

# Electricité et chaleur

Couplage chaleur-force

Pompes à chaleur

Récupération de chaleur et utilisation des  
rejets thermiques



#### **Collectif d'auteurs**

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG, Diessenhofen (Direction)  
Thomas Baumgartner, Bureau d'ingénieur  
pour la technique du bâtiment, Dübendorf  
Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG, Neuenhof  
Hanspeter Eicher, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal  
Werner Lüdin, Elektra Birseck, Munchenstein  
Pierre Renaud, Planair, La Sagne

#### **Traduction**

Planair, La Sagne

#### **Présentation graphique**

Digivision, AG für visuelle Kommunikation, 8008 Zürich

#### **Associations de soutien**

ASCV Association suisse des entreprises de chauffage et de ventilation  
ASMFA Association suisse des maîtres ferblantiers et appareilleurs  
AWP Groupement pompes à chaleur  
DFEL Office d'électricité de la Suisse romande  
SBHI Ingénieurs-conseils suisses de la technique du bâtiment  
et de l'énergie  
SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes  
SICC Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation  
UCS Union des centrales suisses d'électricité  
USIE Union suisse des installateurs - électriciens  
UTS Union technique suisse

Un avant-projet de cette publication a été soumis en été 1991 à une large consultation. De précieuses indications ont pu être ainsi collectées. Le collectif d'auteurs a toutefois eu toute liberté d'analyser, selon ses critères propres, différents points de vue sur des questions particulières.

Couverture: Copyright - The Image Bank

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, novembre 1991. Réimpression partielle autorisée en mentionnant la source. A retirer auprès de l'Office central fédéral des imprimés et du matériel, 3000 Berne. No de commande: 724.354 f.

## Pour commencer, six questions provocantes!

La production et la consommation d'énergie sont des thèmes très controversés. Les techniques présentées ici n'échappent pas à cette règle. Le couplage chaleur-force, les pompes à chaleur, la récupération de chaleur et l'utilisation des rejets thermiques sont défendus avec ferveur par certains, alors que d'autres les tiennent pour marginaux et sans importance. Rares sont les textes objectifs et professionnellement fondés.

Voilà pourquoi nous n'avons pas formulé un long avant-propos en guise d'introduction; nous avons préféré quelques questions provocantes. Peut-on répondre affirmativement à toutes ces questions? Nous pensons que c'est possible si de telles installations sont construites là où des conditions favorables existent et si la planification, la construction et l'exploitation sont optimisées. Pour cela, quelques conditions doivent être remplies:

1. Il faut obtenir un large consensus sur le fait que ces nouvelles techniques représentent un pas important vers une utilisation rationnelle de l'énergie et qu'elles apportent une diminution de charge substantielle pour l'environnement.
2. Le maître de l'ouvrage doit être rendu attentif à ces possibilités et doit être prêt à tenir compte des exigences accrues qu'elles impliquent dans la planification des travaux.
3. Le concepteur doit être ouvert à ces questions. En outre, en raison de la rapidité des progrès techniques, il doit être prêt à consacrer le temps nécessaire à son perfectionnement.

Dans cette brochure, nous tiendrons compte surtout des deux premiers points. C'est pourquoi nous avons essayé de présenter le texte de façon compréhensible pour le profane. Le lecteur pourra trouver la signification des termes techniques dans le glossaire en fin de brochure.

Le but principal de RAVEL- la valorisation de la compétence professionnelle - concerne principalement le troisième point. Pour chacun des trois thèmes, des cours spécifiques seront organisés et proposés à partir de fin 1992.

Le collectif d'auteurs

**Existe-t-il des installations de couplage chaleur-force produisant de l'électricité à des prix concurrentiels?**

**Des pompes à chaleur, dont le coefficient de performance annuel se monte à 3,0 et plus, sont-elles concevables?**

**«Récupération de chaleur» et «utilisation des rejets thermiques» sont-elles deux notions économiquement réalistes?**

**Le couplage chaleur-force combiné à l'amplification électrothermique (par exemple ,pompe à chaleur} permet-il de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>?**

**N'est il pas écologiquement contradictoire de produire du courant à partir de combustible fossile?**

**...et finalement ces nouvelles techniques sont elles fiables ?**

# Table des matières

Chaleur et Energie	Page 3
Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques	Page 6
Pompes à chaleur	Page 12
Couplage chaleur-force Dispositions sur la planification, la construction et l'exploitation	Page 25
Glossaire	Page 30

# Chaleur et énergie

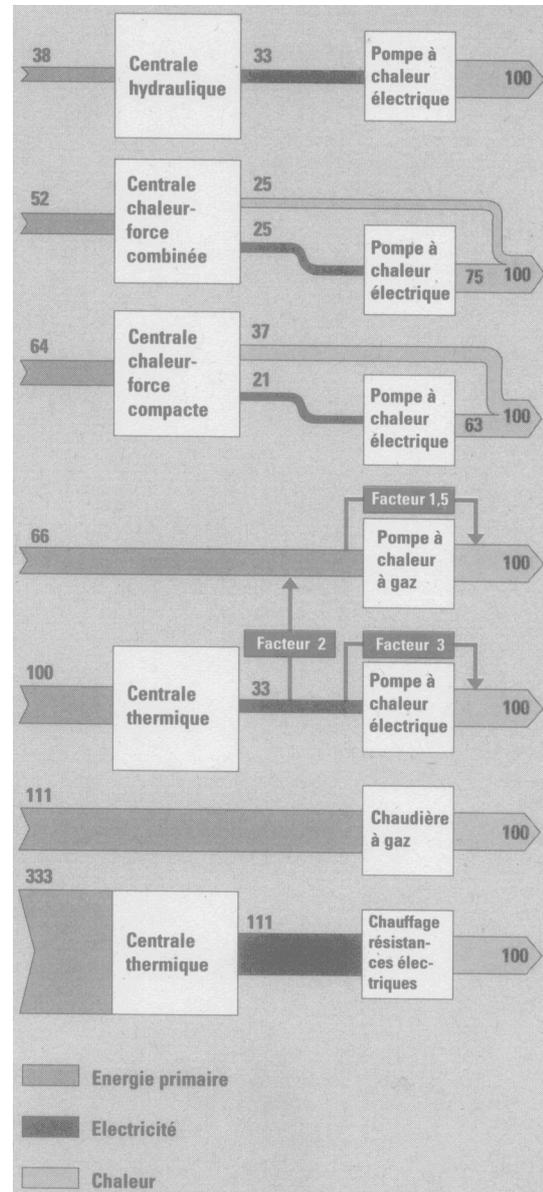
## L'énergie ne doit pas être seulement une notion de quantité, mais aussi de qualité

Si l'on considère aujourd'hui les techniques de production de chaleur à disposition, il ressort que la qualité de la transformation de l'énergie est très diverse (fig. 1). Pour produire 100 unités de chaleur, la consommation d'énergie primaire peut passer - selon les techniques de transformation - de 38 à 333 unités. Cette grosse différence peut s'expliquer par le fait que les diverses formes d'énergie et les techniques de transformation utilisées pour leur mise en valeur sont plus ou moins bien appliquées. Une technique de transformation est d'autant meilleure que la perte de valeur est moindre. Par exemple, une pompe à chaleur électrique utilise l'énergie noble qu'est l'électricité trois fois mieux qu'un chauffage électrique.

Aujourd'hui, la comparaison de différentes formes d'énergie ne se réfère en général qu'aux kilowattheures consommés. Cette analyse est trop simple et une meilleure appréciation tenant notamment compte de la valeur doit être trouvée. Comment décrire la valeur d'une certaine forme d'énergie?

Les notions physiques «d'exergie» et «d'anergie» sont définies avec exactitude dans l'encadré 2. Avec ces formules on peut calculer par exemple que, par une température ambiante de 0°C, 15% d'exergie seulement sont nécessaires pour produire de l'eau chauffée à 50°C. L'électricité (100% d'exergie) est ainsi 6,5 fois plus précieuse qu'une chaleur de chauffage à 50°C (15% d'exergie).

Mais ce facteur d'évaluation de 6,5 n'est pas réaliste, si l'on pense qu'aujourd'hui, avec une pompe à chaleur électrique utilisée dans des conditions favorables, l'on peut atteindre un coefficient de performance annuel d'environ 3. C'est pourquoi il est plus pratique et plus évident de présenter les facteurs d'évaluation sous forme de règles générales correspondant à peu près aux possibilités des techniques actuelles. La figure 1 présente les trois plus importants facteurs et les règles qui en découlent.



### Règles générales

- La valeur de l'électricité hivernal es environ trois fois plus important que celle de l'énergie thermique
- La valeur du gaz ou du mazot es environ une fois et demis plus élevée que celle de l'énergie thermique
- La valeur de l'électricité hivernal es environ deux fois plus élevée que celle du mazout ou du gaz

**Figures 1** Les différentes formes d'énergie et leur valeur sont très diversement utilisées par les techniques actuelles de production de chaleur. les règles générales ci-dessus permettent une explication simple de la valeur en fonction des possibilités pratiques existant aujourd'hui.

## Energie

*L'énergie ne peut être ni produite ni détruite. Ne sont possibles que des procédés de transformation d'une forme d'énergie à une autre (le terme technique usuel "production d'énergie" devrait être remplacé par « transformation d'énergie » pour que cette notion soit physiquement respectée). Comme l'énergie ne peut pas être transformée à volonté une autre distinction s'impose:*

<b>Exergie</b>	<b>Anergie</b>
<i>Partie qui peut être transformée en d'autres formes d'énergie</i>	<i>Partie qui ne peut pas être transformée en d'autres formes d'énergie</i>

## Exemples

**Les énergies liées à la mécanique à l'électricité et à la chimie** (p ex. mazout gaz naturel) présentent pratiquement une exergie pure Elles peuvent être transformées à volonté en d'autres formes d'énergie.

**L'énergie thermique** contient d'autant plus d'exergie que la différence de température est grande entre le fluide caloporteur et l'environnement

**La chaleur environnante** ne contient en général que de l'anergie

**Une pompe à chaleur** permet d'injecter de l'énergie dans la chaleur ambiante (= anergie) à l'aide d'une énergie noble (p ex. l'électricité) et ainsi de «pomper» la chaleur ambiante à un niveau de température plus élevé.

## Formules

$$\dot{Q}_E = (1 - T_2/T_1) \cdot \dot{Q}_A - T_2/T_1 \cdot \dot{Q}$$

$$\dot{Q}_E = \text{flux exergétique [W]} \quad \dot{Q}_A = \text{flux anergétique [W]}$$

$$\dot{Q} = \text{flux thermique [W]}$$

$$T_1 = \text{température absolue du fluide caloporteur[K]}$$

$$T_2 = \text{température absolue de l'environnement[K]}$$

## Encadré 2

## L'électricité est une forme d'énergie très noble

Pour preuve, dans les usines électriques suisses par exemple, seuls 43 % de l'énergie peuvent être transformés en électricité (172,9 PJ de 398,6 PJ, tableau 3), du fait que pour des raisons physiques et techniques, les agents énergétiques primaires ne permettent pas un meilleur rendement.

L'électricité est donc une forme d'énergie qui nécessite beaucoup d'énergie primaire et que l'on ne devrait utiliser que là où la perte d'exergie est la plus faible. Cette démarche exclut en principe le chauffage électrique. C'est pourquoi l'arrêt sur l'énergie prévoit que toute nouvelle installation fixe de chauffage électrique sera soumise à la clause du besoin énergétique. le tableau 3 montre que les besoins pour le chauffage de locaux (pompes à chaleur y compris) couverts par l'électricité représentent aujourd'hui 7,4% des besoins globaux en courant électrique (12,1 PJ de 163,8 PJ).

Dans le domaine de l'électricité, d'autres critères que la valeur doivent également être pris en compte:

- les différences saisonnières: en hiver on utilise davantage de courant qu'en été.
- Les différences journalières: pendant les heures de pointe on utilise plus de courant.

## La consommation d'énergie augmente sans cesse ...

En dépit de tous les appels à l'économie, la consommation d'énergie augmente de 2 à 3 % par an. Cela est dû principalement à notre société dont les besoins augmentent et se diversifient sans cesse, et que seule l'électricité, énergie noble, peut satisfaire. De plus les nouvelles techniques d'utilisation des rejets thermiques et de production rationnelle de chaleur demandent également davantage de courant (énergies d'appoint, pompes à chaleur). Cette démarche ne peut être critiquée dès l'instant où elle permet une économie substantielle d'autres formes d'énergie.

Finalement ce qui est décisif, ce n'est pas seulement la consommation de courant, mais bien la consommation globale d'énergie. Mais là aussi, aucune tendance à la baisse significative n'est à signaler jusqu'ici. Rien d'étonnant tant que le prix de l'énergie reste aussi bas.

## ... et l'environnement ne cesse de se dégrader

La pollution de l'air, le stockage des déchets radioactifs et les réserves de carburants limitées posent de sérieux problèmes. la possibilité d'un changement de climat de la planète provo

qué par l'augmentation des rejets de dioxydes de carbone complique encore la situation. C'est la raison pour laquelle il a été exigé, à la Conférence Mondiale sur le climat à Toronto, une diminution des émissions de dioxydes de carbone de 20% jusqu'en 2005 et de 50% jusqu'en 2050. Ce sont des problèmes universels auxquels nous ne pouvons en aucun cas nous soustraire par la «politique de l'autruche».

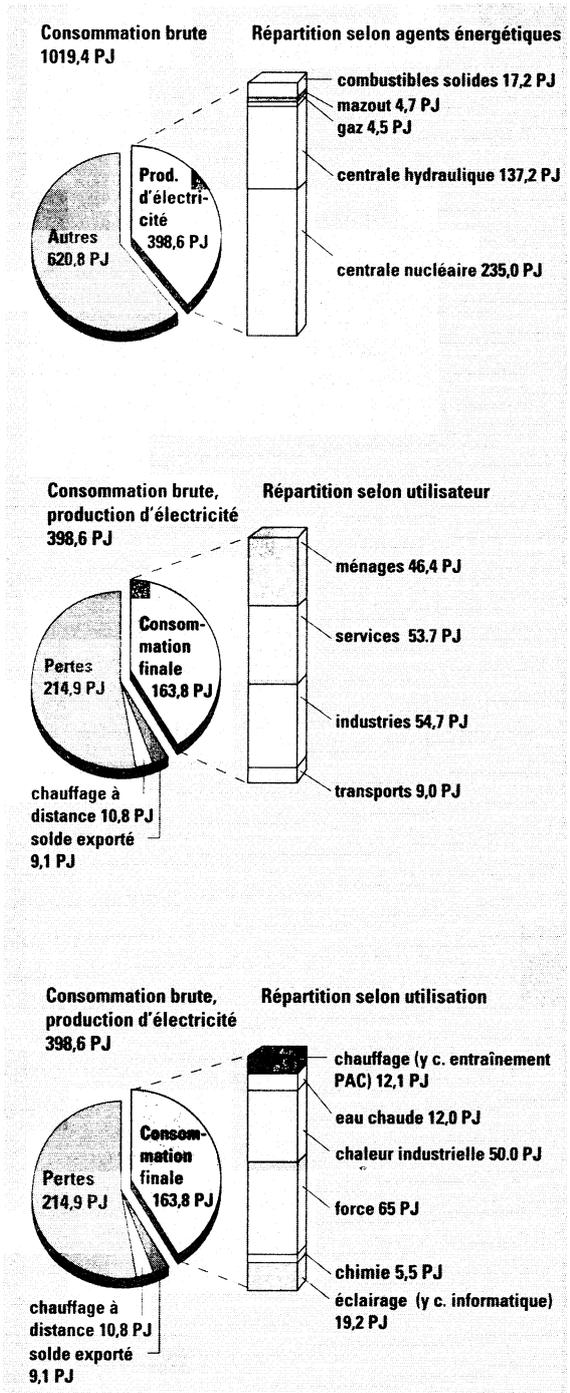
### Que pouvons-nous faire?

En premier lieu, nous devons diminuer fortement nos besoins énergétiques. Ce qui signifie tout d'abord baisser la consommation inutile d'énergie et amoindrir les pertes. Un potentiel d'énergie considérable est récupérable grâce aux systèmes d'utilisation de rejets thermiques et de récupération de chaleur toujours plus nombreux. A l'avenir, un progrès décisif ne peut être réalisé que si les formes d'énergies nobles - électricité, gaz et produits pétroliers - sont engagées selon leurs valeurs.

On pourrait améliorer considérablement le bilan global de l'énergie si davantage de rejets thermiques résultant de la production thermique d'électricité pouvaient être utilisés. Aujourd'hui, cela ne représente qu'une timide part de 5%, y compris la chaleur produite par les centrales de chauffe, qui va en s'effritant (10,8 PJ de 398,6 - 172,9 PJ voir tableau 3). Les causes en sont principalement les frais de transport de chaleur souvent élevés entre la centrale et l'utilisateur, et une absence de volonté politique.

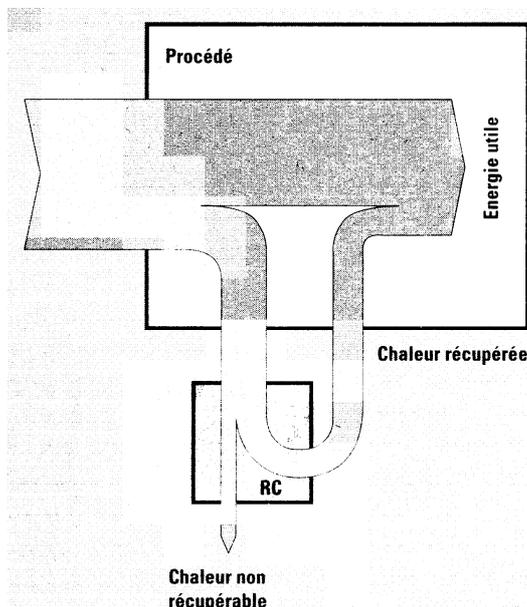
la production décentralisée de courant d'origine fossile représente une solution intéressante là où la chaleur peut être directement employée (installations de couplage chaleur-force compactes avec moteur à gaz). Partant du principe que la quantité de gaz et de mazout actuellement utilisée pour le chauffage demeure constante, on peut ainsi fabriquer du courant électrique sans augmenter l'atteinte à l'environnement. Ceci à condition qu'un tiers environ du courant produit soit utilisé pour l'entraînement de pompes à chaleur, afin de compenser la part de carburant affectée à la production d'électricité. Si une part plus importante du courant produit est affectée à l'entraînement des pompes à chaleur, il en résulte, malgré la production de courant d'origine fossile, une nette diminution de la pollution.

Cette dernière remarque, quelque peu paradoxale, est malheureusement trop souvent mal comprise par les spécialistes. C'est pourquoi nous nous efforcerons, dans les chapitres suivants, de prouver que cette démarche est possible et qu'elle est en plus économiquement intéressante.



**Tableau 3** Bilan énergétique de la Suisse pour l'année 1989 (base: statistique global suisse de l'énergie; 1PJ=278'000'000 kWh.)

# Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques



**Figure 4** La récupération de chaleur (abréviation: RC) permet, dans un procédé ou une installation quelconque, la récupération de l'excès de chaleur réutilisable et la réinjection de cette énergie dans le même procédé ou la même installation sans décalage de temps. Par cette mesure, on améliore le rendement global de l'installation. Le système offre l'avantage de voir la quantité d'énergie récupérée croître proportionnellement aux besoins thermiques.

## Que signifient ces deux termes?

Dans un catalogue listant des mesures pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques figurent en première position. On retrouve d'ailleurs des rejets thermiques dans la plupart des procédés de fabrication, dans les industries, les services et le bâtiment; ces pertes pourraient très bien être utilisées à d'autres fins.

La mise en valeur des rejets thermiques repose techniquement sur leur valeur énergétique. Economiquement parlant, la valeur des rejets thermiques se calcule en fonction de la différence entre les dépenses nécessaires à l'installation d'un système de récupération de ces rejets et l'économie réalisée grâce à son fonctionnement.

Le choix d'un système optimal d'utilisation de chaleur est une tâche techniquement délicate. Afin d'utiliser rationnellement la chaleur résiduelle, il est indispensable d'analyser systématiquement les flux thermiques, d'évaluer la rentabilité de chaque mesure et l'intérêt de la conception globale. De plus, il est nécessaire de trouver des solutions originales, car les solutions standards sont rares.

En considérant le flux thermique dans un système défini, nous trouvons deux formes fondamentalement différentes d'utilisation des rejets thermiques. Ces derniers peuvent être employés à l'intérieur du système ou en élargissant les limites du système. Dans le premier cas, on parle de récupération de chaleur (fig. 4) et dans le deuxième cas d'utilisation des rejets thermiques (fig. 5).

## Composants et domaines d'application

Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques emploient les mêmes composants. Si la température de la source de chaleur est supérieure à la température d'utilisation, on mettra en action des échangeurs ou des systèmes d'échange de chaleur. Dans le cas contraire, on aura recours aux pompes à chaleur.

les échangeurs de chaleur sont parcourus par des fluides caloporteurs (gazeux ou liquides). Des processus physiques de transmission de chaleur par conduction et par convection interviennent.

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur. La figure 6 nous montre les plus fréquents. l'échange de chaleur peut se faire directement (récupérateur) ou par accumulation temporaire dans un certain milieu (régénérateur).

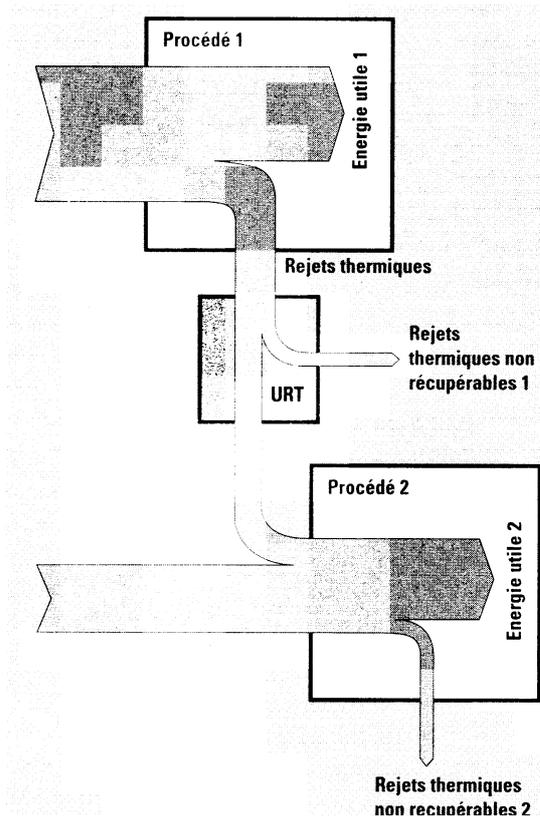
L'échangeur de chaleur du type «récupérateur» se compose de surfaces de séparation perméables à la chaleur, mais non à la matière. La transmission de chaleur s'effectue directement à travers les surfaces de séparation. Il existe plusieurs types d'échangeurs (à plaques, à double manteau, tubulaires). les échangeurs de chaleur doivent être adaptés aux conditions d'exploitation (forme, choix du matériel, milieu caloporteur). L'échangeur peut se présenter comme un composant séparé ou faire partie intégrante de l'installation.

Si le système se compose de deux échangeurs de chaleur reliés par un circuit caloporteur fermé, on parle de **récupérateur de chaleur à fluide intermédiaire (régénérateur)**. La circulation du fluide peut être provoquée par une pompe, par gravitation ou par capillarité (caloduc, voir glossaire).

Si le circuit fermé intermédiaire est formé d'un accumulateur rotatif, on a affaire à un **régénérateur à surfaces de contact**. La charge et la décharge périodiques de la chaleur et de la matière (vapeur) de l'accumulateur s'effectue sans mélange des fluides chauds et froids.

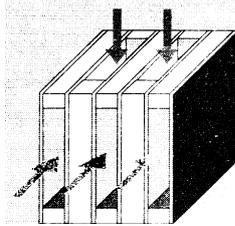
En ce qui concerne la **pompe à chaleur**, l'échange de chaleur exige de l'énergie supplémentaire pour l'élévation de température (voir chapitre «Pompes à chaleur»). La qualité de la source de chaleur détermine le choix et les conditions de fonctionnement de la pompe à chaleur. Le cycle de la pompe à chaleur peut faire partie d'une machine autonome ou être intégré dans un processus industriel.

**Remarques:** D'autres termes techniques courants comme: compression bi-étagée, pompe à chaleur à haute température, Pinch Design Method, caloduc, transformateur de chaleur etc., sont décrits dans le glossaire.

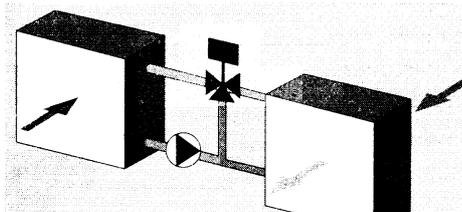


**Figure 5** L'utilisation des rejets thermiques (abréviation: URT) permet, dans un procédé ou une installation, la récupération de l'excès de chaleur réutilisable et l'injection de cette énergie dans d'autres procédés ou installations, en même temps ou avec des décalages horaires considérables. Sur une installation isolée, on n'attend aucune amélioration du rendement global du système. Par contre, sur plusieurs installations interconnectées, le rendement énergétique est meilleur. Dans l'utilisation des rejets thermiques, il faut s'assurer que l'offre et la demande de chaleur coïncident dans le temps ou que la chaleur puisse être stockée dans un accumulateur de chaleur. Pendant toute la durée de la consommation de chaleur, la source de chaleur doit être disponible, afin que les investissements puissent être amortis.

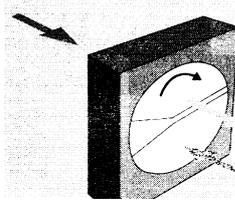
Caractéristiques techniques



Echangeur de chaleur (récupérateur)



Echangeur de chaleur à fluide intermédiaire régénérateur



régénérateur a surfaces de contact

Aussi bien les composants des échangeurs de chaleur que les systèmes d'échangeurs de chaleur sont définis par des caractéristiques techniques. La caractéristique technique des systèmes de récupération de chaleur est définie par le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie récupérable maximale. On trouve dans le tableau 7 la définition et quelques valeurs typiques de **rendement défini en fonction des températures** pour divers échangeurs de chaleur utilisés dans des installations d'air conditionné.

Afin de pouvoir comparer et juger les divers systèmes de récupération de chaleur et rejets thermiques, il faut prendre en compte les besoins supplémentaires en énergie pour l'entraînement et la compensation des pertes de pression. Il existe des propositions pour définir ces différents facteurs.

Conception énergétique

Tout concept énergétique pour un bâtiment ou une entreprise doit viser l'économie de l'énergie utilisée et la couverture des besoins énergétiques à l'aide de systèmes rationnels, surs et supportables pour l'environnement (voir dernier chapitre, fig. 38). Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques doivent être inclus dans le concept. On ne perdra pas de vue l'ensemble du système, car négliger l'optimisation d'une partie peut se répercuter négativement sur la conception globale.

Lors de la conception de logements et de bureaux, il est indispensable d'optimiser les différentes techniques appliquées aux installations sur la base d'une structure d'utilisation et de gestion bien définie.

Dans les milieux industriels intervient un facteur non négligeable: le couplage énergie - procédé de fabrication. La connaissance approfondie du contexte thermodynamique permet la sauvegarde des intérêts de chacun et une utilisation sûre et rationnelle de l'énergie. la mise en place des mesures d'économie d'énergie sera mieux acceptée si elle coïncide avec une amélioration des procédés de fabrication.

Figure 8 Divers modèles d'échangeurs de chaleur.

Echangeurs	Rendement
Récupérateur (échangeur à plaques)	0.5...0.6
Récupérateur à fluide intermédiaire	0.5...0.7
Caloduc (voir glossaire)	0.3...0.6
Régénérateur à surfaces de contact	0.5...0.8

$$\eta = \frac{\vartheta_{AF,S} - \vartheta_{AF,E}}{\vartheta_{AE,E} - \vartheta_{AF,E}}$$

- Indices:
- $\eta$  = Rendement
  - $\vartheta$  = Température
  - AF**= air frais (extérieur)
  - AE**= air évacué
  - E** = entrée
  - S** = sortie

Figure 8 Rendement défini en fonction des températures pour de l'air sec et des flux égaux de part et d'autre de l'échangeur.

## Economie d'énergie

L'utilisation rationnelle et économique de l'énergie dépend de la qualité de la source des rejets thermiques (température, densité de l'énergie, quantité d'énergie, fluide caloporteur, durée des opérations). La source des rejets thermiques doit toujours être analysée en fonction de l'utilisation prévue.

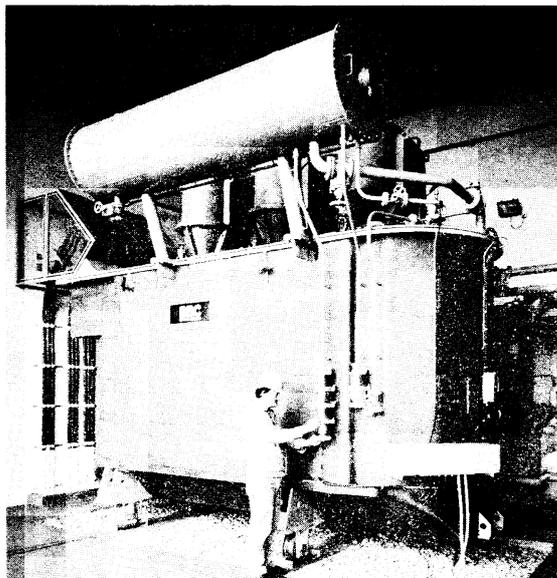
La récupération de chaleur et l'utilisation des rejets thermiques induisent une économie d'énergie par le fait qu'ils améliorent le rendement global du système, mais des frais plus importants pour l'appareillage ainsi qu'un supplément d'électricité pour le réglage, la commande et le transport de la chaleur apparaissent toutefois. Les avantages doivent cependant l'emporter largement sur les dépenses supplémentaires.

Au premier plan du programme RAVEL figure l'utilisation rationnelle de l'électricité. Dans cette optique, on distinguera les 3 domaines d'application suivants:

**Utilisation de rejets thermiques provenant d'installations électriques:** l'électricité est une forme d'énergie universelle, car elle peut pratiquement être transformée et adaptée à chaque utilisation. Les machines et les appareils provoquent des rejets thermiques très souvent récupérables. Malheureusement la mise en valeur de rejets thermiques issus de nombreux petits appareils entraînent des dépenses importantes, si bien qu'une utilisation n'est souvent pas rentable.

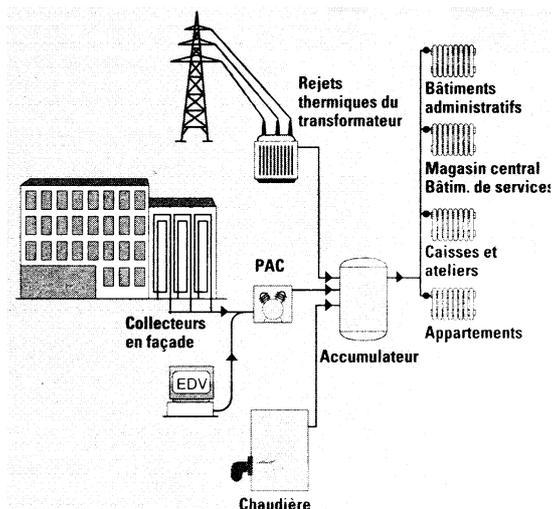
**Substitution de procédés électro-thermiques par l'utilisation de rejets thermiques:** les procédés utilisant de basses températures (applications domestiques, préchauffage, etc.) conviennent souvent à la mise en valeur des rejets thermiques. Le réchauffement de l'eau sanitaire par rejets thermiques est un bon exemple de substitution de

**Utilisation rationnelle de l'électricité comme énergie d'appoint dans les installations thermiques:** les composants supplémentaires indispensables à la transmission et le transport de chaleur (pompes, ventilateurs etc.) utilisés dans les installations thermiques conduisent à un besoin en électricité accru. L'adjonction d'échangeurs de chaleur supplémentaires dans les conduites et canaux augmente les pertes de charges; il s'ensuit un accroissement de la consommation électrique des ventilateurs et des pompes. Afin d'obtenir le meilleur rapport entre l'énergie électrique supplémentaire utilisée et le rejet thermique récupéré, les moteurs, pompes et ventilateurs devront atteindre un rendement optimal.



**Figure 8** L'entreprise Elektra Birseck à Münchenstein utilise les rejets thermiques d'un transformateur pour le chauffage de locaux. Le transformateur est entièrement carrossé afin de récupérer toute la chaleur qu'il dégage. Cet exemple illustre parfaitement l'utilisation des rejets thermiques produits par une installation électrique.

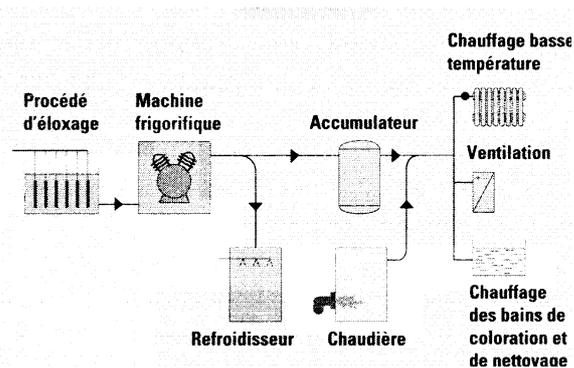
## RAVEL Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques



Economie de chaleur	400 MWh/a
Frais d'investissements supplémentaires	500'000 Fr.
Frais de capitalisation	55'000 Fr./a
Economie de frais	22'850 Fr./a

Base: prix du mazout 0.4 Fr./kg, intérêt 7% renchérissement du mazout 6% durée d'utilisation 15ans

**Figure 9** Réseau de chauffage à distance chez Elektra Birseck Münchenstein. Les chiffres ne se réfèrent qu'à l'utilisation de la chaleur fournie par le transformateur.



Economie de chaleur	428 MWh/a
Frais d'investissements supplémentaires	50 000 Fr.
Frais de capitalisation	5'500 Fr./a
Economie de frais	24'450 Fr./a

Base: prix du mazout 0.4 Fr./kg, renchérissement du mazout 6%, intérêt 7%, durée d'utilisation 15ans

**Figure 10** Utilisation des rejets thermiques chez Anox SA, entreprise d'éloxxage, à Affoltern s/Aar (source: Infoenergie Brugg).

## Rentabilité - exemples

La diminution de consommation d'énergie due aux techniques d'économies mises en place doit faire l'objet d'un calcul de rentabilité. L'économie d'énergie doit être comparée aux dépenses supplémentaires.

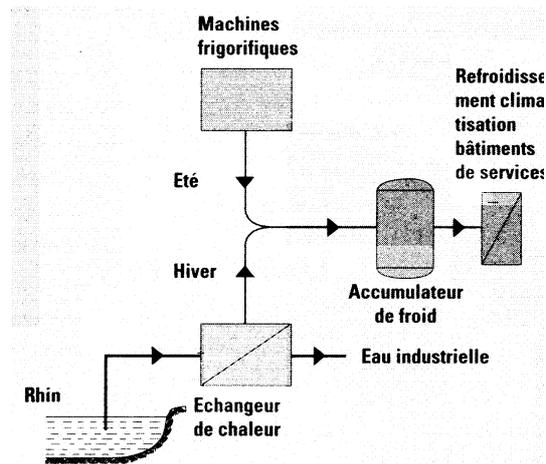
Face aux investissements supplémentaires, il faut calculer les économies dues à la diminution de la consommation énergétique. Cette économie est proportionnelle aux nombres d'heures de fonctionnement; c'est pourquoi le dimensionnement d'une installation doit viser la plus longue période d'utilisation.

Dans les nouvelles installations d'air conditionné, les techniques de récupération de chaleur sont connues et, dans certains cantons, leur application est même réglementée. Avec la récupération de chaleur, deux bons tiers de l'énergie utilisée sont ainsi récupérés. L'énergie électrique supplémentaire nécessaire à ces applications représente environ 10 à 15% de la chaleur récupérée.

Les énergies transitant dans les transformateurs même modestes sont souvent très importantes. Les pertes relatives oscillant entre 1 et 3% de la puissance transférée, le rejet thermique apparaît comme une densité énergétique intéressante et ce d'autant plus que ce rejet est déjà transmis au fluide de refroidissement du transformateur. Le niveau de la température de ce fluide atteint 60° et convient au chauffage de locaux. Chez **Elektra Birseck Münchenstein**, les rejets thermiques du transformateur sont utilisés dans un réseau de chauffage à distance (fig. 8 et 9). Avec des frais annuels de capitalisation de Fr. 55'000. et une économie financière de Fr. 22'850.— par an, cette mesure n'est certes pas rentable; elle est par contre absolument défendable du point de vue énergétique.

La figure 10 montre l'utilisation des rejets thermiques chez **Anox AG**, entreprise spécialisée dans le traitement des métaux, à Affoltern s/A. Le surplus de chaleur est soustrait du procédé d'éloxxage au moyen d'installations de refroidissement. Ces rejets sont ensuite récupérés dans un accumulateur, puis utilisés pour le chauffage de locaux, le préchauffage d'air ainsi que dans des procédés industriels utilisant de la chaleur à basse température. Lorsque l'accumulateur est plein, la chaleur inutilisée est déviée sur une tour de refroidissement. Avec une économie financière de Fr. 24'450. par an et des frais de capitalisation Fr. 5'500.—à peine, ce procédé est aussi intéressant du point de vue énergétique que financier.

L'utilisation des rejets thermiques au sens large du terme s'inscrit également dans le domaine des installations de réfrigération (p. ex. Freecooling). La figure 11 représente une installation de production de froid pour la climatisation, avec stockage du froid, chez **Hoffmann-LaRoche**. Auparavant, les machines de refroidissement travaillaient toute l'année. Depuis l'assainissement, le refroidissement pendant la période creuse hivernale s'effectue par l'eau du Rhin; ainsi les machines de refroidissement ne fonctionnent qu'en été. En plus d'une économie de courant, on obtient aussi une réduction des puissances de pointe. Cet exemple démontre que de très simples mesures conduisent souvent à des résultats économiquement et énergiquement très intéressants.



Economie d'électricité	400 MWh/a
Frais d'investissements supplément	125'000 Fr.
Frais de capitalisation	13'750 Fr.
Economie de frais	56'850 Fr./a

Base: prix du courant 10 ct/kWh, Intérêt 7%, renchérissement de l'électricité 10% durée d'utilisation 15 ans

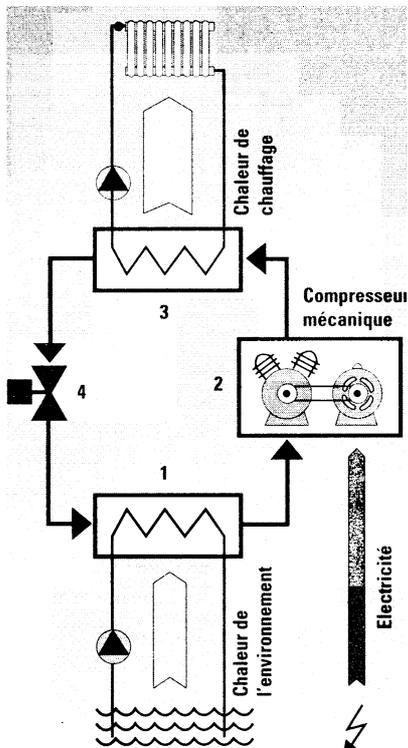
**Figures 11** Utilisation des pertes de chaleur dans une installation de climatisation chez Hoffmann-LaRoche.

### Tendances futures

La récupération de chaleur et l'utilisation des rejets thermiques prendront toujours plus d'importance. L'augmentation des prix de l'énergie et un accroissement des mesures pour la protection de l'environnement permettront de rentabiliser différentes conceptions. Le développement ne sera pas très spectaculaire (nouveaux matériaux, appareils plus compacts), mais les possibilités multiples offertes par les systèmes de gestion de procédés et de bâtiments élargiront considérablement les enjeux. La micro-électronique permettra une meilleure maîtrise des installations après leur mise en service d'où meilleurs contrôles et optimisation des flux d'énergie.

### Encadré 12

## Pompes à chaleur



**Figure 13** Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à compression. Par l'intermédiaire de l'évaporateur (1), la source de chaleur porte le fluide frigorigène à ébullition à basse température. La vapeur ainsi obtenue est comprimée dans le compresseur (2), ce qui a pour effet d'augmenter fortement la température du fluide. La chaleur à haute température ainsi obtenue peut être transmise au travers du condenseur (3) à l'eau de chauffage. Le fluide frigorigène reprend alors son état liquide. Dans la vanne de détente (4), ce fluide est ramené à pression basse et le cycle peut recommencer.

### Comment fonctionne une pompe à chaleur?

Une transmission de chaleur faite uniquement avec un échangeur de chaleur n'est possible que si la température de la source de chaleur est plus élevée que celle délivrée. Mais l'énergie d'une source de chaleur à plus basse température peut être utilisée à l'aide d'une pompe à chaleur (abréviation: PAC) qui, «en pompant», relève le niveau de la température. Comment est-ce possible?

Grâce au **cycle thermodynamique de Carnot**. Avec l'aide d'une énergie noble (p.ex. l'électricité), il est notamment possible d'élever une chaleur d'un niveau de température bas à un niveau plus élevé. la pompe à chaleur à compression, dont le fonctionnement est décrit à la fig.13, est actuellement le système le plus souvent utilisé pour cette opération.

### Composants et domaines d'application

L'**entraînement** des pompes à chaleur à compression est assuré aujourd'hui principalement par des moteurs électriques. Pour des pompes à chaleur de plus gros calibre, on a recours aussi à des moteurs Diesel ou à gaz.

Lorsqu'on parle de **compresseurs**, on pense surtout à des compresseurs à piston. Pour des installations plus importantes, on aura recours à des compresseurs à vis ou à des turbocompresseurs. Le compresseur rotatif entraîné par moteur électrique à vitesse variable est également en service dans de nombreuses installations (voir aussi encadré 21).

A côté des compresseurs mécaniques, il existe le compresseur thermique utilisé dans les **pompes à chaleur à absorption**. Ces dernières travaillent à l'aide de deux matières: le fluide frigorigène propre et le fluide d'absorption (fig. 14). L'énergie à haute valeur est amenée par de la chaleur à haute température (p.ex. rejets thermiques à haute température). Le fonctionnement de la pompe à chaleur à absorption exige très peu d'énergie électrique.

Dans l'industrie il existe des systèmes de pompe à chaleur «ouverts» (cycle à éjection de vapeur et compression bi-étagée, voir glossaire).

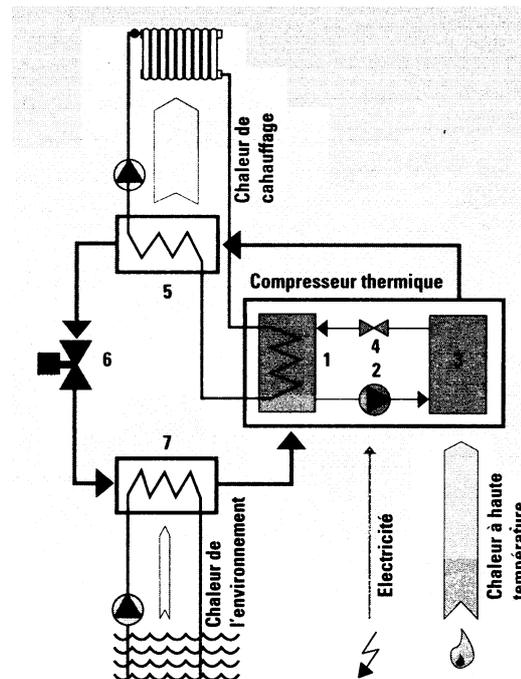
Les pompes à chaleur utilisant des fluides frigorigènes non polluants (voir chapitre suivant) ne peuvent fonctionner actuellement qu'à une température de chauffage de max. 50 à 55°C. Seuls les **systèmes d'apport thermique à basse température** remplissent cette condition durant toute la période de chauffage. Ce sont principalement les chauffages de sols et de plafonds; de nouveaux radiateurs, utilisables à basse température, sont aussi apparus sur le marché. Les radiateurs conventionnels ne remplissent que très rarement ces exigences - (d'anciennes installations fortement sur-dimensionnées dépassent malheureusement de peu la limite des 55°C). Dans ce cas également, un chauffage avec pompe à chaleur est possible pendant la plus grande partie de l'année, pour autant que l'on dispose, pour le peu de jours nécessitant une température de fonctionnement de plus de 50 à 55°C, d'un deuxième générateur de chaleur fonctionnant avec un autre agent énergétique (fonctionnement bivalent).

le fluide caloporteur, côté utilisateur, est en général l'eau. Par contre, pour la source de chaleur, plusieurs fluides peuvent être utilisés. C'est la raison pour laquelle il existe différentes conceptions (fig. 15):

- **Pompes à chaleur eau/eau** pour sources de chaleur en dessus de 0°C (p. ex. nappe phréatique, eau de surface, eau usée).
- **Pompes à chaleur saumure/eau** pour sources de chaleur parfois au-dessous de 0°C (p.ex. sondes géothermiques, serpentins enterrés et combinaison éventuelle avec absorbeurs placés en toiture); la saumure est en général constituée d'un mélange glycol-eau.
- **Pompes à chaleur air/eau** dont la source de chaleur est l'air extérieur. Comme les températures avoisinent le zéro dans l'évaporateur, il se forme souvent du givre qu'il faut enlever périodiquement, ce qui entraîne une consommation supplémentaire d'énergie.

Les pompes à chaleur eau/eau et saumure/eau, dont la puissance de chauffage se situe en dessous de 50 kW environ et fournissant un apport d'énergie thermique à basse température, ont la plupart du temps un fonctionnement **monovalent**, sans deuxième producteur de chaleur. Lorsque la source de chaleur est l'air extérieur, un système **bivalent** avec un deuxième générateur de chaleur est en règle générale nécessaire (excepté les installations avec accumulateur thermique dans un lit de galets).

les pompes à chaleur de chauffage peuvent aussi servir au chauffage de l'eau sanitaire. Pour le chauffage de l'eau uniquement, il existe des **pompes à chaleur/boilers** (plus cor



**Figure 14** Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à absorption. Dans l'absorbeur (1), le fluide frigorigène est absorbé par le fluide d'absorption. Là, la chaleur est ainsi transmise une première fois au chauffage. La pompe (2) injecte le mélange des solutions sous pression dans le concentrateur (3) d'où, après adjonction de chaleur, le fluide est à nouveau évacué. Le liquide d'absorption a rempli son rôle de compresseur thermique et traverse de nouveau la vanne de détente (4) pour arriver dans l'absorbeur (1). Le cycle du second fluide se poursuit presque de la même façon que celui de la pompe à chaleur à compression (fig.13): apport thermique au chauffage dans le condenseur (5), dilatation dans la vanne (6) et prise de chaleur de moindre valeur dans l'évaporateur (7)

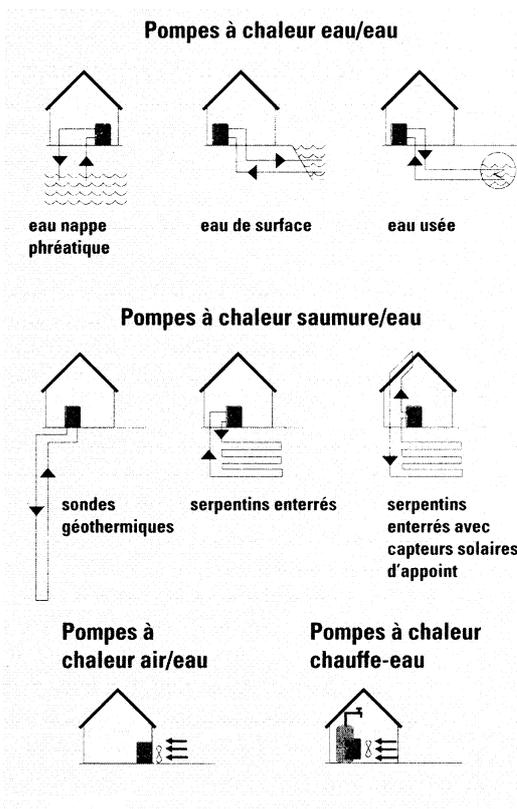


Figure 15 Divers types de pompes à chaleur

rectement: pompes à chaleur/chauffe-eau). Celles-ci soutirent la chaleur d'une pièce non chauffée et utilisent ainsi deux à trois fois moins de courant qu'un chauffe-eau électrique conventionnel. La chaleur étant intentionnellement soutirée du local, il faudra veiller à ne pas la réintroduire malencontreusement par le chauffage!

Dans le 1er chapitre, il est démontré que les **chauffages par résistances électriques** exploitent très mal la haute valeur de l'électricité. C'est pourquoi il faudrait remplacer de plus en plus les chauffages centraux à accumulation existants et présentant certaines conditions - limites favorables (source de chaleur à disposition, chauffage à basse température, etc.) par des pompes à chaleur. Le solde des chauffages par résistances électriques devrait être assaini de façon à pouvoir au moins atteindre un rendement optimal dans des situations bien déterminées. Il s'agit ici surtout de contrôler et d'optimiser la commande et la régulation.

Le **couplage chaleur-force**, en relation avec des pompes à chaleur à moteur électrique, est une façon des plus performantes et des plus souples de créer de la chaleur de chauffage: dans un contexte favorable, il est possible d'économiser 40%/0 d'énergie et de réduire d'autant la pollution due aux éléments polluants et au dioxyde de carbone. Nous démontrerons comment cela est possible dans le chapitre «Couplage chaleur-force».

	<i>Coefficient de performance instantané</i>	<i>Coefficient de performance annuel</i>	<i>Rendement global du système</i>
<b>Définition</b>	$\frac{\text{Puissance extraite [kW]}}{\text{Puissance introduite [kW]}}$	$\frac{\text{chaleur extraite [kW]}}{\text{Energie facturée introduite [kW]}}$	
<b>Limites de bilan</b>	<p><b>Pompes à chaleur (1) compresseur, évaporateur, condenseur)</b></p>	<p><b>Pompes à chaleur (1) Chauffage du carter (2) Pompage source chaleur (3) Dispositif antigel (4) Pompe accumulateur (5)</b></p>	<p><b>En fonction des conditions: en plus, accumulateur (6) et chaudière (7)</b></p>
<b>Période d'observation</b>	<i>Valeur momentanée</i>	<i>Année</i>	<i>Année</i>
<b>Températures (aux conditions limites)</b>	<i>Valeur momentanées: Entrée dans évaporateur Sortie du condenseur</i>	<i>Valeurs annuelles: Entrée dans évaporateur Sortie du condenseur</i>	<i>Valeurs annuelles: Entrée dans évaporateur Sortie du condenseur</i>
<b>Caractéristiques à garantir par:</b>	<i>Fabricant de la PAC</i>	<i>Projecteur de l'installation</i>	<i>Projecteur de l'installation</i>

Tableau 16 Caractéristiques

## Fluide frigorigène et pollution

Le R12 et certains autres fluides frigorigènes contribuent à aggraver le trou d'ozone et seront interdits dès 1994 dans les nouvelles installations. Comme solution de transition, on utilise le R22 qui d'une part est moins toxique, mais d'autre part n'est utilisable qu'à des températures maximales de 50 à 55°C. Des produits de remplacement aux propriétés physiques plus favorables n'apparaîtront en assez grand nombre sur le marché qu'à partir de 1994. De plus ces produits ne conviendront que pour de nouvelles installations, car un produit de remplacement du R12 servant à des installations existantes sans grandes modifications est peu envisageable.

## Caractéristiques

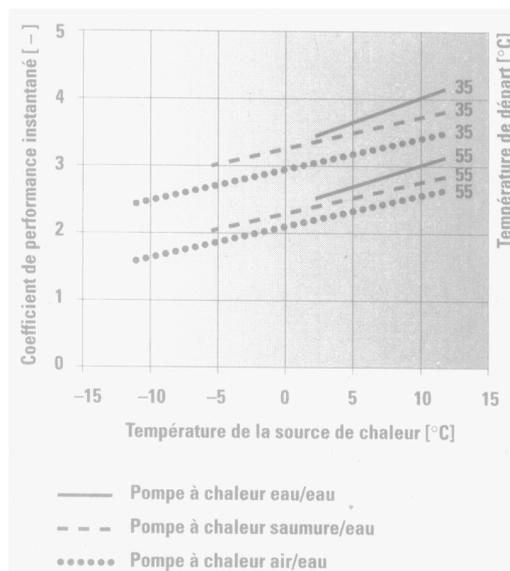
Celui qui décide d'installer une pompe à chaleur veut naturellement connaître d'abord la quantité de kWh de chaleur obtenue avec 1 kWh d'énergie noble et chère. Ce rapport est indiqué par divers chiffres caractéristiques dépendant au moins des trois conditions suivantes, lesquelles devront toujours être indiquées:

- Limite de bilan
- Temps d'observation
- Ecart de température entre la source de chaleur (température à l'entrée de l'évaporateur) et le chauffage (température à la sortie du condenseur) voir fig.17.

Le tableau 16 apporte une définition des chiffres caractéristiques et indique par qui ceux-ci doivent être garantis; le tableau 18 précise ces valeurs pour les pompes à chaleur électriques, en l'état actuel de la technique. Il ressort de ce tableau que sur l'ensemble des installations, un **coefficient de performance annuel moyen de 3,0** est possible aujourd'hui pour les pompes à chaleur à moteur électrique. (Pour les pompes à chaleur à moteur à gaz, les valeurs réelles sont d'env. 1,5 et pour les pompes à chaleur à absorption de 1,31.

### A quoi faut-il faire particulièrement attention?

Dans le passé, deux points surtout ont posé des problèmes: d'une part, les performances techniques théoriquement réalisables ne furent pas atteintes et, d'autre part, les problèmes techniques concernant la commande, la régulation et les raccordements hydrauliques causèrent des surprises désagréables. Ces «maladies d'enfance» devraient être surmontées aujourd'hui. Les conseils suivants peuvent être donnés au maître d'oeuvre:



Le coefficient de performance instantané est d'autant meilleur

- si la température de la source de chaleur est la plus élevée possible:
- si la température au départ du chauffage est la plus basse possible

Alors que l'on ne peut guère influencer la température de la source de chaleur celle au départ du chauffage sera définie par le projeteur !

**Figure 17** Coefficient de performance instantané en fonction de la source de chaleur et de la température de départ du chauffage. Exemples de caractéristiques pour divers types de construction de pompes à chaleur

Construction	Coefficient de performance instantané*	Coefficient de performance annuel	Rendement global du système
eau/eau (monovalent)	3,5...4,0	3,0...3,5	2,8...3,3
saumure/eau (monovalent)	3,0...3,5	2,5...3,0	2,3...2,8
air/eau (bivalent)	2,9...3,4	2,4...2,9	1,5...2,5**

\* Basé sur une température de départ de 35°C et une température de source de chaleur de 2 à 10°C (eau), -5 à 5°C (saumure), 0 à 10°C (air)

\*\* Chaudière incluse dans le rendement global du système, les valeurs peuvent différer fortement en fonction du degré de couverture de la chaudière

**Tableau 18** Valeurs cibles pour les caractéristiques de pompes à chaleur à moteur électrique selon tableau 16 Ces valeurs doivent être possibles avec les techniques actuelles de pompes à chaleur

## Régies générales

Lorsqu'une offre présente d'importants écarts par rapport à l'une des règles générales suivantes, des questions précises et critiques doivent être posées à l'auteur du projet, sans craindre, si nécessaire, de faire appel à un spécialiste indépendant.

- Pompes à chaleur avec sondes géothermiques: 15 m de sonde par kW installé (exemple: 1 maison familiale dont la puissance de chauffage se monte à 10 kW nécessite 2 sondes de 75 m).
- Pompes à chaleur à serpentins enterrés (moins de succès aujourd'hui, suite à la grande surface de terrain nécessaire): 42 m<sup>2</sup> d'emprise au sol par kW installé (exemple: une maison familiale qui utilise 10 kW de chauffage a besoin d'un terrain de 420 m<sup>2</sup> pour les serpentins).
- Pompes à chaleur/eau de nappe phréatique: au moins 150 l/h d'eau par kW installé, le refroidissement de l'eau sera de 4 - 5° (exemple: une maison familiale, dont la puissance de chauffage se monte à 10 kW, a besoin d'une quantité d'eau de 1'500 l/h).
- Pompe à chaleur/eau de surface: 310 l/h d'eau par kW installé, ce qui correspond à un refroidissement d'environ 2°C (exemple: une maison familiale utilisant 10 kW de chauffage doit disposer d'une quantité d'eau de surface de 3'100 l/h).
- Pompe à chaleur air/eau: en règle générale, un deuxième producteur de chaleur est nécessaire (fonctionnement bivalent).
- Prévoir de manière spontanée des fluides frigorigènes répondant aux nouvelles exigences applicables dès 1994 (actuellement le R22).
- Construire des installations avec stockage d'eau chaude. En règle générale il n'est pas très judicieux d'utiliser les chauffages de sol (plus exactement dans les chapes) pour le stockage. (Exception: p.ex. maison à très basse consommation d'énergie avec PAC sur le retour).

## Encadré 19

- Par grand froid, noter les températures de départ et de retour (base importante pour la planification).
- Choisir soigneusement le fournisseur de pompes à chaleur et le responsable du projet (demander des références).
- Examiner les offres sur la base de l'encadré 19 et en cas de doutes, s'en référer à un spécialiste indépendant.
- Les chiffres caractéristiques seront garantis par écrit et ne seront acceptés que s'ils sont conformes à ceux du tableau 18.
- Un chiffre caractéristique au moins doit être contrôlable (en règle générale, c'est le coefficient de performance annuel). De plus, un compteur électrique mesurera la consommation de la pompe à chaleur et un compteur de chaleur sera installé sur le réseau de chauffage.

## Rentabilité - exemples

Pour une installation de pompes à chaleur, on n'obtiendra un résultat économiquement défendable que lorsque les conditions suivantes seront remplies:

- Conditions-limites favorables, dans la mesure du possible, disponibilité illimitée de la source de chaleur avec une température de préférence élevée et constante, ainsi qu'un système de chauffage à basse température.
- Réduction maximale des investissements en veillant cependant à ne pas le faire au détriment des caractéristiques techniques: des pompes à chaleur pour villas raccordées à des sondes géothermiques trop courtes et/ou sans accumulateur ne sont pas de bons exemples d'économies !
- Faible besoin en énergie d'appoint, c'est-à-dire dimensionnement méticuleux des pompes, ventilateurs, etc.
- Tarif d'électricité favorable (p.ex. tarif spécial pompes à chaleur) et rapport intéressant entre utilisation «haut» et «bas» tarif (p.ex. extension des heures de bas tarif).

Au début la question posée était de savoir si un coefficient de performance annuel égal ou supérieur à 3,0 est réaliste ou utopique. Les mesures effectuées sur l'installation suivante prouvent qu'un coefficient de performance annuel de 3,0 est réalisable (fig.20):

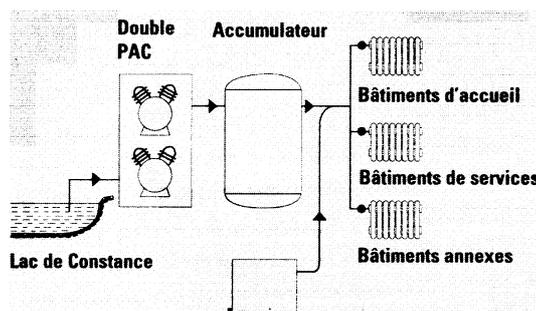
Il s'agit d'une pompe à chaleur eau/eau qui chauffe trois bâtiments de la **gare de Rorschach**. Le lac de Constance tout proche fait office de source de chaleur. Le projet prévoyait une installation bivalente. Le besoin réel de chaleur ayant été surévalué de 47%, l'installation est aujourd'hui presque monovalente, ce qui entraîne les remarques suivantes:

- L'installation présente un bon exemple de coefficient de performance annuel, de réduction de dioxyde de carbone et de substances polluantes pour l'atmosphère. De plus, 36 t d'huile de chauffage ont pu ainsi être économisées.
- Les frais annuels d'énergie sont d'environ Fr. 3'600.—inférieurs à ceux d'une installation comparative conventionnelle; par contre les frais d'amortissement sont de Fr. 26'800. plus élevés.
- l'erreur du calcul du besoin de chaleur se répercute obligatoirement davantage sur les frais d'investissement d'une pompe à chaleur que sur ceux d'une installation conventionnelle. L'influence sur le calcul de rentabilité ne devrait cependant pas être surestimée.

Ce dernier point justement - la surévaluation du besoin de chaleur - a pu être observé dans de nombreuses installations analysées après coup. Deux conseils peuvent être donnés ici:

- Pour de nouvelles installations, calculer les besoins de chaleur avec un maximum de précision selon les normes SIA 384/2 et renoncer aux sécurités supplémentaires.
- Pour l'assainissement d'une installation, mesurer le besoin en chaleur sur l'installation existante.

En résumé on peut dire que les installations de pompes à chaleur, par rapport aux installations conventionnelles, présentent des avantages notoires, surtout en ce qui concerne la lutte contre la pollution et la baisse des émissions de dioxyde de carbone dans l'air. Mais vu la situation actuelle des prix de l'énergie, les frais d'investissements supplémentaires ne sont que partiellement amortis par l'économie des frais d'énergie.



<i>Puissance nécessaire calculée</i>	184 kW
<i>Puissance nécessaire réelle</i>	125 kW
<i>Puissance thermique de la PAC</i>	110 kW
<i>Consommation électrique de la PAC</i>	130 MWh/a
<i>Consommation de mazout de la chaudière</i>	10 MWh/a
<i>Energie utile produite</i>	397 MWh/a
<i>Quantité de mazout substitué</i>	36'000 kg/a
<i>Coefficient de performance annuel</i>	3,0
<i>Rendement global du système (y.c. chaudière)</i>	2,8
<i>Investissements supplémentaires</i>	243'600 Fr.
<i>Frais de capitalisation</i>	26'800 Fr./a
<i>Coût de l'énergie</i>	19'050 Fr./a
<i>En comparaison: coût de l'énergie av. une installation conventionnelle</i>	22'600 Fr./a

*Base: prix du mazout 0,4 Fr./kg; prix du courant 10 ct/kWh; intérêts 7%; renchérissement de l'électricité 5%, renchérissement du mazout 6%; durée d'utilisation 15ans.*

**Figure 20.** Pompe à chaleur utilisant l'eau du lac, gare de Rorschach (source: Infoenergie Brugg).

### Tendances futures

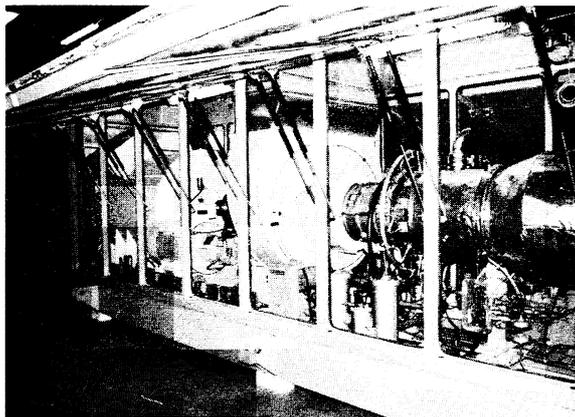
- On verra de plus en plus des pompes à chaleur à vitesse variable (variateur de fréquence, compresseur rotatif Par rapport au compresseur à piston, ce système présente plusieurs avantages. courant de démarrage plus faible, fonctionnement feutré, adaptation graduelle à la puissance, fréquence des enclenchements plus faible, etc.
- Avec de nouveaux fluides (mélanges à 2 composants sans azéotrope), on obtiendra de meilleurs coefficients de performance
- Des échangeurs de chaleur améliorés permettront de produire une meilleure densité de chaleur

### Encadré 21

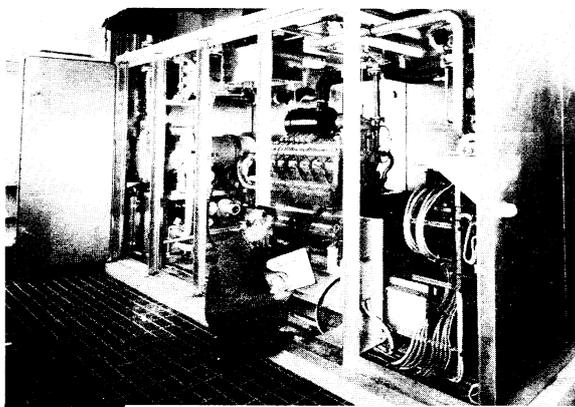
## Couplage chaleur-force



**Figure 22** Centrale chaleur-force combinée de «Merwedekanaal» près d'Utrecht en Hollande avec une puissance électrique de 225 MW.



**Figure 23** Installation de couplage chaleur-force compacte avec turbine à gaz; turbine à gaz (droite) et générateur (gauche) sont construits en «bloc».



**Figure 24** Installation de couplage chaleur-force compacte avec moteur à gaz, à Dietikon. Exploitants: usines électriques du canton de Zurich. Installation standard de CCF avec puissance électrique de 170 kW. Moteur à gaz (milieu), générateur (droite) et échangeur de chaleur (gauche) sont coiffés d'un caisson phonique commun.

### Utilisation des rejets thermiques lors de la production d'électricité - un problème de transport

Le transport de chaleur étant beaucoup plus cher que le transport de l'électricité, les rejets thermiques des grandes centrales électriques thermiques se perdent la plupart du temps dans la nature. Une utilisation économiquement rentable des rejets n'est possible que si l'on trouve aux alentours de la centrale des utilisateurs intéressés en nombre suffisant. On peut dès lors se demander s'il ne serait pas judicieux de décentraliser une partie de la production électrique afin de se rapprocher des consommateurs de chaleur. Cette solution s'appelle couplage chaleur-force (abréviation: CCF). Au premier plan y figurent les installations de couplage chaleur-force compactes (abréviation: CCFC) avec moteurs à combustion ou turbines à gaz, générateurs et échangeurs de chaleur assemblés en un seul bloc.

### Composants et domaines d'application

Les installations de CCF peuvent être des centrales chaleur-force établies dans des quartiers citadins, la chaleur étant distribuée par un réseau de chauffage à distance aux maisons environnantes et l'électricité alimentant le réseau public. Ici les **centrales chaleur-force combinées** sont particulièrement intéressantes (fig. 22): au moyen d'une combinaison turbine à gaz/turbine à vapeur, on peut atteindre un rendement électrique particulièrement important (environ 50%). Les grandes exploitations industrielles se prêtent fort bien à ce genre de centrales combinées.

Pour le couplage chaleur-force, l'industrie présente une certaine importance, puisqu'aussi bien électricité que chaleur sont utilisées souvent sur les lieux mêmes. Suite à l'aggravation des émissions polluantes, de nombreuses installations industrielles devront subir un prochain assainissement. Au vu des conditions-limites favorables, les **installations de couplage chaleur-force compactes avec turbine à gaz** (fig. 23) sont spécialement indiquées pour la production de chaleur industrielle (eau bouillante, vapeur).

Dans les secteurs «ménages» et «services», on installe encore et surtout des chaudières à mazout et à gaz pour la production de chaleur. Les **installations de couplage chaleur-force compactes avec moteur à gaz** représentent ici une alternative intéressante, pour autant que les conditions soient favora

Bles (chauffage d'un plus grand complexe de bâtiments ou raccordement d'un lotissement voisin par chauffage à distance). Comme combustible on prendra, en tout premier lieu, le gaz naturel; mais le biogaz (stations d'épuration) et le gaz liquide sont aussi envisageables. Les installations avec moteur à gaz sont aujourd'hui, grâce au catalyseur à 3 voies, aussi peu polluantes que les chaudières à gaz équipées d'un système Low-NOx (fig. 26). Les installations de 150 - 200 kW, spécialement intéressantes du point de vue économique et pratique, sont désignées comme installations standards. Dans un but de rationalisation, il faudrait tendre à l'avenir vers des modules standards prêts à l'emploi.

Pour des installations électriques de moindre importance (environ 7 - 15 kW), il existe de **petites installations de couplage chaleur-force compactes** avec moteur d'automobile à gaz relativement faciles à installer (fig. 25-). Elles sont dotées d'un catalyseur à 3 voies et peuvent être interconnectées pour de plus grandes puissances. Toutefois l'entretien en est relativement onéreux, étant donné que le moteur de voiture doit être totalement révisé ou changé tous les 5 ans environ.

En principe une installation de couplage chaleur-force peut être asservie aux **besoins thermiques** ou aux **besoins électriques**. La plupart du temps, elle fonctionne comme générateur de chaleur, et le fonctionnement est adapté aux besoins thermiques.

L'électricité est normalement injectée à puissance constante dans le réseau parallèle. En cas de panne du réseau une installation de CCF, munie d'un équipement électrique supplémentaire, peut aussi servir **d'installation de secours** en îlot et remplacer ainsi un groupe de secours conventionnel, pour autant que la chaleur puisse être évacuée en tout temps. Pour un système de secours, la disponibilité du gaz est limitée par rapport au diesel, du fait de sa dépendance envers le réseau d'alimentation.

Afin de réduire le nombre de mises en marche (pollution due aux gaz d'échappement), on intercalera un **accumulateur de chaleur** entre l'installation compacte de couplage chaleur-force et le système de chauffage.

Pour des raisons économiques, on recherchera un fonctionnement annuel de l'installation de couplage de chaleur-force le plus long possible; ainsi l'installation ne sera pas dimensionnée en fonction des besoins calorifiques maximaux, mais une **chaudière d'appoint** servira à couvrir les pointes de puissance par temps froid. Par rapport à un besoin calorifique maximum de 100%, selon les normes SIA 384/2, la puissance thermique de l'installation CCF seule est évaluée à 25 à 40%, ce qui permet de couvrir 60 à 75% du besoin thermique annuel.

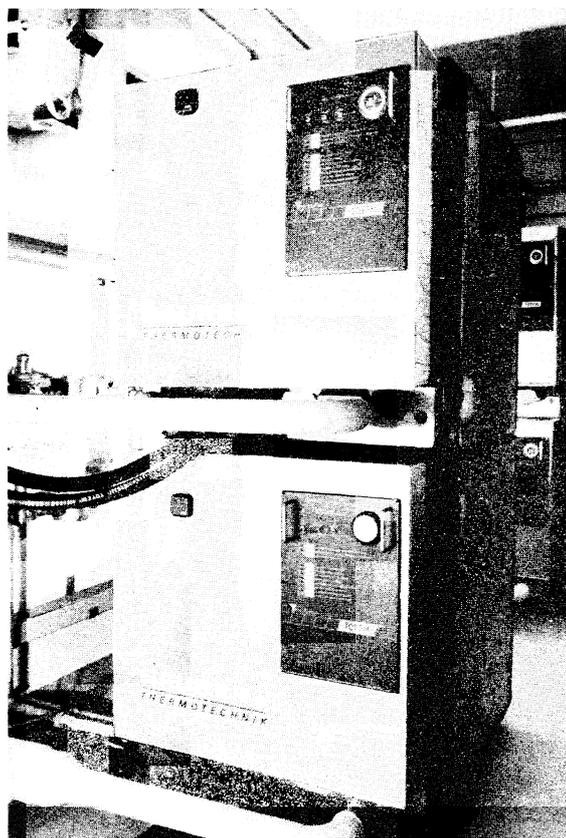


Figure 25 4 Petites installations de couplage chaleur-force avec une puissance électrique de 15 kW chacune donnent ensemble une puissance de chauffage de 156 kW.

Emissions relatives (charges sur l'environnement)

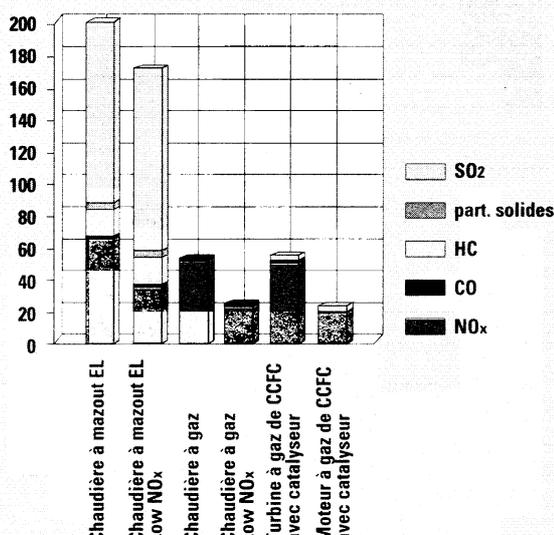


Figure 26 Emissions relatives de différentes techniques de production de chaleur. Les valeurs données se rapportent à l'émission de chaleur et l'évaluation des dommages est basée sur les valeurs-limites d'émission de l'ordonnance sur la protection de l'air (unité: kg/TJ).

Installations	Rendement global annuel	
	non pondéré	pondéré
Chaudière conventionnelle à gaz sans condensation des fumées	0,85...0,92	0,9
Chaudière conventionnelle à gaz avec condensation des fumées	0,92...1,02	1,0
CCFC avec turbine à gaz - thermique 0,50...0,60 - électrique 0,20...0,30	0,75...0,85	1,3
CCFC avec moteur à gaz - thermique 0,54...0,58 - électrique 0,30...0,34	0,85...0,92	1,5
CCFC avec moteur à gaz et PAC pour récupération des pertes par rayonnement et condensation des fumées - thermique 0,68...0,73 - électrique 0,25...0,30	0,95...1,00	1,5
Installation chaleur-force combinée - thermique 0,35...0,45 - électrique 0,40...0,50	0,80...0,85	1,75

**Tableau 27** Rendement global annuel de différentes installations de production de chaleur. La pondération de la colonne de droite est décrite dans le texte.

**Caractéristiques**

En général, la valeur de transformation de l'énergie est exprimée à l'aide du rendement global qui représente le rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie fournie. Le **rendement global annuel** relatif à différents systèmes est mentionné au tableau 27. Le rendement global étant normalement calculé en Suisse par rapport au pouvoir calorifique inférieur, des valeurs supérieures à 1 sont possibles (valeur-limite théorique pour le gaz naturel: 1,11). A cet égard, une erreur fréquente doit être corrigée: contrairement à ce que l'on prétend souvent, le rendement global d'une installation de CCF est à peine meilleur que celui d'une installation conventionnelle de production de chaleur. La grande différence provient du fait que l'énergie disponible - grâce à la production d'électricité - est alors plus précieuse. C'est pourquoi on indique souvent un rendement global annuel thermique et électrique. La somme de ces deux rendements donne le rendement global annuel.

Pour une comparaison concrète, il ne faut prendre en considération qu'un seul chiffre caractéristique. Le tableau 27 indique un **rendement global annuel pondéré**. Cette valeur correspondrait à une installation où le courant produit servirait uniquement à faire fonctionner une pompe à chaleur dont le coefficient de performance annuel serait de 3,0. Ce chiffre démontre clairement qu'une installation de CCF équipée d'un

	Centrales chaleur-force (CCF)		Installations de couplage chaleur-force compactes (CCFC)		
	CCF avec turbine(s) à vapeur	Install. Chaleur-force combinée	CCFC avec turbines à gaz	CCFC avec moteur industriel	Petite CCFC avec moteur d'auto
<b>Système d'entraînement</b>	Turbine(s) à vapeur combinées	Turbine(s) à gaz et à vapeur	Turbine(s) à gaz	Moteur à gaz industriel avec catalyseur à 3 voies, moteur à combustion pauvre, moteur diesel avec catalyseur SCR 4)	Moteur automobile à gaz avec catalyseur à 3 voies
<b>Carburant</b>	Charbon, huile lourde (flammes tourbillonnantes) gaz naturel, mazout (chaudière à vapeur conventionnelle)	Gaz naturel ou liquide, mazout EL, charbon gazéifié (futur)		Gaz naturel ou liquide, pétrole vert, biogaz (p.ex. dans station d'épuration) mazout EL 4)	
<b>Domaine principal d'application (exemples)</b>	Raccordement à un chauffage à distance (p.ex. avec incinération des ordures)	Raccordement à un chauffage à distance	Procédé de chauffage pour industries, hôpitaux (vapeur, eau chaude)	Raccordement à un chauffage à distance local, grands bâtiments isolés	Quartiers industriels, grands bâtiments isolés (p.ex. école, hôtel, bâtiment industriel)
<b>Plage de puissance</b>	5...1000 MWe	20...100 MWe	1...10 MWe	20...1000 kW CCFC standart: 150...200 kW 2)3)	7...15 kW 3)
<b>Indice de performance électrique 1)</b>	0,3...0,6	0,8...1,2	0,4...0,6	0,55...0,65	0,35...0,45

1) Indice de performance électrique = électricité produite/chaleur produite

2) Meilleur plage de puissance par rapport à l'investissement et à la puissance installée

3) Couplage de plusieurs unités possible afin d'obtenir de plus grandes puissances

4) Procédé SCR d'injection d'ammoniac: cher, essais en cours avec urée, plus économique.

**Tableau 28** Classification des couplages chaleur-force

moteur à gaz, p. ex., utilise l'énergie à disposition une fois et demie mieux que la chaudière la plus moderne.

Comme autre ordre de grandeur, il faut mentionner l'**indice de performance électrique** (voir tabl. 28). Il représente le rapport entre l'électricité produite et la chaleur produite. (Mais attention: les mesures pour l'amélioration du coefficient de performance annuel, comme p. ex. la condensation des gaz d'échappement, détériorent l'indice de performance électrique parce que la part de chaleur augmente!)

**CCF et PAC: stratégies et répercussions sur la consommation d'énergie et la production de dioxyde de carbone**

Le CCF combiné avec les PAC électriques peut amener, par l'utilisation appropriée des différentes valeurs des formes d'énergies, une économie d'énergie primaire et un plus grand respect de l'environnement. Les bilans énergétiques de la fig. 29 montrent trois cas-limites typiques comparés à une installation conventionnelle A:

- **Cas-limite B: respect maximal de l'environnement** atteint si tout le courant du CCF sert à actionner des PAC. Le fait que ces PAC appartiennent ou non à cette installation ne joue aucun rôle. Résultat: 40% de moins d'énergie primaire et abaissement proportionnel des éléments polluants et du dioxyde de carbone.
- **Cas-limite C: production électrique maximale sans surcharge sur l'environnement** possible si un tiers environ du courant provenant du CCF est utilisé pour actionner des PAC. Résultat: avec la même consommation d'énergie primaire et sans atteintes supplémentaires à l'environnement par des éléments polluants et du dioxyde de carbone, les deux tiers du courant obtenu par le CCF sont mis à disposition de l'approvisionnement général, ce qui correspond à 20% environ de l'énergie primaire utilisée. le paradoxe réside dans le fait qu'une production de courant à «tarif écologique zéro» est possible et ceci malgré l'utilisation d'énergie primaire fossile!
- **Cas-limite D:** si l'on doit produire beaucoup d'électricité sans renoncer au chauffage, l'énergie engagée peut atteindre 150% au maximum. Résultat: **production électrique maximale** de 45%, avec évidemment 50% de plus d'énergie primaire et une augmentation correspondante des émissions polluantes et du dioxyde de carbone. Cette stratégie n'a de sens que pour la substitution des centrales thermiques sans couplage de chaleur, puisque ces dernières, pour produire la même quantité d'électricité, utilisent 2 à 3 fois plus d'énergie et polluent beaucoup plus qu'une installation avec couplage chaleur-force.

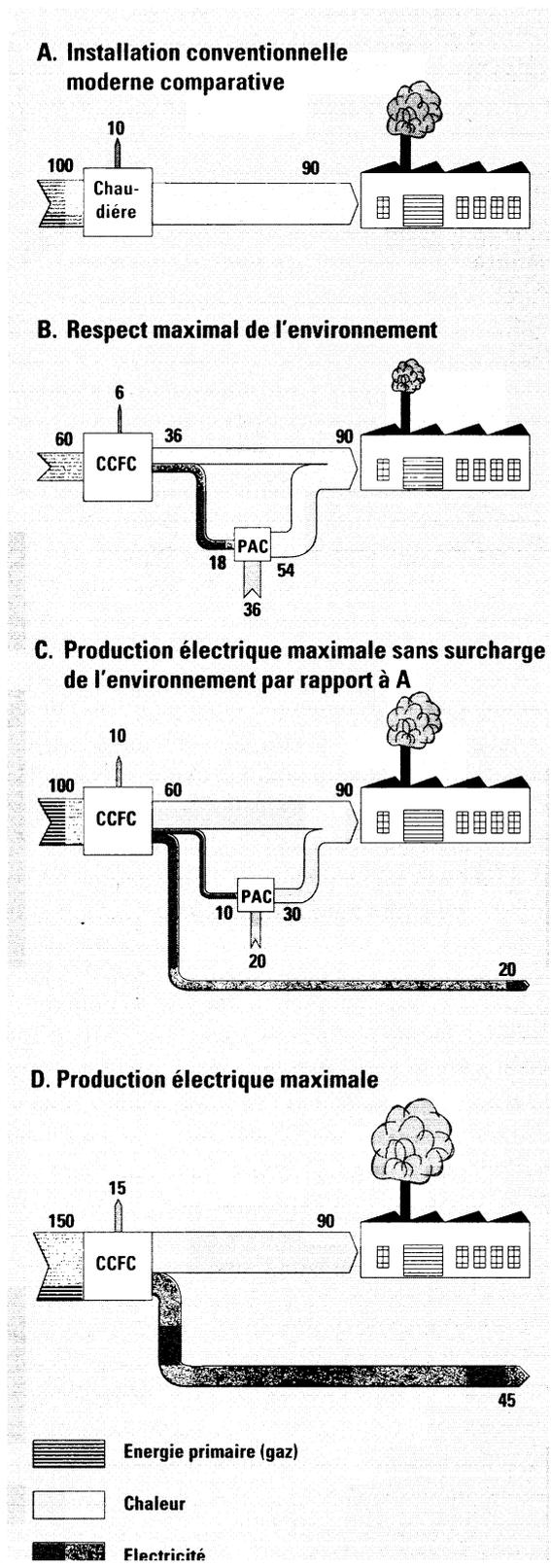


Figure 29 Comparaison des bilans énergétiques d'une installation conventionnelle A et des cas-limites B, C, et D selon figure 30.

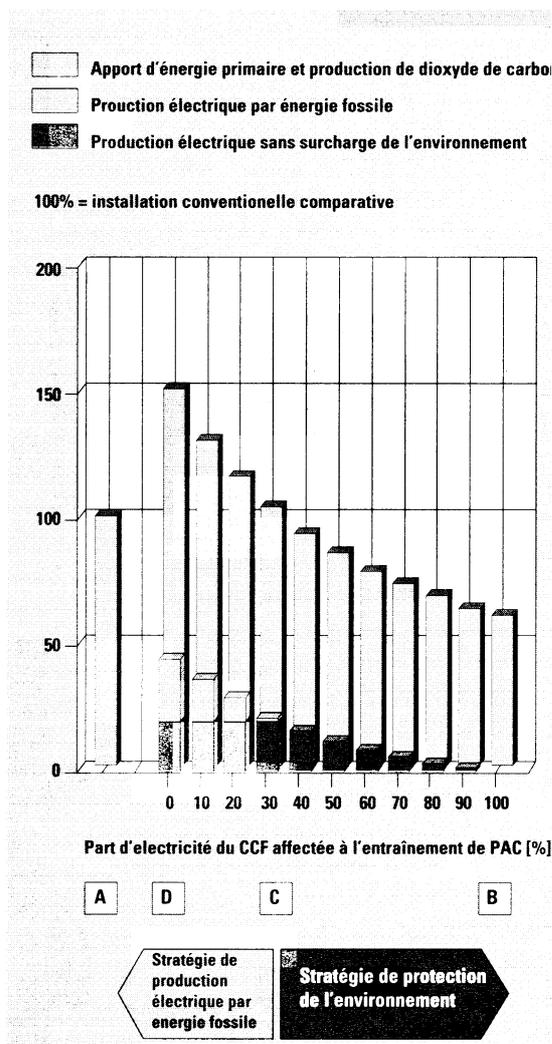


Figure 30 Selon la quantité de courant utilisée pour l'entraînement des pompes à chaleur il existe différentes stratégies. L'installation conventionnelle A et les cas-limites B C et D correspondent aux bilans énergétiques de la fig. 29.

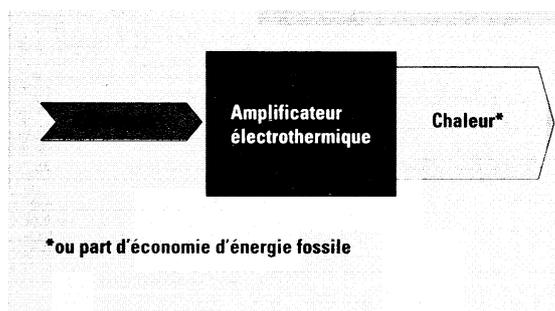


Figure 31 Amplificateur électrothermique.

Il est évident qu'en réalité aucune installation ne correspondra exactement à l'un des trois cas cités plus haut. Le plus souvent, nous trouverons une combinaison de deux des trois cas. La figure 30 présente deux variantes possibles, fondamentalement différentes:

- Si plus d'un tiers du courant du CCF est injecté pour alimenter des PAC, on adopte une **stratégie de protection de l'environnement**. La valeur accordée à la sauvegarde de l'environnement et la quantité d'électricité produite sans surcharges sur l'environnement sont à mettre en balance.
- Si moins d'un tiers du courant produit par le CCE est utilisé pour faire fonctionner des PAC, il en résulte une **stratégie de production électrique par énergie fossile** produisant des charges polluantes supplémentaires.

La production de courant en Suisse s'effectuant pratiquement sans émission de dioxyde de carbone, il existe très peu de possibilités de substitution de centrales thermiques de production d'électricité fossile par des centrales avec couplage chaleur-force, contrairement à l'Allemagne, par exemple. Ce scénario devrait donc être abandonné, car il ne contribue pas à la protection de l'environnement.

la figure 30 compare une installation conventionnelle avec chaudière à gaz et une installation de CCF avec moteur à gaz. Nous voyons que la réduction, resp. l'augmentation des rejets de dioxyde de carbone dépendent de la consommation d'énergie. Si l'on remplace le mazout par le gaz, on diminuera encore davantage les émanations de dioxyde de carbone, puisque le gaz naturel produit, par unité de chaleur, un quart de moins de dioxyde de carbone que l'huile de chauffage .

### Amplificateurs électrothermiques

Les considérations émises jusqu'ici sur les stratégies d'utilisation de CCF/PAC concernaient les pompes à chaleur avec moteur électrique. On pourrait dire de façon plus générale encore, qu'une PAC avec moteur électrique est un amplificateur électrothermique (fig. 31) avec un facteur d'amplification de 3 (l'énergie calorifique produite est trois fois plus élevée que l'énergie électrique consommée).

Finalement il n'est pas nécessaire que le produit final soit absolument de la chaleur- le critère déterminant étant l'économie d'énergie fossile - pour que le combustible supplémentaire utilisé pour la production d'électricité par CCF puisse être compensé. Et si l'on va plus loin dans cette conception, de nombreux autres amplificateurs électrothermiques existent avec des facteurs d'amplification électrothermique encore plus performants que les pompes à chaleur:

- Avec l'électricité comme énergie d'appoint injectée dans la récupération de chaleur ou l'utilisation des rejets thermiques, on obtient sans problème des facteurs d'amplification électrothermique allant de 7 à 10.
- Des installations modernes de renouvellement d'air (voir glossaire) obtiennent des facteurs d'amplification électrothermique de l'ordre de 5 à 10 (comparées à des installations conventionnelles).
- Des véhicules électriques légers utilisent pour la même distance 5 à 10 fois moins d'énergie qu'une voiture normale. L'économie d'énergie fossile ainsi réalisée correspond à un facteur d'amplification électrothermique de 7,5 à 15 (1e carburant fossile a une valeur 1,5 fois plus élevée que la chaleur de chauffage).

### Installations de CCF compactes à moteur Diesel

Jusqu'ici il n'a été question que d'installations de couplage chaleur-force compactes avec moteur à gaz, cette méthode étant maîtrisée; de plus, l'épuration des gaz d'échappement est techniquement résolue. Par contre, pour les moteurs Diesel, le respect des prescriptions concernant les émissions polluantes pose encore des problèmes. Jusqu'à présent on a utilisé des procédés d'injection d'ammoniac. Mais, ce faisant, il subsiste des risques et le procédé reste cher; c'est pourquoi cette technique ne devient économiquement intéressante que pour de très importantes installations. Des procédés d'injection au moyen d'urée au lieu d'ammoniac sont à l'essai. On peut s'attendre à ce que les moteurs Diesel prennent de l'importance dans les installations de CCF, principalement comme groupes de secours.

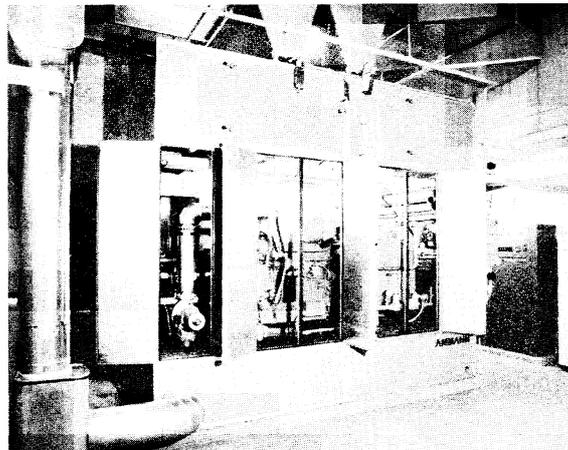
### Pompes à chaleur avec moteur à gaz

les PAC actionnées par des moteurs à gaz peuvent préserver l'environnement de la même manière que la solution «PAC/CCF». On demande fréquemment pourquoi les PAC avec moteur à gaz sont si peu utilisées? On peut résumer la réponse ainsi:

- Forte restriction du potentiel, car l'utilisation de la chaleur (à partir de 1000 kW) doit se trouver au même endroit que la source de chaleur correspondante; de plus, la source de chaleur «air», disponible partout, n'est pas appropriée pour de si grandes installations.
- Selon la situation actuelle des prix, économiquement peu intéressant.
- Le peu de possibilités d'implantation ne laisse aucune chance à une production standardisée de ce type d'installation.

Type d'installation	Investissements supplémentaires		Service, entretien
	Centrale [Fr./kWh <sub>e</sub> ]	Distribution de la chaleur [Fr./kWh <sub>e</sub> ]	
<b>Petite CCFC</b> gaz naturel, bâtiments isolés, quartiers industriels - 15.. kW <sub>e</sub>	4'000	0...2'500	6,0
<b>CCFC avec moteur à gaz</b> gaz naturel, chauffage à distance local - 100 kW <sub>e</sub> - 200 kW <sub>e</sub> - 1000 kW <sub>e</sub>	3'600	0...1'500	3,0...3,5
	3'200	0...1'500	2,3...2,8
	2'800	0...1'500	1,7...2,2
<b>CCFC avec turbine à gaz</b> gaz naturel, mazout EL, industrie, procédés de chauffage - 1 MW <sub>e</sub> - 5 MW <sub>e</sub> - 10 MW <sub>e</sub>	3'000	0...500	1,5...2,5
	1'600	0...500	1,5...2,5
	1'300	0...500	1,5...2,5

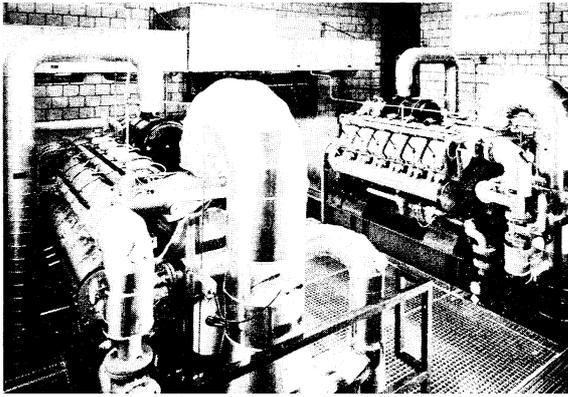
**Tableau 32** Frais spécifiques pour les investissements supplémentaires (comparés aux installations conventionnelles décentralisées) et pour conciergerie et entretien (état 1991)



Puissance thermique nécessaire	900 kW
Energie annuelle nécessaire (chaleur)	3'000 MWh/a
Puissance électrique du CCFC	125 kW
Temps d'enclenchement du CCFC	7'000 h/a
Investissements supplémentaires	400'000 fi
Prix de revient do courant	11.5ct./kWh

Base: tarifs du gaz des services industriels de la ville de Burgdorf, tarifs électrique d'Elektra Fraubrunnen, coût d'entretien 3 ct/kWh<sub>e</sub> prix de revient de la chaleur correspondent à: une installation conventionnelle avec chaudière. Annuités 10%, sans tenir compte du renchérissement de l'énergie

**Figure 33** Fromagerie centrale a Kirchberg (source Dr. Eicher & Pauli SA, Liestal).



<i>Puissance thermique nécessaire</i>	7'000 kW
<i>Energie annuelle nécessaire (chaleur)</i>	14'000 MWh/a
<i>Puissance électrique du CCFC :</i>	2x 450 kW
<i>Temps d'enclenchement du CCFC</i>	6'000 h/a
<i>Taux d'utilisation annuelle du CCFC</i>	93%
<i>Investissements</i>	2'600'000 Fr.
<i>Prix revient du courant</i>	10 ct./kWh
<i>Tarif haut de reprise (hiver)</i>	15 ct./kWh

Base: Tarifs gaz et électricité de la ville Zurich, entretien 1,8 ct/kWh, prix de revient de la chaleur 3,2ct/kWh, intérêt 5,5%, durée d'utilisation 18 ans, sans tenir compte du renchérissement de l'énergie

**Figure 34** Centrale avec 2 installations de couplage chaleur-force compactes dans le complexe de bâtiments «Hardau» à Zurich (source: Dr. Eicher & Pauli SA, Liestal).

### Tendances futures

- *les moteurs Diesel devront se plier aux prescriptions dictées concernant leurs émissions polluantes et ne pourront plus être utilisés sans autre pour les installations de CCFC (aujourd'hui possible seulement avec gaz liquide au biogaz).*
- *Moteurs à combustion pauvre (voir glossaire) dont les gaz d'échappement suivront les exigences des ordonnances pour la qualité de l'air, simplifiant ainsi les mesures actuelles concernant l'épuration des gaz d'échappement.*
- *Moteurs Stirling (voir glossaire) permettant la construction de petites installations de CCFC avec production électrique, intéressantes par ex. dans le domaine des maisons familiales.*
- *Autres améliorations techniques permettant d'atteindre des rendements électriques plus élevés.*
- *Transformation directe d'énergie chimique en électricité au moyen de piles à combustible (voir glossaire).*

- La température du système de distribution de chaleur doit se situer en dessous de 65°C (pas de procédé de production de chaleur).
- Le coefficient de performance annuel des pompes à chaleur reste rigide; de meilleures valeurs sont possibles avec un système CCF/PAC (voir chapitre «amplificateurs électrothermiques»).

**Conclusion:** Les pompes à chaleur avec moteur à gaz sont du point de vue énergétique très intéressantes et dignes d'obtenir une promotion, mais un système CCF/PAC est beaucoup plus souple!

### Rentabilité - exemples

Au tabl. 32 figurent les frais spécifiques à prévoir pour la réalisation d'une installation de CCF. Les deux exemples suivants montrent, comme nous le prétendions au début, que de telles installations sont économiquement viables.

Coop Suisse exploite à Kirchberg une **centrale fromagère** équipée d'une installation de CCFC avec moteur à gaz (fig. 33). La chaleur est utilisée pour le chauffage, la ventilation, l'eau chaude et le nettoyage des cuves. En cas de rupture de courant, l'installation de CCFC sert de groupe de secours. Pour couvrir les heures de pointe, une chaudière bi-combustible est à disposition. L'installation fonctionne depuis l'automne 1989 et donne satisfaction. Grâce à un nombre d'heures de fonctionnement annuel très élevé et par le fait que le courant produit peut entièrement servir à couvrir les besoins propres, la production d'électricité devient même intéressante du point de vue économique.

Les deux installations de couplage chaleur-force compactes de la centrale thermique de **Hardau** (fig. 34) desservent en chauffage environ 1000 appartements, les écoles voisines, une piscine couverte et un home pour personnes âgées. L'installation, qui appartient à la ville de Zurich, a été mise en service en janvier 1990. Du fait que les rejets thermiques par rayonnement de l'installation de CCFC soient récupérés au moyen de PAC électriques, il s'ensuit un excellent rendement global annuel. Environ 8% de la production de courant servent à faire fonctionner ces PAC, le reste est réinjecté dans le réseau urbain. Grâce aux tarifs de restitution de la ville de Zurich, l'installation est économiquement viable.

# Dispositions pour la planification, la construction et l'exploitation

## Mesures de gestion et de promotion

Le dernier chapitre montre que l'examen seul d'une installation unique ne suffit pas. Il est beaucoup plus utile d'examiner le développement dans son ensemble. Le rapport entre le courant produit par CCF et le courant injecté dans les PAC joue un rôle particulièrement important. Si l'on doit diminuer notre production d'éléments polluants et de dioxyde de carbone, la **politique de protection de l'environnement** doit être poursuivie. Ce qui implique qu'au moins un tiers du courant produit par CCF doit être utilisé pour le fonctionnement des PAC.

Il est également démontré qu'en plus de la construction de PAC, d'autres mesures existent (p. ex. récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques) qui, avec un apport de courant relativement modeste, provoquent une économie d'énergie fossile beaucoup plus importante. Les PAC avec moteur électrique et les mesures préconisées qui en découlent ont un effet **amplificateur électrothermique**. Ce qui est important ici, c'est de bien comprendre qu'il n'existe aucune contrainte de situation ou de propriété entre les installations CCF et les amplificateurs électrothermiques. Répartie sur quelques années, la durée des réalisations ne joue pas un rôle prépondérant.

Parallèlement à l'**arrêté sur l'énergie** du Conseil fédéral et aux différents **lois cantonales** sur l'utilisation de l'énergie qui favorisent la promotion et l'utilisation d'une énergie économique, rationnelle et respectueuse de l'environnement, une promotion rapide du CCF et d'amplificateurs électrothermiques doit être encouragée. Des mesures de promotion sont décrites dans l'encadré 36. Ces mesures devraient être si possible appliquées dans un cadre local. A l'intérieur d'une commune, d'une ville ou d'un canton, on pourrait par exemple relier ensemble des CCF et des amplificateurs électrothermiques.

Il n'existe aujourd'hui en Suisse aucun concept énergétique visant à équiper une grande région avec des installations de CCF couvrant une part importante de la consommation d'électricité. C'est pourquoi l'exemple de l'encadré 37 provient d'Allemagne. En premier lieu, il faut promouvoir des installations jouissant de conditions particulièrement favorables (encadré 39). le choix de ces installations sera basé sur des **analyses sommaires** de tous les bâtiments concernés. les cas les plus

## Mesures d'orientation et de promotion

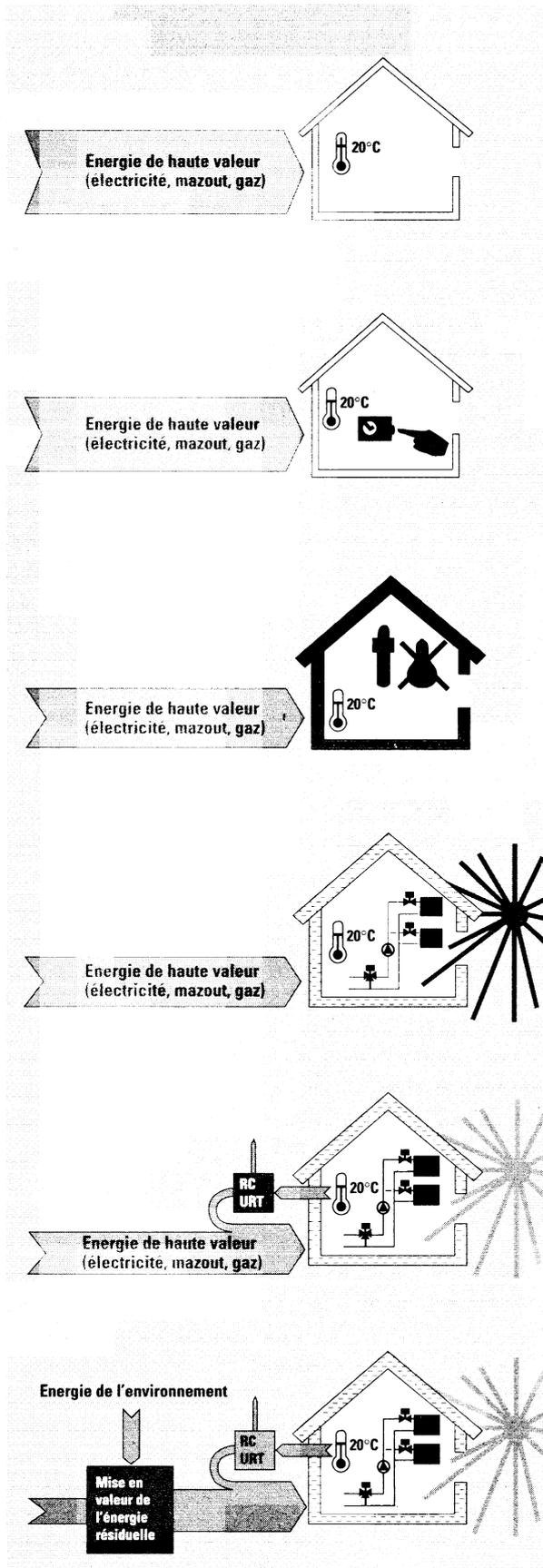
- *Tarifs populaires (paiements pour les kWh injectés dans le réseau CCF, tarifs préférentiels pour pompes à chaleur)*
- *Contributions financières ou prêts sans intérêt pour les installations - pilotes et de démonstration.*
- *Réalisation d'installations de CCF, de PAC et de RC dans des bâtiments publics (prendre les devants avec de bons exemples)*
- *Promotion de sociétés -maîtresses capables de prendre en mains la réalisation et de vendre la chaleur à des conditions fixées au préalable.*
- *Prévoir les mesures nécessaires pour favoriser le chauffage à distance de lotissements.*
- *CCF obligatoire pour de gros consommateurs de chaleur.*
- *Information et cours de perfectionnement*

## Encadré 36

### Concept énergétique des usines de la ville de Rottweil (Allemagne)

*L'usine de Rottweil livre directement à ses clients l'énergie «chaleur» au lieu du gaz. Pour cela, il a fallu construire de petits îlots décentralisés de chauffage à distance munis d'installations de CCFC avec moteur à gaz. Par cette transformation d'énergie «interne», l'enjeu énergétique est non seulement très rentable, mais on obtient même un bénéfice. La prestation électrique actuelle de 40 installations de CCFC se monte à 3,6 MW, ce qui correspond à 18% des prestations de pointe des usines de Rottweil (20 MW). Une gestion informative permet d'optimiser le délestage des pointes, ce qui est particulièrement intéressant en raison des sérieuses économies réalisables dans les tarifs de pointes. Les frais d'investissement spécifiques aux installations de CCFC gravitent autour de 2'300 DM/kW<sub>e</sub> et le fonctionnement atteint une durée de 5'000 h /an. Malgré l'importante part que représente le CCFC (18%), aucun problème de réseau n'est apparu.*

## Encadré 37



**Avant assainissement**

**Réduire les besoins**

- Abaisser les niveaux de température
- Réduire les heures de fonctionnement

**Diminuer les pertes**

- Isolation du bâtiment
- Isolation des éléments techniques (tuyauterie, vannes, ...)
- Appareils électriques avec meilleur rendement (p. ex. ampoules économiques)

**Utilisation des gains de chaleur (soleil, personnes, appareils)**

- Soigner la régulation et le système de commande
- Contrôler chaque pièce individuellement (au moyen de vannes thermostatiques, sinon mieux)
- Système de chauffage souple avec température de départ la plus basse possible

**Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques**

- Récupération de la chaleur utilisable dans le même procédé (p. ex. récupération de chaleur dans les installations de ventilation)
- Rejets thermiques d'un premier procédé utilisés dans un deuxième procédé (p. ex. utilisation des rejets thermiques pour le chauffage de l'eau).

**Mise en place de dispositions écologiques et économiques pour la fourniture du solde à énergie nécessaire**

- Energies renouvelables
- Pompe à chaleur
- Couplage chaleur-force
- et après seulement: production de chaleur conventionnelle

**Figure 38** Regles de base pour un emploi rationnel de l'énergie: c'est lorsque toutes les mesures citées ci-dessus et abordables du point de vue économique sont épuisées et appliquées que l'on peut envisager la mise en place d'une installation de chauffage conventionnelle.

intéressants seront ensuite soumis à une **analyse détaillée**. Cette manière de procéder a fait ses preuves depuis quelques années dans le domaine de l'assainissement énergétique des bâtiments et peut sans autre s'appliquer aux projets formulés plus haut.

Finalement il faut bien admettre que les installations de CCF, les PAC et les systèmes de récupération de chaleur sont relativement complexes par rapport aux installations conventionnelles. Une attention toute particulière doit donc être vouée à tout le déroulement du projet, afin d'éviter des surprises désagréables. C'est pourquoi il est recommandé de toujours lier les mesures d'encouragement à des **obligations** relatives à la planification, à l'optimisation du fonctionnement et aux contrôles des résultats du projet. Et l'on peut même se demander si cette phase de projet ne devrait pas être réglementée et financée.

### Phase 1: Concept global, cahier des charges, projet et mise en soumission

Certaines règles de base pour une utilisation rationnelle de l'énergie doivent être maintenues (fig.38). Cela n'est possible que si le problème est considéré dans son ensemble et qu'un **concept global avec cahier des charges** soit établi, car dans cette première phase tous les points importants sont fixés et les erreurs commises ici se répercutent en s'aggravant sur la consommation d'énergie et sur l'environnement. Il est regrettable que la liste des mesures impératives à prendre, selon fig. 38, soit si souvent négligée !

Tôt ou tard, le **projet** définitif représentant la base de la **mise en soumission** sera établi. Ici l'accent est mis sur 2 points:

- Commande, régulation, liaisons hydrauliques (encadré 40).
- Problèmes de bruit (dans les cas compliqués, le concours d'un spécialiste en acoustique est absolument recommandé).

### Phase 2: planification détaillée, exécution, régulation, mise en route et première réception

Après la conclusion des contrats, on passe à la **planification détaillée et à l'exécution**. Si la conception est claire depuis le début, il ne devrait pas surgir plus de problèmes que pour la construction d'une installation conventionnelle.

### **Les installations permettant d'économiser l'énergie seront tout d'abord construites là où les conditions préalables sont favorables**

- *Couplage chaleur-force: production de chaleur assurée pour au moins 4'000 h de fonctionnement annuel, conditions préalables favorables à un chauffage à distance, conditions de branchement au réseau électrique intéressantes.*
- *Pompes à chaleur. source de chaleur appropriée avec une disponibilité suffisamment grande, une élévation de température la plus faible possible entre source de chaleur et apport thermique (chauffage à basse température).*
- *Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques, dispositions favorables des emplacements, mise en relation des horaires et des niveaux de température entre source de chaleur et besoins thermiques.*

#### Encadré 39

### **Conseils pour, la commande, la régulation et l'hydraulique**

- *Les appareils de commande et de régulation des installations de chauffage, ventilation, climatisation, sanitaire et électricité doivent être de même fabrication afin d'éviter des problèmes d'interface.*
- *Générateurs de chaleur (chaudière, pompe à chaleur, CCFC), accumulateurs et distributeurs doivent, le plus souvent possible, être posés l'un près de l'autre. on évite ainsi beaucoup de problèmes hydrauliques.*
- *L'équilibrage hydraulique sera facilité si l'on prévoit des clapets de réglage et des points de mesure.*
- *Ne jamais laisser agir plus d'une pompe sur un circuit hydraulique (découplage hydraulique).*
- *Les pompes équipant des installations avec vannes thermostatiques doivent avoir une caractéristique relativement plate et ne pas dépasser 2 m de colonne d'eau (problèmes de bruit), sinon prévoir des régulateurs de pression différentielle.*
- *Les raccordements de groupes et de distributions sans pression ne peuvent accuser que peu ou pas de différence de pression entre eux*
- *Le réseau secondaire d'un réservoir-tampon doit pouvoir fonctionner avec débit variable (valable aussi pour le réseau primaire en cas de stratification).*

#### Encadré 40

### **Conseils pour optimisation du procédé et contrôles de qualité**

- Les éléments de contrôle et de mesure indispensables à l'optimisation de l'exploitation et aux contrôles de qualité seront prévus dans la phase de conception du projet déjà.
- L'enregistrement des mesures indispensables de l'exploitation sur des formulaires adéquats se fera chaque semaine (pour un certain temps év. chaque jour) par le concierge. Ce dernier transmettra ces données chaque mois au responsable du projet qui analysera immédiatement ces valeurs afin d'améliorer l'optimisation du fonctionnement
- Dans des installations plus importantes et plus complexes, il est recommandé de se servir d'un enregistrement automatique des mesures.
- Des installations commandées par ordinateur (systèmes d'automates programmables, gestion centralisée) doivent permettre l'enregistrement et la restitution des mesures importantes (p. ex. sous forme de fichier ASCII).
- Dans la première période de chauffage, l'installation ne fonctionne souvent pas très régulièrement (utilisation incomplète, séchage du bâtiment etc.); dans ce cas, introduire si possible une phase d'optimisation de l'exploitation avec contrôle des résultats sur deux ans.
- La valeur des garanties du contrôle de qualité doit être définie dans le contrat d'exploitation.

### **Encadré 41**

Les travaux de **réglage** et de **mise en service** doivent être menés avec un soin particulier. Comme il s'agit en règle générale d'installations de récupération de chaleur, de pompes à chaleur et de couplage chaleur-force impliquant des débits hydrauliques variables, un équilibrage hydraulique s'avère indispensable.

A la **première réception**, la responsabilité de l'installation passe des mains de l'entrepreneur à celles du maître de l'ouvrage. Ce serait une lourde erreur que de considérer à ce moment-là que l'installation travaille à son rendement optimal et de déclarer toute rectification de la régulation superflue pour la suite.

### **Phase 3: Optimisation du fonctionnement, contrôle des résultats et deuxième réception**

De nombreuses recherches effectuées durant les premières années de fonctionnement ont montré que beaucoup d'installations ne travaillent pas du tout comme le concepteur du projet le souhaite; cette remarque est également valable pour des installations conventionnelles !

La période entre la réception proprement dite (ici la première réception) et le début de la période de garantie (ici la deuxième réception) doit être beaucoup mieux utilisée. Durant ce laps de temps de deux ans, on peut parvenir sans problème à l'obtention d'un **fonctionnement véritablement optimisé**. Ces travaux aboutiront à un **contrôle des résultats** et le maître de l'ouvrage acquerra ainsi la certitude qu'il possède une installation qui travaille de manière irréprochable (voir encadré 41).

### **Qui est responsable de quoi et de quelle façon les prestations seront-elles honorées?**

Certains diront: «C'est bien joli, mais en pratique tout est différent. Un concept global, digne de ce nom, est très rarement établi. Les exécutants étant depuis longtemps occupés par d'autres installations, une optimisation de l'exploitation est par conséquent illusoire. De plus, toutes ces bonnes intentions, qui figurent dans les règlements SIA concernant les prestations et honoraires, ne sont en général pas connues et appliquées par les maîtres d'ouvrages!»

L'industrie reconnaît depuis longtemps que le contrôle de qualité ne peut pas dépendre des départements de développement ou de construction, sinon les contrôles se contrôlent

eux-mêmes. le cas se présente aujourd'hui de manière similaire dans la construction où le planificateur (développement) et l'installateur (construction) se contrôlent souvent eux-mêmes. Comment résoudre ce problème?

Une **proposition** correspondant à la situation actuelle et pouvant parfaitement être mise en pratique est décrite à la figure 42. Aux cotés du maître de l'ouvrage, resp. de son représentant (architecte) se tient un ingénieur-conseil qui, sur la base d'une analyse complète, établit un concept global avec cahier des charges. Puis l'ingénieur laisse temporairement la place à un concepteur-responsable, capable de coordonner au besoins les entrepreneurs et d'autres concepteurs, responsable aussi de l'optimisation de l'exploitation. Lorsque cette opération est terminée, l'ingénieur-conseil fonctionne de nouveau pour le contrôle des résultats et la deuxième réception.

Au sujet de la **réglementation des honoraires SIA**, la norme 108 laisse entrevoir une solution. La figure 42 en décrit les phases et prestations partielles. Deux questions y relatives se posent:

- **Concept global:** la SIA propose pour la phase des études préalables «0» des honoraires au tarif-temps. Ceux-ci seront déterminés d'entente avec le maître de l'ouvrage. La façon de délimiter la prestation partielle 1 «Avant-projet» et la prestation partielle 2 «Estimation des coûts et délais» sera définie de cas en cas.
- **Optimalisation de l'exploitation et contrôle des résultats:** ces tâches ne sont que partiellement couvertes par la prestation partielle 15 «Direction des travaux de garantie». Ici aussi une part importante des honoraires doit être fixée séparément, d'entente avec le maître de l'ouvrage.

Cependant le problème le plus important est de trouver des spécialistes dotés d'une grande expérience dans le domaine des couplages chaleur-force, des pompes à chaleur et de la récupération de chaleur. Il faut espérer que les efforts de perfectionnement et de développement en cours dans ce secteur iront en s'accroissant. RAVEL est prêt à y apporter une importante contribution.

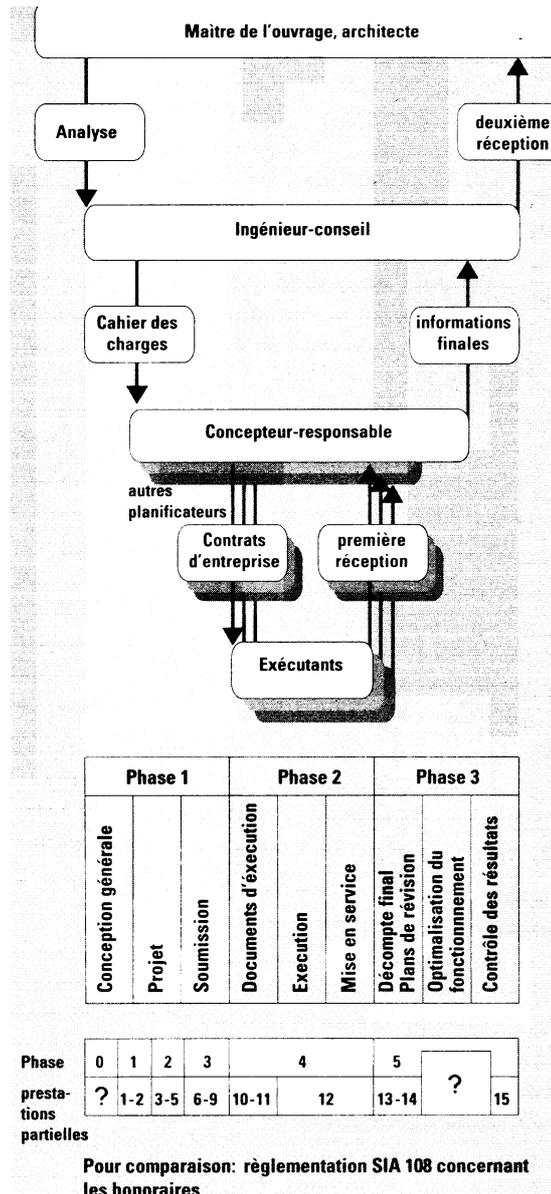


Figure 42 Proposition de planification et de calculs d'honoraires.

# Glossaire

**Agent énergétique:** Matière capable de fournir de l'énergie. Une différence est à faire entre agent **énergétique primaire**, disponible dans la nature et n'ayant subi encore aucune transformation (par exemple bois, charbon, pétrole brut, gaz naturel, eau, uranium) et un **agent énergétique secondaire** obtenu par transformation de l'agent énergétique primaire moyennant des pertes énergétiques (par exemple mazout, benzine, électricité). L'énergie mise directement à disposition du consommateur est appelée **énergie finale**. Ce sont d'une part les agents énergétiques primaires ne nécessitant aucune transformation (par exemple bois, charbon, gaz naturel) et d'autre part les agents énergétiques secondaires. On appelle **énergie utile** celle qui, après toutes formes de transformation, est vraiment utilisée (par exemple chaleur, force, lumière).

**Agent énergétique fossile:** Charbon, pétrole, gaz naturel.

**Agent énergétique primaire:** Voir «Agent énergétique».

**Agent énergétique secondaire:** Voir «Agent énergétique».

**Amplificateur électrothermique:** Appellation générale pour une «boîte noire» capable de délivrer, à l'aide de l'électricité, une quantité d'énergie thermique plusieurs fois supérieure à celle introduite (d'où une économie d'énergie fossile). La pompe à chaleur en est un exemple classique avec un **facteur d'amplification électrothermique** d'environ 3,0.

**Analyse détaillée:** voir «Analyse sommaire».

**Analyse sommaire, analyse détaillée:** Méthodes d'analyse utilisées dès 1980 lors de transformations des installations de chauffage dans le bâtiment. Cette technique est également utilisée pour les installations électriques. Elle permet, sur la base de quelques valeurs caractéristiques (p.ex. l'indice énergétique), de définir les éléments les plus rentables à transformer. L'analyse détaillée permet ensuite de déduire quelles sont les mesures à envisager à court et moyen terme, ainsi que leurs conséquences.

**Anergie:** voir «Energies».

**Apport thermique:** Apport de chaleur dans des locaux chauffés par l'intermédiaire de radiateurs ou de serpentins, etc. La température du système de chauffage est inversement proportionnelle à la surface chauffante. Une installation bien conçue travaille à basse température (chauffage à basse température) avec une inertie la plus faible possible.

**Asservissement aux besoins électriques:** La puissance d'une centrale chaleur-force est proportionnelle aux besoins électriques momentanés.

**Asservissement aux besoins thermiques:** La puissance d'une centrale chaleur-force est proportionnelle aux besoins thermiques momentanés.

**Biogaz:** Gaz – principalement du méthane – produit lors de la décomposition de matières organiques (lisier, installations de traitement des eaux usées, décharge, etc.)

**Bivalent (Fonctionnement de PAC):** Fonctionnement permettant aux installations équipées de pompes à chaleur d'avoir recours à un deuxième générateur de chaleur pour couvrir les demandes de pointe lors des grands froids (on utilise en général des chaudières conventionnelles).

**Caloduc:** (en anglais: heatpipe) caractérise par le fait que le fluide caloporteur circule par lui-même. Dans un caloduc, la chaleur est transportée de la zone chaude à la zone froide par évaporation et condensation du fluide. Dans une disposition verticale, la moitié inférieure est mise en contact avec une source de chaleur et le fluide s'évapore puis monte dans la partie supérieure, où il donne sa chaleur et se condense pour retomber dans la partie inférieure. Dans une disposition horizontale, le retour du fluide se fait par capillarité dans des tubes intérieurs, avec un rendement inférieur.

**Catalyseur:** voir catalyseur à 3 voies,

**Catalyseur à 3 voies:** Les installations de couplage chaleur-force compactes fonctionnent la plupart du temps avec un catalyseur à 3 voies. L'excédent d'air doit alors être réduit pratiquement à zéro, ce qui n'est possible qu'avec un moteur à gaz. En utilisant ce catalyseur, la qualité des gaz d'échappement est comparable à celle obtenue dans les chaudières modernes grâce au système Low-NO<sub>x</sub>.

**CCF:** Abreviation de «couplage chaleur-force». Centrale chaleur-force: grande installation de couplage chaleur-force avec réseau de chauffage à distance.

**CCFC:** Abreviation pour «Couplage chaleur-force compact».

**Chaleur latente/sensible:** On appelle chaleur latente, l'énergie libérée lors du passage d'un élément de l'état gazeux à l'état liquide ou de l'état liquide à l'état solide, sans changement de température. La chaleur sensible, par contre, est fonction de l'écart de température (que l'on peut «sentir»).

**Chaleur sensible:** Voir «Chaleur latente»

**Chaudière d'appoint:** Le rendement économique d'une installation est fonction du nombre d'heures annuelles d'exploitation. C'est pourquoi une centrale chaleur-force n'est pas dimensionnée en fonction des besoins thermiques maximums, le solde étant couvert par une chaudière d'appoint.

**Chauffage basse température:** Voir «Apport thermique».

**Chauffage par résistance électrique:** Une résistance électrique parcourue par un courant électrique fournit de la chaleur. Ce principe est appliqué au chauffage des locaux, soit dans un accumulateur central où la chaleur est stockée dans de l'eau ou de la céramique, soit dans des accumulateurs décentralisés ou des chauffages directs répartis dans chaque local. Selon l'arrêté sur l'énergie, dès le 1.5.91, les nouvelles installations de ce type sont soumises à autorisation.

**Chauffe-eau:** Appellation correcte de l'appareil destiné au chauffage de l'eau chaude sanitaire (auparavant boiler)

**Coefficient de performance:** voir «Rendements».

**Compresseur rotatif:** Sorte de compresseur à vitesse variable convenant particulièrement bien aux petites PAC.

**Compression bi-étagée:** Dans ce type de compression la vapeur évacuée, telle qu'elle existe par exemple dans les processus d'évaporation, est amenée par un compresseur à une pression et une température plus élevées. Le condensat peut ainsi être utilisé pour le chauffage du même procédé. L'élévation de température qui en résulte ne représente que quelques degrés, soit approximativement l'écart de température existant entre l'échangeur de chaleur et le liquide à évaporer. Cette forme de compression est obtenue dans des appareils à jet de vapeur ou des compresseurs mécaniques.

**Contrôle de qualité:** voir «Optimalisation du procédé».

**COP:** Abreviation pour «coefficient de performance».

**Couplage chaleur-force (CCF):** Production combinée de chaleur (chauffage ou procédés thermiques) et de force (pour production de courant électrique). Ainsi, la valeur de l'énergie est sensiblement mieux utilisée qu'avec une production de chaleur conventionnelle.

**Dioxyde de carbone ou CO<sub>2</sub>** Apparaît lors de la combustion de combustible contenant du carbone. Bien que ce gaz ne soit pas nocif, il est une des causes principales de l'effet de serre.

**Eau chaude:** Appellation correcte pour eau chaude sanitaire.

**Echangeur de chaleur:** Utilisé pour le transfert de chaleur d'un fluide caloporteur à un autre. La fig. 6 montre différents modèles d'échangeurs.

**Effet de serre:** Le rayonnement solaire (ondes courtes) traverse pratiquement sans modification l'atmosphère terrestre et se transforme en ondes longues lors du contact avec le sol. Une grande partie de ces ondes étant ensuite absorbée par l'atmosphère terrestre, on assiste à un échauffement progressif de la surface de la terre, de façon comparable à l'effet constaté dans une serre. L'augmentation de la quan-

tité de combustibles fossiles utilisés durant ces 100 dernières années provoque une forte concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, favorisant ainsi l'effet de serre et, partant, l'augmentation de la température en surface. On craint fortement qu'un renforcement de l'effet de serre ne conduise à la fonte des glaces polaires, ce qui entraînerait une élévation du niveau de la mer.

**Éléments polluants:** Les plus importants: 1) **oxyde d'azote (NOx)** apparaissant dans les processus de combustion (moteur automobile, chaudière). 2) **dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)** apparaissant lors de la combustion de carbone contenant du soufre (charbon, huile de chauffage).

**Energie:** En physique. la possibilité de fournir un travail. Unités utilisées en général: joule (J) et kilowattheure (kWh). L'énergie ne peut physiquement ni être fabriquée ni être détruite: on ne peut que la transformer. Sachant que la transformation d'une forme d'énergie à une autre forme est soumise à certaines conditions, il faut introduire une notion de **valeur**. En physique, on parle alors d'**exergie**: plus celle-ci est grande, plus la valeur est élevée. L'exergie est la part d'énergie qui, à une température ambiante donnée, peut être transformée en une autre forme d'énergie. À l'opposé, la part d'énergie qui, à une température ambiante donnée ne peut plus être transformée en une autre forme d'énergie. s'appelle **anergie**. Une description exacte est donnée à l'encadré 2.

**Energie finale:** voir «Agent énergétique».

**Energie grise:** Energie nécessaire à la fabrication d'un produit. Celle-ci n'apparaît pas souvent dans les statistiques énergétiques.

**Energies renouvelables:** Agents énergétiques constamment renouvelés par la nature (par exemple eau, énergie solaire) ou provenant de la biomasse (par exemple bois, biogaz, pétrole vert).

**Energie utile:** Voir «Agent énergétique».

**Exergie:** voir «Energie».

**Fluide caloporteur:** Élément pouvant transporter de la chaleur comme l'eau, le mélange glycol/eau ou l'air.

**Fluide frigorigène:** Transporteur d'énergie dans les machines frigorifiques et les pompes à chaleur. En raison des atteintes à l'environnement, certains de ces produits seront interdits dans les nouvelles installations à partir de 1994. Autres appellations: fréon, réfrigérant, ammoniac, etc.

**Fonctionnement parallèle au réseau:** Type de fonctionnement d'une installation de couplage chaleur-force fournissant en parallèle au réseau une puissance électrique.

Gaz **liquide** Propane, butane ou mélanges gazeux se liquéfiant à des pressions relativement basses et pouvant être stockés en bouteilles ou réservoirs.

**IET:** Abréviation pour «installation à Energie Totale».

**Ilot (fonctionnement en . . .):** Type de fonctionnement indépendant du réseau électrique (p.ex. groupe de secours).

**Indice de performance électrique:** Chiffre caractéristique pour installations de couplage chaleur-force donnant le rapport entre l'électricité produite et la chaleur produite.

**Installation à énergie totale:** Installation comprenant une PAC complétée par une installation de couplage chaleur-force compacte avec, en ligne, un moteur à gaz, un générateur et la pompe à chaleur. On peut ainsi, outre le fonctionnement normal de l'installation chaleur-force, avoir une installation avec PAC à moteur à gaz et une PAC à moteur électrique (le générateur fonctionnant comme moteur). Une **installation jumelée** est également possible avec, d'un côté, moteur à gaz et générateur et, d'un autre côté, moteur électrique avec PAC.

**Installation chaleur-force combinée:** Le gaz sortant de la turbine à gaz est conduit dans une chaudière générant ainsi de la vapeur utilisable pour l'entraînement d'une seconde turbine produisant de l'électricité. Par la combinaison des turbines à gaz et à vapeur, la puissance électrique fournie atteint presque la puissance thermique délivrée.

**Installation de couplage chaleur-force compacte (CCFC):** Installation dont les éléments sont assemblés de manière à obtenir un encombrement minimum.

**Installation de renouvellement d'air:** Ventilation mécanique permettant un renouvellement d'air dont l'importance doit être dictée par des règles d'hygiène. La consommation d'énergie devient ainsi nettement plus faible que pour une installation traditionnelle.

**Installation jumelée:** Voir l'installation à énergie totale».

**Installation standard de couplage chaleur-force: CCF** avec moteur à gaz délivrant une puissance électrique de 150 à 200 kW.

**Monovalent (fonctionnement de PAC):** Avec ce type de fonctionnement, la totalité des besoins thermiques est couverte par la PAC, sans avoir recours à d'autres producteurs de chaleur.

**Moteur à gaz:** Actuellement les générateurs des installations compactes de couplage chaleur-force sont en majorité entraînés par des moteurs à gaz, en raison du coût relativement bas du système d'épuration des gaz par catalyseur à 3 voies. Ces moteurs fonctionnent avec du gaz naturel, du gaz liquide ou du biogaz.

**Moteur Diesel:** Comme le moteur à gaz, il peut être utilisé pour l'entraînement de pompes à chaleur ou d'installations de couplage chaleur-force. Le carburant sera alors l'huile de chauffage. Comme ce moteur ne peut travailler sans excédent d'air, l'utilisation d'un catalyseur à 3 voies n'est pas possible: un coûteux système d'épuration du gaz devient donc nécessaire. Une neutralisation des polluants par injection d'ammoniac est onéreuse, mais l'utilisation d'urée semble plus économique et des essais sont en cours.

**Moteur à combustion pauvre:** L'augmentation de l'apport d'air provoque un abaissement de la température de combustion, d'où une diminution des émissions d'oxyde d'azote. On obtient une réduction supplémentaire de ces oxydes par injection d'ammoniac ou d'urée dans les gaz d'échappement (procédé SCR).

**Moteur Stirling:** Machine thermique inventée en 1816 d' déjà et caractérisée par le fait que l'énergie mécanique est créée à partir d'une masse de gaz constante soumise à un cycle thermodynamique réversible. En principe la machine se compose d'un cylindre avec deux pistons, d'une source de chaleur (huile, gaz, bois, énergie solaire, etc.), d'une source froide (air, eau, etc) et d'un régénérateur (accumulateur de chaud et de froid). Le gaz subit alternativement une transformation isotherme (température constante) et isochore (volume constant). Ce cycle permet un apport d'énergie externe constant et autorise ainsi l'utilisation de différents agents énergétiques et un meilleur contrôle des gaz d'échappement.

**Optimisation du procédé et contrôle de qualité:** Le temps (environ 2 ans) séparant la réception proprement dite (remise de l'installation au maître de l'ouvrage) et la réception de garantie devrait être utilisée pour optimiser l'installation et effectuer les contrôles de qualité. En effectuant ces derniers avant le début de la période de garantie, on offre à l'utilisateur la certitude d'obtenir un fonctionnement parfait de l'installation. Etant donné que ces prestations ne sont pas encore contractuelles, le maître de l'ouvrage les exigera par écrit et veillera à leur exécution.

**Oxyde d'azote:** Voir «Éléments polluants».

**PAC:** Abréviations pour «pompe à chaleur».

**Petite centrale chaleur-force:** Centrale dont la puissance électrique se situe entre 7 et 15 kW. Elle est en général équipée d'un moteur d'automobile fonctionnant au gaz. À l'avenir, le moteur Stirling pourrait offrir dans ce domaine d'intéressantes perspectives.

**Pile à combustible:** Source de courant électrochimique caractérisée par le fait que l'apport du combustible se fait de façon continue, de l'extérieur, tant que la production de courant est nécessaire. Abstraction faite du vieillissement naturel, ces piles ne sont pas altérées par le fonctionnement. Le couplage d'un fournisseur d'énergie et d'un générateur d'électricité permet d'obtenir, dans de nombreux cas, une densité d'énergie rapportée au volume ou au poids bien plus importante qu'avec les sources de courant électrochimiques conventionnelles, dont le combustible travaille en système fermé. La pile à combustible a l'avantage d'exiger peu d'entretien pour un rendement élevé. elle offre une longue durée de vie, pas d'atteintes à l'environnement ni d'émanations gazeuses. Par contre, son fonctionnement est compliqué, le changement d'électrolyse reste problématique et l'investissement est

**Pinch Design Method:** La représentation de toutes les relations de transfert thermique entre les éléments mis en œuvre dans une installation s'appelle réseau de transferts thermiques. Il existe différentes méthodes d'aide à l'élaboration de ce réseau dans des conditions données et stationnaires. Elles reposent sur le principe qu'un flux de matière donné, à chauffer et à refroidir, entre des températures connues, implique une quantité théorique minimum d'énergie à introduire. La méthode PDM (également appelée «Pinch Based Design», «Pinch Point Method») est relativement simple. Elle est complétée par la méthode d'optimisation du réseau pour un large spectre de conditions différentes de fonctionnement le PDM doit son appellation à l'étranglement typique (anglais: Pinch) des 2 courbes de liaison (chaud, froid) dans le diagramme enthalpie/température représentant chacune sur l'échelle de l'enthalpie, dans les intervalles de températures importants, tous les apports (chauffage) et les évacuations (refroidissement) thermiques dans le flux de matière. Cette différence de température minimale apparaît sur le Pinch à une enthalpie déterminée. La zone de recouvrement des courbes parallèles à l'axe d'enthalpie définit le gain thermique maximum possible. Avec cette méthode, on peut préciser la valeur de différents réseaux de transferts thermiques de manière globale. En définissant l'écart minimal de température, on peut calculer le gain thermique maximum, la grandeur du réseau et estimer les coûts. La recherche du Pinch Point peut se faire par différentes méthodes. Le PDM est un outil d'analyse de l'optimisation d'un réseau de transferts thermiques.

**Pompe à chaleur (PAC):** Avec l'aide d'une énergie noble (p. ex. l'électricité), la chaleur est «pompée» d'un niveau de température inférieur à un niveau de température supérieur et peut ainsi être utilisée p. ex. pour le chauffage de locaux. La majorité des PAC sont des pompes à chaleur à compression entraînées par moteur électrique. Les moteurs à gaz sont également compatibles. Les PAC à absorption ne sont à ce jour que peu utilisées en Suisse.

**Pompe à chaleur à absorption:** Pompe à chaleur équipée d'un compresseur thermique (par opposition au compresseur mécanique de la pompe à chaleur à compression). Principe de fonctionnement voir fig. 14.

**Pompe à chaleur à compression:** PAC à compresseur mécanique, la plus communément utilisée (par opposition au compresseur thermique de la pompe à absorption). Fonctionnement: voir fig. 13

**Pompes à chaleur à entraînement électrique:** voir «Pompe à chaleur»

**Pompe à chaleur air/eau:** PAC utilisant l'air comme source de chaleur (en général air extérieur) et l'eau comme fluide caloporteur dans le système de chauffage.

**Pompe à chaleur à haute température:** On définit ainsi une pompe à chaleur dont la température de condensation s'élève au-dessus de 300 °C. Pour des températures supérieures à 150 °C, on parlera de pompe à chaleur à température moyenne. Cette classification n'est pas standardisée.

**Pompe à chaleur à moteur à gaz:** voir «(Pompe à chaleur)»

**Pompe à chaleur/chauffe-eau:** Unité comprenant une PAC et un chauffe-eau (boiler) pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Par rapport à un chauffe-eau conventionnel, la consommation électrique ne représente que 30 à 50%.

**Pompe à chaleur eau/eau:** PAC utilisant de l'eau en guise de fluide caloporteur. Côté source de chaleur (p. ex. eau de surface, nappe phréatique) et de l'eau, côté chauffage.

**Pompe à chaleur pour chauffage d'eau:** Voir «Pompe à chaleur/chauffe-eau»

**Pompe à chaleur saumure/eau:** PAC utilisant une saumure (le plus souvent mélange glycol/eau) en guise de fluide caloporteur côté source de chaleur (p. ex. sonde géothermique ou serpentins enterrés) et de l'eau côté chauffage.

**Production de chaleur:** Production de chaleur de chauffage par chaudière, PAC, centrale chaleur-force, etc.

**Puissance:** Quantité d'énergie par unité de temps. Exemples d'unités: Watt (W), kilowatt (kW).

RC: Abréviation pour «récupération de chaleur».

**Récupération de chaleur:** On parle de récupération de chaleur lorsque, dans un procédé, l'excès de chaleur utilisable est réemployé dans le même procédé. Par contre, on parle d'utilisation des rejets thermiques lorsque l'énergie récupérée est employée dans un autre procédé. Description exacte à la fig. 4.

**Rendement:** De manière très générale, le rapport entre l'énergie extraite et l'énergie introduite. Pour chaque cas, il convient de déterminer une limite de bilan et de période d'observation. Le **coefficient de performance instantané** est une notion synonyme appliquée plus spécialement aux valeurs momentanées (puissance). Les notions de **coefficient de performance annuel** et **rendement global du système** sont utilisées dans le domaine de PAC (voir définition exacte au tableau 16).

**Rendement de récupération de chaleur:** Chiffre caractéristique de récupération de chaleur représentant le rapport entre l'énergie effectivement gagnée et le maximum d'énergie théoriquement récupérable.

**Rendement global du système:** Voir «Rendement».

**Totem:** Abréviation pour «Total Energie Modul», désigné ici par petite installation de couplage chaleur-force.

**Transformateur de chaleur:** Relatif au procédé thermodynamique au cours duquel la chaleur à bas niveau de température est amenée à un niveau de température plus élevé sans apport d'énergie mécanique, mais en utilisant la chaleur comme moyen d'entraînement. Pour ce faire, il faut qu'il existe au moins trois niveaux différents de température permettant au procédé de prendre ou de donner la chaleur nécessaire. La transformation de chaleur permet donc de transformer une partie de chaleur à température moyenne (p. ex. rejets thermiques) en énergie utilisable à haute température, ceci sans apport d'énergie de haute valeur. Les PAC à absorption ou les transformateurs de chaleur proprement dits appliquent ce procédé. Dans ce dernier cas, une partie de la chaleur de niveau moyen est amenée à une température plus élevée à l'aide de la dévaluation exergetique du solde de chaleur ramené au bas niveau de température. Le processus de transformation de chaleur peut être réalisé techniquement avec des installations à absorption et à désorption.

**Trou d'ozone:** Trou dans la couche de protection de la terre contre les rayons ultraviolets. Principaux responsables les combinaisons d'hydrogène, de fluor, de chlore et de carbone se trouvant dans les gaz propulseurs des sprays, les produits industriels ou les mousses synthétiques utilisées dans l'isolation d'appareils ou de bâtiments.

**Turbine à gaz:** Les grandes centrales chaleur-force (dès 1 à 2 MW) et les centrales thermiques sont en majorité équipées de turbines à gaz. À la sortie de la turbine, le gaz est encore suffisamment chaud pour être récupéré dans une chaudière et produire de la vapeur. Le système d'épuration des gaz est relativement coûteux. Le combustible utilisé est le gaz naturel ou le mazout.

**Turbine à vapeur:** Entraînement classique pour générateur. Ces turbines ont un rôle important à jouer dans les centrales thermiques ou atomiques ainsi que dans les installations chaleur-force combinées. Lorsqu'il est exigé une mise en marche rapide (par exemple dans les centrales d'appoint), il est préférable d'utiliser des turbines fonctionnant au gaz ou au mazout.

URT: Abréviation pour «utilisation des rejets thermiques».

**Utilisation des rejets thermiques (URT):** La chaleur résiduelle provenant d'un premier procédé est mise en valeur par un deuxième procédé. À différencier de la **récupération de chaleur** dont l'énergie récupérée est utilisée dans le même procédé. Descriptif exact voir fig. 5.

**Valeur:** Voir «Energie»