

This document was produced
by scanning the original publication.

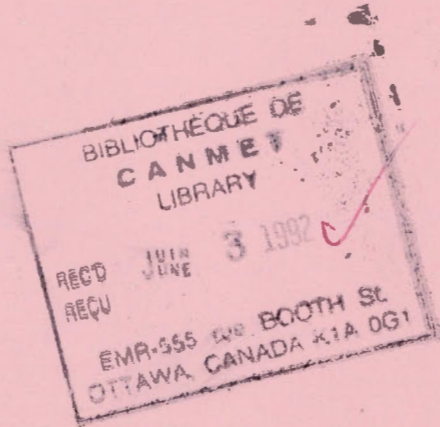
Ce document est le produit d'une
numérisation par balayage
de la publication originale.

M 91-6/9F

SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

9

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS



Chauffage et refroidissement (vapeur et eau)

CONTRACT

~~INTERNAL REPORT~~

TJ 163.4
C2
A614
1985
no. 009
c.3

nergie, Mines et
ources 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

- | | |
|--|---|
| 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 | |

94 pp

MICROMEDIA

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

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

N° de catalogue M91-6/9F au Canada: \$6.75
ISBN 0-662-93331-1 à l'étranger: \$8.10

Prix sujet à changement sans préavis

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

MICROMEDIA

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
Objectif	1
Contenu	1
NOTIONS DE BASE	3
Énergie contenue dans la vapeur	3
Énergie calorifique	3
Chaleur	3
Unités d'énergie	4
Changement d'état	4
Vapeur saturée	5
Vapeur surchauffée	5
Qualité de la vapeur	5
Tables de vapeur	6
Transport de la vapeur	6
Modes de transmission de la chaleur	7
Transfert de chaleur par radiation	7
Transfert de chaleur par convection	7
Transfert de chaleur par conduction	9
Processus de condensation	9
Condensation en film	9
Condensation en gouttes	9
Purgeurs	10
Purgeurs sensibles à la température (à soufflet et à bilame)	10
Purgeurs thermodynamiques	10
Purgeurs sensibles à la masse volumique	10
Techniques de collecte du condensat	10
Fuites aux purgeurs	12
Fuites de vapeur	12
Vapeur instantanée et coup de bélier	12
Séparateurs de vapeur	12
Capacité d'extraction de condensat	14
Équation générale pour le calcul de l'échangeur de chaleur	14

01-2003902

Écart logarithmique moyen de température (LMTD)	15
Effet de l'isolant sur le transfert de chaleur	16
Effet des mouvements de l'air sur le transfert de chaleur	16
Chauffage à la vapeur	20
Chauffage direct à la vapeur	20
Considérations pratiques sur le chauffage direct à la vapeur	21
Chauffage indirect à la vapeur	22
Serpentins à la vapeur	22
Vaisseaux à enveloppe chauffante	23
Échangeurs de chaleur	24
Rendement des échangeurs de chaleur	26
Aérothermes	27
Équipements refroidis à l'eau	29
Refroidissement direct	29
Refroidissement indirect	29
Source d'eau de refroidissement	29
Transfert de la chaleur	29
Analyse énergétique	30
Sommaire	31
APPAREILLAGE	33
Appareils chauffés à la vapeur	33
Sécheurs rotatifs	33
Évaporateurs	33
Appareils de chauffage d'ambiance	33
Préchauffeurs d'air	34
Machines frigorifiques à absorption	34
Machines stationnaires à chambre de vapeur	34
Appareils de vulcanisation	34
Appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau	34
Échangeurs de chaleur	34
Réservoirs de stockage	34
Vaisseaux à enveloppe de vapeur	34
Appareils de moulage en matrices	35
Appareils refroidis à l'eau	35
Compresseurs refroidis à l'eau	35
Bacs de refroidissement à l'eau	35
Refroidisseurs	35
Tunnels de refroidissement par aspersion	35
Divers appareils refroidis à l'eau	35

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE 37

Possibilités de maintenance 37

Exemples concrets de maintenance 37

1. Réparation des fuites 37
2. Réparation de l'isolant 38
3. Entretien des instruments 38
4. Entretien des purgeurs 38
5. Nettoyage des surfaces d'échange de chaleur 39
6. Vérification de la qualité de vapeur 39
7. Réduction de la température et de la pression de la vapeur 39
8. Vérification de la capacité des purgeurs 40
9. Inclinaison des serpents de chauffage pour évacuer le condensat 40

Possibilités d'améliorations de coût modique 40

Exemples concrets d'améliorations de coût modique 41

1. Arrêt des équipements 41
2. Verrouillage des dispositifs de régulation 41
3. Marche des appareils à pleine charge 42
4. Emploi d'événements thermostatiques 42
5. Adjonction d'instruments de mesure et de contrôle 43
6. Choix de l'emplacement des instruments de régulation 43

Possibilités de rénovation 43

Exemples concrets de rénovation 43

1. Conversion du chauffage direct à la vapeur en chauffage indirect 43
2. Installation ou amélioration de l'isolation 45
3. Récupération de la chaleur des équipements à vapeur 45
4. Réexamen du chauffage du bâtiment 45
5. Stabilisation de la demande de vapeur et d'eau 45
6. Révision des horaires de marche en fonction de la demande de pointe 46
7. Récupération de la chaleur contenue dans les eaux rejetées 47

ANNEXES

- A** Glossaire
- B** Tables
- C** Conversions courantes
- D** Feuilles de travail



INTRODUCTION



Beaucoup d'installations de transfert de chaleur en service aujourd'hui ont été installées alors que le combustible ne coûtait pas cher et qu'on n'accordait pas beaucoup d'importance à la gestion de l'énergie. Par conséquent, plusieurs processus existants d'échange de chaleur n'ont pas un rendement satisfaisant sur le plan énergétique. Les augmentations du prix des combustibles ont sensibilisé l'intérêt des techniques de gestion de l'énergie applicables aux installations en place. Le présent module décrit comment on peut réaliser des économies d'énergie et de coûts en modifiant les installations et les méthodes d'exploitation.

Objectif

L'objectif du présent module se résume comme suit:

- Décrire sommairement les équipements de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) employés dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel.
- Sensibiliser aux économies potentielles qui peuvent être tirées de la mise en oeuvre des «Possibilités de gestion de l'énergie».
- Etablir une procédure d'évaluation des économies énergétique et monétaire à l'aide d'équations, de méthodes de calculs et de feuilles de travail appliqués à des exemples concrets.
- Présenter une gamme de «Possibilités de gestion de l'énergie» à partir desquelles des économies typiques d'énergie et de coûts d'exploitation sont calculées.

Le présent module contient également des informations qui aideront à reconnaître les «Possibilités de gestion de l'énergie» reliées aux équipements de transfert de chaleur. Les économies potentielles qui s'en suivent pourront être alors évaluées.

Contenu

En vue d'assurer une continuité dans la présentation, ce module a été subdivisé en trois grands chapitres:

- Le chapitre *Notions de base* couvre sommairement les notions de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau), et donne des exemples qui feront bien comprendre les concepts de base employés dans les équations et les calculs.
- Le chapitre *Appareillage* décrit l'équipement typique de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) employé dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* décrit diverses occasions d'économie et évalue les économies correspondantes d'énergie et de coûts tout en déterminant leur période de rentabilité.
- Les annexes comprennent un glossaire, des tableaux, des tables de conversion, et des feuilles de travail.



NOTIONS DE BASE



Tout équipement de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) fonctionne sur le principe que l'énergie calorifique se transmet toujours de la matière la plus chaude à la matière la plus froide.

Dans toute situation d'échange de chaleur, il faut chercher à maximiser le transfert de chaleur dans les situations de chauffage ou de refroidissement et à le minimiser dans les autres cas. De nombreuses possibilités de gestion de l'énergie existent à l'intérieur de tout système d'échange et de distribution de chaleur.

Il faut connaître certaines notions de base de l'échange de chaleur pour pouvoir analyser les consommations d'énergie, et c'est l'un des objectifs du présent chapitre.

Énergie contenue dans la vapeur

Lorsque l'eau est chauffée à la pression atmosphérique, sa température monte à 100°C. C'est la plus haute température que l'eau puisse atteindre sous cette pression. Un chauffage plus intense ne fait pas augmenter la température de l'eau: il transforme l'eau en vapeur. La quantité de chaleur que l'eau doit absorber pour atteindre son point d'ébullition se nomme la *chaleur sensible*. À partir de la température d'ébullition, la chaleur servant à transformer l'eau en vapeur est la *chaleur latente*.

Si l'eau est chauffée sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, son point d'ébullition sera plus élevé que 100°C et la chaleur sensible requise sera plus élevée. Il existe donc pour chaque pression une température d'ébullition spécifique. Plus la pression est élevée, plus la température d'ébullition et la quantité de chaleur sensible augmentent. Si la pression est réduite, la quantité de chaleur sensible diminue et la température de l'eau descend au point d'ébullition correspondant à la nouvelle pression. Cela signifie qu'une certaine quantité de chaleur sensible est alors cédée par l'eau et qu'elle est alors transformée en chaleur latente à un petit volume d'eau, provoquant la *vaporisation instantanée*. Un exemple de ce phénomène se présente lorsque le condensat est évacué par un purgeur.

Énergie calorifique

La chaleur est une forme d'énergie. Le niveau d'énergie calorifique contenue dans un corps est mesuré par sa température. Plus la température est élevée, plus le corps contient de l'énergie. Dans la plupart des corps, le fait d'augmenter l'énergie contenue a pour conséquence d'augmenter leur température jusqu'au point d'ébullition. Certaines substances réagissent différemment à des températures spécifiques. Par exemple, en fournissant de la chaleur à de la glace, elle fond et se transforme en eau sans augmentation de sa température (chaleur latente de fusion). Pareillement, l'addition de chaleur à l'eau peut maintenir l'ébullition sans que sa température augmente (chaleur latente de vaporisation). L'unité d'énergie calorifique couramment employée dans le système SI (Système international d'unités) adopté au Canada est le joule.

Chaleur

L'énergie existant sous forme de chaleur, de travail et d'électricité peut être convertie en une autre forme seulement par les moyens suivants:

- Énergie mécanique en énergie électrique: à l'aide d'une génératrice électrique: rendement de 50 % à 95 %.
- Énergie mécanique en énergie calorifique: conversion possible, mais non pratique.
- Énergie électrique en énergie calorifique: à l'aide d'un élément chauffant; rendement de 100 %.
- Énergie électrique en énergie mécanique: à l'aide d'un moteur électrique; rendement de 50 à 95 %.
- Énergie calorifique en énergie mécanique: à l'aide d'un moteur thermique; rendement maximum de 40 %.
- Énergie calorifique en énergie électrique: à l'aide d'un thermocouple, mais non pratique.

L'énergie est exprimée en calories, en joules et en wattheures.

Unités d'énergie

La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 gramme d'eau. La calorie n'est pas reconnue dans le système SI.

Le joule (J) est une unité de travail du SI équivalant à la force de 1 newton agissant sur une distance de 1 mètre.

Le wattheure (Wh) est une unité du SI représentant la quantité d'énergie électrique consommée par le passage d'un courant de 1 ampère sous une différence de potentiel de 1 volt pendant une heure.

L'équivalence entre les joules, les wattheures et les calories s'établit comme suit:

$$1 \text{ calorie} = 4\,1855 \text{ joules}$$

$$1 \text{ wattheure} = 3\,600 \text{ joules}$$

Il est également juste de dire qu'un watt est un taux de production d'énergie correspondant à 1 joule par seconde.

Changement d'état

La température est une mesure de l'énergie calorifique contenue dans une matière. L'eau à la pression atmosphérique bout à 100°C et la glace fond à 0°C. Lorsque la température d'un corps est abaissée à -273°C ou 0 K (zéro absolu), ce corps ne contient plus aucune énergie calorifique. En ajoutant de la chaleur, la température augmentera jusqu'à ce qu'un changement d'état se produise.

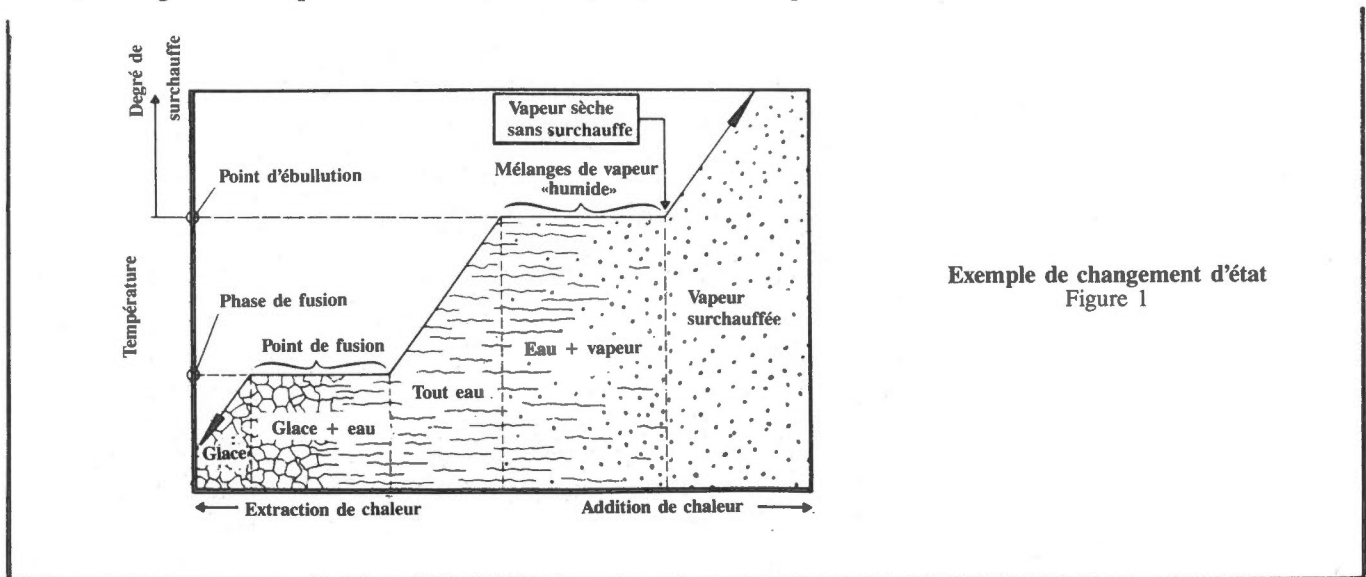
La plupart des corps subissent un changement d'état à une température précise, sans provoquer une augmentation de leur température jusqu'à ce que la transformation soit complète. Des exemples typiques sont la fusion de la glace, ou l'ébullition de l'eau. La figure 1 représente le processus de changement d'état.

La plupart des corps purs ont une température spécifique de *fusion* et de *congélation*. La pression extérieure n'a que peu ou pas d'effet sur cette température, de sorte que la fusion ou la congélation ne peut se produire à aucune autre température.

En ajoutant de la chaleur à la glace, elle commence à fondre à 0°C. La quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre 1 kilogramme de glace à 0°C et le transformer en 1 kilogramme d'eau à 0°C se définit comme la *chaleur latente de fusion* de l'eau (334,92 kJ/kg). En soutirant cette même quantité de chaleur de 1 kilogramme d'eau à 0°C, elle se transforme en 1 kilogramme de glace à 0°C.

La chaleur latente de fusion de la plupart des corps purs est indiquée dans les tables de propriétés physiques. La chaleur latente de fusion des mélanges et des corps hétérogènes doit être déterminée de façon empirique.

Contrairement à la congélation et à la fusion, l'*évaporation* se produit à différentes températures. L'évaporation est la dispersion sous forme de gaz des molécules situées à la surface d'un liquide. Le taux d'évaporation est à son maximum au point d'ébullition. Lorsqu'un liquide a atteint sa température d'ébullition, il faut fournir de l'énergie calorifique supplémentaire pour qu'il se transforme en gaz (par exemple, de l'eau en vapeur). Cette quantité de chaleur supplémentaire est la *chaleur latente de vaporisation*. Pour l'eau, la chaleur latente de vaporisation est 2 256,9 kJ/kg sous une pression de 101,35 kPa (abs.) et une température de 100°C.



Exemple de changement d'état
Figure 1

L'eau, l'alcool et l'essence s'évaporent à toutes températures, leur taux d'évaporation augmentant avec des températures plus élevées. Les gaz évaporés exercent une pression appelée la *pression de vapeur*. Quand la température d'un liquide monte, il y a une plus grande perte de liquide à la surface: cela augmente la pression de vapeur. Lorsque la pression de vapeur atteint la pression des gaz environnants, l'ébullition se produit. L'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique produit de la vapeur à 101,325kPa (abs.). Si la pression exercée sur la surface est augmentée, l'ébullition se produit à une température plus élevée.

L'évaporation et l'ébullition de l'eau peuvent être provoquées sous une pression inférieure à la pression atmosphérique. Des exemples se présentent dans l'emploi d'évaporateurs sous vide qui concentrent des solutions de sucre, de jus d'orange ou de lait, dans lesquels l'excès d'eau est éliminé par ébullition à des températures de 40 à 60°C. Cette opération préserve la saveur du concentré.

Vapeur saturée

Lorsque la vapeur s'échappe de la surface de l'eau en ébullition, que ce soit dans un appareil ouvert à l'atmosphère ou sous pression, c'est de la *vapeur saturée*. Si on enlève de la chaleur de cette vapeur, elle se condense en eau. Par exemple, la vapeur qui s'échappe de la surface de l'eau en ébullition se refroidit rapidement au contact de l'air environnant et se condense. La vapeur condensée apparaît sous forme de gouttelettes en chute libre au-dessus du niveau d'eau. Dans une conduite de vapeur, les gouttelettes se rassemblent en gouttes plus grosses qui retombent au bas de la conduite pour former du *condensat*, que les purgeurs ont pour rôle d'évacuer.

Vapeur surchauffée

La *vapeur surchauffée* est produite en chauffant la vapeur saturée à une température supérieure à la température de saturation. Puisque la vapeur surchauffée ne contient pas d'eau libre, l'enthalpie (autrement dit, la chaleur contenue) peut être déterminée en consultant directement les tables de vapeur surchauffée d'après les conditions de température et de pression existantes. La quantité de surchauffe de la vapeur est exprimée en degrés de surchauffe, c'est-à-dire par le nombre de degrés Celsius excédant la température de saturation.

La vapeur surchauffée n'est pas idéale pour les applications de chauffage, car la température de surchauffe peut difficilement être maintenue à une valeur constante, et la capacité calorifique par unité de volume est plus faible que celle de la vapeur saturée. De plus, les conduites qui la transportent doivent être plus grosses pour un même poids de vapeur. L'échange de chaleur peut être augmenté par la *désurchauffe* de la vapeur. La méthode la plus courante pour désurchauffer consiste à pulvériser de l'eau dans la vapeur.

Qualité de la vapeur

Lorsque la vapeur saturée s'échappe de la surface de l'eau dans un ballon de chaudière, il devrait s'agir idéalement d'une vapeur pure à la température et à la pression de saturation. Cependant, de minuscules gouttelettes d'eau s'échappent avec la vapeur. Le rapport entre la masse de vapeur pure et la masse totale est définie comme la qualité de la vapeur.

La qualité de vapeur peut être exprimée par l'équation suivante:

$$\text{Qualité (x)} = \frac{\text{masse de vapeur}}{\text{masse totale}}$$

Si la qualité de vapeur est 1, cela signifie que la vapeur ne contient pas d'eau. Il s'agit alors d'une vapeur sèche et saturée. À mesure que la vapeur se refroidit, sa qualité se détériore. Le pourcentage en poids de l'eau contenue dans la vapeur peut être déterminé par l'équation:

$$\text{Pourcentage d'eau} = 100\% - (\text{qualité} \times 100)$$

Par exemple, si la qualité de vapeur est de 0,98, le pourcentage d'eau se calcule comme suit:

$$\begin{aligned} &= 100 - (0,98 \times 100) \\ &= 100 - 98 \\ &= 2\% \end{aligned}$$

La qualité de vapeur est une valeur associée à une vapeur saturée, à la pression et à la température de saturation.

Tables de vapeur

Les tables de vapeur servent à évaluer la quantité d'énergie contenue dans l'eau ou la vapeur (table 1 et 2). Elles servent également à déterminer les températures de saturation et les volumes spécifiques de vapeur et d'eau à différentes pressions. Les explications suivantes sur les propriétés de la vapeur et de l'eau aideront à utiliser les tables de vapeur.

- Pression (kPa). La pression employée dans les tables de vapeur est la pression de saturation exprimée en kPa absolus. La pression effective est toujours de 101,325 kPa inférieure à la pression absolue car son point de référence se situe à la pression atmosphérique. Pour obtenir la pression absolue, il faut donc ajouter 101,325 kPa à la pression effective.
- Température de saturation (°C). La température de saturation est la température à laquelle l'ébullition produit de la vapeur à une pression donnée. Par exemple, si une chaudière produit de la vapeur saturée à 374,68 kPa (eff.), elle fonctionne à une température de 150°C.
- Volume spécifique du liquide saturé, v_f (m³/kg). Cette valeur est le volume en mètres cubes occupé par 1 kilogramme d'eau à la température de saturation. Tel qu'indiqué, cette valeur est constante sur une large gamme de températures. L'augmentation du volume spécifique sous l'effet d'une hausse de température est en relation réciproque avec la diminution de la masse volumique se produisant pour la même hausse de température. La masse volumique de l'eau est de 1 000 kg/m³ à la température ambiante normale.
- Volume spécifique de la vapeur saturée, v_g (m³/kg). Le volume spécifique de la vapeur saturée est le volume en mètres cubes occupé par 1 kilogramme de vapeur saturée sèche à la pression correspondante.
- Enthalpie (kJ/kg). Les tables de vapeur sont établies en considérant que l'eau à 0°C ne contient pas d'énergie. L'énergie totale contenue dans l'eau, la vapeur ou un mélange des deux, est appelée l'enthalpie du fluide, exprimée en kilojoules par kilogramme. Sous la rubrique Enthalpie, il y a trois colonnes identifiant l'enthalpie du liquide (h_f), l'enthalpie d'évaporation (h_{fg}), et l'enthalpie de la vapeur (h_g).

L'enthalpie du liquide (h_f) est une mesure de la quantité d'énergie calorifique contenue dans l'eau à une température spécifique.

L'enthalpie d'évaporation (h_{fg}) (plus correctement appelée chaleur latente de vaporisation) est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour convertir 1 kilogramme d'eau en 1 kilogramme de vapeur sous une pression donnée.

L'enthalpie de la vapeur (h_g) est la quantité totale d'énergie calorifique contenue dans la vapeur saturée sèche sous une pression donnée. Cette quantité d'énergie est la somme de l'enthalpie du liquide (h_f) et de la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer 1 kilogramme d'eau à une température donnée (h_{fg}).

Ces trois valeurs d'enthalpie peuvent être exprimées de la façon suivante:

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

dans laquelle h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

$$h_f = \text{enthalpie du liquide (kJ/kg)}$$

$$h_{fg} = \text{enthalpie d'évaporation (kJ/kg)}$$

Cette relation s'applique à la vapeur saturée quelle que soit sa pression.

Transport de la vapeur

La vapeur est produite par une chaudière ou par une batterie de chaudières dans un endroit généralement éloigné des appareils utilisant de la vapeur. La vapeur doit alors être acheminée par divers ensembles de tuyauterie et robinetterie jusqu'à sa destination finale. Si les principes de base intervenant dans le transport de la vapeur ne sont pas bien compris, des erreurs très coûteuses peuvent être faites lors de la conception des circuits de distribution.

Pour concevoir correctement un réseau de tuyauterie devant transporter de la vapeur, il faut connaître les données suivantes:

- la température et la pression de la vapeur,
- la quantité de vapeur à transporter,
- la distance sur laquelle la vapeur sera transportée.

Dans le calcul du diamètre des conduites de transport de la vapeur, il est recommandé de garder la vitesse de la vapeur à l'intérieur de limites pratiques. Il est généralement satisfaisant d'utiliser une vitesse de 40 à 60 m/s, avec un maximum de 75 m/s. Si la conduite est trop grosse, une perte inutile de chaleur en résultera à cause des trop grandes surfaces d'échange. En plus, on paye plus cher pour les conduites et leur isolation. Par contre, si la conduite est trop petite, elle provoquera un bruit excessif à cause de la vitesse accrue de l'écoulement de la vapeur, ainsi qu'une perte de charge excessive et une réduction de la capacité de transport. La vitesse de la vapeur saturée circulant dans une conduite peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$V = \frac{w \times v_g}{A \times 3\,600}$$

dans laquelle V = vitesse de la vapeur (m/s)

w = débit de vapeur (kg/h)

A = section intérieure de la conduite (m²)

v_g = volume spécifique de la vapeur saturée à la pression de service (m³/kg)

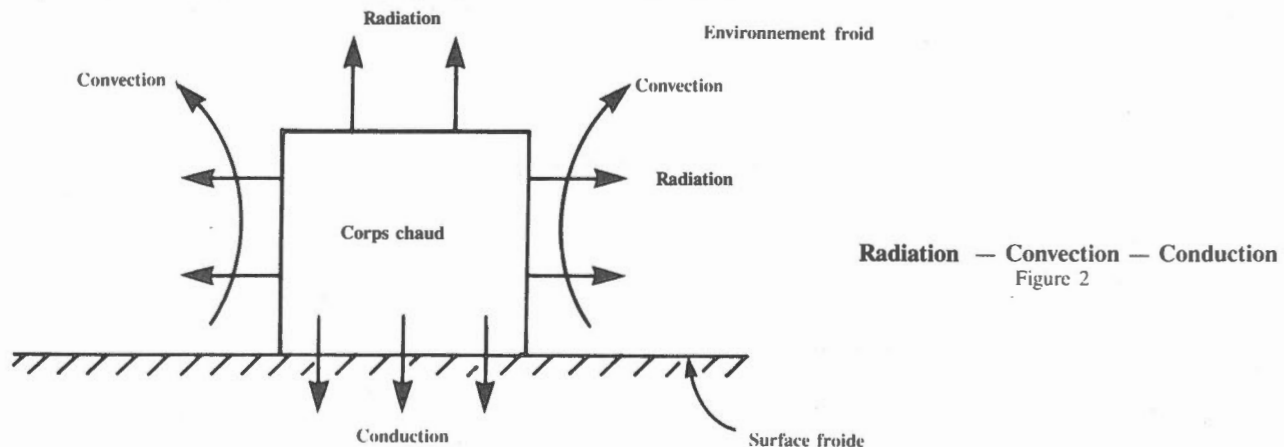
3 600 = conversion d'unités, heures à secondes

La feuille de travail 9-1 est prévue pour ce calcul, dont un exemple est présenté ci-après.

Modes de transmission de la chaleur

Un corps chaud cède sa chaleur de trois façons (Figure 2)

- par radiation;
- par convection, au fluide qui l'entoure;
- par conduction, aux autres corps qui sont en contact avec lui.



Transfert de chaleur par radiation

Dans le transfert de chaleur *par radiation*, un corps plus chaud cède de la chaleur à un corps plus froid sans que les deux corps soient en contact. La chaleur transmise de cette façon est dite chaleur radiante. Tout objet libère continuellement de la chaleur radiante. L'intensité de cette radiation dépend de la température et de la nature de la surface.

Lorsque les ondes de radiation rencontrent un autre corps, l'énergie qu'elles contiennent est absorbée par la surface de ce corps. La chaleur transmise par radiation augmente à mesure que la température d'un corps s'élève. À des températures voisines de la température ambiante, la chaleur transmise par radiation est négligeable.

Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur *par convection* fait intervenir simultanément la conduction de chaleur, l'accumulation de l'énergie et un mouvement dans le fluide. La convection est le mode d'échange de chaleur le plus important entre un solide et un liquide ou un gaz.

Calcul de la vitesse de circulation de la vapeur

Feuille de travail 9-1

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Diamètre intérieur de la conduite de vapeur 0,1541 m

Débit de vapeur (w) 13 608 kg/h

Volume spécifique de la vapeur (v_g) 0,25888 m³/kg

$$\begin{aligned} \text{Section de la conduite (A)} &= \frac{3,142 \times (\text{diam. int.})^2}{4} \\ &= \frac{3,142 \times (0,1541)^2}{4} \\ &= 0,0187 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vitesse (V)} &= \frac{w \times v_g}{A \times 3600} \\ &= \frac{13\,608 \times 0,25888}{0,0187 \times 3600} \\ &= 52,33 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Pour les conduites principales de vapeur, la vitesse devrait se situer entre 40 et 60 m/s. Si la vitesse dépasse 75 m/s, il faut réduire le débit ou employer une conduite de plus grand diamètre.

Le transfert de chaleur par convection se produit en plusieurs étapes. Tout d'abord, la chaleur passe par conduction de la surface aux particules d'un fluide adjacent. L'énergie transmise augmente la température et l'énergie interne des particules du fluide. Ces particules se déplacent vers une zone où la température est plus basse et transmettent la chaleur à d'autres particules. Il existe à la fois un mouvement de chaleur et un mouvement du fluide. L'effet net est un échange d'énergie, et puisqu'il s'opère dans le sens du gradient température, on l'appelle *flux de chaleur par convection*.

Dans le transfert de chaleur par convection, on distingue la *convection naturelle* et la *convection forcée*. Lorsque les courants de convection sont provoqués par les seules différences de masse volumique résultant des différentiels de température, la convection est dite naturelle. Lorsque les courants de convection sont provoqués par un agent extérieur tel qu'une pompe ou une soufflante, la convection est dite forcée.

L'intensité de la transmission de chaleur par convection dépend pour une grande part des courants de convection. Ce mode de transmission de la chaleur dépend des caractéristiques d'écoulement des fluides. Il ne peut pas se produire sous vide.

Transfert de chaleur par conduction

Dans le transfert de chaleur *par conduction*, la chaleur passe d'une zone plus chaude vers une zone plus froide à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gaz), ou entre deux objets différents se trouvant en contact physique direct. L'énergie est transmise par contact moléculaire direct sans qu'il y ait un déplacement appréciable des molécules. L'effet obtenu par la transmission de chaleur par conduction est une mise en équilibre des températures. Cependant, si les différences de température sont entretenues par l'application ou l'extraction de chaleur en différents points, un transfert de chaleur est maintenu de la zone plus chaude vers la zone plus froide.

La conduction est le seul mode de transfert de chaleur entre des solides opaques. La conduction est également importante dans les fluides, mais dans les milieux autres que solides, elle est généralement combinée avec la convection et même, dans certains cas, avec le rayonnement.

Processus de condensation

Deux types de condensation peuvent se produire, isolément ou en association: il s'agit de la condensation en film et de la condensation en gouttes.

Condensation en film

Lorsqu'une vapeur saturée pure vient en contact avec une surface plus froide, elle se condense en formant un film sur la surface. Si par gravité le condensat coule le long de la surface, et qu'un écoulement constant existe dans toute l'épaisseur du film, le transfert de chaleur à travers ce film se produit par conduction. Puisqu'il s'agit de conduction, l'épaisseur du film de condensat a une influence directe sur la quantité de chaleur transmise. L'épaisseur du film dépend de la vitesse à laquelle le condensat est enlevé. Sur une surface verticale, à cause de l'action de la gravité, le film est plus épais dans le bas que dans le haut. Plus la surface s'éloigne de la verticale, plus l'épaisseur du film augmente.

La température du film est la moyenne de la température de la surface et de la température de la vapeur. Une augmentation de la température du film réduit sa viscosité aussi bien que son épaisseur, car si la viscosité diminue, la vitesse de retombée du film augmente. L'épaisseur du film est également réduite si la vitesse de circulation de la vapeur est grande, à cause de l'entraînement du film de condensat par la vapeur. La vapeur devrait circuler dans le même sens que l'écoulement du condensat. À mesure que la transmission de chaleur augmente à cause de l'augmentation de l'écart de température entre la vapeur et la surface, l'épaisseur du film de condensat augmente. La conductance de la surface diminue lorsque l'écart de température augmente, ce qui est une relation inhabituelle.

Les équations servant au calcul de la conductance d'un film de condensat font intervenir la conductivité thermique, la viscosité et la masse volumique du condensat, ainsi que l'écart de température entre la vapeur et la surface, et certains caractères géométriques de la surface, tels que la hauteur dans le cas d'une surface verticale et le diamètre dans le cas d'une conduite horizontale. Ces équations sont données dans les ouvrages traitant de la transmission de la chaleur.

Condensation en gouttes

Sur les surfaces contaminées par une substance qui empêche le condensat de mouiller la surface, la vapeur se condense en gouttes et non en film. C'est ce que fait le mercaptan benzylique sur le cuivre ou le laiton, et l'acide oléique sur le cuivre, le laiton, le nickel ou le chrome. Dans ces conditions, une grande partie de la surface n'est pas couverte par un film d'eau isolant et permet un échange de chaleur sans obstacle. C'est ce qu'on appelle la condensation en gouttes. La conductance d'un condensat en gouttes est de 4 à 8 fois plus élevée que celle d'un condensat en film. Puisque la condensation en gouttes est un phénomène rare, il est préférable de calculer les échanges de chaleur à l'aide des coefficients de condensation en film qui sont donnés dans les ouvrages traitant du transfert de la chaleur.

Purgeurs

Les purgeurs ont pour rôle d'évacuer tout condensat, air et gaz non condensable emprisonné dans les appareils et conduites contenant ou transportant de la vapeur, afin de permettre un chauffage rapide du produit et des équipements. Les purgeurs sont des appareils de robinetterie qui évacuent le condensat et l'air sans laisser sortir la vapeur. Au moment du démarrage des appareils et du réchauffage des conduites de vapeur, les purgeurs expulsent l'air emprisonné. Pendant la marche continue, ils continuent d'évacuer les petites quantités d'air et de gaz non condensables qui sont entraînées dans le système par l'eau d'alimentation de la chaudière.

Certains purgeurs sont à crépine intégrée qui protège contre les impuretés et l'entartrage. Il faut éliminer ces dépôts car le purgeur pourrait être bloqué en position ouverte et la vapeur s'échapperait librement dans le circuit d'évacuation du condensat. Il existe aussi des purgeurs munis de clapets de retenue empêchant tout retour de condensat. En consultant les fabricants de purgeurs ou leurs catalogues, de plus amples détails pourront être obtenus sur les purgeurs, dont les types les plus courants sont décrits ci-après.

Purgeurs sensibles à la température (à soufflet et à bilame)

Il y a deux types de purgeurs sensibles à la température, ou thermostatiques. Le purgeur à soufflet fonctionne par la dilatation d'un soufflet rempli de liquide, et le purgeur à bilame par la dilatation d'un élément bimétallique. Ces deux types de purgeurs sont actionnés par une différence de température. Lorsqu'ils sont froids, ils sont ouverts pour évacuer l'air et le condensat lors du démarrage. La vapeur est en contact direct avec le robinet, mais un retard à la fermeture se présente avec ces deux types de purgeurs. Le fonctionnement des purgeurs sensibles à la température est amélioré en utilisant un grand mamelon purgeur pour laisser au condensat le temps de se refroidir. Ces appareils peuvent être endommagés par les effets de coup de bélier. Ils sont généralement économiques pour des pressions de vapeur supérieures à 41 kPa (eff.).

Purgeurs thermodynamiques

Les purgeurs thermodynamiques sont également appelés purgeurs à disque. Ces appareils sont généralement employés lorsque la pression est supérieure à 56 kPa (eff.) et lorsque la pression en aval est inférieure à la moitié de la pression en amont. Ces appareils ne risquent pas d'être endommagés par les effets de coup de bélier.

Purgeurs sensibles à la masse volumique

Les purgeurs sensibles à la masse volumique sont le purgeur à flotteur fermé, et le purgeur à flotteur inversé ouvert. Le purgeur à flotteur fermé est capable d'évacuer le condensat de façon continue, mais il ne peut chasser l'air à moins d'être muni d'un événement sensible à la température. Un coup de bélier peut provoquer la défaillance de ce type de purgeur.

Le purgeur à flotteur inversé ouvert est probablement le type le plus employé. Le purgeur est ouvert lorsqu'il est froid, mais il ne peut pas évacuer de grandes quantités d'air au moment du démarrage à moins d'être muni d'un événement sensible à la température. Ce type de purgeur permet une évacuation rapide du condensat.

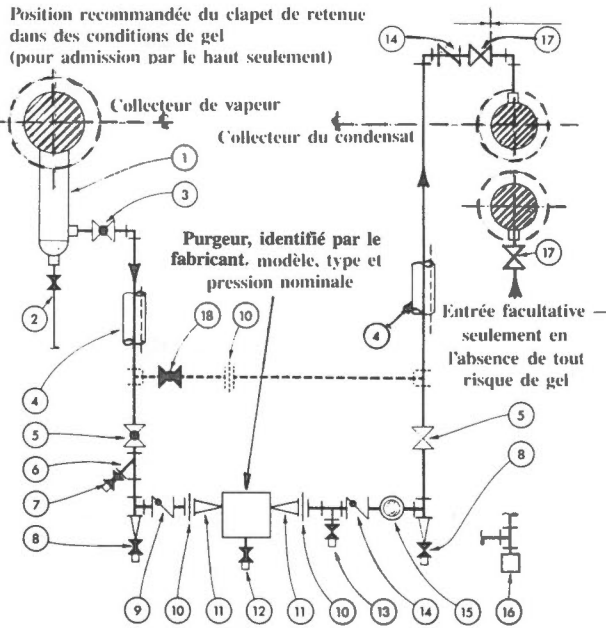
Techniques de collecte du condensat

La figure 3 représente la disposition de la tuyauterie recommandée pour l'installation des purgeurs sur la plupart des appareils chauffés à la vapeur.

Il faut tenir compte des points suivants pour tout montage de purgeurs.

- Grouper les purgeurs d'une façon ordonnée pour assurer la facilité d'entretien.
- La tuyauterie, des robinets et des raccords doivent être de la même grandeur que les raccordements du purgeur, mais jamais inférieur à NPS 3/4.
- Normalement, les purgeurs doivent être installés plus bas que l'appareil ou le dispositif qu'ils desservent.
- Chaque appareil utilisateur de vapeur doit être muni de ses propres purgeurs.
- Prévoir des purgeurs à tous les points bas des conduites principales de vapeur, pour en évacuer le condensat se formant lors du démarrage.
- Si possible, selon la configuration des tuyères de l'échangeur de chaleur, poser un mamelon purgeur au point milieu des calandres de l'échangeur. Poser des mamelons purgeurs doubles à chaque extrémité ou près de chaque extrémité de l'échangeur.
- S'il y a danger de gel et lorsque le condensat n'est pas vidangé dans un système de collecte, choisir des purgeurs de type thermostatique qui ne formeront pas de poche d'eau et qui seront montés verticalement pour se vidanger par gravité. Autrement, choisir des purgeurs pouvant être munis d'un dispositif de vidange automatique intégré.

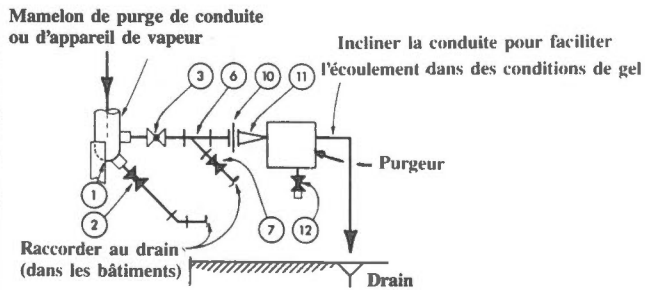
- S'il y a danger de gel, éviter de longues sections de conduites horizontales d'évacuation car de la glace pourrait se former dans la conduite en aval du purgeur. Utiliser de courtes conduites d'évacuation, et si le condensat n'est pas vidangé dans un système de collecte, incliner les conduites d'évacuation vers le bas pour qu'elles puissent se vidanger d'elles-mêmes.
- Pour les appareils consommant de grandes quantités de vapeur, envisager l'emploi d'un séparateur de vapeur dans la conduite d'alimentation. Les séparateurs de vapeur seront discutés plus loin dans le présent module.
- Dans le cas des machines tournantes, l'emploi d'un siphon s'impose pour évacuer le condensat. La pression de la vapeur sert à forcer (action de siphon) le condensat à remonter dans un tube jusque dans le purgeur (figure 4).



Légende

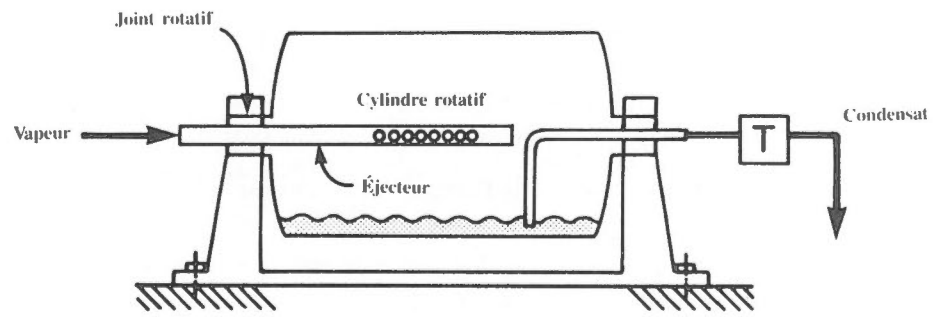
- 1 Mamelon de purge du collecteur de vapeur, ou de la conduite d'alimentation ou de sortie de l'appareil à vapeur.
 - 2 Robinet de purge pour l'évacuation périodique des sédiments. Par sécurité, cette tuyauterie doit être prolongée directement à l'égout ou près du sol.
 - 3 Robinet d'isolement, à poser près de la conduite de purge.
 - 4 ★ Isolant. Nécessaire dans un environnement froid si le condensat risque de geler en cas d'arrêt de marche ou de marché intermittente. Par très grand froid, le chauffage de la tuyauterie peut aussi être nécessaire — si la vapeur n'est pas constamment disponible, employer un câble chauffant.
 - 5 ★ Robinet d'isolement. Nécessaire seulement si les robinets (3) et (17) sont inaccessibles ou si une conduite de déviation est employée — voir note (18).
 - 6 Crépine. Normalement prévue dans les conduites de moins de 2 po de diamètre en amont des purgeurs. La crépine peut être intégrée au purgeur.
 - 7 ★ Robinet pour purger les sédiments de la crépine à l'atmosphère. Bouchon nécessaire pour la sécurité.
 - 8 ★ Robinet de vidange manuel pour emploi dans les conditions de gel si le purgeur est à montage horizontal — voir note (16).
 - 9 ★ Clapet de retenue. Nécessaire dans les conduites munies de purgeurs à flotteur inversé pour assurer l'étanchéité en cas d'inversion de la pression différentielle dans le purgeur lors de la vidange de la conduite ou d'une crépine en amont du purgeur.
 - 10 Raccords-unions pour enlever le purgeur, etc.
 - 11 ★ Réducteur pour adapter le purgeur aux dimensions de la conduite.
 - 12 ★ Robinet de purge pour un purgeur à crépine intégrée (option remplaçant (6) ci-dessus).
 - 13 ★ Robinet d'essai montrant si un purgeur défectueux évacue de la vapeur. Certains purgeurs ont un orifice taraudé pour recevoir ce robinet.
 - 14 ★ Clapet de retenue empêchant le retour par le purgeur lorsque le condensat est évacué par plusieurs purgeurs dans un collecteur commun. En position basse, le clapet bénéficie d'une colonne d'eau pour se refermer et permet un joint hydraulique. Nécessaire si plusieurs purgeurs refoulent ou évacuent dans un collecteur, sous pression ou non.
 - 15 ★ Hublot de verre permettant de voir si un purgeur refoule ou évacue correctement dans une conduite de retour de condensat sous pression. Rarement employé car le verre peut s'éroder ou éclater.
 - 16 ★ Drain (automatique) sensible à la température permettant à la conduite de se vider, pour empêcher tout avarie en cas de gel (voir note 4). Si le clapet (14) est au-dessus, le purgeur peut être à vidange automatique.
 - 17 Robinet d'isolement du collecteur.
 - 18 ★ Conduite de déviation (by-pass) est non recommandée car elle peut être laissée ouverte par inadvertance. Il vaut mieux prévoir un purgeur de secours.
- ★ L'astérisque repère les éléments facultatifs, non essentiels à la conception de base de la tuyauterie des purgeurs.

Condensat vers la conduite de retour



Pour l'évacuation du condensat

Figure 3



Disposition du purgeur sur un cylindre rotatif

Figure 4

Fuites aux purgeurs

Dans tout système de distribution de vapeur desservant des appareils il est estimé que jusqu'à 25 % des purgeurs peuvent présenter des fuites lorsqu'il n'y a pas de programme efficace de maintenance préventive comprenant l'entretien régulier des purgeurs. En considérant la quantité de vapeur ainsi perdue, il est évident que la maintenance des purgeurs est un travail rentable. Cependant, déterminer la présence d'une fuite n'est pas chose facile.

Prenons l'exemple d'un purgeur qui évacue le condensat à l'atmosphère. L'évacuation de condensat est continue s'il s'agit d'un purgeur thermostatique (à soufflet ou à bilame), et intermittente s'il s'agit d'un purgeur à flotteur inversé ouvert ou à disque. Du fait que le purgeur évacue à l'atmosphère, une partie du condensat se transforme en vapeur instantanée. Il est alors très difficile de savoir si la vapeur provient du condensat ou d'une fuite du purgeur. Si la vapeur s'échappe de façon continue sous la forme d'un jet de vapeur «bleu», il s'agit d'une fuite. Si la vapeur s'échappe de façon intermittente sous la forme d'un «nuage blanchâtre», c'est seulement de la vapeur instantanée.

Malheureusement, la vapeur n'est pas visible si le purgeur se vidange dans un système de collecte de condensat. Dans ce cas, trois méthodes sont disponibles pour discerner les fuites d'un purgeur.

- Utiliser un appareil d'écoute ou une tige d'acier qu'on tient à l'oreille, et écouter le bruit que fait la conduite d'évacuation du purgeur. Une évacuation continue se reconnaît normalement par le bruit que fait la vapeur qui traverse le purgeur à grande vitesse. Ce procédé exige de l'expérience, et il est parfois inadéquat dans les zones très bruyantes. Le stéthoscope est un appareil d'écoute couramment employé à cette fin.
- À l'aide d'un pyromètre, mesurer la température de la conduite à l'entrée du purgeur et à sa sortie. Il y a lieu de croire que le purgeur laisse s'échapper de la vapeur si la température de la conduite d'évacuation est presque aussi élevée qu'à l'entrée.
- Poser des voyants de verre sur la conduite d'évacuation du purgeur et observer directement le courant d'évacuation du purgeur. *De grandes précautions s'imposent car le verre peut s'éroder avec le temps et présenter un risque d'éclatement.*

De plus amples détails sur les purgeurs sont présentés dans le Module 8 — Systèmes à vapeur et à condensat.

Fuites de vapeur

Les fuites de vapeur sont une autre source importante de gaspillage d'énergie et d'argent. Le tableau 3 montre la quantité de vapeur perdue par mois selon les ouvertures de différentes dimensions et sous diverses pressions, lorsque la vapeur fuit à l'atmosphère.

Sur une tuyauterie bien isolée, les fuites de vapeur peuvent être difficiles à localiser. Les indices révélateurs sont un isolant détrempe, des gouttes d'eau qui coulent des revêtements isolants, et, bien sûr, un jet visible de vapeur. Dans la plupart des cas, les fuites se produisent aux robinets ou aux joints à brides d'une tuyauterie, elles peuvent être corrigées en resserrant un raccord boulonné, en remplaçant un joint étanche, ou en renouvelant l'étoupe d'étanchéité d'un robinet.

La feuille de travail 9-2 permet de calculer le coût des pertes de vapeur dues à des fuites.

Vapeur instantanée et coup de bélier

Lorsqu'un condensat chaud sous pression est envoyé dans une conduite de retour à basse pression, il entre immédiatement en ébullition. La vapeur formée par ce phénomène de vaporisation subite est dite vapeur instantanée. Plus le condensat est chaud ou plus la conduite d'évacuation est froide, plus le taux de vaporisation est important. La formation de vapeur instantanée peut être très intense si le condensat provient d'une vapeur haute pression. Puisqu'une partie seulement du condensat est vaporisée, il existe un risque que la vapeur formée déplace le condensat dans la tuyauterie pour créer des «masses liquides». Ces masses de condensat parcourent la tuyauterie en produisant des coups de bélier qui peuvent endommager la tuyauterie, les raccords, les régulateurs et les appareils. Ce phénomène de «coup de bélier» se produit lorsque des masses d'eau rencontrent des obstacles sur leur parcours. Le Module 8 — Systèmes à vapeur et à condensat élabore la méthode de calcul des quantités de vapeur instantanée.

Séparateurs de vapeur

Dans les réseaux de distribution de vapeur, des séparateurs enlèvent le condensat de la vapeur. Généralement, les séparateurs sont installés en amont des appareils exigeant de la vapeur sèche, ou dans un circuit secondaire de distribution de vapeur où pourraient exister des pourcentages relativement élevés de condensat entraîné. L'échange de chaleur s'effectuant dans les diverses pièces d'équipement est amélioré si le condensat est complètement éliminé du réseau de distribution de vapeur.

Perte de vapeur dans l'atmosphère

Feuille de travail 9-2

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LIÉE Date: 20 FÉVRIER 1986

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Appareil: ÉCHANGEUR DE CHALEUR

Diamètre estimé de la fuite: 2,38 mm

Pression de vapeur: 689 kPa(effectifs)

Perte de vapeur: 13,47 kg/h (Table 3)

Durée de service: Nombre d'heures par jour: 24

Nombre de jours par semaine: 7

Nombre de semaines par année: 52

Coût de la vapeur: 22 \$/1000 kg (A obtenir de l'opérateur du générateur de vapeur)

$$\begin{aligned} \text{Vapeur perdue} &= \underline{13,47} \text{ kg/h} \times \underline{24} \text{ h/jour} \times \underline{7} \text{ jours/sem.} \times \underline{52} \text{ sem./an} \\ &= \underline{117\ 674} \text{ kg/an} \end{aligned}$$

Économies potentielles en dollars:

$$\begin{aligned} &= \underline{117\ 674} \text{ kg/an} \times \underline{22} \text{ \$/1000 kg} \\ &= \underline{2\ 589} \text{ \$ par année} \end{aligned}$$

Capacité d'extraction du condensat

Il est très important que le purgeur puisse enlever le condensat se formant lors du démarrage à froid et en marche normale. Lorsque la vapeur commence à circuler et que l'équipement est froid, le taux de formation du condensat est beaucoup plus élevé que lorsque l'équipement a atteint sa température normale de fonctionnement.

La capacité des purgeurs est déterminée en fonction de la quantité de condensat produite pendant la marche normale, et en utilisant un coefficient de sécurité pour la surproduction de condensat du démarrage. D'après les applications, le coefficient de sécurité se situe entre 2 et 10. Par exemple, un purgeur d'une capacité de 200 kg/h ne convient pas à un serpentin dont la capacité est de 200 kg/h sous une pression différentielle de 793 kPa, car lors de la mise en marche, le condensat pourrait se former à un taux plus rapide que 200 kg/h ou la pression différentielle pourrait baisser. Dans les deux cas, le serpentin serait inondé de condensat et l'échange de chaleur serait réduit. Les fabricants de purgeurs offrent une vaste documentation sur la capacité des purgeurs. Il est important de discuter avec les fournisseurs ou les fabricants de la méthode de calcul à employer selon les applications spécifiques.

Équation générale pour le calcul de l'échange de chaleur

L'équation générale pour le calcul de l'échange de chaleur est la suivante:

$$Q = U \times A \times DT$$

dans laquelle Q = taux de transfert de chaleur (watts)

U = coefficient global du transfert de chaleur [watts/(m²·°C)]

A = surface d'échange (m²)

DT = différence de température entre le fluide chaud et le fluide froid (°C)

La figure 5 donne les valeurs du coefficient U pour certaines applications de chauffage et refroidissement. Pour des applications différentes d'autres tables plus complètes sont publiées.

APPLICATIONS DE CHAUFFAGE		COEFFICIENT DE SURFACE PROPRE		COEFFICIENTS DE CALCUL Tenant compte de l'encrassement normal	
CÔTÉ CHAUD	CÔTÉ FROID	Convection naturelle	Convection forcée	Convection naturelle	Convection forcée
1 Vapeur	Solution aqueuse	250-500	300-550	100-200	150-275
2 Vapeur	Huile légère	50- 70	110-140	40- 45	60-110
3 Vapeur	Huile de graissage moyenne	40- 60	100-130	25- 40	50-100
3 Vapeur	Mazout lourd (#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	Solution aqueuse	80-100	100-225	70-100	110-160
11 Huile thermique à haute température	Goudron et asphalte	12- 30	45- 65	10- 20	30- 50
12 Therminol	Goudron et asphalte	15- 30	50- 60	12- 20	30- 50
APPLICATIONS DE REFROIDISSEMENT					
CÔTÉ FROID	CÔTÉ CHAUD				
13 Eau	Solution aqueuse	80-100	150-200	65-125	105-200
14 Eau	Huile de refroidissement	10- 15	25- 45	7- 10	15- 25
15 Eau	Huile de graissage moyenne	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 ammoniacque (dilatation directe)	Solution aqueuse	35- 45	60- 90	20- 35	40- 60
19 Saumure de calcium ou de Sodium	Solution aqueuse	100-120	175-200	50- 75	80-125

Coefficient de transmission thermique totale moyenne

$$U = \text{BTU}/(\text{h} \cdot \text{pi}^2 \cdot ^\circ\text{F})$$

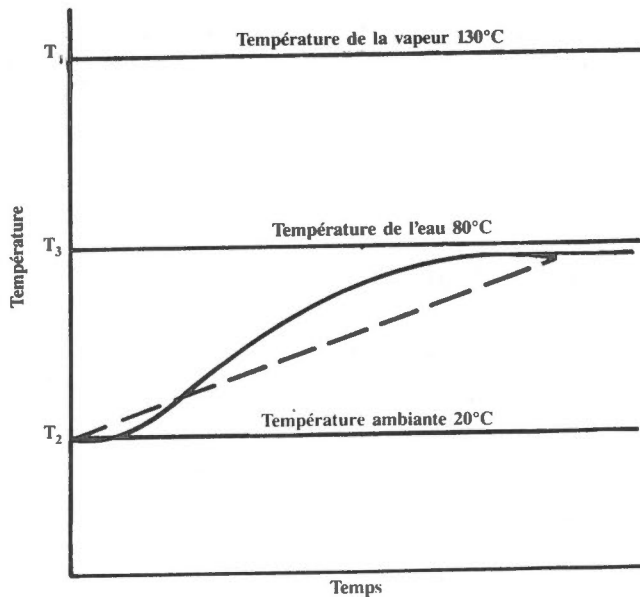
Note: 1 Btu/(h·ft²·°F) = 5,68 w/(m²·°C)

Figure 5

Écart logarithmique moyen de température (LMTD)

Dans tout calcul de l'échange de chaleur aux fins de chauffage, il est important de bien comprendre la notion d'écart de température. Considérons le chauffage d'un réservoir avec un serpentin de vapeur immergé dans l'eau (figure 6). L'eau doit passer de la température ambiante de 20°C à 80°C par la vapeur à une pression de 172,25 kPa (eff.) et à une température de 130°C.

Selon la figure 6 l'écart de température disponible au début du processus est $T_1 - T_2 = 130^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 110^\circ\text{C}$. À mesure que l'eau se réchauffe, cet écart diminue jusqu'à ce que la température de l'eau atteigne 80°C, et l'écart devient $T_1 - T_3 = 130^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$. Il faut alors déterminer l'écart de température moyen DT qui peut être employé pour tout le cycle de chauffage. Si la température de l'eau augmentait à un taux uniforme, ce à quoi correspond la droite en pointillés, l'écart moyen serait la moyenne arithmétique des écarts de température existant au début et à la fin du chauffage.



Courbe type de chauffage
Figure 6

$$\begin{aligned} \text{Moyenne arithmétique} &= \frac{(T_1 - T_2) + (T_1 - T_3)}{2} = \frac{110^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C}}{2} \\ &= 80^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Cependant, la courbe de chauffage normale est représentée par la ligne continue. Pour un calcul plus précis, il faut employer l'écart logarithmique moyen de température (LMTD). À partir du même exemple, l'équation utilisée est la suivante:

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

dans laquelle LMTD = écart logarithmique moyen de température (°C)

DT_1 = le plus grand écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid (°C)

DT_2 = le plus petit écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid (°C)

La feuille de travail 9-3 permet de faire un tel calcul, et elle a été utilisée à l'exemple précédent. La valeur ainsi calculée doit être employée comme DT dans la formule

$$Q = U \times A \times DT$$

L'écart logarithmique moyen de température (table 4) a été établi d'après l'équation ci-dessus pour des valeurs de T_1 situées entre 0°C et 400°C, et de T_2 entre 5°C et 240°C. Pour des valeurs en dehors de cette gamme, utiliser l'équation pour fin de calcul.

Effet de l'isolant sur le transfert de chaleur

La quantité de chaleur nécessaire au chauffage est la chaleur fournie au corps pour obtenir la température désirée plus la chaleur perdue à l'atmosphère. Par exemple, pour le chauffage d'un réservoir de stockage, la chaleur totale nécessaire est la somme de la chaleur nécessaire pour élever le produit emmagasiné à la température voulue et de la chaleur dissipée dans l'atmosphère par les parois du réservoir et la surface du liquide. Si l'appareil de chauffage a pour seul rôle de maintenir le produit stocké à la même température d'entrée, la chaleur fournie doit seulement être égale à la chaleur perdue. L'installation d'un isolant sur la surface extérieure du réservoir réduit le taux de perte de chaleur à l'atmosphère puisque dans l'équation $Q = U \times A \times DT$, la valeur de U est moindre, ce qui fait diminuer la valeur de Q.

La chaleur perdue par les équipements et tuyauteries isolés peut être calculée à l'aide des tableaux 5 et 6, et des feuilles de travail 9-4 et 9-5. La réduction des pertes de chaleur par l'application d'un isolant est traitée dans le Module 1 — Isolation thermique des équipements.

Des exemples de l'emploi des feuilles de travail 9-4 et 9-5 sont donnés ci-dessous.

Effet des mouvements de l'air sur le transfert de chaleur

Les mouvements d'air à la surface extérieure d'un réservoir ou d'un appareil ont pour effet d'augmenter le taux de perte de chaleur à l'atmosphère. En l'absence de vent, le gradient de température existant autour de la surface extérieure est considéré en régime stable. Quand le vent déplace l'air environnant, l'écart de température n'est plus en régime stable et la chaleur dissipée augmente.

Les valeurs des coefficients de transfert de chaleur «U» pour divers différentiels de température et vitesses de vent sont disponibles dans plusieurs publications, qu'il est recommandé de consulter pour fin de calculs.

Calcul de l'écart logarithmique moyen de température (LMTD)

Feuille de travail 9-3

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Utilisation du chauffage

Température initiale du liquide (T_2) 20 °C

Température finale du liquide (T_3) 80 °C

Température de la vapeur (T_1) 130 °C

$$\begin{aligned} \text{Plus grand écart de température (DT}_1\text{)} &= T_1 - T_2 \\ &= \underline{130} - \underline{20} \\ &= \underline{110} \text{ °C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Plus petit écart de température (DT}_2\text{)} &= T_1 - T_3 \\ &= \underline{130} - \underline{80} \\ &= \underline{50} \text{ °C} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} &= \frac{110 - 50}{\ln \frac{110}{50}} \\ \text{ou,} &= \frac{60}{2,306 \log 2,2} \\ &= \frac{60}{0,79} \\ &= \underline{75,95} \text{ °C} \end{aligned}$$

Pertes de chaleur par la tuyauterie

Feuille de travail 9-4

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE

Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN

Par: MBE

Diamètre de conduite: 4 NPS

Longueur de conduite: 100 m

Température de conduite: 150 °C

Heures de service
par année: 8 760 h

Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE

Épaisseur proposée: 51 mm

Sans isolant

Avec isolant

Perte de chaleur
par mètre: 725 Wh/(m·h)(Table 6)

57 Wh/(m·h)(Module 1)

Perte de chaleur totale par heure:
(Perte de chaleur/mètre) x longueur

Perte de chaleur /mètre x longueur

$$\frac{725}{\text{m}} \times 100 \text{ m} = 72\,500 \text{ Wh/h}$$

$$\frac{57}{\text{m}} \times 100 \text{ m} = 5\,700 \text{ Wh/h}$$

Perte de chaleur annuelle:
Perte de chaleur/h x h/an

Perte de chaleur/h x h/an

$$72\,500 \text{ Wh/h} \times 8\,760 \text{ h/an} = 635\,100\,000 \text{ Wh/an (1)}$$

$$5\,700 \text{ Wh/h} \times 8\,760 \text{ h/an} = 49\,932\,000 \text{ Wh/an (2)}$$

Diminution des pertes de chaleur
grâce à la pose d'un isolant

$$\begin{aligned} &= (1) - (2) \\ &= 635\,100\,000 - 49\,932\,000 \\ &= 585\,168\,000 \text{ Wh/an} \\ &\text{ou } 585\,168\,000 \text{ Wh/an} \times 3,6 \text{ kJ/Wh} \\ &= 2\,106\,604\,800 \text{ kJ/an} \end{aligned}$$

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE

Date: 20 FEVRIER 1985

Endroit: ANY TOWN

Par: MBE

Appareil: RÉSERVOIR D'EAU # 2

Heures de service par année: 2 688 h

Superficie: 21,600 m²

Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE

Température du produit: 80 °C

Épaisseur d'isolant proposée: 51 mm

Sans isolant

Avec isolant

Perte de chaleur: = 750 Wh/(m²·h)(Table 5)

33,3 Wh/(m²·h)(Module 1)

Perte de chaleur totale per heure:
Superficie x perte de chaleur

Superficie x perte de chaleur

$$\frac{21,206}{15\ 905} \times \frac{750}{\text{Wh/h}}$$

$$\frac{21,206}{706} \times \frac{33,3}{\text{Wh/h}}$$

Perte de chaleur annuelle:
Perte de chaleur/h x h/an

Perte de chaleur/h x h/an

$$\frac{15\ 905}{42,8 \times 10^6} \times \frac{2\ 688}{\text{Wh/an (1)}}$$

$$\frac{706}{1,9 \times 10^6} \times \frac{2\ 688}{\text{Wh/an (2)}}$$

Diminution des pertes de chaleur
grâce à la pose d'un isolant

$$\begin{aligned} &= (1) - (2) \\ &= \frac{42,8 \times 10^6}{40,9 \times 10^6} - \frac{1,9 \times 10^6}{\text{Wh/an}} \\ &= \frac{40,9 \times 10^6}{\text{Wh/an}} \\ &\text{ou } \frac{40,9 \times 10^6}{\text{Wh/an}} \times 3,6 \text{ kJ/Wh} \\ &= \frac{147 \times 10^6}{\text{kJ/an}} \end{aligned}$$

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Chauffage à la vapeur

Normalement, c'est la vapeur saturée qui est employée pour le chauffage. La vapeur à basse pression autrefois très employée dans les locomotives à vapeur, les marteaux-pilons à vapeur et les machines à vapeur n'est plus que rarement employé et ne sera pas traité dans le présent module.

Les appareils de chauffage à la vapeur agissent de deux façons: par chauffage direct et par chauffage indirect.

Avec le chauffage direct, le produit ou la matière à chauffer est en contact direct avec la vapeur et, dans la plupart des cas, il n'y a aucune récupération de condensat. Par exemple, un liquide peut être chauffé en y injectant directement de la vapeur. La vapeur et le condensat se mélangent au produit. Si ce procédé est employé pour chauffer une solution aqueuse, il faut tenir compte du fait que le condensat provoquera une certaine dilution et peut entraîner des solides en suspension.

Dans le chauffage indirect, la vapeur n'est pas en contact avec le produit. Dans la plupart des cas, le condensat de la vapeur est récupéré et retourné à la chaudière ou dans d'autres applications nécessitant de l'eau chaude. Le chauffage indirect est employé notamment, dans les cas suivants:

- dans un échangeur de chaleur vapeur-liquide
- pour le chauffage du contenu d'un réservoir de stockage
- pour le chauffage ambiant.

Il est à noter qu'il existe des cas de chauffage indirect où le condensat n'est pas récupéré. Prenons l'exemple du chauffage d'huile végétale ou de glucose dans des échangeurs de chaleur, où une défaillance de l'échangeur de chaleur pourrait avoir pour conséquence que la matière chauffée se mêle au condensat. Si ce condensat était récupéré pour réutiliser comme eau d'alimentation de chaudière, la matière mêlée au condensat contaminerait les surfaces d'échange à l'intérieur de la chaudière. Il en résulterait une baisse du rendement de la chaudière et, dans les cas extrêmes, un risque d'explosion de la chaudière. Par conséquent, chaque application doit être étudiée individuellement. Si le condensat ne peut pas être réutilisé, il est recommandé d'étudier la possibilité d'utiliser la chaleur du condensat.

Chauffage direct à la vapeur

Dans la plupart des processus de chauffage direct par la vapeur, la matière à chauffer est contenue dans un appareil fonctionnant à la pression atmosphérique. La température maximale à laquelle le liquide peut être porté est son point d'ébullition. L'apport supplémentaire de vapeur à un liquide en ébullition ne peut produire aucune augmentation de température.

L'emploi de la vapeur dans des processus de chauffage implique certaines considérations théoriques et pratiques. Commençons par les principes théoriques du chauffage direct par la vapeur.

M = poids du liquide (kg)

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

T₁ = température du liquide à chauffer (°C)

T₂ = température finale du liquide chauffé (°C)

w = débit de vapeur (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur, (kJ/kg)

t = temps nécessaire pour atteindre la température T₂ en minutes

h_f = enthalpie de l'eau à la température T₂, (kJ/kg)

Q₁ = quantité de perte de chaleur à l'atmosphère [kJ/(°C·s)]

Q₂ = quantité de chaleur transportée par la vapeur perdue [kJ/(°C·s)]

Chaleur appliquée à l'appareil (kJ) = $\frac{w}{60} \times (h_g - h_f) \times t$

$$\text{Perte de chaleur par l'appareil (kJ)} = (Q_1 + Q_2) \times 60 \times t \times \frac{(T_2 - T_1)}{2}$$

$$\text{Gain de chaleur du liquide (kJ)} = (T_2 - T_1) \times M \times c$$

Gain de chaleur = chaleur appliquée — perte de chaleur

$$(T_2 - T_1) \times M \times c = \frac{w}{60} \times (h_g - h_f) \times t - \left[(Q_1 + Q_2) \times 60 \times t \times \frac{(T_2 - T_1)}{2} \right]$$

Toutes les valeurs considérées dans l'équation précédente sauf Q_1 et Q_2 peuvent être déterminées à l'aide d'instruments de mesure ordinaires et des constantes physiques publiées dans les manuels. Les méthodes théoriques de détermination de $Q_1 + Q_2$ dépassent la portée du présent module, et c'est pourquoi une méthode empirique est décrite ci-après.

Pour déterminer la quantité de perte de chaleur à l'atmosphère par un réservoir chauffé, on augmente la température du réservoir et de son contenu à une température située à mi-chemin entre T_1 et T_2 , puis on arrête le chauffage, et finalement on mesure la diminution de la température sur une certaine période de temps.

Perte de chaleur à l'atmosphère + perte de chaleur par évaporation = perte de chaleur par le liquide.

DT = baisse de température (°C)

t = temps pour que la baisse de température mesurée se produise (minutes)

Perte de chaleur (en kJ) = DT × M × c

$$\text{Taux de perte de chaleur à l'atmosphère et par évaporation (kJ/min)} = Q_1 + Q_2 = \frac{DT \times M \times c}{t}$$

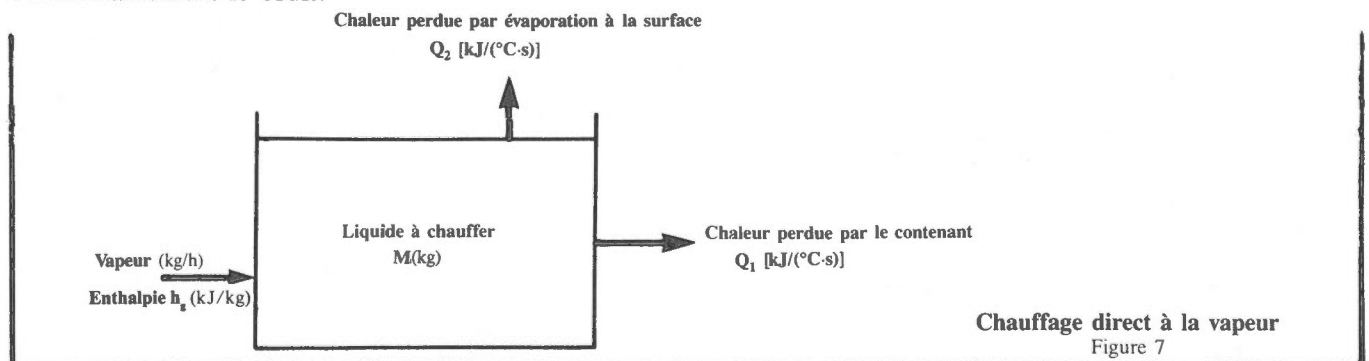
Cette méthode n'est pas valable si le liquide est en ébullition, ou si l'application initiale du chauffage comprend une matière gelée.

Considérations pratiques sur le chauffage direct à la vapeur

Le chauffage direct à la vapeur est économique et rapide, mais il peut s'avérer très dangereux si des mesures adéquates ne sont pas prises. Plusieurs mesures de sécurité s'imposent.

- L'appareil doit être conçu pour les conditions de vapeur prévues et convenablement ventilé. De la chaleur sera perdue dans la vapeur, mais toute tentative de fermer l'appareil pourrait occasionner une montée excessive de pression.
- Ne jamais tenter de chauffer un liquide à l'aide d'un boyau ou d'un tube d'injection de vapeur car le boyau ou le tube pourrait se mettre à fouetter dangereusement.
- Être des plus prudents s'il s'agit de chauffer à la vapeur une matière autre que des solutions aqueuses.
- Arrêter le chauffage dès que le point d'ébullition est atteint.

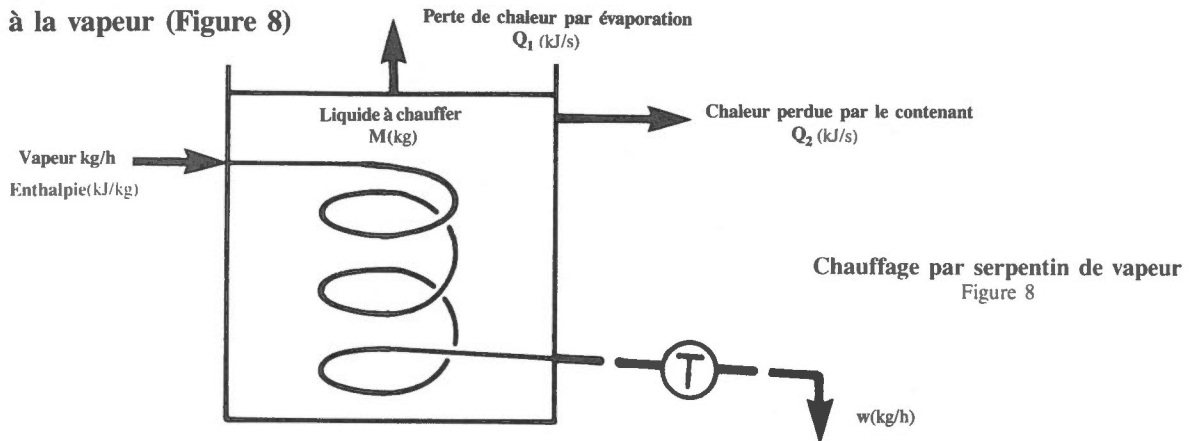
Le chauffage direct à la vapeur est un processus bruyant. Le bruit vient des bulles de vapeur formées dans le liquide qui s'écrasent subitement. L'emploi de robinets et d'éjecteurs qui mélangent et agitent le liquide réduit considérablement le bruit.



Chauffage indirect à la vapeur

Les trois grandes catégories d'appareils de chauffage indirect à vapeur sont les serpentins à vapeur, les vaisseaux à enveloppe chauffante, et les échangeurs de chaleur. Avec les vaisseaux à enveloppe chauffante et les serpentins à vapeur, le liquide chauffé ne circule normalement pas. Dans les échangeurs de chaleur, par contre, la vapeur et le liquide sont tous les deux en circulation.

Serpentins à la vapeur (Figure 8)



Les données nécessaires pour calculer la perte de chaleur dans le chauffage par serpentins de vapeur sont les suivantes:

- w = débit de vapeur (kg/h)
- h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)
- h_f = enthalpie du condensat récupéré (kJ/kg)
- M = poids du liquide dans le réservoir (kg)
- c = chaleur spécifique du liquide (kJ/kg.°C)
- Q_1 = perte de chaleur par évaporation (kJ/s)
- Q_2 = perte de chaleur à l'atmosphère (kJ/s)
- T_1 = température du liquide à chauffer (°C)
- T_2 = température finale du liquide chauffé (°C)
- t = temps nécessaire pour amener le liquide à T_2 (s)
- 3600 = coefficient de conversion, heures à secondes

$$\text{Chaleur fournie(kJ)} = \frac{w}{3600} \times t \times (h_g - h_f)$$

$$\text{Gain de chaleur (kJ)} = M \times (T_2 - T_1) \times c$$

$$\text{Perte de chaleur (kJ)} = (Q_1 + Q_2) \times t$$

$$\text{Chaleur fournie} = \text{gain de chaleur} + \text{perte de chaleur}$$

$$\frac{w}{3600} \times t \times (h_g - h_f) = [M \times (T_2 - T_1) \times c] + [(Q_1 + Q_2) \times t]$$

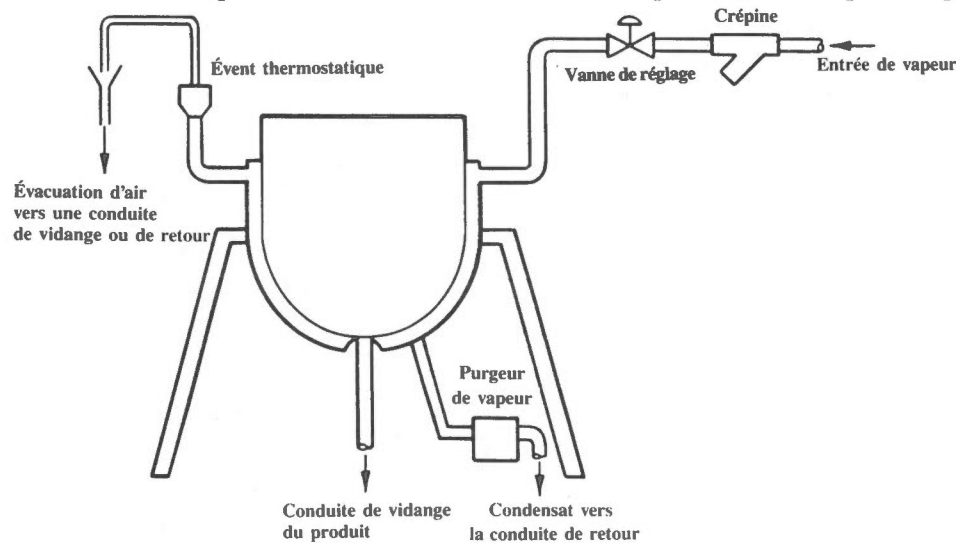
Toutes les valeurs sauf ($Q_1 + Q_2$) peuvent être déterminées à l'aide d'instruments de mesure et des tables. La valeur de ($Q_1 + Q_2$) peut être déterminée de façon empirique par la méthode décrite pour le chauffage indirect, mais quelques précautions s'imposent:

- L'échantillonnage de température obtenu alors que le liquide est proche de son point d'ébullition n'est pas valable à cause de la perte excessive de chaleur qui se produit par évaporation.
- L'échantillonnage doit être pris pendant que l'appareil est rempli plus qu'à moitié, afin que la perte de chaleur à l'atmosphère (Q_2) ne soit pas sous-estimée.
- Il faut mesurer la température du condensat avant qu'il atteigne le purgeur.

Vaisseaux à enveloppe chauffante

Un vaisseau à enveloppe chauffante comporte une paroi intérieure et une paroi extérieure. L'espace entre les parois est rempli de vapeur qui chauffe le contenu de l'appareil. Ce genre d'appareil est employé pour chauffer et maintenir un produit à une température déterminée, comme pour la cuisson de soupes et de confitures.

Les vaisseaux à enveloppe chauffante sont des appareils sous pression et, à ce titre, ils doivent être conçus et construits conformément aux codes en vigueur. Il est important de noter que la surface extérieure d'un vaisseau à enveloppe chauffante s'approche de la température de la vapeur et doit être soigneusement isolée. Autrement, il en résulte une perte excessive de chaleur et un risque de brûlures pour le personnel.



Vaisseau à enveloppe chauffante
Figure 9

Puisque la plupart des vaisseaux à enveloppe chauffante servent à maintenir une substance à des températures élevées pendant de longues périodes de temps, l'analyse théorique d'une telle application est donnée ci-après.

w = débit de vapeur (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat (kJ/kg)

M_1 = poids du produit à l'entrée (kg)

M_2 = poids du produit à la sortie (kg)

Q_2 = perte de chaleur à l'atmosphère par la surface de l'appareil (kJ/s)

t = durée du chauffage (s)

$3\ 600$ = coefficient de conversion, heures à secondes

Prenons comme hypothèse que la température du produit est proche de son point d'ébullition. Si elle ne l'était pas, la méthode empirique décrite pour les serpentins de vapeur conviendrait pour déterminer les diverses constantes.

$$\text{Chaleur fournie (kJ)} = \frac{W}{3\,600} \times t \times (h_g - h_f)$$

$$\text{Perte de chaleur à l'atmosphère (kJ)} = Q_2 \times t$$

$$\text{Perte de chaleur par ébullition (kJ)} = (M_1 - M_2) \times h_g$$

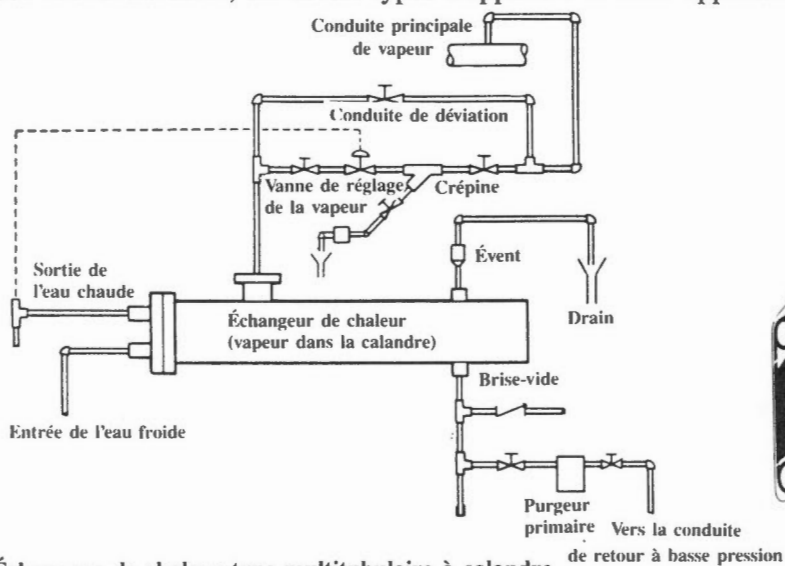
$$\text{Chaleur fournie} = \text{perte par ébullition} + \text{perte à l'atmosphère}$$

$$\frac{W}{3\,600} \times t \times (h_g - h_f) = [(M_1 - M_2) \times h_g] + (Q_2 \times t)$$

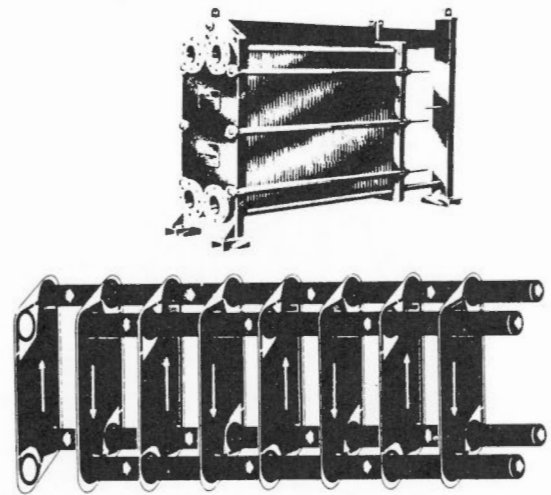
Pour déterminer la valeur de Q_2 au point d'ébullition, faire l'expérience décrite précédemment avec l'appareil rempli au 2/3 ou au 3/4, en employant une huile minérale ou végétale à plus haut point d'ébullition, et la chauffer jusqu'au point d'ébullition du produit à chauffer.

Échangeurs de chaleur

Aux fins du présent module, les types d'échangeurs de chaleur considérés sont les échangeurs à calandre et les échangeurs à plaques. Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour chauffer ou refroidir un fluide en circulation. Lorsqu'on emploie un échangeur de chaleur, les conditions d'échange de chaleur sont stables. Avant d'étudier leur fonctionnement, les divers types d'appareils et leurs applications seront décrits.



Échangeur de chaleur type multitubulaire à calandre
Figure 10



Échangeur de chaleur à plaques
Figure 11

La plupart des échangeurs de chaleur comportent quatre raccords. Deux servent à la matière à traiter, et deux autres servent au fluide de chauffage ou de refroidissement. Les échangeurs de chaleur sont couramment employés dans les applications suivantes:

- pour chauffer un liquide par de la vapeur ou un liquide chaud,
- pour refroidir un liquide par un autre liquide,
- pour condenser de la vapeur par un liquide froid.

Dans un échangeur à calandre, il est recommandé que les deux fluides circulent à contre-courant pour réaliser le meilleur rendement de transfert de chaleur. Normalement, le fluide corrosif ou contenant le plus d'impuretés circule dans les tubes, pour que le côté calandre (l'enveloppe qui entoure les tubes) reste propre. Cela est simplement dû au fait qu'il est moins coûteux de fabriquer des tubes résistants à la corrosion.

Les convertisseurs employés pour le chauffage des bâtiments, dans lesquels la vapeur chauffe l'eau, est un exemple courant d'un échangeur de chaleur.

La perte de chaleur à l'atmosphère par l'enveloppe d'un échangeur de chaleur est faible en comparaison du taux d'échange de chaleur qui se produit à l'intérieur, particulièrement si la calandre est isolée. En fait, si la calandre n'est pas isolée, il en résulte non seulement une perte de chaleur mais un risque de brûlure pour le personnel.

Considérons un échangeur de chaleur qui chauffe de l'eau à l'aide d'une vapeur saturée sèche.

w_1 = débit de vapeur (kg/h)

w_2 = débit d'eau (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat (kJ/kg)

T_1 = température de l'eau à l'entrée (°C)

T_2 = température de l'eau à la sortie (°C)

Q = perte de chaleur à l'atmosphère (kJ/s)

3 600 = coefficient de conversion, heures à secondes

$$\text{Chaleur fournie (kJ/s)} = \frac{w_1}{3600} \times (h_g - h_f)$$

$$\text{Gain de chaleur (kJ/s)} = \frac{w_2}{3600} \times (T_2 - T_1) \times 4,1855$$

$$\text{Perte de chaleur (kJ/s)} = Q$$

Chaleur fournie = gain de chaleur + perte de chaleur

$$\frac{w_1}{3\ 600} \times (h_g - h_f) = \left[\frac{w_2}{3\ 600} \times (T_2 - T_1) \times 4,1855 \right] + Q$$

Comme il fut expliqué précédemment, Q sera très faible, mais la valeur peut être déterminée de façon empirique en procédant comme suit:

Laisser l'échangeur de chaleur fonctionner normalement jusqu'à ce que les conditions soient stables. Refermer la vanne d'entrée de la vapeur et la vanne de sortie de l'eau chaude. Laisser l'échangeur se refroidir pendant 5 minutes. Observer la température de l'eau. Rouvrir la vanne d'entrée de la vapeur et recueillir le condensat pendant les 10 minutes suivantes. Consigner la température de l'eau. La quantité moyenne de perte de chaleur à l'atmosphère peut alors être déterminée comme suit:

M_1 = poids du condensat recueilli en 10 minutes (kg)

M_2 = capacité du côté eau de l'échangeur de chaleur (kg)

M_3 = poids de l'échangeur de chaleur (kg)

c_1 = chaleur spécifique du matériau de l'échangeur de chaleur [kJ/(kg·°C)]

4,1855 = chaleur spécifique de l'eau [kJ/(kg·°C)]

T_1 = température de l'eau au commencement des 10 minutes de chauffage (°C)

T_2 = température de l'eau à la fin des 10 minutes de chauffage (°C)

$$\text{Chaleur fournie (kJ)} = (h_g - h_f) \times M_1$$

$$\text{Gain de chaleur en 10 minutes (kJ)} = [(M_2 \times 4,1855) + (M_3 \times c_1)] \times (T_2 - T_1)$$

$$\text{Perte de chaleur en 10 minutes (kJ)} = 10 \times 60 \times Q$$

Chaleur fournie = gain de chaleur + perte de chaleur

$$(h_g - h_f) \times M_1 = [(M_2 \times 4,1855) + (M_3 \times c_{1f})] \times (T_2 - T_1) + 10 \times Q$$

Taux de perte de chaleur de l'échangeur (kJ/min) = Q

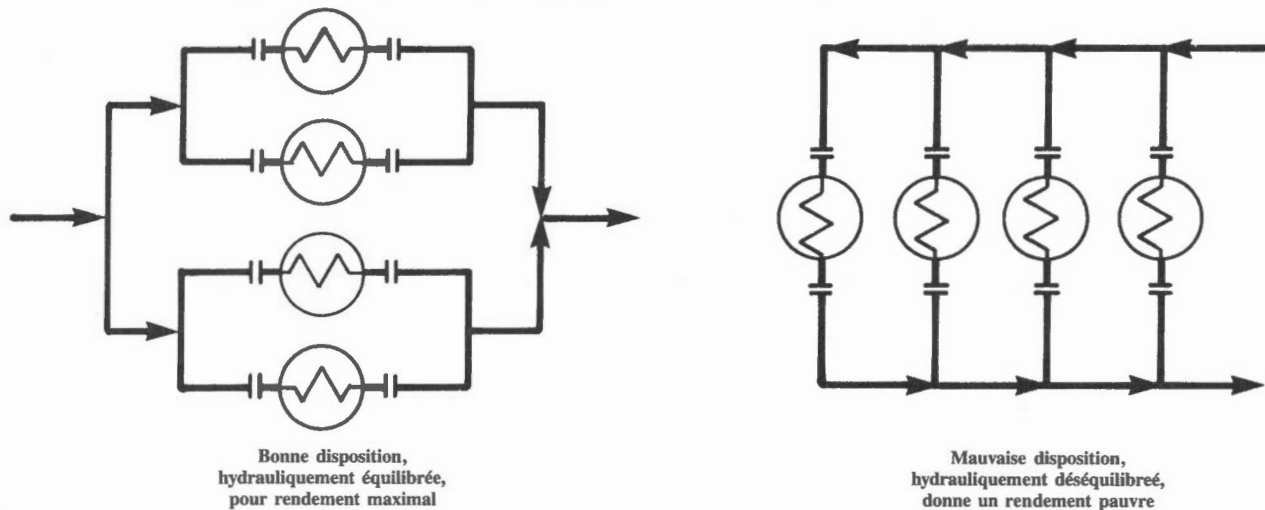
Il faut tenir compte de certaines considérations pratiques en employant cette méthode empirique:

- Le temps de refroidissement de 5 min et le temps de chauffage de 10 min sont approximatifs et doivent être établis d'après les conditions réelles. L'objectif est de garder l'augmentation de température entre 5 et 10°C.
- On suppose que la calandre et les tubes de l'échangeur de chaleur sont faits du même matériau. Si ce n'est pas le cas, il faut tenir compte du poids et de la chaleur spécifique de chacun des composants.

Rendement des échangeurs de chaleur

Le choix final du type et de la capacité d'un échangeur de chaleur s'effectuent avec l'aide du fabricant. Nous donnons ci-après quelques exemples d'installations d'échangeurs de chaleur correctement sélectionnés qui ne donnent pas un rendement satisfaisant.

- *Circulation incorrecte des fluides.* Il est important que les deux fluides circulent à contre-courant. Le fluide de chauffage doit entrer par le haut et sortir par le bas, alors que le fluide froid doit entrer par le bas et sortir par le haut. Tout écart de ces principes peut donner lieu à un mauvais rendement et à des accidents coûteux. Pour obtenir un bon rendement avec circulation à contre-courant, l'entrée de la vapeur et la sortie du fluide chaud doivent être situées à proximité.
- *Mauvaise disposition de la tuyauterie de connexion.* Il est courant de voir plusieurs échangeurs de chaleur disposés en parallèle. Dans ce cas, la distribution du fluide est importante. La tuyauterie doit être disposée de telle sorte que la résistance d'écoulement soit uniforme entre le collecteur et chacun des échangeurs. Cette exigence ne s'applique pas à l'alimentation de vapeur du fait que le principal facteur assurant la bonne circulation de la vapeur est la sortie du condensat et non la tuyauterie d'entrée. La figure 12 montre pour une batterie d'échangeurs de chaleur des exemples d'agencement adéquat et inadéquat de la tuyauterie.



Agencement de la tuyauterie pour un groupe d'échangeurs de chaleur

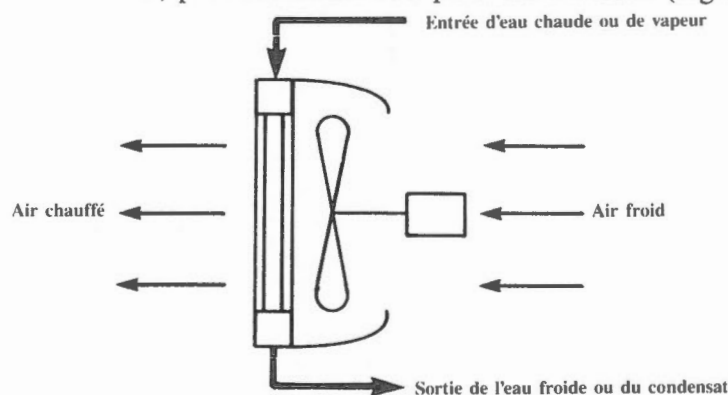
Figure 12

- *Mauvais arrangements des purgeurs.* Dans les échangeurs où la chaleur provient de la vapeur, il est important d'évacuer le condensat à mesure qu'il se forme pour éviter une accumulation à l'intérieur de l'échangeur. Le condensat étant un mauvais conducteur de chaleur il réduit considérablement le rendement du transfert de chaleur de l'échangeur. L'évacuation du condensat peut être affectée par des purgeurs défectueux ou d'une capacité insuffisante, par une contre-pression excessive aux purgeurs ou par une mauvaise disposition des purgeurs. Afin de vérifier l'évacuation du condensat, on ouvre avec précaution le robinet de vidange du purgeur; si une grande quantité de vapeur instantanée s'en échappe, cela confirme qu'il y a effectivement une accumulation de condensat.

- *Insuffisance du système d'évent.* Toute accumulation de gaz du côté vapeur ou calandre d'un échangeur nuit au rendement du transfert de chaleur. Les gaz dissous entraînés par la vapeur peuvent s'accumuler aux endroits les plus élevés pour réduire la conductivité thermique. Dans les petits échangeurs dont la tuyauterie est généralement de faible diamètre, cela ne se produit pas car les gaz sont entraînés par la vapeur. Dans les gros échangeurs, par contre, des événements manuels ou automatiques doivent être prévus aux endroits les plus élevés pour évacuer les gaz. Dans les condenseurs de vapeur où la pression de vapeur est inférieure à la pression atmosphérique, des éjecteurs mécaniques ou à vapeur sont prévus pour enlever les gaz présents dans la vapeur.
- *Encrassement et entartrage.* Les problèmes rencontrés le plus souvent dans les échangeurs de chaleur sont l'encrassement et l'entartrage, qui réduisent l'échange de chaleur et nuisent à l'écoulement des fluides. Le fluide qui est le plus susceptible d'encrasser ou d'entartrer les parois devrait circuler dans les tubes. La présence de dépôts est révélée par une diminution du rendement et du débit, ce qui peut être empêché par un traitement adéquat de l'eau. Des entreprises spécialisées pourront recommander le type de traitement requis. Dans certains cas, l'encrassement et l'entartrage ne peuvent pas être empêchés, et un nettoyage chimique et/ou mécanique est nécessaire. Les échangeurs devraient être disposés de telle façon que les collecteurs puissent être ouverts pour le nettoyage mécanique sans avoir à enlever d'autres appareils ou éléments de tuyauterie. Des nettoyages répétés ou un entartrage prononcé peuvent rendre nécessaire le remplacement d'un faisceau entier de tubes. En pareil cas, il faut enlever et remplacer complètement le faisceau de tubes et sa plaque tubulaire.
- *Fuites.* Lorsqu'un échangeur de chaleur s'est corrodé avec le temps, une fissure peut se produire entre la plaque tubulaire et le faisceau de tubes. Cela peut être difficile à déceler, surtout dans le cas d'un échangeur du type eau-eau ou eau-vapeur. Les fuites peuvent causer un problème de contamination. Pour éviter ce problème, le meilleur moyen est de maintenir le fluide propre à pression élevée, bien que cette solution ne soit pas toujours pratique. Il faut réparer l'échangeur ou remplacer ses tubes aussitôt qu'une fuite est décelée.

Aérothermes

Les aérothermes sont des échangeurs de chaleur qui enlèvent la chaleur contenue dans la vapeur ou l'eau chaude circulant dans des tubes de métal, pour réchauffer l'air pulsé sur les tubes (Figure 13).



Aérotherme type
Figure 13

Normalement, les tubes portent des ailettes ou traversent de fines plaques de métal pour augmenter la surface d'échange et le coefficient de transfert de chaleur. Un signal de basse température ambiante provenant d'un thermostat fait démarrer le ventilateur qui envoie de l'air sur les surfaces chaudes pour augmenter le transfert de chaleur. Lorsque le thermostat détecte que la température désirée est atteinte, il arrête le ventilateur.

Si l'aérotherme est chauffé à la vapeur, un purgeur commande le débit de vapeur et l'interrompt lorsque que l'extraction de la chaleur de la vapeur n'est plus nécessaire.

Dans la plupart des aérothermes chauffés à l'eau chaude, l'eau chaude circule constamment. Dans certains appareils récents de grande capacité chauffés à l'eau chaude, une électrovanne ferme l'entrée d'eau lorsque le ventilateur s'arrête.

Le mauvais fonctionnement d'un aérotherme peut être dû aux défauts suivants:

- mauvais fonctionnement du système de régulation
- mauvais fonctionnement des purgeurs
- poche d'air dans le circuit
- tubes corrodés et entartrés
- ailettes et extérieur des tubes empoussiérés ou encrassés
- mauvais fonctionnement du ventilateur et du moteur.

La théorie de fonctionnement des aérothermes est expliquée ci-après pour qu'on puisse mieux comprendre leurs applications et leurs modes d'emploi. L'exemple concerne un aérotherme chauffé à l'eau chaude.

f_a = débit d'air (m^3/h)

v_g = volume spécifique de l'air (m^3/kg)

c_p = chaleur spécifique de l'air à pression constante [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]

T_{A1} = température de l'air à l'entrée ($^\circ C$)

T_{A2} = température de l'air à la sortie ($^\circ C$)

w = débit d'eau (kg/h)

T_{W1} = température de l'eau à l'entrée ($^\circ C$)

T_{W2} = température de l'eau à la sortie ($^\circ C$)

Chaleur fournie (kJ/h) = $w \times (T_{W1} - T_{W2}) \times 4,1855$

Gain de chaleur (kJ/h) = $\frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_{A2} - T_{A1})$

Chaleur fournie = gain de chaleur

$w \times (T_{W1} - T_{W2}) \times 4,1855 = \frac{f_a}{v} \times c_p \times (T_{A2} - T_{A1})$

Prenons l'exemple d'un aérotherme chauffé à la vapeur.

f_a = débit d'air (m^3/h)

v_g = volume spécifique de l'air (m^3/kg)

c_p = chaleur spécifique de l'air à pression constante [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]

T_{A1} = température de l'air à l'entrée ($^\circ C$)

T_{A2} = température de l'air à la sortie ($^\circ C$)

w = débit de vapeur = débit de condensat (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat (kJ/kg)

Chaleur fournie (kJ/h) = $w \times (h_g - h_f)$

Gain de chaleur (kJ/h) = $\frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_{A2} - T_{A1})$

Chaleur fournie = gain de chaleur

$$w \times (h_g - h_f) = \frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_{A2} - T_{A1})$$

De cette équation ou de l'équation précédente, il est possible de calculer la consommation de vapeur ou d'eau et le coût d'exploitation des aérothermes chauffés à la vapeur ou à l'eau chaude.

Équipements refroidis à l'eau

Les équipements refroidis à l'eau sont régis par les mêmes lois de thermodynamique et d'échange de chaleur que les équipements chauffés à la vapeur. L'énergie sous forme de chaleur se transmet d'un niveau de température élevé à un niveau de température plus bas. La gamme des températures de l'eau utilisée est limitée. À la pression atmosphérique, l'eau gèle à 0°C et bout à 100°C. La température normale de l'eau distribuée par les aqueducs municipaux peut varier entre 4°C et 10°C selon la saison. Si l'eau de l'aqueduc est utilisée pour refroidissement, ces variations de température doivent être prises en considération pour le choix d'un échangeur de chaleur, la pompe, la tuyauterie et les dispositifs de régulation. Le refroidissement à l'eau peut se faire de façon directe ou indirecte.

Refroidissement direct

Dans les applications de refroidissement direct, l'eau de refroidissement est amenée en contact direct avec la matière ou le produit à refroidir. Généralement, le refroidissement direct est utilisé pour des produits solides immergés dans un réservoir contenant l'eau ou passés dans un jet d'eau pulvérisée. Dans un tel processus, la température finale du produit ne doit pas être critique, de même que la quantité et la température de l'eau.

Une autre méthode de refroidissement direct est l'injection d'eau dans un produit aqueux, procédé qui refroidit et dilue le produit.

Refroidissement indirect

Le refroidissement indirect à l'eau est la méthode la plus couramment utilisée. L'eau de refroidissement et le produit à refroidir sont séparés par une membrane, et la transmission de la chaleur du produit vers l'eau de refroidissement s'effectue à travers cette membrane. Des exemples typiques de refroidissement indirect concernent les serpentins de refroidissement immergés dans les réservoirs contenant des liquides, les serpentins de refroidissement des appareils de refroidissement d'air, les échangeurs de chaleur et les vaisseaux à enveloppe chauffante.

Sources d'eau de refroidissement

L'eau de refroidissement peut provenir du réseau d'aqueduc municipal, de puits et de sources de surface tels que les lacs, étangs, rivières et ruisseaux. Dans bien des cas, l'eau est employée sans subir de traitement et elle ne passe qu'une fois dans le circuit, pour être évacuée ensuite dans le réseau d'égout municipal ou vers la source d'origine. En raison des variations de température de l'eau provenant de sources naturelles, il faut s'assurer, en choisissant le matériel de refroidissement, qu'il pourra supporter les variations de débit qui lui seront imposées pour obtenir les taux d'échange de chaleur nécessaires.

Dans un système en circuit fermé, l'eau de refroidissement est réutilisée en y ajoutant seulement de petites quantités d'eau d'appoint pour compenser les pertes dans le circuit. Généralement, ces systèmes sont équipés d'un dispositif quelconque d'évacuation de la chaleur tel qu'un bassin de refroidissement par évaporation, une tour de refroidissement ou un refroidisseur qui rejette la chaleur contenue dans l'eau et ramène cette eau à la température requise au processus de refroidissement. Normalement, ces systèmes emploient une certaine forme de traitement chimique pour éliminer ou réduire le plus possible, les problèmes d'encrassement ou d'entartrage provoqués par les impuretés contenues dans l'eau. Plus de détails sur les tours de refroidissement et les refroidisseurs sont contenus dans le Module 11 — Refroidissement et pompes à chaleur.

Transfert de la chaleur

En théorie, il devrait être possible de refroidir 10 L/s d'un produit devant passer de 30°C à 25°C, en utilisant un débit de 10 L/s d'eau de refroidissement à 20°C réchauffée jusqu'à 25°C. En pratique, cependant, cela n'est pas possible à cause des limitations physiques de la capacité des équipements, de la diminution de l'échange de chaleur due à l'entartrage, et de l'apport de chaleur provenant de l'atmosphère. Il est donc convenu d'accepter pour un échangeur de chaleur un écart de température d'approche de 3°C à 5°C entre l'eau de refroidissement et le fluide à refroidir, à la fin de l'échange.

L'équation suivante peut être employée pour calculer la quantité approximative de chaleur cédée ou absorbée dans un écoulement d'eau.

$$Q = f_w \times (T_1 - T_2) \times 15$$

où Q = chaleur totale transmise (MJ/h)

f_w = débit d'eau (L/s)

T_1 = température de l'eau à l'entrée (°C)

T_2 = température de l'eau à la sortie (°C)

15 = facteur multiplicateur tenant compte de la chaleur spécifique de l'eau et de la conversion des unités.

Par exemple, un produit circulant à 5 L/s entre dans un échangeur de chaleur à 30°C et en sort à 25°C. La chaleur cédée se calcule comme suit:

$$\begin{aligned} Q &= f_w \times (T_1 - T_2) \times 15 \\ &= 5 \times (30 - 25) \times 15 \\ &= 5 \times 5 \times 15 \\ &= 375 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

Si le rendement du transfert de chaleur de l'échangeur est de 100%, l'eau de refroidissement doit donc absorber une énergie de 375 MJ/h. Un rendement réaliste pour un échangeur de chaleur étant de 85%, le débit de l'eau de refroidissement doit être ajusté pour pouvoir absorber $375 \div 0,85 = 441,18$ MJ/h.

Si la température d'entrée de l'eau de refroidissement est de 15°C et qu'on emploie un écart de température d'approche de 5°C:

$$\begin{aligned} 441,18 &= f_w \times (15 - 20) \times 15 \\ 441,18 &= f_w \times (-5) \times 15 \\ 441,18 &= -75 f_w \\ f_w &= \frac{441,18}{-75} \\ &= -5,88 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Le signe négatif peut être négligé car il indique seulement que la chaleur est absorbée par l'eau de refroidissement.

En conclusion, il faudra appliquer un débit de 5,88 L/s d'eau de refroidissement à 15°C lorsque sa température monte à 20°C, pour faire passer 5 L/s de produit de 30°C à 25°C dans un échangeur dont le rendement est de 85%.

Analyse énergétique

Diverses possibilités de gestion de l'énergie existent dans les appareils de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) dans les installations industrielles, bâtiments commerciaux et immeubles de caractère public. De nombreuses possibilités peuvent être identifiées lors d'une analyse au passage. Une telle analyse est généralement plus révélatrice si elle est effectuée par une personne de l'extérieur ayant une connaissance générale des principes de gestion de l'énergie. Les possibilités d'économies d'énergie typiques relevées pendant une analyse au passage sont: les fuites de vapeur aux raccords, les fuites d'eau, ou des avaries à l'isolant. La vigilance du personnel de gestion et du personnel d'exploitation impliqué dans un programme d'entretien préventif efficace peuvent réduire sensiblement les consommations d'énergie et les coûts d'exploitation.

Tous les items relevés au cours d'une analyse au passage ne sont pas aussi faciles à analyser que ceux déjà décrits. Par exemple, on peut noter que de l'eau de refroidissement est évacuée directement à l'égout. Or, cette eau peut contenir une certaine énergie calorifique, et il faut analyser avec soin s'il serait rentable d'en récupérer la chaleur. Cela soulève les questions suivantes:

- Quelle quantité de chaleur contient l'eau rejetée?
- Est-il possible d'utiliser cette chaleur?
- Quelle est l'investissement nécessaire pour récupérer cette chaleur?
- Les économies d'énergie et les dépenses s'y rattachant seront-elles suffisantes pour compenser l'achat de l'équipement de récupération de chaleur?

Une analyse de diagnostic est nécessaire pour déterminer mathématiquement la quantité de chaleur contenue dans l'eau rejetée, quelle quantité d'énergie peut être récupérée et s'il y a un emploi possible pour cette énergie récupérée. C'est la quantité d'énergie récupérable et réutilisable qui définit les économies monétaires. À partir de cette donnée, et après avoir déterminé le coût estimé d'achat et d'installation de l'équipement de récupération de la chaleur, la période de rentabilité permet d'évaluer la faisabilité du projet.

Les possibilités de gestion de l'énergie sont divisées en trois catégories:

- Les *Possibilités de maintenance* sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont *exécutées de façon périodique, au moins une fois par année.*
- Les *Possibilités d'amélioration de coût modique* sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont *réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.*
- Les *Possibilités de rénovation* sont des initiatives de gestion de l'énergie, et dont le coût est important.

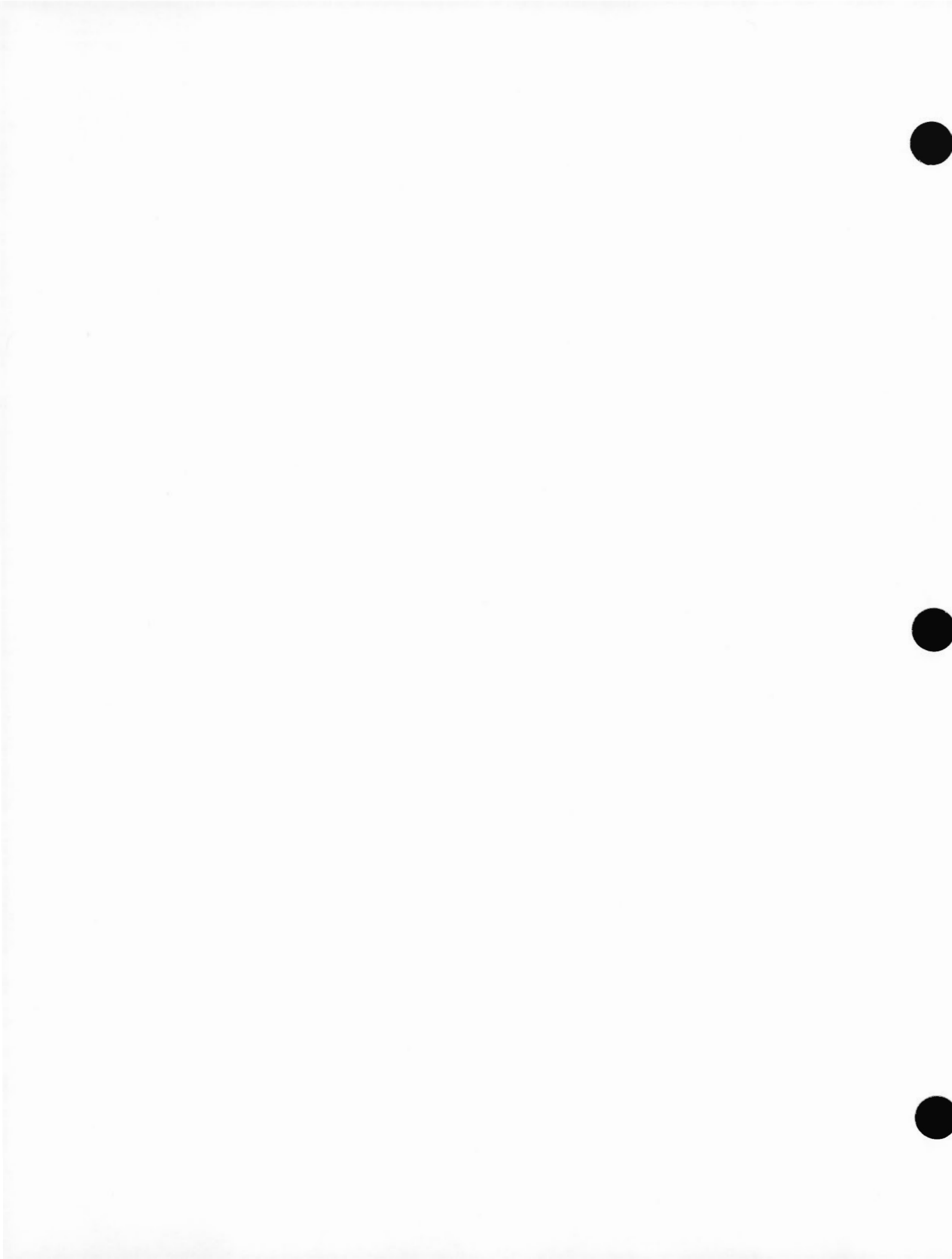
Il est à noter que la distinction entre les améliorations de coût modique et les rénovations dépend normalement de l'importance et de la nature des installations, ainsi que de la politique financière de l'administration.

Sommaire

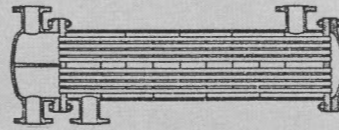
Nombreuses sont les occasions de réduire les consommations d'énergie et leurs dépenses dans les équipements de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau). La vigilance déployée par le personnel de gestion, de conception, d'exploitation et de maintenance pour reconnaître ces occasions permettra de réaliser des économies appréciables.

Les fuites de vapeur, y compris celles qui proviennent de purgeurs mal entretenus, d'isolation inadéquate des tuyauteries et équipements, ainsi que les pertes d'énergie liées aux rejets d'une installation constituent un gaspillage d'énergie autant que d'argent. Une gestion efficace de l'énergie consiste à reconnaître l'existence de telles pertes et à les réduire.

La gestion de l'énergie doit être abordée avec un esprit ouvert permettant de s'interroger sur le rendement du processus utilisé depuis longtemps. Le chapitre sur les Possibilités de gestion de l'énergie permettra de reconnaître les anomalies pouvant exister dans une installation particulière. La vigilance accrue du personnel qui gère, exploite ou entretient une installation peut, avec une certaine créativité et de l'assistance spécialisée, être rentable en termes d'économies d'énergie et de coûts.



APPAREILLAGE



Le présent chapitre décrit les appareillages typiques de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) souvent employés dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel. Les taux typiques de consommation de vapeur des appareils chauffés à la vapeur sont présentés dans le tableau 7. Les appareillages passés en revue ci-dessous sont divisés en trois catégories:

- appareils chauffés à la vapeur
- appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau
- appareils refroidis à l'eau.

Appareils chauffés à la vapeur

Les principaux types d'appareils chauffés à la vapeur sont décrits ci-après sous des rubriques individuelles.

Sécheurs rotatifs

Les sécheurs rotatifs chauffés à la vapeur sont couramment employés dans l'industrie. Ils sont utilisés, par exemple, dans le processus de mouture humide du maïs et dans les cuiseurs rotatifs. Normalement, leur vitesse de rotation est faible. Ce genre d'appareils est divisé en deux groupes, qui varient considérablement selon leurs applications et leurs modes de fonctionnement. Dans le premier groupe, le produit est séché par contact avec la surface d'un cylindre rempli de vapeur. Dans le deuxième groupe, le produit est contenu dans un cylindre rotatif dans lequel des tubes ou des conduites remplis de vapeur assèchent le produit par contact direct. Dans certains cas, le cylindre rotatif est entouré d'une enveloppe chauffante pour augmenter la surface d'échange de chaleur.

Les sécheurs rotatifs remplis de vapeur sont très employés dans les industries du papier, du textile, du plastique et des produits alimentaires; ils comprennent, par exemple, des sécheurs à grain, repasseuses de buanderie, et sécheurs de machine à papier. Pour ces appareils, la pression de vapeur peut atteindre 1 100 kPa (eff.).

Les sécheurs rotatifs à conduites de vapeur interne sont fréquemment utilisés dans les industries alimentaires et chimiques et dans le conditionnement des viandes; on y remarque des sécheurs à grain et des cuiseurs rotatifs. Le débit de vapeur varie considérablement selon le type spécifique d'appareil et leur utilisation. La pression de vapeur peut atteindre 1 100 kPa (eff.).

Évaporateurs

Les évaporateurs réduisent la teneur en eau d'un produit par l'utilisation de chaleur. Ils sont couramment employés dans les industries de pâtes et papiers, chimiques et textiles. Un évaporateur constitue une application spéciale de l'échangeur de chaleur à calandre, dans lequel le produit circule dans les tubes et la vapeur dans la calandre. Le produit chauffé entre dans une chambre de séparation qui sépare la vapeur du produit pour la réacheminer, bien souvent, pour d'autres fins. Le produit concentré qui en résulte est dirigé vers l'étape de traitement suivante.

Des systèmes d'évaporation à plusieurs stages sont souvent employés, l'évaporateur à triple effet étant le plus courant. La vapeur partant de la première étape sert de source de chaleur à la deuxième étape, et ce processus se répète pour la troisième étape. La vapeur sortant de la troisième étape peut même servir à préchauffer le produit entrant ou à fournir de la chaleur à une autre fin. La consommation de vapeur des évaporateurs varie entre 500 et 50 000 kg/h, alors que les pressions peuvent atteindre 1 200 kPa (eff.).

Appareils de chauffage d'ambiance

Divers appareils chauffés à la vapeur sont employés dans le chauffage des bâtiments. Les appareils les plus courants comprennent des aérothermes, conditionneurs d'air, radiateurs à ailettes, et serpentins. Dans certains cas, un ventilateur permet une circulation forcée de l'air sur la surface chauffée, pour augmenter la chaleur absorbée par l'air et pulser l'air chauffé dans la direction déterminée. Les pressions de vapeur sont généralement faibles, de l'ordre de 2 à 7 kPa (eff.), mais il existe des appareils où la pression de vapeur atteint 700 kPa (eff.).

Préchauffeurs d'air

Les préchauffeurs d'air sont des réchauffeurs spécialisés servant spécifiquement à chauffer l'air destiné à un processus. L'alimentation d'air à haute température pour le séchage du papier ou du bois et pour le préchauffage de l'air de combustion des chaudières sont des applications typiques. Les sècheurs à tunnel sont des exemples de préchauffeurs. Certains appareils peuvent chauffer l'air à de très hautes températures, pouvant atteindre 300°C.

Machines frigorifiques à absorption

Une machine frigorifique à absorption refroidit l'eau pour le conditionnement de l'air ou des applications de procédés, par évaporation de l'eau d'une solution de bromure de lithium. La vapeur peut fournir la chaleur permettant l'évaporation. Pour plus de détails sur les machines frigorifiques à absorption, consulter le Module 11 — Refroidissement et pompes à chaleur.

Machines stationnaires à chambre de vapeur

Ce type d'appareils comprend les presses chauffantes qui sont employées dans l'industrie du contre-plaqué et autres industries de fabrication de matériaux en feuilles, les moules à enveloppe de vapeur pour la fabrication de pièces en caoutchouc et en plastique, les autoclaves pour la stérilisation, et les appareils pour la cuisson de produits en conserve. On distingue trois catégories de machines stationnaires à chambre de vapeur:

- Les appareils où le produit est enfermé dans une presse à enveloppe de vapeur. Des jouets, des caissons de batterie et des volants d'automobile sont formés de cette façon.
- Les appareils où la vapeur est introduite directement dans la chambre contenant le produit, c'est ainsi que fonctionnent les stériliseurs pour les vêtements et pansements chirurgicaux, les autoclaves employés dans la production des plastiques, et la cuisson de produits contenus dans des boîtes en étain.
- Les appareils où le produit est contenu dans une chambre entourée d'une enveloppe où circule la vapeur. C'est le cas de certains stériliseurs et autoclaves où la vapeur n'est pas en contact avec le produit. Les pressions de vapeur et les débits de vapeur peuvent varier grandement, selon l'utilisation.

Appareils de vulcanisation

Les appareils de vulcanisation sont employés dans les industries du caoutchouc et des plastiques pour améliorer les propriétés des produits; ces appareils peuvent être à chauffage direct ou indirect. La vulcanisation ordinaire des pneus est réalisée par des moules venant en contact direct avec les presses à plateaux chauffés à la vapeur. Une réparation localisée est souvent faite à l'aide de la vapeur qui vient en contact direct avec le produit. Normalement, la pression de vapeur ne dépasse pas 1 050 kPa (eff.), et le débit de vapeur varie entre 2 et 60 kg/h.

Appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau

Les appareils de cette catégorie sont décrits ci-dessous.

Échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont employés dans les applications indirectes de chauffage et de refroidissement. Il peut s'agir d'échangeurs multitubulaires à calandre ou d'échangeurs à plaques. Les capacités nominales de pression et de température tout comme les exigences de débits de vapeur et d'eau varient considérablement, selon les applications.

Réservoirs de stockage

Des réservoirs sont employés pour le stockage de liquides ou de solides dont la température doit être augmentée, réduite ou maintenue à un niveau particulier. Le chauffage peut être fourni directement ou indirectement selon le produit. Dans le cas d'un refroidissement, il est généralement indirect. Le chauffage ou le refroidissement peut se faire à l'aide de serpentins ou d'autres dispositifs immergés dans le produit stocké, ou à l'aide de serpentins appliqués contre les parois du réservoir. Comme pour les échangeurs de chaleur, les capacités nominales de pression et de température ainsi que les débits de vapeur et d'eau varient considérablement.

Vaisseaux à enveloppe de vapeur

Les vaisseaux à enveloppe chauffante servent le plus souvent de cuiseurs à la vapeur ou de concentrateurs. Leurs principales utilisations industrielles sont dans le conditionnement des viandes, la fabrication du papier, le raffinage du sucre, la récupération des déchets d'abattoir et le conditionnement des fruits et légumes. La pression de vapeur varie de 1 à 1 000 kPa (eff.) et les débits de vapeur peuvent varier de presque nul jusqu'à 5 000 kg/h.

Bien que moins courant, ces appareils peuvent également servir au refroidissement, dans lequel l'eau de refroidissement circule dans l'enveloppe pour refroidir le produit ou le maintenir à la température désirée. Cela s'appliquerait typiquement à un processus où se déclenche une réaction exothermique (c'est-à-dire qui dégage de la chaleur) et où la température du processus doit être maintenue constante.

Appareils de moulage en matrice

Les appareils de moulage en matrice sont souvent conçus pour assurer un chauffage et un refroidissement. La vapeur sert à réchauffer la matrice avant le moulage, alors que pendant le moulage, l'eau de refroidissement maintient la matrice à la température de service.

Appareils refroidis à l'eau

Les catégories d'appareils à refroidissement à l'eau sont décrits individuellement ci-après.

Compresseurs refroidis à l'eau

Selon le type de compresseur et le nombre de stades de compression, l'eau de refroidissement peut être employée dans des refroidisseurs intermédiaires et des refroidisseurs de sortie. Pour de plus amples détails sur les compresseurs, se référer au Module 14 — Compresseurs et turbines.

Bacs de refroidissement à l'eau

Dans les bacs de refroidissement à l'eau, le produit est immergé. Normalement, la température du bain de refroidissement n'est pas critique, et elle est maintenue par l'alimentation continue d'eau d'appoint laissant le surplus déborder, ou par cycle répétitif de vidange et de remplissage.

Refroidisseurs

Les refroidisseurs utilisent de l'eau glacée ou une solution de glycol pour assurer le refroidissement dans les applications de réfrigération et de climatisation. Pour de plus amples détails à leur sujet voir le Module 11 — Refroidissement et pompes à chaleur.

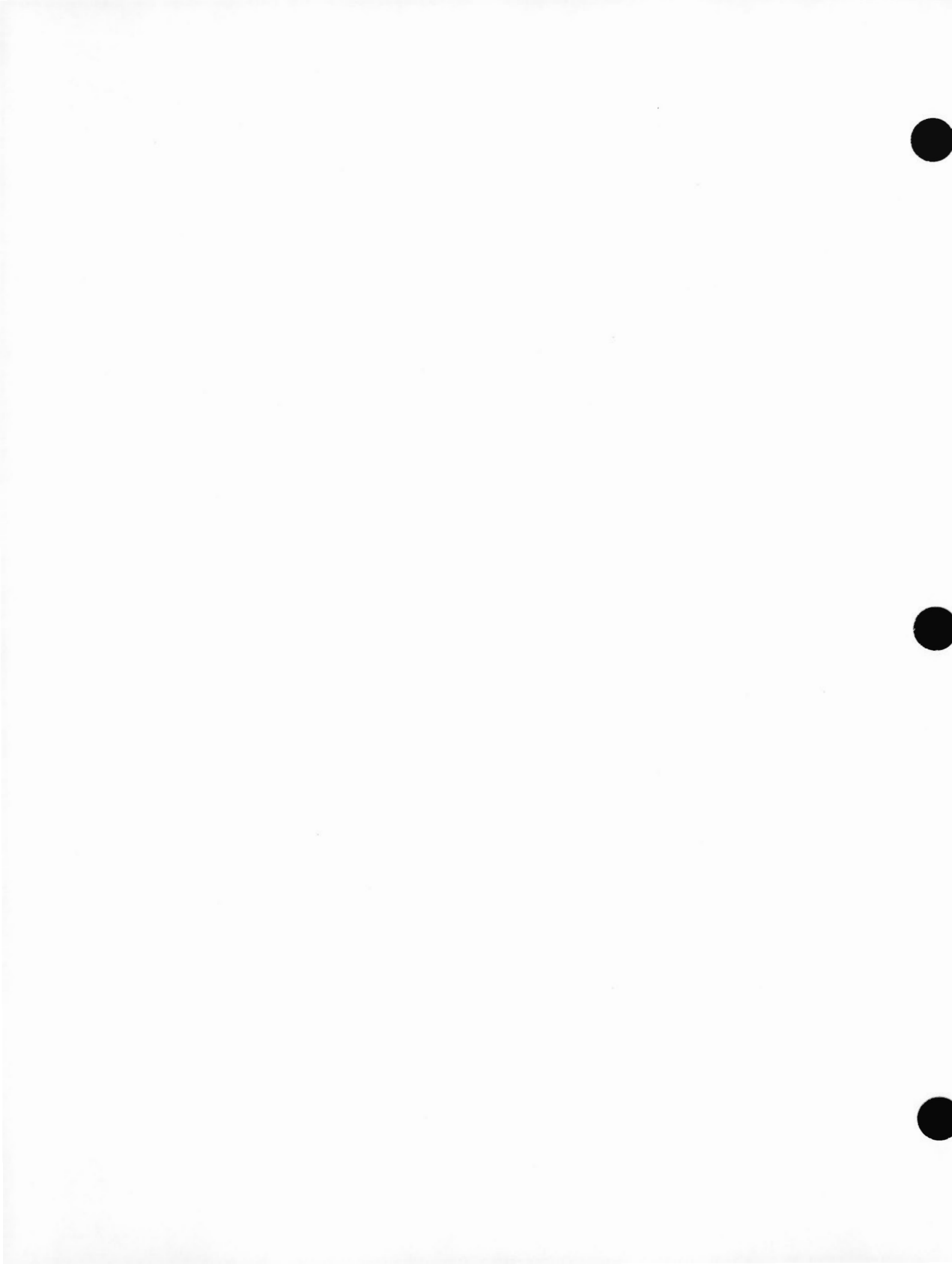
Tunnels de refroidissement par aspersion

Dans un tunnel de refroidissement par aspersion, le produit est déplacé mécaniquement dans le tunnel, où il est refroidi par une aspersion d'eau de refroidissement.

Divers appareils refroidis à l'eau

Certains appareils sont refroidis par un courant d'eau qui remplit une cavité et déborde ensuite vers un système de collecte. L'eau absorbe la chaleur développée par l'appareil pour le maintenir à la température désirée. Les masticateurs et calandres employés dans la fabrication du caoutchouc sont des applications typiques de ce genre de refroidissement.

Il est à noter que de nombreux systèmes de refroidissement à l'eau employés de nos jours sont en circuit fermé, c'est-à-dire à recirculation d'eau. Lorsque l'eau a acquis une certaine température, elle passe dans une tour de refroidissement, un bassin de refroidissement par évaporation ou un autre dispositif qui rejette à l'atmosphère la chaleur absorbée.



POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE



«Possibilités de gestion de l'énergie» est une expression désignant toutes les façons d'utiliser l'énergie de façon rationnelle afin de réduire les coûts d'exploitation. Dans ce chapitre, plusieurs possibilités typiques sont décrites sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation, avec des exemples concrets des économies d'énergie qui s'en suivent. Même si ce chapitre ne donne pas une liste exhaustive de toutes les possibilités que présentent les appareils de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau), il stimulera la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités existant dans leurs installations. Les autres modules de la présente série devront être étudiés pour découvrir les possibilités de gestion de l'énergie existant dans les autres types d'appareillage.

Le texte qui suit donne les grandes lignes de plusieurs possibilités de gestion de l'énergie, suivies d'exemples concrets ou de commentaires.

Possibilités de maintenance

Les possibilités de maintenance sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont exécutées de façon périodique, ou moins une fois par année. Les points suivants représentent des possibilités typiques d'économie dans ce secteur.

1. Réparer les fuites aux robinets, raccords et garnitures d'étanchéité.
2. Réparer l'isolant endommagé.
3. Entretenir les dispositifs de régulation de température et de pression.
4. Entretenir les purgeurs.
5. Nettoyer les surfaces d'échange de chaleur.
6. S'assurer que la qualité de vapeur convient au type d'utilisation.
7. S'assurer que les gammes de pression et de température de la vapeur respectent les tolérances spécifiées pour les appareils.
8. S'assurer que les purgeurs ont une capacité suffisante pour évacuer tout le condensat.
9. S'assurer que les serpentins de chauffage sont inclinés dans le sens de l'entrée de vapeur vers le purgeur pour éviter qu'ils soient inondés de condensat.

Exemples concrets de maintenance

1. Réparation des fuites

Une analyse au passage révèle qu'il y a une fuite de vapeur au raccord à brides de l'entrée de vapeur sur un échangeur de chaleur. La pression de vapeur en ce point est de 689 kPa (eff.) et l'ouverture de la fuite est évaluée à 6,35 mm de diamètre.

La feuille de travail 9-2 permet de calculer que les économies potentielles peuvent atteindre 12 632\$ par année.

La fuite peut être corrigée en remplaçant la garniture d'étanchéité ou coût de 100\$, pièces et main-d'œuvre comprises. Le travail peut être prévu pendant une période d'inactivité de l'usine.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{100\$}{12\ 632\$}$$

$$= 0,0079 \text{ an (3 jours)}$$

2. Réparation de l'isolant

Une analyse au passage révèle qu'il manque d'isolant sur un réservoir de stockage contenant de l'eau à 80°C. L'isolant avait été enlevé au complet pour changer le réservoir de place et seulement la moitié inférieure de l'isolant avait été réinstallée. Le réservoir a un diamètre de 3 mètres, une hauteur de 3 mètres, et un couvercle plat. Au moment de l'analyse, la température ambiante était de 21°C, et il n'y avait pas de vent. La température de l'eau est normalement maintenue à 80°C par de la vapeur à 689 kPa (eff.). Cette condition existait 2 688 heures par année.

$$\begin{aligned}\text{Surface non isolée} &= (3,14 \times d \times h) + (3,14 \times r^2) \\ &= (3,14 \times 3 \times 1,5) + (3,14 \times 1,5^2) \\ &= 14,137 + 7,069 \\ &= 21,206 \text{ m}^2\end{aligned}$$

La feuille de travail 9-5 permet de calculer que si l'isolant du réservoir était réparé, la perte de chaleur serait réduite de 147 000 000 kJ par année.

$$\text{Énergie disponible par kg de vapeur à 689 kPa (eff.)} = 2\,048,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Coût de la vapeur} = 22\$/1\,000 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}\text{Perte de chaleur} &= \frac{147\,000\,000 \text{ kJ}}{2\,048,3 \text{ kJ/kg}} \\ &= 71\,767 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle (\$)} &= 71\,767 \times 22\$/1\,000 \text{ kg} \\ &= 1\,579\$\end{aligned}$$

Le coût estimé de l'isolant installé est de 500\$

$$\begin{aligned}\text{Période de rentabilité} &= \frac{500\$}{1\,579\$} \\ &= 0,318 \text{ an (4 mois)}\end{aligned}$$

3. Entretien des instruments

L'entretien adéquate des instruments de mesure et de régulation est une façon d'assurer que les bonnes conditions de marche existent, et que toute anomalie est portée à l'attention des opérateurs et du personnel d'entretien. Par exemple, si les indicateurs de pression, de température et de débit n'indiquent pas les valeurs exactes, il est difficile de vérifier que les conditions requises existent réellement (ainsi que de calculer la consommation réelle d'énergie). Le réglage des régulateurs de température et de pression est un autre aspect important. Pour des renseignements sur ce sujet, il faut se reporter au Module 15 — Mesures et contrôles, et au Module 16 — La régulation automatique.

4. Entretien des purgeurs

À une usine grande consommatrice de vapeur, il fut constaté qu'il était difficile de déceler quels purgeurs fonctionnaient mal. Des problèmes très spécifiques se présentaient aux endroits où un grand nombre de purgeurs étaient raccordés à un réservoir collecteur de condensat.

En vue de repérer les purgeurs qui fuyaient, un pyromètre à contact fut acheté pour mesurer la température de surface de la conduite d'évacuation des purgeurs. Certains critères furent définis en fonction du type de purgeur et des conditions de vapeur existantes pour faire un lien entre la température des conduites d'évacuation et l'importance des fuites. Cette technique fut ensuite intégrée au programme d'entretien préventive des purgeurs.

Selon l'évaluation, la réduction des fuites aux purgeurs pourrait permettre des économies de vapeur de l'ordre de 400kg/h.

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle (\$)} &= 400 \text{ kg/h} \times 8\,760 \text{ h/an} \times 22\$/1\,000\text{kg} \\ &= 77\,088\$/\text{an}\end{aligned}$$

Le coût des opérations de recherche et de réparation des purgeurs qui fuyaient fut estimé à 20 000\$ par année.

$$\begin{aligned}\text{Période de rentabilité} &= \frac{20\,000\$}{77\,088\$} \\ &= 0,26 \text{ an (3 mois)}\end{aligned}$$

5. Nettoyage des surfaces d'échange de chaleur

Le nettoyage des surfaces d'échange de chaleur pour les débarrasser des accumulations de boues, de tartre et d'autres dépôts, assure une transmission de chaleur maximale.

6. Vérification de la qualité de vapeur

Il est important de s'assurer que les équipements reçoivent de la vapeur sèche d'une qualité la plus proche de 1. Dans le cas de la vapeur saturée sèche, cette qualité maximale existe puisque toute son humidité a été transformée en vapeur. Dans bien des cas, la qualité de la vapeur sortant d'une chaudière ou d'un autre type de générateur de vapeur s'approche effectivement de l'unité, mais à mesure que la vapeur circule dans le réseau de distribution, il se produit de la condensation qui réduit la qualité de la vapeur. À moins que des moyens efficaces d'évacuation de ce condensat soient appliqués au réseau de distribution, le condensat pénètre dans les appareils et, par conséquent réduit les échanges de chaleur et les appareils risquent d'être inondés de condensat.

7. Réduction de la température et de la pression de la vapeur

L'analyse énergétique d'une installation détermina que la vapeur était bien produite sous une pression de 1 550 kPa (eff.), mais que la plus haute pression réellement nécessaire n'était que de 1 050 kPa (eff.). L'appareillage qui avait besoin d'une vapeur à 1 550 kPa n'existait plus depuis bien des années.

Il fut décidé de réduire progressivement la pression de la vapeur jusqu'à 1 050 kPa. À chaque étape de réduction de pression, les services concernés exprimaient leur réaction au cours de problèmes manifestés. À une pression de 1 150 kPa (eff.), due à une opération à basse pression et des taux de combustion élevés, les opérateurs contrôlaient difficilement les ventilateurs de chaudières entraînés par des turbines à vapeur. La pression fut donc élevée à 1 250 kPa (eff.). La réduction de la pression fut accompagnée d'une réduction des pertes de chaleur dans les conduites de vapeur et des pertes de vapeur dues aux fuites et aux purgeurs. Les économies d'énergie furent estimées à $6,087 \times 10^6$ MJ/an. Pour calculer les économies correspondantes en termes de coûts d'exploitation, il faut considérer qu'un mètre cube de gaz naturel contient 37,2 MJ d'énergie et que le rendement des chaudières était de 80%.

$$\begin{aligned}\text{Économie de gaz naturel} &= \frac{6,087 \times 10^6}{37,2 \times 0,8} \\ &= 204\,536 \text{ m}^3 \text{ par an}\end{aligned}$$

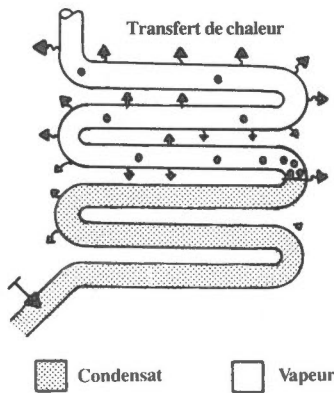
Le gaz naturel coûte 0,14\$/m³.

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle (\$)} &= 204\,536 \text{ m}^3/\text{an} \times 0,14\$/\text{m}^3 \\ &= 28\,635\$/\text{an}\end{aligned}$$

8. Vérification de la capacité des purgeurs

Le condensat qui n'est pas évacué d'un appareil d'échange de chaleur, tel qu'un serpentin ou un échangeur de chaleur, occupe un certain volume et réduit l'espace disponible pour le contact de la vapeur avec les surfaces d'échange (figure 14). Normalement, la présence de condensat est due à des purgeurs d'une capacité insuffisante ou qui fonctionnent mal. Pour éviter que l'appareil soit inondé de condensat, la capacité des purgeurs doit être définie d'après la plus grande quantité de condensat pouvant être produite pendant les périodes de démarrage. Si le condensat inonde un appareil d'échange de chaleur, l'échange de chaleur est réduit et si l'appareil sert au chauffage, cela augmente le délai nécessaire pour que le produit chauffé atteigne la température désirée. Parfois, pour essayer de surmonter ce problème, on décide d'augmenter la pression et la température de la vapeur, mais cela augmente la consommation d'énergie requise pour produire la vapeur à une température et pression plus élevées. Si, au contraire, on remédie au problème en agissant directement sur les purgeurs, cette dépense supplémentaire d'énergie ne serait pas nécessaire.

Il est recommandé de consulter les fabricants de purgeurs pour déterminer le type et la capacité des purgeurs à employer.



Serpentin de vapeur partiellement inondé
Figure 14

9. Inclinaison des serpentins de chauffage pour évacuer le condensat

Le refoulement du condensat dans un appareil d'échange réduit la surface disponible pour l'échange de chaleur entre la vapeur et le produit chauffé. Cette situation peut être due à une mauvaise conception ou au montage inadéquat des serpentins. Les serpentins doivent toujours être conçus et installés de façon qu'ils présentent une pente continue vers le bas à partir du raccord d'entrée de vapeur dans l'échangeur jusqu'au purgeur pour éviter que des poches de condensat se forment dans les points bas du serpentin, ce qui causerait les problèmes suivants :

- Inondation du serpentin et de la diminution de l'échange de chaleur.
- Coups de bélier provoqués par les masses de condensat qui sont forcés de circuler dans le réseau et qui risquent d'endommager l'équipement.

Si l'efficacité du transfert de chaleur est inférieure aux prévisions, et si les purgeurs semblent fonctionner correctement, on doit chercher pour la présence de poches de condensat à l'intérieur des serpentins.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les possibilités d'amélioration de coût modique sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût n'est pas élevé. Des exemples typiques sont donnés ci-après :

1. Arrêter les équipements non utilisés.
2. Prévoir des capots verrouillables sur les dispositifs de régulation tels que les thermostats pour empêcher que des personnes non autorisées en modifient le réglage.
3. Faire fonctionner les appareils à leur capacité optimum, chaque fois qu'on le peut. Éviter de faire fonctionner des groupes d'appareil à capacité réduite.
4. Poser des événements thermostatiques.
5. Ajouter des instruments de mesure et de contrôle fournissant des données à partir desquelles des améliorations à l'exploitation pourront être apportées.
6. Choisir l'emplacement des instruments de régulation assurant le fonctionnement optimal.

Exemples concrets d'améliorations de coût modique

1. Arrêt des équipements

Une analyse au passage révéla qu'un système de chauffage à la vapeur fournissant de l'air chaud à un tunnel de séchage fonctionnait même lorsque le tunnel n'était pas en service. Par une analyse plus poussée, il fut constaté que ce système de chauffage fonctionnait 8 760 heures par année, alors que le tunnel ne servait que 6 000 heures par année. Le réchauffeur employait une vapeur sèche et saturée à une pression de 689 kPa (eff.) et avec un débit de 200 kg/h. La vapeur coûte 22\$/1 000 kg.

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle de vapeur} &= (8\,760 - 6\,000) \text{ h/an} \times 200 \text{ kg/h} \\ &= 2\,760 \times 200 \\ &= 552\,000 \text{ kg/an}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle (\$)} &= 552\,000 \text{ kg/an} \times 22\$/1\,000 \text{ kg} \\ &= 12\,144\$\end{aligned}$$

Il fut décidé de poser un relais et une électrovanne pour couper la vapeur lorsque le tunnel de séchage n'est pas en service. Le coût estimé de l'achat, de la pose et du raccordement de ce dispositif était de 500\$.

$$\begin{aligned}\text{Période de rentabilité} &= \frac{500\$}{12\,144\$} \\ &= 0,041 \text{ an (15 jours)}\end{aligned}$$

2. Verrouillage des dispositifs de régulation

Au cours d'une analyse de la consommation énergétique de l'ensemble d'une installation de production, il fut constaté que les thermostats des aérothermes étaient réglés pour maintenir une température de 23,3°C dans les lieux de travail, même s'il avait été convenu avec le personnel que 21,1°C était acceptable. En fait, parfois des employés faisaient fonctionner des ventilateurs d'évacuation pour abaisser la température ambiante, ce qui envoyait de l'air chauffé à l'extérieur. Dix aérothermes étaient impliqués, chacun présentant un débit d'air de 236 L/s. Ces appareils chauffaient l'air extérieur à partir d'une température moyenne d'hiver de -10°C, en employant de la vapeur à 180 kPa absolu. Le condensat extrait des serpentins de chauffage était évacué dans un réservoir de condensat ouvert à l'atmosphère. La durée de la période de chauffage était évaluée à 3 500 heures, et la vapeur produite coûtait 22\$/1 000 kg.

Vapeur nécessaire au maintien de 23,3°C (par aérotherme):

$$\begin{aligned}w \times (h_g - h_f) &= \frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_2 - T_1) \\ w &= \frac{\frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_2 - T_1)}{(h_g - h_f)} \\ &= \frac{\frac{236}{0,831} \times 1,006 \times (23,3 - (-10))}{(2\,701,5 - 490,7)} \\ &= 4,3 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Pour 10 aérothermes, cela représente un total de 43 kg/h de vapeur.

Vapeur nécessaire au maintien de 21°C (par aérotherme):

$$w \times (h_g - h_f) = \frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_2 - T_1)$$

$$w = \frac{\frac{f_a}{v_g} \times c_p \times (T_2 - T_1)}{(h_g - h_f)}$$
$$= \frac{0,831}{2\,701,5 - 490,7} \times 1,006 \times (21,1 - (-10))$$

$$= 4,02 \text{ kg/h}$$

Pour 10 aérothermes, cela représente un total de 40,2 kg/h de vapeur.

$$\begin{aligned} \text{Économie annuelle de vapeur} &= 3\,500 \times (43 - 40,2) \\ &= 3\,500 \times 2,8 \\ &= 9\,800 \text{ kg/an} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Économie annuelle (\$)} &= 9\,800 \times 22\$/1\,000 \\ &= 216\$ \end{aligned}$$

Le coût estimé de l'achat et de l'installation de capots verrouillables sur dix thermostats était de 500\$.

$$\begin{aligned} \text{Période de rentabilité} &= \frac{500\$}{216\$} \\ &= 2,31 \text{ ans} \end{aligned}$$

3. Marche des appareils à pleine charge

Les appareils chauffés à la vapeur fonctionnent souvent à une charge inférieure à leur capacité nominale. Il vaut la peine de réexaminer les horaires de production pour savoir si certains appareils peuvent être arrêtés pour permettre aux appareils restant en service de fonctionner à pleine charge.

La marche à pleine charge présente généralement plusieurs avantages:

- Dans des circonstances normales, les appareils fonctionnant à pleine charge fournissent leur rendement maximal.
- La perte de chaleur est réduite. Avec quatre appareils remplis à moitié d'un produit à chauffer, les pertes de chaleur à l'atmosphère sont, dans la plupart des cas, presque le double de ce que perdent deux appareils remplis à pleine capacité. Si les appareils sont dans un endroit où leurs pertes de chaleur contribuent en quelque sorte au chauffage du bâtiment, la charge de chauffage est réduite d'autant, mais s'ils sont à l'extérieur, la chaleur qu'ils dégagent est dissipée et cela constitue un gaspillage d'énergie et d'argent.

4. Emploi d'événements thermostatiques

L'air entre dans les appareils chauffés à la vapeur de deux façons. D'une part, quel que soit le mode de production de la vapeur, l'eau d'alimentation contient toujours une certaine quantité d'air. D'autre part, lors de la mise en charge d'un circuit de vapeur, que ce soit la mise en charge initiale ou un rechargement après une interruption de marche, il y a toujours de l'air d'emprisonné dans la conduite de vapeur.

Quand de l'air ou tout autre gaz non condensable est présent dans un volume de circulation de vapeur, la vapeur ne peut pas se maintenir à sa température de saturation. Le tableau suivant montre combien la présence d'air affecte la température d'un mélange vapeur/air.

Pression (kPa eff.)	Température de la vapeur saturée (°C)	Température du mélange vapeur-air		
		5% air	10% air	15% air
14	104°C	102°C	100,5°C	99°C
34	108°C	107°C	105,5°C	104°C
69	115°C	114°C	112°C	110°C
138	126°C	124°C	122°C	121°C

Les événements thermostatiques évacuent très efficacement l'air des circuits de vapeur. Pour assurer le meilleur rendement des circuits de vapeur, les événements doivent être situés aux endroits où l'air peut facilement les atteindre.

5. Adjonction d'instruments de mesure et de contrôle

Sans instruments de mesure et de contrôle (Module 15) sur les appareils de chauffage et de refroidissement, il est très difficile de déterminer si les appareils fonctionnent conformément aux spécifications. Par exemple, s'il n'y a pas de thermomètre sur un appareil servant à chauffer ou à refroidir un liquide, il est difficile de vérifier le fonctionnement d'un régulateur de température. Un thermomètre, par contre, fournit à l'opérateur l'assurance que le régulateur de température remplit efficacement ses fonctions.

6. Choix de l'emplacement des instruments de régulation

L'emplacement des instruments réglant le chauffage ou le refroidissement est très important. Les thermostats qui commandent le chauffage des locaux dans une section de réception sont parfois posés sur les murs extérieurs du bâtiment. À ces endroits, ils détectent une température inférieure à celle qui existe réellement dans l'ensemble de la pièce. Ils pourraient alors exiger plus de chauffage que nécessaire au confort des occupants. Si les thermostats sont installés sur une cloison intérieure ou une colonne, ils détecteront une température ambiante plus représentative et la consommation d'énergie sera réduite.

Possibilités de rénovation

Les possibilités de rénovation sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût est important. Beaucoup de possibilités de cette nature nécessitent une analyse détaillée par des spécialistes et le présent module ne peut les décrire toutes. Par contre, quelques possibilités d'économie sont représentées et accompagnées d'exemples concrets ou d'un simple commentaire. Les opérations suivantes constituent des possibilités de gestion de l'énergie par la rénovation.

1. Convertir les processus de chauffage direct à la vapeur en chauffage indirect, et récupérer le condensat.
2. Installer un isolant ou améliorer l'isolant existant sur les appareils.
3. Déplacer les appareils chauffés à la vapeur installés au centre d'un bâtiment vers le périmètre, afin que leurs pertes de chaleur contribuent à chauffer ce secteur.
4. Réexaminer le concept de chauffage central d'un bâtiment, par opposition au chauffage localisé.
5. Modifier les processus, si possible, pour stabiliser la demande de vapeur ou d'eau.
6. Réviser les horaires de marche des processus pour essayer de réduire les demandes de pointe de vapeur ou d'eau.
7. Évaluer les possibilités de récupération de chaleur de l'eau rejetée par une installation.

Exemples concrets de rénovation

1. Conversion du chauffage direct à la vapeur en chauffage indirect

Une analyse au passage révéla que de la vapeur sortait d'un événement atmosphérique sur un réservoir d'eau chauffé directement à la vapeur. L'eau était chauffée à 60°C par une injection directe de vapeur saturée à 200 kPa absolus. L'opération consistait à remplir le réservoir de 6 000 kg d'eau à 10°C, le chauffer pendant une heure jusqu'à 60°C et à maintenir l'eau à cette température pendant une heure additionnelle. L'eau chauffée était ensuite transférée par pompage vers un réservoir intermédiaire pour être ensuite prélevée à un débit de 0,5 L/s.

Le débit de vapeur fournie au chauffage du réservoir était de 300 kg/h en moyenne.

La possibilité d'employer un échangeur de chaleur fut évaluée pour chauffer l'eau seulement selon les besoins immédiats. Cela éliminerait la perte de vapeur par l'évent du réservoir de stockage et supprimerait même les réservoirs de stockage et intermédiaire. En outre, la consommation de produits chimiques servant à traiter l'eau d'alimentation serait diminuée.

L'échangeur de chaleur ferait alors passer 0,5 L/s d'eau de 10°C à 60°C à l'aide de vapeur saturée à 200 kPa absolus. L'enthalpie de la vapeur est de 2 201,6 kJ/kg. Le condensat serait évacué vers un réservoir de condensat existant ouvert à l'atmosphère et ensuite retourné à la chaudière. L'échangeur de chaleur a un rendement de 80%. Le coût de production de la vapeur est de 22\$/1 000 kg.

$$\begin{aligned}\text{Chaleur nécessaire pour chauffer l'eau} &= f_w \times (T_1 - T_2) \times 15 \\ &= 0,5 \times (60 - 10) \times 15 \\ &= 375 \text{ MJ/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Chaleur fournie par la vapeur} &= \frac{375}{0,8} \\ &= 468,75 \text{ MJ/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Vapeur nécessaire} &= \frac{468,75 \times 1\,000}{2\,201,6} \\ &= 213 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Économie de vapeur par heure} &= 300 - 213 \\ &= 87 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Considérant que le système fonctionne 7 500 heures par année:

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle de vapeur} &= 87 \times 7\,500 \\ &= 652\,500 \text{ kg/an}\end{aligned}$$

La consommation d'eau d'alimentation de la chaudière serait réduite d'autant, et cela diminuerait le coût de traitement de d'eau de 200\$ par année.

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle (\$)} &= (652\,500 \times 22\$/1\,000) + 200\$ \\ &= 14\,355\$ + 200\$ \\ &= 14\,555\$\end{aligned}$$

La valeur de revente des deux réservoirs, de la pompe et de leur tuyauterie désormais inutiles fut estimé à 2 000\$. Le coût estimé de l'échangeur de chaleur est de 8 000\$.

$$\begin{aligned}\text{Période de rentabilité} &= \frac{8\,000\$ - 2\,000\$}{14\,555} \\ &= \frac{6\,000\$}{14\,555\$} \\ &= 0,41 \text{ an (5 mois)}\end{aligned}$$

2. Installation ou amélioration de l'isolant

Au cours d'une analyse au passage, il fut constaté qu'un réservoir de stockage extérieur, chauffé à l'électricité et contenant un produit à 75°C, n'était pas isolé. Le réservoir était utilisé 6 000 heures par année, sa surface totale était de 60 m², et l'électricité coûtait 0,05\$ par kWh.

Il fut proposé d'isoler les parois du réservoir avec un isolant en fibre de verre de 51 mm recouvert d'une enveloppe en aluminium.

La feuille de travail 9-5 permet de calculer que l'installation de l'isolant procurera une économie annuelle d'énergie de 204×10^6 W/an.

$$\begin{aligned}\text{Économie annuelle (\$)} &= \frac{204 \times 10^6 \times 0,05\$}{1\,000} \\ &= 10\,200\$ \end{aligned}$$

Le coût estimé pour l'achat et l'installation de l'isolant est de 2 000\$.

$$\begin{aligned}\text{Période de rentabilité} &= \frac{2\,000\$}{10\,200\$} \\ &= 0,196 \text{ an (3 mois)} \end{aligned}$$

3. Récupération de la chaleur des équipements à vapeur

Tout appareil chauffé à la vapeur et isolé d'après les normes courantes d'isolation perd de la chaleur à l'atmosphère. Cette perte de chaleur peut souvent contribuer à réduire le chauffage nécessaire pour maintenir les températures intérieures du bâtiment. Lorsque les appareils chauffés à la vapeur sont groupés au même endroit, il se peut que l'excès de chaleur dégagée doive être évacué à l'extérieur pour maintenir une température ambiante acceptable. En pareil cas, il peut être avantageux d'étudier la possibilité de transférer ailleurs certains appareils chauffés à la vapeur afin de réduire le besoin de chauffage du bâtiment et diminuer, par le fait même, la quantité d'air évacuée de l'emplacement original.

4. Réexamen du chauffage du bâtiment

Souvent, un immeuble ou tout autre bâtiment est maintenu à 20°C pendant l'hiver, même si dans certaines zones une température inférieure suffirait. Cela peut être le cas d'un service de réception de marchandises occupé pour une brève période du jour. Le seul besoin pour cette zone serait de maintenir la température au-dessus du point de congélation, à l'exception d'un petit bureau occupé six heures par jour. L'étude d'une possibilité de chauffer le bureau à l'aide de radiateurs électriques et de réduire la température du reste de la zone à 5°C devrait être envisagée. Il en résulterait une économie d'énergie.

5. Stabilisation de la demande de vapeur et d'eau

Une analyse au passage détermina dans un système de refroidissement à l'eau en circuit ouvert, qu'un débit de 5 L/s d'eau était refroidi de 40°C à 20°C et transféré dans un réservoir de stockage, pour être ensuite prélevée à un débit de 2 L/s. À cause de la différence entre ces deux débits, le refroidissement se faisait par cycles de marche et d'arrêt. Il fut décidé d'analyser la possibilité d'éliminer le stockage intermédiaire, de convertir le circuit ouvert en système de recirculation, et de refroidir l'eau à un débit de 2 L/s. Le refroidissement s'effectuerait dans un échangeur de chaleur d'un rendement de 80%, dans lequel l'eau de refroidissement serait de 10°C à l'entrée, et de 15°C à la sortie.

Eau de refroidissement nécessaire pour refroidir 5 L/s d'eau:

$$\begin{aligned}\text{Chaleur cédée par l'eau à refroidir } Q &= fw \times (T_1 - T_2) \times 15 \\ &= 5 \times (40 - 20) \times 15 \\ &= 5 \times 20 \times 15 \\ &= 1\,500 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Chaleur absorbée par l'eau de refroidissement } Q &= \frac{1\,500}{0,8} \\ &= 1\,875 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eau de refroidissement nécessaire } fw &= \frac{Q}{(T_1 - T_2) \times 15} \\ &= \frac{1\,875}{(15 - 10) \times 15} \\ &= \frac{1\,875}{5 \times 15} \\ &= 25 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Eau de refroidissement nécessaire pour refroidir 2 L/s d'eau :

$$\begin{aligned} \text{Chaleur cédée par l'eau à refroidir } Q &= fw \times (t_1 - t_2) \times 15 \\ &= 2 \times (40 - 20) \times 25 \\ &= 2 \times 20 \times 15 \\ &= 600 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Chaleur absorbée par l'eau de refroidissement } Q &= \frac{600}{0,8} \\ &= 750 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eau de refroidissement nécessaire } fw &= \frac{Q}{(T_1 - T_2) \times 15} \\ &= \frac{750}{(15 - 10) \times 15} \\ &= \frac{750}{5 \times 15} \\ &= 10 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Puisque le débit d'eau de refroidissement passe de 25 L/s à 10 L/s, la réduction est de $25 - 10 = 15$ L/s.

La diminution du débit d'eau de refroidissement permet de réduire les coûts de pompage et également de diminuer la quantité d'énergie dépensée par l'appareil pour ramener l'eau de refroidissement à sa température d'entrée de 10°C.

6. Révision des horaires de marche en fonction de la demande de pointe

Dans plusieurs installations industrielles, les horaires de marche des procédés ont été déterminés sans se préoccuper, ou très peu, de la consommation d'énergie. Cependant, si la consommation d'énergie est considérée comme un des critères d'étude, les horaires de marche peuvent être planifiés afin de supprimer les pointes de consommation d'énergie. Cela réduit, par le fait même, les demandes de pointe imposées aux divers appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau.

7. Récupération de la chaleur contenue dans les eaux rejetées

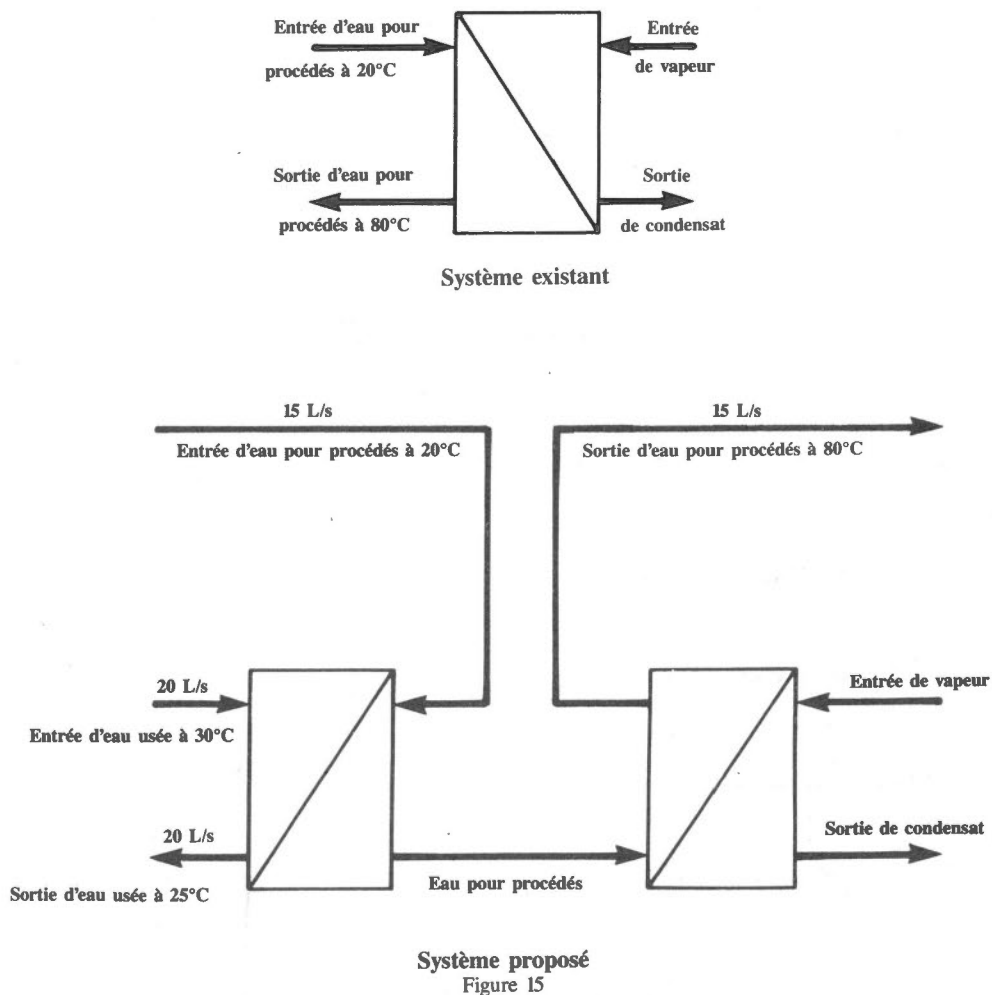
Les eaux rejetées par une installation contiennent parfois une énergie calorifique qui pourrait être récupérée et réutilisée pour réduire la charge des systèmes de production d'énergie. Prenons le cas d'une eau de refroidissement qui était rejetée à l'égout à cause du risque de contamination. Il s'agissait de 20 L/s d'eau à 30°C. Ailleurs dans l'installation, le débit de 15 L/s d'eau était chauffé de 20°C à 80°C dans un échangeur de chaleur à vapeur. L'échangeur de chaleur utilisait de la vapeur sèche et saturée à 700 kPa (abs.).

Il était donc possible de récupérer une partie de la chaleur contenue dans l'eau rejetée en lui faisant préchauffer l'eau devant être chauffée dans l'échangeur de chaleur. Il suffisait, simplement, d'installer un deuxième échangeur de chaleur.

On suppose que la température de l'eau rejetée diminuera de 5°C. Le rendement de la transmission de chaleur de l'échangeur existant et du nouvel échangeur est de 80%.

Les systèmes existant et proposé sont présentés de façon schématique dans la figure 15.

Les feuilles de travail 9-7 et 9-8 servent à faire les calculs nécessaires. La récupération de la chaleur disponible dans l'eau rejetée pourrait réduire de 4 320 000 kg/an la consommation de vapeur sèche et saturée à 700 kPa absolus, ce qui représente une économie de 95 040\$ par année. Si le nouveau système de récupération de la chaleur coûte 40 000\$, la période de rentabilité serait de 0,42 an (5 mois).



Perte de vapeur dans l'atmosphère

Feuille de travail 9-2

Entreprise: EXEMPLE NO.1, MAINTENANCE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉPARATION DE FUITES Par: MBE

Appareil: ÉCHANGEUR DE CHALEUR NO. 1

Diamètre estimé de la fuite: 6,35 mm

Pression de vapeur: 689 kPa(effectifs)

Perte de vapeur: 95,7 kg/h (Table 3)

Durée de service: Nombre d'heures par jour: 24

Nombre de jours par semaine: 5

Nombre de semaines par année: 50

Coût de la vapeur: 22 \$/1000 kg (A obtenir de l'opérateur du générateur de vapeur)

$$\begin{aligned} \text{Vapeur perdue} &= \underline{95,7} \text{ kg/h} \times \underline{24} \text{ h/jour} \times \underline{5} \text{ jours/sem.} \times \underline{50} \text{ sem./an} \\ &= \underline{574\ 200} \text{ kg/an} \end{aligned}$$

Économies potentielles en dollars:

$$\begin{aligned} &= \underline{574\ 200} \text{ kg/an} \times \underline{22} \text{ \$/1000 kg} \\ &= \underline{12\ 632} \text{ \$ par année} \end{aligned}$$

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: EXEMPLE No.2, MAINTENANCE Date: 20 février 1985

Endroit: AMÉLIORATION D'ISOLANT Par: M3E

Appareil: RÉSERVOIR #2 Heures de service par année: 2688 h

Superficie: 21,21 m² Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE

Température du produit: 80 °C Épaisseur d'isolant proposée: 51 mm

Sans isolant

Avec isolant

Perte de chaleur: = 750 Wh/m²(Table 5)

33,3 Wh/m²(Module 1)

Perte de chaleur totale per heure:
Superficie x perte de chaleur

Superficie x perte de chaleur

$$\frac{21,21}{\text{-----}} \times \frac{750}{\text{-----}}$$

$$\frac{15907,5}{\text{-----}} \text{ Wh/h}$$

$$\frac{21,21}{\text{-----}} \times \frac{33,3}{\text{-----}}$$

$$\frac{706,3}{\text{-----}} \text{ Wh/h}$$

Perte de chaleur annuelle:
Perte de chaleur/h x h/an

Perte de chaleur/h x h/an

$$\frac{15907,5}{\text{-----}} \times \frac{2688}{\text{-----}}$$

$$\frac{42,76 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an (1)}$$

$$\frac{706,3}{\text{-----}} \times \frac{2688}{\text{-----}}$$

$$\frac{1,9 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an (2)}$$

Diminution des pertes de chaleur
grâce à la pose d'un isolant

$$= \text{(1)} - \text{(2)}$$

$$= \frac{42,76 \times 10^6}{\text{-----}} - \frac{1,9 \times 10^6}{\text{-----}}$$

$$= \frac{40,86 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an}$$

ou

$$\frac{40,86 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an} \times 3,6 \text{ kJ/Wh}$$

$$= \frac{147 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ kJ/an}$$

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: RÉNOUATION - EXEMPLE NO. 2 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: INSTALLATION / AMÉLIORATION D'ISOLANT Par: MBE

Appareil: RÉSERVOIR #1 Heures de service par année: 6 000 h

Superficie: 60 m² Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE

Température du produit: 75 °C Épaisseur d'isolant proposée: 51 mm

Sans isolant

Avec isolant

Perte de chaleur: = 600 Wh/(m²·h)(Table 5) 33,3 Wh/(m²·h)(Module 1)

Perte de chaleur totale per heure:
Superficie x perte de chaleur

Superficie x perte de chaleur

$$\frac{60}{\text{-----}} \times \frac{600}{\text{-----}}$$

$$\frac{36\,000}{\text{-----}} \text{ Wh/h}$$

$$\frac{60}{\text{-----}} \times \frac{33,3}{\text{-----}}$$

$$\frac{1\,998}{\text{-----}} \text{ Wh/h}$$

Perte de chaleur annuelle:
Perte de chaleur/h x h/an

Perte de chaleur/h x h/an

$$\frac{36\,000}{\text{-----}} \times \frac{6\,000}{\text{-----}}$$

$$\frac{216 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an (1)}$$

$$\frac{1\,998}{\text{-----}} \times \frac{6\,000}{\text{-----}}$$

$$\frac{11,988 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an (2)}$$

Diminution des pertes de chaleur
grâce à la pose d'un isolant

$$= \text{(1)} - \text{(2)}$$

$$= \frac{216 \times 10^6}{\text{-----}} - \frac{11,988 \times 10^6}{\text{-----}}$$

$$= \frac{204 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an}$$

ou $\frac{204 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ Wh/an} \times 3,6 \text{ kJ/Wh}$

$$= \frac{734,4 \times 10^6}{\text{-----}} \text{ kJ/an}$$

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

**Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau
rejetée pour préchauffer un autre courant d'eau**

(méthode approximative)

Feuille de travail 9-7

Page 1 de 2

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO. 7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Courante d'eau rejetée: _____

- Débit d'eau (fw): _____ 20 L/s
- Température actuelle de l'eau (T₁): _____ 30 °C
- Température proposée de l'eau à sortie (T₂): _____ 25 °C
(On doit déterminer cette température avec le fabricant de l'échangeur de chaleur.)

- Quantité de chaleur disponible Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$
$$= \underline{20 \times (30 - 25) \times 15}$$

$$= \underline{1500} \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou } \frac{1500}{3600} \text{ MJ/h}$$

$$= \underline{0,416} \text{ MJ/s}$$

Rendement de l'échangeur de chaleur proposé: _____ 80 %
(à obtenir du fabricant de l'échangeur)

$$\text{Quantité de chaleur disponible} = \underline{0,416} \text{ MJ/s} \times \underline{80} \%$$

$$= \underline{0,333} \text{ MJ/s} \quad (1)$$

**Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau
rejetée pour préchauffer un autre écoulement d'eau**

(méthode approximative)

Worksheet 9-7

Page 2 de 2

Entreprise: RÉNOVATION-EXEMPLE NO.7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Courant d'eau à réchauffer:

Débit d'eau (fw): 15 L/s

Témpérature de l'eau à entrée (T₁): 20 °C

Température finale désirée (T₂) 80 °C

Quantité de chaleur nécessaire Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$
$$= \underline{15 \times (20 - 80) \times 15}$$

$$= \underline{-13\,500} \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou } \frac{13\,500}{3\,600} \text{ MJ/h (Négliger le sign négatif)}$$

$$= \underline{3,75} \text{ MJ/s} \quad (2)$$

Diminution de l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer le courant d'eau à la température finale désirée:

$$= (2) \text{ MJ/s} - (1) \text{ MJ/s}$$

$$= \underline{3,75} - \underline{0,333}$$

$$= \underline{3,417} \text{ MJ/s} \quad (3)$$

**Besoins de vapeur pur chauffer de l'eau
dans un échangeur de chaleur vapeur-eau**

(méthode approximative)

Feuille de travail 9-8

Page 1 de 2

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO. 7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Vapeur

Pression 598,7 kPa(eff.)
 Température 164,96 °C
 Enthalpie 2 762 kJ/kg (1)

Condensat

Pression 598,7 kPa(eff.)
 Température 164,96 °C
 Enthalpie 697,1 kJ/kg (2)

Chaleur disponible dans la vapeur

$$\begin{aligned} & (1) - (2) \\ = & \underline{2\,762} - \underline{697,1} \\ = & \underline{2\,064,9} \text{ kJ/kg} \quad (3) \end{aligned}$$

Rendement de l'échangeur de chaleur:

$$\underline{80} \% \quad (4)$$

Chaleur disponible pour chauffer l'eau

$$\begin{aligned} = & (3) \times (4) \text{ kJ/kg} \\ = & \underline{2\,064,9} \times \underline{0,80} \\ = & \underline{1\,651,9} \text{ kJ/kg} \\ \text{ou} & \underline{1\,651,9} \text{ kJ/kg} \\ & \underline{1000} \text{ kJ/MJ} \\ = & \underline{1,6519} \text{ MJ/kg} \quad (5) \end{aligned}$$

Vapeur nécessaire au chauffage
(sans récupération de chaleur)

$$\begin{aligned} = & \frac{\text{Feuille de travail 9-7 (2)}}{\text{Feuille de travail 9-8 (5)}} \\ = & \frac{\underline{3,75}}{\underline{1,6519}} \text{ MJ/s} \\ & \underline{2,27} \text{ MJ/kg} \quad (6) \\ & \underline{2,27} \text{ kg/s} \quad (6) \end{aligned}$$

**Besoins de vapeur pour chauffer de l'eau
dans un échangeur de chaleur vapeur-eau**

(Approximate Method)

Feuille de travail 9-8

Page 2 de 2

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO. 7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Vapeur nécessaire au chauffage
(avec récupération de la chaleur) = Feuille de travail 9-7 (3)
= feuille de travail 9-8 (5)

= $\frac{3,417}{1,6519}$ MJ/s
= $\frac{2,07}{}$ MJ/kg
= $\frac{2,07}{}$ kg/s (7)

Économies de vapeur dues
à la récupération de la chaleur = (6) - (7)

= $\frac{2,27}{}$ - $\frac{2,07}{}$

= $\frac{0,20}{}$ kg/s (8)

Heures de service
par année = $\frac{6\ 000}{}$ h (9)

Économies annuelles de vapeur
par récupération de la chaleur = (8) x (9) x 3 600

= $\frac{0,20 \times 6\ 000 \times 3\ 600}{}$

= $\frac{4\ 320\ 000}{}$ kg/an (10)

Coût de la vapeur = $\frac{22}{}$ \$ / 1 000 kg (11)

Économies annuelles en dollars = (10) x (11)

= $\frac{4\ 320\ 000 \times 22}{1000}$

= $\frac{95\ 040}{}$ \$ par année (12)

Coût installé de l'équipement
de récupération de la chaleur = $\frac{40\ 000}{}$ \$ (13)

Période de rentabilité = $\frac{(13)}{(12)}$

= $\frac{40\ 000}{95\ 040}$

= $\frac{40\ 000}{95\ 040}$ 0,42 ans

ANNEXES

- A** Glossaire
- B** Tables
- C** Conversions courantes
- D** Feuilles de travail



Glossaire

Analyse au passage — Inspection visuelle d'une installation pour étudier la consommation de l'énergie.

Analyse de diagnostic — Analyse d'une possibilité d'économiser l'énergie, pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement actuel du processus, l'étude des relevés, le calcul des économies possibles, et l'estimation des dépenses d'investissement et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité.

Appareil sous pression — Appareil conçu pour fonctionner à des pressions supérieures ou inférieures à la pression atmosphérique.

Chaleur latente — Quantité de chaleur exprimée en kJ/kg que doit absorber 1 kilogramme d'eau pour être transformé en 1 kilogramme de vapeur à la même pression. La même quantité de chaleur doit être extraite pour que la vapeur se condense et forme de nouveau 1 kilogramme d'eau.

Chaleur sensible — Quantité de chaleur exprimée en kJ/kg que doit absorber 1 kilogramme d'eau pour que sa température passe de 0°C au point d'ébullition à n'importe quelle pression spécifique.

Chaleur totale de la vapeur — Somme de la chaleur latente et de la chaleur sensible, exprimée en kJ/kg.

Conductance thermique (C) — Quantité de chaleur transmise dans une unité de temps par unité de surface d'un corps ou d'un ensemble de dimensions définies, en présence d'un écart d'un degré entre les températures moyennes des surfaces, exprimée en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Énergie — Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système physique à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowattheures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie calorifique — Forme d'énergie transférée d'un point de température supérieure à un point de température inférieure. Exprimée en MJ/kg.

Énergie gaspillée — Énergie qui est dissipée sans avoir été pleinement utilisée. Cela peut comprendre l'énergie sous forme de vapeur, de gaz d'échappement, d'eau de vidange et même de déchet.

Énergie variable — Consommation d'énergie liée à la production.

Enthalpie — Quantité de chaleur contenue dans un corps par unité de masse, exprimée en kJ/kg.

Intensité énergétique — Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit ou d'un groupe de produits, exprimée en énergie consommée par unité de production.

Isolant — Matériau de faible conductivité thermique servant à réduire l'échange de chaleur.

Masse volumique — Nombre indiquant le rapport entre le poids d'un volume donné d'un corps et le poids du même volume d'eau. Si la masse volumique est supérieure à 1, le corps est plus lourd que l'eau; si sa masse volumique est inférieure à 1, le corps est plus léger que l'eau.

Possibilités d'amélioration de coût modique — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.

Possibilités de maintenance — Initiatives de gestion de l'énergie exécutées de façon périodique, au moins une fois par année.

Possibilités de rénovation — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût est important.

Pression absolue — Toute pression dont la base de mesure est le vide absolu, exprimée en kPa absolus.

Pression effective — Toute pression dont la base de mesure est la pression atmosphérique, exprimée en kPa (eff.).
À noter que $\text{kPa (eff.)} + \text{pression atmosphérique} = \text{kPa (abs.)}$.

Résistance thermique (R) — Coefficient indiquant les propriétés isolantes relatives, ou encore la résistance à la chaleur d'un matériau ou d'un ensemble de matériaux. S'exprime en $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$.

Système SI — Système de mesure légal au Canada. L'appellation Système International d'unités est abrégé par le sigle SI dans toutes les langues.

Température d'approche d'un échangeur de chaleur — Écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid qu'on emploie dans le calcul d'un échangeur de chaleur comme une limite pratique pour l'échange de chaleur devant se produire. Normalement de 3°C à 5°C .

Transmittance thermique (U) — Quantité de chaleur transmise dans une unité de temps par unité de surface d'un corps ou d'un ensemble, y compris ses couches limites, divisée par l'écart de température entre les deux côtés du corps ou de l'ensemble, exprimée en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Type d'énergie — Combustible ou forme d'énergie utilisé par une installation donnée (exemple: pétrole, électricité et gaz naturel).

Vapeur instantanée — Vapeur formée par la détente du condensat à une pression inférieure à celle sous laquelle il s'était formé. Lorsque la pression du condensat baisse, une certaine quantité de chaleur sensible s'en dégage et est absorbée sous la forme de chaleur latente, ce qui fait qu'une partie du condensat «se vaporise instantanément».

Vapeur saturée — Vapeur pure à la température correspondant au point d'ébullition de l'eau à une pression spécifique.

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

TABLE 1

Température °C	K	Press. kPa	Volume, m ³ /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_f</i>	<i>v_{fg}</i>	<i>v_g</i>	<i>h_f</i>	<i>h_{fg}</i>	<i>h_g</i>	<i>s_f</i>	<i>s_{fg}</i>	<i>s_g</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	9.0269
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	33.60	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	83.84	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	6.7478	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	2.0509	2.0519	393.77	2272.9	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291
96.0	369.15	87.69	0.0010406	1.9143	1.9153	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

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

TABLE 1

Température °C	K	Press. kPa	Volume, m ³ /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_f</i>	<i>v_{fg}</i>	<i>v_g</i>	<i>h_f</i>	<i>h_{fg}</i>	<i>h_g</i>	<i>s_f</i>	<i>s_{fg}</i>	<i>s_g</i>
100.0	373.15	101.33	0.0010437	1.6720	1.6730	419.06	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554
105.0	378.15	120.80	0.0010477	1.4182	1.4193	440.17	2243.6	2683.7	1.3630	5.9331	7.2962
110.0	383.15	143.27	0.0010519	1.2089	1.2099	461.32	2230.0	2691.3	1.4185	5.8203	7.2388
115.0	388.15	169.06	0.0010562	1.0352	1.0363	482.90	2216.2	2698.7	1.4733	5.7099	7.1832
120.0	393.15	198.54	0.0010606	0.8905	0.8915	503.72	2202.2	2706.0	1.5276	5.6017	7.1293
125.0	398.15	232.1	0.0010652	0.7692	0.7702	524.99	2188.0	2713.0	1.5813	5.4957	7.0769
130.0	403.15	270.1	0.0010700	0.6671	0.6681	546.31	2173.6	2719.9	1.6344	5.3917	7.0261
135.0	408.15	313.1	0.0010750	0.5807	0.5818	567.68	2158.9	2726.6	1.6869	5.2897	6.9766
140.0	413.15	361.4	0.0010801	0.5074	0.5085	589.10	2144.0	2733.1	1.7390	5.1894	6.9284
145.0	418.15	415.5	0.0010853	0.4449	0.4460	610.59	2128.7	2739.3	1.7906	5.0910	6.8815
150.0	423.15	476.0	0.0010908	0.3914	0.3924	632.15	2113.2	2745.4	1.8416	4.9941	6.8358
155.0	428.15	543.3	0.0010964	0.3453	0.3464	653.77	2097.4	2751.2	1.8923	4.8989	6.7911
160.0	433.15	618.1	0.0011022	0.3057	0.3068	675.47	2081.3	2756.7	1.9425	4.8050	6.7475
165.0	438.15	700.8	0.0011082	0.2713	0.2724	697.25	2064.8	2762.0	1.9923	4.7126	6.7048
170.0	443.15	792.0	0.0011145	0.2414	0.2426	719.12	2047.9	2767.1	2.0416	4.6214	6.6630
175.0	448.15	892.4	0.0011209	0.21542	0.21654	741.07	2030.7	2771.8	2.0906	4.5314	6.6221
180.0	453.15	1002.7	0.0011275	0.19267	0.19380	763.12	2013.2	2776.3	2.1393	4.4426	6.5819
185.0	458.15	1123.3	0.0011344	0.17272	0.17386	785.26	1995.2	2780.4	2.1876	4.3548	6.5424
190.0	463.15	1255.1	0.0011415	0.15517	0.15632	807.52	1976.7	2784.3	2.2356	4.2680	6.5036
195.0	468.15	1398.7	0.0011489	0.13969	0.14084	829.88	1957.9	2787.8	2.2833	4.1821	6.4654
200.0	473.15	1554.9	0.0011565	0.12600	0.12716	852.37	1938.6	2790.9	2.3307	4.0971	6.4278
205.0	478.15	1724.3	0.0011644	0.11386	0.11503	874.99	1918.8	2793.8	2.3778	4.0128	6.3906
210.0	483.15	1907.7	0.0011726	0.10307	0.10424	897.73	1898.5	2796.2	2.4247	3.9293	6.3539
215.0	488.15	2106.0	0.0011811	0.09344	0.09463	920.63	1877.6	2798.3	2.4713	3.8463	6.3176
220.0	493.15	2319.8	0.0011900	0.08485	0.08604	943.67	1856.2	2799.9	2.5178	3.7639	6.2817
225.0	498.15	2550.	0.0011992	0.07715	0.07835	966.88	1834.3	2801.2	2.5641	3.6820	6.2461
230.0	503.15	2798.	0.0012087	0.07024	0.07145	990.27	1811.7	2802.0	2.6102	3.6006	6.2107
235.0	508.15	3063.	0.0012187	0.06403	0.06525	1013.83	1788.5	2802.3	2.6561	3.5194	6.1756
240.0	513.15	3348.	0.0012291	0.05843	0.05965	1037.60	1764.6	2802.2	2.7020	3.4386	6.1406
245.0	518.15	3652.	0.0012399	0.05337	0.05461	1061.58	1740.0	2801.6	2.7478	3.3579	6.1057
250.0	523.15	3978.	0.0012513	0.04879	0.05004	1085.78	1714.7	2800.4	2.7935	3.2773	6.0708
255.0	528.15	4325.	0.0012632	0.04463	0.04590	1110.23	1688.5	2798.7	2.8392	3.1968	6.0359
260.0	533.15	4694.	0.0012756	0.04086	0.04213	1134.94	1661.5	2796.4	2.8848	3.1161	6.0010
265.0	538.15	5088.	0.0012887	0.03742	0.03871	1159.93	1633.5	2793.5	2.9306	3.0353	5.9658
270.0	543.15	5506.	0.0013025	0.03429	0.03559	1185.23	1604.6	2789.9	2.9763	2.9541	5.9304
275.0	548.15	5950.	0.0013170	0.03142	0.03274	1210.86	1574.7	2785.5	3.0222	2.8725	5.8947
280.0	553.15	6420.	0.0013324	0.02879	0.03013	1236.84	1543.6	2780.4	3.0683	2.7903	5.8586
285.0	558.15	6919.	0.0013487	0.02638	0.02773	1263.21	1511.3	2774.5	3.1146	2.7074	5.8220
290.0	563.15	7446.	0.0013659	0.02417	0.02554	1290.01	1477.6	2767.6	3.1611	2.6237	5.7848
295.0	568.15	8004.	0.0013844	0.02213	0.02351	1317.27	1442.6	2759.8	3.2079	2.5389	5.7469
300.0	573.15	8593.	0.0014041	0.020245	0.021649	1345.05	1406.0	2751.0	3.2552	2.4529	5.7081
305.0	578.15	9214.	0.0014252	0.018502	0.019927	1373.40	1367.7	2741.1	3.3029	2.3656	5.6685
310.0	583.15	9870.	0.0014480	0.016886	0.018334	1402.39	1327.6	2730.0	3.3512	2.2766	5.6278
315.0	588.15	10561.	0.0014726	0.015383	0.016856	1432.09	1285.5	2717.6	3.4002	2.1856	5.5858
320.0	593.15	11289.	0.0014995	0.013980	0.015480	1462.60	1241.1	2703.7	3.4500	2.0923	5.5423
325.0	598.15	12056.	0.0015289	0.012666	0.014195	1494.93	1194.0	2688.0	3.5008	1.9961	5.4969
330.0	603.15	12863.	0.0015615	0.011428	0.012989	1528.52	1143.6	2670.2	3.5528	1.8962	5.4490
335.0	608.15	13712.	0.0015978	0.010256	0.011854	1568.25	1089.5	2649.7	3.6063	1.7916	5.3979
340.0	613.15	14605.	0.0016387	0.009142	0.010780	1595.47	1030.7	2626.2	3.6616	1.6811	5.3427
345.0	618.15	15545.	0.0016858	0.008077	0.009763	1632.52	966.4	2598.9	3.7193	1.5636	5.2828
350.0	623.15	16535.	0.0017411	0.007058	0.008799	1671.94	895.7	2567.7	3.7800	1.4376	5.2177
355.0	628.15	17577.	0.0018085	0.006051	0.007859	1716.63	813.8	2530.4	3.8489	1.2953	5.1442
360.0	633.15	18675.	0.0018899	0.005044	0.006940	1764.17	721.3	2485.4	3.9210	1.1390	5.0600
365.0	638.15	19833.	0.0020160	0.003996	0.006012	1817.96	610.0	2428.0	4.0021	0.9558	4.9579
370.0	643.15	21054.	0.0022136	0.002759	0.004973	1890.21	452.6	2342.8	4.1108	0.7036	4.8144
371.0	644.15	21366.	0.0022778	0.002446	0.004723	1910.50	407.4	2317.9	4.1414	0.6324	4.7738
372.0	645.15	21562.	0.0023636	0.002075	0.004439	1935.57	351.4	2287.0	4.1794	0.5446	4.7240
373.0	646.15	21820.	0.0024963	0.001588	0.004084	1970.50	273.5	2244.0	4.2326	0.4233	4.6559
374.0	647.15	22081.	0.0028427	0.000623	0.003466	2046.72	109.5	2156.2	4.3493	0.1692	4.5185
374.15	647.30	22120.	0.00317	0.0	0.00317	2107.37	0.0	2107.4	4.4429	0.0	4.4429

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (PRESSION)

TABLE 1

Press.Temp.		Volume,m ³ /kg			Enthalpie,kJ/kg			Entropie,kJ/kg K			Énergie,kJ/kg	
kPa	°C	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Vapeur
<i>p</i>	<i>t</i>	<i>v_f</i>	<i>v_g</i>	<i>v_g</i>	<i>h_f</i>	<i>h_{fg}</i>	<i>h_g</i>	<i>s_f</i>	<i>s_{fg}</i>	<i>s_g</i>	<i>U_f</i>	<i>U_g</i>
240.	126.09	0.0010663	0.7454	0.7465	529.6	2184.9	2714.5	1.5929	5.4728	7.0657	529.38	2535.4
260.	128.73	0.0010688	0.6914	0.6925	540.9	2177.3	2718.2	1.6209	5.4180	7.0389	540.68	2538.1
280.	131.20	0.0010712	0.6450	0.6460	551.4	2170.1	2721.5	1.6471	5.3670	7.0140	551.14	2540.6
300.	133.54	0.0010735	0.6045	0.6056	561.4	2163.2	2724.7	1.6716	5.3193	6.9909	561.11	2543.8
350.	138.87	0.0010789	0.5229	0.5240	584.3	2147.4	2731.6	1.7273	5.2119	6.9392	583.89	2548.2
400.	143.62	0.0010839	0.4611	0.4622	604.7	2133.0	2737.6	1.7764	5.1179	6.8943	604.24	2552.7
450.	147.92	0.0010885	0.4127	0.4138	623.2	2119.7	2742.9	1.8204	5.0343	6.8547	622.67	2556.7
500.	151.84	0.0010928	0.3736	0.3747	640.1	2107.4	2747.5	1.8604	4.9588	6.8192	639.57	2560.2
550.	155.47	0.0010969	0.3414	0.3425	655.8	2095.9	2751.7	1.8970	4.8900	6.7870	655.20	2563.3
600.	158.84	0.0011009	0.3144	0.3155	670.4	2085.0	2755.5	1.9308	4.8267	6.7575	669.76	2566.2
650.	161.99	0.0011046	0.29138	0.29249	684.1	2074.7	2758.9	1.9623	4.7681	6.7304	683.42	2568.7
700.	164.96	0.0011082	0.27137	0.27268	697.1	2064.9	2762.0	1.9918	4.7134	6.7052	696.29	2571.1
750.	167.78	0.0011116	0.25431	0.25543	709.3	2055.5	2764.8	2.0195	4.6621	6.6817	708.47	2573.3
800.	170.41	0.0011150	0.23914	0.24026	720.9	2046.5	2767.5	2.0457	4.6139	6.6596	720.04	2575.3
900.	175.36	0.0011213	0.21369	0.21481	742.6	2029.5	2772.1	2.0941	4.5250	6.6192	741.63	2578.8
1000.	179.88	0.0011274	0.19317	0.19429	762.6	2013.6	2776.2	2.1382	4.4446	6.5828	761.48	2581.9
1100.	184.07	0.0011331	0.17625	0.17738	781.1	1998.5	2779.7	2.1786	4.3711	6.5497	779.88	2584.5
1200.	187.96	0.0011386	0.16206	0.16320	798.4	1984.3	2782.7	2.2161	4.3033	6.5194	797.06	2586.9
1300.	191.61	0.0011438	0.14998	0.15113	814.7	1970.7	2785.4	2.2510	4.2403	6.4913	813.21	2589.0
1400.	195.04	0.0011489	0.13987	0.14072	830.1	1957.7	2787.8	2.2837	4.1814	6.4651	828.47	2590.8
1500.	198.29	0.0011539	0.13050	0.13166	844.7	1945.2	2789.9	2.3145	4.1261	6.4406	842.93	2592.4
1600.	201.37	0.0011586	0.12253	0.12369	858.6	1933.2	2791.7	2.3436	4.0739	6.4175	856.71	2593.8
1800.	207.11	0.0011678	0.10913	0.11032	884.6	1918.3	2794.8	2.3976	3.9775	6.3751	882.47	2596.3
2000.	212.37	0.0011766	0.09836	0.09954	908.6	1900.6	2797.2	2.4469	3.8898	6.3367	906.24	2598.2
2200.	217.24	0.0011850	0.08947	0.09065	931.0	1888.1	2799.1	2.4922	3.8093	6.3015	928.35	2599.6
2400.	221.78	0.0011932	0.08201	0.08320	951.9	1848.5	2800.4	2.5343	3.7347	6.2690	949.07	2600.7
2600.	226.04	0.0012011	0.07565	0.07686	971.7	1829.6	2801.4	2.5736	3.6651	6.2387	968.60	2601.5
2800.	230.05	0.0012088	0.07018	0.07139	990.5	1811.5	2802.0	2.6106	3.5998	6.2104	987.10	2602.1
3000.	233.84	0.0012163	0.06541	0.06663	1008.4	1793.9	2802.3	2.6455	3.5382	6.1837	1004.70	2602.4
3500.	242.54	0.0012345	0.05579	0.05703	1049.8	1752.2	2802.0	2.7253	3.3976	6.1228	1045.44	2602.4
4000.	250.33	0.0012521	0.04850	0.04975	1087.4	1712.9	2800.3	2.7965	3.2720	6.0685	1082.4	2601.3
4500.	257.41	0.0012691	0.04277	0.04404	1122.1	1675.6	2797.7	2.8612	3.1579	6.0191	1116.4	2599.5
5000.	263.91	0.0012858	0.03814	0.03943	1154.5	1639.7	2794.2	2.9206	3.0529	5.9735	1148.0	2597.0
5500.	269.93	0.0013023	0.03433	0.03563	1184.9	1605.0	2789.9	2.9757	2.9552	5.9309	1177.7	2594.0
6000.	275.55	0.0013187	0.03112	0.03244	1213.7	1571.3	2785.0	3.0273	2.8635	5.8908	1205.8	2590.4
6500.	280.82	0.0013350	0.028364	0.029719	1241.1	1538.4	2779.5	3.0759	2.7768	5.8527	1232.5	2586.3
7000.	285.79	0.0013513	0.026022	0.027373	1267.4	1506.0	2773.5	3.1219	2.6943	5.8162	1258.0	2581.8
7500.	290.50	0.0013677	0.023959	0.025327	1292.7	1474.2	2766.9	3.1657	2.6193	5.7811	1282.4	2577.0
8000.	294.97	0.0013842	0.022141	0.023525	1317.1	1442.8	2759.9	3.2076	2.5595	5.7471	1306.0	2571.7
9000.	303.31	0.0014179	0.019078	0.020495	1363.7	1380.9	2744.6	3.2867	2.3953	5.6820	1351.0	2560.1
10000.	310.96	0.0014526	0.016589	0.018041	1408.0	1319.7	2727.7	3.3605	2.2593	5.6198	1393.5	2547.3
11000.	318.05	0.0014887	0.014917	0.016006	1450.6	1258.7	2709.3	3.4304	2.1291	5.5595	1434.2	2533.2
12000.	324.65	0.0015268	0.012756	0.014203	1491.8	1197.4	2689.2	3.4972	2.0030	5.5002	1473.4	2517.8
13000.	330.83	0.0015672	0.011230	0.012797	1532.0	1135.0	2667.0	3.5616	1.8792	5.4408	1511.6	2500.6
14000.	336.64	0.0016106	0.009884	0.011495	1571.6	1070.7	2642.4	3.6242	1.7560	5.3803	1549.1	2481.4
15000.	342.13	0.0016579	0.008682	0.010340	1611.0	1004.0	2615.0	3.6859	1.6320	5.3178	1586.1	2459.9
16000.	347.33	0.0017103	0.007597	0.009308	1650.5	934.3	2584.9	3.7471	1.5060	5.2531	1623.2	2436.0
17000.	352.26	0.0017696	0.006601	0.008371	1691.7	859.9	2551.6	3.8107	1.3748	5.1855	1661.6	2409.3
18000.	356.96	0.0018399	0.005658	0.007498	1734.8	779.1	2513.9	3.8765	1.2362	5.1128	1701.7	2378.9
19000.	361.43	0.0019260	0.004751	0.006678	1778.7	692.0	2470.6	3.9429	1.0903	5.0332	1742.1	2343.8
20000.	365.70	0.0020370	0.003840	0.005877	1826.5	591.9	2418.4	4.0149	0.9263	4.9412	1785.7	2300.8
21000.	369.78	0.0022015	0.002922	0.005023	1886.3	481.3	2347.6	4.1048	0.7175	4.8223	1840.0	2242.1
22000.	373.69	0.0026714	0.001056	0.003728	2011.1	184.5	2195.6	4.2947	0.2892	4.9799	1952.4	2113.6
22120.	374.15	0.00317	0.0	0.00317	2107.4	0.0	2107.4	4.4429	0.0	4.4429	2037.3	2037.3

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

Press.
p, kPa
(t.)

TABLE 2
Température, *t*, °C

	0.	20.	40.	60.	80.	100.	120.	140.	160.
<i>v</i> 0.0010002		135.23	144.47	153.71	162.95	172.19	181.42	190.66	199.89
1.0 <i>h</i>	-0.0	2538.6	2575.9	2613.3	2650.9	2688.6	2726.5	2764.6	2802.9
(6.983) <i>s</i>	-0.0002	9.0611	9.1842	9.3081	9.4088	9.5136	9.6125	9.7070	9.7975
<i>v</i> 0.0010002		90.131	96.298	102.46	108.62	114.78	120.94	127.10	133.25
1.5 <i>h</i>	-0.0	2538.4	2575.8	2613.2	2650.8	2688.6	2726.5	2764.6	2802.9
(13.04) <i>s</i>	-0.0002	8.8736	8.9968	9.1127	9.2223	9.3263	9.4253	9.5198	9.6103
<i>v</i> 0.0010002		67.582	72.211	76.837	81.459	86.080	90.700	95.319	99.936
2.0 <i>h</i>	-0.0	2538.3	2575.6	2613.1	2650.7	2688.5	2726.4	2764.5	2802.8
(17.51) <i>s</i>	-0.0002	8.7404	8.8637	8.9797	9.0894	9.1934	9.2924	9.3870	9.4775
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017		48.124	51.211	54.296	57.378	60.460	63.540	66.619
3.0 <i>h</i>	-0.0		83.9	2575.4	2612.9	2650.6	2688.4	2726.3	2764.5
(24.10) <i>s</i>	-0.0002		0.2963	8.6760	8.7922	8.9019	9.0060	9.1051	9.1997
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017		36.081	38.398	40.714	43.027	45.339	47.650	49.961
4.0 <i>h</i>	-0.0		83.9	2575.2	2612.7	2650.4	2688.3	2726.2	2764.4
(28.98) <i>s</i>	-0.0002		0.2963	8.5426	8.6589	8.7688	8.8730	8.9721	9.0668
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017		28.854	30.711	32.565	34.417	36.267	38.117	39.966
5.0 <i>h</i>	-0.0		83.9	2574.9	2612.6	2650.3	2688.1	2726.1	2764.3
(32.90) <i>s</i>	-0.0002		0.2963	8.4390	8.5555	8.6655	8.7698	8.8690	8.9636
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017		24.037	25.586	27.132	28.676	30.219	31.761	33.302
6.0 <i>h</i>	-0.0		83.9	2574.7	2612.4	2650.1	2688.0	2726.0	2764.2
(36.18) <i>s</i>	-0.0002		0.2963	8.3543	8.4709	8.5810	8.6854	8.7846	8.8793
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078		19.179	20.341	21.501	22.659	23.816	24.973
8.0 <i>h</i>	-0.0			167.5	2612.0	2649.8	2687.8	2725.8	2764.1
(41.53) <i>s</i>	-0.0002			0.5721	8.3372	8.4476	8.5521	8.6515	8.7463
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078		15.336	16.266	17.195	18.123	19.050	19.975
10.0 <i>h</i>	-0.0			167.5	2611.6	2649.5	2687.5	2725.6	2763.9
(45.83) <i>s</i>	-0.0002			0.5721	8.2334	8.3439	8.4486	8.5481	8.6430
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078		10.210	10.834	11.455	12.075	12.694	13.312
15.0 <i>h</i>	-0.0			167.5	2610.6	2648.8	2686.9	2725.1	2763.5
(54.00) <i>s</i>	-0.0002			0.5721	8.0440	8.1591	8.2601	8.3599	8.4551
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171		8.1172	8.5847	9.0508	9.516	9.980
20.0 <i>h</i>	-0.0				251.1	2648.0	2686.3	2724.6	2763.1
(60.09) <i>s</i>	-0.0002				0.5721	8.0206	8.1261	8.2262	8.3215
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171		5.4007	5.7144	6.0267	6.3379	6.6483
30.0 <i>h</i>	-0.0				251.1	2646.5	2685.1	2723.6	2762.3
(69.12) <i>s</i>	-0.0002				0.8310	7.9300	7.9363	8.0370	8.1329
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171		4.0424	4.2792	4.5146	4.7489	4.9825
40.0 <i>h</i>	-0.0				251.1	2644.9	2722.6	2761.4	2800.3
(75.89) <i>s</i>	-0.0002				0.8310	7.6937	7.8009	7.9023	7.9985
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171	0.0010292		3.4181	3.6074	3.7955	3.9829
50.0 <i>h</i>	0.0					2682.6	2721.6	2760.6	2799.6
(81.35) <i>s</i>	-0.0002					1.0753	7.6953	7.7872	7.8840
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171	0.0010292		2.8440	3.0025	3.1599	3.3165
60.0 <i>h</i>	0.0					2681.3	2720.6	2759.8	2798.9
(85.95) <i>s</i>	-0.0001					1.0752	7.6085	7.7111	7.8083
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171	0.0010292		2.1262	2.2464	2.3654	2.4836
80.0 <i>h</i>	0.0					2678.8	2718.6	2758.1	2797.5
(93.51) <i>s</i>	-0.0001					1.0752	7.4703	7.5742	7.6723
<i>v</i> 0.0010002	0.0010017	0.0010078	0.0010171	0.0010292		1.6955	1.7927	1.8886	1.9838
100.0 <i>h</i>	0.1					2676.2	2716.5	2756.4	2796.2
(99.63) <i>s</i>	-0.0001					1.0752	7.3618	7.4670	7.5662
<i>v</i> 0.0010001	0.0010017	0.0010077	0.0010171	0.0010291	0.0010437		1.1876	1.2529	1.3173
150.0 <i>h</i>	0.1						419.1	2752.2	2792.7
(111.4) <i>s</i>	-0.0001						1.3068	7.2693	7.4667
<i>v</i> 0.0010001	0.0010016	0.0010077	0.0010171	0.0010291	0.0010437		0.9349	0.9840	0.9840
200.0 <i>h</i>	0.2						503.7	2747.8	2789.1
(120.2) <i>s</i>	-0.0001						1.3068	7.2298	7.3275
<i>v</i> 0.0010001	0.0010016	0.0010077	0.0010170	0.0010291	0.0010436		0.6167	0.6506	0.6506
300.0 <i>h</i>	0.3						419.2	2738.8	2781.8
(133.5) <i>s</i>	-0.0001						1.3067	7.0254	7.1271
<i>v</i> 0.0010000	0.0010015	0.0010076	0.0010170	0.0010290	0.0010436		0.01800	0.4837	0.4837
400.0 <i>h</i>	0.4						419.3	2739.1	2774.2
(143.6) <i>s</i>	-0.0001						1.3066	1.7389	6.9805

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2 Température, t , °C

									Press. p , kPa
180.	200.	220.	240.	260.	280.	300.	320.	340.	
209.12	218.35	227.58	236.82	246.05	255.28	264.51	273.74	282.97 v	
2841.4	2880.1	2919.0	2958.1	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2 h	1.0
9.8843	9.9679	10.0484	10.1262	10.2014	10.2743	10.3450	10.4137	10.4805 s	
139.41	145.56	151.72	157.87	164.03	170.18	176.34	182.49	188.64 v	
2841.4	2880.0	2918.9	2958.1	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2 h	1.5
9.6972	9.7807	9.8612	9.9390	10.0142	10.0871	10.1578	10.2266	10.2934 s	
104.55	109.17	113.79	118.40	123.02	127.64	132.25	136.87	141.48 v	
2841.3	2880.0	2918.9	2958.0	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2 h	2.0
9.5643	9.6479	9.7284	9.8062	9.8814	9.9543	10.0251	10.0938	10.1606 s	
69.698	72.777	75.855	78.933	82.010	85.088	88.165	91.242	94.320 v	
2841.3	2880.0	2918.9	2958.0	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2 h	3.0
9.3771	9.4607	9.5412	9.6190	9.6943	9.7672	9.8379	9.9066	9.9735 s	
52.270	54.580	56.889	59.197	61.506	63.814	66.122	68.430	70.738 v	
2841.2	2879.9	2918.8	2958.0	2997.3	3036.9	3076.8	3116.8	3157.2 h	4.0
9.2443	9.3279	9.4084	9.4862	9.5615	9.6344	9.7051	9.7738	9.8407 s	
41.814	43.661	45.509	47.356	49.203	51.050	52.897	54.743	56.590 v	
2841.2	2879.9	2918.8	2957.9	2997.3	3036.9	3076.7	3116.8	3157.1 h	5.0
9.1412	9.2248	9.3054	9.3832	9.4584	9.5313	9.6021	9.6708	9.7377 s	
34.843	36.383	37.922	39.462	41.001	42.540	44.079	45.618	47.157 v	
2841.1	2879.8	2918.8	2957.9	2997.3	3036.9	3076.7	3116.8	3157.1 h	6.0
9.0569	9.1406	9.2212	9.2990	9.3742	9.4472	9.5179	9.5866	9.6535 s	
26.129	27.284	28.439	29.594	30.749	31.903	33.058	34.212	35.367 v	
2841.0	2879.7	2918.7	2957.8	2997.2	3036.8	3076.7	3116.8	3157.1 h	8.0
8.9240	9.0077	9.0883	9.1661	9.2414	9.3143	9.3851	9.4538	9.5207 s	
20.900	21.825	22.750	23.674	24.598	25.521	26.445	27.369	28.292 v	
2840.9	2879.6	2918.6	2957.8	2997.2	3036.8	3076.6	3116.7	3157.0 h	10.0
8.8208	8.9045	8.9852	9.0630	9.1383	9.2113	9.2820	9.3508	9.4177 s	
13.929	14.546	15.163	15.780	16.396	17.012	17.628	18.244	18.860 v	
2840.6	2879.4	2918.4	2957.6	2997.0	3036.6	3076.5	3116.6	3157.0 h	15.0
8.6332	8.7170	8.7977	8.8757	8.9510	9.0240	9.0948	9.1635	9.2304 s	
10.444	10.907	11.370	11.832	12.295	12.757	13.219	13.681	14.143 v	
2840.3	2879.2	2918.2	2957.4	2996.9	3036.5	3076.4	3116.5	3156.9 h	20.0
8.5000	8.5839	8.6647	8.7426	8.8180	8.8910	8.9618	9.0306	9.0975 s	
6.9582	7.2675	7.5766	7.8854	8.1940	8.5024	8.8108	9.1190	9.4272 v	
2839.8	2878.7	2917.8	2957.1	2996.6	3036.2	3076.1	3116.3	3156.7 h	30.0
8.3119	8.3960	8.4769	8.5550	8.6305	8.7035	8.7744	8.8432	8.9102 s	
5.2154	5.4478	5.6800	5.9118	6.1435	6.3751	6.6065	6.8378	7.0690 v	
2839.2	2878.2	2917.4	2956.7	2996.3	3036.0	3075.9	3116.1	3156.5 h	40.0
8.1782	8.2625	8.3435	8.4217	8.4973	8.5704	8.6413	8.7102	8.7772 s	
4.1697	4.3560	4.5420	4.7277	4.9133	5.0986	5.2839	5.4691	5.6542 v	
2838.6	2877.7	2917.0	2956.4	2995.9	3035.7	3075.7	3115.9	3156.3 h	50.0
8.0742	8.1587	8.2399	8.3182	8.3939	8.4671	8.5380	8.6070	8.6740 s	
3.4726	3.6281	3.7833	3.9383	4.0931	4.2477	4.4022	4.5566	4.7109 v	
2838.1	2877.3	2916.6	2956.0	2995.6	3035.4	3075.4	3115.6	3156.1 h	60.0
7.9891	8.0738	8.1552	8.2336	8.3093	8.3826	8.4536	8.5226	8.5896 s	
2.6011	2.7183	2.8350	2.9515	3.0678	3.1840	3.3000	3.4166	3.5319 v	
2836.9	2876.3	2915.8	2955.3	2995.0	3034.9	3075.0	3115.2	3155.7 h	80.0
7.8544	7.9395	8.0212	8.0998	8.1757	8.2491	8.3202	8.3893	8.4564 s	
2.0783	2.1723	2.2660	2.3595	2.4527	2.5458	2.6387	2.7316	2.8244 v	
2835.8	2875.4	2915.0	2954.6	2994.4	3034.4	3074.5	3114.8	3155.3 h	100.0
7.7495	7.8349	7.9169	7.9958	8.0719	8.1454	8.2166	8.2857	8.3529 s	
1.3811	1.4444	1.5073	1.5700	1.6325	1.6948	1.7570	1.8191	1.8812 v	
2832.9	2872.9	2912.9	2952.9	2992.9	3033.0	3073.3	3113.7	3154.3 h	150.0
7.5574	7.6439	7.7266	7.8061	7.8826	7.9565	8.0290	8.0973	8.1646 s	
1.0325	1.0804	1.1280	1.1753	1.2224	1.2693	1.3162	1.3629	1.4095 v	
2830.0	2870.5	2910.8	2951.1	2991.4	3031.7	3072.1	3112.6	3153.3 h	200.0
7.4196	7.5072	7.5907	7.6707	7.7477	7.8219	7.8937	7.9632	8.0307 s	
0.6837	0.7164	0.7486	0.7805	0.8123	0.8438	0.8753	0.9066	0.9379 v	
2824.0	2865.5	2906.6	2947.5	2988.2	3028.9	3069.7	3110.5	3151.4 h	300.0
7.2222	7.3119	7.3971	7.4783	7.5562	7.6311	7.7034	7.7734	7.8412 s	
0.5093	0.5343	0.5589	0.5831	0.6072	0.6311	0.6549	0.6785	0.7021 v	
2817.8	2860.4	2902.3	2943.9	2985.1	3026.2	3067.2	3108.3	3149.4 h	400.0
7.0788	7.1708	7.2576	7.3402	7.4190	7.4947	7.5675	7.6379	7.7061 s	

**PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE
(TEMPÉRATURE ET PRESSION)**

Press.
p, kPa
(*t*,)

TABLE 2
Température, *t*, °C

	360.	380.	400.	420.	440.	460.	480.	500.	520.
<i>v</i>	292.20	301.43	310.66	319.89	329.12	338.35	347.58	356.81	366.04
1.0 <i>h</i>	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(6.983) <i>s</i>	10.5457	10.6091	10.6711	10.7317	10.7909	10.8488	10.9056	10.9612	11.0157
<i>v</i>	194.80	200.95	207.11	213.26	219.41	225.57	231.72	237.87	244.03
1.5 <i>h</i>	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(13.04) <i>s</i>	10.3585	10.4220	10.4840	10.5445	10.6037	10.6617	10.7184	10.7741	10.8286
<i>v</i>	146.10	150.71	155.33	159.94	164.56	169.17	173.79	178.41	183.02
2.0 <i>h</i>	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(17.51) <i>s</i>	10.2257	10.2892	10.3512	10.4118	10.4710	10.5289	10.5857	10.6413	10.6958
<i>v</i>	97.397	100.47	103.55	106.63	109.71	112.78	115.86	118.94	122.01
3.0 <i>h</i>	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(24.10) <i>s</i>	10.0386	10.1021	10.1641	10.2246	10.2838	10.3418	10.3985	10.4541	10.5087
<i>v</i>	73.046	75.354	77.662	79.970	82.278	84.586	86.893	89.201	91.509
4.0 <i>h</i>	3197.7	3238.6	3279.7	3321.0	3362.7	3404.6	3446.7	3489.2	3531.9
(28.98) <i>s</i>	9.9058	9.9693	10.0313	10.0918	10.1510	10.2090	10.2657	10.3214	10.3759
<i>v</i>	58.436	60.283	62.129	63.975	65.822	67.668	69.514	71.360	73.207
5.0 <i>h</i>	3197.7	3238.6	3279.7	3321.0	3362.7	3404.6	3446.7	3489.2	3531.9
(32.90) <i>s</i>	9.8028	9.8663	9.9283	9.9888	10.0480	10.1060	10.1627	10.2184	10.2729
<i>v</i>	48.696	50.235	51.773	53.312	54.851	56.389	57.928	59.467	61.005
6.0 <i>h</i>	3197.7	3238.5	3279.6	3321.0	3362.6	3404.5	3446.7	3489.2	3531.9
(36.18) <i>s</i>	9.7186	9.7821	9.8441	9.9047	9.9639	10.0218	10.0786	10.1342	10.1888
<i>v</i>	36.521	37.675	38.829	39.983	41.137	42.291	43.445	44.599	45.753
8.0 <i>h</i>	3197.7	3238.5	3279.6	3321.0	3362.6	3404.5	3446.7	3489.1	3531.9
(41.53) <i>s</i>	9.5858	9.6493	9.7113	9.7719	9.8311	9.8890	9.9458	10.0014	10.0560
<i>v</i>	29.216	30.139	31.062	31.986	32.909	33.832	34.756	35.679	36.602
10.0 <i>h</i>	3197.6	3238.5	3279.6	3321.0	3362.6	3404.5	3446.7	3489.1	3531.9
(45.83) <i>s</i>	9.4828	9.5463	9.6083	9.6689	9.7281	9.7860	9.8428	9.8984	9.9530
<i>v</i>	19.475	20.091	20.707	21.323	21.938	22.554	23.169	23.785	24.400
15.0 <i>h</i>	3197.5	3238.4	3279.5	3320.9	3362.5	3404.4	3446.6	3489.1	3531.8
(54.00) <i>s</i>	9.2956	9.3591	9.4211	9.4817	9.5409	9.5988	9.6556	9.7112	9.7658
<i>v</i>	14.605	15.067	15.529	15.991	16.453	16.914	17.376	17.838	18.300
20.0 <i>h</i>	3197.5	3238.3	3279.4	3320.8	3362.5	3404.4	3446.6	3489.0	3531.8
(60.09) <i>s</i>	9.1627	9.2262	9.2882	9.3488	9.4081	9.4660	9.5228	9.5784	9.6330
<i>v</i>	9.7353	10.043	10.351	10.659	10.967	11.275	11.583	11.891	12.199
30.0 <i>h</i>	3197.3	3238.2	3279.3	3320.7	3362.3	3404.2	3446.4	3488.9	3531.6
(69.12) <i>s</i>	8.9754	9.0389	9.1010	9.1615	9.2208	9.2788	9.3355	9.3912	9.4458
<i>v</i>	7.3002	7.5314	7.7625	7.9935	8.2246	8.4556	8.6866	8.9176	9.1485
40.0 <i>h</i>	3197.1	3238.0	3279.1	3320.5	3362.2	3404.1	3446.3	3488.8	3531.5
(75.89) <i>s</i>	8.8424	8.9060	8.9680	9.0286	9.0879	9.1459	9.2027	9.2583	9.3129
<i>v</i>	5.8392	6.0242	6.2091	6.3941	6.5790	6.7638	6.9487	7.1335	7.3183
50.0 <i>h</i>	3196.9	3237.8	3279.0	3320.4	3362.1	3404.0	3446.2	3488.7	3531.4
(81.35) <i>s</i>	8.7392	8.8028	8.8649	8.9255	8.9848	9.0428	9.0996	9.1552	9.2098
<i>v</i>	4.8652	5.0194	5.1736	5.3277	5.4819	5.6360	5.7900	5.9441	6.0981
60.0 <i>h</i>	3196.7	3237.7	3278.8	3320.2	3361.9	3403.9	3446.1	3488.6	3531.3
(85.95) <i>s</i>	8.6549	8.7185	8.7806	8.8412	8.9005	8.9585	9.0153	9.0710	9.1256
<i>v</i>	3.6477	3.7634	3.8792	3.9948	4.1105	4.2261	4.3418	4.4574	4.5729
80.0 <i>h</i>	3196.4	3237.3	3278.5	3320.0	3361.7	3403.6	3445.9	3488.4	3531.1
(93.51) <i>s</i>	8.5217	8.5854	8.6475	8.7081	8.7675	8.8255	8.8823	8.9380	8.9926
<i>v</i>	2.9172	3.0098	3.1025	3.1951	3.2877	3.3803	3.4728	3.5653	3.6578
100.0 <i>h</i>	3196.0	3237.0	3278.2	3319.7	3361.4	3403.4	3445.6	3488.1	3530.9
(99.63) <i>s</i>	8.4183	8.4820	8.5442	8.6049	8.6642	8.7223	8.7791	8.8348	8.8894
<i>v</i>	1.9431	2.0051	2.0669	2.1288	2.1906	2.2524	2.3142	2.3759	2.4377
150.0 <i>h</i>	3195.1	3236.2	3277.5	3319.0	3360.7	3402.8	3445.0	3487.6	3530.4
(111.4) <i>s</i>	8.2301	8.2940	8.3562	8.4170	8.4764	8.5345	8.5914	8.6472	8.7018
<i>v</i>	1.4561	1.5027	1.5492	1.5956	1.6421	1.6885	1.7349	1.7812	1.8276
200.0 <i>h</i>	3194.2	3235.4	3276.7	3318.3	3360.1	3402.1	3444.5	3487.0	3529.9
(120.2) <i>s</i>	8.0964	8.1603	8.2226	8.2835	8.3429	8.4011	8.4581	8.5139	8.5686
<i>v</i>	0.9691	1.0003	1.0314	1.0625	1.0935	1.1245	1.1556	1.1865	1.2175
300.0 <i>h</i>	3192.4	3233.7	3275.2	3316.8	3358.8	3400.9	3443.3	3486.0	3528.9
(133.5) <i>s</i>	7.9072	7.9713	8.0338	8.0949	8.1545	8.2128	8.2698	8.3257	8.3803
<i>v</i>	0.7256	0.7491	0.7725	0.7959	0.8192	0.8426	0.8659	0.8892	0.9125
400.0 <i>h</i>	3190.6	3232.1	3273.6	3315.4	3357.4	3399.7	3442.1	3484.9	3527.8
(143.6) <i>s</i>	7.7723	7.8367	7.8994	7.9606	8.0203	8.0787	8.1359	8.1919	8.2480

**PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE
(TEMPÉRATURE ET PRESSION)**

TABLE 2
Température, t , °C

Press.
 p , kPa

540.	560.	580.	600.	625.	650.	700.	750.	800.	
379,27 3574,9 11,0693	384,50 3618,2 11,1218	393,74 3661,8 11,1735	402,97 3705,6 11,2243	414,50 3760,8 11,2866	426,04 3816,4 11,3476	449,12 3928,9 11,4663	472,19 4043,0 11,5807	495,27 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 11,6911 <i>s</i>	1.0
250,18 3574,9 10,8821	256,34 3618,2 10,9347	262,49 3661,8 10,9864	268,64 3705,6 11,0372	276,33 3760,8 11,0995	284,03 3816,4 11,1605	299,41 3928,9 11,2792	314,79 4043,0 11,3935	330,18 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 11,5040 <i>s</i>	1.5
187,64 3574,9 10,7494	192,25 3618,2 10,8019	196,87 3661,8 10,8536	201,48 3705,6 10,9044	207,25 3760,8 10,9667	213,02 3816,4 11,0277	224,56 3928,8 11,1464	236,10 4043,0 11,2608	247,63 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 11,3712 <i>s</i>	2.0
125,09 3574,9 10,5622	128,17 3618,2 10,6148	131,24 3661,8 10,6665	134,32 3705,6 10,7173	138,17 3760,8 10,7796	142,01 3816,4 10,8406	149,70 3928,8 10,9593	157,40 4043,0 11,0736	165,09 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 11,1841 <i>s</i>	3.0
93,817 3574,9 10,4295	96,124 3618,2 10,4820	98,432 3661,7 10,5337	100,74 3705,6 10,5845	103,62 3760,8 10,6468	106,51 3816,4 10,7078	112,28 3928,8 10,8265	118,05 4043,0 10,9409	123,82 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 11,0513 <i>s</i>	4.0
75,053 3574,9 10,3265	76,899 3618,2 10,3790	78,745 3661,7 10,4307	80,592 3705,6 10,4815	82,899 3760,7 10,5438	85,207 3816,3 10,6049	89,822 3928,8 10,7235	94,438 4043,0 10,8379	99,053 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 10,9483 <i>s</i>	5.0
62,544 3574,9 10,2423	64,082 3618,2 10,2949	65,621 3661,7 10,3466	67,159 3705,6 10,3973	69,082 3760,7 10,4596	71,005 3816,3 10,5207	74,852 3928,8 10,6394	78,698 4043,0 10,7537	82,544 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 10,8642 <i>s</i>	6.0
46,907 3574,9 10,1095	48,061 3618,2 10,1621	49,215 3661,7 10,2138	50,369 3705,5 10,2646	51,811 3760,7 10,3269	53,254 3816,3 10,3879	56,138 3928,8 10,5066	59,023 4043,0 10,6210	61,908 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 10,7314 <i>s</i>	8.0
37,525 3574,9 10,0065	38,448 3618,1 10,0591	39,372 3661,7 10,1108	40,295 3705,5 10,1616	41,449 3760,7 10,2239	42,603 3816,3 10,2849	44,910 3928,8 10,4036	47,218 4042,9 10,5180	49,526 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 10,6284 <i>s</i>	10.0
25,316 3574,8 9,8194	25,632 3618,1 9,8719	26,247 3661,7 9,9236	26,863 3705,5 9,9744	27,632 3760,7 10,0367	28,401 3816,3 10,0978	29,940 3928,8 10,2164	31,478 4042,9 10,3308	33,017 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 10,4413 <i>s</i>	15.0
18,761 3574,8 9,6865	19,223 3618,0 9,7391	19,685 3661,6 9,7908	20,146 3705,4 9,8416	20,723 3760,6 9,9039	21,300 3816,2 9,9650	22,455 3928,7 10,0836	23,609 4042,9 10,1980	24,762 <i>v</i> 4158,7 <i>h</i> 10,3085 <i>s</i>	20.0
12,507 3574,7 9,4993	12,815 3618,0 9,5519	13,122 3661,5 9,6036	13,430 3705,4 9,6544	13,815 3760,6 9,7167	14,200 3816,2 9,7778	14,969 3928,7 9,8965	15,739 4042,8 10,0109	16,508 <i>v</i> 4158,6 <i>h</i> 10,1213 <i>s</i>	30.0
9,3795 3574,6 9,3665	9,6104 3617,9 9,4191	9,8413 3661,4 9,4708	10,072 3705,3 9,5216	10,361 3760,5 9,5839	10,649 3816,1 9,6450	11,227 3928,6 9,7636	11,804 4042,8 9,8780	12,381 <i>v</i> 4158,6 <i>h</i> 9,9885 <i>s</i>	40.0
7,5031 3574,5 9,2634	7,6878 3617,8 9,3160	7,8726 3661,3 9,3677	8,0574 3705,2 9,4185	8,2883 3760,4 9,4808	8,5192 3816,0 9,5419	8,9810 3928,6 9,6606	9,4427 4042,7 9,7750	9,9044 <i>v</i> 4158,5 <i>h</i> 9,8855 <i>s</i>	50.0
6,2521 3574,4 9,1792	6,4062 3617,7 9,2318	6,5602 3661,3 9,2835	6,7141 3705,1 9,3343	6,9066 3760,3 9,3966	7,0991 3816,0 9,4577	7,4839 3928,5 9,5764	7,8687 4042,7 9,6908	8,2535 <i>v</i> 4158,5 <i>h</i> 9,8013 <i>s</i>	60.0
4,6885 3574,2 9,0462	4,8040 3617,5 9,0988	4,9196 3661,1 9,1506	5,0351 3705,0 9,2014	5,1795 3760,2 9,2637	5,3239 3815,8 9,3248	5,6126 3928,4 9,4436	5,9013 4042,6 9,5580	6,1899 <i>v</i> 4158,4 <i>h</i> 9,6685 <i>s</i>	80.0
3,7503 3574,0 8,9431	3,8428 3617,3 8,9957	3,9352 3660,9 9,0474	4,0277 3704,8 9,0982	4,1432 3760,0 9,1606	4,2988 3815,7 9,2217	4,4898 3928,2 9,3405	4,7208 4042,5 9,4549	4,9517 <i>v</i> 4158,3 <i>h</i> 9,5654 <i>s</i>	100.0
2,4994 3573,5 8,7555	2,5611 3616,9 8,8082	2,6228 3660,5 8,8599	2,6845 3704,4 8,9108	2,7616 3759,6 8,9732	2,8386 3815,3 9,0343	2,9927 3927,9 9,1531	3,1468 4042,2 9,2676	3,3008 <i>v</i> 4158,0 <i>h</i> 9,3781 <i>s</i>	150.0
1,8739 3573,0 8,6223	1,9202 3616,4 8,6750	1,9666 3660,0 8,7268	2,0129 3704,0 8,7776	2,0707 3759,3 8,8401	2,1286 3815,0 8,9012	2,2442 3927,6 9,0201	2,3598 4041,9 9,1346	2,4754 <i>v</i> 4157,8 <i>h</i> 9,2452 <i>s</i>	200.0
1,2485 3572,0 8,4343	1,2794 3615,5 8,4870	1,3103 3659,2 8,5389	1,3412 3703,2 8,5898	1,3799 3758,5 8,6523	1,4185 3814,2 8,7135	1,4957 3927,0 8,8325	1,5728 4041,4 8,9471	1,6499 <i>v</i> 4157,3 <i>h</i> 9,0577 <i>s</i>	300.0
0,9357 3571,1 8,3006	0,9590 3614,6 8,3534	0,9822 3658,3 8,4053	1,0054 3702,3 8,4563	1,0344 3757,7 8,5189	1,0634 3813,5 8,5802	1,1214 3926,4 8,6992	1,1793 4040,8 8,8139	1,2372 <i>v</i> 4156,9 <i>h</i> 8,9246 <i>s</i>	400.0

**PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE
(TEMPÉRATURE ET PRESSIION)**

Press.
p, kPa
(*t*)

TABLE 2
Température, *t*, °C

		0.	20.	40.	60.	80.	100.	120.	140.	160.
500.0	v	0.0010000	0.0010015	0.0010076	0.0010169	0.0010290	0.0010435	0.0010605	0.0010800	0.38347
(151.8)	h	0.5	84.3	167.9	251.5	335.3	419.4	503.9	589.2	2766.4
	s	-0.0001	0.2962	0.5719	0.8307	1.0790	1.3066	1.5273	1.7388	6.8631
600.0	v	0.0009999	0.0010015	0.0010075	0.0010169	0.0010289	0.0010434	0.0010604	0.0010799	0.31655
(158.8)	h	0.6	84.4	168.0	251.6	335.4	419.4	504.0	589.3	2758.2
	s	-0.0001	0.2962	0.5719	0.8307	1.0749	1.3065	1.5272	1.7387	6.7648
800.0	v	0.0009998	0.0010014	0.0010075	0.0010168	0.0010288	0.0010433	0.0010603	0.0010798	0.0011021
(170.4)	h	0.8	84.6	168.2	251.7	335.5	419.6	504.1	589.4	675.6
	s	-0.0001	0.2961	0.5718	0.8306	1.0748	1.3063	1.5270	1.7389	1.9423
1000.0	v	0.0009997	0.0010013	0.0010074	0.0010167	0.0010287	0.0010432	0.0010602	0.0010796	0.0011019
(179.9)	h	1.0	84.8	168.3	251.9	335.7	419.7	504.3	589.5	675.7
	s	-0.0001	0.2961	0.5717	0.8305	1.0746	1.3062	1.5269	1.7383	1.9420
1500.0	v	0.0009995	0.0010010	0.0010071	0.0010165	0.0010285	0.0010430	0.0010599	0.0010793	0.0011016
(198.3)	h	1.5	85.3	168.8	252.3	336.1	420.1	504.6	589.8	676.0
	s	-0.0000	0.2960	0.5715	0.8302	1.0743	1.3058	1.5264	1.7378	1.9414
2000.0	v	0.0009992	0.0010008	0.0010069	0.0010162	0.0010282	0.0010427	0.0010596	0.0010790	0.0011012
(212.4)	h	2.0	85.7	169.2	252.7	336.5	420.5	505.0	590.2	676.3
	s	0.0000	0.2959	0.5713	0.8299	1.0740	1.3054	1.5260	1.7373	1.9408
3000.0	v	0.0009987	0.0010004	0.0010065	0.0010158	0.0010278	0.0010422	0.0010590	0.0010783	0.0011005
(233.8)	h	3.0	86.7	170.1	253.6	337.3	421.2	505.7	590.8	676.9
	s	0.0001	0.2957	0.5709	0.8294	1.0733	1.3046	1.5251	1.7362	1.9396
4000.0	v	0.0009982	0.0009999	0.0010060	0.0010153	0.0010273	0.0010417	0.0010584	0.0010777	0.0010997
(250.3)	h	4.0	87.6	171.0	254.4	338.1	422.0	506.4	591.9	677.5
	s	0.0002	0.2955	0.5706	0.8289	1.0726	1.3038	1.5242	1.7352	1.9385
5000.0	v	0.0009977	0.0009995	0.0010056	0.0010149	0.0010268	0.0010412	0.0010579	0.0010771	0.0010990
(263.9)	h	5.1	88.6	171.9	255.3	338.8	422.7	507.1	592.1	678.1
	s	0.0002	0.2952	0.5702	0.8283	1.0720	1.3030	1.5233	1.7342	1.9373
6000.0	v	0.0009972	0.0009990	0.0010052	0.0010144	0.0010263	0.0010406	0.0010573	0.0010764	0.0010983
(275.5)	h	6.1	89.5	172.7	256.1	339.6	423.5	507.8	592.8	678.6
	s	0.0003	0.2950	0.5698	0.8278	1.0713	1.3023	1.5224	1.7332	1.9361
8000.0	v	0.0009962	0.0009981	0.0010043	0.0010135	0.0010254	0.0010396	0.0010562	0.0010752	0.0010968
(295.0)	h	8.1	91.4	174.5	257.8	341.2	425.0	509.2	594.1	679.8
	s	0.0004	0.2946	0.5690	0.8267	1.0700	1.3007	1.5206	1.7311	1.9338
10000.0	v	0.0009953	0.0009972	0.0010034	0.0010127	0.0010245	0.0010386	0.0010551	0.0010739	0.0010954
(311.0)	h	10.1	93.2	176.3	259.4	342.8	426.5	510.6	595.4	681.0
	s	0.0005	0.2942	0.5682	0.8257	1.0687	1.2992	1.5188	1.7291	1.9315
15000.0	v	0.0009928	0.0009950	0.0010013	0.0010105	0.0010221	0.0010361	0.0010523	0.0010709	0.0010919
(342.1)	h	15.1	97.9	180.7	263.6	346.8	430.3	514.2	598.7	684.0
	s	0.0007	0.2931	0.5663	0.8230	1.0655	1.2954	1.5144	1.7241	1.9258
20000.0	v	0.0009904	0.0009929	0.0009992	0.0010083	0.0010199	0.0010337	0.0010497	0.0010679	0.0010886
(365.7)	h	20.1	102.5	185.1	267.8	350.8	434.0	517.7	602.0	687.1
	s	0.0008	0.2919	0.5643	0.8204	1.0623	1.2916	1.5101	1.7192	1.9203
30000.0	v	0.0009857	0.0009886	0.0009951	0.0010041	0.0010155	0.0010289	0.0010445	0.0010621	0.0010821
	h	30.0	111.7	193.8	276.1	358.7	441.6	524.9	608.7	693.3
	s	0.0008	0.2895	0.5604	0.8153	1.0560	1.2843	1.5017	1.7097	1.9095
40000.0	v	0.0009811	0.0009845	0.0009910	0.0010001	0.0010112	0.0010244	0.0010395	0.0010567	0.0010760
	h	39.7	120.8	202.5	284.5	366.7	449.2	532.1	615.5	699.6
	s	0.0004	0.2870	0.5565	0.8102	1.0498	1.2771	1.4935	1.7004	1.8991
50000.0	v	0.0009767	0.0009804	0.0009872	0.0009961	0.0010071	0.0010200	0.0010347	0.0010514	0.0010701
	h	49.3	129.9	211.2	292.8	374.7	456.8	539.4	622.4	705.9
	s	-0.0002	0.2843	0.5525	0.8052	1.0438	1.2701	1.4856	1.6915	1.8890
60000.0	v	0.0009723	0.0009765	0.0009834	0.0009923	0.0010031	0.0010157	0.0010301	0.0010464	0.0010645
	h	58.8	138.9	219.8	301.1	382.6	464.5	546.6	629.2	712.4
	s	-0.0012	0.2815	0.5486	0.8002	1.0379	1.2633	1.4778	1.6828	1.8793
80000.0	v	0.0009641	0.0009689	0.0009760	0.0009849	0.0009954	0.0010076	0.0010214	0.0010368	0.0010540
	h	77.5	156.6	236.9	317.6	398.5	479.7	561.3	643.2	725.5
	s	-0.0037	0.2756	0.5406	0.7904	1.0264	1.2501	1.4629	1.6661	1.8607
100000.0	v	0.0009565	0.0009616	0.0009690	0.0009779	0.0009882	0.0009999	0.0010132	0.0010279	0.0010443
	h	95.9	174.0	253.8	334.0	414.4	495.1	576.0	657.2	738.9
	s	-0.0067	0.2692	0.5325	0.7808	1.0152	1.2373	1.4486	1.6502	1.8431

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE
(TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2
Température, t , °C

Press.
 p , kPa

180.	200.	220.	240.	260.	280.	300.	320.	340.	
0.4045 2811.4 6.9647	0.4250 2855.1 7.0592	0.4450 2898.0 7.1478	0.4647 2940.1 7.2317	0.4841 2981.9 7.3115	0.5034 3023.4 7.3879	0.5226 3064.8 7.4614	0.5416 3106.1 7.5322	0.5606 v 3147.4 h 7.6008 s	500.0
0.3346 2804.8 6.8691	0.3520 2849.7 6.9662	0.3690 2893.5 7.0567	0.3857 2936.4 7.1419	0.4021 2978.7 7.2228	0.4183 3020.6 7.3000	0.4344 3062.3 7.3740	0.4504 3103.9 7.4454	0.4663 v 3145.4 h 7.5143 s	600.0
0.2471 2791.1 6.7122	0.2608 2838.6 6.8148	0.2740 2884.2 6.9094	0.2869 2928.6 6.9976	0.2995 2972.1 7.0807	0.3119 3014.9 7.1595	0.3241 3057.3 7.2348	0.3363 3099.4 7.3070	0.3483 v 3141.4 h 7.3767 s	800.0
0.1944 2776.5 6.5835	0.2059 2826.8 6.6922	0.2169 2874.6 6.7911	0.2276 2920.6 6.8825	0.2379 2965.2 6.9680	0.2480 3009.0 7.0485	0.2580 3052.1 7.1251	0.2678 3094.9 7.1984	0.2776 v 3137.4 h 7.2689 s	1000.0
0.0011271 763.4 2.1386	0.1324 2794.7 6.4508	0.1406 2848.6 6.5624	0.1483 2899.2 6.6630	0.1556 2947.3 6.7550	0.1628 2993.7 6.8405	0.1697 3038.9 6.9207	0.1765 3083.3 6.9967	0.1832 v 3127.0 h 7.0693 s	1500.0
0.0011267 763.6 2.1379	0.0011560 852.6 2.3300	0.1021 2819.9 6.3829	0.1084 2875.9 6.4943	0.1144 2928.1 6.5941	0.1200 2977.5 6.6852	0.1255 3025.0 6.7696	0.1308 3071.2 6.8487	0.1360 v 3116.3 h 6.9235 s	2000.0
0.0011258 764.1 2.1366	0.0011550 853.0 2.3284	0.0011891 943.9 2.5165	0.06816 2822.9 6.2241	0.07283 2885.1 6.3432	0.07712 2942.0 6.4479	0.08116 2995.1 6.5422	0.08500 3045.4 6.6285	0.08871 v 3093.9 h 6.7088 s	3000.0
0.0011249 764.6 2.1352	0.0011540 853.4 2.3268	0.0011878 944.1 2.5147	0.0012280 1037.7 2.7006	0.05172 2835.6 6.1353	0.05544 2902.0 6.2576	0.05883 2962.0 6.3642	0.06200 3017.5 6.4593	0.06499 v 3069.8 h 6.5461 s	4000.0
0.0011241 765.2 2.1339	0.0011530 853.8 2.3253	0.0011866 944.4 2.5129	0.0012264 1037.8 2.6984	0.0012750 1134.9 2.8840	0.04222 2856.9 6.0886	0.04530 2925.5 6.2105	0.04810 2987.2 6.3163	0.05070 v 3044.1 h 6.4106 s	5000.0
0.0011232 765.7 2.1325	0.0011519 854.2 2.3237	0.0011853 944.7 2.5110	0.0012249 1037.9 2.6962	0.0012729 1134.7 2.8813	0.03317 2804.9 5.9270	0.03614 2885.0 6.0692	0.03874 2954.2 6.1880	0.04111 v 3016.5 h 6.2913 s	6000.0
0.0011216 766.7 2.1299	0.0011500 855.1 2.3206	0.0011829 945.3 2.5075	0.0012218 1038.1 2.6919	0.0012687 1134.5 2.8761	0.0013277 1236.0 3.0629	0.02426 2786.8 5.7942	0.02681 2878.7 5.9519	0.02896 v 2955.3 h 6.0790 s	8000.0
0.0011199 767.8 2.1272	0.0011480 855.9 2.3176	0.0011805 945.9 2.5039	0.0012188 1038.4 2.6877	0.0012648 1134.2 2.8709	0.0013221 1235.0 3.0563	0.0013979 1343.4 3.2488	0.01926 2783.5 5.7145	0.02147 v 2883.4 h 5.8803 s	10000.0
0.0011159 770.4 2.1208	0.0011433 858.1 2.3102	0.0011748 947.6 2.4953	0.0012115 1039.2 2.6775	0.0012553 1134.0 2.8585	0.0013090 1232.9 3.0407	0.0013779 1338.3 3.2278	0.0014736 1454.3 3.4267	0.0016324 v 1593.3 h 3.6571 s	15000.0
0.0011120 773.1 2.1145	0.0011387 860.4 2.3030	0.0011693 949.3 2.4869	0.0012047 1040.3 2.6677	0.0012466 1134.0 2.8468	0.0012971 1231.4 3.0262	0.0013606 1334.3 3.2089	0.0014451 1445.6 3.3998	0.0015704 v 1572.4 h 3.6100 s	20000.0
0.0011046 778.7 2.1022	0.0011301 865.2 2.2891	0.0011590 953.1 2.4710	0.0011922 1042.8 2.6492	0.0012307 1134.7 2.8250	0.0012763 1229.7 2.9998	0.0013316 1328.7 3.1797	0.0014012 1433.6 3.3556	0.0014939 v 1547.7 h 3.5447 s	30000.0
0.0010976 784.4 2.0905	0.0011220 870.2 2.2758	0.0011495 957.2 2.4560	0.0011808 1045.8 2.6320	0.0012166 1136.3 2.8050	0.0012583 1229.2 2.9761	0.0013077 1325.4 3.1469	0.0013677 1425.9 3.3193	0.0014434 v 1532.9 h 3.4965 s	40000.0
0.0010910 790.2 2.0793	0.0011144 875.4 2.2632	0.0011407 961.6 2.4417	0.0011703 1049.2 2.6158	0.0012040 1138.5 2.7864	0.0012426 1229.8 2.9545	0.0012874 1323.7 3.1213	0.0013406 1421.0 3.2882	0.0014055 v 1523.0 h 3.4572 s	50000.0
0.0010847 796.2 2.0684	0.0011073 880.8 2.2511	0.0011325 966.3 2.4281	0.0011607 1053.0 2.6005	0.0011924 1141.2 2.7690	0.0012285 1231.1 2.9345	0.0012698 1323.2 3.0981	0.0013179 1418.0 3.2606	0.0013791 v 1516.3 h 3.4236 s	60000.0
0.0010731 808.4 2.0478	0.0010941 891.9 2.2281	0.0011174 976.2 2.4026	0.0011433 1061.4 2.5720	0.0011720 1147.8 2.7370	0.0012041 1235.4 2.8985	0.0012401 1324.7 3.0570	0.0012809 1415.7 3.2130	0.0013280 v 1508.6 h 3.3671 s	80000.0
0.0010623 820.9 2.0283	0.0010821 903.5 2.2067	0.0011039 986.7 2.3789	0.0011279 1070.7 2.5458	0.0011543 1155.6 2.7081	0.0011833 1241.5 2.8663	0.0012155 1328.7 3.0210	0.0012514 1416.9 3.1723	0.0012921 v 1505.9 h 3.3200 s	100000.0

**PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE
(TEMPÉRATURE ET PRESSION)**

Press. <i>p</i> , kPa (t.)	TABLE 2 Température, <i>t</i> , °C								
	360.	380.	400.	420.	440.	460.	480.	500.	520.
500.0 (151.8)	v 0,5795 h 3188.8 s 7,6673	v 0,5984 h 3230.4 s 7,7319	v 0,6172 h 3272.1 s 7,7948	v 0,6359 h 3314.0 s 7,8561	v 0,6547 h 3356.1 s 7,9160	v 0,6734 h 3398.4 s 7,9745	v 0,6921 h 3441.0 s 8,0318	v 0,7108 h 3483.8 s 8,0879	v 0,7294 h 3526.8 s 8,1428
600.0 (158.8)	v 0,4821 h 3187.0 s 7,5810	v 0,4979 h 3228.7 s 7,6459	v 0,5136 h 3270.6 s 7,7090	v 0,5293 h 3312.6 s 7,7705	v 0,5450 h 3354.8 s 7,8305	v 0,5606 h 3397.2 s 7,8891	v 0,5762 h 3439.8 s 7,9465	v 0,5918 h 3482.7 s 8,0027	v 0,6074 h 3525.8 s 8,0577
800.0 (170.4)	v 0,3603 h 3183.4 s 7,4441	v 0,3723 h 3225.4 s 7,5094	v 0,3842 h 3267.5 s 7,5729	v 0,3960 h 3309.7 s 7,6347	v 0,4078 h 3352.1 s 7,6950	v 0,4196 h 3394.7 s 7,7539	v 0,4314 h 3437.5 s 7,8115	v 0,4432 h 3480.5 s 7,8678	v 0,4549 h 3523.7 s 7,9230
1000.0 (179.9)	v 0,2873 h 3179.7 s 7,3368	v 0,2969 h 3222.0 s 7,4027	v 0,3065 h 3264.4 s 7,4665	v 0,3160 h 3306.9 s 7,5287	v 0,3256 h 3349.5 s 7,5893	v 0,3350 h 3392.2 s 7,6484	v 0,3445 h 3435.1 s 7,7062	v 0,3540 h 3478.3 s 7,7627	v 0,3634 h 3521.6 s 7,8181
1500.0 (198.3)	v 0,1898 h 3170.4 s 7,1389	v 0,1964 h 3213.5 s 7,2060	v 0,2029 h 3256.6 s 7,2709	v 0,2094 h 3299.7 s 7,3340	v 0,2158 h 3342.8 s 7,3953	v 0,2223 h 3386.0 s 7,4550	v 0,2287 h 3429.3 s 7,5133	v 0,2350 h 3472.8 s 7,5703	v 0,2414 h 3516.5 s 7,6261
2000.0 (212.4)	v 0,1411 h 3160.8 s 6,9950	v 0,1461 h 3204.9 s 7,0635	v 0,1511 h 3248.7 s 7,1296	v 0,1561 h 3292.4 s 7,1935	v 0,1610 h 3336.0 s 7,2555	v 0,1659 h 3379.7 s 7,3159	v 0,1707 h 3423.4 s 7,3748	v 0,1756 h 3467.3 s 7,4323	v 0,1804 h 3511.3 s 7,4885
3000.0 (233.8)	v 0,09232 h 3140.9 s 6,7844	v 0,09584 h 3187.0 s 6,8561	v 0,09931 h 3232.5 s 6,9246	v 0,1027 h 3277.5 s 6,9906	v 0,1061 h 3322.3 s 7,0543	v 0,1095 h 3367.0 s 7,1160	v 0,1128 h 3411.6 s 7,1760	v 0,1161 h 3456.2 s 7,2345	v 0,1194 h 3500.9 s 7,2916
4000.0 (250.3)	v 0,06787 h 3119.9 s 6,6265	v 0,07066 h 3168.4 s 6,7019	v 0,07338 h 3215.7 s 6,7733	v 0,07604 h 3262.3 s 6,8414	v 0,07866 h 3308.3 s 6,9069	v 0,08125 h 3354.0 s 6,9702	v 0,08381 h 3399.6 s 7,0314	v 0,08634 h 3445.0 s 7,0909	v 0,08886 h 3490.4 s 7,1489
5000.0 (263.9)	v 0,05316 h 3097.6 s 6,4966	v 0,05551 h 3148.8 s 6,5762	v 0,05779 h 3198.3 s 6,6508	v 0,06001 h 3246.5 s 6,7215	v 0,06218 h 3294.0 s 6,7890	v 0,06431 h 3340.9 s 6,8538	v 0,06642 h 3387.4 s 6,9164	v 0,06849 h 3433.7 s 6,9770	v 0,07055 h 3479.8 s 7,0360
6000.0 (275.5)	v 0,04330 h 3074.0 s 6,3836	v 0,04539 h 3128.3 s 6,4680	v 0,04738 h 3180.1 s 6,5462	v 0,04931 h 3230.3 s 6,6196	v 0,05118 h 3279.3 s 6,6893	v 0,05302 h 3327.4 s 6,7559	v 0,05482 h 3375.0 s 6,8199	v 0,05659 h 3422.2 s 6,8818	v 0,05834 h 3469.1 s 6,9417
8000.0 (295.0)	v 0,03088 h 3022.7 s 6,1872	v 0,03265 h 3084.2 s 6,2828	v 0,03431 h 3141.6 s 6,3694	v 0,03589 h 3196.2 s 6,4493	v 0,03740 h 3248.7 s 6,5240	v 0,03887 h 3299.7 s 6,5945	v 0,04030 h 3349.6 s 6,6617	v 0,04170 h 3398.8 s 6,7262	v 0,04308 h 3447.4 s 6,7883
10000.0 (311.0)	v 0,02331 h 2964.8 s 6,0110	v 0,02493 h 3035.7 s 6,1213	v 0,02641 h 3099.9 s 6,2182	v 0,02779 h 3159.7 s 6,3057	v 0,02911 h 3216.2 s 6,3861	v 0,03036 h 3270.5 s 6,4612	v 0,03158 h 3323.2 s 6,5321	v 0,03276 h 3374.6 s 6,5994	v 0,03391 h 3425.1 s 6,6640
15000.0 (342.1)	v 0,01256 h 2770.8 s 5,5677	v 0,01428 h 2887.7 s 5,7497	v 0,01566 h 2979.1 s 5,8876	v 0,01686 h 3057.0 s 6,0016	v 0,01794 h 3126.9 s 6,1010	v 0,01895 h 3191.5 s 6,1904	v 0,01989 h 3252.4 s 6,2724	v 0,02080 h 3310.6 s 6,3487	v 0,02166 h 3366.8 s 6,4204
20000.0 (365.7)	v 0,0018269 h 1742.9 s 3,8835	v 0,008246 h 2660.2 s 5,3165	v 0,009947 h 2820.5 s 5,5585	v 0,01120 h 2932.9 s 5,7232	v 0,01224 h 3023.7 s 5,8523	v 0,01315 h 3102.7 s 5,9616	v 0,01399 h 3174.4 s 6,0581	v 0,01477 h 3241.1 s 6,1456	v 0,01551 h 3304.2 s 6,2262
30000.0	v 0,0016285 h 1678.0 s 3,7541	v 0,001874 h 1837.7 s 4,0021	v 0,002831 h 2161.8 s 4,4896	v 0,004921 h 2558.0 s 5,0706	v 0,006227 h 2754.0 s 5,3499	v 0,007189 h 2887.7 s 5,5349	v 0,007985 h 2993.9 s 5,6779	v 0,008681 h 3085.0 s 5,7972	v 0,009310 h 3166.6 s 5,9014
40000.0	v 0,0015425 h 1650.5 s 3,6856	v 0,001682 h 1776.4 s 3,8814	v 0,001909 h 1934.1 s 4,1190	v 0,002371 h 2145.7 s 4,4285	v 0,003200 h 2399.4 s 4,7893	v 0,004137 h 2617.1 s 5,0906	v 0,004941 h 2779.8 s 5,3997	v 0,005616 h 2906.8 s 5,4762	v 0,006205 h 3013.7 s 5,6128
50000.0	v 0,0014862 h 1633.9 s 3,6355	v 0,001589 h 1746.8 s 3,8110	v 0,001729 h 1877.7 s 4,0083	v 0,001938 h 2026.6 s 4,2262	v 0,002269 h 2199.7 s 4,4723	v 0,002747 h 2387.2 s 4,7316	v 0,003308 h 2564.9 s 4,9709	v 0,003882 h 2723.0 s 5,1782	v 0,004408 h 2854.9 s 5,3466
60000.0	v 0,0014444 h 1622.8 s 3,5948	v 0,001528 h 1728.4 s 3,7589	v 0,001632 h 1847.3 s 3,9383	v 0,001771 h 1975.0 s 4,1252	v 0,001962 h 2113.5 s 4,3221	v 0,002226 h 2263.2 s 4,5291	v 0,002565 h 2418.8 s 4,7365	v 0,002952 h 2570.6 s 4,9374	v 0,003358 h 2712.6 s 5,1189
80000.0	v 0,0013833 h 1609.7 s 3,5296	v 0,001445 h 1707.0 s 3,6807	v 0,001518 h 1814.2 s 3,8425	v 0,001605 h 1924.1 s 4,0033	v 0,001710 h 2036.6 s 4,1633	v 0,001841 h 2152.5 s 4,3237	v 0,001999 h 2272.8 s 4,4855	v 0,002188 h 2397.4 s 4,6488	v 0,002405 h 2524.0 s 4,8104
100000.0	v 0,0013388 h 1603.4 s 3,4767	v 0,001390 h 1696.3 s 3,6211	v 0,001446 h 1797.6 s 3,7738	v 0,001511 h 1899.0 s 3,9223	v 0,001587 h 2000.3 s 4,0664	v 0,001675 h 2102.7 s 4,2079	v 0,001777 h 2207.7 s 4,3492	v 0,001893 h 2316.1 s 4,4913	v 0,002024 h 2427.2 s 4,6331

**PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE
(TEMPÉRATURE ET PRESSION)**

TABLE 2
Température, *t*, °C

Press.
p, kPa

540.	560.	580.	600.	625.	650.	700.	750.	800.	
0,7481 3570,1 8,1967	0,7667 3613,6 8,2496	0,7853 3657,4 8,3016	0,8039 3701,5 8,3526	0,8272 3757,0 8,4152	0,8504 3812,8 8,4766	0,8968 3925,8 8,5957	0,9432 4040,3 8,7105	0,9896 <i>v</i> 4156,4 <i>h</i> 8,8213 <i>s</i>	500,0
0,6230 3569,1 8,1117	0,6386 3612,7 8,1647	0,6541 3656,6 8,2167	0,6696 3700,7 8,2678	0,6890 3756,2 8,3305	0,7084 3812,1 8,3919	0,7471 3925,1 8,5111	0,7858 4039,8 8,6259	0,8245 <i>v</i> 4155,9 <i>h</i> 8,7368 <i>s</i>	600,0
0,4666 3567,2 7,9771	0,4783 3610,9 8,0302	0,4900 3654,8 8,0824	0,5017 3699,1 8,1336	0,5163 3754,7 8,1964	0,5309 3810,7 8,2579	0,5600 3923,9 8,3773	0,5891 4038,7 8,4923	0,6181 <i>v</i> 4155,0 <i>h</i> 8,6033 <i>s</i>	800,0
0,3728 3565,2 7,8724	0,3822 3609,0 7,9256	0,3916 3653,1 7,9779	0,4010 3697,4 8,0292	0,4127 3753,1 8,0921	0,4244 3809,3 8,1537	0,4477 3922,7 8,2734	0,4710 4037,4 8,3885	0,4943 <i>v</i> 4154,1 <i>h</i> 8,4997 <i>s</i>	1000,0
0,2477 3560,4 7,6808	0,2540 3604,5 7,7343	0,2604 3648,8 7,7869	0,2667 3693,3 7,8385	0,2745 3749,3 7,9017	0,2824 3805,7 7,9636	0,2980 3919,6 8,0838	0,3136 4034,9 8,1993	0,3292 <i>v</i> 4151,7 <i>h</i> 8,3108 <i>s</i>	1500,0
0,1852 3555,5 7,5435	0,1900 3599,9 7,5974	0,1947 3644,4 7,6503	0,1995 3689,2 7,7022	0,2054 3745,5 7,7657	0,2114 3802,1 7,8279	0,2232 3916,5 7,9485	0,2349 4032,2 8,0645	0,2467 <i>v</i> 4149,4 <i>h</i> 8,1763 <i>s</i>	2000,0
0,1226 3545,7 7,3474	0,1259 3590,6 7,4020	0,1291 3635,7 7,4554	0,1323 3681,0 7,5079	0,1364 3737,8 7,5721	0,1404 3795,0 7,6349	0,1483 3910,3 7,7564	0,1562 4026,8 7,8733	0,1641 <i>v</i> 4144,7 <i>h</i> 7,9857 <i>s</i>	3000,0
0,09135 3535,8 7,2055	0,09384 3581,4 7,2608	0,09631 3627,0 7,3149	0,09876 3672,8 7,3680	0,1018 3730,2 7,4328	0,1049 3787,9 7,4961	0,1109 3904,1 7,6187	0,1169 4021,4 7,7363	0,1229 <i>v</i> 4140,0 <i>h</i> 7,8495 <i>s</i>	4000,0
0,07259 3525,9 7,0934	0,07461 3572,0 7,1494	0,07662 3618,2 7,2042	0,07862 3664,5 7,2578	0,08109 3722,5 7,3233	0,08356 3780,7 7,3872	0,08845 3897,9 7,5108	0,09329 4016,1 7,6292	0,09809 <i>v</i> 4135,3 <i>h</i> 7,7431 <i>s</i>	5000,0
0,06008 3515,9 7,0000	0,06179 3562,7 7,0568	0,06349 3609,4 7,1122	0,06518 3656,2 7,1664	0,06728 3714,8 7,2326	0,06936 3773,5 7,2971	0,07348 3891,7 7,4217	0,07755 4010,7 7,5409	0,08159 <i>v</i> 4130,7 <i>h</i> 7,6554 <i>s</i>	6000,0
0,04443 3495,7 6,8484	0,04577 3543,8 6,9068	0,04709 3591,7 6,9636	0,04839 3639,5 7,0191	0,05001 3699,3 7,0866	0,05161 3759,2 7,1523	0,05477 3879,2 7,2790	0,05788 3999,9 7,3999	0,06096 <i>v</i> 4121,3 <i>h</i> 7,5158 <i>s</i>	8000,0
0,03504 3475,1 6,7261	0,03615 3524,5 6,7863	0,03724 3573,7 6,8446	0,03832 3622,7 6,9013	0,03965 3683,8 6,9703	0,04096 3744,7 7,0373	0,04355 3866,8 7,1660	0,04609 3989,1 7,2886	0,04858 <i>v</i> 4112,0 <i>h</i> 7,4058 <i>s</i>	10000,0
0,02250 3421,4 6,4885	0,02331 3475,0 6,5535	0,02411 3527,7 6,6160	0,02488 3579,8 6,6764	0,02584 3644,3 6,7492	0,02677 3708,3 6,8195	0,02859 3835,4 6,9536	0,03036 3962,1 7,0806	0,03209 <i>v</i> 4088,6 <i>h</i> 7,2013 <i>s</i>	15000,0
0,01621 3364,7 6,3015	0,01688 3423,0 6,3724	0,01753 3479,9 6,4398	0,01816 3535,5 6,5043	0,01893 3603,8 6,5814	0,01967 3671,1 6,6554	0,02111 3803,8 6,7953	0,02250 3935,0 6,9267	0,02385 <i>v</i> 4065,3 <i>h</i> 7,0511 <i>s</i>	20000,0
0,009890 3241,7 5,9949	0,01043 3312,1 6,0805	0,01095 3378,9 6,1597	0,01144 3443,0 6,2340	0,01202 3520,2 6,3212	0,01258 3595,0 6,4033	0,01365 3739,7 6,5560	0,01465 3880,3 6,6970	0,01562 <i>v</i> 4018,5 <i>h</i> 6,8288 <i>s</i>	30000,0
0,006735 3108,0 5,7302	0,007219 3193,4 5,8340	0,007667 3272,4 5,9276	0,008088 3346,4 6,0135	0,008584 3433,8 6,1122	0,009053 3517,0 6,2035	0,009930 3674,8 6,3701	0,01075 3825,5 6,5210	0,01152 <i>v</i> 3971,7 <i>h</i> 6,6606 <i>s</i>	40000,0
0,004888 2968,9 5,4886	0,005328 3070,7 5,6124	0,005734 3163,2 5,7221	0,006111 3248,3 5,8207	0,006550 3346,8 5,9320	0,006960 3438,9 6,0331	0,007720 3610,2 6,2138	0,008420 3770,9 6,3749	0,009076 <i>v</i> 3925,3 <i>h</i> 6,5222 <i>s</i>	50000,0
0,003755 2838,3 5,2755	0,004135 2951,7 5,4132	0,004496 3055,8 5,5367	0,004835 3151,6 5,6477	0,005229 3261,4 5,7717	0,005596 3362,4 5,8827	0,006269 3547,0 6,0775	0,006885 3717,4 6,2483	0,007460 <i>v</i> 3879,6 <i>h</i> 6,4031 <i>s</i>	60000,0
0,002641 2648,2 4,9650	0,002886 2765,1 5,1072	0,003132 2874,9 5,2374	0,003379 2980,3 5,3595	0,003682 3104,6 5,4999	0,003974 3220,3 5,6270	0,004519 3428,7 5,8470	0,005017 3516,7 6,0354	0,005481 <i>v</i> 3792,8 <i>h</i> 6,2034 <i>s</i>	80000,0
0,002168 2538,6 4,7719	0,002326 2648,2 4,9050	0,002493 2754,5 5,0311	0,002668 2857,5 5,1505	0,002891 2985,8 5,2954	0,003106 3105,3 5,4267	0,003536 3324,4 5,6579	0,003952 3526,1 5,8600	0,004341 <i>v</i> 3714,3 <i>h</i> 6,0397 <i>s</i>	100000,0

PERTE DE VAPEUR PAR LES ORIFICES ÉVACUANT À L'ATMOSPÈRE

TABLE 3

Diamètre de l'orifice, po	Perte de vapeur, lb/h lorsque la pression effective de la vapeur est de:											
	2 lb/po ²	5 lb/po ²	10 lb/po ²	15 lb/po ²	25 lb/po ²	50 lb/po ²	75 lb/po ²	100 lb/po ²	125 lb/po ²	150 lb/po ²	200 lb/po ²	250 lb/po ²
1/32	0.31	0.49	0.70	0.85	1.14	1.86	2.58	3.3	4.02	4.74	6.17	7.61
1/16	1.25	1.97	2.8	3.4	4.6	7.4	10.3	13.2	16.1	18.9	24.7	30.4
3/32	2.81	4.44	6.3	7.7	10.3	16.7	15.4	29.7	36.2	42.6	55.6	68.5
1/8	4.5	7.9	11.2	13.7	18.3	29.8	41.3	52.8	64.3	75.8	99.0	122.0
5/32	7.8	12.3	17.4	21.3	28.5	46.5	64.5	82.5	100.0	118.0	154.0	190.0
3/16	11.2	17.7	25.1	30.7	41.1	67.0	93.0	119.0	145.0	170.0	222.0	274.0
7/32	15.3	24.2	34.2	41.9	55.9	91.2	126.0	162.0	197.0	232.0	303.0	373.0
1/4	20.0	31.6	44.6	54.7	73.1	119.0	165.0	211.0	257.0	303.0	395.0	487.0
9/32	25.2	39.9	56.5	69.2	92.5	151.0	209.0	267.0	325.0	384.0	500.0	617.0
5/16	31.2	49.3	69.7	85.4	114.0	186.0	258.0	330.0	402.0	474.0	617.0	761.0
11/32	37.7	59.6	84.4	103.0	138.0	225.0	312.0	399.0	486.0	573.0	747.0	921.0
3/8	44.9	71.0	100.0	123.0	164.0	268.0	371.0	475.0	578.0	682.0	889.0	1096.0
13/32	52.7	83.3	118.0	144.0	193.0	314.0	436.0	557.0	679.0	800.0	1043.0	1286.0
7/16	61.1	96.6	137.0	167.0	224.0	365.0	506.0	647.0	787.0	928.0	1210.0	1492.0
15/32	70.2	111.0	157.0	192.0	257.0	419.0	580.0	742.0	904.0	1065.0	1389.0	1713.0
1/2	79.8	126.0	179.0	219.0	292.0	476.0	660.0	844.0	1028.0	1212.0	1580.0	1949.0

Conversion métrique
 1 lb/h = 0,4536 kg/h
 1 po = 25,4 mm
 1 lb/po² = 6,897 kPa

DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE MOYENNE LOGARITHMIQUE POUR LES APPLICATIONS DE CHAUFFAGE OU DE REFROIDISSEMENT

TABLE 4

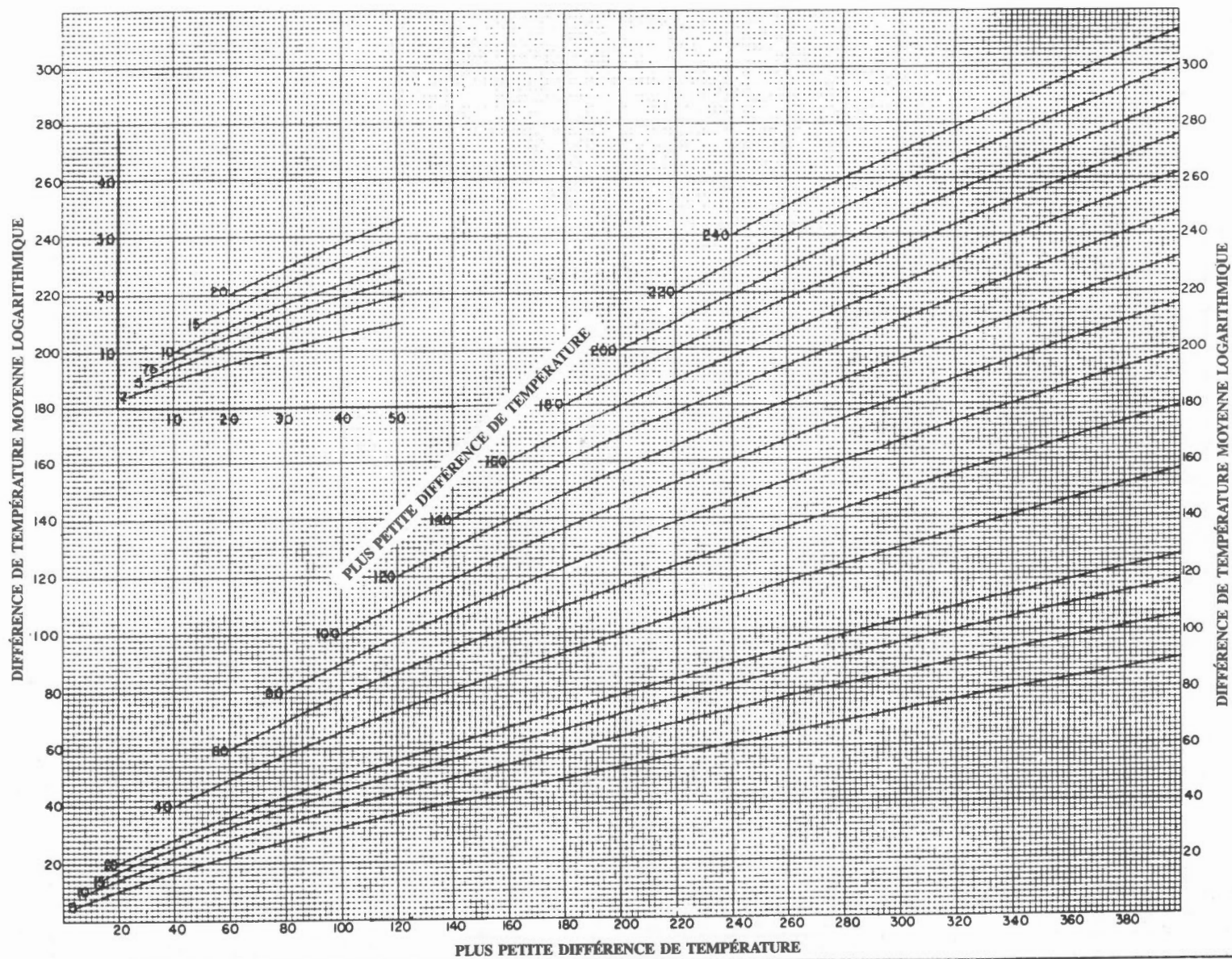
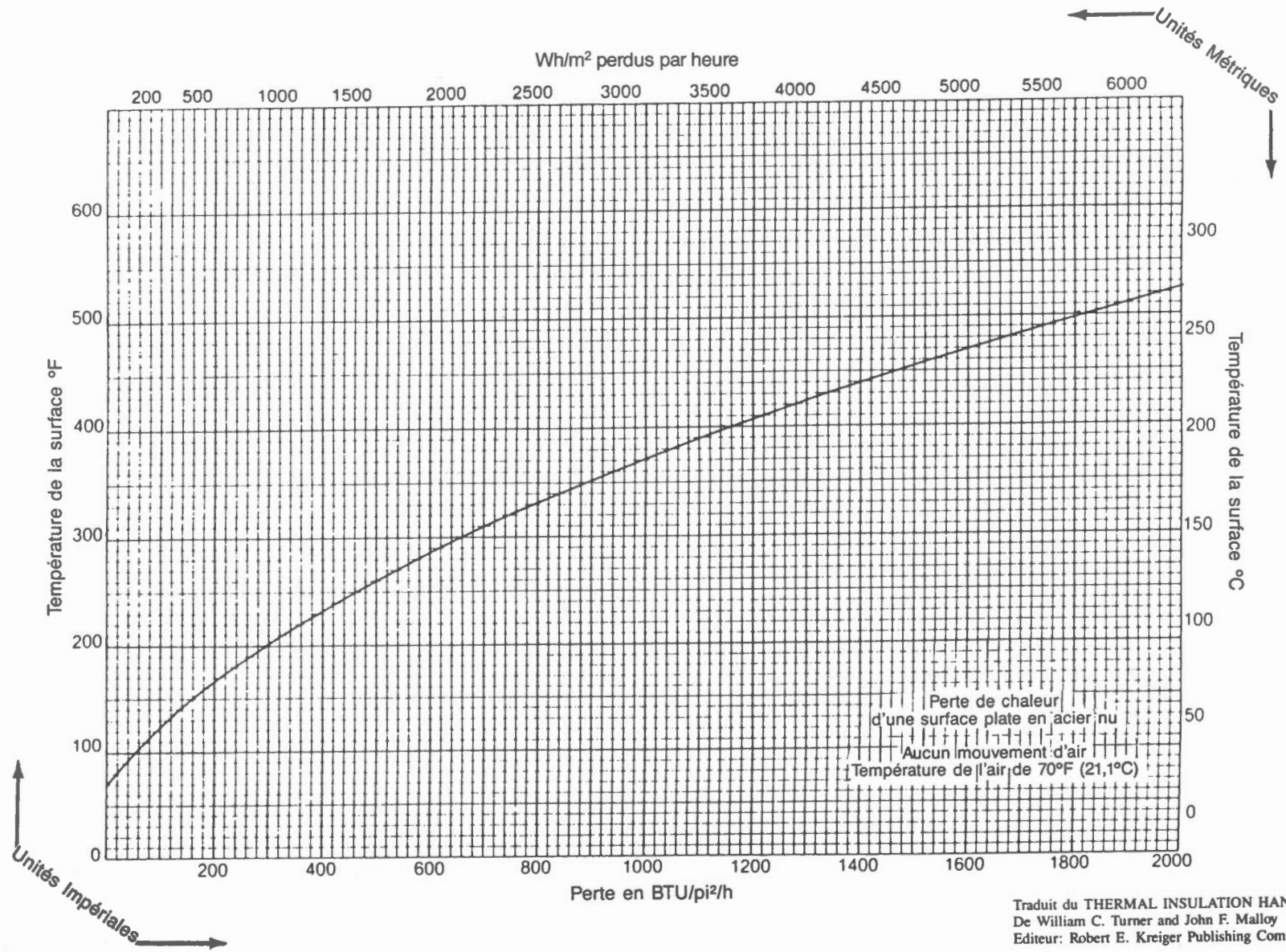
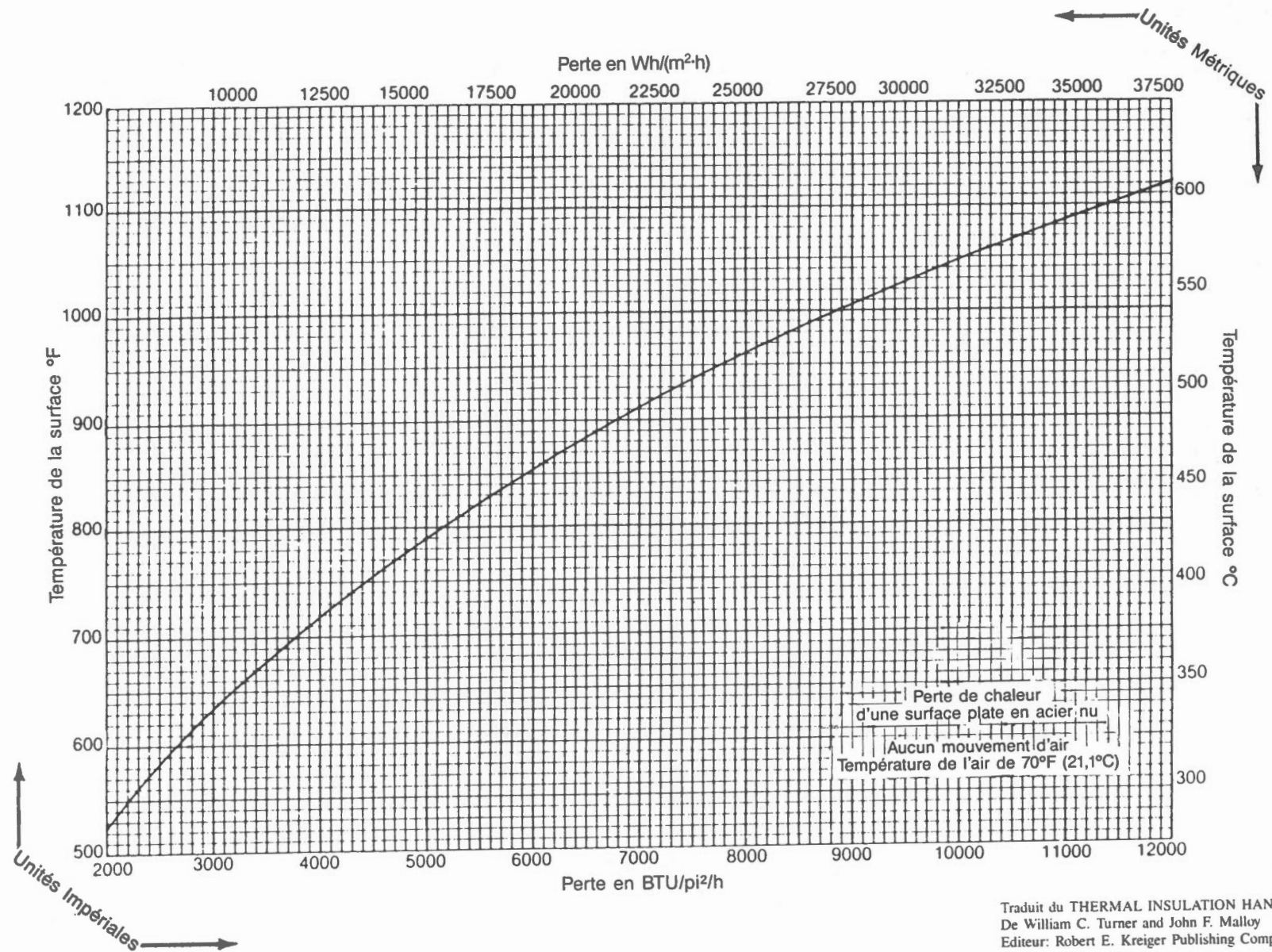


TABLE 5



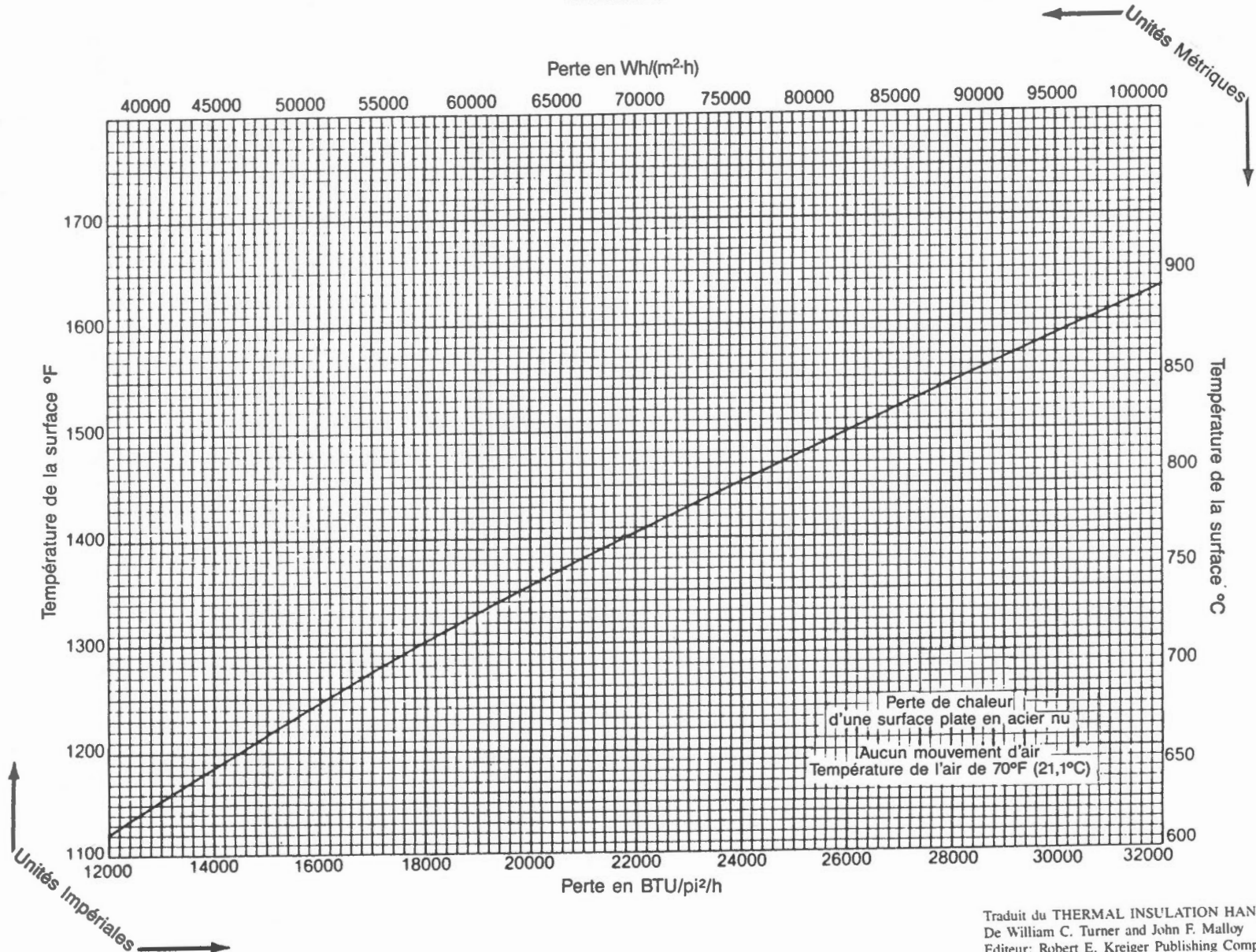
Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK,
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

TABLE 5



Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

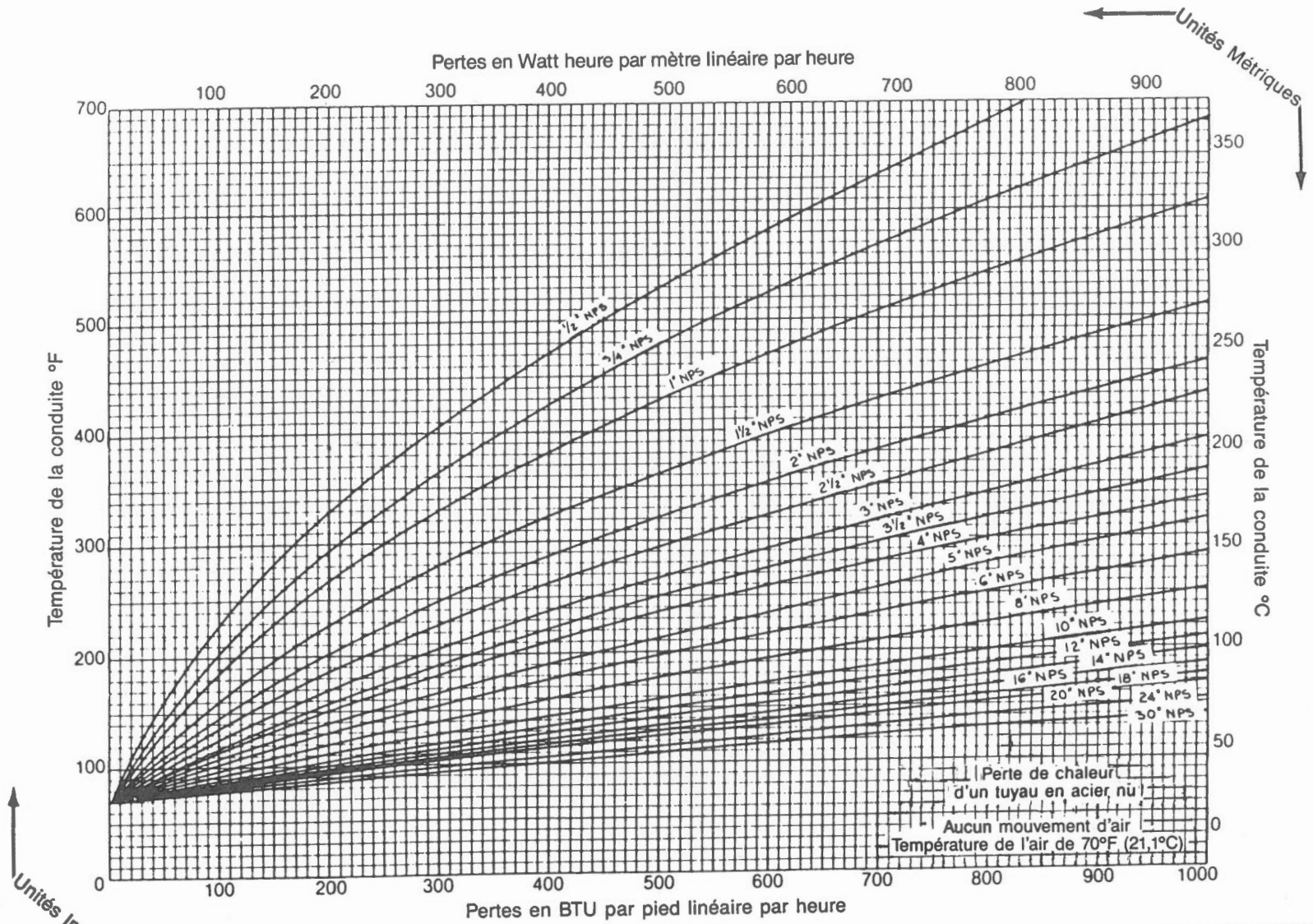
TABLE 5



B-17

Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
 De William C. Turner and John F. Malloy
 Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

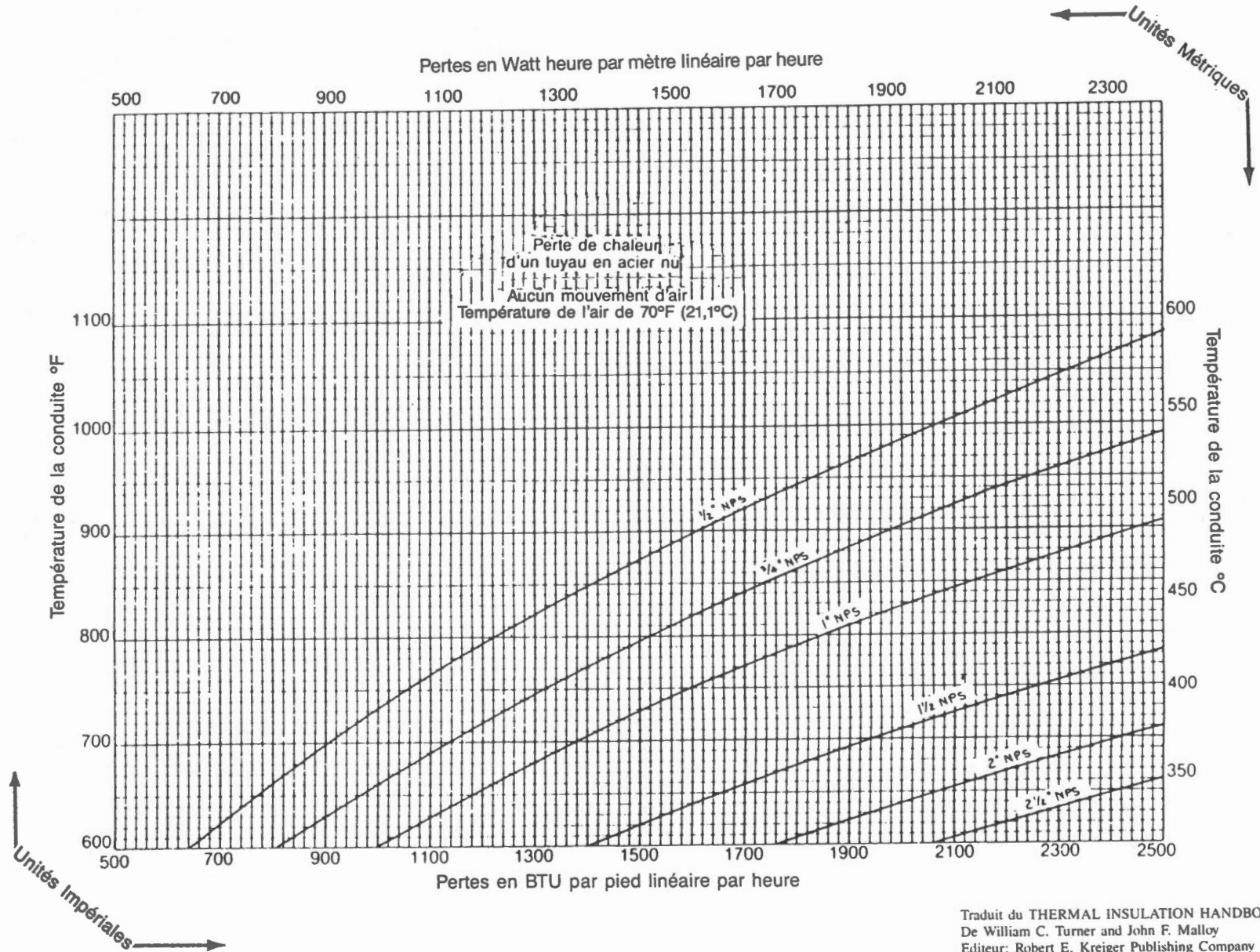
TABLE 6



B-18

Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK,
 De William C. Turner and John F. Malloy
 Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

TABLE 6



Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

TAUX DE CONSOMMATION DE VAPEUR TYPES

TABLE 7

	Pression de service lb/po ² (eff).	Lb par h	
		En service	Maximum
BOULANGERIES Pétrin, 8 pi de long Étuves de fermentation finale, capacité de 500 pi ³	10	4 7	
Fours: A sole fixe ou rôtissoire Pain blanc, surface de 120 pi ² Pain de sègle, surface de 10 pi ² Fours Master Baker Century Reel, w/pb par 100 lbs de pain Fours rotatifs, par plate-forme Bennett 400, plate-forme simple Hubbard (toute dimension) Middleby-Marshall, w/pb Fours à sole mobile, Baker-Perkins, plateau long (par 100 lbs) Fours à sole mobile, Baker-Perkins, plateau court (par 100 lbs) General Electric Rotatifs Fish Duothermic, par plate-forme Fours pivotants: moule à 8-10 brioches moule à 12-18 brioches moule à 18-28 brioches	10	29 58 29 29 29 44 58 58 13 29 20 58 29 58 87	
LAVAGE DE BOUTEILLES Boissons gazeuses, bière, etc.: par 100 bouteilles-min Litres de lait, par 100 caisses/h	5	310 58	
CONFISERIE ET CHOCOLATERIE Cuisson de bonbon, cuiseur de 30 gal, 1 heure Fonte du chocolat, récipient à enveloppe chauffante de 24" diam. Bouilloires trempées de chocolat, par surface de réservoir de 10 pi ² Tempéreuses à chocolat, nappées, surface active de 20 pi ² chacun Bouilloire à confiserie par pi ² d'enveloppe Bouilloire à confiserie par pi ² de chauffante	70 30 75	46 29 29 29	60 100
CRÉMÉRIES ET LAITÉRIES Conserves de crème, 3 par minute Pasteurisateur, par 100 gallons chauffés 20 min	15-75		310 282
LAVES-VAISSELLE Type à cuve à 2 compartiments Type à gros convoyeur ou rouleau Autosan, Colt, selon les dimensions Champion, selon les dimensions Hobart Crescent, selon les dimensions Fan Spray, selon les dimensions Crescent, commande de vapeur manuelle Hobart modèle AM-5 Lave-vaisselle	10-30 30 10 15-20	 29 58 29 58	58 58 117 310 186 248
ÉQUIPEMENT D'HÔPITAL Alambics, par 100 gallons d'eau distillée Stérilisateurs, bassin hygiénique Stérilisateurs, pansements, par 10 po de longueur, env. Stérilisateurs, instrument, par 100 po ³ env. Stérilisateurs, eau, par 10 gallons, env.	40-50	102 3 7 3 6	
Fours stérilisateurs, à double porte: Jusqu'à 50 pi ³ par 10 pi ³ env. 50 à 100 pi ³ , par 10 pi ³ env. 100 et plus, par 10 pi ³ env.	40-50	29 21 16	

TAUX DE CONSOMMATION DE VAPEUR TYPES

TABLE 7

ÉQUIPEMENT D'HÔPITAL (suite)	Pression de service lb/po² (eff).	Lb par h	
		En service	Maximum
Stérilisateurs, Type non-pressurisé Pour bouteilles ou pasteurisation Début avec eau à 70°F, maintenue pour 20 minutes en ébullition à une profondeur de 3 po	40	51	69
Instruments et ustensiles: Début avec une eau à 70°F, ébullition pendant 20 min: Profondeur 3,5 po: dim. 8 × 9 × 18 po Profondeur 3,5 po: dim. 9 × 20 × 10 po Profondeur 4 po: dim. 10 × 12 × 22 po Profondeur 4 po: dim. 12 × 16 × 24 po Profondeur 4 po: dim. 10 × 12 × 36 po Profondeur 10 po: dim. 16 × 15 × 20 po Profondeur 10 po: dim. 20 × 20 × 24 po	40	27 30 39 60 66 92 144	27 30 39 60 66 92 144
ÉQUIPEMENT DE BLANCHISSAGE Alambic sous-vide, par 10 gallons Table de détachage, tendeur de pantalons Machine à apprêter les robes, formeuse de pardessus, chacun Machine à apprêter les vestons, Susie Q, chacun Table d'apprêtage sous-vide, table à repasser à dôme 18 po., ch. Fers à repasser à vapeur, chacun	100	16 29 58 44 20 4	
Fers à repasser: 48 × 120 po, 1 cylindre 48 × 120 po, 2 cylindres 4 rouleaux, 100 à 120 po 6 rouleaux, 100 à 120 po 8 rouleaux, 100 à 120 po	100	248 310 217 341 465	
Équipement pour les chemises Poignet simple, col, empiècement No. 3, chacun Manche double Corps Plastron	100	7 13 29 44	
Salles de séchage Couverture Convoyeur, par boucle, env. Chariot, par porte, env. Rideau, 50 par 114 Rideau, 64 par 130 Cuiseur d'empois, capacité de 10 gallons Machine à apprêter, par 10 po de longueur, env. Presses, par 10 po de longueur, env. Fers à repasser maniables, par 10 po de longueur, env. Équipement pour les cols: machine à repasser les cols et les poignets Désodorisateur Machine à défroisser les draps (wind whip) Machine à défroisser les draps double (wind whip)	100	20 7 58 29 58 7 5 7 5 21 87 58 87	
Tambours de séchage, usage général autre source 36 po, par 10 po de longueur, env. 40 po, par 10 po de longueur, env. 42 po, par 10 po de longueur, env. Vorcone, 46 par 120 po Presses, vide central, 42 po Presses, vapeur, 42 po	100	29 38 52 310 20 29	

TAUX DE CONSOMMATION DE VAPEUR TYPES

TABLE 7

	Pression de service lb/po ² (eff).	Lb par h	
		En service	Maximum
MOULAGE DU PLASTIQUE Chaque 12 à 15 pi ² de surface de plateau	125	29	
PÂTES ET PAPIER Machines à onduler par 1 000 pi ² Pâte de bois, par 100 lbs de papier	175 50	29 372	
ÉQUIPEMENT DE RESTAURANT Tables à vapeur standard, par pi de longueur Tables à vapeur standard, par réservoir de 20 pi ² Bain-marie, par pi de longueur, 30 po de large Bain-marie, par réservoir de 10 pi ² Fontaines à café, par 10 gallons, eau d'appoint froide Coquetière à 3 compartiments Marmites à vapeur pour huître Marmite à vapeur pour palourde ou homard	5-20	36 29 13 29 13 13 13 29	
Chaudrons à chemise de vapeur Capacité de 10 gallons Chaudron pour bouillon, 25 gallons Chaudron pour bouillon, 40 gallons Chaudron pour bouillon, 60 gallons	5-20	13 29 44 58	
Chauffe-plats Par étagère de 100 pi ² Par étagère de 20 pi ³ Réchauds, par 20 pi ³ Marmite à vapeur pour légumes, par compartiment Marmite à vapeur pour pommes de terre Morandi Proctor, 30 comp., sans retour Évier pour marmite, jets de vapeur, usage moyen Polissoirs d'argent, Tahara	5-20	58 29 29 29 87 29 58	
MIROITERIE Tables à vapeur standard	102		
ATELIERS DE PNEUS Moules de camion, grande dimension Moules de camion, moyenne dimension Moules de passager Sections, par section Fer à vulcaniser, chacun	100	87 58 29 7 7	

CONVERSIONS COURANTES

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

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

PRÉFIXES SI

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

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

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

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po ²	A/po ²	ampère/cm ²	A/cm ²	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	2,928 × 10 ⁻⁴
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi ³	mètre cube	m ³	0,02832
pied cube	pi ³	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi ³ /m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F-32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/ mètre carré	lx, lm/m ²	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m ²	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	1,356 × 10 ⁻³
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	2,684 × 10 ⁶
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H ₂ 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 ²	3,183
lumen/pied carré	lm/pi ²	lumen/mètre carré	lm/m ²	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mile	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	kg/(Pa-s-m ²) (PERM)	5,721 × 10 ⁻¹¹
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	kg/(Pa-s-m ²) (PERM)	5,745 × 10 ⁻¹¹
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	1,4532 × 10 ⁻¹²
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	1,4593 × 10 ⁻¹²
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	4,536 × 10 ⁻⁴
livre/pied cube	lb/pi ³	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po ²	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi ²	mètre carré	m ²	0,09290
pouce carré	po ²	centimètre carré	cm ²	6,452
verge carré	v ²	mètre carré	m ²	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

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

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

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

Calcul de la vitesse de circulation de la vapeur

Feuille de travail 9-1

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Diamètre intérieur de la conduite de vapeur _____ m

Débit de vapeur (w) _____ kg/h

Volume spécifique de la vapeur (v_g) _____ m³/kg

Section de la conduite (A) = $\frac{3,142 \times (\text{diam. int.})^2}{4}$

= $\frac{3,142 \times (\quad)^2}{4}$

= _____ m²

Vitesse (V) = $\frac{w \times v_g}{A \times 3\,600}$

= _____

= _____ m/s

Pour les conduites principales de vapeur, la vitesse devrait se situer entre 40 et 60 m/s. Si la vitesse dépasse 75 m/s, il faut réduire le débit ou employer une conduite de plus grand diamètre.

Perte de vapeur dans l'atmosphère

Feuille de travail 9-2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Appareil: _____

Diamètre estimé de la fuite: _____ mm

Pression de vapeur: _____ kPa(effectifs)

Perte de vapeur: _____ kg/h (Table 3)

Durée de service: Nombre d'heures par jour: _____

Nombre de jours par semaine: _____

Nombre de semaines par année: _____

Coût de la vapeur: _____ \$/1 000 kg (À obtenir de l'opérateur du générateur de vapeur)

Vapeur perdue = _____ kg/h x _____ h/jour x _____ jours/sem. x _____ sem./an

= _____ kg/an

Économies potentielles en dollars:

= _____ kg/an x _____ \$/1 000 kg

= _____ \$ par année

Calcul de l'écart logarithmique moyen de température (LMTD)

Feuille de travail 9-3

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Utilisation du chauffage

Température initiale du liquide (T_2) _____ °C

Température finale du liquide (T_3) _____ °C

Température de la vapeur (T_1) _____ °C

Plus grand écart de température (DT_1) = $T_1 - T_2$
 = _____ - _____
 = _____ °C

Plus petit écart de température (DT_2) = $T_1 - T_3$
 _____ - _____
 = _____ °C

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

ou, = _____
 2,306 log _____
 = _____
 = _____ °C

Pertes de chaleur par la tuyauterie

Feuille de travail 9-4

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Diamètre de conduite: _____ NPS Longueur de conduite: _____ m

Température de conduite: _____ °C Heures de service
par année: _____ h

Type d'isolant proposé: _____ Épaisseur proposée: _____ mm

Sans isolant

Avec isolant

Perte de chaleur
par mètre: _____ Wh/(m·h)(Table 6)

_____ Wh/(m·h)(Module 1)

Perte de chaleur totale par heure:
(Perte de chaleur/mètre) x longueur

Perte de chaleur /mètre x longueur

_____ x _____
_____ Wh/h

_____ x _____
_____ Wh/h

Perte de chaleur annuelle:
Perte de chaleur/h x h/an

Perte de chaleur/h x h/an

_____ x _____
_____ Wh/an (1)

_____ x _____
_____ Wh/an (2)

Diminution des pertes de chaleur
grâce à la pose d'un isolant

= (1) - (2)

= _____ - _____

= _____ Wh/an

ou _____ Wh/an x 3,6 kJ/Wh

= _____ kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: _____ Date: _____
 Endroit: _____ Par: _____
 Appareil: _____ Heures de service par année: _____ h
 Superficie: _____ m² Type d'isolant proposé: _____
 Température du produit: _____ °C Épaisseur d'isolant proposée: _____ mm

Sans isolant

Avec isolant

Perte de chaleur: = _____ Wh/(m²·h)(Table 5) _____ Wh/(m²·h)(Module 1)

Perte de chaleur totale per heure:
Superficie x perte de chaleur

Superficie x perte de chaleur

_____ x _____
_____ Wh/h

_____ x _____
_____ Wh/h

Perte de chaleur annuelle:
Perte de chaleur/h x h/an

Perte de chaleur/h x h/an

_____ x _____
_____ Wh/an (1)

_____ x _____
_____ Wh/an (2)

Diminution des pertes de chaleur
grâce à la pose d'un isolant

= (1) - (2)

= _____ - _____

= _____ Wh/an

ou _____ Wh/an x 3,6 kJ/Wh

= _____ kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Quantité de chaleur contenue dans un écoulement d'eau
(Méthode approximative)
Feuille de travail 9-6

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Écoulement d'eau: _____

Débit d'eau (fw) _____ L/s

Température de l'eau à l'entrée(T_1) _____ °C

Température de l'eau à la sortie(T_2) _____ °C

Chaleur totale transmise Q (MJ/h)

$$\begin{aligned} Q &= fw \times (T_1 - T_2) \times 15 \\ &= \underline{\hspace{2cm}} \times (\underline{\hspace{1cm}} - \underline{\hspace{1cm}}) \times 15 \\ &= \underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

**Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau
rejetée pour préchauffer un autre courant d'eau**

(méthode approximative)

Feuille de travail 9-7

Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Courant d'eau rejetée: _____

- Débit d'eau (fw): _____ L/s
- Température actuelle de l'eau (T₁): _____ °C
- Température proposée de l'eau à sortie (T₂): _____ °C
(On doit déterminer cette température avec le fabricant de l'échangeur de chaleur.)
- Quantité de chaleur disponible Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$
$$= \underline{\hspace{2cm}} \times (\underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}}) \times 15$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou } \frac{\underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/h}}{3\,600}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/s}$$

Rendement de l'échangeur de chaleur proposé: _____ %
(à obtenir du fabricant de l'échangeur)

Quantité de chaleur disponible = _____ MJ/s x _____ %

$$= \underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/s} \quad (1)$$

**Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau
rejetée pour préchauffer un autre écoulement d'eau**

(méthode approximative)

Feuille de travail 9-7

Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Courant d'eau à réchauffer:

Débit d'eau (fw): _____ L/s

Température de l'eau à entrée (T₁): _____ °C

Température finale désirée (T₂) _____ °C

Quantité de chaleur nécessaire Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \times (\underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}}) \times 15$$

$$= -\underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou } \frac{\underline{\hspace{2cm}}}{3\ 600} \text{ MJ/h (Négliger le signe négatif)}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/s} \quad (2)$$

Diminution de l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer le courant d'eau à la température finale désirée:

$$= (2) \text{ MJ/s} - (1) \text{ MJ/s}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} - \underline{\hspace{2cm}}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \text{ MJ/s} \quad (3)$$

Besoins de vapeur pour chauffer de l'eau dans un échangeur de chaleur vapeur-eau

(méthode approximative)

Feuille de travail 9-8

Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Vapeur

Pression _____ kPa(eff.)

Température _____ °C

Enthalpie _____ kJ/kg (1)

Condensat

Pression _____ kPa(eff.)

Température _____ °C

Enthalpie _____ kJ/kg (2)

Chaleur disponible dans la vapeur

(1) - (2)

= _____ - _____

= _____ kJ/kg (3)

Rendement de l'échangeur de chaleur: _____ % (4)

Chaleur disponible pour chauffer l'eau = (3) x (4) kJ/kg

= _____ x _____

= _____ kJ/kg

ou _____ kJ/kg
1000 kJ/MJ

= _____ MJ/kg (5)

Vapeur nécessaire au chauffage
(sans récupération de chaleur)

= $\frac{\text{Feuille de travail 9-7 (2)}}{\text{Feuille de travail 9-8 (5)}}$

= _____ MJ/s
MJ/kg

= _____ kg/s (6)

**Besoins de vapeur pour chauffer de l'eau
dans un échangeur de chaleur vapeur-eau**
(méthode approximative)
Feuille de travail 9-8
Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Vapeur nécessaire au chauffage
(avec récupération de la chaleur) = Feuille de travail 9-7 (3)
= Feuille de travail 9-8 (5)
= _____ MJ/s
= _____ MJ/kg
= _____ kg/s (7)

Économies de vapeur dues
à la récupération de la chaleur = (6) - (7)
= _____
= _____ kg/s (8)

Heures de service
par année = _____ h (9)

Économies annuelles de vapeur
par récupération de la chaleur = (8) x (9) x 3 600
= _____
= _____ kg/an (10)

Coût de la vapeur = _____ \$ /1 000 kg (11)

Économies annuelles en dollars = (10) x (11)
= _____ x _____
= _____ \$ par année (12)

Coût installé de l'équipement
de récupération de la chaleur = _____ \$ (13)

Période de rentabilité = $\frac{(13)}{(12)}$
= _____
= _____ ans



