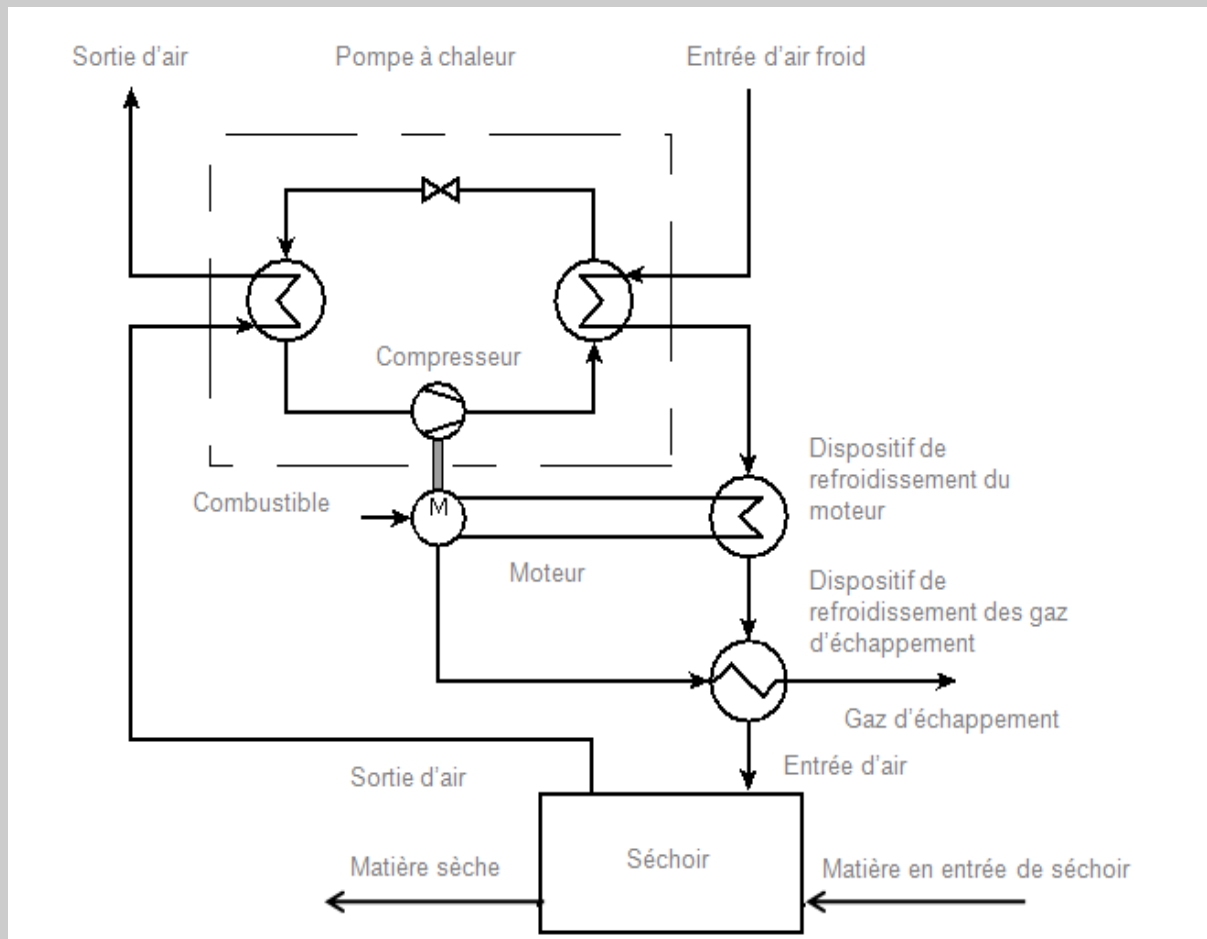


Efficacité énergétique - Section 7

Bhodan SOROKA

Laborelec
Janvier 2009



Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

Table des matières

<u>1. Introduction</u>	4
<u>2. Principes physiques</u>	4
<u>3. Installations de pompes à chaleur</u>	6
3.1 Cycle à compression fermé	7
3.1.1 Entraînement par moteur électrique.....	8
3.1.2 Entraînement par moteur diesel	9
3.2 Recompression mécanique de la vapeur (RMV).....	10
3.3 Recompression thermique de la vapeur (RTV).....	12
3.4 Pompes à chaleur à absorption.....	13
3.4.1 Pompes à chaleur à absorption, type I	13
3.4.2 Pompes à chaleur à absorption, type II (transformation de chaleur)	14
<u>4. Caractéristiques des pompes à chaleur</u>	14
4.1 Comparaison technique / économique des pompes à chaleur industrielles	14
4.2 Critères pour des applications possibles de pompes à chaleur	17
<u>5. Applications industrielles des pompes à chaleur</u>	18

Pompes à chaleur industrielles

www.leonardo-energy.org

5.1	Pompes à chaleur et opérations de séchage	18
5.2	Pompes à chaleur et opération de distillation.....	19
6.	Conclusions	22
7.	Références	22

1. Introduction

Les pompes à chaleur industrielles utilisant comme source chaude les déperditions d'énergie des process permettent de disposer de chaleur à une température plus élevée pour être utilisée dans des processus de chauffe ou de préchauffe, ou encore pour le chauffage de l'espace environnant. La définition exacte fait débat mais, de façon générique, on peut considérer que les pompes à chaleur représentent une méthode rentable d'amélioration de l'efficacité énergétique de process industriels et/ou de réduction de la consommation d'énergie primaire.

Les pompes à chaleur industrielles (PCIs) offrent de nombreuses possibilités aux divers process de fabrication ou d'exploitation. L'amélioration de l'efficacité énergétique est, sans aucun doute, l'argument le plus connu qui pèse en faveur de la mise en œuvre de PCIs, mais peu d'industriels ont pris la mesure des autres possibilités non exploitées qu'offrent les PCIs dans la résolution de problèmes de production et environnementaux. En effet, les PCIs peuvent représenter l'option la moins coûteuse pour supprimer les goulets d'étranglement d'un process de production. En fait, les PCIs sont également un des meilleurs moyens pour un site industriel de réduire de façon significative et rentable les émissions gazeuses associées.

2. Principes physiques

Une pompe à chaleur est fondamentalement un moteur thermique fonctionnant en cycle inverse.

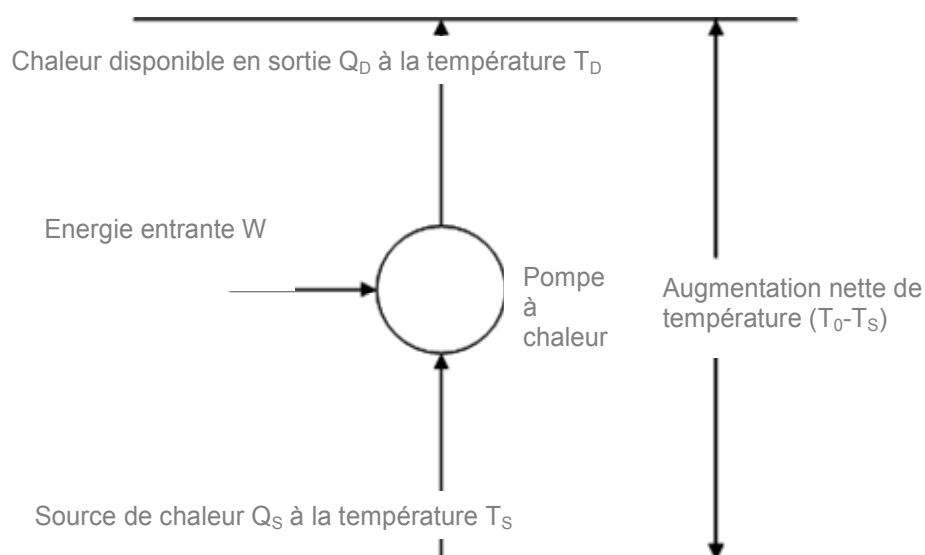


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur

Pompes à chaleur industrielles

D'après le premier principe de la thermodynamique, la quantité de chaleur fournie Q_D , à température de la source chaude T_D est reliée à la quantité de chaleur extraite Q_S , à la température de la source froide T_S et à la quantité d'énergie entrante W par l'équation :

$$Q_D = Q_S + W$$

Par comparaison avec les pompes à chaleur qui utilisent comme sources chaudes le sol ou l'eau pour assurer le chauffage de l'espace environnant, les pompes à chaleur industrielles (PCIs) présentent les avantages suivants :

- haut rendement assuré par des augmentations de température faibles et/ou des niveaux de température élevés ;
- longues périodes de fonctionnement annuel ;
- coûts d'investissement relativement bas du fait des grandes tailles et des faibles distances entre la source de chaleur et la source froide (dissipatrice d'énergie) ;
- la production de chaleur perdue et la demande de chaleur sont simultanées.

Malgré ces avantages, le nombre d'installation de pompes à chaleur dans l'industrie est négligeable comparé au nombre de pompes à chaleur installées pour des besoins de chauffage de l'espace environnant.

Note

Un coefficient de performance (COP) peut être défini comme :

$$COP = \frac{Q_D}{W}$$

Le coefficient de performance de Carnot

$$COP_C = \frac{T_D}{T_D - T_S}$$

représente le rendement maximum théorique possible pour un système de pompe à chaleur. En pratique les rendements atteints sont bien inférieurs au COP_C . Malheureusement, il est difficile de comparer les COP des différents types de PCI car ceux-ci sont très différents à performance économique équivalente.

Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

Si l'on compare différents systèmes de pompes à chaleur, alimentés par diverses sources d'énergie, le ratio d'énergie primaire (REP), défini ci-dessous, est mieux adapté

Cette expression peut être associée au ratio de rendement à partir de la relation :

$$REP = \eta.COP$$

où η est l'efficacité avec laquelle l'énergie primaire entrante est convertie en travail au niveau de l'arbre du compresseur.

3. Installations de pompes à chaleur

Une pompe à chaleur est fondamentalement un moteur thermique fonctionnant en cycle inverse.

Il existe différents types de cycles de pompes à chaleur pour les applications industrielles. Ces cycles peuvent être classés de diverses façons selon qu'ils sont de nature mécanique ou thermique, à compression ou à absorption, à cycles fermés ou ouverts. Les cycles les plus importants sont :

- cycle à compression fermé, entraînement par moteur électrique ;
- cycle à compression fermé, entraînement par moteur diesel ;
- recompression mécanique de la vapeur (RMV) ;
- recompression thermique de la vapeur (RTV) ;
- cycle d'absorption (pompage et transformation de la chaleur).

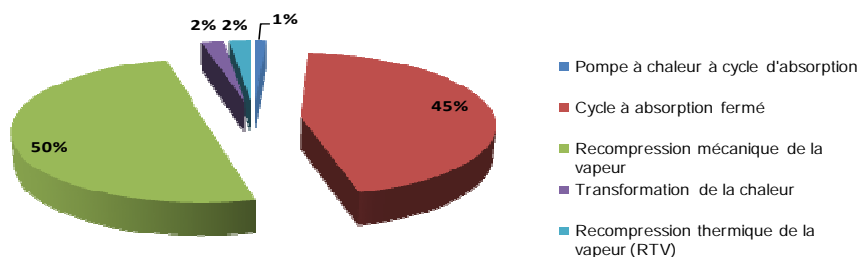


Figure 2 : classement des installations de pompes à chaleur selon le type de pompe mis en œuvre

3.1 Cycle à compression fermé

Le principe du cycle à compression fermé est illustré ci-dessous :

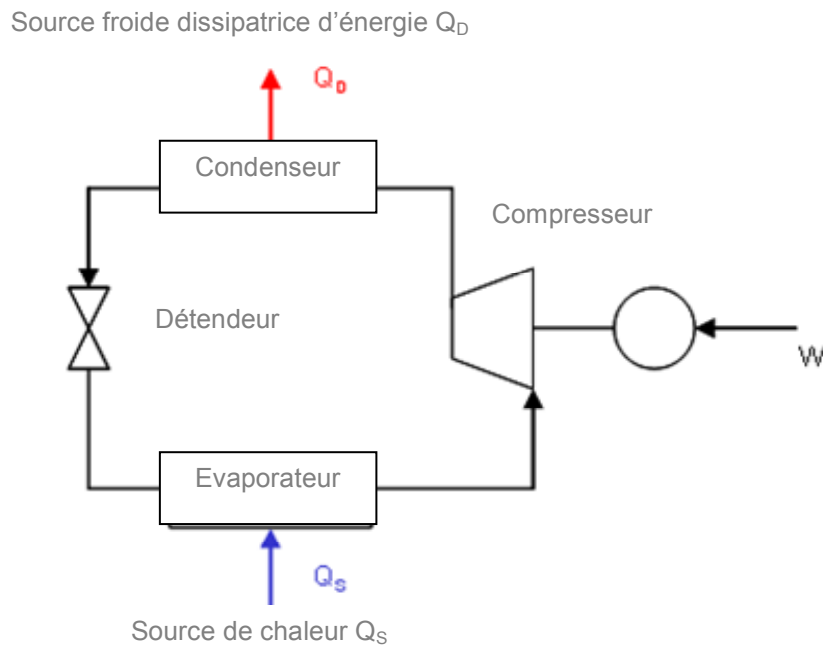


Figure 3 : cycle à compression fermé

Le COP est obtenu par l'expression

$$COP = \frac{Q_D}{W} \approx \frac{Q_D}{Q_D - Q_S} = \eta_c \cdot COP_C$$

où η_c est appelé le coefficient de performance de Carnot. Pour un type de cycle spécifique, le coefficient de performance de Carnot peut souvent être considéré comme constant pour T_D et T_S variables, sous réserve de faibles variations.

Pour augmenter le COP de ce type de cycle, il convient de procéder à des modifications à l'intérieur du cycle simple :

- un refroidissement du condensat après son passage dans le condenseur peut être réalisé par la source froide. Avec cette solution, la chaleur extraite de la pompe à chaleur est ainsi augmentée sans accroissement

Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

de l'apport d'énergie par le compresseur. En conséquence, le cycle est souvent très économique, au moins dans le cas où la source froide se présente sous forme liquide. Les améliorations typiques du COP et les possibilités ainsi obtenues sont d'environ 1% par degré Kelvin de refroidissement.

- une autre amélioration possible consiste à effectuer en deux temps l'expansion du condensat dans le condenseur. La partie vaporisée du fluide calorporteur est comprimée à la sortie de la première valve d'expansion, sans la faire passer à travers l'évaporateur, afin d'en accroître la température, ce qui a pour effet de diminuer le besoin en compression de la vapeur. Il en découle une augmentation du COP et des capacités de production. Cette solution connue sous le nom d'*économiseur*, est souvent utilisée dans les applications industrielles. Le cycle nécessite alors un compresseur à deux temps.
- une solution sensiblement équivalente est obtenue par un *refroidisseur intermédiaire flash*, pour laquelle la quantité de vapeur à comprimer est augmentée et l'augmentation de température est réduite. Ceci est réalisé en utilisant le surplus de chaleur de la vapeur en provenance du premier compresseur afin d'évaporer une partie du liquide calorporteur après la première phase d'expansion. Ce type de cycle fournit théoriquement de meilleurs résultats qu'un cycle à *économiseur*. Il présente le désavantage de faire apparaître une chute de pression dans le refroidisseur intermédiaire, et le risque de production de gouttes liquides dans le second compresseur.
- lorsque des augmentations de température élevées sont requises, des solutions de type cycles en cascade sont envisageables. Ces solutions permettent d'utiliser différents fluides calorporteurs à chaque étape, et des rapports de pression raisonnables sont obtenus dans chaque compresseur. Le couplage en série de pompes à chaleur présente un intérêt lorsque le gradient de température entre les sources froide et chaude est important.

Trois différents types de compresseurs sont utilisés pour les pompes à chaleur à cycle à compression fermé : les compresseurs à piston, les compresseurs à vis et les turbocompresseurs. Des compresseurs à piston sont mis en œuvre pour des systèmes dont la puissance d'extraction de chaleur atteint environ 500 kW ; viennent ensuite les compresseurs à vis pour des puissances allant jusqu'à 5 MW environ ; et enfin les turbocompresseurs pour les puissances élevées (2 MW environ). Le COP peut être déterminé approximativement à partir du COP_c et du rendement η_c . Le rendement varie selon la nature du fluide calorporteur, mais les valeurs typiques sont de 0,448 pour un compresseur à piston, 0,55 pour un compresseur à vis et 0,64 pour un turbocompresseur.

3.1.1 Entraînement par moteur électrique

L'entraînement du compresseur est le plus souvent assuré par un moteur électrique dont le rendement varie entre 70 et 97 % selon sa taille et la charge. Il n'est pas rare que les

applications d'échange de chaleur industrielles travaillent à des rendements supérieurs à 90 % depuis la pleine charge jusqu'à moins de la moitié de la charge nominale.

La figure 3 ci-après montre l'évolution des valeurs typiques de COP en fonction de la température d'évaporation pour différentes valeurs de température de condensation et différents types de compresseur, pour un cycle à compression fermé, avec économiseur et entraînement par moteur électrique.

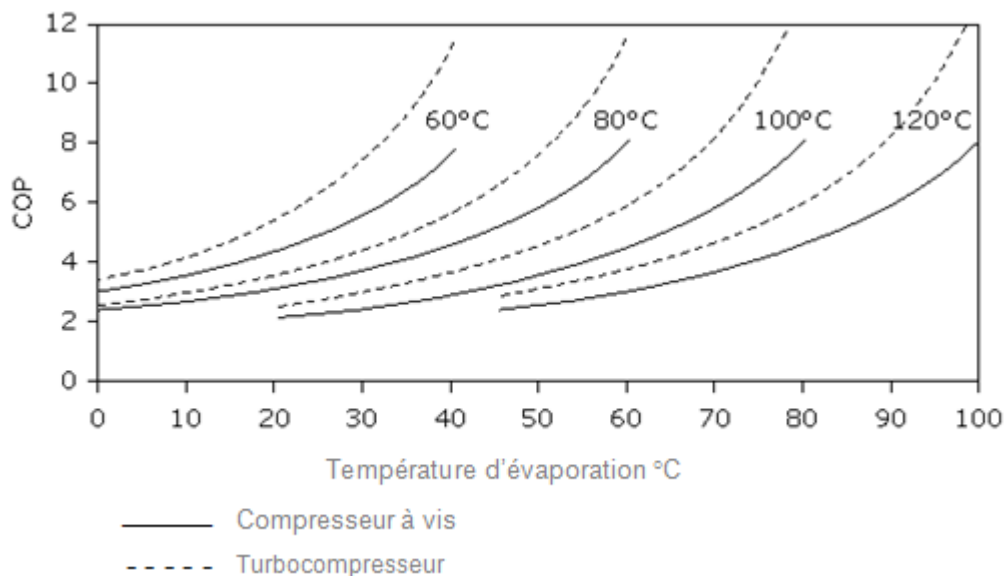


Figure 4 : valeurs de COP en fonction des caractéristiques de la pompe à chaleur

Il apparaît que le turbocompresseur est plus efficace que le compresseur à vis, et ce d'autant plus que l'augmentation de température est faible.

3.1.2 Entraînement par moteur Diesel

Lorsqu'un moteur diesel est utilisé pour entraîner le compresseur, la déperdition de chaleur au niveau du moteur peut être également utilisée pour réchauffer la source froide. La chaleur provenant du moteur, et exploitable dans les applications industrielles, est disponible au niveau des gaz d'échappement ainsi que dans le liquide de refroidissement pour les applications fonctionnant au voisinage de 100°C. Le schéma ci-dessous illustre la façon dont cette chaleur est récupérée.

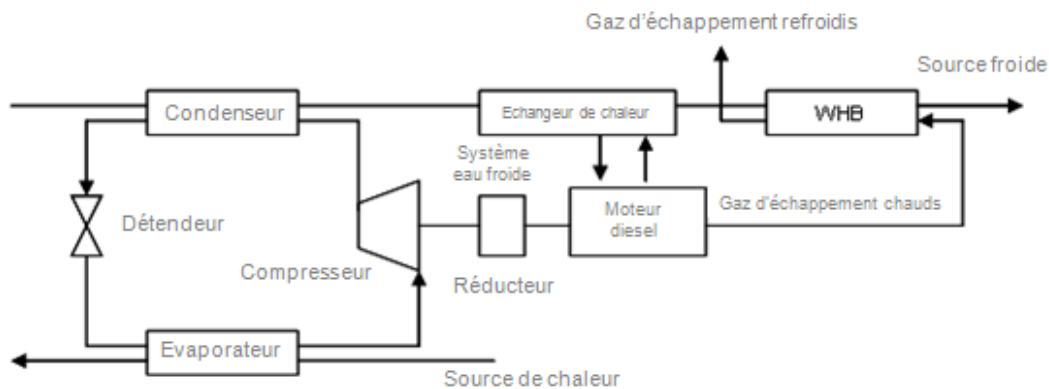


Figure 5 : pompes à chaleur entraînées par moteur diesel

Le rendement mécanique pour des moteurs diesel récents et adaptés à l'entraînement des pompes à chaleur est supérieur à 0,4 (il peut atteindre jusqu'à 0,45).

Le COP d'une pompe à chaleur entraînée par un diesel peut être déduit du COP de la pompe à chaleur, à partir de la formule suivante :

$$COP = \eta_m \cdot COP_{PC} + (\eta_{tot} - \eta_m)$$

Où

COP_{PC}	COP intrinsèque de la pompe à chaleur prenant en compte le rendement électrique
η_m	rendement mécanique du moteur diesel
η_{tot}	rendement total du moteur diesel

3.2 Recompression mécanique de la vapeur (RMV)

La technique de recompression mécanique de la vapeur consiste à augmenter la pression et, par voie de conséquence, la température des gaz rejetés, afin de permettre la récupération de leur chaleur. Le type le plus courant de vapeur compressée par RMV est la vapeur d'eau, telle que illustrée par la figure ci-dessous.

Il existe plusieurs configurations de systèmes possibles. Le plus usuel est de type semi-ouvert, où la vapeur est directement compressée (également connu sous le nom de

système direct). Après compression, la vapeur est condensée dans un échangeur de chaleur où celle-ci est fournie à la source froide. Cette technique à RMV est très utilisée dans les applications d'évaporation.

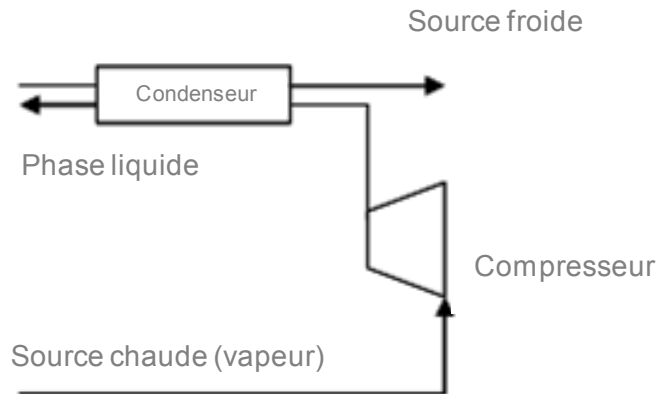


Figure 6 : recompression mécanique de la vapeur

L'autre type de système semi-ouvert n'a pas de condenseur mais possède un évaporateur. Cette configuration moins fréquente peut être utilisée pour vaporiser un flux à température plus élevée issu du procédé, avec un apport d'énergie mécanique et une source froide à plus basse température.

La figure ci-dessous montre comment le COP évolue en fonction de l'écart de température, dans un système à RMV utilisant un compresseur à vis. Il y apparaît que les COP obtenus par les systèmes à RMV sont très élevés et dépendent fortement de l'écart de température.

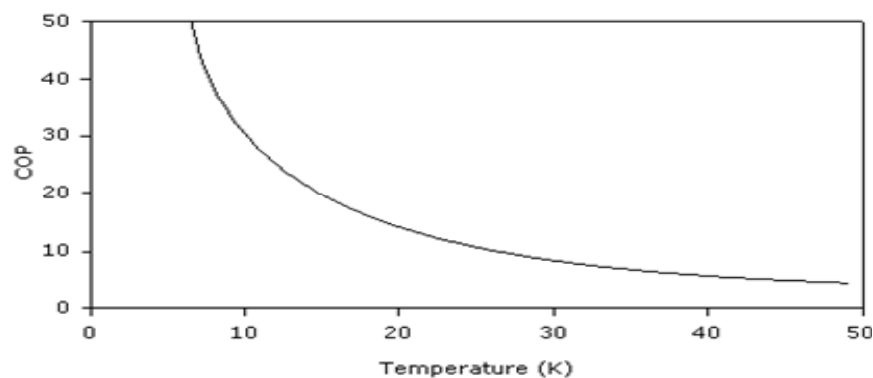


Figure 7 : COP fonction de l'augmentation de température

Le choix du type de compresseur est de très loin le facteur le plus important dans la conception des systèmes à RMV. Il s'agit soit de turbocompresseurs, soit de compresseurs volumétriques.

Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

3.3 Recompression thermique de la vapeur (RTV)

Avec les systèmes de type RTV, le pompage de la chaleur est réalisé à l'aide d'un éjecteur et de vapeur à haute pression. Dans ce cas, l'ensemble est simplement appelé éjecteur. Le principe en est illustré ci-dessous. Contrairement à un système de type RMV, la pompe à chaleur à RTV est entraînée par la chaleur sans apport d'énergie mécanique. Comparée à un système à RMV, cette méthode ouvre de nouveaux champs d'application, particulièrement dans les cas où la différence de prix entre l'énergie fossile et l'énergie électrique est importante.

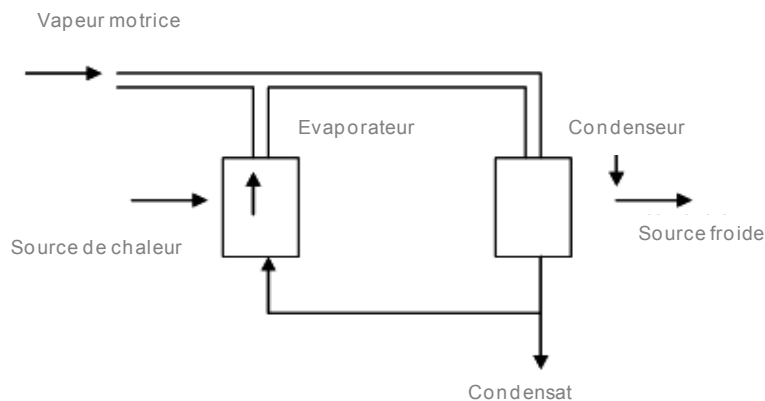


Figure 8 : COP fonction de l'augmentation de température

La méthode RTV est applicable à toutes les tailles industrielles. Les équipements d'évaporation en sont le champ d'application usuel.

Le COP est défini par la relation entre la chaleur de condensation de la vapeur issue de la RVT et celle injectée avec la vapeur assurant le déplacement. La figure ci-dessous montre son évolution en fonction de l'augmentation de température, défini comme la différence entre les températures de condensation et d'évaporation. On remarquera les modestes résultats obtenus.

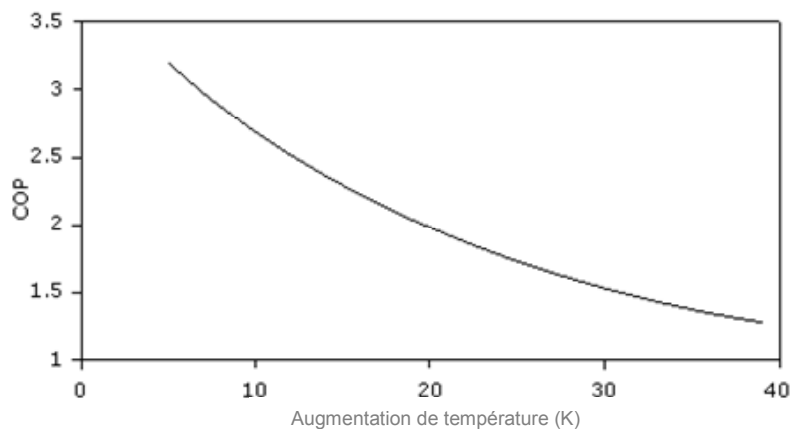


Figure 8 : COP fonction de l'augmentation de température

3.4 Pompes à chaleur à absorption

Les cycles des pompes à chaleur à absorption exploitent la propriété suivante : le point d'ébullition d'un mélange est plus élevé que le point d'ébullition correspondant d'un fluide caloporteur pur et volatile. Par conséquent, il faut utiliser un liquide caloporteur constitué d'un mélange dont un des composants est volatile et l'autre non. Le mélange le plus utilisé dans les applications industrielles est une solution aqueuse de bromure de lithium (LiBr/H₂O).

Le cycle d'absorption de base se présente sous deux configurations possibles : pompe à absorption de chaleur (PAC, Type I) et transformation de chaleur (PAC, Type II), qui conviennent dans différents cas. La différence entre ces cycles est le niveau de pression dans les quatre échangeurs de chaleur principaux (*évaporateur, absorbeur, désorbeur et condenseur*), ce qui influe sur les niveaux de température des flux de chaleur.

3.4.1 Pompes à chaleur à absorption, type I

Au cours d'un cycle de pompe à chaleur à absorption, la chaleur passe d'un niveau de température bas à un niveau de température moyen, grâce à un apport de chaleur à une température très élevée.

Trois paramètres sont importants :

- le coefficient de performance (COP) détermine la quantité de chaleur disponible en sortie comparé à la quantité de chaleur apportée ;
- l'augmentation possible de température pouvant être atteinte à différentes valeurs pour les 3 niveaux de température ;
- le niveau de température maximal pour lequel de la chaleur peut encore être produite.

Le facteur limitant étant le risque de cristallisation. Les valeurs des 3 paramètres listées ci-dessus sont disponibles pour 2 fluides caloporteurs dans le tableau ci-dessous.

Fluide caloporteur	COP	Augmentation maximale de température (°C)	Température maximale produite (°C)
LiBr/H ₂ O	1.6-1.7	45-50	100
Alktrate	1.6-1.7	50	200

Tableau 1 : caractéristiques des pompes à chaleur à absorption

Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

D'après les informations du tableau ci-dessus, il est clair qu'une pompe à chaleur utilisant du LiBr/H₂O ne peut être utilisée que pour des besoins en chaleur inférieurs à 100°C, du fait de la limite en température de sortie.

Cela limite fortement l'utilisation pour les applications industrielles. La valeur de COP décroît à 1,3 ou 1,4 lorsque le rendement de la chaudière est pris en compte.

3.4.2 Pompes à chaleur à absorption, Type II (transformation de chaleur)

Dans le cycle la chaleur est apportée à un niveau moyen de température. Une partie de cette chaleur est transformée à un niveau élevé de température tandis qu'une autre partie est libérée à un niveau bas de température. La transformation de chaleur est utilisée pour récupérer la chaleur perdue d'un process industriel à un niveau moyen de température, remplaçant ainsi l'apport de chaleur primaire.

Pour les applications industrielles, le seul fluide caloporteur utilisé est le LiBr/H₂O.

Comme pour les pompes à chaleur à absorption, 3 paramètres sont importants :

- le coefficient de performance (COP) détermine la quantité de chaleur à haut niveau de température disponible en sortie comparé à la quantité de chaleur récupérée à un niveau moyen de température (typiquement de l'ordre de 0,445 – 0,49). A peu près la moitié de la chaleur perdue peut être transformée en chaleur à haut niveau de température.
- la température maximale de fonctionnement est de 150°C, ce qui implique, notamment, que de la vapeur basse pression peut être produite.

4. Caractéristiques des pompes à chaleur

4.1 Comparaison technique / économique des pompes à chaleur industrielles

Chaque type de pompe à chaleur est optimale pour une gamme de température donnée.

Lorsque, pour différents types de pompe à chaleur, les gammes de température de travail se recouvrent, il est possible d'établir des comparaisons.

Le tableau ci-dessous regroupe les limites techniques de fonctionnement des différents types de pompe à chaleur, ainsi que des coûts approximatifs pour 3 tailles de pompes. D'après les informations du tableau, il est possible de sélectionner le type de pompe approprié pour une configuration industrielle donnée.

Pompes à chaleur industrielles

Type de pompe à chaleur industrielle	Température maximale de la source froide [°C]	Augmentation maximale de température [°C]	Coûts d'installation (€/kW _{chaleur disponible en sortie})		
			0.5 MW chaleur disponible en sortie	1 MW chaleur disponible en sortie	4 MW chaleur disponible en sortie
Moteur électrique CCC	120	80	450-700	320-550	240-420
Moteur Diesel CCC	130	90	520-770	390-620	300-490
RMV	190	90	Non disponible	380-450	135-220
RTV	150	40	Non disponible	210-270	100-120
Absorption, Type I (LiBr/H ₂ O)	100	50	340-390	300-350	250-290
Transformation de chaleur (LiBr/H ₂ O)	150	60	800-900	720-830	590-680

Tableau 2 : Comparaison technique / économique pour différents types de pompes à chaleur

Il existe de nombreuses méthodes permettant d'évaluer les options d'investissement et de procéder à des comparaisons économiques. Dans l'industrie, la méthode de calcul du temps de retour sur investissement est bien connue, et souvent utilisée pour une comparaison rapide des différentes alternatives.

Partant du principe que la chaleur efficace produite par la pompe à chaleur vient en remplacement d'une chaudière existante (rendement = η_b). La durée de retour sur investissement pour tout projet PCI peut être calculée comme suit :

$$PBP = \frac{I}{\left(\frac{B_{combustible}}{\eta_b} - \frac{B_{drive}}{COP}\right) \cdot 8760 - m_{IHP}}$$

Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

Où

PBP	durée de retour sur investissement [en années d'exploitation]
I	coût d'investissement du projet [unité monétaire/kW _{chaleur disponible} en sortie]
B _{combustible}	Prix des combustibles [unité monétaire/kWh]
B _{drive}	Coût de l'énergie motrice pour la pompe à chaleur [unité monétaire/kWh]
η_b	Rendement de l'équipement de production de chaleur existant (i.e. chaudière)
COP	COP de la pompe à chaleur industrielle
m _{IHP}	Coût annuel de maintenance de la pompe à chaleur [coût/kW _{chaleur disponible en sortie}]

Les durées acceptables de retour sur investissement varient selon les différents pays et les différents secteurs industriels, et dépendent aussi du type d'installation. Toutefois, on considère que des temps de retour sur investissement acceptables se situent entre 2 et 3 ans.

D'après les comparaisons effectuées, nous pouvons tirer un certain nombre de conclusions :

- Si les températures de travail sont telles que les pompes à chaleur de type RMV et RTV peuvent être utilisées, il apparaît alors que, parmi toutes les technologies de pompes à chaleur, ce sont les technologies RMV et RTV qui offrent les retours sur investissement les plus courts, et sont même en position de concurrence. Sauf en période de faible coût des énergies fossiles, les durées de retour sur investissement sont intéressantes.
- Le temps de retour sur investissement des projets de pompes à chaleur à entraînement par moteur électrique dépend fortement du prix de l'électricité et du COP (augmentation de température). Si le COP est inférieur à 4, le projet n'est alors pas rentable alors que pour des valeurs de COP proches de 6, il est possible que l'installation soit économiquement viable.
- D'après la définition du temps de retour sur investissement, il paraît évident qu'il convient d'étudier chaque cas afin de définir quelle solution présente le temps de retour sur investissement le plus court, en prenant en compte non seulement le coût propre de la pompe à chaleur, mais aussi le type d'installation et l'ensemble des coûts annexes.

4.2. Critères pour des applications possibles de pompes à chaleur

La première étape pour toute application de nature PCI est d'identifier toutes les solutions techniques pouvant être mises en place et d'en évaluer les rentabilités respectives.

Dans le cas d'applications simples, pour lesquelles le process faisant intervenir les pompes à chaleur ne compte qu'un nombre réduit de flux avec une source de chaleur et une source froide dissipatrice d'énergie, il n'est alors pas nécessaire de procéder à une évaluation minutieuse. Seules les informations concernant la source de chaleur et la source froide sont importantes pour estimer la faisabilité du projet et identifier le type de pompe à chaleur à mettre en place. Les paramètres importants sont alors :

- les températures de la source de chaleur et de la source froide,
- les tailles (en terme de charge de chaleur) de la source chaude et de la source froide,
- les paramètres physiques de la source chaude et de la source froide, tels que l'état et l'emplacement.

Les températures des sources froide et chaude définissent quels types de pompes à chaleur peuvent être mis en place pour une application donnée.

Les limites approximatives d'exploitation des différents type de PCI sont résumées dans le tableau ci-dessus. Dans le tableau ci-dessous sont portées, pour chaque type de PCI, le ratio de chaleur entre la source chaude et la source froide (valeur q).

Type de PCI	$q = \frac{\text{Chaleur source chaude}}{\text{Chaleur source froide}}$
CCC, moteur électrique	1,1-1,5
CCC, moteur diesel	1,3-3
RMV	1,1-1,4
RTV	1,7-10
Absorption, Type I (LiBr/H ₂ O)	2,5
Transformateur de chaleur (LiBr/H ₂ O)	0,5

Tableau 3 : valeur q des pompes à chaleur industrielles

D'après les informations regroupées dans ces 2 tableaux, il est possible d'identifier quels types de PCI peuvent être mis en œuvre, et de procéder à une évaluation technique et économique.

5. Applications industrielles des pompes à chaleur

5.1 Pompes à chaleur et opération de séchage

Les usines pétrochimiques utilisent un grand nombre de processus de séchage afin d'extraire des substances condensables (telles que la vapeur d'eau) de substances non condensables (telles que l'air). Les pompes à chaleur sont déjà largement implantées dans les industries du bois et du papier.

Contrairement aux séchoirs traditionnels, les PCI permettent de ne plus extraire le solvant en phase vapeur avec un flux d'air, mais condensent, en première étape, le solvant par contact de surface avec l'évaporateur froid, et l'extraient ensuite en phase liquide. Grâce à ce procédé, la chaleur de condensation peut être récupérée.

Il est possible de réduire les besoins en énergie primaire. Des études montrent qu'il existe des conditions de travail optimales pour les pompes à chaleur à des fins de séchage. Des comparaisons ont été établies entre plusieurs schémas de flux, afin d'évaluer les réductions de consommation en énergie primaire en remplaçant les séchoirs conventionnels par des pompes à chaleur.

Si l'évaporateur d'une pompe à chaleur est installée dans le conduit d'évacuation et le condenseur au niveau d'une prise d'air froid, il devient alors possible de récupérer la chaleur efficace de l'air évacué ainsi que la chaleur de condensation latente de la vapeur d'eau contenue dans l'air évacué.

Ce type de montage est appelé « pompe à chaleur de récupération ».

Les performances d'une pompe à chaleur de récupération peuvent être améliorées si un moteur thermique est utilisé pour l'entraînement du compresseur. Dans ce cas, la chaleur dégagée du moteur thermique peut être utilisée pour chauffer le flux d'air entrant (voir figure ci-dessous).

Le rendement du processus peut être encore augmenté grâce à un échange thermique entre l'entrée et la sortie d'air.

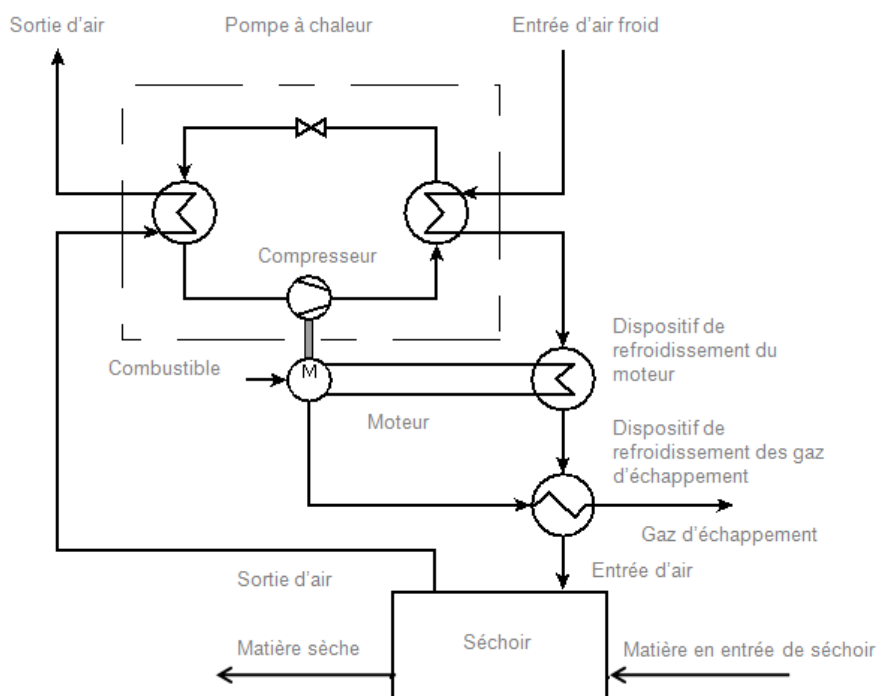


Figure 10 : pompe à chaleur de récupération avec utilisation de la chaleur dégagée par le moteur thermique

5.2 Pompes à chaleur et opération de distillation

Les quantités d'énergie importantes nécessaires aux process de distillation peuvent être souvent réduites grâce à l'utilisation de pompes à chaleur afin de récupérer la chaleur du condenseur et la fournir au rebouilleur.

Il convient pour cela d'augmenter par compression la température de la chaleur récupérée au niveau du condenseur et de la porter au niveau de température du rebouilleur. Des études ont été menées afin de définir des règles permettant de déterminer dans quelles conditions il est économiquement avantageux de mettre en œuvre des pompes à chaleur dans les process de distillation.

Le système considéré consiste en une colonne, un rebouilleur et un condenseur. Dans tous les cas, la vapeur d'eau est utilisée pour chauffer le rebouilleur. La pression ainsi que la température de condensation sont définies à partir de la température du rebouilleur, tandis que le support de refroidissement choisi dépend de la température de condensation maximale.

L'alternative la plus simple aux conceptions conventionnelles incluant la mise en œuvre de pompes à chaleur consiste à remplacer le chauffage par vapeur du rebouilleur par un réfrigérant condensable à haute pression, et de remplacer le fluide de refroidissement par un réfrigérant évaporable à basse pression.

Efficacité énergétique

www.leonardo-energy.org

Le rebouilleur se comporte alors comme une pompe à chaleur et la colonne de condensation comme l'évaporateur de la pompe à chaleur.

Ce type de pompe à chaleur est représenté ci-dessous. La colonne est la même que pour le système conventionnel, mais les échangeurs de chaleur sont très différents.

Le ratio de la chaleur « pompée » au rebouilleur au travail de compression requis peut être exprimé comme :

$$COP = \frac{\dot{Q}_R}{W} = \eta_{tot} \frac{T_3}{T_3 - T_1}$$

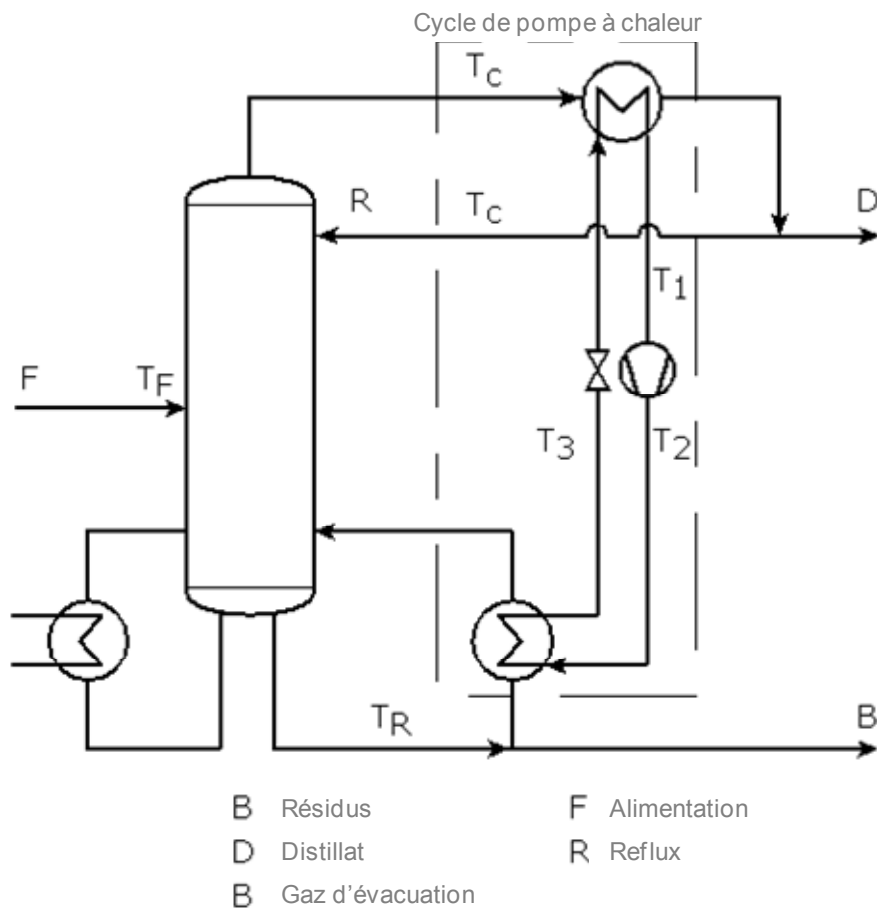


Figure 10 : unité de distillation avec cycle fermé de pompe à chaleur

Pompes à chaleur industrielles

Où η_{tot} représente le rendement combiné du compresseur et du fluide. Si le réfrigérant est correctement choisi, les valeurs de T2 et T3 du diagramme de flux d'une usine de distillation conventionnelle seront pratiquement égales et la formule s'écrira alors :

$$\frac{\dot{Q}_R}{W} = \frac{\eta_{tot} (T_R + \Delta T_R)}{T_R - T_C + (\Delta T_R + \Delta T_C)}$$

La valeur de T_R au numérateur a peu d'effet tandis que l'expression ($\Delta T = \Delta T_R + \Delta T_C$) au dénominateur est un paramètre critique de performance de la pompe à chaleur.

Afin de réduire le travail de compression nécessaire pour récupérer la chaleur, il convient de minimiser ΔT .

Toutefois, pour minimiser ΔT , il convient d'augmenter la surface de l'échangeur, ce qui se traduit par une augmentation du coût.

Pour de nombreux systèmes de pompes à chaleur, la rentabilité économique n'est valable que pour des gammes de variation de ΔT très limitées.

Les résultats de comparaison entre une colonne conventionnelle et une colonne associée à une pompe à chaleur de type RMV sont fournies dans le tableau suivant.

		Usine de distillation conventionnelle	Colonne avec pompe à chaleur
Données de conception	Diamètre de colonne	2,5 m	
	Poids de l'ensemble	12 m SULZER Packing Type BX	
	Pression en tête / Température	175 mbar/124°C	
	Pression en bas	199 mbar/135.5°C	
	Pression de colonne	24 mbar	
	Taux d'ébullition	36 000 kg/h	
	Chaleur de vaporisation (en tête)	74,5 kcal/kg	
Energie	Besoins énergétiques pour l'ébullition (kW)	3 120	-
	Puissance du turbo-souffleur (kW)	-	310
	Puissance du rebouilleur (kW)	-	23
	Puissance totale (kW)	3 120	333
Coûts énergétiques	Coût de la vapeur (€/h) (25€/T)	140	1
	Coût de l'énergie électrique (0,06€/T)		18,6
	Coût total de l'énergie (€/h)	-	19,6
	Coût total de l'énergie (€/y)	1125000	157 500
	Coût de l'énergie consommée (%)	100	14

Tableau 4 : étude de cas de pompes à chaleur utilisées pour des process de distillation

6. Conclusions

La rentabilité d'un projet de pompe à chaleur dépend fortement du mode d'intégration de la pompe à chaleur au process. Il convient donc d'analyser toutes les alternatives techniquement réalisables d'intégration de pompes à chaleur, en prenant en compte à la fois les caractéristiques de la pompe à chaleur, mais aussi les caractéristiques propres au process. Une pré-étude a pour but de retenir un nombre limité d'installations alternatives possibles sur la base desquelles des calculs de rentabilité plus élaborés peuvent être effectués.

Les modèles de pompes à chaleur disponibles dans le commerce ont tous des caractéristiques de fonctionnement différentes et plusieurs gammes de température de fonctionnement.

Pour certains modèles, ces gammes de température se recouvrent. Dans ce cas, et pour une application donnée, plusieurs modèles de pompes à chaleur sont appropriés, et il convient alors de procéder à des études comparatives sur les plans technique, économique et pratique afin de définir la meilleure solution.

Pour tous les différents modèles, la durée de retour sur investissement est directement proportionnelle aux coûts d'installation. Il conviendra donc, lors de la phase d'étude, de considérer toutes les possibilités permettant de réduire les coûts d'installation.

7. Références

- [1] Scientific rapport, Economische aspekten van de toepassing van de warmtepomp in de Belgische industrie, KU Leuven, September 1982.
- [2] F. Moser and H. Schnitzer, Heat Pumps in Industry, Elsevier Science Publishers, New York, 1985.
- [3] Industrial Heat Pumps, CADDET Energy Efficiency, Sittard, 1997
- [4] Handboek Industriële Warmtepompen, Kluwer Techniek, Deventer, 1998