Applications de grandes pompes à chaleur dans les systèmes de chauffage urbain en Suède

Autor(en): **Dahlroth, B. / Berghe, J.-O.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **75 (1984)**

Heft 4

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904364

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

2.21 ✓
2.24 ✓

Applications de grandes pompes à chaleur dans des systèmes de chauffage urbain en Suède

B. Dahlroth et J.-O. Berghe

Plusieurs grandes pompes à chaleur sont actuellement en service dans des systèmes de chauffage urbain et d'autres sont en construction. La puissance totale installée des pompes à chaleur peut être estimée à 500 MW ou plus pour 1990, avec une production de chaleur d'au moins 2,5 TWh. Cela correspond en gros à 5% des besoins thermiques totaux à cette époque. La chaleur industrielle perdue et les eaux usées sont les sources de chaleur qui conviennent le mieux. Tous les projets à grandes pompes à chaleur reposent actuellement sur le processus de compression.
Les énergies hydraulique et nucléaire domineront la production suédoise jusqu'à la fin des années huitante, conduisant à un prix favorable de l'énergie électrique. Les moteurs électriques représentent donc la solution la plus économique pour l'entraînement des compresseurs.

In Fernwärmesystemen sind zurzeit verschiedene grosse Wärmepumpen in Betrieb und weitere sind im Bau. Für 1990 kann mit einer insgesamt installierten Leistung der Wärmepumpen von 500 MW gerechnet werden, die mindestens 2,5 TWh Wärme erzeugen werden. Dies entspricht rund 5% des gesamten Wärmebedarfs in diesem Jahr. Industrielle Verlustwärme und Abwässer sind die am besten geeigneten Wärmequellen. Alle Projekte mit grossen Wärmepumpen basieren auf dem Kompressionsprinzip.
Hydraulische und nukleare Energie werden in der schwedischen Elektrizitätsproduktion bis zum Ende der achtziger Jahre dominieren, was zu günstigen Strompreisen führt. Elektromotoren sind daher eine der wirtschaftlichsten Lösungen für den Antrieb der Kompressoren.

Adresse de l'auteur
B. Dahlroth, J.-O. Berghe, Kraftverksföreningens utvecklingsavdelning, VAST, Birger Jarlsgatan 41 A, P.O. Box 1704, Stockholm, Schweden

1. Sources de chaleur disponibles pour les grandes pompes à chaleur

L'accès à une source de chaleur appropriée et d'une capacité suffisante est la première condition à satisfaire lors de l'étude d'une usine à grande pompe à chaleur (PAC). Il est souhaitable de disposer d'une température aussi élevée que possible, variant sur une faible plage. Il est en outre favorable que l'énergie de la source de chaleur soit abondante en hiver, quand les besoins thermiques culminent. La distance entre la source de chaleur et la charge thermique ne doit pas être trop grande, et il convient d'éviter en pratique des influences défavorables de l'environnement sur la source de chaleur. Quelques sources de chaleur intéressantes sont énumérées ci-dessous:

- réfrigérants de processus industriels
- eaux des réseaux d'égouts urbains
- eau de mer, eau de lac et eaux courantes
- eaux souterraines
- air ambiant

Les réfrigérants des processus industriels peuvent être divers types de gaz ou liquides. Le niveau de température est relativement élevé dans de nombreux cas, et des échangeurs de chaleur permettent parfois une utilisation directe. La fourniture d'énergie peut être régulière ou intermittente selon le type de processus. Des processus industriels continus, tels que raffineries de pétrole ou usines de pâte à papier, sont particulièrement avantageux. Une source de chaleur à niveau de température élevé permet d'obtenir un coefficient de performance annuel élevé, qui se traduit par un haut degré de conservation de l'énergie. L'utilisation d'une telle source de chaleur impose normalement une certaine restructuration du processus, affectant les coûts de production de la chaleur. Il convient de tenir compte du fait que la source de chaleur risque d'être perdue si l'entreprise industrielle ferme ses portes ou change le processus.

Les eaux usées sont utilisées comme source de chaleur dans nombre de projets actuels à grande PAC en Suède. De nombreux centres urbains disposent d'un réseau d'égouts et les stations d'épuration sont souvent relativement proches des charges thermiques. Une diminution de la température des eaux usées perturberait le traitement biologique. Afin de l'éviter et pour réduire les risques d'un encrassement important des échangeurs de chaleur, la plupart des projets PAC utilisent les eaux d'égouts après leur épuration. La plage de température typique des eaux usées est comprise entre +8 °C et +18 °C, la valeur inférieure apparaissant souvent pendant la période de fonte des neiges au printemps. Une attention particulière doit être accordée aux risques de corrosion lors du choix des matériaux des évaporateurs, car les eaux usées peuvent contenir des produits chimiques corrosifs.

L'eau de mer, de lac ou de rivière est habituellement disponible en grandes quantités, mais sa température est relativement faible en hiver. Les conditions sont plus favorables pour l'eau de mer le long de la côte occidentale de la Suède, où des températures de +5 à +6 °C ont été enregistrées dans des courants profonds, même quand la surface est recouverte de glace. Outre les risques de corrosion, il est nécessaire d'étudier la protection des tubes et des surfaces d'échangeurs de chaleur contre l'encrassement, en particulier par des algues, moules, etc. La température de l'eau profonde des lacs peut être de +2 à +3 °C en hiver et l'extraction d'une quantité notable de chaleur impose la circulation de grandes quantités d'eau du lac à travers l'évaporateur. Les problèmes de corrosion et d'encrassement sont moins importants

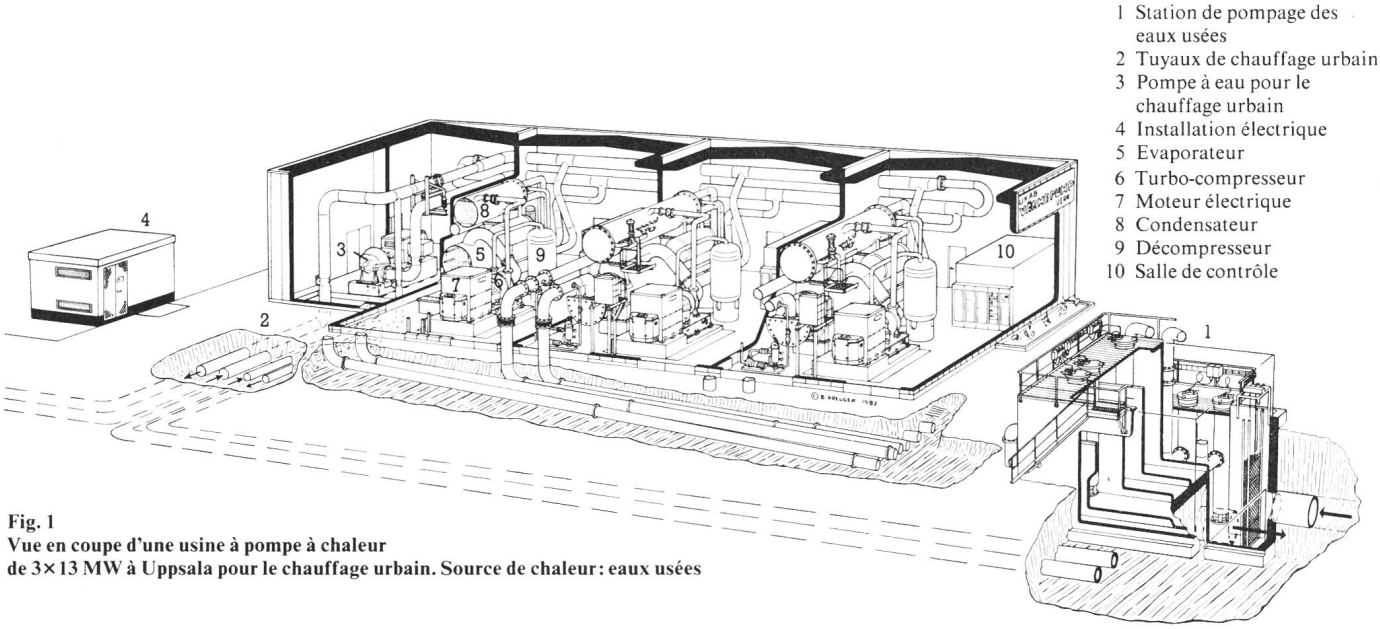


Fig. 1
Vue en coupe d'une usine à pompe à chaleur de 3×13 MW à Uppsala pour le chauffage urbain. Source de chaleur: eaux usées

que ceux posés par l'eau de mer, et d'une nature différente.

En Suède, la température de l'eau de rivière est d'environ 0 °C en hiver et il est impossible d'extraire de la chaleur par abaissement de la température. Une importante source de chaleur potentielle sera toutefois disponible si l'actuel développement d'évaporateurs pour extraction de la chaleur latente par congélation est couronné de succès. Les conditions thermiques sont évidemment plus favorables au printemps, en été et en automne.

Les eaux souterraines sont caractérisées par une fourniture limitée et une température relativement constante tout au long de l'année. Le niveau peut être de +7 à +8 °C dans le sud de la Suède et de +3 à +4 °C dans les régions septentrionales du pays. Les conditions diffèrent d'un endroit à l'autre, et il est important de vérifier l'existence d'un débit suffisant et de déterminer la méthode de réinjection la mieux adaptée, avant le début des travaux de construction.

Contrairement aux sources de chaleur précitées, l'air ambiant présente des variations de température saisonnières très importantes et très peu de chaleur peut être extraite pendant la période la plus froide de l'hiver. L'air ambiant est une source de chaleur disponible partout en quantité illimitée, à proximité de toute charge thermique. Les dimensions des évaporateurs à air sont toutefois grandes, d'où un coût élevé et des difficultés d'installation, en particulier dans les zones d'habitation existantes. Une attention particulière doit être accordée au bruit résultant de la circulation d'air et à la nécessité d'un système de dégivrage efficace.

2. Projets d'implantation de grandes pompes à chaleur

Tous les projets à grande PAC font jusqu'à présent appel en Suède au processus de compression. Le principe thermodynamique du circuit PAC est le même pour une grande PAC de plusieurs MW et pour une petite unité destinée à une maison unifamiliale. Les principaux éléments sont: évaporateur, compresseur, condenseur, récepteur et détendeur. L'évaporateur et le condenseur sont les éléments les plus volumieux et probablement les plus coûteux (fig. 1 et 2).

Les évaporateurs du type à tubes sont les plus courants. En général, l'eau provenant de la source de chaleur se trouve à l'intérieur des tubes de l'évaporateur, plus accessibles, tandis que le réfrigérant propre se trouve à l'extérieur. Il y a toutefois des exceptions, telles que les évaporateurs à aspersion externe. De tels évaporateurs sont constitués par des faisceaux de tubes et utilisés quand l'eau de la source de chaleur est si polluée que les surfaces doivent être rincées périodiquement, ou quand il existe un risque de formation de glace. Dans ces cas, le réfrigérant se trouve à l'intérieur. Il est également possible de construire des évaporateurs à aspersion externe à l'aide d'éléments creux et plats, formant des plaques.

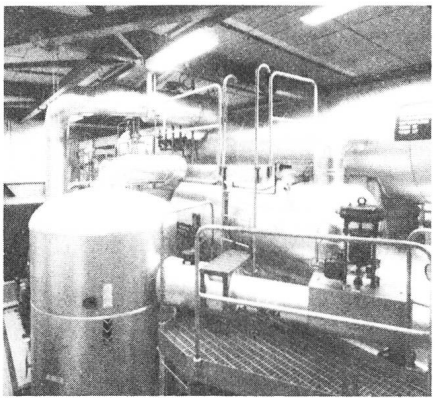


Fig. 2 Condensateur d'une unité de 13 MW de l'usine à PAC de Uppsala

On a jusqu'à présent évité d'utiliser des échangeurs de chaleur du type usuel à plaques dans le circuit du réfrigérant. Leur nettoyage mécanique est très facile, mais le côté réfrigérant doit alors être ouvert, ce qui entraîne un risque de contamination et une longue période d'immobilisation. Le matériau du joint de tels échangeurs de chaleur peut aussi être problématique. D'intéressants travaux de développement sont toutefois poursuivis activement dans ce domaine, afin de réduire le coût des évaporateurs. Des évaporateurs constitués par des faisceaux de tubes de refroidissement à brides sont utilisés pour extraire la chaleur de l'air ambiant. Le condensateur est normalement du type tubulaire, avec circulation de l'eau du réseau de chauffage urbain (CU) dans les tubes.

Les compresseurs à vis et les turbocompresseurs semblent en concurrence dans la partie inférieure de la plage des MW, mais seuls les turbocompresseur demeurent pour une puissance thermique unitaire supérieure à 5 MW environ. Une régulation de la puissan-

ce du compresseur à vis est relativement facile et il serait possible d'utiliser des compresseurs à vis et des turbocompresseurs en parallèle. Des turbocompresseurs à vitesse constante et aubage directeur d'entrée réglable permettent toutefois une plage de régulation de puissance qui semble suffisante quand la PAC est utilisée pour fournir la charge thermique de base. Le choix du type de compresseur peut être laissé à l'entrepreneur. Des moteurs Diesel, turbines à gaz, turbines à vapeur ou moteurs électriques représentent la solution la plus économique en Suède.

Dans le cas d'une PAC pour un projet de chauffage urbain, on ne peut pas tirer pleinement parti de la surchauffe du réfrigérant (qui doit de toute façon demeurer limitée) et la possibilité d'augmenter le coefficient de performance par une surfusion importante est limitée. Un montage économiseur permet toutefois d'augmenter le coefficient de performance malgré les conditions de température défavorables. Un montage économiseur désigne un circuit de réfrigérant dans lequel l'expansion et la compression s'effectuent par phases. Entre les phases d'expansion, de la vapeur est séparée du liquide, puis injectée dans le compresseur entre les phases correspondantes. De même qu'une PAC est un cycle thermodynamique inversé, on peut dire que le montage économiseur est similaire à l'inverse d'un soutirage de vapeur sur une turbine pour le préchauffage de l'eau d'alimentation.

Le choix du réfrigérant pour de grandes PAC dans des réseaux de chauffage urbain pose un problème, par suite de la température élevée requise dans le condenseur et de l'écart de température par rapport à la source de chaleur. Le seul compromis raisonnable, qui a été retenu par tous les fournisseurs des usines à grandes PAC en Suède, semble jusqu'à présent être l'emploi de R 12 ($C\,Cl_2F_2$).

En dépit de la grande différence de température entre la source de chaleur et la charge thermique, des valeurs acceptables du coefficient de performance sont réalisables, avec une moyenne annuelle de trois ou légèrement plus pour un système utilisant les eaux usées.

3. Les grandes pompes à chaleur en tant que charge du réseau électrique suédois

Si de grandes PAC à entraînement électrique sont introduites dans des réseaux de chauffage urbain pour économiser le mazout ou le charbon, il est important de connaître le type d'énergie primaire qui sera utilisé pour produire cette électricité. Il est impossible d'apprécier correctement les PAC sans une telle connaissance.

L'électricité est essentiellement produite en Suède par des centrales hydroélectriques, dont un grand nombre présentent une grande capacité d'accumulation saisonnière. La construction de la plupart des centrales hydroélectriques est toutefois interdite et la mise hors service de centrales nucléaires obligera la Suède à développer la production de centrales thermiques à combustible fossile. Quel type de production d'électricité faut-il ajouter pour de nouvelles charges électriques marginales telles que les PAC? Certainement beaucoup de charbon, mais la capacité d'accumulation hydraulique permettra-t-elle d'éviter le mazout? Pour obtenir certaines réponses, des études ont été effectuées avec et sans divers types de PAC et mélanges de centrales.

Par suite de la capacité d'accumulation des centrales hydroélectriques existantes, le mélange de nouvelles énergies thermiques marginales ajoutées, nécessaire pour couvrir une charge de chauffage marginale ajoutée, sera relativement indépendant de la forme effective de cette charge. De telles charges marginales tireront l'essentiel de leur énergie, 80% environ, de centrales thermiques telles que nucléaires, de production mixte de chaleur et d'électricité ou à condensation. Même de grandes charges de chauffage, présentant des pointes si élevées que la capacité de transport et de distribution est insuffisante, ne constitueront pas un problème de production et l'énergie destinée à de telles charges sera toujours d'origine thermique à 80% environ. Contrairement à certains types de petites PAC, les grandes unités des réseaux de chauffage urbain ne présentent pas de telles pointes. Elles peuvent en fait être arrêtées pendant les périodes de pointe de charge.

Les nouvelles PAC installées dans les réseaux de chauffage urbain au début des années 80 utiliseront essentiellement de l'électricité nucléaire. Il s'agit de remplacer d'une façon efficace et très économique le fuel lourd, et la durée d'amortissement sera relativement courte. Les PAC installées vers 1990 ou immédiatement après recevront l'essentiel de leur électricité de centrales mixtes chaleur–électricité (CCE) fonctionnant au fuel. De telles centrales existent déjà dans certains réseaux de chauffage urbain, mais ne sont pas pleinement utilisées actuellement par suite du coût de production défavorable par rapport à celui de l'électricité hydraulique ou nucléaire. La combustion de fuel lourd dans des centrales CCE existantes est toutefois moins coûteuse que la construction de nouvelles centrales thermiques à condensation. Ces centrales CCE seront progressivement converties pour le charbon au fil des ans. Il s'agit de nouveau de convertir d'une façon très efficace à l'aide de PAC une demande importante de fuel lourd pour les chaudières en une demande moindre – moitié environ –, de mazout ou de charbon pour CCE, mais uniquement tant que les PAC ne sont pas installées dans les mêmes réseaux de chauffage urbain que la production combinée de chaleur et d'électricité. Ces deux convertisseurs d'énergie risquent d'entrer en conflit dans un même réseau. De grandes PAC existantes, déjà amorties au cours des années 80, seront alors exploitées uniquement pendant l'été. De nouvelles PAC, comme toute autre charge nouvelle, ne seront peut-être pas alimentées par de nouvelles centrales thermiques à condensation avant la fin de la décennie 90. A cette époque, de grandes PAC seront définitivement remplacées par des centrales CCE de diverses tailles, fonctionnant au charbon ou peut-être même à la tourbe.

Il convient de noter que ce scénario n'est valable que pour la Suède. Dans un pays où la production principale repose déjà sur des centrales thermiques à condensation, il est préférable d'utiliser des centrales CCE fonctionnant au charbon, plutôt que des PAC dans les grands réseaux de chauffage urbain. Dans tout système de chauffage utilisant un fuel léger coûteux, des PAC à entraînement électrique seront par contre probablement toujours intéressantes, à condition que de bonnes sources de chaleur soient disponibles.

4. Contribution de grandes pompes à chaleur à la production de chaleur

Intégrées dans des réseaux de chauffage urbain, de grandes PAC doivent concurrencer économiquement d'autres types de centrales de production de chaleur. Sur un diagramme de du-

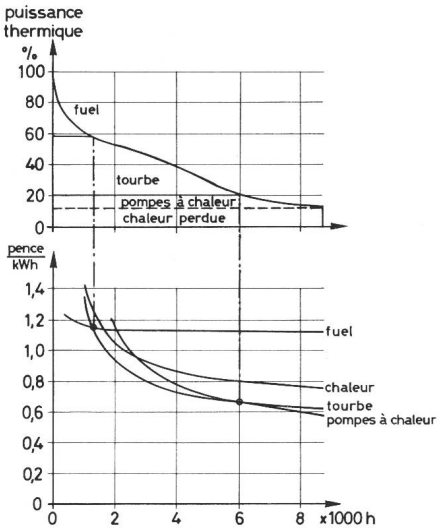


Fig. 3 Coûts de production et durée de la charge thermique du chauffage urbain
(1 £ = 12 Swedish Kronor)

rée typique selon figure 3, les centrales couvrant les besoins thermiques sont classées de bas en haut, dans l'ordre des coûts variables croissants. Les coûts fixes de grandes PAC sont relativement élevés, tandis que leurs coûts variables sont relativement faibles, par suite des prix modérés de l'électricité et de bonnes valeurs du coefficient de performance. Dans le cas de l'utilisation directe de la chaleur perdue de processus industriels ou de l'incinération des ordures ménagères, les coûts variables peuvent être encore plus faibles, comme l'indique une bande «chaleur perdue» à la base de la courbe de durée. Les coûts variables de production les plus élevés sont ceux des centrales à chaudière utilisant du fuel, et ce type de production de chaleur est le mieux adapté pour la fourniture des pointes. Sur la plage entre la base et la pointe, il y a place pour une production de chaleur à coûts variables moyens, représentée par des centrales à chaudière utilisant comme combustible du charbon, des copeaux de bois ou de la tourbe.

Les caractéristiques de coûts de la production de chaleur sont indiquées au-dessous de la courbe de durée. Les coûts sont calculés en monnaie constante pour 1981, sous forme de valeurs moyennes actuelles d'une période de 15 ans.

Ces caractéristiques permettent d'optimiser le mélange de modes de production et d'estimer la puissance de chaque usine en fonction du critère économique selon figure 3. Des limitations physiques et techniques peuvent toutefois aboutir à d'autres puissances en pratique. La source de chaleur disponible pour la PAC par exemple peut donner une capacité de production de chaleur inférieure à celle indiquée par la courbe de durée.

La position des PAC à la base du graphique de durée se traduit par une longue durée d'utilisation, et les PAC à entraînement électrique du type actuel représentent des charges favorables pour la production d'énergie de base.

5. Problèmes d'adaptation, grandes pompes à chaleur – systèmes de chauffage urbain

De grandes PAC dans des systèmes de chauffage urbain conventionnels posent un problème d'adaptation en ce qui concerne les niveaux de température. La plupart des systèmes de chauffage urbain suédois sont conçus pour une température aller/retour de 120/70 °C à la température extérieure minimale de l'emplacement géographique considéré. Une température aller plus faible suffit pendant le printemps, l'été et l'automne, comme le montre la figure 4, qui représente les conditions typiques d'un système de chauffage urbain conventionnel.

La température de sortie maximale admissible du condenseur de la PAC étant comprise entre 70 et 80 °C, le raccordement à un système de chauffage urbain soulève des problèmes. En cas de branchement en parallèle avec des usines à chaudière, ces dernières doivent compenser la température de sortie insuffisante de la PAC, afin de porter le mélange à la température requise. En été, une température de 75–80 °C suffira probablement en pratique et la PAC peut alors fonctionner seule. Dans la plupart des cas, la PAC est raccordée du côté retour (montage en série) et préchauffe l'eau du réseau de chauffage urbain avant son entrée dans la chaudière, afin de la porter à la température requise. Il est évident que les faibles niveaux de température des systèmes de chauffage urbain existants faciliteront l'intégration de tous les types de production de chaleur à basse température. De nombreux travaux sont actuellement effectués en vue d'abaisser les températures du système de chauffage urbain. Il est techniquement possible d'étudier de nouveaux systèmes de chauffage urbain pour des niveaux de température ne dépassant pas 95/45 °C. Dans ce cas, la température de sortie des PAC sera insuffisante pendant moins de 1000 heures par an. Dans un nouveau système de chauffage urbain, la puissance maximale totale de la PAC, si elle n'est pas limitée par la source de chaleur, et le choix des niveaux de température se ramèneront donc uniquement à la recherche de l'optimum économique.

A l'arrêt du fonctionnement de la PAC, la chaleur manquante doit être remplacée par une production de réserve, pour laquelle une chaudière à mazout existante est utilisable.

6. Installations à grandes pompes à chaleur en service ou en construction en Suède

Dans les systèmes de chauffage urbain suédois, il est techniquement pos-

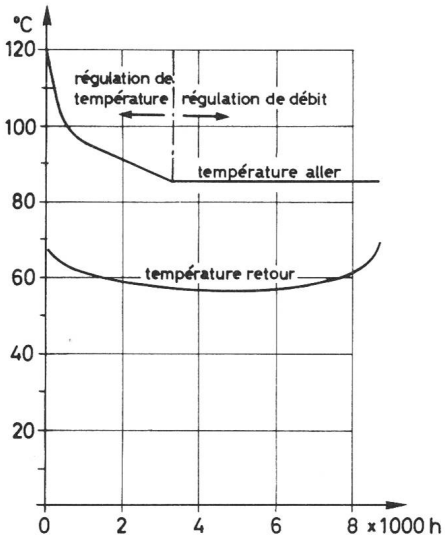
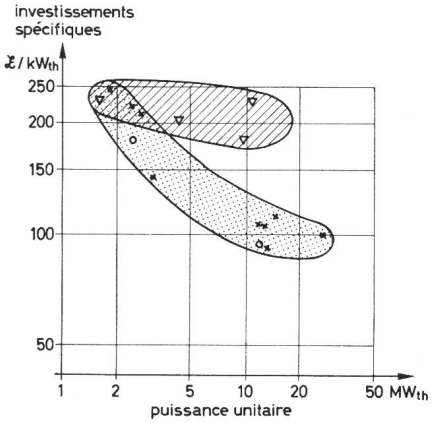


Fig. 4 Températures dans un réseau de chauffage urbain conventionnel



Sources de chaleur:
▽ Eau de lac ou de mer
× Eaux usées
○ Chaleur industrielle perdue

Fig. 5 Investissements spécifiques pour les usines à PAC en fonction de la taille unitaire en MWh
(1 £ = 12 Swedish Kronor)

Grandes pompes à chaleur électriques pour chauffage urbain en Suède, situation de décembre 1982.
*Les usines équipées de compresseurs à vis sont repérées par un *. Toutes les autres usines sont équipées de turbocompresseurs.* Tableau I

Nom/lieu	Source de chaleur	Chaleur produite MW	COP	En service	Fournisseur
	Chaleur industrielle perdue				
Arla Järfälla	Laiterie	2,4	3,7*	83	STAL-Refrigeration
Arlöv	Raffinerie à sucre	12	10	82	FRIGOR-YORK (steam turbine)
Borlänge	Fabr. de papier	2×12	3,2	83	STAL-Laval
Lilla Edet	Centrale hydro. électr.	2×0,5	3,2*	83	TETAB
Sandviken		12	3,6	84	STAL-Laval
Stockholm (Värtan)	Centrale thermique	3	4–5	82	STAL-Refrigeration
Östersund	Laiterie	1,5	3	81	STAL-Refrigeration
Finspång		1,5, 2×1,7		81,83	STAL-Refrigeration
	Eaux usées traitées				
Eskilstuna		13		83	STAL-Laval
Gävle		14		84	STAL-Laval
Göteborg Rya		~2×27	3,1	83, 84	Götaverken
Kalmar		12		83	STAL-Laval
Karlshamn		1,9	2,5	82	Sulzer
Lund		13	3,2	83	STAL-Laval
Malmö (Sjölunda)		3×13	3,2	83	STAL-Laval
Oskarshamn		2,4	2,7	83	STAL-Refrigeration
Sala		3,2	2,8	81	STAL-Refrigeration
Stockholm (Loudden)		2×2,7	3,3	82	Sulzer
Uppsala		3×13	3,2	82	STAL-Laval
Västerås		12	3,2	82	STAL-Laval
Örnsköldsvik		2×5		83	
	Eau de mer				
Lidingö I		11	3,0	83	STAL-Laval
Lidingö II		2×1,65	2,6*	83	TETAB
Visby		2×4,5	2,7*	83	STAL-Refrigeration
Stockholm (Värtan)		13	~3,5	83	STAL-Laval
	Eau de lac				
Ludvika		10	2,8	82	STAL-Laval
Upplands Väsby		2×11	3,0	84	STAL-Laval
	Air ambiant				
Stockholm (Skarpnäck)		4	~2,5	83	STAL-Refrigeration
Eskilstuna (et eaux souterraines)		~3	~2,5	83	
Fagersjö		2,5	~2,5	83	
Kungälv		2		83	
Varberg		1		83	

sible d'installer au moins des PAC d'une puissance d'un millier de MW. Il existe toutefois des facteurs de limitation, tels que la disponibilité de bonnes sources de chaleur et la capacité de l'industrie à produire et installer des PAC assez vite pour assurer leur amortissement pendant la période limitée où le prix de l'électricité demeurera modéré. La puissance totale installée des PAC peut être estimée à 500 MW ou plus en 1990, avec une production de chaleur d'au moins 2,5 TWh. Ce chiffre correspond en gros à 5% des besoins thermiques totaux à cette époque.

Le tableau I présente quelques caractéristiques importantes des usines à PAC en service ou en construction. Leur nombre augmentera certainement. Les caractéristiques techniques présentées sont approximatives. On hésite encore sur la définition de la puissance nominale et de la valeur moyenne du coefficient de performance d'une PAC.

La figure 5 représente les investissements spécifiques en fonction de la taille unitaire.

Les coûts correspondant au côté source de chaleur sont inclus, mais non les coûts des tuyauteries de raccordement entre l'usine et le réseau de chauffage urbain. Il est évident que de petites usines sont relativement plus coûteuses. Elles peuvent toutefois être utilisées dans de petits réseaux pour remplacer des fuels légers plus coûteux.