. Le modèle de base d'échangeur de chaleur à ailettes est une configuration à courant transversal (figure 18); l'appareil à contre-courant connu sous le nom de Z-box (figure 19) en est une deuxième. Les flux d'air à contre-courant assurent le plus grand écart de température possible pour une transmission thermique maximale, mais une configuration à courant transversal peut parfois permettre des raccords de conduits d'air plus pratiques. Les échangeurs de chaleur à plaques à ailettes sont habituellement utilisés dans les cas où la température de l'air est inférieure à 500 °C. L'usage de bons produits et de joints d'étanchéité empêche le mélange des fluides et facilite le nettoyage, l'entretien et l'inspection de l'appareil. Les principaux usages sont la récupération de la chaleur provenant des fours à cuisson, à étuve et à fumage des aliments et des systèmes de chauffage et de ventilation.





**Échangeur de chaleur à plaques air-air**  
Figure 18



**Échangeur de chaleur du genre Z-Box**  
Figure 19

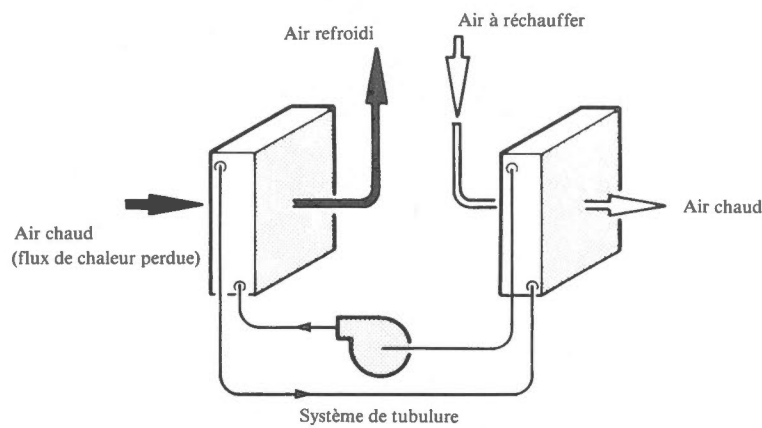
Les récupérateurs de chaleur à courant transversal ou à contre-courant ont respectivement une efficacité de récupération de 40 à 60 pour cent et 65 à 75 pour cent.

Il est difficile d'établir l'éventail général des vitesses du flux d'air ou des chutes de pression pour tous les genres d'échangeurs de chaleur à plaques fixes de type à ailettes en raison de la grande variété des applications et des méthodes de construction. Cependant, les capacités normales des appareils modulaires du type à ailettes sont de l'ordre de 470 à 4 700 L/s. Il est possible de fabriquer, à l'aide de modules, des modèles à plus grande capacité pouvant aller jusqu'à 47 000 L/s.

### Système à fonctionnement circulaire

Le système à fonctionnement circulaire peut être efficace pour récupérer la chaleur perdue des flux d'air, en particulier lorsqu'on désire installer un système de récupération de chaleur sans devoir réacheminer les conduits. Ce système convient également dans les cas où la source de chaleur est très éloignée de la demande. Une séparation complète des flux d'air élimine le risque de mélange entre l'air extérieur et l'air d'échappement.

Sous sa forme la plus simple, ce système de récupération de chaleur utilisé pour le traitement à basse température est constitué de serpentins d'eau à tubes à ailettes, d'une pompe de circulation et de la tuyauterie de raccordement. Comme l'illustre la figure 20, un des serpentins est situé dans le courant des gaz d'échappement et l'autre, dans le conduit par lequel l'air à réchauffer circule. On peut raccorder plusieurs serpentins en série ou en parallèle pour utiliser plusieurs sources de chaleur et desservir plusieurs endroits. La pompe assure la circulation d'un fluide caloporteur comme l'eau ou une solution de glycol (antigel), ou d'un fluide de transmission thermique à plus haute température dans les deux serpentins.



**Système à fonctionnement circulaire**  
Figure 20

Le registre des températures des systèmes à fonctionnement circulaire est limité par le fluide de transmission thermique. A des températures plus élevées (à plus de 200 °C), des serpentins de construction spéciale et des systèmes de contrôle peuvent être nécessaires pour assurer une liaison permanente des ailettes au tube et pour empêcher le fluide d'atteindre des températures excessives.

Dans bien des cas, l'eau déminéralisée peut servir de médium de transmission thermique. Cette solution est préférable étant donné que l'eau pure permet une transmission thermique plus efficace. L'eau est limitée dans ses applications en raison de son point de congélation élevé. En plus des problèmes dus à la corrosion, il a été nécessaire de faire appel à d'autres fluides de transmission thermique, tels que la solution de glycol contre la corrosion.

Il faut chercher à obtenir auprès du fabricant de fluides approprié les recommandations spécifiques concernant une application donnée. Lorsqu'on utilise des serpentins à tube à ailettes, il faut tenir compte des données techniques du serpentin pour déterminer les chutes de pression d'un modèle particulier. Les vitesses du côté du serpentin se situent entre 1,5 et 3,0 m/s. Des vitesses de surface plus basses peuvent entraîner des frais d'achat plus élevés, alors que des vitesses de surface plus élevées peuvent augmenter les frais d'exploitation en raison de plus fortes chutes de pression du flux d'air.

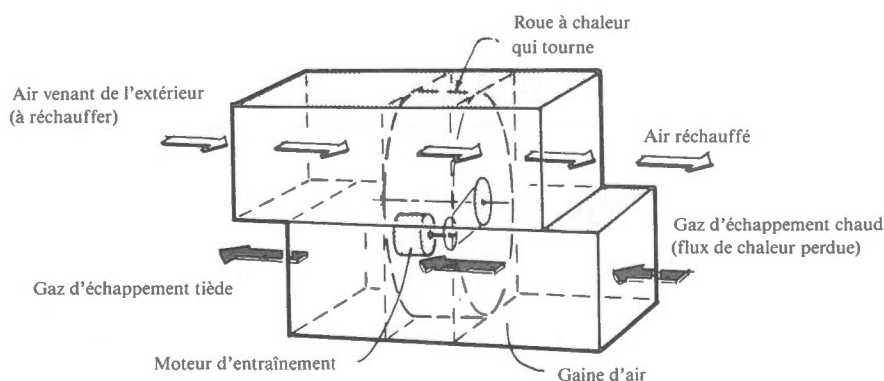
Les chutes de pression dans les serpentins à tube muni d'ailettes en spirale à haute température sont de l'ordre de 0,005 à 1,0 kPa, et dépendent de l'espacement des ailettes et du nombre de passages.

Les applications utilisant des gaz d'échappement à des températures allant jusqu'à 200 °C peuvent normalement donner un rendement thermique de l'ordre de 60 à 65 pour cent pour la récupération de la chaleur sensible. Les applications à des températures supérieures à 200 °C donnent habituellement des rendements légèrement inférieurs, allant jusqu'à 50 pour cent, en raison des propriétés de transmission thermique limitées des fluides caloporteurs et des matériaux de construction.

### Roue à chaleur

La roue à chaleur (aussi appelée récupérateur rotatif) devient de plus en plus populaire pour les applications nécessitant un récupérateur de chaleur perdue air-air à basse ou à moyenne température. Comme l'illustre la figure 21, il contient un disque poreux de bonne dimension, fabriqué dans un matériau ayant une capacité calorifique élevée, et tournant entre deux conduites d'air contiguës, l'une pour l'air froid, l'autre pour l'air chaud. L'axe de la roue est situé sur un plan parallèle à la cloison séparant les deux gaines. Pendant que la roue tourne lentement, la chaleur sensible (et dans certains cas l'humidité contenant de la chaleur latente) est transmise au matériau par le courant d'air chaud et retirée du matériau par le courant d'air froid.

Les gaines d'air raccordées à la roue (figure 21) sont disposées de telle sorte que chacun des courants d'air circule dans le sens de l'axe, et passe approximativement à travers la moitié de la roue, l'un dans le sens contraire de l'autre. En tournant, le matériau poreux est chauffé par le courant d'air chaud, et pénètre dans la gaine d'air froid où il libère l'énergie nouvellement acquise.



Roue à chaleur ou récupérateur rotatif

Figure 21

Les roues à chaleur sont habituellement fabriquées avec un diamètre de 3,5 mètres et un débit d'air de 30 000 L/s. Cependant, on a fabriqué des roues avec un diamètre allant jusqu'à 15 mètres. Cependant, des éléments multiples peuvent être utilisés en parallèle.

Les roues à chaleur sont conçues pour des températures allant de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ . D'après leur usage et leur conception, on peut les diviser en deux catégories — les usages pour le "confort" et les usages pour le "procédé".

- Confort — Les roues servant pour le confort sont conçues pour la transmission de la chaleur sensible ou de la chaleur totale à des températures allant de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à environ  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  au maximum. Le tambour est fabriqué de matériaux métalliques, minéraux ou artificiels.
- Procédé — Les applications pour des procédés à basse température concernent la transmission de la chaleur sensible à des températures allant jusqu'à  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  environ. Le matériau de la roue est habituellement de l'aluminium; cependant, l'acier inoxydable, le monel et d'autres matériaux à l'épreuve de la corrosion peuvent être utilisés dans les milieux corrosifs. Les applications pour des procédés à température moyenne sont généralement utilisées pour des températures allant jusqu'à  $425\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La roue est fabriquée en acier inoxydable, en monel ou autres matériaux semblables, et en céramique. Les applications pour les procédés à température élevée peuvent aller jusqu'à  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La roue est en céramique ou en acier résistant à des températures très élevées.

Les roues à chaleur sont offertes en quatre configurations. La première consiste en un châssis métallique enfermant un noyau de toile tricotée en acier inoxydable ou en fils d'aluminium qui ressemble aux tampons métalliques dont on se sert pour récurer les ustensiles de cuisine.

Appelé laminaire, le deuxième genre est fabriqué en tôle ondulée et comporte plusieurs passages parallèles pour la circulation du fluide.

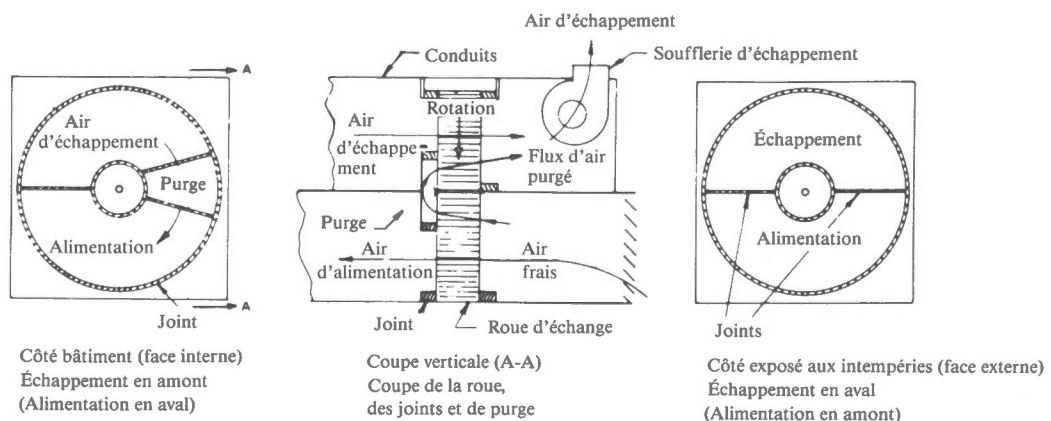
Le troisième genre est aussi une roue laminaire, mais fabriquée en céramique, avec une configuration alvéolaire. Ce type est utilisé dans les applications à température élevée dont la limite de fonctionnement se situe à environ  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La quatrième variété est de construction laminaire, mais les voies de circulation sont recouvertes d'un matériau absorbant l'eau de façon que la chaleur latente et la chaleur sensible puissent toutes deux être récupérées. La garniture de la roue peut être constituée de n'importe quel matériau, par exemple le chlorure de lithium.

L'efficacité totale de la transmission de la chaleur sensible peut aller de 70 à 80 pour cent. Avec ce genre de roue, la quantité totale de chaleur récupérée (à la fois sensible et latente) est de l'ordre de 65 à 80 pour cent.

Le rendement d'un échangeur de chaleur rotatif air-air peut être caractérisé par les chutes de pression qui se produisent dans les flux d'air et par l'efficacité de l'appareil. Ces deux facteurs dépendent de la vitesse de surface qui est basée sur la surface exposée au flux d'air. La surface totale de la roue est divisée en deux et chacune des moitiés est utilisée par l'un des deux flux d'air.

Les vitesses de surface pratiques pour les applications visant le confort se situent entre 2,0 et 4,6 m/s. Les vitesses les plus basses se traduisent par de plus faibles chutes de pression, une plus grande efficacité et des coûts d'exploitation plus faibles, mais nécessitent des appareils plus volumineux et un plus grand espace pour l'installation.



Roue à chaleur avec section de purge  
Figure 22

Des vitesses de circulation d'air plus élevées permettent des coûts d'achat plus bas et un espace moins grand, mais les frais d'exploitation sont généralement plus élevés en raison de l'augmentation des chutes de pression.

Pour assurer un rendement optimal, les roues destinées au confort ont généralement une épaisseur de 15 à 30 cm d'épaisseur. Les roues pour les températures élevées peuvent avoir une épaisseur variant de 10 cm à 1 m, selon la chute de pression acceptable de chacun des deux courants. Leur vitesse de rotation est généralement de 5 à 20 rpm.

Étant donné que les pores des roues à chaleur transportent une petite quantité de gaz de la gaine d'air d'échappement vers la gaine d'entrée, il peut y avoir mélange. Si ce mélange est indésirable, le transport des gaz d'échappement peut être partiellement éliminé par l'installation d'une section de purge (figure 22) où une petite quantité d'air propre est soufflée à travers la roue et rejetée dans l'atmosphère, nettoyant de ce fait les passages des gaz d'échappement.

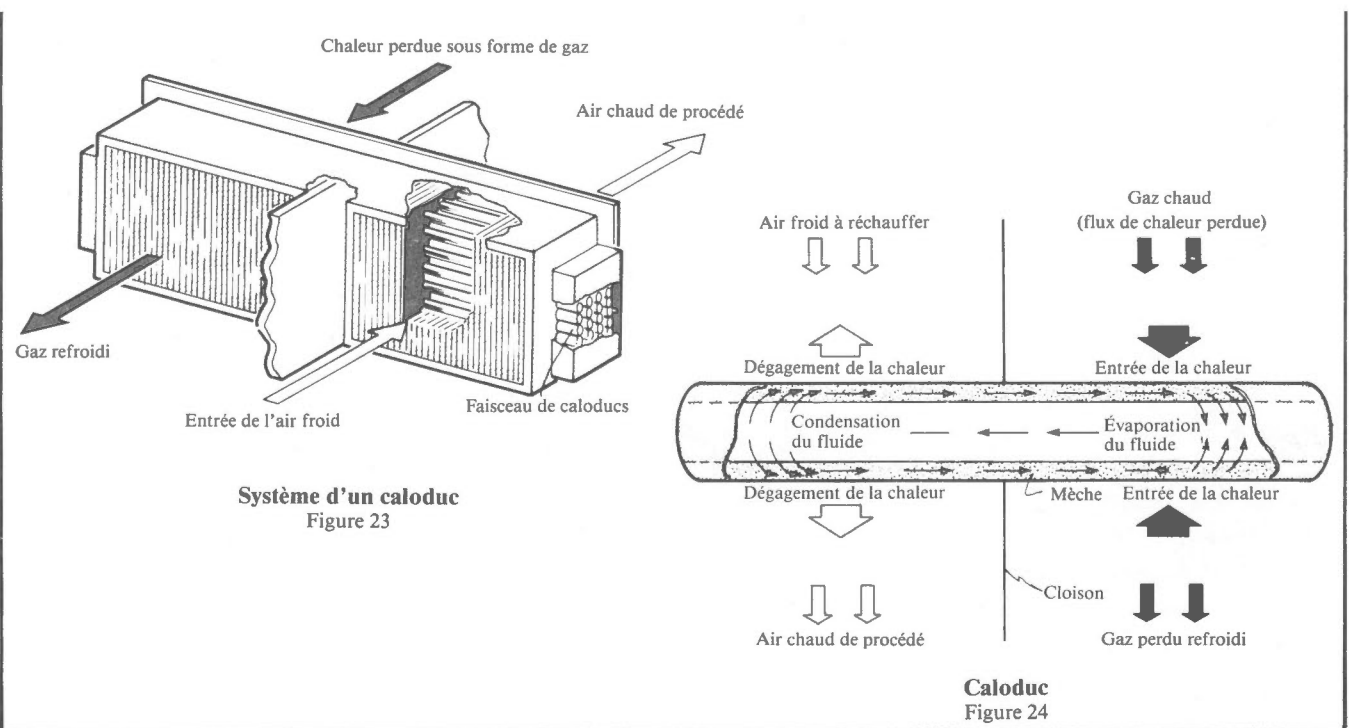
Les roues à chaleur sont de plus en plus utilisées pour récupérer la chaleur de l'air de procédé dans des milieux à température basse ou modérée. Les applications courantes sont les préchauffeurs de fours de fumage des aliments ou des étuves, ainsi que des préchauffeurs d'air de chaudière. Ils conviennent aussi très bien pour le chauffage des locaux où de grandes quantités d'air de ventilation sont nécessaires pour des raisons de salubrité et de sécurité.

### Caloducs (échangeurs de chaleur à thermosiphon)

Le caloduc est un échangeur de chaleur passif, à tubes à ailettes gaz-gaz. Comme le montre la figure 23, les éléments forment un faisceau de caloducs qui se prolongent à travers les gaines de gaz d'échappement et d'entrée de l'air dans une disposition qui rappelle les échangeurs de chaleur à serpentin à ailettes. Chaque tube est, par contre, un élément distinct scellé et muni, à l'intérieur, d'une mèche annulaire qui fait toute la longueur du tube (figure 24), au centre duquel un fluide convenant à la transmission thermique est enfermé. Bien que les caloducs fassent toute la largeur de l'appareil, une cloison étanche sépare les deux flux d'air, empêchant tout mélange.

Le caloduc est compact et efficace, étant donné que le cycle d'évaporation et de condensation à l'intérieur des tubes constitue une façon très pratique de transmettre la chaleur. La chaleur absorbée en provenance des gaz d'échappement chauds fait évaporer le fluide du caloduc à l'extrémité chaude et pousse la vapeur vers l'extrémité froide. La chaleur latente de l'évaporation est transportée sous forme de vapeur vers l'extrémité froide du caloduc située dans la gaine de gaz froid. La vapeur se condense en dégageant sa chaleur latente. Le liquide condensé circule alors par capillarité (ou par gravité) à travers la mèche et retourne vers l'extrémité chaude où il se transforme de nouveau en vapeur.

Les caloducs sont conçus pour fonctionner à des températures allant de -50 à 700 °C. Les éléments qui fonctionnent à des températures allant jusqu'à 275 °C sont fabriqués en aluminium, en cuivre ou en acier, alors que les éléments destinés à des chaleurs plus élevées sont généralement fabriqués en acier.



L'efficacité de la récupération de chaleur de ces dispositifs va de 40 à 70 pour cent, selon l'usage qu'on en fait. Une efficacité de 60 pour cent constitue une valeur normale.

Les échangeurs de chaleur sous forme de caloducs atteignent leur efficacité maximale s'ils fonctionnent à contre-courant des flux d'air. Cependant, ils peuvent fonctionner à efficacité réduite si les courants d'air sont parallèles. Par exemple, un échangeur de chaleur à caloducs fonctionnant avec une efficacité de 60 pour cent dans une disposition à contre-courant, pour des flux d'air d'une masse donnée, n'atteindra que 48 pour cent d'efficacité dans une disposition à courants parallèles, pour des flux d'air de masse égale. De façon générale, on estime que l'efficacité d'une disposition à courants parallèles représente 80 pour cent de l'efficacité d'une disposition à contre-courant.

Les vitesses de surface des échangeurs à caloducs sont de 2,0 à 4,0 m/s, mais les vitesses de 2,3 à 2,8 m/s sont les plus courantes. Les chutes de pression pour une efficacité de 60 pour cent (chaleur sensible) vont de 0,10 à 0,175 kPa, à 2,0 m/s jusqu'à 0,375 à 0,50 kPa, à 4,0 m/s. L'efficacité de la récupération est inversement proportionnelle à la vitesse, mais l'effet n'en est pas aussi prononcé que pour la chute de pression.

Les applications de ces dispositifs incluent le chauffage de l'air des séchoirs et des fours et le préchauffage de l'air de combustion des chaudières.

## Équipement des Pompes à Chaleur

Les pompes à chaleur sont des dispositifs qui servent à reconditionner la chaleur perdue, c'est-à-dire à augmenter la température d'un flux de chaleur perdue pour qu'elle atteigne le degré désiré.

Les pompes à chaleur font appel à une source d'énergie externe (comme l'électricité) pour augmenter la température de la chaleur perdue récupérée. Ce système fonctionne fondamentalement comme un cycle de réfrigération inversé. Le liquide qui circule dans l'évaporateur absorbe la chaleur provenant de la source de chaleur perdue et se transforme en vapeur; la vapeur est alors comprimée, ce qui élève sa température. De là, elle se dirige vers le condenseur où la chaleur absorbée précédemment est transmise au fluide qu'elle doit réchauffer.

### Genres de pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont normalement classées en fonction du genre de source de chaleur et de puits thermique utilisé. De nombreuses configurations sont possibles pour la source de chaleur et le puits thermique, selon la forme de la chaleur perdue. Celles qu'on utilise dans les applications de récupération de la chaleur perdue sont, notamment, les pompes :

- air-air
- eau-air
- air-eau
- eau-eau

Dans chacun des cas énumérés, le premier terme renvoie à la source de chaleur et le deuxième, au puits thermique, ou flux qui recevra la chaleur extraite.

La pompe à chaleur air-air est le genre le plus répandu pour le chauffage des locaux tant résidentiels que commerciaux. La chaleur est extraite d'un flux d'air extérieur ou d'un gaz d'échappement; sa température est augmentée et la chaleur est dissipée dans le local à chauffer.

Une pompe à chaleur eau-air utilise l'eau comme source thermique et l'air pour transmettre la chaleur dans le local à chauffer.

Les pompes à chaleur air-eau sont couramment utilisées pour produire de l'eau chaude pour des besoins industriels. Ces systèmes extraient la chaleur des gaz d'échappement pour la transmettre à l'eau.

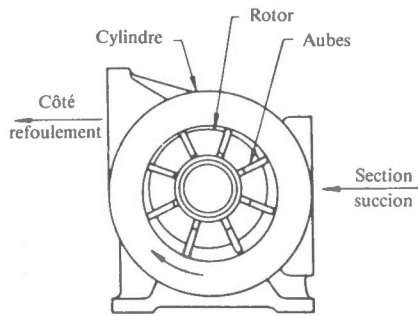
Une pompe à chaleur eau-eau extrait la chaleur d'une source d'eau, tout en la rejetant simultanément dans un puits thermique d'eau, soit pour chauffer les locaux, soit pour des procédés.

### Éléments d'une pompe à chaleur

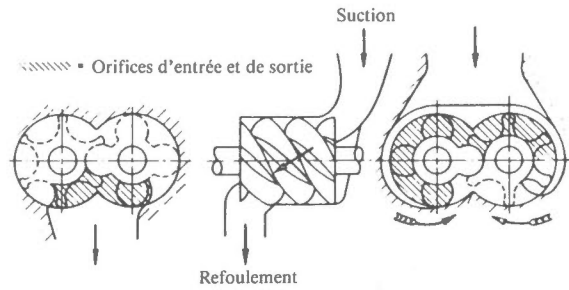
Pour la plupart, les éléments et les méthodes utilisés pour les pompes à chaleur sont directement reliés à la réfrigération. Le Manuel 11 de cette série, "Refroidissement et pompes à chaleur", a traité du sujet en détail. La figure 4 du présent manuel montre une représentation graphique de la pompe à chaleur.

Les principaux éléments en sont :

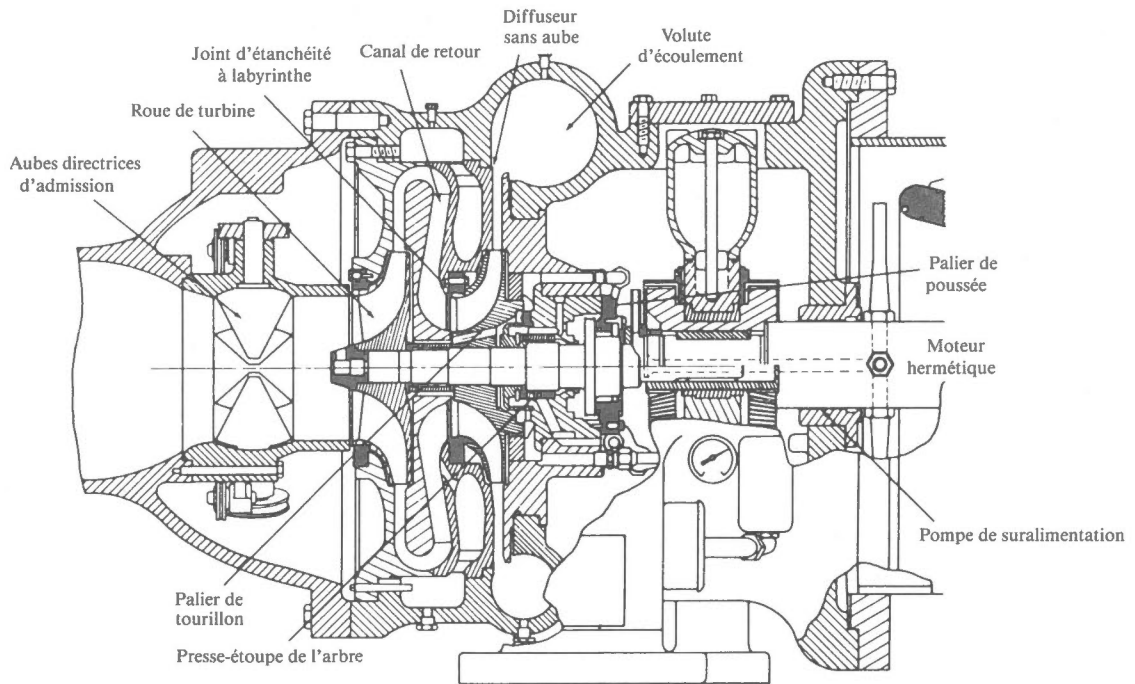
- les compresseurs de réfrigérant
- les évaporateurs
- les dispositifs d'étranglement
- les condenseurs



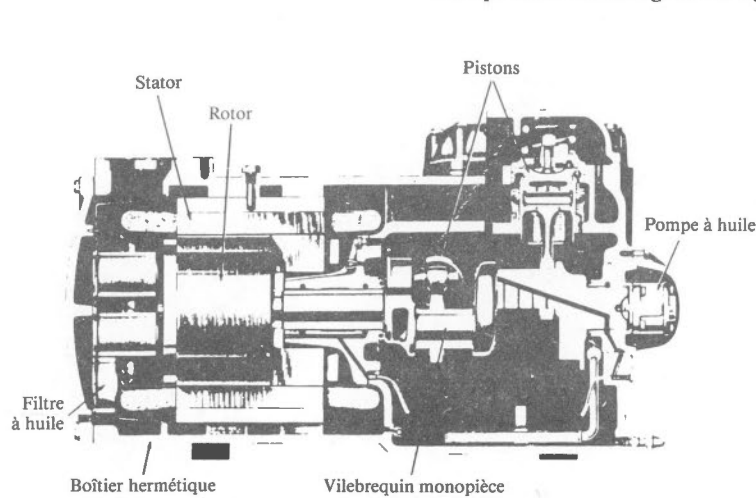
**Vue intérieure d'un gros compresseur rotatif**



**Compresseur rotatif à double hélice**

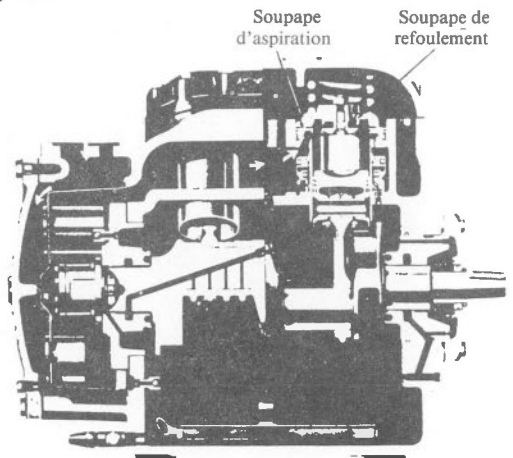


**Compresseur centrifuge de réfrigération**



**Compresseur hermétique**

**Compresseurs à pistons classiques**



**Compresseur de type ouvert**

**Compresseur de pompe à chaleur**

Figure 25

Les compresseurs :

Les compresseurs à déplacement et les compresseurs dynamiques sont utilisés couramment dans les pompes thermiques.

Les compresseurs à déplacement augmentent la pression du fluide de travail en réduisant le volume de la chambre de compression. Pour ce faire, le travail de l'arbre est transmis au mécanisme. Cette catégorie comprend :

- les compresseurs à piston
- les compresseurs rotatifs
- les compresseurs à vis (rotatifs à hélices)

Les compresseurs dynamiques augmentent la pression du réfrigérant grâce à un échange constant du mouvement angulaire entre un élément mécanique rotatif et le fluide qui est comprimé. Cette catégorie comprend :

- les compresseurs centrifuges
- les turbocompresseurs

La figure 25 présente les diagrammes de plusieurs compresseurs énumérés ci-dessus. De tous ces genres, les compresseurs à piston sont les plus utilisés. C'est avant tout parce qu'ils :

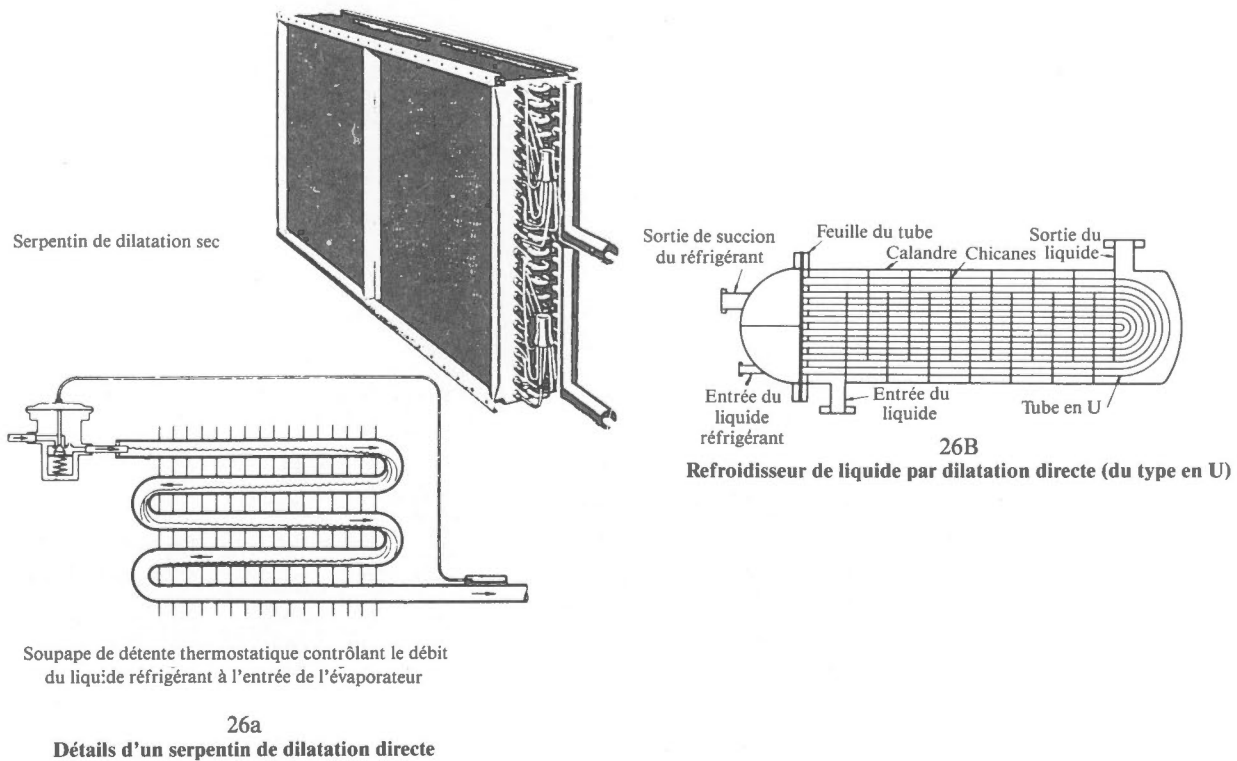
- sont efficaces pour un vaste éventail de charge;
- sont vendus dans une grande variété de dimensions et de capacités;
- sont relativement bon marché.

Les évaporateurs et les condensateurs

Le choix d'un évaporateur et d'un condensateur dépend de la nature de la source de chaleur perdue (gaz ou liquide) et du puits thermique prévu (gaz ou liquide).

Les évaporateurs couramment utilisés comprennent :

- Les serpentins à dilatation directe consistant en une série de tubes à ailettes à l'intérieur desquels circule le réfrigérant. Ce genre est utilisé pour extraire la chaleur des flux de gaz (voir figure 26a).
- Les échangeurs de chaleur à calandre multitubulaire (déjà décrits). Ils sont utilisés pour extraire la chaleur d'un liquide, des vapeurs perdues d'un procédé, etc. Le réfrigérant circule généralement à l'intérieur de la calandre et le liquide à l'intérieur de la tubulure (voir la figure 26b).



Évaporateurs de pompes à chaleur  
Figure 26

Comme dans le cas des évaporateurs, les condensateurs utilisés dans les pompes à chaleur se présentent généralement sous une des formes décrites ci-dessus.

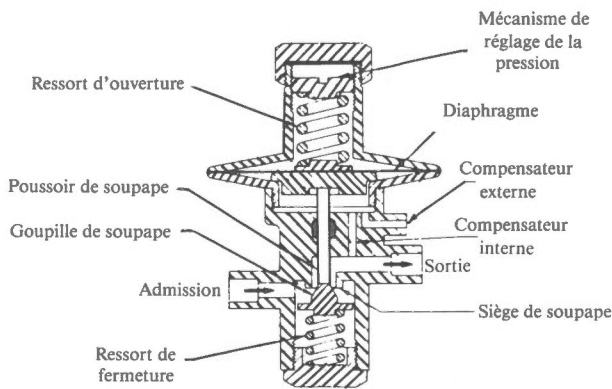
Dispositifs d'étranglement :

Les dispositifs d'étranglement (soupapes de détente) sont utilisés pour contrôler le flux de liquide et pour abaisser la pression du réfrigérant vers l'évaporateur de la pompe à chaleur.

On utilise deux genres :

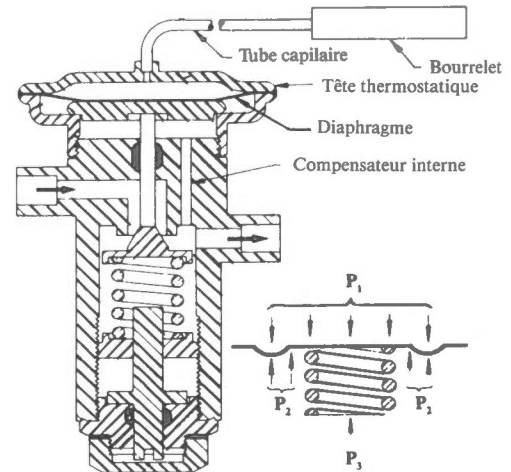
- Le détendeur à pression constante, qui maintient une charge constante sur le compresseur (figure 27a).
- La soupape de détente thermostatique, qui mesure le débit de réfrigérant entrant dans l'évaporateur, de façon que la charge corresponde à la capacité du système (figure 27b).

De ces deux genres, le dernier est le plus couramment utilisé en raison de sa souplesse de fonctionnement.



La soupape est utilisée avec un compensateur externe ou un compensateur interne, mais pas avec les deux.

27a  
Détendeur à pression constante



P1#- Pression de la vapeur de l'élément thermostatique  
P2#- Pression de l'évaporateur  
P3#- Equivalent de pression de la force du ressort de surchauffe

27b  
Soupape de détente thermostatique

Soupapes de détente de la pompe à chaleur  
Figure 27

### Utilisations des pompes à chaleur

Les pompes à chaleur permettent une grande souplesse d'utilisation, car elles font appel à une méthode indirecte pour récupérer et pour fournir la chaleur. Elles servent principalement au chauffage des locaux, pour les procédés industriels et le chauffage de l'eau.

Les pompes à chaleur à température élevée sont maintenant offertes sur le marché. Ces appareils peuvent utiliser les flux de chaleur perdue dont la température va de 40 à 70 °C. En comparaison, les pompes à chaleur classiques utilisaient habituellement des flux de chaleur perdue à des températures allant de 5 à 20 °C. Comme exemple d'application, les pompes à chaleur à température élevée sont utilisées dans certaines industries de procédés chimiques pour récupérer la chaleur des vapeurs au-dessus des colonnes de distillation et la réutiliser pour chauffer ces mêmes colonnes. Bien que la technologie soit encore relativement nouvelle et actuellement limitée à certaines industries, les pompes à chaleur à température élevée ouvrent de vastes horizons pour les projets de récupération de la chaleur perdue et ce, dans un proche avenir.

### Surcompression de la Vapeur

La surcompression de la vapeur est une forme de pompage de la chaleur par laquelle la vapeur perdue provenant d'un procédé est comprimée afin d'en élever la température. Cette chaleur est recyclée vers la source du procédé ou utilisée à d'autres fins. Cette méthode est plus efficace que la pompe à chaleur classique, mais moins souple du fait que seule la chaleur perdue provenant de la vapeur peut être récupérée. La surcompression de la vapeur peut être effectuée par compression mécanique ou thermique.



## Surcompression mécanique

On peut trouver dans le Module 14 de cette série, Compresseurs et turbines, des renseignements détaillés concernant les compresseurs. La description qui suit s'applique aux compresseurs utilisés dans l'élévation de la température de la chaleur perdue.

Le compresseur est l'élément le plus important dans tout système de surcompression mécanique de la vapeur. Il faut choisir très soigneusement le modèle qui convient et qui a la souplesse nécessaire pour fonctionner dans toutes les conditions exigées par le système.

Il existe une grande variété de compresseurs :

- Compresseurs à vis :

Un compresseur à vis est un appareil de type volumétrique qui consiste en deux rotors à rainures hélicoïdales qui s'emboîtent (mâle et femelle) et enfermés dans un logement stationnaire avec des orifices d'entrée et de sortie. Ce compresseur est limité dans ses applications en raison de ses faibles capacités volumétriques de traitement. Il offre cependant des rapports de compression importants. Il n'est pas particulièrement indiqué dans des conditions de charge partielle.

- Compresseur à lobes rotatifs

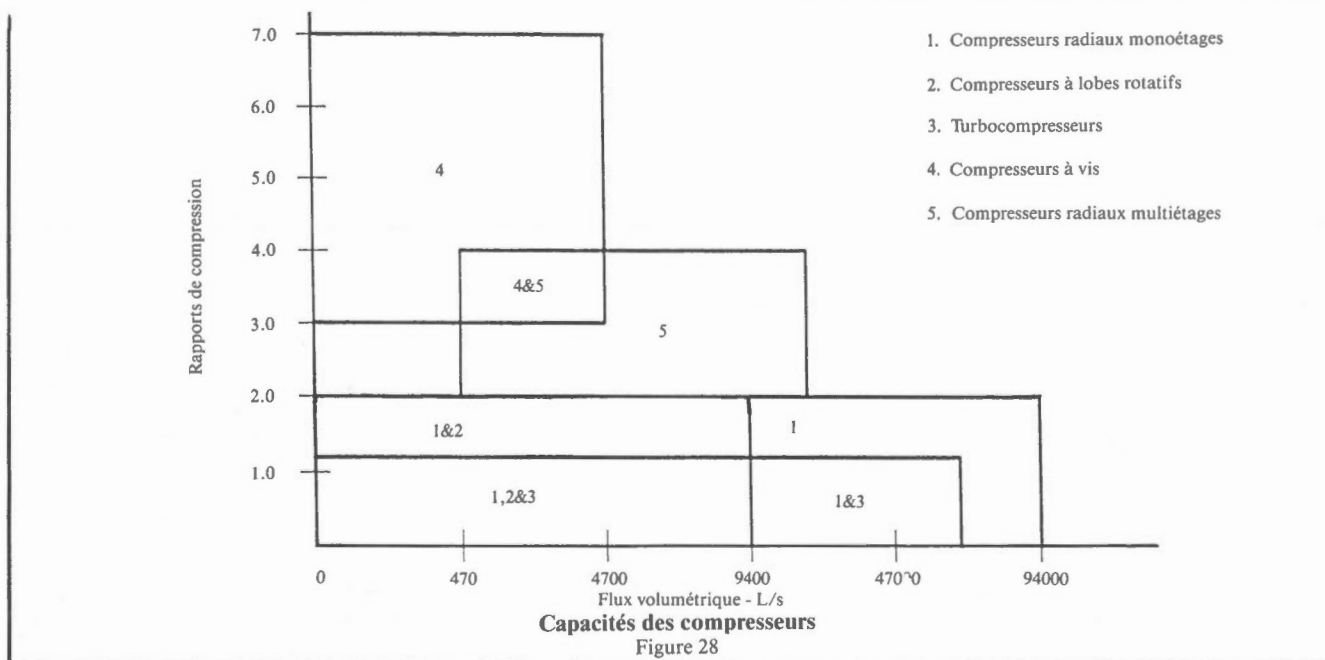
Le compresseur à lobes rotatifs est un appareil de type volumétrique qui consiste en un boîtier contenant une paire de rotors symétriques dans un logement stationnaire. Des engrenages externes maintiennent le synchronisme des deux rotors. L'étanchéité à l'intérieur du logement stationnaire et entre les rotors est assurée par un joint à jeu serré. Ces compresseurs sont utilisés dans les applications à faibles capacités volumétriques où des rapports de compression de 2 à 1 sont acceptables.

- Turbocompresseurs (ventilateur) :

Ce type de compresseur devient de plus en plus souvent utilisé dans les systèmes de surcompression mécanique de la vapeur. Un boîtier soudé et un fonctionnement à basse vitesse permettent un grand choix de matériaux de construction et des coûts d'immobilisations peu élevés. Il ne s'agit pas d'un ventilateur classique pour la circulation de l'air mais d'un appareil spécialement conçu pour l'utilisation de la vapeur. L'appareil peut atteindre des rapports de compression de 1,2 à 1,3:1 et une capacité volumétrique pouvant atteindre 70 000 L/s.

- Surcompresseur radial monoétage (du genre centrifuge) : Le surcompresseur radial monoétage est le type le plus couramment utilisé dans les systèmes de surcompression mécanique de la vapeur (SMV). Son vaste champ d'application et son prix relativement peu élevé le rendent intéressant pour les évaporateurs des systèmes SMV moyens et grands. Les compresseurs radiaux sont plus efficaces que les compresseurs à lobes rotatifs mais pas aussi efficaces que les turbocompresseurs. Des capacités allant jusqu'à 95 000 L/s sont possibles avec une hausse de pression maximale limitée de 2,0 à 2,1.

La figure 28 illustre les capacités relatives et les rapports de compression des différents genres de compresseurs.



Des moteurs électriques (à vitesse constante ainsi qu'à vitesse variable) sont couramment utilisés pour faire fonctionner les compresseurs. Des turbines à vapeur peuvent s'avérer rentables pour des usages intensifs, lorsqu'on dispose de vapeur à haute pression.

Bien que les exigences quant à la puissance théorique d'un compresseur soient légèrement réduites en fonctionnant à des températures d'évaporation plus basses, par exemple en fonctionnant dans le registre des pressions subatmosphériques, le volume de vapeur à comprimer et, par conséquent, les dimensions et le coût du compresseur augmentent à un tel rythme qu'il en coûte plus cher que de fonctionner à température élevée.

### **Surcompression thermique**

Cette méthode est la plus indiquée pour la compression de la vapeur subatmosphérique et elle permet de traiter de grands volumes de vapeur à de faibles coûts d'immobilisations. Elle est couramment utilisée pour l'évaporation dans les procédés de transformation des aliments, où il faut maintenir les températures suffisamment basses pour préserver la qualité des produits et où l'on dispose de vapeur motrice à une pression acceptable.

La surcompression thermique produit une masse de vapeur plus importante que la vapeur à faible puissance calorifique mais les systèmes peuvent être conçus de façon à utiliser entièrement cette énergie. La contamination du condensat est un autre problème et, dans tous les cas, le rejet reste la seule solution.

Le Module 8, "Systèmes à vapeur et à condensat", traite de la conception des éjecteurs et le lecteur trouvera plus de détails en consultant ce module.

### **Applications de la surcompression de la vapeur**

Dans la plupart des cas, on utilise la surcompression de la vapeur, thermiquement ou mécaniquement, lorsque :

- la température de la chaleur perdue excède 70 °C;
- la température, de la chaleur rehaussée, n'excède pas 10 °C;
- la disponibilité et l'usage de la chaleur perdue sont simultanées et les quantités correspondent bien.

La limite de la température à laquelle on peut porter la chaleur est imposée par les caractéristiques des compresseurs. On choisit normalement les turbocompresseurs en vue de comprimer la vapeur, étant donné qu'ils peuvent fonctionner avec des volumes variables, en produisant une pression de refoulement constante. Cependant, la compression de la vapeur d'eau exige un grand nombre d'étapes de compression et des taux de compression supérieurs à 1,5; la nécessité d'augmenter la température de plus de 10 °C rend de ce fait le procédé non économique.

La consommation de la vapeur motrice augmente substantiellement dans le cas de thermocompresseurs fonctionnant à des températures rehaussées de plus de 10 °C. Cependant, ces appareils peuvent encore convenir si les quantités nécessaires de chaleur rehaussée dépassent largement la chaleur à faible puissance calorifique disponible.

L'utilisation de la vapeur comprimée pour des sources variables ou des applications de charges n'est également pas recommandée étant donné qu'on ne peut emmagasiner la vapeur de façon économique.

Malgré ces limites, la compression de la vapeur a trouvé de nombreux débouchés dans les procédés industriels en raison de son coefficient de performance élevé. La thermocompression peut, le cas échéant, s'avérer un procédé très économique en raison du faible coût des thermocompresseurs. La compression de la vapeur de détente qui s'échappe du tambour de condensat en vue de son utilisation dans les procédés en est un exemple.

## **Opérations à Étapes Multiples**

Les opérations à étapes multiples permettent d'obtenir de l'énergie en cascade dans un procédé de production comportant du chauffage ou du refroidissement. Dans les opérations à étapes multiples classiques, on compte par exemple :

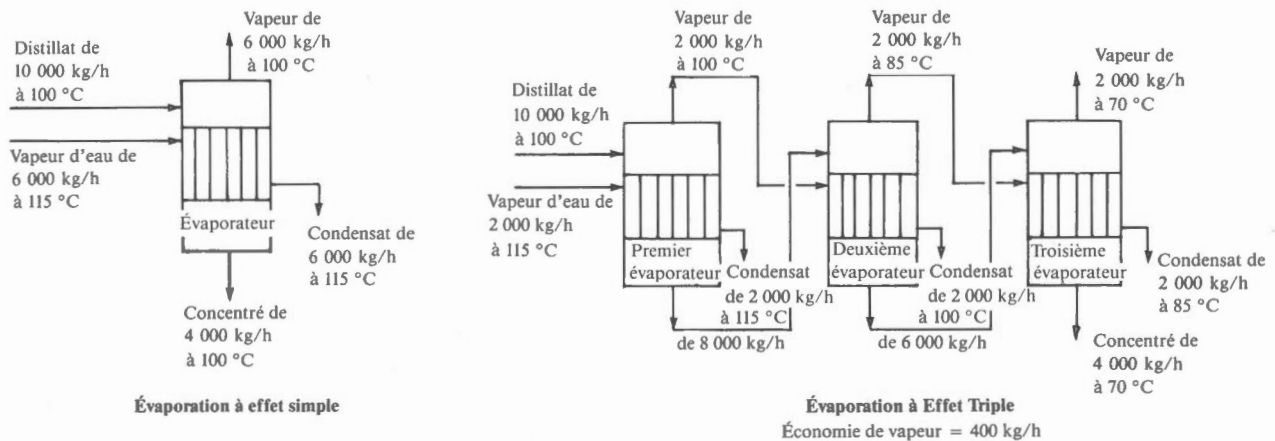
- l'évaporation à effets multiples
- la vaporisation éclair
- d'autres opérations à étapes multiples.

### **Évaporation à effets multiples**

L'évaporation est le retrait d'un solvant contenu dans une solution ou une boue par l'évaporation de ce solvant. Dans presque toutes les applications industrielles, le solvant est l'eau et le résidu non volatile est l'élément constitutif précieux. L'évaporation à effet simple est la configuration la plus simple d'un évaporateur, lequel utilise la vapeur d'eau provenant d'une source extérieure et rejette sa vapeur dans l'atmosphère ou dans un condensateur refroidi à l'air ou à l'eau. Ce genre d'évaporateur nécessite environ un kilogramme de vapeur d'eau par kilogramme d'eau évaporé, ou davantage si la vapeur nécessaire est plus froide que le produit.

On peut améliorer l'efficacité énergétique en utilisant un évaporateur à effets multiples. La figure 29 montre un système à triple effet pour l'évaporation des liquides d'une distillerie. Dans cette opération, la vapeur provenant du premier effet est utilisée pour réchauffer le deuxième effet, l'ébullition à une température (et à une pression) inférieure(s). La vapeur qui se dégage du deuxième effet est utilisée pour réchauffer le troisième effet, qui boue à une température (et à une pression) encore plus basse(s). La vapeur provenant du troisième effet est condensée dans un condensateur.

Dans l'exemple qui précède, on peut réduire de 66 pour cent l'énergie utilisée en remplaçant le système à effet simple par un système à effet triple.



Évaporateur à effets multiples  
Figure 29

Les évaporateurs existent en un grand nombre de modèles et le choix dépend des propriétés de la matière à évaporer, de la configuration générale du procédé et de la concentration finale nécessaire. La modification implique l'augmentation du nombre d'effets et l'utilisation normale d'un évaporateur d'un modèle existant. De grands évaporateurs à six ou sept effets ont été couramment utilisés dans l'industrie des pâtes et papiers et, plus récemment dans l'industrie alimentaire.

### Vaporisation éclair à étapes multiples

Lorsqu'un condensat à haute pression est déversé dans un contenant où la pression est moins élevée, il contient plus de chaleur qu'il n'en faut pour conserver sa forme liquide à cette basse pression. Il en résulte que l'excès de chaleur entraîne la vaporisation d'une partie du condensat sous forme de vapeur éclair. En dégageant le condensat à une pression précise, on peut produire une vapeur utilisable.

La vaporisation éclair à étapes multiples consiste à abaisser la pression d'un condensat à haute pression par étapes, en vue de produire de la vapeur destinée à un usage immédiat. Les conditions idéales pour la vaporisation éclair existent lorsqu'on dispose d'un condensat à haute pression, qu'on a besoin de vapeur à une pression moins élevée et que la vapeur excédentaire se perd dans le purgeur de vapeur. Même dans les cas où la perte de vapeur est inexistante, la vapeur éclair peut réduire la consommation de vapeur en augmentant l'efficacité de la récupération de la chaleur perdue de l'économiseur de la chaudière.

Le vaporisateur éclair et l'équipement qui s'y rattache ont été décrits en détail dans le Module 7 de cette série, "Systèmes à vapeur et à condensat". Le lecteur trouvera des renseignements supplémentaires en consultant ce manuel.

### **Autres opérations à étapes multiples**

On peut songer à utiliser les opérations à étapes multiples dans une variété d'applications. En interreliant l'équipement ou les procédés à l'utilisation d'échangeurs de chaleur, de pompes à chaleur, etc., il est possible d'extraire de l'énergie thermique d'une source de chaleur perdue. Le séchage à deux étapes de produits alimentaires, en utilisant les gaz d'échappement du séchoir avec une faible humidité relative pour le préséchage en est un exemple. Un nouveau séchoir indirect, qui est proposé pour l'industrie de la distillation et l'industrie des pâtes et papiers, utilise la vapeur d'eau à haute pression tout en produisant de la vapeur à basse pression qui peut, à son tour servir à l'évaporation à étapes multiples.



# POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE



Les possibilités de gestion de l'énergie identifient différentes façons d'utiliser rationnellement l'énergie pour réduire les coûts d'exploitation. Dans le présent chapitre, plusieurs exemples de possibilités types sont donnés sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation. Ce chapitre n'énumère pas de façon exhaustive toutes les applications existantes de récupération de la chaleur perdue. Il est toutefois destiné à donner de l'information au personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance pour l'aider dans la recherche de toutes les possibilités qu'offre leur installation. On peut également se référer à d'autres modules de cette série pour examiner les Possibilités de gestion de l'énergie qu'offrent d'autres appareillages.

## 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 :

- **Identification des sources de chaleur perdue**

L'identification des sources de chaleur récupérable semble relativement simple. On ne saurait toutefois trop insister sur l'importance de cette tâche. Le personnel de gestion et d'exploitation doit toujours être attentif aux sources de chaleur récupérable. On doit examiner en particulier tout procédé ou système existant que l'on remplace ou que l'on modifie.

- **Élimination des pertes thermiques**

On peut souvent éliminer totalement les pertes thermiques. On peut, par exemple :

- rechercher et colmater les fuites de vapeur. Bien qu'elles paraissent négligeables, les fuites entraînent une perte de la vapeur utilisable et, par le fait même, d'argent. Le Module 9 intitulé "Appareils de chauffage et de refroidissement (vapeur d'eau)" donne un excellent exemple des économies auxquelles on peut s'attendre si on élimine les fuites.
- vérifier le bon fonctionnement des séparateurs de vapeur. Comme les fuites de vapeur, le mauvais fonctionnement des séparateurs de vapeur peut entraîner des pertes thermiques considérables. Il peut également avoir un effet négatif sur les procédés de production. L'inspection des séparateurs doit faire partie intégrante de tout programme de maintenance.
- inspecter et assurer l'entretien de l'isolant. L'utilisation d'un isolant est un moyen peu coûteux de réduire la déperdition de chaleur. On doit réparer ou remplacer tout isolant endommagé ou manquant. On doit examiner en particulier tout procédé ou système auquel des modifications ont été apportées.
- arrêter les appareils et les systèmes qui ne sont pas nécessaires. On doit analyser les raisons pour lesquelles on laisse fonctionner en tout temps des appareils qu'on n'utilise pas de façon régulière. S'il n'est pas possible d'arrêter ces appareils pendant les périodes creuses (par exemple, la nuit), on pourrait remanier le programme des opérations de procédé de manière à éliminer les temps morts, ce qui permettrait de réduire la consommation d'énergie et la déperdition de chaleur. On pourrait aussi étudier la possibilité d'utiliser des appareils plus rapides et plus efficaces.
- **Réduction au minimum de la quantité de chaleur contenue dans les rejets thermiques par des mécanismes de contrôle de maintenance**

L'élimination totale des rejets thermiques n'est pas toujours possible ni toujours souhaitable. Par exemple, il pourrait être souhaitable de maintenir la température des gaz de combustion au-dessus d'un point quelconque pour empêcher la condensation. Dans d'autres cas toutefois, la quantité de chaleur contenue dans les rejets peut être réduite sans que le procédé en soit gêné. Les températures et les méthodes d'exploitation doivent faire l'objet d'une évaluation périodique. Les points de consignes devraient être fixés convenablement. De façon plus régulière, on doit vérifier et régler au besoin les mécanismes des appareils de contrôle.

- **Maintenance des appareils mécaniques**

Un bon entretien des appareils mécaniques peut entraîner une réduction des pertes thermiques. Toutes les surfaces thermoconductrices et d'échange thermique doivent être particulièrement bien entretenues. Un certain encrassement est toujours prévu dans la conception de l'appareillage d'échange de chaleur, mais s'il est excessif, il pourrait réduire considérablement l'efficacité du système.

## Possibilités d'Amélioration de Cout Modique

Les possibilités d'amélioration à 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. Utilisation directe des rejets thermiques propres.
2. Utilisation de l'eau usée de procédé comme source de chaleur pour la pompe à chaleur d'un système de chauffage des locaux.
3. Utilisation de l'air d'échappement pour le séchage.

## Exemples concrets d'amélioration de coût modique

### 1. Utilisation directe de la chaleur récupérable

Des quantités de chaleur sont souvent rejetées en pure perte dans l'atmosphère ou dans des circuits de vidange. Ces rejets thermiques pourraient être réutilisés directement.

Exemple : Une grande brasserie a un jour constaté qu'elle rejetait en moyenne 7,5 L/s (environ 650 000 L/jour) d'eau chaude propre.

Une des sources principales de cette eau était le circuit de refroidissement du compresseur.

Cette brasserie rejetait plus de 100 000 L/jour à une température de 8 °C. Elle a envisagé de réutiliser cette eau comme eau d'alimentation de la chaudière dans un cycle à passage forcé unique. L'eau d'alimentation devait être chauffée à 104 °C. La température de l'eau de l'aqueduc municipal utilisée antérieurement à cette fin était en moyenne de 4 °C.

a) Quantité de chaleur économisée par jour :

$$\begin{aligned} Q &= M \times pc \times DT \\ &= 100\,000 \text{ kg/j} \times 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \times (8 - 4) \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 1\,672\,000 \text{ kJ/j} \times 250 \text{ j/an} \\ &= 4,18 \times 10^8 \text{ kJ/an} \end{aligned}$$

b) Calcul de l'économie sur le coût du gaz naturel :

Si le gaz naturel coûte 4,27 \$/GJ (4,50 \$/1 000 pi<sup>3</sup>) puis brûle avec un rendement thermique de 90 %, l'économie sur le coût du gaz naturel est la suivante :

$$\begin{aligned} &= Q \times \frac{1}{E_{\text{chaud.}}} \times \frac{\$}{\text{unité de contenu énergétique du combustible}} \\ &= 4,18 \times 10^8 \text{ kJ/an} \times \frac{1}{0,9} \times \frac{4,27 \text{ \$}}{\text{GJ}} \\ &= 1\,980 \text{ \$/an} \end{aligned}$$

c) Calcul de l'économie sur le coût de l'eau :

On peut économiser sur le coût de l'eau en utilisant l'eau du circuit de refroidissement du compresseur comme eau d'alimentation de la chaudière. Si l'eau coûte 3,00 \$/4 546 litres, l'économie réalisable est la suivante :

$$\begin{aligned}
&= \text{Volume d'eau épargnée} \times \frac{\$}{\text{unité de volume d'eau}} \\
&= 100\,000 \text{ L/j} \times 250 \text{ j/an} \times 3,00 \$/4\,546 \text{ litres} \\
&= 16\,500 \$/\text{an}
\end{aligned}$$

d) Calcul de la période de rentabilité :

Le coût de l'installation des tuyauteries nécessaires pour véhiculer l'eau du circuit de refroidissement du compresseur à la chaudière était de 30 000 \$.

$$\begin{aligned}
\text{Période de rentabilité} &= \frac{30\,000 \$}{1\,980 \$ + 16\,500 \$} \\
&= 1,62 \text{ année}
\end{aligned}$$

## 2. Utilisation des eaux usées de procédé comme source thermique pour une pompe à chaleur

Une usine de Toronto qui prévoit de construire une annexe pour ses bureaux cherche une méthode économique pour chauffer et refroidir les locaux de la nouvelle annexe. L'usine produit des rejets thermiques sous forme d'eau à une température de 15 °C et à un débit de 0,38 L/s. La pompe à chaleur est donc tout indiquée dans ce cas.

Les charges de refroidissement et de chauffage de la nouvelle annexe, y compris la ventilation, calculées par un spécialiste de l'énergie, représentent respectivement 35,17 kW et 29,31 kW. Un système de conditionnement d'air complet, monté sur la toiture et avec chauffage électrique, avait d'abord été proposé. Le coût annuel du chauffage pour un système entièrement électrique a été estimé à 2 451 \$.

Une pompe thermique eau-air a par la suite été envisagée comme solution de rechange au système de conditionnement d'air complet de base avec chauffage électrique proposé. La pompe thermique a été choisie parce qu'elle remplissait les critères de charge de chauffage et de refroidissement et utilisait des réchauffeurs électriques de gaine comme unités de chauffage de remplacement pouvant la remplacer à 100 pour cent. Le fournisseur de la pompe thermique a indiqué que le COP (coefficient de performance) de la pompe pour le chauffage dans les conditions d'eau données était de 2,25. Le COP de la pompe thermique serait comparable aux performances du système de conditionnement d'air l'été. La source d'eau chaude était disponible 85 pour cent du temps pendant la saison de chauffage. De l'eau de refroidissement était disponible pendant toute la durée de la saison de refroidissement. La pompe thermique coûterait environ 3 000 \$ de plus que le système de conditionnement d'air standard avec chauffage électrique.

Comme la pompe fonctionne comme un système de conditionnement d'air l'été, les économies proviennent essentiellement des frais de chauffage réduits l'hiver. On peut calculer les économies réalisées de la manière suivante :

a) Coût énergétique annuel de la pompe thermique :

Le coût du chauffage par pompe thermique peut être décomposé en deux parties. Les unités de chauffage électrique de remplacement doivent fonctionner pendant 15 pour cent de la saison. Le coût du chauffage pendant cette période de l'année est égal à 15 pour cent du coût estimatif annuel du chauffage, à savoir 2 451 \$ (voir les paragraphes ci-dessus). Pendant 85 pour cent de la saison de chauffage, la pompe thermique peut utiliser l'eau chaude comme source thermique. Comme la pompe peut produire 2,25 unités de chauffage pour chaque unité d'énergie (électrique) consommée, le coût du chauffage par pompe thermique est le suivant :

$$\text{Coût} = \frac{0,85 \times 2\,451 \$}{2,25}$$

Ainsi, le coût énergétique annuel de la pompe thermique est :

$$\begin{aligned}
&= \frac{(0,85 \times 2\,451)}{2,25} + (0,15 \times 2\,451) \\
&= 1\,294 \$
\end{aligned}$$



- b) Les économies annuelles sur le coût du chauffage sont égales à ce qu'il en aurait coûté de chauffer l'immeuble par électricité, moins ce que cela a coûté de le chauffer par pompe thermique :

$$= 2\,451 \$ - 1\,294 \$$$

$$= 1\,157 \$$$

- c) Calcul de la période de rentabilité :

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{3\,000 \$}{1\,157 \$} = 2,6 \text{ années}$$

### 3. Recyclage des gaz d'échappement (extraction) des sècheurs

Une grosse usine de traitement de denrées alimentaires prépare trois produits concentrés, soit de la protéine, de la fécule et des fibres, à partir de pois des champs. Au dernier stade du procédé de cuisson, les produits sont séchés et ensachés individuellement. Une analyse énergétique de l'installation, au passage, a permis de constater que les sècheurs de fécule et de fibres utilisaient des quantités importantes d'air chaud dans un cycle à passage unique. Cette chaleur était rejetée dans l'atmosphère alors qu'elle aurait pu être récupérée. (Les détails sur la récupération de la chaleur des sècheurs de fibres sont donnés ci-dessous. On a constaté que les conditions et les chiffres étaient les mêmes pour les sècheurs de fécule.)

On a fait appel à un spécialiste de l'énergie pour les mesures sur place. Les résultats indiquent que le sècheur de fibres rejetait dans l'atmosphère 4 150 L/s d'air à une température de 93 °C et d'une humidité relative d'environ 5 pour cent. Le fournisseur de l'équipement nous a indiqué qu'il était possible de faire fonctionner les sècheurs avec une humidité relative à l'extraction de l'ordre de 30 pour cent sans que la vitesse de séchage en soit réduite. En recyclant une partie des gaz d'échappement (extraction) des sècheurs, la chaleur contenue dans ces gaz pourrait être récupérée et réutilisée de manière à obtenir une humidité relative de 30 pour cent à la récupération.

La manière la plus simple d'effectuer le recyclage serait de détourner une partie des gaz d'échappement (extraction) des sècheurs vers un point en aval du four de façon à les réutiliser dans une canalisation de recirculation. Le recyclage des gaz chargés de produits résiduels en amont du four n'est pas recommandé, car il en résulterait une combustion qui entraînerait une baisse de la qualité du produit. On pourrait monter des registres dans la canalisation de recirculation et dans la cheminée d'échappement (extraction) pour régler le débit de l'air retourné dans le système.

À une humidité relative d'échappement (extraction) de 20 pour cent, les gaz ont pu être recyclés à 83 pour cent, c'est-à-dire 3 445 L/s. Cela c'est traduit par une réduction de 47 pour cent de la consommation de combustible, permettant des économies de 18 000 \$. La réduction de la quantité d'air d'appoint nécessaire a permis d'économiser encore 5 000 \$/an. Une faible augmentation du coût énergétique correspondant à l'augmentation de l'alimentation électrique nécessaire au ventilateur se chiffrait à 400 \$/an. Le coût estimatif des modifications est de 14 300 \$ et comprend les matériaux, la main-d'oeuvre, l'ingénierie, etc.

$$\begin{aligned} \text{Période de rentabilité} &= \frac{14\,300}{18\,000 \$ + 5\,000 \$ - 400 \$} \\ &= 0,63 \text{ année} \end{aligned}$$

## Possibilités de Rénovation

Les possibilités de rénovation sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées en une seule fois et dont le coût est important. Comme la plupart des possibilités de cette catégorie demandent une analyse approfondie effectuée par des spécialistes, elles ne peuvent toutes être traitées dans le présent module. Voici quelques exemples types de possibilités de rénovation.

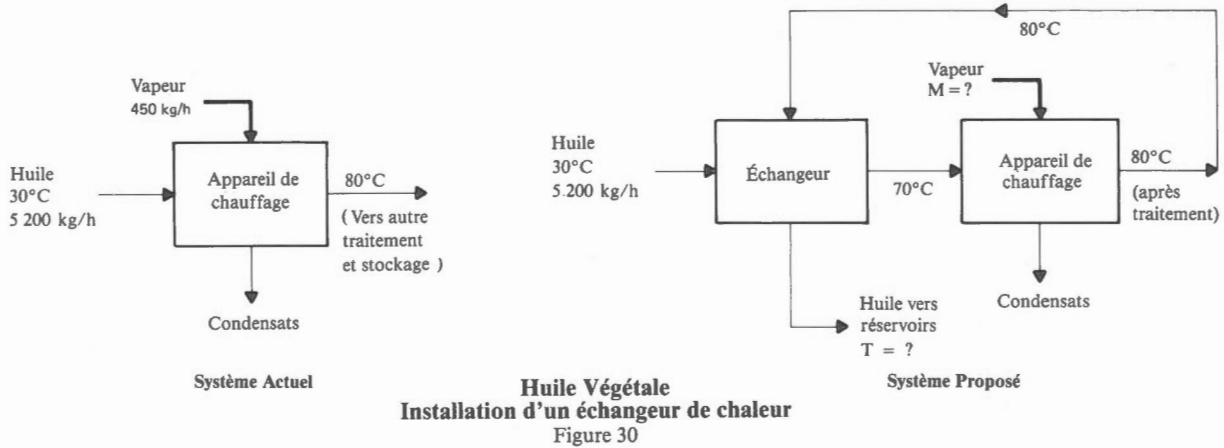
1. Utilisation d'échangeurs de chaleur pour préchauffer un fluide de procédé.
2. Utilisation de caloducs pour préchauffer l'air d'appoint des fours.

## Exemples Concrets de Rénovation

### 1. Installation d'un échangeur de chaleur

Une usine de production d'huile végétale doit porter de l'huile semi-traitée à une température précise avant le dernier stade, soit le raffinage. Un appareil de chauffage à la vapeur est utilisé à cette fin.

L'huile raffinée est envoyée vers des réservoirs de stockage à environ la même température après le traitement. On propose d'installer un échangeur de chaleur pour récupérer une partie de la chaleur contenue dans l'huile envoyée aux réservoirs de stockage pour préchauffer l'huile à l'entrée de l'appareil de chauffage à la vapeur. La quantité de vapeur nécessaire serait donc réduite. La figure 30 illustre le système actuel et celui proposé.



Rappelons, comme on l'a vu dans la section Notions de base, qu'il est impossible de transférer toute la chaleur de l'huile chaude à l'huile froide. Dans la pratique, la dimension de l'échangeur est choisie en fonction d'une rentabilité acceptable sur les investissements calculée d'après les économies d'énergie, le coût de l'échangeur et le coût du pompage de l'huile vers l'échangeur et dans les tuyauteries.

Une température d'approche de 10 °C serait raisonnable vu les considérations ci-dessus. La température de l'huile réchauffée à la sortie de l'échangeur de chaleur serait donc de 70 °C (soit 80 °C - 10 °C).

- a) On peut calculer la chaleur transférée de l'huile chaude à l'huile entrant dans l'échangeur à l'aide de l'équation de transfert de la chaleur sensible dont on a parlé dans la section Notions de base.

$$\begin{aligned} Q &= M \times c_p \times DT \\ &= 5\,200 \text{ kg/h} \times 2,09 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \times (70-30)^\circ\text{C} \\ &= 43,5 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

On peut calculer à l'aide de la même équation la température de l'huile envoyée aux réservoirs de stockage :

$$\begin{aligned} Q &= M \times c_p \times DT \\ Q &= M \times c_p \times (T_{\text{entrée}} - T_{\text{sortie}}) \end{aligned}$$

ou en remaniant l'équation

$$\begin{aligned} T_{\text{sortie}} &= T_{\text{entrée}} - \frac{Q}{M c_p} \\ &= 80 - \frac{43,5 \times 10^4 \text{ kJ/h}}{5\,200 \text{ kg/h} \times 2,09 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

$$T_{\text{sortie}} = 40^\circ\text{C}$$

- b) Quantité de vapeur nécessaire pour porter l'huile de 30 °C à 80 °C (système actuel)

Chaleur transmise à l'huile

$$\begin{aligned} Q &= M \times c_p \times DT \\ &= 5\,200 \text{ kg/h} \times 2,09 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \times (80 - 30)^\circ\text{C} \\ &= 54,3 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Quantité de vapeur nécessaire (vapeur)

$$Q = h_{fg} \times M$$

$$\text{ou } M = \frac{Q}{h_{fg}}$$

$h_{fg}$  étant l'enthalpie de la vapeur sèche saturée à la pression atmosphérique

$$\begin{aligned} M &= \frac{54,3 \times 10^4 \text{ kJ/h}}{2\,257 \text{ kJ/kg}} \\ &= 240,8 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

- c) Quantité de vapeur nécessaire pour porter l'huile de 70 °C à 80 °C (système proposé)

Chaleur transmise à l'huile

$$\begin{aligned} Q &= M \times c_p \times DT \\ &= 5\,200 \text{ kg/h} \times 2,09 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \times (80 - 70)^\circ\text{C} \\ &= 10,9 \times 10^4 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Quantité de vapeur nécessaire

$$Q = h_{fg} \times M$$

$$\text{ou } M = \frac{Q}{h_{fg}}$$

$h_{fg}$  étant l'enthalpie de la vapeur sèche saturée à la pression atmosphérique

$$\begin{aligned} M &= \frac{10,9 \times 10^4 \text{ kJ/h}}{2\,257 \text{ kJ/kg}} \\ &= 48,2 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

- d) Économies nettes de vapeur

$$\begin{aligned} \text{Quantité de vapeur économisée} &= (240 - 48) \text{ kg/h} \\ &= 192 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

e) Calcul des économies sur le coût du gaz naturel :

Si le gaz naturel coûte 4,27 \$/GJ (4,50 \$/1 000 pi<sup>3</sup>) et brûle avec un rendement de 60 pour cent, les économies sur le coût du gaz naturel sont :

$$\begin{aligned} &= Q \times h_{fg} \times \frac{1}{E_{\text{chaud.}}} \times \frac{\$}{\text{unité de contenu énergétique du combustible}} \\ &= 192 \text{ kg/h} \times 2\,257 \text{ kJ/kg} \times \frac{1}{0,6} \times \frac{4,27 \$}{\text{GJ}} \\ &= 3,08 \$/\text{h} \end{aligned}$$

Les économies annuelles basées sur 8 heures de fonctionnement par jour, cinq jours par semaine et 240 jours par année sont :

$$\text{Économies annuelles} = 29\,570 \$$$

f) Calcul de la période de rentabilité

Le coût de l'échangeur a été fixé à 19 000\$ (installation comprise).

$$\begin{aligned} \text{Période de rentabilité} &= \frac{19\,000 \$}{29\,570 \$} \\ &= 0,64 \text{ année} \end{aligned}$$

## 2. Installation d'un caloduc

Un fabricant a un four qui rejette actuellement 3 330 L/s d'air à 130 °C. On étudie la possibilité d'installer un caloduc pour récupérer la chaleur de l'air rejeté et d'utiliser cette chaleur pour préchauffer l'air d'appoint du four. La consommation de gaz naturel serait réduite en conséquence.

Les autres conditions de service comprennent :

— heures de fonctionnement	3 800 h/an
— température extérieure moyenne	5 °C
— volume d'air d'appoint	1 915 L/s
— rendement du caloduc	60 %

a) Calcul de l'énergie qui sera récupérée par le caloduc

L'équation utilisée est essentiellement la même que celle présentée dans la section Notions de base pour le calcul de la chaleur sensible.

$$Q = M \times c_p \times DT$$

On doit la modifier légèrement toutefois pour convertir le volume d'air en poids et pour prendre en compte le rendement du caloduc (c.-à-d. 60 %).

$$\begin{aligned} Q &= (1\,915 \text{ L/s} \times 1,197 \times 10^{-3} \text{ kg/L}) \times (1,006 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}) \times (130-5)^\circ\text{C} \times (0,6) \\ &= 173 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

ou, fondé sur 3 800 heures de fonctionnement par année,

$$Q = 2,37 \times 10^9 \text{ kJ/an}$$

b) Calcul des économies sur le coût du gaz naturel :

Si le gaz naturel coûte 4,27 \$/GJ (4,50 \$/1 000 pi<sup>3</sup>) et brûle avec un rendement de 90 pour cent, les économies sur le coût du gaz naturel sont :

$$\begin{aligned} &= Q \times \frac{1}{E_{\text{four}}} \times \frac{\$}{\text{unité de contenu énergétique du combustible}} \\ &= 2,77 \times 10^9 \text{ kJ/an} \times \frac{1}{0,9} \times \frac{4,25 \$}{\text{GJ}} \\ &= 11\,240 \$ \end{aligned}$$

c) Calcul de la période de rentabilité

Le coût du caloduc a été fixé à 16 000 \$ (installation comprise). Les frais d'exploitation annuels sont de 750 \$.

$$\begin{aligned} \text{Période de rentabilité} &= \frac{16\,000 \$}{11\,240 \$ - 750 \$} \\ &= 1,52 \text{ année} \end{aligned}$$

## **ANNEXES**

- A** Glossaire
- B** Tableaux
- C** Conversions courantes



## Glossaire

**ASHRAE** — Sigle de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.

**Chaleur latente** — Chaleur qui produit un changement de phase. Changement de l'enthalpie durant un changement d'état; la quantité de chaleur absorbée ou rejetée à température constante, quelle que soit la pression; ou la différence de l'enthalpie entre l'état sec saturé et l'état liquide saturé d'un fluide pur et condensable, à la même pression.

**Chaleur perdue** — Énergie sous forme de chaleur rejetée ou perdue par un procédé, qui peut être récupérée ou réutilisée dans un autre procédé à la condition que sa qualité soit suffisante (c'est-à-dire qu'elle soit assez chaude et qu'il y ait une utilité pour cette chaleur).

**Chambre de détente** — Réservoir de séparation placé entre la soupape de détente et l'évaporateur en vue de séparer et de détourner tout gaz éclair formé dans la soupape de détente.

**Condensateur** — Échangeur de chaleur dans lequel le réfrigérant, après avoir été comprimé à une pression convenable, se condense tout en transmettant sa chaleur à un médium de refroidissement externe.

**Condensation** — Processus qui transforme une vapeur en liquide par l'extraction de la chaleur.

**Cycle fermé** — Tout cycle dans lequel le médium primaire est toujours enfermé et qui répète la même suite d'événements.

**Degré Kelvin** — Unité de mesure de température dans laquelle le zéro (0 K) est absolu à zéro et correspond à -273 °C. Le K et °C sont des augmentations égales de température.

**Eau de refroidissement** — Eau qui sert à refroidir un procédé ou un condensateur.

**Eau du condensateur** — Eau froide circulant dans un condensateur et servant à condenser un réfrigérant ou une vapeur.

**Échangeur de chaleur** — Appareil spécialement conçu pour transférer la chaleur entre deux fluides physiquement séparés.

**Effet de réfrigération** — Quantité nette de rejet de froid ou de chaleur obtenue, sans compter les effets parasites tels que la chaleur dégagée de la tubulure ou la chaleur ajoutée à la vapeur réfrigérante au compresseur.

**Éjecteur à vapeur** — Dispositif en forme de buse qui accumule un fluide à vitesse élevée dans un endroit restreint afin d'obtenir une pression statique plus faible à ce point, afin qu'un fluide d'une autre source y soit attiré.

**Énergie** — Capacité d'exécuter du travail; de prendre un certain nombre de formes qui peuvent être transformées de l'une à l'autre telles que l'énergie thermique (la chaleur), mécanique (le travail), électrique et chimique; les unités de mesure sont habituellement le kilowattheure (kWh) ou le mégajoule (MJ).

**Énergie perdue** — Énergie qui est perdue sans avoir été pleinement utilisée. Cela peut inclure l'énergie contenue dans un fluide ou un flux comme la vapeur, les gaz d'échappement, les eaux usées ou même les déchets.

**Enthalpie** — L'enthalpie est l'unité de mesure d'énergie calorifique par unité de masse d'un matériau. Les unités sont exprimés en kJ/kg.

**Entropie** — Rapport entre la chaleur ajoutée à une substance et la température absolue à laquelle elle a été ajoutée; mesure du désordre moléculaire d'une substance dans un état donné.

**État** — Condition d'un système ou d'une substance, caractérisée par les valeurs de ses propriétés telles que la température ou la pression. Le terme est souvent interchangeable avec le terme "phase", comme dans la phase solide ou la phase gazeuse d'une substance.



**Étranglement d'un fluide** — Procédé qui consiste à en abaisser la pression par dilatation sans apport de travail ou de chaleur.

**Évaporateur** — Échangeur de chaleur dans lequel le réfrigérant liquide est évaporé par l'absorption de la chaleur du médium à refroidir.

**Fonte** — Passage d'une substance de l'état solide à l'état liquide.

**Gaz chaud** — Vapeur dégagée d'un compresseur dans un cycle de compression de la vapeur — ce gaz est "chaud" comparativement au gaz d'aspiration en raison de l'apport énergétique sous forme de travail de compression.

**Gaz d'aspiration** — Vapeur du réfrigérant du côté aspiration d'un compresseur dans un cycle de compression de la vapeur; gaz rejeté par le serpentin de l'évaporateur.

**Gaz éclair** — Gaz résultant de l'évaporation instantanée d'un liquide lorsque la pression au-dessus du liquide est réduite. Le liquide qui reste est alors refroidi. La production de gaz éclair s'effectue au dispositif d'étranglement dans un processus de réfrigération, lorsque la pression au-dessus du liquide est abaissée en dessous de la pression de saturation du liquide à une température donnée.

**Gaz sec saturé** — Vapeur ne contenant aucun liquide, dont la qualité est un (1) et dont l'état peut être défini graphiquement comme étant placé sur la ligne de saturation d'un diagramme d'état, à la droite du point critique.

**Isolant** — Matériau à faible conductivité thermique utilisé pour réduire le passage de la chaleur.

**Point de rosée** — Degré de température auquel la vapeur se condense lorsqu'elle est refroidie à une pression constante.

**Possibilités de gestion de l'énergie, coût modique** — Améliorations possibles en vue d'économiser de l'énergie qui sont effectuées une seule fois et dont les coûts ne sont pas considérés comme élevés.

**Possibilités de gestion de l'énergie, maintenance** — Activités visant les économies possibles d'énergie qui doivent être faites régulièrement et jamais moins d'une fois par an. Elles comprennent les programmes d'entretien préventif.

**Possibilités de gestion de l'énergie, modernisation** — Améliorations possibles en vue d'économiser l'énergie qui sont effectuées une seule fois et dont les coûts sont importants.

**Pression absolue** — Toute pression dont l'unité de mesure est basée sur le vide absolu (c.-à-d. pression effective et pression atmosphérique). S'exprime en kPa (pression absolue).

**Pression au manomètre** — Toute pression dont la mesure est basée sur la pression atmosphérique, exprimée en kPa (au manomètre). Nota :  $kPa \text{ (au manomètre)} + \text{pression atmosphérique} = kPa \text{ (pression absolue)}$ .

**Pression de saturation** — Pression d'un liquide ou d'une vapeur à l'état de saturation (c.-à-d. au-dessus ou en dessous de la courbe de saturation).

**Pression différentielle** — Différence de pression entre deux points.

**Procédé** — Modification des propriétés d'un système ou d'une substance, habituellement définie par l'état au départ et l'état à la fin du procédé.

**Propriété** — Caractéristique physique utilisée pour décrire l'état d'une substance. Deux propriétés données servent habituellement à définir l'état ou la condition de la substance de laquelle toutes les autres propriétés peuvent dériver. Des exemples sont la température, la pression, l'enthalpie et l'entropie.

**Puissance réfrigérante** — Capacité nette ou nominale de refroidir ou de réchauffer d'un système de réfrigération donné, exprimée en watts ou en kilowatts de refroidissement.

**Puits thermique** — Médium ou dispositif dans lequel la chaleur est déversée; il doit toujours être à une température inférieure à celle du médium rejetant la chaleur pour que se produise la transmission thermique. Par exemple, un condenseur rejette de la chaleur dans un lac par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur — le lac agit comme puits thermique.

**Rapport d'efficacité de l'énergie** — Mesure d'efficacité d'un système de réfrigération ou de pompe à chaleur qui compare l'effet de réfrigération réel par rapport au travail réel ou à l'énergie fournie au cycle. (Nota : Ce rapport n'existe qu'en mesures impériales.)

**Récupérateur** — Échangeur de chaleur conçu pour récupérer ce qui serait autrement de la chaleur perdue.

**Résistance thermique** — Chiffre indiquant la valeur isolante ou de résistance au transport de la chaleur d'un matériau ou d'un assemblage.

**Source de chaleur** — Médium ou procédé duquel on peut tirer de la chaleur; il doit toujours être à une température plus élevée que celle du médium ou du procédé nécessitant la chaleur pour que se produise la transmission thermique; voir chaleur perdue. Par exemple, la vapeur éclair provenant d'une chaudière peut être utilisée comme source de chaleur pour régénérer le réfrigérant d'un solvant dans un refroidisseur par absorption.

**Taux de compression** — Rapport entre la pression de refoulement et la pression d'aspiration d'un compresseur, exprimé en unités absolues.

**Température d'approche** — Dans un échangeur de chaleur, l'écart de température entre le fluide traité qui quitte l'échangeur et le fluide caloporteur qui y entre. Dans un dispositif de refroidissement par évaporation, l'écart entre la température moyenne de l'eau en circulation quittant le dispositif et la température moyenne au thermomètre à bulbe humide de l'air quittant le dispositif.

**Température de saturation** — Température d'un liquide ou d'une vapeur à l'état de saturation (c.-à-d. au-dessus ou en dessous de la courbe de saturation).

**Travail** — Énergie mécanique transmise dans un procédé ou à une substance.

**Vapeur** — Gaz en équilibre ou près de l'équilibre avec la phase liquide; gaz sous la courbe de saturation ou juste légèrement au-delà la ligne de saturation de la vapeur.

**Vérification de diagnostic** — Analyse d'une occasion possible d'économiser l'énergie qui pourrait comprendre l'évaluation du fonctionnement actuel du procédé et des antécédents, et le calcul des économies et des coûts d'immobilisations et d'exploitation en vue d'établir la viabilité financière d'un projet.

**Volume de l'espace libre** — Espace dans un cylindre qui n'est pas occupé par le piston à la fin d'un temps de compression, mesuré en pourcentage de la course du piston.

**Vérification sommaire** — Inspection visuelle d'une installation afin d'observer la façon dont l'énergie est utilisée ou perdue.

**Volume spécifique** — Volume par unité d'une substance, ordinairement exprimé en mètres cubes par kilogramme (m<sup>3</sup>/kg); l'inverse de la densité spécifique.

**Zéro absolu** — Température théorique à laquelle tout mouvement moléculaire s'arrête, définie comme -273 °C ou 0° Kelvin.



PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SATURÉE ET DE L'EAU SATURÉE (TEMPÉRATURE)

TABLEAU 1

Température °C	K	Press. kPa	Volume, m <sup>3</sup> /kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K		
			Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur
<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v<sub>f</sub></i>	<i>v<sub>fg</sub></i>	<i>v<sub>g</sub></i>	<i>h<sub>f</sub></i>	<i>h<sub>fg</sub></i>	<i>h<sub>g</sub></i>	<i>s<sub>f</sub></i>	<i>s<sub>fg</sub></i>	<i>s<sub>g</sub></i>
0.	273.15	0.6108	0.0010002	206.30	206.31	-0.04	2501.6	2501.6	-0.0002	9.1579	9.1577
0.01	273.16	0.6112	0.0010002	206.16	206.16	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1.0	274.15	0.6566	0.0010001	192.61	192.61	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2.0	275.15	0.7055	0.0010001	179.92	179.92	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3.0	276.15	0.7575	0.0010001	168.17	168.17	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4.0	277.15	0.8129	0.0010000	157.27	157.27	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5.0	278.15	0.8718	0.0010000	147.16	147.16	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0249
6.0	279.15	0.9345	0.0010000	137.78	137.78	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0015
7.0	280.15	1.0012	0.0010001	129.06	129.06	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8.0	281.15	1.0720	0.0010001	120.96	120.97	33.61	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9.0	282.15	1.1472	0.0010002	113.43	113.44	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10.0	283.15	1.2270	0.0010003	106.43	106.43	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
12.0	285.15	1.4014	0.0010004	93.83	93.84	50.34	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536
14.0	287.15	1.5973	0.0010007	82.90	82.90	58.75	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060
16.0	289.15	1.8168	0.0010010	73.38	73.38	67.13	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593
18.0	291.15	2.0624	0.0010013	65.09	65.09	75.50	2459.0	2534.5	0.2677	8.4458	8.7135
20.0	293.15	2.337	0.0010017	57.84	57.84	83.86	2454.3	2538.2	0.2963	8.3721	8.6694
22.0	295.15	2.642	0.0010022	51.49	51.49	92.23	2449.6	2541.8	0.3247	8.2994	8.6241
24.0	297.15	2.982	0.0010026	45.92	45.93	100.59	2444.9	2545.5	0.3530	8.2277	8.5806
26.0	299.15	3.360	0.0010032	41.03	41.03	108.95	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
28.0	301.15	3.778	0.0010037	36.73	36.73	117.31	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
30.0	303.15	4.241	0.0010043	32.93	32.93	125.66	2430.7	2556.4	0.4365	8.0181	8.4546
32.0	305.15	4.753	0.0010049	29.57	29.57	134.02	2425.9	2560.0	0.4640	7.9500	8.4140
34.0	307.15	5.318	0.0010056	26.60	26.60	142.34	2421.2	2563.6	0.4913	7.8828	8.3740
36.0	309.15	5.940	0.0010063	23.97	23.97	150.74	2416.4	2567.2	0.5184	7.8164	8.3348
38.0	311.15	6.624	0.0010070	21.63	21.63	159.09	2411.7	2570.8	0.5453	7.7509	8.2962
40.0	313.15	7.375	0.0010078	19.545	19.546	167.45	2406.9	2574.4	0.5721	7.6861	8.2583
42.0	315.15	8.198	0.0010086	17.691	17.692	175.81	2402.1	2577.9	0.5987	7.6222	8.2209
44.0	317.15	9.100	0.0010094	16.035	16.036	184.17	2397.3	2581.5	0.6252	7.5590	8.1842
46.0	319.15	10.086	0.0010103	14.556	14.557	192.53	2392.5	2585.1	0.6514	7.4966	8.1481
48.0	321.15	11.162	0.0010112	13.232	13.233	200.89	2387.7	2588.6	0.6776	7.4350	8.1125
50.0	323.15	12.335	0.0010121	12.045	12.046	209.26	2382.9	2592.2	0.7035	7.3741	8.0776
52.0	325.15	13.613	0.0010131	10.979	10.980	217.62	2378.1	2595.7	0.7293	7.3138	8.0432
54.0	327.15	15.002	0.0010140	10.021	10.022	225.99	2373.2	2599.2	0.7550	7.2543	8.0093
56.0	329.15	16.511	0.0010150	9.158	9.159	234.35	2368.4	2602.7	0.7804	7.1955	7.9759
58.0	331.15	18.147	0.0010161	8.380	8.381	242.72	2363.5	2606.2	0.8058	7.1373	7.9431
60.0	333.15	19.920	0.0010171	7.678	7.679	251.09	2358.6	2609.7	0.8310	7.0798	7.9108
62.0	335.15	21.838	0.0010182	7.043	7.044	259.46	2353.7	2613.2	0.8560	7.0230	7.8790
64.0	337.15	23.912	0.0010193	6.468	6.469	267.84	2348.8	2616.6	0.8809	6.9667	7.8477
66.0	339.15	26.150	0.0010205	5.947	5.948	276.21	2343.9	2620.1	0.9057	6.9111	7.8168
68.0	341.15	28.563	0.0010217	5.475	5.476	284.59	2338.9	2623.5	0.9303	6.8561	7.7864
70.0	343.15	31.16	0.0010228	5.045	5.046	292.97	2334.0	2626.9	0.9548	6.8017	7.7565
72.0	345.15	33.96	0.0010241	4.655	4.656	301.36	2329.0	2630.3	0.9792	6.7470	7.7270
74.0	347.15	36.96	0.0010253	4.299	4.300	309.74	2324.0	2633.7	1.0034	6.6945	7.6979
76.0	349.15	40.19	0.0010266	3.975	3.976	318.13	2318.9	2637.1	1.0275	6.6418	7.6693
78.0	351.15	43.65	0.0010279	3.679	3.680	326.52	2313.9	2640.4	1.0514	6.5896	7.6410
80.0	353.15	47.36	0.0010292	3.408	3.409	334.92	2308.8	2643.8	1.0753	6.5380	7.6132
82.0	355.15	51.33	0.0010305	3.161	3.162	343.31	2303.8	2647.1	1.0990	6.4868	7.5858
84.0	357.15	55.57	0.0010319	2.934	2.935	351.71	2298.6	2650.4	1.1225	6.4362	7.5588
86.0	359.15	60.11	0.0010333	2.726	2.727	360.12	2293.5	2653.6	1.1460	6.3861	7.5321
88.0	361.15	64.95	0.0010347	2.535	2.536	368.53	2288.4	2656.9	1.1693	6.3365	7.5058
90.0	363.15	70.11	0.0010361	2.3603	2.3613	376.94	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4799
92.0	365.15	75.61	0.0010376	2.1992	2.2002	385.36	2278.0	2663.4	1.2156	6.2387	7.4543
94.0	367.15	81.46	0.0010391	2.0599	2.0619	393.78	2272.9	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291
96.0	369.15	87.69	0.0010406	1.9443	1.9453	402.20	2267.8	2669.7	1.2615	6.1427	7.4042
98.0	371.15	94.30	0.0010421	1.7883	1.7893	410.63	2262.2	2672.9	1.2842	6.0954	7.3796
100.0	373.15	101.33	0.0010437	1.6720	1.6730	419.06	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554

NOTE AU CLIENT : Remplacer le point décimal par une virgule dans les tableaux.







**TABLEAU 2**  
**VALEURS CALORIFIQUES SPÉCIFIQUES**  
**(à 20 °C)**

<u>Matériau</u>	<u>Chaleur spécifique kJ/(kg·°C)</u>
Fer et acier à faible teneur de carbone	0,5
Aluminium	0,92
Cuivre	0,40
Verre	0,84
Zinc	0,39
Plomb	0,13
Étain	0,23
Laiton	0,39
Eau	4,18
Huile (à moteur non utilisée)	1,88
Acide acétique	2,03
Acétone	2,16
Aniline	2,06
Benzène	1,74
Alcool n-butylique	2,37
Chloroforme	0,967
Acétate d'éthyle	2,01
Alcool éthylique	2,47
Éthylène glycol	2,38
Glycérine	2,43
n-heptane	1,88
Alcool isobutylique	2,30
Alcool méthylique	2,47
n-octane	2,18
n-pentane	2,18
Toluène	1,68
Térébenthine	1,80
Air	1,01



**TABLEAU 3**

**VALEURS CALORIFIQUES DE LA VAPORISATION**

<u>Matériau</u>	<u>Chaleur de vaporisation kJ/kg</u>
Eau à 20 °C	2 450
Trichloroéthylène	230
Acétone	510
Alcool éthylique	860
Alcool isopropylique	675
Benzène	400
Toluène	350
Térébenthine	290
Naphthe	240
Kérosène	200
Tétrachlorure de carbone	195

**TABLEAU 4**

**COEFFICIENTS MOYENS DE LA TRANSMISSION THERMIQUE GÉNÉRALE U\***

APPLICATIONS THERMIQUES		COEFFICIENTS DE SURFACE PROPRE		COEFFICIENTS D'ÉPREUVE Considérant l'encrassement habituel dans cette catégorie	
COTÉ CHAUD	COTÉ FROID	Convection naturelle	Convection forcée	Convection naturelle	Convection forcée
1. Vapeur	Solution aqueuse	250-500	300-550	100-200	150-275
2. Vapeur	Huiles légères	50-70	110-140	40-45	60-110
3. Vapeur	Lubrifiant moyen	40-60	100-130	25-40	50-100
4. Vapeur	Bunker C ou mazout #6	20-40	70-90	10-30	60-80
5. Vapeur	Goudron ou asphalte	15-35	50-70	15-25	40-60
6. Vapeur	Soufre fondu	35-45	60-80	4-15	50-70
7. Vapeur	Paraffine fondue	35-45	45-55	25-35	40-50
8. Vapeur	Air ou gaz	2-4	5-10	1-3	4-8
9. Vapeur	Mélasse ou sirop de maïs	20-40	70-90	15-30	60-80
10. Eau chaude à haute température	Solutions aqueuses	80-100	100-225	70-100	110-160
11. Huile de transfert à haute température	Goudron ou asphalte	12-30	45-65	10-20	30-50
12. Therminol	Goudron ou asphalte	15-30	50-60	12-20	30-50
APPLICATIONS DU REFROIDISSEMENT					
COTÉ FROID	COTÉ CHAUD				
13. Eau	Solution aqueuse	80-100	150-200	65-125	105-200
14. Eau	Huile de trempage	10-15	25-45	7-10	15-25
15. Eau	Lubrifiant moyen	8-12	20-30	5-8	10-20
16. Eau	Mélasse ou sirop de maïs	7-10	18-26	4-7	8-15
17. Eau	Air ou gaz	2-4	5-10	1-3	4-8
18. Fréon ou ammoniac (dilat. dir.)	Solution aqueuse	35-45	60-90	20-35	40-60
19. Liquide frigorigène de calcium ou de sodium	Solution aqueuse	100-120	175-200	50-75	80-125

\*U = Btu/h·ft<sup>2</sup>·°F)

Nota: 1 Btu (h·ft<sup>2</sup>·°F) = 5,68 W/(m<sup>2</sup>·°C)



## 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 <sup>2</sup>
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts	1 thermie	= 10 <sup>5</sup> 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

1 v <sup>3</sup>	= 27 pi <sup>3</sup>
1 pi <sup>3</sup>	= 1728 po <sup>3</sup>
1 cm <sup>3</sup>	= 1000 mm <sup>3</sup>
1 m <sup>3</sup>	= 10 <sup>6</sup> cm <sup>3</sup>
1 m <sup>3</sup>	= 1000 L

### Carrés

1 v <sup>2</sup>	= 9 pi <sup>2</sup>
1 pi <sup>2</sup>	= 144 po <sup>2</sup>
1 cm <sup>2</sup>	= 100 mm <sup>2</sup>
1 m <sup>2</sup>	= 10000 cm <sup>2</sup>

## PRÉFIXES SI

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

## TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm <sup>2</sup>	ampère/pouce carré	A/po <sup>2</sup>	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm <sup>3</sup>	pouce cube	po <sup>3</sup>	0,06102
mètre cube	m <sup>3</sup>	pied cube	pi <sup>3</sup>	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi <sup>3</sup>	0,06243
joule	J	Btu	Btu	9,480 × 10 <sup>-4</sup>
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	3,73 × 10 <sup>-7</sup>
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	9,842 × 10 <sup>-4</sup>
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	1,102 × 10 <sup>-3</sup>
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	9,87 × 10 <sup>-3</sup>
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H <sub>2</sub> O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po <sup>2</sup>	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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup> /min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m <sup>2</sup>	lumen par pied carré	lm/pi <sup>2</sup>	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	pouce carré	po <sup>2</sup>	0,1550
mètre carré	m <sup>2</sup>	pied carré	pi <sup>2</sup>	10,764
mètre carré	m <sup>2</sup>	verge carré	v <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	A/po <sup>2</sup>	ampère/cm <sup>2</sup>	A/cm <sup>2</sup>	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 × 10 <sup>-4</sup>
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
piéd cube	pi <sup>3</sup>	mètre cube	m <sup>3</sup>	0,02832
piéd cube	pi <sup>3</sup>	litre	L	28,32
piéd cube/minute	pi <sup>3</sup> /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
piéd	pi	mètre	m	0,3048
piéd bougie	pi-b	lux, lumen/ mètre carré	lx, lm/m <sup>2</sup>	10,764
piéd lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m <sup>2</sup>	3,42626
piéd-livre	pi-lb	joule	J	1,356
piéd-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
piéd livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	1,356 × 10 <sup>-3</sup>
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 × 10 <sup>6</sup>
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 <sub>2</sub> O	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 <sup>2</sup>	3,183
lumen/pied carré	lm/pi <sup>2</sup>	lumen/mètre carré	lm/m <sup>2</sup>	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-s-m <sup>2</sup> ) (PERM)	5,721 × 10 <sup>-11</sup>
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	kg/(Pa-s-m <sup>2</sup> ) (PERM)	5,745 × 10 <sup>-11</sup>
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	1,4532 × 10 <sup>-12</sup>
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	1,4593 × 10 <sup>-12</sup>
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 × 10 <sup>-4</sup>
livre/pied cube	lb/pi <sup>3</sup>	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po <sup>2</sup>	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi <sup>2</sup>	mètre carré	m <sup>2</sup>	0,09290
pouce carré	po <sup>2</sup>	centimètre carré	cm <sup>2</sup>	6,452
verge carré	v <sup>2</sup>	mètre carré	m <sup>2</sup>	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'éclairage.

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
<b>CHARBON</b>		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	$25,0 \times 10^6$ BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	$25,8 \times 10^6$ 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
<b>COKE</b>		
— 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
<b>POIX</b>	37 200 mégajoules/tonne	$32,0 \times 10^6$ BTU/tonne
<b>PÉTROLE BRUT</b>	38,5 mégajoules/litre	$5,8 \times 10^6$ BTU/baril
<b>MAZOUT N° 2</b>	38,68 mégajoules/litre	$5,88 \times 10^6$ BTU/baril $0,168 \times 10^6$ BTU/GI
<b>PÉTROLE N° 4</b>	40,1 mégajoules/litre	$6,04 \times 10^6$ BTU/baril $0,173 \times 10^6$ BTU/GI
<b>PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)</b>		
— 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
<b>KÉROSÈNE</b>	37,68 mégajoules/litre	$0,167 \times 10^6$ BTU/GI
<b>DIESEL</b>	38,68 mégajoules/litre	$0,172 \times 10^6$ BTU/GI
<b>GAZOLINE</b>	36,2 mégajoules/litre	$0,156 \times 10^6$ BTU/GI
<b>GAZ NATUREL</b>	37,2 mégajoules/m <sup>3</sup>	$1,00 \times 10^6$ BTU/M pi <sup>3</sup>
<b>PROPANE</b>	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	$0,02165 \times 10^6$ BTU/lb $0,1145 \times 10^6$ BTU/GI
<b>ÉLECTRICITÉ</b>	3,6 mégajoules/kWh	$0,003413 \times 10^6$ BTU/kWh





