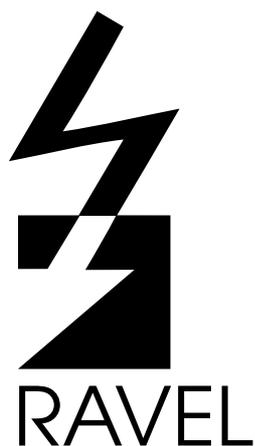


# Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques

Planification, construction et exploitation  
rationnelle de la récupération de chaleur  
et de l'utilisation des rejets thermiques

Ravel dans le domaine  
de la chaleur

Cahier 2



## Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques

La récupération de chaleur et l'utilisation des rejets thermiques utilisent le courant de sept à dix fois mieux qu'un chauffage électrique et environ trois fois mieux qu'une pompe à chaleur. Pas étonnant dès lors que ces rejets thermiques, provenant de procédés industriels, soient devenus aujourd'hui une source d'énergie dont l'importance va croissant, alors que jusqu'ici ils étaient considérés comme inutiles et donc simplement évacués. L'utilisation des rejets thermiques n'est pas seulement judicieuse du point de vue écologique ou énergétique, mais souvent rentable dans de nombreux cas, également dans les petites installations. La rentabilité implique une planification minutieuse dans les petits systèmes, davantage encore que dans les grandes installations. A partir d'une situation bien définie, la rentabilité ne peut être garantie qu'en présence de solutions techniques optimales offrant le meilleur rendement possible. Compte tenu de la complexité des installations et du nombre important de techniques différentes, le choix du système le plus approprié devient une tâche très difficile. Lorsque l'on parcourt les manuels d'enseignement actuels, il est difficile d'y trouver des détails quant au dimensionnement pratique d'installations de récupération de chaleur et de l'utilisation des rejets thermiques. La présente brochure RAVEL a pour but de combler ces lacunes.

En proposant une vue d'ensemble des différents systèmes et de leurs composants, les auteurs font le point sur les techniques les plus récentes. Ils mettent en évidence le principe de fonctionnement, les avantages et inconvénients des systèmes considérés et le secteur d'application précis propre à chaque type d'installation.

Dans un deuxième temps, ils répondent cas par cas aux questions principales des responsables de projets concernant les problèmes posés par la planification et la réalisation, comme par exemple : dans quel cas la construction d'une installation de récupération de chaleur ou d'utilisation des rejets thermiques se justifie-t-elle ? Comment procéder pour trouver la solution ? Quelles sont les différentes étapes de la planification ? Comment évaluer la rentabilité et calculer le rendement d'une installation ? Quelles sont les normes légales et les directives à respecter ? Les théories de bases sont développées à l'aide des formules de calculs les plus importantes, étayées d'exemples concrets. Conçue de manière à faciliter la tâche du lecteur et prévue pour être consultée quotidiennement, cette brochure représente un instrument de travail et une aide de planification appréciables, au vu des caractéristiques, marches à suivre et autres aide-mémoire qu'elle contient.

ISBN 3-905233-77-0

Edition originale : ISBN 3-905233-08-8

1995

N° de commande : 724.355 f

# Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques

Planification, construction et exploitation rationnelle  
de la récupération de chaleur  
et de l'utilisation des rejets thermiques

RAVEL dans le domaine de la chaleur  
Cahier 2



Programme d'impulsions RAVEL  
Office fédéral des questions conjoncturelles

«RAVEL dans le domaine de la chaleur»  
en 5 cahiers

Rédacteur principal : Hans Rudolf Gabathuler

Dans un proche avenir, les techniques d'amélioration des systèmes liés à l'énergie vont gagner beaucoup d'importance. Sur ce thème, la littérature à disposition est encore peu abondante. C'est pourquoi trois cours RAVEL « Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques », « Pompes à chaleur » et « Couplage chaleur-force » vont permettre aux planificateurs(trices) actuels de se perfectionner dans ce domaine prometteur. La série de publications éditée à cet effet, « RAVEL dans le domaine de la chaleur » se compose de cinq cahiers. Ces cahiers peuvent être obtenus à l'Office central fédéral des imprimés et du matériel, 3000 Berne.

- Cahier 1 : Electricité et chaleur – document de base et annexes (N° de commande : 724.357 f)
- Cahier 2 : Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques (N° de commande : 724.355 f)
- Cahier 3 : Pompes à chaleur (N° de commande : 724.356 f)
- Cahier 4 : Couplage chaleur-force (N° de commande : 724.358 f)
- Cahier 5 : Schémas standards (N° de commande : 724.359 f)



*Points importants*



*Indications concernant la série  
«RAVEL dans le domaine de la chaleur»  
(voir ci-dessus)*



*Bibliographie complémentaire*



*Renseignements sur le logiciel*



*Exemples de calculs*



*Dénomination, formules et abréviations  
à la page 57*

**INDEX**

*Index à la page 58*

Auteurs

Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG  
Industriestrasse 5, 5432 Neuenhof  
Viktor Kyburz, Infoenergie  
Kindergartenstrasse 1, 5200 Windisch

Experts

Hanspeter Pfenninger, Konvekta AG, 9015 St. Gallen  
Erich Thoma, F. Hoffmann-La Roche AG, 4002 Basel

Rédaction et réalisation

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG,  
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen

Traduction

Planair, Crêt 108A, 2314 La Sagne

Graphisme

Monika Ehrat, 8240 Thayngen

Mise en page et photocomposition

Consortium Dac/City Comp SA, Morges et Lausanne

Organisation de soutien

SBHI Ingénieurs-conseils suisses de la technique du  
bâtiment et de l'énergie, Schermenwaldstr. 10,  
3063 Ittigen

Patronage

ASCV Association suisse des entreprises de chauffage  
et ventilation

SICC Société suisse des ingénieurs en chauffage et  
climatisation

USTSC Union suisse des professionnels de la technique  
sanitaire et chauffage

UTS Union technique suisse

ISBN 3-905233-77-0

Edition originale : ISBN 3-905233-08-8

Copyright © 1995 Office fédéral des questions conjoncturelles,  
3003 Berne, octobre 1995. Reproduction d'extraits autorisée avec  
indication de la source. Diffusion : Coordination romande du pro-  
gramme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case  
postale 12, 1015 Lausanne (Numéro de commande 724.355 f).

Form 724.355 f 9.95 300

# Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-95), le programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

- PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions
- RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité
- PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Leur but est de favoriser une croissance économique qualitative. Dans ce sens ils doivent conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Le programme RAVEL cherche principalement à améliorer la compétence des professionnels à utiliser l'énergie électrique à bon escient. Outre les aspects de la sécurité et de la production, qui étaient prioritaires jusqu'ici, il est aujourd'hui indispensable de s'intéresser davantage aux rendements. RAVEL a établi une matrice de consommation qui définit dans leurs grandes lignes les thèmes à traiter. Les procédés utilisés dans l'industrie, le commerce et le secteur tertiaire sont à considérer parallèlement aux utilisations de l'électricité dans les bâtiments. Dans ce contexte, les groupes-cibles concernés sont les spécialistes de tous les niveaux de formation et les décideurs qui doivent gérer les investissements en matière d'équipements et de procédés.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc. Les objectifs de RAVEL sont poursuivis par des projets de recherche et de diffusion des connaissances de base, par des cycles de formation et de perfectionnement, ainsi que par l'information. Le transfert des nouvelles connaissances est orienté vers une mise en pratique dans le travail quotidien. Il repose principalement sur des publications, des cours et des réunions. Une journée d'information annuelle RAVEL permet de présenter et de discuter des nouveaux résultats, développements et tendances de cette discipline fascinante qu'est l'utilisation rationnelle de l'électricité. Les personnes intéressées trouveront dans le bulletin « Construction et Energie » de plus amples informations sur le vaste éventail des possibilités en matière de formation continue offertes aux groupes-cibles. Ce bulletin paraît trois fois l'an et peut être obtenu gratuitement en s'adressant à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne. En outre, chaque participant à un cours, ou autre manifestation du pro-

gramme, reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

## Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés ; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles, ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend également des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités proposées. Pour la préparation de ces activités, une direction de projet a été mise en place ; elle se compose du Dr Roland Walthert, de M. Werner Böhi, du Dr Eric Bush, de MM. Jean-Marc Chuard, Hans-Rudolf Gabathuler, Ruedi Messmer, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, du Dr Daniel Spreng, de M. Felix Walter, du Dr Charles Weinmann, de MM. Georg Züblin et Eric Mosimann de l'OFQC. Une très large part des activités est confiée à des groupes de travail qui sont responsables du contenu, de même que du maintien des coûts et des délais.

## Documentation

Après avoir été soumise à une large consultation pour être testée et discutée, la présente publication a été soigneusement remaniée. Toutefois les auteurs ont eu toute liberté d'analyser, selon leurs critères propres, différents points de vue sur des questions particulières et assument la responsabilité des textes. On pourra remédier à certaines lacunes pouvant se présenter dans la pratique en procédant à d'éventuelles adaptations. Les propositions seront prises en compte par l'Office fédéral des questions conjoncturelles et par le rédacteur (cf. page 2). Nous remercions vivement tous les collaborateurs qui ont offert leur précieux concours à l'élaboration de la présente brochure.

Office fédéral des questions conjoncturelles  
Service de la technologie  
Dr B. Hotz-Hart  
Vice-directeur

# Table des matières

1.	RC/URT et utilisation rationnelle de l'électricité	7
1.1	Situation de la RC et de l'URT dans le concept énergétique	7
	Concepts	7
	Délimitation	7
	Dispositions	7
1.2	RC/URT et RAVEL	8
	Que font la RC et l'URT dans RAVEL ?	8
	Domaines d'utilisation en relation avec RAVEL	9
2.	Composants et systèmes	11
2.1	Aperçu des différents systèmes	11
	Catégories	11
	RC sur air évacué	11
	RC dans les installations industrielles d'évacuation de l'air	11
	RC/URT des gaz et des liquides	12
	Schémas hydrauliques	12
	Régulation de la puissance	12
	Risques de formation de gel	13
	Contamination	13
	Energie d'appoint	13
	Décontamination	13
	Présentation et dimensions	16
	Indications de puissance	16
2.2	Systèmes de type « récupérateur »	16
	Echangeurs de chaleur à plaques et à tubes pour l'air	16
	Echangeurs de chaleur à plaques pour liquides	17
	Echangeurs de chaleur tubulaires	18
	Utilisation de l'échangeur de chaleur tubulaire comme condenseur dans la production de froid	19
	Autres utilisations d'échangeurs de chaleur de type « récupérateur »	19
2.3	Systèmes de type « régénérateur »	20
	Circuits fermés	20
	Caloducs	21
	Echangeurs de chaleur rotatifs	21
2.4	Pompes à chaleur et transformateurs de chaleur	22
	Pompes à chaleur	22
	Compression bi-étagée	23
	Transformateurs de chaleur	24
3.	Principes de base	25
3.1	Rejets thermiques	25
3.2	Echangeurs de chaleur	26
	Transfert de chaleur	26
	Pertes de charge	27
3.3	Grandeurs caractéristiques	28
	Rendements lors d'échanges de chaleur	28
	Amplification électrothermique	29
3.4	Dimensionnement et optimisation	29
	Prudence face aux indications de rendement des températures !	29
	Récupération annuelle de chaleur	30
	Optimisation	32
	Récupération maximale nette d'énergie	32
	Gain financier maximal	32
3.5	Rentabilité	33

---

4.	Planification	35
4.1	Aide-mémoire RAVEL	35
	Commencer par réduire la consommation d'énergie!	35
	Utilisation de l'aide-mémoire RAVEL	35
	Paramètres « source-utilisateur »	36
	Paramètres de connexion en réseau	36
	Autres aspects de connexion en réseau	38
	Critères de rentabilité	38
	Coûts externes	39
4.2	Méthodes de mesure	39
4.3	Recherche de solutions	41
4.4	Phases de la planification	42
	Annexe	43
A.	Domaines d'application	43
	RC dans le secteur du confort	43
	RC dans l'industrie	43
	Procédés industriels de ventilation	43
	Installations de froid	43
	Production d'air comprimé	44
	Situation générale dans l'industrie	44
	Exemple de l'industrie chimique	45
	Transmission de chaleur à travers des barrières de sécurité	46
	Couplage chaleur-force	46
	Installations ORC	46
B.	Exemples	47
	Industrie de développement de films	47
	« Refroidissement doux »	48
	Production de froid en hiver	49
	Raccordement chaud et froid	50
C.	Méthode du pincement	51
D.	Aide-mémoire RAVEL	53
	Aide-mémoire RAVEL « source de chaleur »	53
	Aide-mémoire RAVEL « récepteur de chaleur »	53
	Raccordements	53
	Dénominations, symboles, abréviations	57
	Index	58
	Publications du programme d'impulsions RAVEL	59

---

# 1. RC, URT et utilisation rationnelle de l'électricité

## 1.1 Situation de la RC et de l'URT dans le concept énergétique

### Concepts

La récupération de chaleur (RC) et l'utilisation des rejets thermiques (URT) sont des techniques visant à utiliser l'énergie de manière rationnelle. Elles permettent la mise en place de procédés rentables et respectueux de l'environnement. La différence entre RC et URT provient de l'orientation des flux thermiques en relation avec la configuration du système (encadré 1)<sup>1)</sup>.

### Délimitation

Les méthodes de RC/URT s'appliquent pratiquement à toutes les disciplines techniques. Dans cette étude, l'accent sera porté sur la RC/URT dans la technique du bâtiment et sur l'URT des sources de chaleur industrielles pour une utilisation orientée vers la technique du bâtiment (tableau 2). L'URT provenant de la technique du bâtiment n'est que très rarement appliqué au secteur industriel. La RC/URT dans le secteur industriel relève d'un domaine spécial qui dépasse le cadre de la présente brochure, en raison des caractéristiques techniques propres à chaque procédé.

### Dispositions

L'utilisation des rejets thermiques n'est à envisager qu'après mise en œuvre de toutes les possibilités applicables en vue d'éviter des rejets thermiques, et prise des dispositions garantissant une couverture rationnelle des besoins de chaleur. Le tableau 3 propose une procédure d'analyse différenciée en fonction des domaines d'application. Dans le secteur industriel, la priorité est donnée à la production et aux mesures de rationalisation qui en découlent. Dans le secteur de la technique du bâtiment, il s'agit d'assurer le confort en veillant à limiter le plus possible la consommation.

Le tableau 4 propose une série de mesures concrètes, différentes selon les besoins, pour une utilisation rationnelle de l'énergie dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment.

#### Récupération de Chaleur, en abrégé: RC

Les inévitables rejets thermiques dégagés par un procédé sont réinjectés dans le *même procédé*, sans grand décalage de temps. La formule idéale consiste à faire coïncider source et récepteur en temps et en quantité; on obtient ainsi un meilleur rendement de l'installation.

#### Utilisation des Rejets Thermiques, en abrégé: URT

Les inévitables rejets thermiques dégagés par un procédé sont réinjectés dans *d'autres procédés*, sans ou avec décalage de temps. L'attention sera axée sur l'offre et la demande de chaleur; il est souvent nécessaire de stocker la chaleur dans un accumulateur. L'utilisation globale de l'énergie est améliorée par la création d'un réseau de connexions, alors que le rendement d'une installation isolée reste inchangé. Selon le lieu de l'utilisation de la chaleur, il faut faire une distinction entre l'utilisation à l'intérieur de l'entreprise dans un autre procédé (URT interne) et l'utilisation par des tiers à l'extérieur de l'entreprise (URT externe).



Cahier 1, paragraphe 3.1.

#### Encadré 1

		Utilisateur	
		Habitat	Industrie
Source	Habitat	RC URT	URT (rarement)
	Industrie	URT	RC / URT (domaine spécial)

Tableau 2: Délimitation des domaines à étudier; dans cette brochure, l'accent est mis sur les domaines encadrés.

<sup>1)</sup> Remarque: le mélange d'air recyclé dans les installations de ventilation n'est pas considéré comme RC, car il s'agit d'une diminution des besoins (renouvellement d'air plus faible).

		Intégration	Coût
1	Eviter toute consommation inutile	I	faible
	Réduire les besoins	H	faible
	Service	I, H	faible
	Surveillance	I, H	faible
2	Réduction du besoin spécifique d'énergie	I, H	moyen
	Diminuer les pertes	H	moyen
3	Augmentation du rendement énergétique	I	moyen
	Bonne régulation	I, H	moyen
	Utilisation de la chaleur libérée de sources de chaleur diffuses	H	moyen
4	Récupération de l'énergie	I, H	élevé
	Récupération de la chaleur (RC)	I, H	élevé
	Récupération des rejets thermiques (URT)	I, H	élevé
5	Utilisation de sources d'énergies renouvelables	I, H	très élevé
	Mise en valeur des énergies résiduelles (protège environnement et coût)	I, H	très élevé

Tableau 3: Catalogue des mesures principales en matière d'utilisation de l'énergie dans les secteurs de l'industrie et de l'habitat, avec indication du domaine d'application (I = industrie, H = habitat).

Même si les frais d'investissement sont élevés, les mesures à prendre en relation avec la RC/URT sont souvent rentables. Il vaut donc la peine d'entreprendre des démarches sérieuses, surtout en cas d'assainissement et de rénovation. Pour le fonctionnement proprement dit d'une installation, le recours à la RC/URT n'est certes pas indispensable, mais dans l'ensemble, l'énergie n'en sera que mieux utilisée.

## 1.2 RC/URT et RAVEL

Que font la RC et l'URT dans RAVEL ?

Beaucoup ! Car ils participent avec le couplage chaleur-force (abréviation CCF) à la stratégie de protection de l'environnement menée par RAVEL. En dépit d'une production de courant avec des agents énergétiques d'origine fossile, l'environnement doit être mieux préservé que jusqu'ici. Cette règle est respectée, si une partie du courant produit par CCF est réinjectée dans des amplificateurs électrothermiques. L'exemple le plus représentatif d'un amplificateur électrothermique est la pompe à chaleur (abréviation : PAC) : avec une unité d'électricité, elle produit trois unités de chaleur de chauffage. Les installations de RC et d'URT sont également des amplificateurs électrothermiques, mais avec l'aide desquels on obtient des facteurs d'amplification beaucoup plus performants, allant de 7 à 25 !

 *Cahier 1, paragraphe 2.5 et 3.4.*

	Construction et habitat	Technique de procédé et de production
Amélioration par des mesures d'organisation et d'exploitation	Connaître la consommation d'énergie ; classer les flux des rejets thermiques selon genre, volume, lieu et période ; conditions à fixer judicieusement pour air évacué et air pulsé ; optimiser le service en air de roulement, réduire la température des locaux.	Examiner les procédés ; analyser les flux énergétiques ; réduire les températures ; examiner les programmes horaires.
Amélioration en misant sur un coût d'investissement plutôt faible	Réduire les pertes de distribution ; améliorer commande et régulation ; améliorer le rendement des générateurs de chaleur ; poser des horloges.	Exploiter les condensats ; isoler les conduites ; améliorer la régulation ; disposer d'entraînements à vitesse variable.
Amélioration en misant sur un coût d'investissement plutôt élevé	Récupérer la chaleur dans les installations de ventilation et de climatisation ; utilisation des rejets thermiques pour le chauffage de l'eau sanitaire et assistance au chauffage ; introduire une gestion technique centralisée ; installer le free cooling ; utiliser la chaleur de condensation des machines de refroidissement.	Récupérer la chaleur dans le procédé ; compression bi-étagée ; utiliser les rejets thermiques dans l'exploitation ; introduire une gestion technique centralisée des procédés ; installer des machines de production à rendement élevé.

Tableau 4: Exemples de mesures dans les domaines du bâtiment et de l'industrie.

## Domaines d'utilisation en relation avec RAVEL

En considérant l'utilisation rationnelle de l'électricité dans le domaine de la chaleur, on remarque quatre cas bien distincts (cf. encadré 5). Les points 2 à 4 sont importants pour des utilisations de RC/URT dans l'un des secteurs définis au tableau 2.

Un procédé électrique quelconque, libérant de la chaleur, ne convient pas forcément à une utilisation rentable de rejets thermiques. Pour parvenir à une utilisation judicieuse, la chaleur doit être récoltée et transportée à peu de frais. L'analyse des sources de chaleur électriques est facilitée par l'utilisation d'un aide-mémoire (paragraphe 4.1 et annexe D). Exemples typiques : convertisseurs électriques-électriques (transformateurs, ordinateurs), convertisseurs électriques-mécaniques (moteurs, générateurs), convertisseurs électriques-chimiques (électrolyse, accumulateurs), convertisseurs électriques-thermiques (fours électriques) et autres procédés électriques tels que source de lumière, électronique d'agrément, etc.

Les procédés électrothermiques à basse température (chauffage électrique, chauffage de l'eau, préchauffage de l'air, etc.) sont des éléments potentiels favorables à un approvisionnement en rejets thermiques. Pour autant que des émetteurs de rejets thermiques soient disponibles et que les consommateurs ne soient pas dispersés en trop petits groupes, l'énergie électrique pourra être remplacée en grande partie par des rejets thermiques. Par cette substitution, l'électricité passe du rôle d'agent énergétique principal à celui de distributeur d'énergie d'appoint.

Les fonctions essentielles des installations de RC/URT sont les suivantes : transport de chaleur, transmission de chaleur et régulation centrale des flux thermiques. Les éléments supplémentaires indispensables à ces diverses fonctions (pompes électriques, ventilateurs, etc.) provoquent une augmentation des besoins en électricité. L'adjonction d'échangeurs de chaleur dans les conduits et les canalisations accroît les pertes de charge et, de ce fait, la consommation électrique des moyens mis en place. Afin d'obtenir le meilleur rapport possible entre l'énergie électrique supplémentaire utilisée et l'énergie thermique récupérée, les moteurs, pompes et ventilateurs devront atteindre un rendement optimal.

### Quatre principaux secteurs d'application

1. Mise en valeur de rejets thermiques à haute température : la vapeur à haute température produite par des rejets thermiques de procédés entraîne un générateur de courant par l'entremise d'une turbine à vapeur.
2. Utilisation de rejets thermiques découlant de procédés électriques : rejets thermiques provenant de gros transformateurs destinés au chauffage de locaux.
3. Substitution de systèmes électrothermiques par l'utilisation des rejets thermiques : remplacement des corps de chauffe électriques du chauffe-eau par un échangeur de chaleur alimenté par des rejets thermiques.
4. Utilisation rationnelle de l'électricité comme énergie d'appoint dans des installations de RC/URT : moteurs, pompes et ventilateurs réglés pour un rendement optimal.

Encadré 5

## 2. Composants et systèmes

### 2.1 Aperçu des différents systèmes

#### Catégories

Les éléments principaux des installations de RC/URT sont les échangeurs de chaleur, tant que la température de la source est supérieure à la température d'utilisation. Si l'on inverse les conditions, la pompe à chaleur devient l'élément principal de l'installation. Les différents systèmes sont divisés en 4 catégories (tableau 6 et encadré 7). Le tableau 8 montre différents composants des installations de RC/URT.

La RC peut se baser sur des schémas définis et des appareils standardisés, alors que dans le cas de l'URT, récupérateurs et régénérateurs doivent toujours être planifiés individuellement, étant donné les diverses possibilités de leur utilisation.

En ce qui concerne l'eau et l'air, différentes technologies sont en principe appliquées pour les composants et les systèmes. A propos de l'air, il faut tenir compte du facteur humidité. Au sujet de l'eau, on a en général affaire à un système à fluide unique, et seules les limites imposées par l'utilisation de l'appareil sont à considérer.

#### RC sur air évacué

Cette méthode est décrite au tableau 10. Pour de plus amples renseignements, on peut consulter la documentation suivante :



*Directives SICC 89-1F. Systèmes de récupération de chaleur. Berne: Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation (SICC), 1983. (Source: SICC, CP 2327, 3001 Berne)*

*VDI 2071. Récupération de chaleur des installations de climatisation. Berlin, Cologne: Beuth Verlag, 1981 (feuille 1), 1983 (feuille 2). (Source: librairie)*

#### RC dans des installations industrielles d'évacuation de l'air

Les installations industrielles d'évacuation d'air travaillent selon les mêmes principes que les installations destinées au confort d'habitations. Dans le vaste domaine des installations relatives aux domaines techniques, la RC a acquis ces dernières années une importance grandissante. De ce fait, la technique de commande, le choix des matériaux, les possibilités d'accumulation ainsi que les fluides caloporteurs se sont adaptés à cette nouvelle demande.

Système	Type	Catégorie
Echangeur à plaques, tubulaire, gaufré	Récupérateur	I
Echangeur de chaleur à fluide intermédiaire, caloduc	Régénérateur	II
Echangeur rotatif	Régénérateur	III
Pompe à chaleur et autres		IV

Tableau 6: Classification des systèmes de RC pour installations de ventilation selon type et catégorie d'après VDI 2071.

#### Concepts

Récupérateur : échangeur de chaleur, dans lequel l'échange se fait directement à travers les parois de séparation.

Régénérateur : échangeur de chaleur, dans lequel la chaleur est stockée provisoirement dans un milieu pendant l'échange.

Catégorie I : procédé de récupération avec des surfaces d'échange fixes. D'ordinaire, seule la chaleur sensible est transmise de cette façon (échangeur de chaleur à surfaces séparatives).

Catégorie II : procédé de régénération avec surfaces séparatives. Un fluide, sous forme liquide ou gazeuse, accumule la chaleur qu'il restitue ensuite.

Catégorie III : système de régénération avec surfaces de contact. Un solide absorbe la chaleur ou l'humidité – ou les deux –, et la délivre à nouveau.

Catégorie IV : système pompe à chaleur. On utilise un fluide frigorigène qui, moyennant l'apport d'énergie, transmet de la chaleur.



Autres processus cf. paragraphe 2.4.

Encadré 7

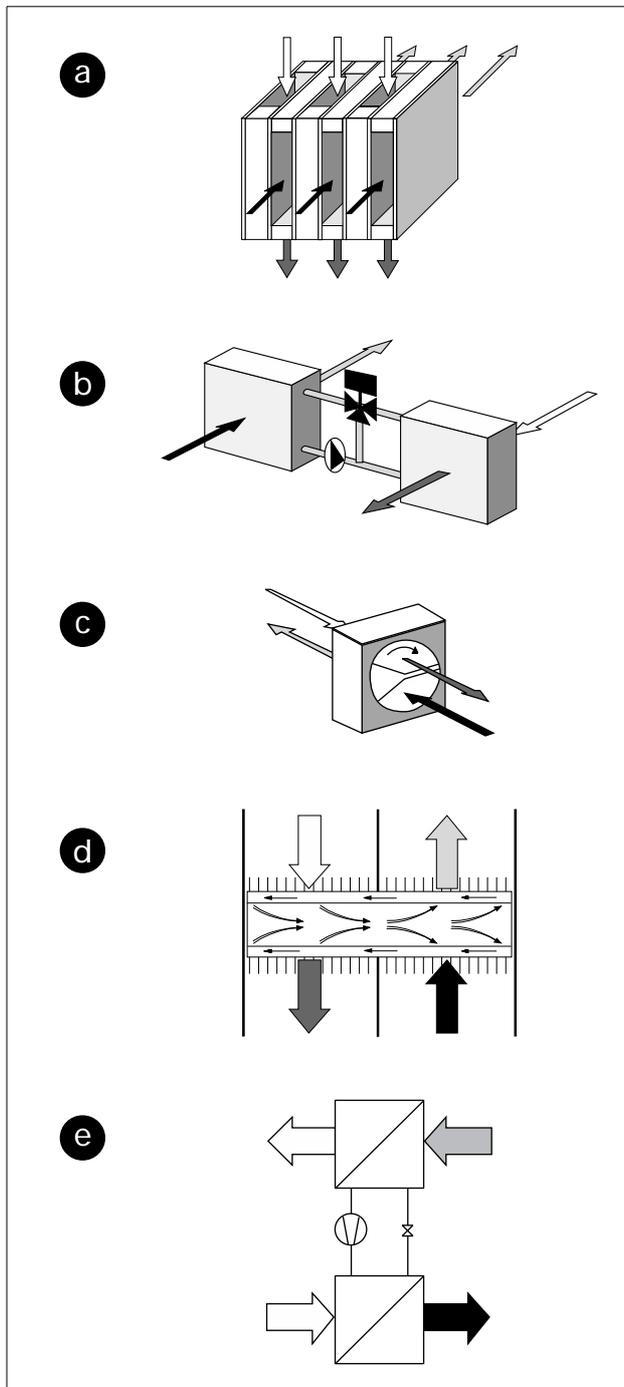


Figure 8 : Description des systèmes d'échangeurs de chaleur :  
 a) Échangeur de chaleur à flux croisé (catégorie I).  
 b) Échangeur de chaleur à fluide intermédiaire (catégorie II).  
 c) Échangeur de chaleur rotatif (catégorie III).  
 d) Caloduc (catégorie II).  
 e) Pompe à chaleur (catégorie IV).

### RC/URT des gaz et des liquides

Contrairement aux procédés de récupération sur l'évacuation de l'air, les possibilités de RC/URT des éléments liquides (tableau 11) ne forment pas un tout.

Dans le cadre des mesures générales d'économie d'énergie de ces dernières années, la préoccupation essentielle des ingénieurs s'est portée sur les énormes quantités de chaleur inutilisées et rejetées dans la nature par les techniques de refroidissement. Dans ces installations, l'utilisation de la chaleur des condensateurs peut être réalisée de façon fort simple.

☞ « Installations de refroidissement », annexe A.

### Schémas hydrauliques

La figure 9 montre 4 schémas hydrauliques pour des systèmes à circuit fermé. Le schéma A présente un optimum certain concernant le débit :

- Avec un débit trop faible, la puissance transmise est insuffisante.
- Avec un débit trop important, la différence de température ne peut pas être utilisée de façon optimale.

Pour les schémas B, C et D, on s'efforcera d'obtenir un réglage optimal des valeurs de consigne du régulateur. En cas d'utilisation de 2 pompes (schémas C et D) le débit du circuit « source de chaleur » ne doit pas être plus faible que celui du circuit « utilisateur de chaleur », car la circulation pourrait être perturbée dans l'accumulateur.

L'optimisation est à calculer en fonction des différentes conditions d'utilisation, et un équilibrage hydraulique minutieux de l'installation est indispensable. Ces calculs tiendront également compte des frais d'investissement et des énergies d'appoint.

☞ Cahier 1, chapitres 4 et 5

### Régulation de la puissance

En vue de s'adapter aux périodes de transition et pour aboutir à un fonctionnement optimal, il est souhaitable d'asservir la puissance transmise par l'air évacué aux besoins nécessaires au chauffage de l'air frais. Pour ce faire, la solution la plus fréquente est la pose d'un bypass, côté air extérieur. Un réglage tout aussi judicieux sera pratiqué au niveau des caloducs par des clapets bypass. La transmission de chaleur par les échangeurs thermiques rotatifs peut être modifiée au moyen d'une commande de vitesse de rotation, afin d'adapter le rendement aux besoins.

### Risque de formation de gel

Dans les systèmes de la catégorie II (circuit fermé intermédiaire et caloducs), la répartition de la température dans le conduit placé après la RC est pratiquement constante. Par contre, elle devient très irrégulière en présence d'échangeurs thermiques à flux croisés, d'où augmentation du risque de formation de gel dans les coins. Les récupérateurs de chaleur rotatifs accusent les températures les plus élevées dans la zone de rinçage et les températures les plus basses dans la partie opposée du « rotor ». S'il y a formation de gel, l'échange de chaleur diminue et la perte de pression au niveau de l'air augmente. C'est pourquoi il faut à tout prix éviter une quelconque formation de gel, ce qui est possible par la pose d'un bypass ou d'un système de préchauffage.

### Contamination

La contamination, c'est-à-dire la transmission de poussières et/ou d'odeurs, doit si possible toujours être évitée, ce qui est le cas dans les systèmes à parois de séparation. Les échangeurs thermiques rotatifs travaillent avec des chambres de rinçage. Selon de toutes récentes mesures, les fuites constatées dans ce type d'échangeur ne sont pas insignifiantes.

### Energie d'appoint

Tous les systèmes de RC sont actionnés par des éléments mécaniques qui nécessitent un entraînement électrique. L'utilisation de systèmes d'entraînement dont la vitesse de rotation progressive et variable est contrôlée électroniquement, permet d'adapter la consommation de courant à la puissance nécessaire. Des applications à forte consommation énergétique, tels que des étranglements du côté « processus », ne devraient être utilisés que si aucune autre solution ne peut être appliquée.

### Décontamination

Dans le cadre d'une exploitation industrielle, les installations de traitement de l'air posent de sérieux problèmes d'encrassement des appareils par les matières en suspension dans l'air vicié. Pour y remédier, il est toujours possible de poser un filtre, mais cette opération occasionne une perte de pression supplémentaire et, de ce fait, une augmentation des besoins énergétiques et de surveillance. Lorsque l'air évacué est fortement vicié, la pose de filtres grossiers (cyclones, déflecteurs, chicanes) avant l'échangeur est recommandée.

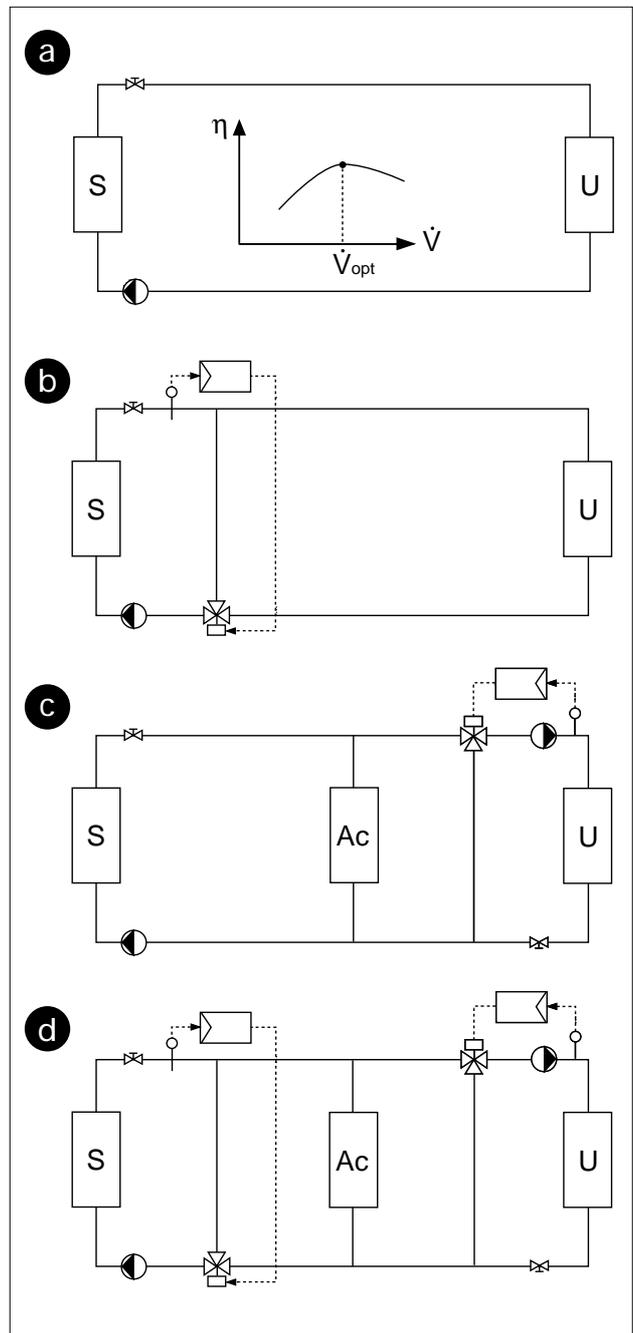


Figure 9: Schémas hydrauliques; la source émettrice «S» peut être en principe un échangeur de chaleur ou une pompe à chaleur.

A. Circuit non régulé.

B. Circuit régulé.

C. Circuit avec accumulateur pour chargement étagé à plusieurs passages.

D. Circuit avec accumulateur pour chargement par stratification.

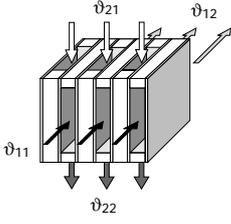
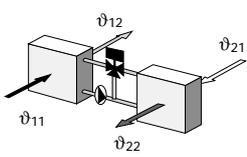
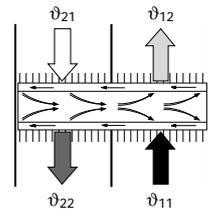
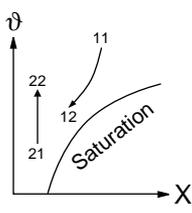
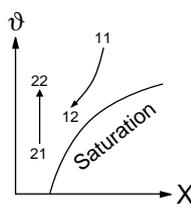
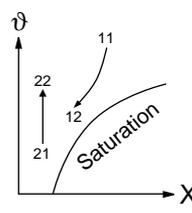
	Récupérateur	Régénérateur à surfaces de séparation fixes	Régénérateur à surfaces de contact
Exemple	Echangeur de chaleur avec tube de verre ou plaques	Echangeur de chaleur à fluide intermédiaire	Caloduc
Dessin			
Mode de fonctionnement	Flux croisés	Echangeur thermique à choix, les flux d'air peuvent être très éloignés l'un de l'autre	Flux parallèles ou opposés, sans croisement
Diagramme de Mollier			
Régulation puissance	Bypass	Bypass, vanne de réglage	Bypass, inclinaison de l'échangeur de chaleur
Risque de gel	Relativement élevé en cas de flux croisés (répartition inégale de la température)	Faible (régulation de la température avec vanne)	Moyen (répartition température homogène)
Echange de fluide	Non	Non	Non, si parois de séparation bien étanches
Energie d'appoint	Non	Oui (pompe)	Non
Parties mobiles	Clapets bypass	Pompe	Clapets bypass, mécanisme de basculement
Volume de construction-type pour 1000 m³/h	1,5 m³	0,5 m³	0,5 m³
Perte de pression typique	150 Pa	120 Pa	120 Pa
Rendement de température	0,40 à 0,60	0,40 à 0,70	0,35 à 0,60
Coûts spécifiques	Plutôt bas, pour faibles quantités d'air < 10 000 m³/h	Plutôt élevés	Moyens

Tableau 10: Différents systèmes pour la récupération de chaleur de l'air (respectivement gaz).

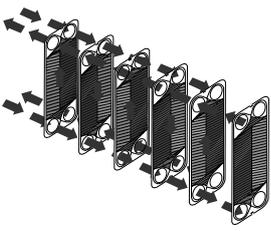
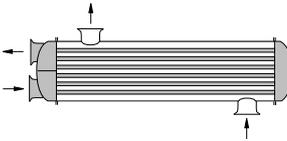
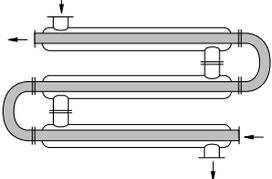
	Echangeur de chaleur à plaques	Echangeur de chaleur à faisceaux de tubes	Echangeur de chaleur à double-manteau et coaxial
Dessin			
Construction, principe de fonctionnement	Forme compacte, parois de séparation fixes, plaques profilées, plaques étanches et soudées, vissées au bâti au moyen d'écrous tendeurs	Changement de phase solide/liquide, tube à ailettes, pas d'échange de fluides	Changement de phase solide/liquide, tube à ailettes, pas d'échange de fluides
Domaines d'utilisation	Chimie, pharmacie, habitat, technique de l'environnement, industrie alimentaire et des boissons	Condenseur dans les techniques de froid ou dans des procédés produisant de la vapeur	Condenseur dans les techniques de froid
Matières	Acier de construction, acier chrome-nickel, alliage d'aluminium, titane, nickel, graphite	Bâti en acier, tubes à ailettes en acier, cuivre, cuivre-nickel, laiton	Acier, cuivre, cuivre-nickel, laiton (tubes)
Caloporteurs	Eau, huile glycol, produits chimiques. Vapeur ou gaz: rarement	Eau, vapeur d'eau, fluide frigorigène (fluide de refroidissement)	Eau, fluide frigorigène (fluide de refroidissement)
Entretien, nettoyage	Procédé de rinçage ou démontage des plaques (relativement bon marché)	Facile dans les tubes, presque toujours chimiquement côté manteau	Facile dans les tubes, presque toujours chimiquement côté manteau
Plages de températures	Jusqu'à 150°C environ; avec des joints spéciaux: jusqu'à 300°C	Technique de refroidissement jusqu'à 120°C max.; procédés de vapeur, jusqu'à environ 300°C	Jusqu'à max. 120°C
Caractéristiques	De petites à grandes puissances, faible poids, très bon transfert de la chaleur, surface d'échange variable, pièces de rechange livrables rapidement	Grandes puissances, tubes à ailettes (intérieur + extérieur), bon transfert de la chaleur, gros volumes de fluides caloporteurs	Faibles puissances, faibles volumes de fluides caloporteurs, perte de pression relativement importante
Coûts spécifiques	Moyen à élevé	Plutôt élevé	Plutôt bas

Tableau 11: Différents processus de récupération de chaleur de l'eau (respectivement de liquides).

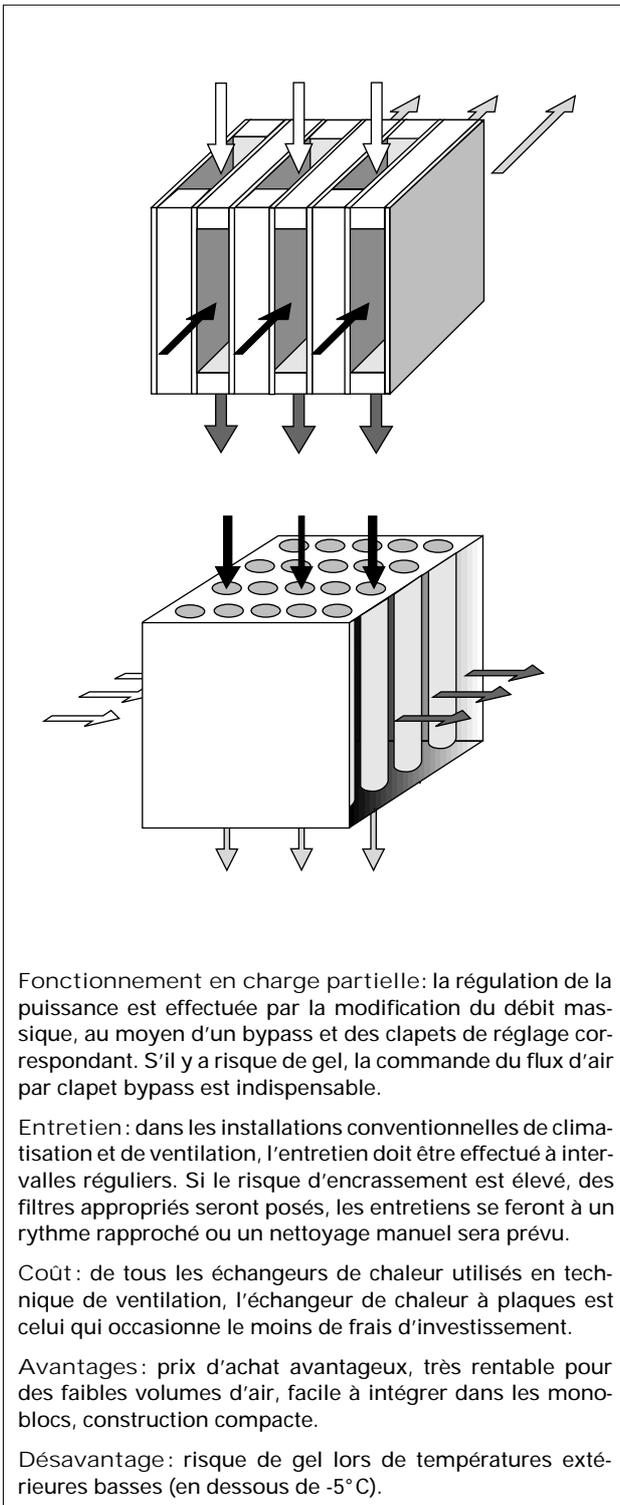


Figure 12: Echangeur de chaleur à plaques (en haut) et échangeur de chaleur à tubes (en bas) pour l'air.

### Présentation et dimensions

Les échangeurs de chaleur à plaques et les régénérateurs rotatifs sont disponibles dans différentes grandeurs définies selon les débits et la place disponible. Les échangeurs de chaleur à fluide intermédiaire et les caloducs peuvent être adaptés à chaque situation en variant la longueur, le nombre de tubes ou le nombre de rangées de tubes. L'intégration dans des monoblocs ou des appareils compacts de différentes dimensions est réalisable.

### Indications de puissance

Les indications sur l'encombrement, les pertes de pression et le rendement de température figurent au tableau 10; afin de permettre la comparaison, les valeurs sont données sur la base d'installations dont le volume est de  $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$  d'air frais et  $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$  d'air évacué. Bien entendu, des différences peuvent apparaître de fabricant à fabricant.

## 2.2 Systèmes de type « récupérateur »

Ce paragraphe traite uniquement des échangeurs de chaleur de type « récupérateur » en relation avec les applications de RC et d'URT. Les autres types d'échangeurs, comme par exemple les échangeurs de chaleur tubulaires, à tubes spiralés, à double-manteau, les condenseurs, les évaporateurs, etc., qui remplissent souvent une fonction bien définie dans des opérations techniques ne sont pas abordés ici.

### Echangeurs de chaleur à plaques et à tubes pour l'air

Le fonctionnement de cet échangeur de chaleur est simple à comprendre, puisque les clapets bypass y sont les seules parties mobiles. Dans l'échangeur à plaques, les flux chauds et froids, séparés par des plaques métalliques, sont placés l'un contre l'autre et faiblement espacés. Une transmission d'impuretés, d'odeurs, de bactéries ou d'humidité n'apparaît généralement pas, ou alors en présence de rapports de pression extrêmes ou suite à l'apparition d'un défaut au niveau de l'échangeur. L'échangeur de chaleur tubulaire est plus robuste, mais possède une plus petite surface d'échange pour un volume identique. La figure 12 montre les différences qui apparaissent entre ces 2 types d'échangeurs ainsi que leurs caractéristiques essentielles.

Les plaques constituant l'échangeur de chaleur se présentent sous différentes formes, selon l'objectif d'utili-

sation et, surtout, le principe de circulation de l'air : monobloc, profil creux, modules combinables, montage en diagonale posé sur l'angle, démontable pour faciliter l'entretien, etc.

Leur domaine d'utilisation concerne les installations de ventilation de confort usuel ainsi que les hôpitaux, piscines couvertes, complexes sportifs. La séparation des flux permet également leur utilisation dans les installations de séchage et de laquage ainsi que pour la ventilation des halles industrielles.

Les matériaux employés pour la fabrication de ces échangeurs sont l'aluminium, les matières synthétiques et l'acier inoxydable.

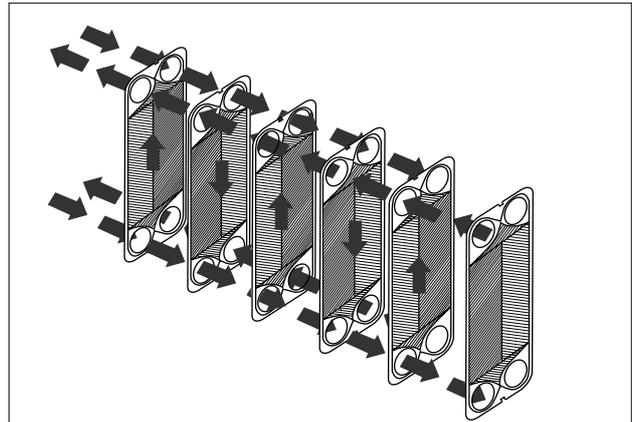
### Echangeurs de chaleur à plaques pour liquides

Les échangeurs de chaleur à plaques sont de conception compacte, d'entretien aisé et résistent à la corrosion. Actuellement on dispose de moyens performants pour l'étanchéité. Des démontages fréquents de ces appareils à des fins de nettoyage (par exemple dans l'industrie alimentaire) sont possibles. Pour des pressions élevées, les plaques seront soudées dans les bords ou aux emplacements de contact. Dans les techniques de refroidissement, les échangeurs de chaleur à plaques sont utilisables comme évaporateurs ou comme condenseurs (changements de phase) en adaptant leur section de passage. Ce même principe d'exécution est utilisé dans l'URT pour eaux usées fortement polluées.

Cet appareil fonctionne selon le principe d'échange de chaleur à travers des parois de séparation fixes, sans mélange de matière.

L'échangeur de chaleur se présente sous une forme compacte de par la disposition typique de ses plaques. Elles sont soudées en périphérie ou équipées de joints. L'espace entre les plaques est dû à la structure gaufrée de celles-ci. Elles sont incorporées dans un support en fonction du schéma hydraulique désiré et pressées les unes contre les autres, entre une plaque fixe et une plaque mobile, au moyen d'écrou-tendeurs (figure 13). L'échangeur de chaleur à plaques est fréquemment employé dans les installations de RC/URT, car il offre un grand facteur d'échange allié à de petits débits et un faible poids. D'autres propriétés de cet échangeur sont décrites à l'encadré 14.

Les domaines d'application de l'échangeur de chaleur à plaques sont la chimie, la pharmacie, l'industrie



Fonctionnement en charge partielle : la régulation de la puissance est effectuée par la modification de l'un des deux débits massiques.

Entretien : vu les fortes turbulences dans les canaux des plaques, le risque d'encrassement est réduit. Si nécessaire, le nettoyage peut être effectué à peu de frais avec un système de rinçage éprouvé. Dans des cas plus compliqués, l'échangeur de chaleur à plaques peut être intégralement démonté. La conception modulaire de cet appareil permet un remplacement avantageux des pièces détachées.

Coût : le prix est déterminé en fonction du principe de construction, des matériaux utilisés et de la surface d'échange.

Avantages : construction compacte, pertes de chaleur minimales, petites différences de température, coefficients de transmission de chaleur élevés, adaptation facile aux conditions données, bon rapport qualité/prix.

Désavantages : nombreux joints, moins bonne aptitude lors de différences de température élevées entre côté primaire et côté secondaire, facilement encrassé par des particules solides.

Figure 13 : Echangeur thermique à plaques pour liquides

#### Données techniques des échangeurs de chaleur à plaques pour liquides

Fluides primaire-secondaire : eau-eau, eau-huile, eau-glycol, liquides organiques et inorganiques, rarement gaz ou vapeur  
 Température : jusqu'à 150°C avec joints standard 200-300°C possible, avec joints spéciaux

Débit	5 à 2500 m <sup>3</sup> /h
Vitesse du fluide	0,2 à 2 m/s
Perte de pression	20 à 100 kPa
Valeur « k »	2000 à 6000 W/m <sup>2</sup> K
Surface d'échange	1 à 300 m <sup>2</sup>
Différence de température primaire-secondaire	2 à 5 K
Rendement de température	50 à 90 %
Pression de service	jusqu'à 25 bar environ

Encadré 14

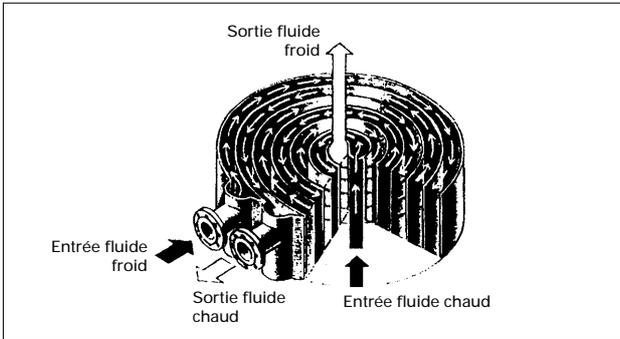
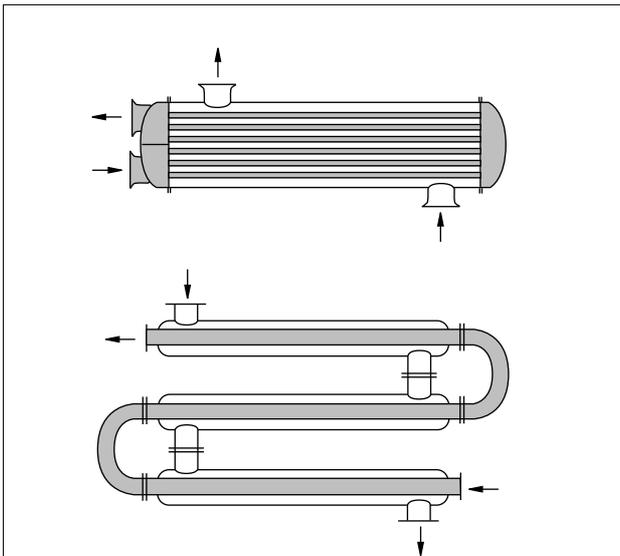


Figure 15 : Schéma de construction d'un échangeur de chaleur spiralé pour liquides.



Entretien : nettoyage facile dans les tubes, mais difficile du côté manteau ; la plupart du temps, le nettoyage doit être effectué chimiquement.

Coût : les exécutions à faisceaux de tubes et à double-manteau sont plus avantageuses que les modèles en forme de pot.  
Avantage du modèle « tubulaire » : composants avantageux.

Désavantages du modèle « tubulaire » : important volume de liquide, risques de fuite.

Avantages du modèle à « double-manteau » : nécessite peu de fluide de refroidissement, exécution fiable.

Désavantage du modèle à « double-manteau » : forte perte de pression.

Figure 16 : Echangeurs de chaleur à faisceaux (en haut) et à double-manteau (en bas).

alimentaire, les processus techniques relatifs à l'environnement et au chauffage. Les échangeurs de chaleur à plaques sont utilisés de préférence avec des liquides exempts de particules solides, mais il peuvent aussi être employés comme évaporateur ou comme condenseur. Les matériaux utilisés pour la fabrication des échangeurs de chaleur à plaques varient selon les cas ; les échangeurs peuvent être en acier, acier inoxydable, alliage d'aluminium, titane, nickel ou graphite. Les parois de séparation de ces appareils étant minces, leur construction exige peu de matière.

L'échangeur de chaleur spiralé représente une conception particulière d'échangeur à plaques. Il prend toujours plus d'importance, spécialement dans le domaine de la RC/URT des gaz de combustion, où il représente une variante appréciée et avantageuse. Ces propriétés sont analogues à celles d'un échangeur de chaleur à plaques. Sa conception est présentée à la figure 15.

#### Echangeurs de chaleur tubulaires

Les tubes représentent l'élément de base de nombreuses conceptions d'échangeurs de chaleur. Les modèles les plus courants sont les échangeurs à faisceaux de tubes et à double-manteau. Les principes de construction sont présentés à la figure 16.

Le principe de fonctionnement réside dans l'échange de chaleur sur des surfaces de séparation fixes qui peuvent être agrandies par des canelures ou des ailettes, aussi bien du côté primaire que du côté secondaire. Le procédé ne donne lieu à aucun échange de matière. La forme caractéristique de cet échangeur rappelle de la disposition des tubes dans une chaudière. Le flux est réparti dans les différents tubes. Le point faible du système réside dans les risques de fuites entre les tubes et le manteau de la chaudière, ce qui peut provoquer une baisse de rendement importante. Ces fuites proviennent des tolérances de fabrication, mais aussi de la dilatation thermique différente de chacun des éléments à la température de fonctionnement. Des développements récents ont permis de trouver une solution intéressante au problème ci-dessus en utilisant des joints flexibles sur les tôles longitudinales et transversales. Il s'agit de modules élastiques pouvant être incorporés aux parois de séparation sans être vissés, et qui compensent toutes les tolérances et dilatations. D'autres moyens visant à diminuer les fuites vers la base des tubes ont été développés ces dernières années.

Son domaine d'application s'étend des techniques de refroidissement jusqu'à la production de vapeur dans

les usines thermiques. Pour les grandes installations, on aura recours à des échangeurs de chaleur à faisceaux de tubes classiques, alors que pour des installations moins importantes, la préférence est donnée aux modèles à double-manteau.

Les matériaux utilisés pour les tubes sont l'acier, l'acier inoxydable, le cuivre, un alliage cuivre-nickel ou le laiton.

Utilisation de l'échangeur de chaleur tubulaire comme condenseur dans la production de froid

Il existe de multiples possibilités d'utilisation des condenseurs dans la technique de production de froid. C'est pourquoi il ne sera abordé ici que les condenseurs refroidis par liquide, domaine de la technique du froid qui revêt une importance particulière pour l'URT (figure 17 et encadré 18).

La surface d'échange de chaleur est composée d'un certain nombre de tubes minces, souvent cannelés sur les deux côtés, et incorporés dans un manteau de forme cylindrique. Pour les condenseurs refroidis par liquide, le fluide frigorigène se trouve autour des tubes, alors que le fluide de refroidissement passe dans les tubes. L'évaluation thermodynamique et l'optimisation sont déterminantes, étant donné les imprécisions de calcul du transfert de chaleur lors du changement de phase. Actuellement, on installe presque uniquement des tubes aux caractéristiques excellentes (cannelés à l'intérieur et à l'extérieur, cf. figure 19), fiables et résistants, résultat de technologies toujours plus performantes. Un meilleur rendement et simultanément un volume de construction plus compact permettent une réduction de la quantité du fluide frigorigène, ce qui diminue d'autant le risque de pollution en cas de fuite.

Autres utilisations d'échangeur de chaleur de type « récupérateur »

L'utilisation d'échangeurs de chaleur sur les gaz d'échappement impose l'emploi de métaux spéciaux adaptés aux fluides corrosifs apparaissant lors de la condensation du gaz (chlore, acide fluorhydrique ou acide sulfurique). En guise d'alternative, des matériaux comme le graphite, la céramique ou des matières synthétiques peuvent également être utilisés.

Dans la construction d'appareils destinés à la chimie, on rencontre souvent des échangeurs de chaleur en graphite, spécialement prévus pour les faibles débits. Récemment, des constructions spéciales modulables ont été développées pour les gros débits de gaz de combustion. La transmission de chaleur a lieu par le circuit

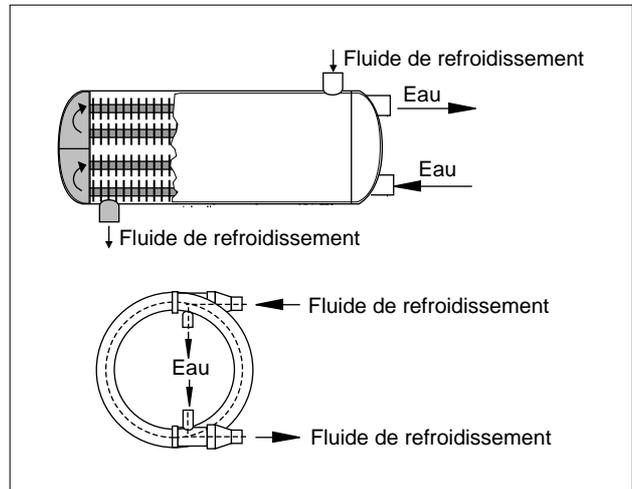


Figure 17: Forme des condenseurs; à faisceaux de tubes (en haut) et à double manteau ou coaxial (en bas).

Données techniques des échangeurs de chaleur tubulaires pour installations de refroidissement

Fluides	en général eau et fluide frigorigène
Plage de températures	jusqu'à 120° C environ
Vitesse du fluide	2 à 3 m/s
Valeur « k »	300 à 1200 W/m <sup>2</sup>
Différence de température (côté eau)	environ 5 K
Pression de service	jusqu'à 25 bar environ

Encadré 18

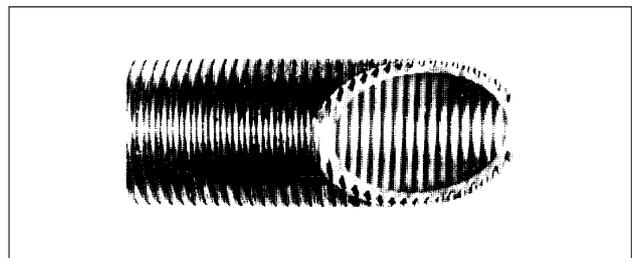
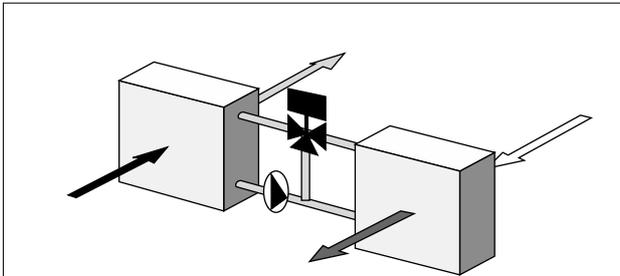


Figure 19: Tube pour puissance élevée avec ailettes intérieures et extérieures.



Fonctionnement en charge partielle: une régulation est assurée par la modification du flux caloporteur (changement de vitesse du circulateur, commande équipée d'une vanne à 3 voies). La puissance transmise change également en fonction du flux d'air (par exemple dans une installation avec débit variable). Dans le circuit intermédiaire, le débit doit être optimisé par rapport à la puissance transmise.

Entretien: le nettoyage périodique des échangeurs doit être effectué méthodiquement, en veillant à l'ordre d'alignement des tubes, car une inversion peut amener des perturbations. Si le nettoyage doit être effectué par un système à haute pression, il faut prévoir des lamelles épaisses et rigides. Le risque de corrosion engendré par le fluide caloporteur dans le circuit intermédiaire doit être contrôlé périodiquement (inhibiteurs).

Coût: pour de petits débits d'air le système à fluide intermédiaire est relativement cher. Par contre, si l'on a affaire à des volumes importants, il devient plus avantageux par rapport à d'autres systèmes, du fait de l'abandon du rapprochement des circuits d'air frais et d'air évacué et des canalisations y relatives. Les frais d'entretien et de surveillance sont comparables à ceux de l'échangeur thermique à plaques.

Avantages: les flux d'air ou de gaz peuvent être éloignés l'un de l'autre; les risques de contamination et de fuite sont inexistant; une connexion (réseau) de plusieurs installations est possible; idéal pour des assainissements.

Désavantage: la surveillance périodique du circuit intermédiaire est indispensable.

Figure 20: Circuit intermédiaire avec deux échangeurs de chaleur séparés.

de l'eau, qui passe à travers les tubes en graphite. Pour ce type d'application, les échangeurs de chaleur en matières synthétiques flexibles (PTFE, PFA, PVDF.) peuvent également être utilisés. Ils sont fabriqués dans des grandeurs modulables et assemblés sur place dans des cadres préfabriqués. Les matières synthétiques offrent l'avantage de garantir une grande résistance à la corrosion et à l'encrassement et sont insensibles aux modes de stockage. Elles peuvent résister à des températures de fonctionnement de plus de 200°C.

Pour des températures dépassant 500°C, on choisira des échangeurs thermiques en céramique, matière reconnue pour sa résistance à la corrosion et à l'usure.

## 2.3 Systèmes de type « régénérateur »

### Circuits fermés

La transmission indirecte de chaleur au moyen d'un circuit intermédiaire peut se combiner de diverses façons à d'autres systèmes. L'excédent de chaleur peut être transporté en direction de plusieurs points de distribution, placés à des distances différentes. Cette propriété revêt une grande importance, lorsqu'il s'agit de travaux d'assainissement et de rénovation. Un autre avantage du système réside dans la flexibilité offerte quant aux possibilités d'optimisation (construction d'échangeurs de chaleur compacts ou par éléments, choix des formes, des dimensions et des répartitions des tubes, choix des surfaces et des matériaux).

Selon le niveau de température de la source de chaleur, l'exploitant peut profiter de ces rejets thermiques selon le but recherché: chauffage d'air froid ou d'eau, ou encore, en cas de rejets thermiques à très haute température, production de vapeur pour des procédés industriels.

Le principe du fonctionnement typique de ce système est représenté par le circuit intermédiaire assurant le transport de chaleur du côté chaud au côté froid (figure 20). Le raccordement hydraulique des deux échangeurs permet le transfert de chaleur d'un échangeur à l'autre. Le fluide caloporteur circulant dans le circuit intermédiaire a un effet régénérateur: il stocke et transporte la chaleur.

Le domaine d'application le plus important de ce système est la ventilation. Dans les travaux d'assainissement, il représente souvent la seule solution. Dans ce cas, on utilisera de préférence l'échangeur de chaleur à lamelles. Si la température du flux d'air humide s'abaisse au-dessous du point de rosée, la chaleur latente est alors

récupérée. Il n'y a pas de mélange entre fluides froids et chauds. En hiver, une protection contre les risques de gel est nécessaire. Le fluide du circuit intermédiaire doit résister au gel (par exemple solution eau-glycol). Les installations de ventilation dans le secteur de la production offrent de nombreuses possibilités d'application pour de tels systèmes.

### Caloducs

Le principe de fonctionnement du caloduc (en anglais: « heat pipe ») est caractérisé par la circulation différenciée des gaz et des liquides. Un tube à lamelles étanche contient un fluide frigorigène (CFC) en phase liquide ou gazeuse en fonction de la zone.

On distingue deux types de construction :

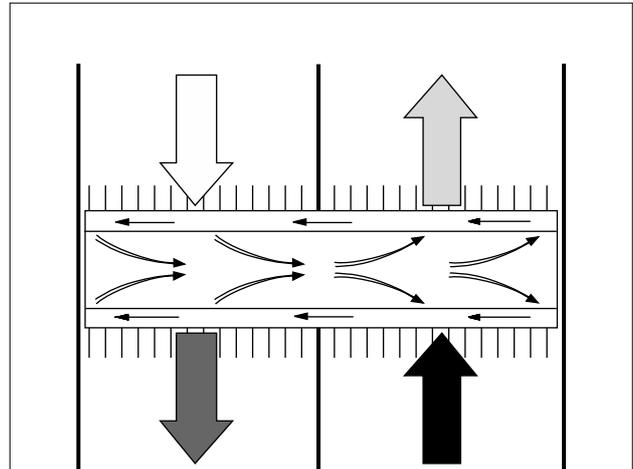
- Le caloduc vertical (thermosiphon à double phase ou caloduc à gravitation), où la moitié inférieure est mise en contact avec une source de chaleur. Le fluide s'évapore, puis monte dans la partie supérieure où il donne sa chaleur et se condense pour retomber dans la partie inférieure.
- Le caloduc horizontal (version classique) possède un revêtement poreux, dans lequel le retour du fluide s'effectue par capillarité.

Le domaine d'application s'étend aux piscines couvertes, aux hôpitaux, aux techniques de ventilation de la branche textile, aux installations de laquage et de séchage et même aux installations d'évacuation de gaz. Les matériaux utilisés pour sa fabrication sont des alliages d'aluminium et de cuivre. En cas de contact avec des gaz corrosifs, les caloducs seront recouverts d'une couche de protection.

### Echangeurs de chaleur rotatif

L'échangeur de chaleur rotatif a été développé vers la fin des années 1950 pour des installations de climatisation américaines. Depuis longtemps, il fait partie de l'équipement standard des installations de ventilation et de climatisation. Il est également très apprécié pour les équipements industriels, en raison de ses possibilités de récupération de l'humidité (chaleur latente) dans les flux d'air évacué et les gaz de combustion. Les nouvelles matières utilisées dans la fabrication des éléments de l'échangeur de chaleur rotatif rendent son installation possible dans une vaste plage de températures.

Le mode de fonctionnement de l'échangeur de chaleur rotatif se distingue par les charges et les décharges périodiques de la chaleur et de la vapeur dans la masse de l'accumulateur. La masse d'accumulation (rotor) a la forme d'un cylindre plat.



Fonctionnement en charge partielle: le réglage de la puissance est réalisé au moyen d'un bypass. Le basculement des tubes permet également une régulation limitée.

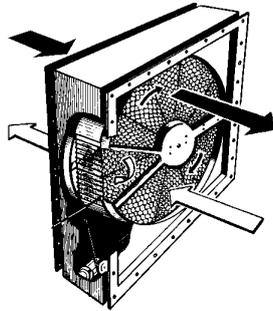
Entretien: les échangeurs de chaleur devant être périodiquement nettoyés doivent être équipés de lamelles avec grandes séparations. Lorsque l'air évacué est très sale, prévoir des filtres.

Coût: plus élevé que pour les simples échangeurs de chaleur à plaques.

Avantages: peu d'énergie d'appoint nécessaire, faible encombrement de montage; avec la répartition homogène de la température, le risque de gel est minime.

Désavantages: les deux flux d'air doivent être jumelés; le fluide frigorigène est un facteur de pollution, les rendements sont relativement faibles, réduction des possibilités de réglage lors du basculement.

Figure 21: Caloducs.



Fonctionnement en charge partielle: la puissance transmise et, de ce fait, la température de l'air pulsé, sont dépendantes de la vitesse du rotor; cette dernière permet de régler la température de l'air pulsé. Dans la zone de vitesse d'environ 0 à 10 t/min, on obtient les meilleures caractéristiques de réglage. Si la vitesse du rotor diminue, le rendement de l'humidité diminue beaucoup plus fortement que le rendement de température. D'autres possibilités de réglage existent: commutation séquentielle, fonctionnement intermittent, etc.

Entretien: nettoyage périodique, contrôle et réglage éventuel des joints du côté air. Remplacement de la courroie trapézoïdale, selon le degré d'usure. Le graufilage en aluminium doit être changé tous les 5 à 10 ans. Si des filtres correspondants sont prévus les surveiller et les entretenir.

Coût: le prix de l'échangeur de chaleur rotatif est plus élevé que celui de l'échangeur à plaques. Raisons de cette différence: besoin de place plus important pour le rotor et les gaines jumelées pour air frais et air évacué, difficultés de nettoyage, résistance à la corrosion, etc. Les frais d'entretien dépendent du concept de l'installation et de la qualité des fluides.

Avantages: transfert de l'humidité; avec un dimensionnement et un fonctionnement optimaux, on obtient un degré élevé de récupération de chaleur.

Désavantages: coût élevé des amenées d'air (gainés), fuites d'air, n'est pas indiqué pour le séchage.

Figure 22: Echangeur de chaleur rotatif avec zone de rinçage

Données techniques pour échangeurs de chaleur rotatifs

Fluide	Air, gaz
Plage de température	0 à 300°C
Débit d'air	1000 à 100 000 m <sup>3</sup> /h
Vitesse de l'air	1,5 à 3 m/s
Perte de charge	50 à 300 Pa
Vitesse du rotor	0 à 10 t/min
Puissance du moteur d'entraînement	0,09 à 0,75 kW
Encombrement de l'appareil (diamètre)	0,5 à 5,0 m
Rendement de température	50 à 75 %
Rendement de l'humidité	15 à 75 %

Encadré 23

Cette particularité donne la forme de sa construction. Le rotor tourne lentement; dans une direction, il est parcouru par de l'air chaud, et dans l'autre direction, par de l'air froid (figure 22). Du côté du flux d'air chaud, il soustrait la chaleur et l'humidité et les transmet au flux d'air froid. A l'heure actuelle, les rotors sont dotés le plus souvent de stries en aluminium ondulé (résistant à la corrosion) ou de structures gaufrées. Les détails techniques sur les échangeurs de chaleur rotatifs figurent dans l'encadré 23.

Il est à noter que la forme géométrique du rotor favorise les fuites. Une zone de rinçage fonctionnant par dépression évite au maximum le transfert de particules d'air vicié dans l'air pulsé.

Ce dispositif entraîne cependant une perte d'énergie, influencé également par l'emplacement des ventilateurs par rapport au rotor.

Selon l'utilisation, il est parfois souhaitable d'échanger de l'humidité entre les deux flux d'air. La transmission d'humidité peut se dérouler de deux façons:

- Echange de matière par condensation et évaporation: avec un rotor non hygroscopique, outre le transfert de chaleur, on obtient un transfert d'humidité que lorsque l'on descend en dessous du point de rosée de l'air humide (régénérateur à condensation)
- Echange de matière par adsorption et désorption: avec un rotor hygroscopique (par traitement de surface) on obtient un transfert de la chaleur sensible (température) et latente (humidité) (régénérateur à adsorption).

Le domaine d'application comprend aussi bien les installations techniques de ventilation dans le secteur du bâtiment et de l'industrie, que les installations techniques des procédés purement industriels. Dans des installations où l'air est fortement vicié (cuisines, cabines de pulvérisation, poussière de meulage, chimie, etc.), la pose d'un échangeur rotatif soulève toutefois quelques problèmes. En fait, les masses d'accumulation hygroscopiques ne conviennent qu'à des milieux propres et inertes.

## 2.4 Pompes à chaleur et transformateurs de chaleur

### Pompes 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 la température nécessaire. Mais l'énergie d'une source de chaleur à plus

basse température peut aussi être utilisée grâce à une pompe à chaleur (abréviation : PAC) qui, en « pompant », élève le niveau de température.

A part l'énergie nécessaire à son entraînement, la pompe à chaleur a besoin d'une source de chaleur appropriée. La qualité de cette source de chaleur déterminera grandement le choix et les conditions de fonctionnement de la pompe à chaleur. Dans le domaine des installations de confort, l'exploitation d'une source de chaleur provoque souvent de grosses dépenses, alors que dans le secteur des arts et métiers et de l'industrie, d'importantes quantités de rejets thermiques sont à disposition, sans investissement disproportionné pour leur mise en valeur. Lorsque les différences de température entre le côté « froid » et le côté « chaud » de la pompe à chaleur sont faibles, le coefficient de performance est élevé. Ces dernières années, la pompe à chaleur a fait son apparition également dans les secteurs de l'industrie et des arts et métiers. Ses domaines d'application sont multiples :

- chauffage, ventilation et climatisation ;
- chauffage de l'eau ;
- production d'énergie intégrée (chaleur-froid-force) ;
- procédés de séchage ;
- séparation de matières (distillation, condensation) ;
- réduction de liquides.

La pompe à chaleur peut fonctionner de façon autonome ou faire partie intégrante d'un procédé industriel. Les types de construction sont présentés schématiquement à la figure 24. Avec la pompe à chaleur à compression et la compression mécanique bi-étagée, l'énergie nécessaire à l'entraînement sera d'origine mécanique, tandis que pour la pompe à chaleur à absorption et la compression bi-étagée à jet de vapeur, l'énergie exigée pour l'entraînement sera d'origine thermique.

La pompe à chaleur à compression avec moteur électrique obtient un grand succès dans les applications domestiques.

 *Cahier 1, paragraphe 3.2; cahier 3.*

### Compression bi-étagée

Si au lieu de passer par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène, on injecte directement la vapeur du système dans la pompe à chaleur, on se trouve alors en présence d'un « procédé ouvert » appelé compression bi-étagée ou thermocompression. Dans ce type de compression mécanique ou thermique, les rejets de vapeur, tels qu'ils

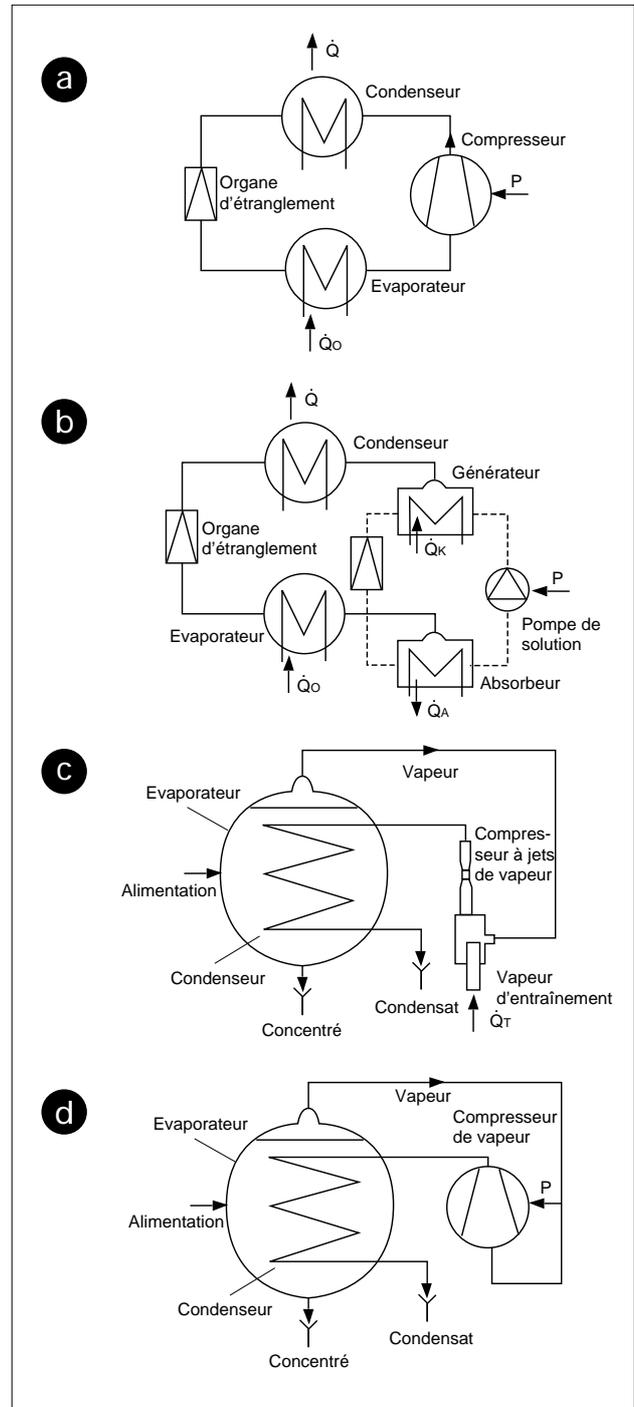


Figure 24 : Types de construction de pompes à chaleur (PAC) : à processus « fermé » (a, b) et à processus « ouvert » (c, d)  
 a) Pompe à chaleur à compression  
 b) Pompe à chaleur à absorption  
 c) à jet de vapeur – compression bi-étagée  
 d) Compression mécanique bi-étagée

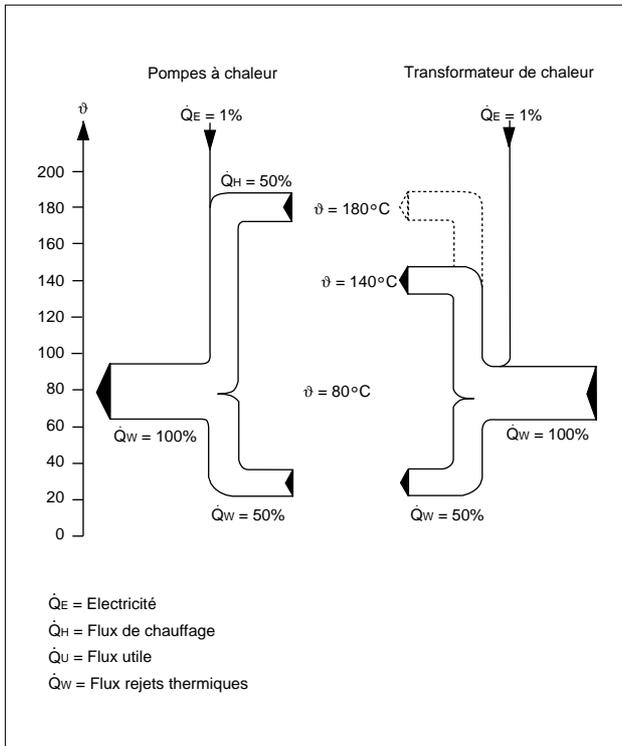


Figure 25: Comparaison des flux énergétiques d'une pompe à chaleur à absorption et d'un transformateur de chaleur.

existent par exemple dans un processus d'évaporation, sont amenés par un compresseur à une pression plus élevée. L'avantage de ce système réside dans la suppression de l'échangeur de chaleur et des différences de températures qu'il implique. Le procédé peut être réalisé en plusieurs étages.

### Transformateurs de chaleur

Le mode de fonctionnement des pompes à chaleur est en principe bien connu. Par contre, on ne sait pas grand-chose sur les possibilités d'utilisation des transformateurs de chaleur. Ils appartiennent pourtant, de même que les pompes à chaleur mécaniques et thermiques, au groupe des systèmes actifs d'utilisation des rejets thermiques.

La pompe à chaleur à absorption est en mesure de transformer une partie de la chaleur à basse température en une énergie thermique utilisable, de température moyenne, si un flux thermique de la même importance est amené à un niveau de température élevé.

Le transformateur de chaleur effectue le processus dans le sens inverse, puisqu'il utilise de la chaleur à température moyenne et la répartit en deux flux thermiques de valeur identique : le premier, à haute température, peut-être utilisé librement, tandis que le second, à basse température, peut-être délivré à un puits de chaleur. L'entraînement du transformateur n'exige qu'une faible part d'électricité représentant 1 à 2% d'énergie d'appoint.

La figure 25 oppose les deux procédés l'un à l'autre, afin de faciliter la comparaison. Selon ce principe, la chaleur des processus industriels lourds peut être relevée de 60-110°C jusqu'à 100-160°C, sans apport énergétique supplémentaire. On dénombre en Allemagne depuis quelques années déjà plusieurs exploitations du secteur de l'industrie lourde qui fonctionnent selon ce principe et donnent de bons résultats.

 Une installation de cuisson rejetant 2 MW d'énergie thermique sous forme de vapeur à 96-100°C, produit, à l'aide d'un transformateur, 1 MW de chaleur à 145°C pouvant être réinjectée dans cette même installation de cuisson.

 Ingwersen, H. H. (Hrsg.): *Mehrfachnutzung industrieller Prozesswärme*. Gräfelfing/München: Resch-Verlag, 1986. (Source: librairie)  
 H. Schnell und B. Thier: *Wärmetauscher. Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen*. Essen: Vulkan-Verlag, 1991. (Source: librairie)

## 3. Principes de base

### 3.1 Rejets thermiques

Les rejets thermiques ont plusieurs origines (encadré 26). Pour leur utilisation, il faut faire une distinction entre rejets de chaleur intrinsèques et rejets de chaleur diffus :

- Les rejets de chaleur intrinsèques sont liés à des flux de matière. En font partie principalement : l'air vicié, les flux provenant des gaz de combustion, les fluides de refroidissement ainsi que la chaleur emmagasinée par la matière à la sortie d'un traitement. A ce propos, il faut distinguer la chaleur latente (par exemple condensation) de la chaleur sensible (changement de température).
- Les rejets de chaleur diffus sont obtenus principalement par rayonnement et convection de grandes surfaces (pertes surfaciques des installations, pertes par transmission des bâtiments chauffés).

Recherche et récupération de rejets thermiques sont plus simples à réaliser pour la chaleur intrinsèque que pour la chaleur diffuse. La figure 27 propose une représentation imagée d'un processus général.

#### Origines de la formation des rejets thermiques

La production d'une énergie de haute valeur provoque inévitablement une énergie de moindre valeur – appelée anergie – à une température et une pression si basses qu'elle ne peut plus être utilisée.

Dans les processus de transformation, il existe cependant des rejets thermiques inévitables du point de vue technique, qui pourraient être réengagés ultérieurement.

Pour des raisons d'économie ou d'organisation, la production de rejets thermiques – qui en fait pourrait être évitée du point de vue technique – est souvent acceptée comme telle (malheureusement aussi parfois par ignorance ou indifférence!). Enfin, des rejets thermiques se dégagent aussi de l'énergie injectée dans le procédé (exemple: un produit chauffé qui doit être refroidi).



*Seule l'anergie ne peut plus être engagée dans un procédé. Les autres formes d'énergie peuvent être réutilisées par l'entremise d'échangeurs de chaleur et de pompes à chaleur!*

Encadré 26

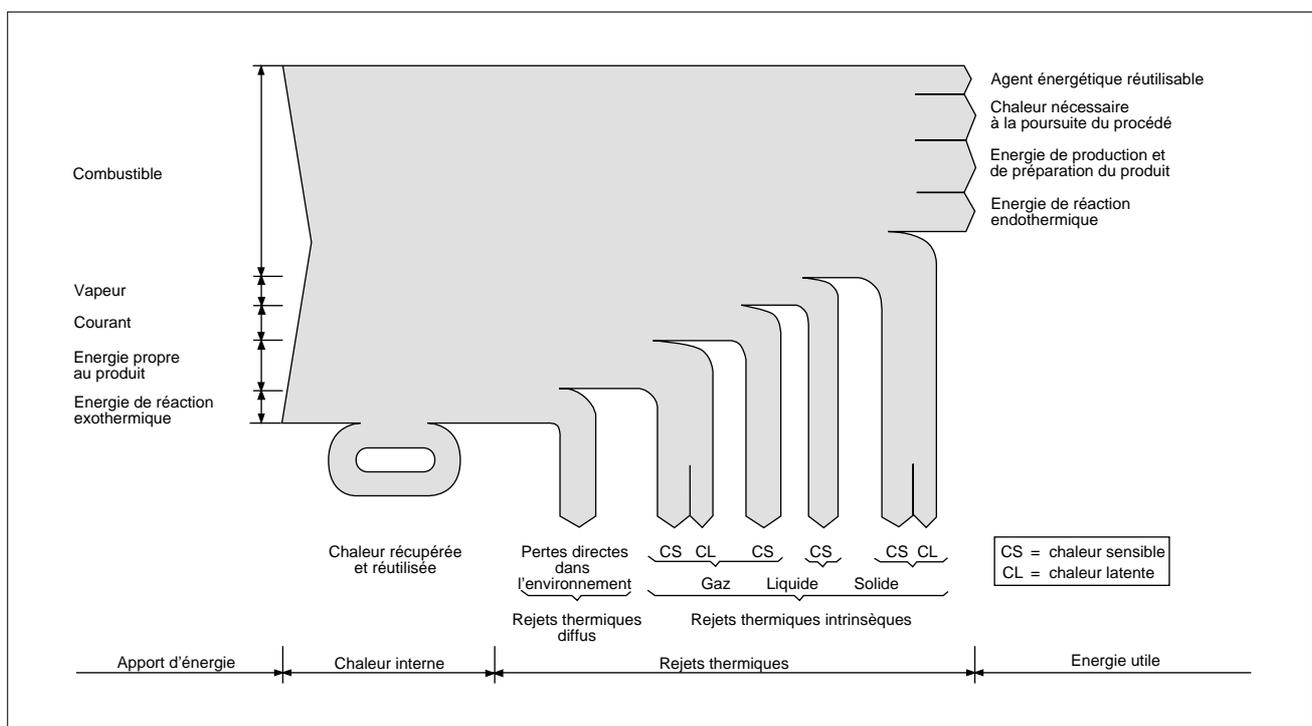


Figure 27: Présentation du principe des flux énergétiques et des rejets thermiques d'un processus dans le diagramme de Sankey

Formule du transfert de chaleur

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} \cdot \Delta\vartheta_{pe}}{\ln(\Delta\vartheta_{gr}/\Delta\vartheta_{pe})}$$

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

$$k = \text{coefficient de transmission de chaleur [W/m}^2 \text{ K]}$$

$$A = \text{surface de transmission de chaleur [m}^2 \text{]}$$

$$\Delta\vartheta_m = \text{différence logarithmique moyenne de température [K]}$$

$$\Delta\vartheta_{gr} = \text{grande différence de température [K] (cf. figure 30)}$$

$$\Delta\vartheta_{pe} = \text{petite différence de température [K] (cf. figure 30)}$$

Le coefficient de transmission de chaleur  $k$  n'est pas une dimension caractéristique de la matière, mais il découle de nombreux facteurs, comme par exemple l'état du fluide (vapeur, gaz, liquide), les propriétés du fluide (densité, pouvoir calorifique spécifique, viscosité, capacité de transmission), les caractéristiques thermodynamiques (pression, température), la vitesse du fluide ainsi que les dimensions et la géométrie de l'échangeur de chaleur.

La différence logarithmique moyenne de température (appelée aussi « longueur thermique ») représente la différence de température moyenne effective dans l'échangeur de chaleur.

Encadré 28

Type	$k$ [W/m <sup>2</sup> ]
Eau/eau Echangeur tubulaire Echangeur à double manteau	200 à 1000 350 à 1400
Vapeur/eau Echangeur tubulaire (vapeur dans le tube) Evaporateur (vapeur autour du tube)	350 à 1200 600 à 1500
Eau/gaz Echangeur tubulaire Chaudière de postchauffage (gaz dans le tube)	15 à 70 15 à 45
Gaz/gaz Echangeur tubulaire Echangeur à double manteau	6 à 35 2 à 35

Tableau 29: Valeurs indicatives pour les coefficients de transmission de chaleur.

## 3.2 Echangeurs de chaleur

### Transfert de chaleur

A la frontière entre deux systèmes ayant des températures différentes se produit un échange de chaleur sans qu'aucun travail n'intervienne. L'importance du flux est proportionnelle à la surface d'échange et à la différence de température.

On distingue les processus d'échange suivants :

- Transfert de chaleur sans changement d'état des matières impliquées (par exemple gaz/gaz, liquide/liquide, gaz/liquide).
- Transfert de chaleur avec changement d'état de l'un des deux flux au moins (par exemple évaporation, condensation).
- Transfert combiné de chaleur et de matière par convection et évaporation (par exemple refroidissement par vaporisation eau/air).

Le mode de transfert de chaleur et de matière dépend de la direction du flux (flux parallèles, flux opposés ou/et flux croisés) et du genre de surface d'échange.

Il faut différencier :

- Le transfert indirect de chaleur, qui intervient avec des systèmes à récupération dans lesquels les flux passent simultanément en étant séparé par une paroi.
- Le transfert semi-indirect de chaleur, avec des systèmes à régénération dans lesquels les flux passent alternativement et périodiquement, sans paroi de séparation.
- Le transfert direct de chaleur avec un mélange des flux dans un même local. Ici, la surface de transmission nécessaire se trouve fortement réduite, mais ce mode de transmission n'est réalisable que sous certaines conditions.

La figure 30 montre le schéma de principe d'un échangeur de chaleur et fait ressortir l'importance de la direction des flux. A des fins pratiques, l'emploi des formules de l'encadré 28 est suffisant. Il est impossible d'établir une formule générale pour le calcul du coefficient de transmission de chaleur  $k$ , au vu de toutes les interdépendances impliquées. En pratique, ce coefficient est défini pour chaque cas sur la base de valeurs d'expérience ou d'essais. Le tableau 29 donne des valeurs indicatives pour différentes applications techniques.

Est à recommander comme ouvrage de référence pour l'établissement des calculs :



*VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 6. Aufl. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 1991 (Source: Librairie)*

Lors d'échange de chaleur, on peut différencier trois principes différents de guidage des flux : flux parallèles, flux opposés et flux croisés. L'évolution des températures sur la surface d'un échangeur à flux parallèles et opposés est indiquée à la figure 30.

Avec des flux parallèles, la température de sortie du flux chaud est toujours plus élevée que la température de sortie du flux froid. Avec des flux opposés et dans des conditions favorables, il est possible d'avoir une température de sortie du flux froid plus élevée que la température de sortie du flux chaud.

L'efficacité de l'échange de chaleur et, par là, le gain de chaleur, dépend en majeure partie de la surface et de la capacité de transfert de l'appareil. Le gain de chaleur représente ainsi le rapport entre la chaleur échangée et la différence de température des flux de chaleur avant l'échange de chaleur.

A la figure 32, on remarque l'évolution d'un échange de chaleur fictif pour des flux parallèles, opposés et croisés. Concernant les flux opposés, la surface « 1 » correspond à un rendement de 50%. Si le gain de chaleur dans l'échangeur atteint 80, respectivement 90%, la surface nécessaire est augmentée d'un facteur 4, respectivement 9, et les frais d'investissement, respectivement de capitalisation, y relatifs seront plus importants. Les deux autres courbes montrent les rapports pour flux croisés et parallèles. Le transfert de chaleur est nettement réduit et, à partir du facteur de surface 3, le rendement est presque constant.

### Pertes de charge

Le fait de compenser les pertes de charge dans les échangeurs de chaleur, gaines, pièces de forme, filtres, etc. requiert un supplément d'énergie électrique. L'énergie d'appoint exigée, fournie par un ventilateur ou une pompe, est calculée selon l'encadré 31.

Lors du dimensionnement d'un transformateur respectivement d'une installation, l'optimum entre transmission de chaleur et pertes de pression sera recherché. Le rapport entre le gain d'énergie thermique et le surplus d'énergie dû aux pertes de charge doit être supérieur à 3.

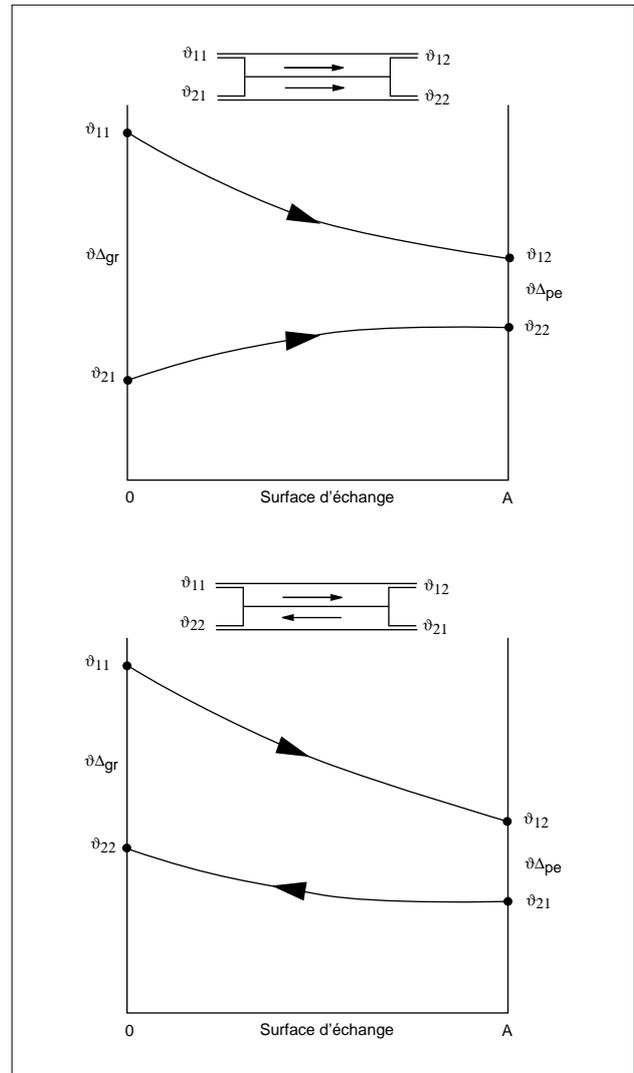


Figure 30: Courbes de température des fluides pour flux parallèles et flux contraires.

Besoin en énergie d'appoint

$$W_A = \frac{\dot{V} \cdot t_F \cdot \Delta p}{\eta}$$

$W_A$  = besoin en énergie d'appoint [J]

$\dot{V}$  = débit volumique [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$t_F$  = durée du fonctionnement [h]

$\Delta p$  = perte de pression du système (y compris filtres) [Pa]

$\eta$  = rendement du système de récupération [-]

Encadré 31

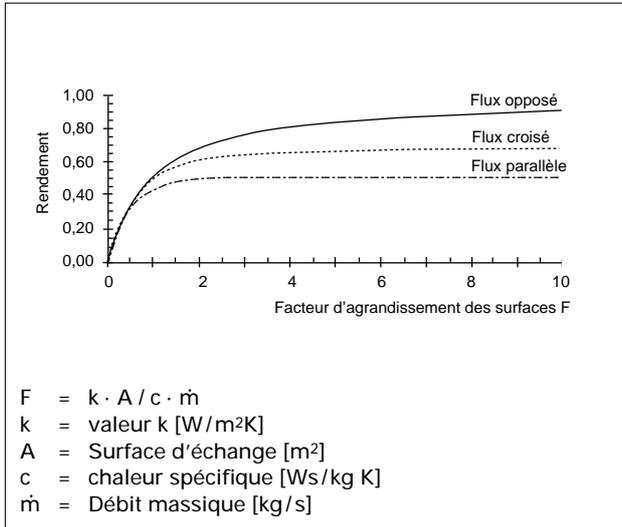


Figure 32: Rendement en fonction du facteur d'agrandissement de surface (fluide et débit massiques pareils de chaque côté, valeur k constante).

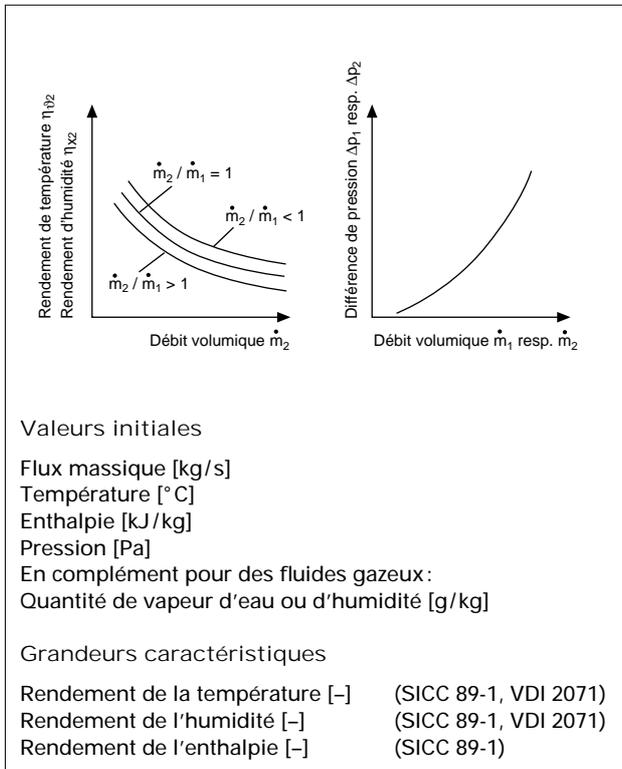


Figure 33: Valeurs initiales et grandeurs caractéristiques pour récupérateurs de chaleur.

### 3.3 Grandeurs caractéristiques

Des grandeurs caractéristiques uniformisées sont rassemblées dans des normes et des directives prévues pour les récupérateurs de chaleur dans les systèmes de ventilation (cf. figure 33). Les rendements servent de valeurs comparatives pour différentes applications et permettent le calcul de la rentabilité. C'est le facteur d'amplification électrothermique, qui permet d'évaluer la mise en valeur de l'électricité dans les installations de RC/URT.

#### Rendements lors d'échanges de chaleur

Les équations d'équilibre d'un échangeur de chaleur, selon les figures 30 et 34, permettent d'obtenir, par transformation:

$$\eta_{h2} = (\dot{Q}_{22} - \dot{Q}_{21}) / (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{21})$$

$$\eta_{h2} = \dot{m}_{22} (h_{22} - h_{21}) / \dot{m}_1 (h_{11} - h_{21})$$

$$\eta_{h1} = (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{12}) / (\dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{21})$$

$$\eta_{h1} = \dot{m}_1 (h_{11} - h_{12}) / \dot{m}_2 (h_{11} - h_{21})$$

Lorsque les flux massiques et les chaleurs spécifiques sont identiques, les trois valeurs caractéristiques suivantes sont aussi égales de chaque côté.

#### Rendement de température

$$\eta_2 = (\vartheta_{22} - \vartheta_{21}) / (\vartheta_{11} - \vartheta_{21})$$

$$\eta_1 = (\vartheta_{11} - \vartheta_{12}) / (\vartheta_{11} - \vartheta_{21})$$

#### Rendement d'humidité

$$\eta_{x2} = (x_{22} - x_{21}) / (x_{11} - x_{21})$$

$$\eta_{x1} = (x_{11} - x_{12}) / (x_{11} - x_{21})$$

#### Rendement d'enthalpie

$$\eta_{h2} = (h_{22} - h_{21}) / (h_{11} - h_{21})$$

$$\eta_{h1} = (h_{11} - h_{12}) / (h_{11} - h_{21})$$

Les rendements sont toujours calculés en référence au fluide à réchauffer. Ils dépendent du type de récupérateur de chaleur, du rapport des flux massiques et des conditions d'exploitation. Dans la technique de ventilation d'immeubles, la comparaison doit toujours porter sur  $\eta_{\vartheta 2}$ ,  $\eta_{x2}$  et  $\eta_{h2}$

### Amplification électrothermique

Pour vaincre les résistances à l'écoulement, les installations de RC/URT sont équipées de ventilateurs et de pompes entraînés électriquement. Les composants doivent être dimensionnés et actionnés de manière à ce que l'on gagne le plus de chaleur possible en engageant le moins d'électricité possible. Ce rapport, appelé rapport d'amplification électrothermique (AET) est représenté à la figure 35. Ainsi, il est tenu compte de la consommation électrique de tous les éléments impliqués dans le gain de chaleur. Ce dernier est calculé sur la base des heures de fonctionnement et des rendements, selon tableau 37.

*Une installation de ventilation pour bureau, dont la consommation de chaleur se monte annuellement à 98 980 kWh est divisée, en simplifiant, en trois états de fonctionnement :*

- Etat 1: 1150 h à 12 000 m<sup>3</sup>/h ;
- Etat 2: 1150 h à 8 000 m<sup>3</sup>/h ;
- Etat 3: 1030 h à 6 000 m<sup>3</sup>/h.

L'installation de RC est un échangeur de chaleur à fluide intermédiaire, le caloporteur étant une solution eau/glycol. Au tableau 36, un calcul de modèle montre les valeurs obtenues avec une pompe de circulation à une vitesse et une pompe fonctionnant avec variateur de vitesse électronique (variateur de fréquence). Les valeurs AET calculées sur cette base présentent des grandeurs différentes pour les deux exécutions :

$$AET_{\text{une vitesse}} = 85\,100 \text{ kWh} / 3340 \text{ kWh} = 25,5$$

$$AET_{\text{continu}} = 86\,600 \text{ kWh} / 2860 \text{ kWh} = 30,1$$

Avec un entraînement géré de manière optimale, on gagne davantage de chaleur et on consomme moins d'électricité.

## 3.4 Dimensionnement et optimisation

Prudence face aux indications de rendement de température !

Dans la pratique, on utilise fréquemment le rendement de température par mesure de simplification. En fait, il n'est valable que pour des flux identiques, des capacités de chaleur spécifiques analogues et sans changements de phase. Si les valeurs réelles diffèrent de ces indications, des erreurs surviennent. Deux exemples illustrent ces propos :

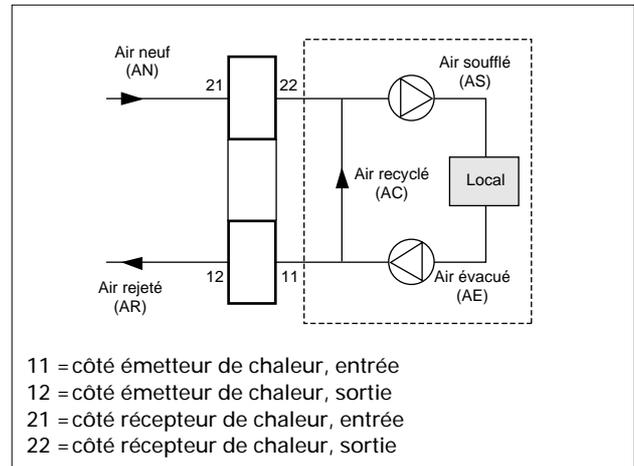


Figure 34 : Système de récupération de chaleur [source : SICC-directive 89-1].

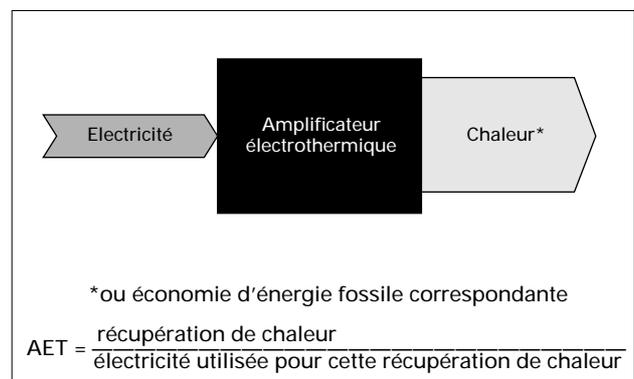


Figure 35 : Amplification électrothermique (AET).

Position	Echangeur de chaleur à fluide intermédiaire avec pompe à 1 vitesse		Echangeur de chaleur à fluide intermédiaire avec pompe en marche continue	
	RC [kWh]	EI [kWh]	RC [kWh]	EI [kWh]
1	39 480	1 930	39 480	1 840
2	28 690	870	28 740	720
3	16 930	540	17 930	300
Total	85 100	3 340	86 160	2 860

Tableau 36 : Récupération de chaleur (RC) et consommation électrique (EI) pour une pompe de circulation à 1 vitesse et une pompe de circulation en marche continue.

Ventilateurs	$\eta_v$
Ventilateur radial	
- à ailettes recourbées vers l'avant	0,65
- à ailettes recourbées vers l'arrière	0,83
Ventilateur axial à ailettes performantes	0,85
Ventilateur à vis	0,80
Ventilateur mural simple	0,60
Moteurs	$\eta_M$
0,2 kW	0,63
0,5 kW	0,70
0,8 kW	0,73
1,2 kW	0,78
5 kW	0,85
10 kW	0,88
20 kW	0,90
50 kW	0,92
100 kW	0,93
1000 kW	0,95
Rendement global $\eta = \eta_v \cdot \eta_M$	

Tableau 37: Rendements de moteurs et de ventilateurs.

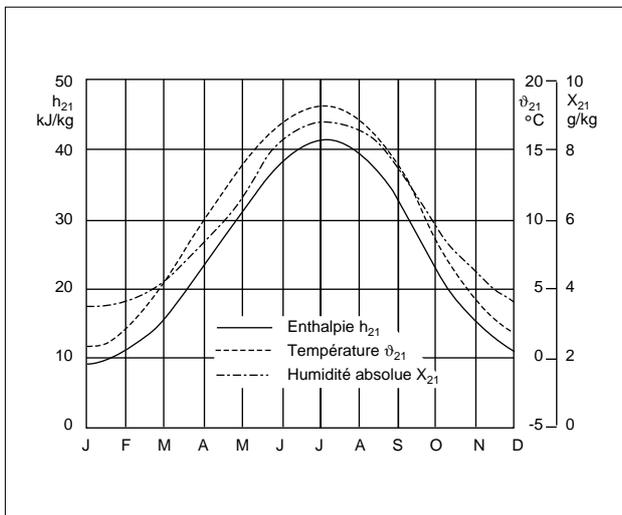


Figure 38: Valeurs moyennes pour enthalpie, température et humidité de l'air extérieur.

Grâce au système de RC, une partie des rejets thermiques provenant de l'air évacué d'une piscine couverte est transmise à l'air pulsé. Les quantités d'air pulsé et évacué sont identiques. Les indications suivantes sont données :

- Température de l'air évacué = 32°C ; humidité = 15 g/kg
- Température extérieure = -10°C ; humidité = 1 g/kg

Par la RC, l'air extérieur est chauffé à 21,5°C. Par contre, pour une enthalpie identique, l'air évacué n'est refroidi qu'à 14°C. Si l'on considère les rendements de températures, les chiffres ci-dessus font ressortir les valeurs suivantes :

$$\eta_{\theta 1} = 43 \%$$

$$\eta_{\theta 2} = 75 \%$$

Malgré des quantités d'air identiques, les rendements sont différents, car en franchissant le point de rosée, de la condensation s'est formée et a libéré de la chaleur d'évaporation. C'est pourquoi le refroidissement d'un air humide est moins important que le refroidissement d'un air complètement sec.

Pour le préchauffage de l'eau d'une tannerie, on utilise les rejets thermiques des eaux évacuées à une température de 35°C à travers un échangeur de chaleur tubulaire où 5 m<sup>3</sup>/h sont refroidis de 35 à 23°C et 3 m<sup>3</sup>/h sont chauffés de 8 à 28°C.

Les rendements des températures se montent alors à :

$$\eta_{\theta 1} = 44 \%$$

$$\eta_{\theta 2} = 74 \%$$

Le résultat ainsi obtenu est naturellement faussé, étant donné l'inégalité des flux massiques.

Suite aux débits différents, aux capacités de chaleur spécifiques inégales et aux changements de phase, il est indispensable d'utiliser la formule du rendement d'enthalpie.

### Récupération annuelle de chaleur

Pour les installations de ventilation, on ne peut pas se baser, comme pour les autres installations de techniques énergétiques, sur un état de charge constant, car cette charge évolue en fonction de la courbe sinusoidale représentant l'état de l'air extérieur pendant l'année (figure 38). Le calcul du gain annuel de chaleur récupérée peut être établi à l'aide de la moyenne des températures mensuelles à l'emplacement du système de RC, ou par l'intermédiaire des statistiques de température et d'humidité. Ces statistiques peuvent être obtenues auprès de :

 *SIA-Documentation DO12: Metedaten für die Haustechnik. Zurich: Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA), 1987. (Source: SIA, case postale, 8039 Zurich)*

*Directives SICC 83-2F: Calculation des coûts d'exploitation des installations de traitement de l'air. Berne: Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation (SICC), 1983. (Source: SICC, case postale 2327, 3001 Berne).*

Le gain annuel de chaleur servant à l'évaluation de la rentabilité des installations dépend non seulement des conditions météorologiques, mais également des caractéristiques de l'air évacué, du volume des flux avec les durées d'exploitation correspondantes, de la température maximale de l'air pulsé (et éventuellement de l'humidité) ainsi que du système de RC choisi (figure 39). La courbe sinusoidale du comportement annuel de l'air extérieur révèle que le gain momentané est soumis à de fortes fluctuations. A noter que l'état de l'air évacué est pratiquement constant tout au long de l'année.

La figure 40 sert de base à une estimation annuelle de l'énergie pour 24 heures de fonctionnement journalier. Pour convertir les rendements et les durées d'exploitation, on peut se servir des formules suivantes :

$$q_{\text{nouveau}} = f \frac{q_{\text{ancien}} \cdot \eta_{2\text{nouveau}} \cdot t_E}{\eta_{2\text{ancien}} \cdot 24 \text{ h}}$$

$$q_{\text{nouveau/ancien}} = \text{quantités de chaleur spécifique} \quad [\text{kWh/a pour } 1000\text{m}^3/\text{h d'air}]$$

$$f = \text{facteur de correction } 0,87 \text{ à } 1,04 \text{ [-]}$$

$$\eta_{2\text{nouveau/ancien}} = \text{rendement [-]}$$

$$t_E = \text{nouvelles durées quotidiennes d'exploitation [h]}$$

Le facteur de correction « f » tient compte de la situation et du nombre d'heures d'exploitation. Il peut se situer entre 0,87 (heures d'exploitation: de 7 h à 17 h) et 1,04 (heures d'exploitation: de 18 h à 24 h).

Pour les installations indépendantes des températures extérieures et lorsque les conditions d'exploitation sont constantes, le calcul du gain annuel de chaleur nécessite peu de données sur les conditions d'exploitation de la source de chaleur.

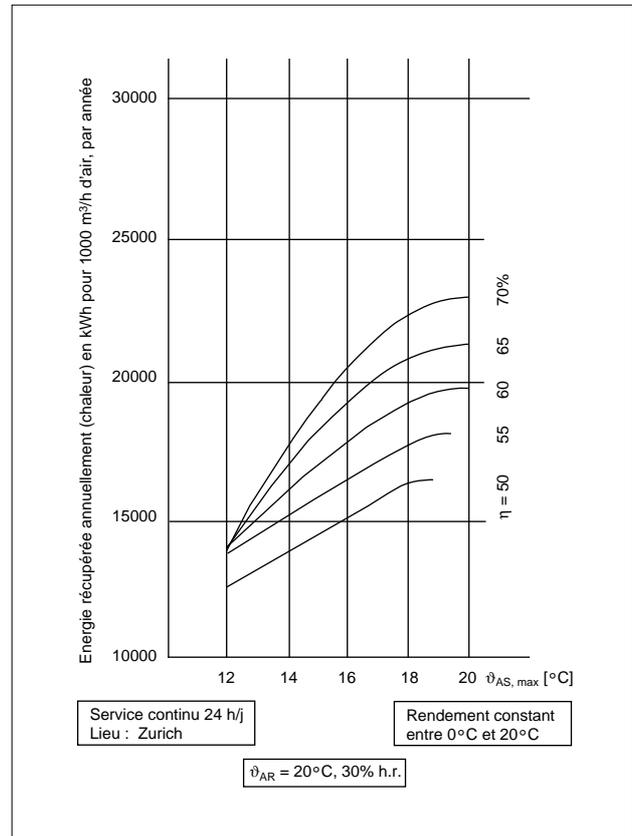


Figure 39: Récupération de chaleur pour différents rendements en régime sec ( $\vartheta_{11} = 20^\circ\text{C}$ ; 30 h.r.;  $x_{11} = 4,5 \text{ g/kg}$ ) [source: SICC-directive 89-1].

	Cas A	Cas B
Température air évacué	20°C	24°C
Température air soufflé	20°C	24°C
Rendement	60%	60%
Fonctionnement	7 – 19 h	7 – 19 h
Récupérateur I	9,2 MWh/a	12,3 MWh/a
Récupérateur II	9,2 MWh/a	12,3 MWh/a
Récupérateur III	9,4 MWh/a	12,5 MWh/a

Tableau 40: Récupération de chaleur pour 12 h de fonctionnement sans transfert d'humidité pour 1000 m<sup>3</sup>/h.

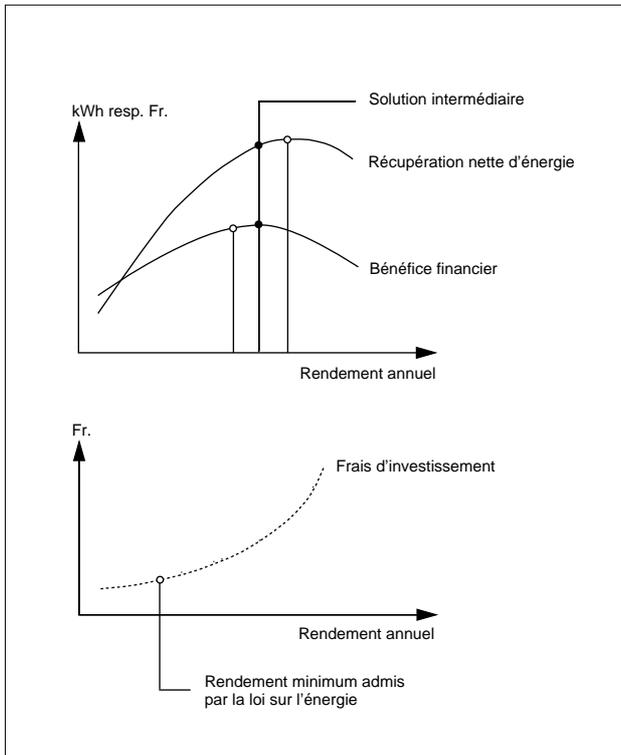


Figure 41: Représentation qualitative des critères d'optimisation [source: SICC-directive 89-1].

#### Récupération nette d'énergie

Elle se calcule sur la base de l'énergie totale récupérée (chaleur)  $ERC_{TOT}$ , de laquelle on déduit la consommation électrique de l'énergie d'appoint (ventilateurs, pompes, entraînements)  $W_A$  et le besoin énergétique pour les fuites d'air  $W_{FA}$ . Si la période d'observation dure une année, on obtiendra des valeurs annuelles.

$$ERC_N = ERC_{TOT} - W_A - W_{FA}$$

#### Rendement moyen selon SICC 89-1

Le rapport entre l'énergie annuelle nette récupérée  $ERC_N$  et le besoin global annuel en énergie  $Q_{TOT}$ , donne le rendement  $\eta$  de l'installation

$$\eta = ERC_N / Q_{TOT}$$

Encadré 42

#### Optimalisation

Un système RC/URT peut être optimisé au moyen des critères suivants (figure 41):

- énergie maximale nette récupérée;
- gain financier maximum (le plus grand rendement du capital).

Le gain maximal net d'énergie récupérée, comparé au gain financier maximal, est obtenu par un rendement annuel élevé. Les investissements augmentent proportionnellement au gain, respectivement au rendement. La durée de vie d'une installation de RC est évaluée normalement entre 10 et 20 ans.

#### Récupération maximale nette d'énergie

Lors de l'établissement des calculs d'optimisation, respectivement du choix des installations de RC/URT, l'énergie récupérée maximale nette devrait être déterminante. Dans cette opération, le coût supplémentaire de l'énergie d'appoint et de l'énergie additionnelle doit être soustrait de l'énergie récupérée (cf. aussi encadré 42).

#### Gain financier maximal

Dans ce calcul, les frais d'exploitation et les frais d'investissement doivent être optimisés.

Des vitesses d'air élevées dans l'échangeur autorisent certes des appareils, respectivement des investissements plus petits, mais requièrent très souvent une consommation d'énergie d'appoint considérablement plus grande. De ce fait, le profit net et la rentabilité diminuent, spécialement lors d'augmentations du prix de l'énergie.

Si la durée d'exploitation d'une installation est courte (par exemple provisoire), la durée de vie doit être prise en compte dans les calculs d'optimisation. Dans ce cas, le rendement minimal exigé par la loi sur l'énergie est souvent suffisant.



A notre connaissance, aucun logiciel d'optimisation de systèmes RC/URT n'est disponible sur le marché. Par contre, certaines entreprises proposent leurs services pour le calcul du besoin énergétique annuel, du gain énergétique net récupéré par année et du rendement (par exemple Konvekta AG, St Gall).

### 3.5 Rentabilité

Les systèmes de RC/URT apportent de substantielles économies d'énergie mais provoquent des frais d'investissement et des dépenses supplémentaires. Seul un calcul de rentabilité permet de déterminer la solution optimale.

La rentabilité sera déterminée en fonction des frais annuels. Ils sont constitués des frais de capitalisation (provenant des investissements et des taux d'intérêts), des frais d'exploitation (surveillance, entretien) et du coût de l'énergie (proportionnel à la consommation d'énergie et soumis au prix spécifique de l'énergie). En cas de variantes multiples, on choisira celle qui provoque le moins de frais annuels.

Au tableau 44, on trouve un résumé des frais d'investissements relatifs concernant différents composants de RC/URT des installations de ventilation. Les frais d'exploitation, par rapport aux frais d'installation, sont présentés au tableau 45.

 Exemples dans l'appendice B.

Il faut tenir compte principalement du coût des énergies économisé et supplémentaire.

Les frais issus des investissements supplémentaires sont les suivants :

- appareils (échangeur de chaleur, filtre, régulation, gaines et conduites) ;
- raccordements électriques et sanitaires ;
- volume occupé plus important ;
- dispositions architecturales complémentaires ;
- honoraires.

En regard, on place les économies de frais, par exemple :

- production d'énergie (chaleur et froid) ;
- distribution de l'énergie (gaines, conduites plus petites) ;
- abandon du préchauffage (y compris raccordements et régulation).

L'influence des critères énumérés plus bas sur la rentabilité à long terme d'une installation de RC/URT doit être appréciée après une analyse sérieuse :

- prix de l'énergie ;
- évolution du prix de l'énergie ;
- échelonnement des amortissements ;
- frais d'investissements (surtout des investissements supplémentaires) ;
- frais d'exploitation (énergie et entretien).

Système RC	Energie électrique	
	Pompe, moteur	Ventilateur
Systèmes à air :		
Récupérateur	—	3 à 6 %
A fluide intermédiaire	1 à 3 %	3 à 7 %
Caloduc	—	3 à 5 %
Régénérateur	0,2 à 2 %	2 à 4 %
Systèmes à eau :		
Récupérateur	< 1 %	—
A fluide intermédiaire	< 1 %	—

Tableau 43 : Energie électrique en % de la récupération de chaleur de différents systèmes RC/URT.

Echangeur de chaleur	Coûts pour petits volumes d'air	Coût pour gros volumes d'air
Echangeur à plaques	Plutôt bas	—
Echangeur rotatif	Moyen	Moyen
A fluide intermédiaire	Plutôt élevé	Plutôt bas

Tableau 44 : Classement des coûts relatifs pour différents systèmes d'échangeurs de chaleur (selon l'importance du volume, le classement varie).

Type	Utilisation [années]	Entretien [%]	Service [%]
Echangeur thermique à plaques			
- Aluminium	10	1	2
- Matière anti-corrosive	20	1	2
A fluide intermédiaire	20	2	2
Echangeur de chaleur rotatif à surface d'absorption	12	4	3
Echangeur de chaleur rotatif à surface traitée	20	3	3
Pompe à chaleur	10	4	3

Tableau 45 : Durée d'utilisation et charges d'exploitation de systèmes de RC.

▼ *Connaître le gain énergétique net représente le critère de base de chaque optimisation des systèmes de RC/URT. Pour les installations de ventilation, les directives de la SICC recommandent une vitesse des flux inférieur à 2 m/s sur la surface active d'échange. Des considérations énergétiques recommandent de ne pas dépasser les vitesses de 2,5 m/s (pour récupérateurs et circuits fermés) et de 3 m/s (pour les échangeurs rotatifs).*

Lors de l'établissement d'un calcul de rentabilité classique, les conséquences sur l'environnement ne sont pas prises en compte. Ces dernières peuvent se traduire, en ce qui concerne les différents agents et systèmes énergétiques, par des augmentations de prix spécifiques et peuvent être incorporées sous cette forme dans le calcul de rentabilité. Des exemples de majoration des prix de l'énergie et d'autres indications concernant le calcul de rentabilité se trouvent dans :

 *RAVEL, une économie d'argent. Guide pratique pour les calculs de rentabilité. Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1991. (Source: Office central fédéral des imprimés et du matériel, 3000 Berne)*

## 4. Planification

### 4.1 Aide-mémoire RAVEL

Commencer par réduire la consommation d'énergie !

Chaque exploitation industrielle ou artisanale se voit confrontée tôt ou tard à une analyse de sa consommation d'énergie. C'est le moment propice pour envisager une politique de RC ou d'URT (encadré 46). Avant de prendre des mesures au niveau de la construction et des installations, il faudrait avoir épuisé toutes les possibilités en vue de réduire les besoins énergétiques.

Utilisation de l'aide-mémoire RAVEL

Afin de réaliser une procédure systématique, RAVEL a développé un aide-mémoire<sup>2)</sup> des producteurs (sources) et des consommateurs (utilisateurs) permettant de trouver les meilleures connexions possibles entre ces deux parties, selon des critères thermodynamiques et techniques.

 *Formulaires et explications dans l'appendice D.*

La situation de départ des utilisations de RC/URT peut être répartie selon l'encadré 47. La prise en compte des sources et des utilisateurs dans de nouvelles installations est toute théorique, tandis que pour des installations existantes, on dresse sur place un inventaire des sources et des utilisateurs. La liste des utilisations est formulée comme suit :

- utilisateurs internes au processus (RC) ;
- utilisateurs internes à l'exploitation (URT interne) ;
- utilisateurs externes (URT externe).

Des exemples de classification systématique sont citées à la figure 48 et dans les tableaux 49 et 50.

Dans des cas évidents (1 à 2 paramètres « source-utilisateur »), avec un peu d'expérience et en s'appuyant sur les dimensions des raccordements, les possibilités sont rapidement établies. Là où plusieurs possibilités restent ouvertes, on choisira la meilleure liaison entre source et utilisateur à l'aide de plusieurs équations comparatives (matrice de mise en réseau).

En conclusion, il faut naturellement se poser la question suivante : n'existe-t-il pas d'autres combinaisons pour parvenir à un système global encore plus performant ?

<sup>2)</sup> Brunner Robert : WRG/AWN-Chekliste. Materialien zu RAVEL. Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, N° de commande 724.397.31.52 d, 1992 (n'existe qu'en langue allemande).

#### Instructions générales pour la planification

La réduction du besoin énergétique diminue les atteintes à l'environnement. Contrairement à d'autres mesures de protection de l'environnement, une économie d'énergie finale entraîne aussi une économie financière.

Dans de nombreux cas, des avantages indéniables résultent de l'association directe entre les mesures de protection de l'environnement et les techniques d'utilisations de la chaleur (par exemple par la récupération des fluides frigorigènes diminue les rejets de vapeur de fluide dans l'atmosphère et permet une récupération de la chaleur de condensation des fluides).

Des systèmes modernes de gestion de chaleur permettent d'optimiser des procédés énergétiques au moyen de couplages rationnels.

En plus des périodes d'amortissement, d'autres effets sont à relever. Une utilisation plus judicieuse de l'énergie peut se traduire par exemple par la mise au repos d'une chaudière ou son remplacement par un modèle plus petit (exemple : lors de la substitution d'une grande chaudière par un petit incinérateur de déchets, non seulement on réduit les pertes dues aux mises en marche, mais on évite les frais d'élimination des ordures).

La diminution des besoins énergétiques entraîne en général une baisse de puissance des installations de refroidissement. En optant pour des systèmes de refroidissement fonctionnant sans eau, on comprime les frais de refroidissement et les frais d'évacuation des eaux usées.

Il existe actuellement un large choix de systèmes d'échangeur de chaleur, de composants et d'installations de récupération de chaleur. Les systèmes existants permettent de satisfaire aux plus hautes exigences en matière de sécurité (installations, produits, environnement).

Encadré 46

#### Situation de départ pour des concepts de RC/URT

Nouvelles installations : conditions optimales, indépendantes de l'existant. Une connexion libre des sources de chaleur et des récepteurs est possible.

Raccordement d'une nouvelle installation à une installation existante : cette dernière pose les conditions-limites au point de jonction. De toute façon, les besoins de rénovation de l'installation existante doivent faire l'objet d'une analyse minutieuse.

Assainissement : c'est l'installation existante qui pose les conditions-limites. C'est pourquoi la situation de départ doit être définie par des mesures individuelles ciblées et faire l'objet d'une analyse fouillée.

Encadré 47

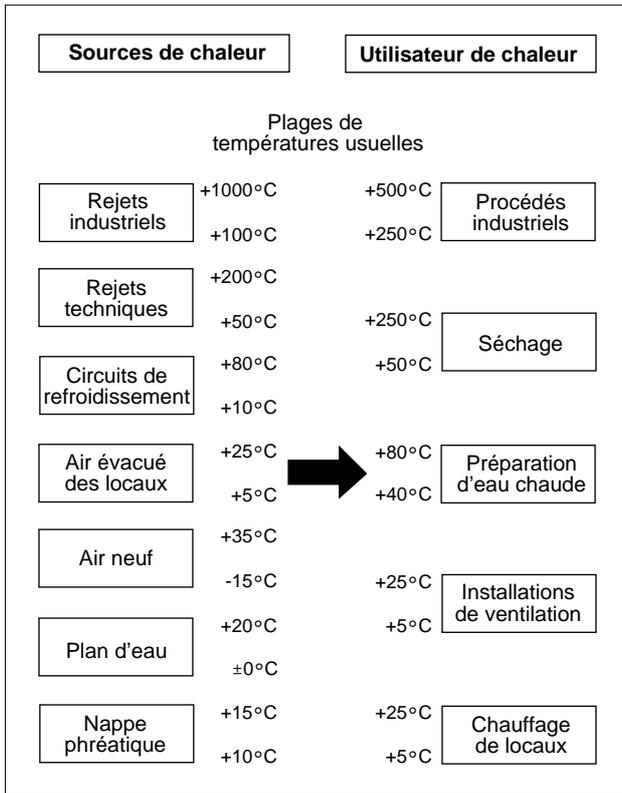


Figure 48: Plages de températures usuelles des sources et des utilisateurs de chaleur.

Si le nombre de paires « source-utilisateur » devient très important, la mise en valeur manuelle se révèle très difficile. Reste alors l'éventualité de se concentrer sur le flux d'énergie le plus important et de développer un concept sommaire de l'installation. Certaines exploitations plus complexes ne peuvent être optimisées qu'au moyen d'un système informatique.

 Méthode du pincement à l'appendice C.

La solution étudiée est présentée de façon sommaire dans un schéma de flux énergétiques. Après avoir élaboré un concept technique, il faut encore s'attacher à étudier les aspects économiques.

#### Paramètres « source-utilisateur »

Ces paramètres décrivent les aspects relatifs à l'énergie et aux propriétés physico-chimiques des fluides (encadré 51). Les moyens de transmission des rejets thermiques par fluide caloporteur, ainsi que les valeurs thermodynamiques et les propriétés de la matière, sont autant de critères d'appréciation pour évaluer le coût de la transmission et le degré de valorisation des rejets thermiques. La composition des fluides donne une indication sur les risques de corrosion et l'apparition éventuelle de condensation dans les appareils de RC/URT.

Branche	Niveau de température des rejets thermiques
Habitat (secteur confort)	en dessous de 50° C
Production d'énergie (usines électriques)	en dessous de 50° C
Métallurgie et industrie des machines	plus de 300° C
Production de matériel de construction	plus de 300° C
Industrie textile	50 à 300° C
Industrie du papier et du carton	50 à 300° C
Industrie chimique	de 50 à 300° C et plus
Industrie des denrées alimentaires	en dessous de 50° C 50 à 300° C

Tableau 49: Niveaux de températures typiques des rejets thermiques dans différents secteurs industriels.

#### Paramètres de connexion en réseau

Les paramètres de connexion en réseau permettent un choix sommaire des paires source-utilisateur optimales: Différence de température: les rejets thermiques devraient être reliés au côté « utilisateur » de telle façon qu'une véritable transformation exergetique puisse avoir lieu. Un flux de rejets thermiques peut alimenter successivement plusieurs utilisateurs dont la température est décroissante (encadré 52).

Rapport entre offre d'énergie et besoin d'énergie: plus l'offre d'énergie d'une source est élevée, plus l'utilisation s'avère payante. L'offre utilisable dépend des exigences de la demande (encadré 53).

Pointes de puissance de l'offre et de la demande: si les consommateurs demandent approximativement la même puissance, une adaptation synchronisée ne pose pas de problème. Indépendamment de ce facteur, la puissance doit être interprétée comme une énergie moyenne durant un laps de temps donné. Les accumulateurs repré-

sentent un moyen approprié pour absorber des pointes de puissance (encadré 55).

La puissance fournie par la source et la puissance demandée par l'utilisateur fluctuent dans le temps généralement indépendamment l'une de l'autre. L'utilisation sera d'autant plus rentable si l'on parvient à une synchronisation de l'offre et la demande, comme c'est le cas dans la récupération de chaleur. Dans la plupart des cas, ce principe l'emporte d'ailleurs sur les autres solutions. Distance entre source et utilisateur : le principe de l'utilisation de rejets thermiques repose sur le transport d'un fluide caloporteur. Il s'agit là d'un moyen de transmission énergétique très coûteux, par rapport à celui des combustibles et du courant. On veillera à ne pas dépasser certaines distances maximales afin d'assurer la rentabilité du système (encadré 54).

Vecteur énergétique		Température [°C]	Pression [bar]
Vapeur	Vapeur surchauffée	400	10
	Vapeur saturée	105	1,2
	Vapeur	100	1,01
Eau surchauffée	Eau surchauffée	180/140	25
	Eau de chauffage	90/70	2,5
Eau sanitaire	Eau chaude sanitaire	70/50	1,5
Eau de refroidissement	Eau potable sanitaire	40	4
	Eau de circuit intermédiaire	26/32	6
		80/60	6
Huile thermique	Chauffage d'appoint	250/200	3

Tableau 50: Exemple de répartition du besoin de chaleur selon le vecteur énergétique, la température et la pression.

#### Paramètres des sources et des utilisateurs de chaleur

##### Energie et puissance

La puissance d'une source de chaleur dépend, lors d'une transformation énergétique, de la consommation du combustible et du pourcentage de perte. Pour la source de chaleur, la valeur moyenne de la puissance sera définie en fonction de l'énergie délivrée dans un intervalle de temps caractéristique. L'évolution de la puissance dans le temps est indispensable à une optimisation d'installation. Pour les utilisateurs de chaleur, il faudra définir les valeurs de besoin correspondantes.

##### Températures

La température à la sortie de la source de chaleur devrait atteindre un niveau minimum d'utilisation. Elle ne doit pas être supérieure à la température d'utilisation mais quelques degrés au-dessus de la température minimum d'alimentation de l'utilisateur. Le tableau 49 présente quelques niveaux de température typiques des rejets thermiques. Pour des renseignements plus précis et dans des cas-limites, un relevé de l'évolution des températures dans le temps doit être établi. Dans des systèmes convectifs et du côté des utilisateurs de chaleur, il faut relever les températures de l'aller et au retour.

##### Heures de fonctionnement

Des heures de fonctionnement annuel les plus élevées possible et des cycles de marche suffisamment longs devraient être fixés. L'idéal est un fonctionnement continu.

##### Transport de la chaleur

Un système à convection pour le transport de la chaleur est la solution la plus appropriée. Dans le cas d'une émission de chaleur diffuse, un processus de collecte et de concentration est nécessaire. Du point de vue technique l'eau et l'air sont des caloporteurs adéquats.

##### Propriétés physiques et composition chimique du fluide caloporteur

Si les propriétés physiques du fluide caloporteur diffèrent fortement de l'eau respectivement de l'air, il n'est en principe pas possible d'utiliser des éléments standards. Il est important de connaître la composition chimique exacte du caloporteur, vu les risques de corrosion et d'encrassement des gaines, conduites et échangeurs de chaleur. Les solutions homogènes, dispersées ou en fumée ne posent pas de problème. Les substances chimiquement inertes sont idéales. Des mesures de précaution sont à prendre pour les matières corrosives, inflammables ou explosives. Les matières toxiques ou contaminées par des agents pathogènes ne doivent sous aucun prétexte entrer en contact avec des êtres vivants ni être rejetées dans l'environnement. Dans des installations de procédés techniques, l'air évacué se trouve souvent chargé de particules qui contribuent à l'encrassement des échangeurs de chaleur. Les dépenses d'entretien sont à évaluer. La corrosion et l'encrassement par des matières polluantes peuvent conduire à la mise hors service prématurée d'une installation de RC/URT.

Encadré 51

Paramètres de raccordement :  
différence de température

Plus la différence de température est grande, plus l'utilisation d'un échangeur de chaleur s'avère payante. Plus la différence de température diminue, plus les exigences de l'échangeur de chaleur s'élèvent.

Si la température de la source de chaleur est plus basse que la température exigée par l'utilisateur de chaleur, on utilisera cette chaleur au moyen d'une pompe à chaleur. En présence de grandes quantités d'énergie et de petites différences de températures utiles à la pompe de chaleur, il existe des solutions avec pompe à chaleur réellement économiques.

Encadré 52

Paramètres de raccordement :  
corrélation entre offre et besoin d'énergie

Une valeur >1 désigne un surplus d'émission; pour écouler ce surplus, il faut prévoir un deuxième utilisateur ou une décharge artificielle. Pour permettre une utilisation judicieuse, le rapport de la puissance moyenne sur un intervalle horaire typique doit également être >1. Si ce rapport est <1, une couverture partielle doit être recherchée. La couverture partielle s'avère intéressante en présence de grandes quantités d'énergie.

La gestion des charges et de l'énergie peuvent imposer de sérieuses exigences aux techniques de mesures et de régulation. Le surplus de chaleur doit être évacué (par exemple tour de refroidissement). Les différences entre offre et demande de chaleur doivent être connues et compensées par des systèmes d'accumulation.

Encadré 53

Paramètres de raccordement :  
distance entre source et utilisateur

La distance entre des paires «source-utilisateur» doit être minimale. Des réseaux de conduites et de gaines étendus représentent une solution onéreuse, occasionnent des pertes de chaleur et des frais d'entretien supplémentaires. Si le transfert doit s'effectuer sur plusieurs centaines de mètres, mieux vaut alors transporter la chaleur dans des tubes. L'isolation des tubes (comparée aux gaines) est meilleur marché, l'entretien est plus facile et les frais de montage réduits. L'extension maximale d'un réseau dépend pratiquement des économies réalisables et doit être déterminé individuellement pour chaque système de RC/URT.

Encadré 54

#### Autres aspects de connexion en réseau

Compatibilité de durée de vie des composants de l'installation : les installations de distribution de chaleur et les installations d'utilisation de chaleur devraient avoir une durée de vie équivalente. La distribution, surtout à des tiers, exige une disponibilité à long terme des rejets thermiques.

Séparation de substances : dans les installations de procédés techniques, l'air évacué joue le rôle du fluide transporteur de chaleur et de matière (humidité lors du séchage, substances polluantes et poussières dans les procédés de décontamination). Lors de l'échange de chaleur, il faudrait éviter le retour des matières dans l'air pulsé. A cet égard, l'échangeur de chaleur rotatif peut poser un problème : pour l'échangeur de chaleur à surfaces de séparation, l'étanchéité doit être garantie pour les pressions de service. En principe, on devrait disposer d'une pression d'air frais supérieure à la pression de l'air évacué. Les mêmes réflexions sont valables en vue de stopper la propagation d'agents pathogènes depuis l'air évacué jusqu'à l'air pulsé. Si des agents polluants ou nocifs sont détectés, il vaut alors mieux fermer le circuit.

#### Critères de rentabilité

Comme base de décision pour les investissements, il faut analyser le potentiel des rejets thermiques techniquement utilisables par rapport à ceux économiquement défendables. Pour cela, on appliquera différents processus, selon l'importance du projet.

Sur le plan pratique, l'échelle des valeurs thermodynamiques se situe plutôt à l'arrière-plan. La mise en rapport des économies et des coûts permet d'évaluer la valeur d'un système :

$$\text{Valeur des rejets thermique} = \frac{\text{Economie d'énergie}}{\text{Capital investi}} \text{ [kWh/Fr]}$$

La valeur des rejets thermiques est représentée par la différence entre le coût nécessaire à l'utilisation des rejets thermiques et le profit résultant de leur utilisation. Vu de cette façon, la valorisation des rejets thermiques n'est possible que si les conditions d'exploitation de ces rejets sont prises en considération :

- Si une part importante du besoin énergétique pour le chauffage de locaux peut être remplacée à peu de frais par des rejets thermiques à basse température, ces rejets ont une valeur substantielle, malgré leur faible exergie.
- Dans le cas de l'utilisation de rejets thermiques à haute température, si l'alternative « production d'électricité »

est plus défavorable que l'alternative « couverture des besoins de chaleur », alors il est raisonnable et judicieux d'utiliser aussi ces rejets à haute température pour couvrir les besoins d'un utilisateur à basse température.

### Coûts externes

Les effets externes n'ont malheureusement que peu ou pas d'incidence sur les décisions en matière d'économie d'entreprise. Il faut en revanche tenir compte des aspects relevant de l'économie politique (consommation d'énergie primaire, sécurité d'approvisionnement, disponibilité), de la protection de l'environnement (réduction des émissions de substances nocives, lutte contre le gaspillage des ressources) ou encore de l'emploi (influence sur le marché du travail).

## 4.2 Méthodes de mesure

Des preuves sérieuses du succès ne peuvent être obtenues qu'en travaillant avec des valeurs mesurées. Pour cela, il faut qu'un concept de mesure soit élaboré. De plus, afin de prouver l'efficacité de l'assainissement, il faut disposer de valeurs mesurées sur l'installation avant son assainissement.

Les bases de mesures pour les installations de RC/URT sont les suivantes :

- description de la situation actuelle (aide-mémoire) ;
- description de l'efficacité des dispositions (contrôle des résultats) ;
- analyse de chaque aspect ;
- régulation de l'installation ;
- exploitation optimale, surveillance permanente à l'aide du système central de gestion technique du bâtiment ;

En rapport avec les économies d'énergie, les valeurs d'exploitation technique et énergétique suivantes devront être mesurées :

- énergies (chaleur, électricité, consommation de combustible) ;
- puissances (chaleur, électricité, substitution de combustible) ;
- températures ;
- débits (liquide, gaz) ;
- humidités relatives ;
- pressions ;
- durées d'enclenchement, heures d'exploitation, signaux d'état ;
- nombre de commutations.

Paramètres de raccordement :

pointes de puissance de l'offre et de la demande

Les accumulateurs servent à couvrir les variations momentanées de l'offre et de la demande de chaleur. Ils exigent toutefois des investissements supplémentaires, des dépenses plus élevées pour la commande et la régulation et provoquent des pertes supplémentaires. La capacité de l'accumulateur est fonction de l'énergie à accumuler. Elle dépend donc essentiellement de la non-simultanéité entre l'offre et la demande. Seuls des accumulateurs volumineux peuvent limiter les pertes durant une période d'accumulation prolongée. Plus l'intervalle de temps est grand, plus le volume doit être important. Une accumulation de courte durée (heures, jours) peut être maîtrisée par une technologie conventionnelle. Par contre, une accumulation de longue durée (semaines, mois), s'avère onéreuse et ne se justifie que dans des cas exceptionnels. En lieu et place d'une accumulation de longue durée, il sera recherché une utilisation rationnelle de l'installation sur la base d'une stratégie d'exploitation appropriée (par exemple fonctionnement optimal durant les périodes de transition, raccordements d'autres utilisateurs de chaleur).

L'accumulateur permet aussi une adaptation des puissances. Une puissance brève et élevée de la source peut être transformée en une fourniture de chaleur constante de plus faible intensité. L'accumulateur doit être dimensionné de manière à satisfaire chacune des fonctions qui lui sont assignées. Pour des questions de rentabilité, on optera de préférence pour des installations sans accumulateur. Cependant, une utilisation de chaleur sans accumulation n'est pas toujours possible.

La situation des maxima d'offre et de demande ne sert que d'indicateur sommaire. Ainsi, par exemple, une surémission de longue durée peut désamorcer le problème de l'accumulateur. Pour des analyses plus détaillées, l'évolution dans le temps de l'offre et de la demande sont à prendre en compte.

*Encadré 55*

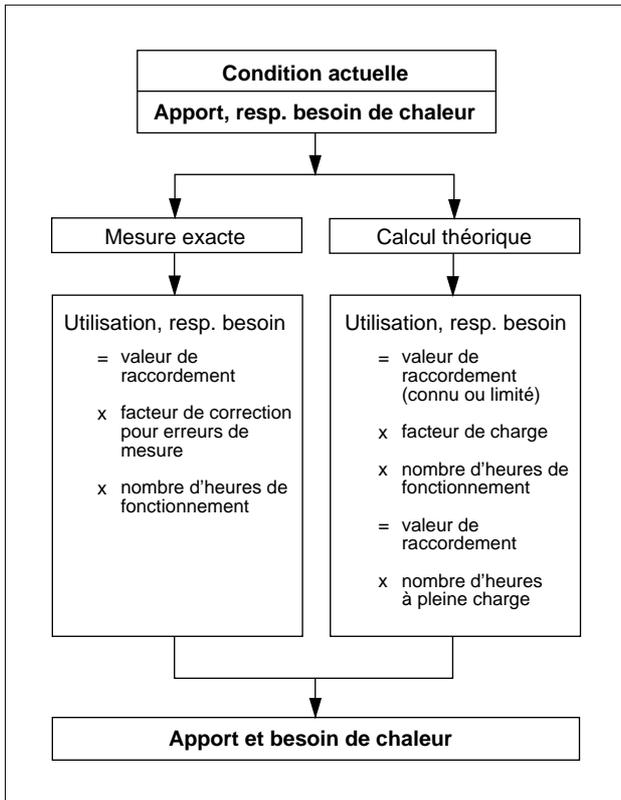


Figure 56 : Définition du besoin et de la consommation d'énergie (source: WRG und AWN durch Elektrowärmepumpen in Gewerbe und Industrie, Band VIII, Essen, Vulkanverlag).

Calcul de la consommation d'énergie

$$W = P \cdot f_c \cdot t_f$$

$W$  = consommation énergétique [kWh]  
 $P$  = puissance de raccordement [kW]  
 $f_c$  = facteur de décharge [-]  
 $t_f$  = durée de fonctionnement [h]

La durée de fonctionnement peut être déterminée avec une relative précision. Par contre, le facteur de décharge suscite souvent une plus grande insécurité.

Encadré 57

Pour effectuer des mesures isolées, on utilise souvent des systèmes amovibles; avec une gestion technique centralisée, les points de mesure sont fixés à demeure. Un système éprouvé pour des mesures occasionnelles consiste à prévoir des points de mesures sur lesquels les sondes peuvent être rapidement adaptées.

Etant donné le coût élevé des procédés de mesure d'énergie, seules peu de valeurs sont mesurées en permanence (par exemple flux de chaleur dans la station principale, électricité fournie à l'alimentation générale). Aussi trivial que cela paraisse, on ignore souvent que les flux énergétiques ne peuvent être enregistrés qu'au moyen de mesures. Fréquemment, on se contente de caractéristiques spécifiques, de données nominales ou d'autres valeurs basées sur des rendements « habituels », pour élaborer et proposer des concepts d'utilisation des rejets thermiques. Pourtant, c'est bien de ces données que dépend le succès d'un concept. Si l'on ne peut établir de mesures exactes, au moins faut-il pouvoir constituer une base de données minimale solide (cf. figure 56 et encadré 57).

Les mesures exactes concernent les mesures énergétiques des flux d'énergie qui nous intéressent. Les moyens essentiels à mettre en œuvre pour l'établissement de ces mesures sont :

- compteur d'énergie électrique;
- compteur de chaleur (différence de température, débit);
- consommation de combustible (compteur à gaz, compteur à mazout, balance);
- compteur d'heures d'exploitation.

Au moyen du bilan énergétique, on peut calculer d'autres flux énergétiques. Des mesures qualifiées de « globales » devraient également intégrer les mesures aux conditions-limites. L'introduction ultérieure de moyens sophistiqués, pour obtenir des mesures exactes, est normalement très coûteuse. En limitant les mesures à l'essentiel, on limite également les frais. En estimant les valeurs de raccordement et en supposant des flux constants et des différences de température invariables, on détermine les énergies par l'entremise du compteur d'heures d'exploitation :

- compteur d'heures d'exploitation;
- estimation des valeurs de raccordement (plaquettes signalétiques);
- estimation des différences de températures (thermomètres mobiles);
- estimation des flux (mesures par ultrasons);
- estimation de la consommation de combustible (évolution du stock de combustible).

Les estimations devraient être vérifiées de préférence à l'aide de mesures ponctuelles (mentionnées ci-dessus et entre parenthèses). Dans de nombreux cas, les précisions ainsi obtenues sont suffisantes pour une première évaluation du concept.

### 4.3 Recherche de solutions

Après de multiples comparaisons de chaque source et de chaque utilisateur selon la méthode exposée ci-dessus, une certaine configuration peut être dégagée. Avant de se lancer plus avant dans l'analyse d'une des solutions, il est conseillé de représenter les flux énergétiques de la variante envisagée par un diagramme. Lors de l'élaboration d'un réseau de transferts thermiques, les flux énergétiques sont à considérer avant les problèmes techniques liés aux appareils.

La représentation des flux énergétiques soulèvera beaucoup de questions qui sont autant d'éléments qui amènent à la solution. Il est donc vivement conseillé d'établir une supervision du concept sous forme de flux énergétiques, afin d'éviter de grossières erreurs de principe.

La RC/URT permet la substitution de combustible et, plus rarement, d'électricité. Les répercussions que cela implique peuvent influencer de façon déterminante la rentabilité des systèmes RC/URT. Toutefois il ne suffit pas de considérer uniquement la RC/URT, mais bien plus la globalité du concept « économie d'énergie ». Des optimisations partielles trop peu approfondies peuvent avoir des conséquences négatives sur l'ensemble du rendement.

Les différents flux de chaleur peuvent être estimés au moyen des débits, des températures et des valeurs spécifiques des fluides d'une part et, d'autre part, avec les données d'exploitation et les rendements. Si, pour une association « source-utilisateur » donnée, les évaluations démontrent que seule une portion minime des rejets thermiques est utilisée ou que la quantité des rejets thermiques reste fortement en dessous des besoins, il faut alors rechercher une nouvelle association « source-utilisateur ». Dans le premier cas, il reste trop de rejets thermiques non utilisés si l'on ne trouve pas d'autres utilisateurs. Dans le second cas, il faut rechercher une ou plusieurs autres sources jusqu'à obtention de la quantité de chaleur voulue. C'est seulement après une étude approfondie des flux énergétiques que l'on pourra entamer l'étape « appareillage » du programme. Des solutions concernant l'appareillage

#### Aspects de planification

- Frais d'investissements
- Frais d'exploitation
- Durée d'amortissement
- Construction simplifiée
- Système modulaire (kit)
- Possibilité d'extension du système
- Disponibilité de l'installation
- Heures de fonctionnement
- Genre d'exploitation
- Sécurité d'exploitation
- Besoin en énergie primaire
- Stabilité de l'exploitation
- Capacité de réglage
- Perte de pression
- Risque de gel
- Densité
- Elimination des condensats
- Résistance à la corrosion
- Sensibilité à l'encrassement
- Procédé d'auto-nettoyage
- Simplicité du service
- Préjudice aux autres installations en cas de panne

Encadré 58

## Procédure

1. Evaluation de l'installation ou du procédé
2. Analyse sommaire
  - Saisie des données et de la situation
  - Interprétation
  - Rentabilité (estimation sommaire)
  - Concept d'utilisation et suite de la procédure
3. Analyse fine
  - Fixer les limites du système
  - Analyse détaillée des conditions
  - Bilans des énergies et puissances
  - Liste de mesures, nouvelles conditions d'exploitation
  - Calculs de rentabilité
  - Elaboration du projet
4. Exécution, respectivement assainissement
5. Optimalisation de l'exploitation
6. Contrôle de qualité

Encadré 59

pourront être trouvées dans les possibilités d'utilisation et de combinaisons suivantes :

- transfert direct de la chaleur sans caloporteur (régénérateurs ou récupérateurs) ;
- transfert direct de la chaleur avec caloporteur (régénérateur) ;
- transfert indirect de la chaleur avec caloporteur (système à circuit fermé) ;
- pompes à chaleur, transformateur de chaleur, couplage chaleur-force, installations ORC (Organic Rankine Cycle).

En principe, on peut affirmer que les installations ayant un rendement global élevé génèrent des frais d'investissements plus importants et une consommation électrique plus forte pour les pompes et les ventilateurs.

D'autres aspects importants pour la planification ne figurant pas dans l'aide-mémoire sont décrits à l'encadré 58. Pour la récupération de chaleur dans les installations de ventilation, des schémas-types et des appareils standardisés sont disponibles. Dans les installations d'utilisation des rejets thermiques, les composants et le système (récupérateur, régénérateur, pompes à chaleur) doivent être adaptés à chaque situation. Cela concerne la planification, l'évaluation, l'optimalisation, le montage, l'exploitation et la surveillance. Seuls des composants isolés, tels qu'échangeurs de chaleur à gaz de combustion ou équivalents, peuvent servir d'éléments de base dans différentes installations.

#### 4.4 Phases de la planification

Dans les directives 89-1 de la SICCC, on peut trouver des documents décrivant tous les points importants relatifs à la planification. Dans cette même documentation, une attention particulière est portée à la réception et à la garantie des installations de ventilation.

Les phases principales de la planification sont résumées à l'encadré 59.

 *Cahier 1, chapitre 6.*

# Annexe

## A. Domaines d'application

### RC dans le secteur du confort

Dans ce secteur, les installations de RC pour les techniques de ventilation sont en général exploitées dans des constructions non réservées à l'habitation. Les récupérateurs de chaleur représentent ici des composants essentiels qui, de par leur rapport favorable entre frais et utilisation, sont utilisés depuis les années 1960 déjà. Aujourd'hui, bon nombre d'installations sont en service et donnent satisfaction.

### RC dans l'industrie

La RC est possible également dans les installations de ventilation industrielle et s'avère presque toujours rentable. Les installations de ventilation industrielle desservent des halles de production, des ateliers et leurs dépendances, comme par exemple les entrepôts ou similaires. Un exemple d'appareil est montré à la figure 60.

### Procédés industriels de ventilation

Dans le cadre de la production industrielle, on trouve très souvent des installations de ventilation industrielle, dont le système fonctionne indépendamment de l'installation générale d'aération des locaux. En tant que systèmes indépendants, ils sont soumis à des critères de dimensionnement particuliers, tels que configuration spéciale des locaux, transfert énergétique élevé, contamination de l'air par des matières polluantes (cf. encadré 61).

Dans les installations industrielles de ventilation, l'air sert de vecteur de transport de matière et d'énergie des procédés de production. Les caractéristiques de ces installations sont :

- apport de chaleur dans un processus ;
- évacuation de la chaleur et de l'humidité hors d'un processus ;
- évacuation des gaz, solvants, nuages de peinture, vapeurs, etc.

### Installations de froid

Dans le domaine des techniques de refroidissement, les puissances mises en œuvre permettent une distinction entre le froid industriel et le froid artisanal. Mais, dans les deux cas, les principes d'URT sont identiques.

La production de froid peut servir au chauffage de l'eau, au chauffage de locaux ou à l'aération (figure 62). Dans ces cas, les rejets thermiques remplacent l'électricité et le combustible.

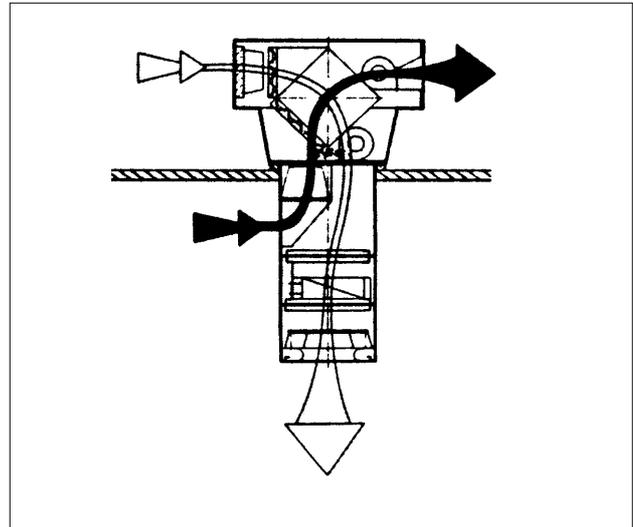


Figure 60 : Exemple d'un appareil de ventilation de toiture avec RC intégrée pour l'industrie (source : Hoval).

Exemples de matières polluantes causant des problèmes dans l'air soufflé et l'air évacué

- Gaz de soudure
- Vapeurs corrosives
- Vapeurs ou gaz explosifs
- Brouillard d'huile et d'émulsions
- Solvants
- Décapants
- Poussières
- Particules de peinture
- Substances radioactives (gaz, aérosols, particules)
- Substances toxiques
- Germes
- Odeurs
- Humidité

Encadré 61

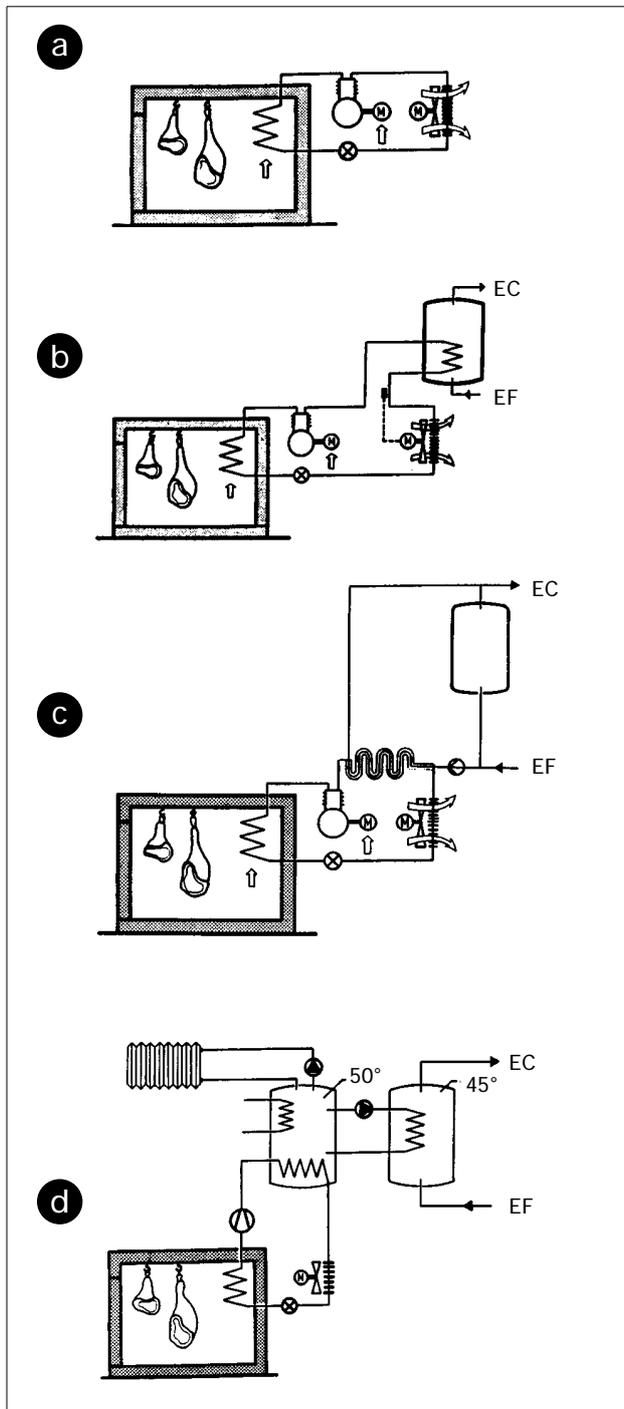


Figure 62: Système d'application d'URT dans une installation de froid

- a) Pas d'utilisation des rejets thermiques.  
 b) Condensation directe dans le chauffe-eau.  
 c) Condensation dans l'échangeur extérieur.  
 d) Avec accumulateur de chaleur pour divers consommateurs.

Les données physiques d'un cycle thermique déterminent si un fluide peut être surchauffé, respectivement sous-refroidi, et jusqu'à quel degré. Avec des conditions favorables et un choix de raccordements judicieux, une utilisation répartie selon la température peut être mise sur pied. En surchauffant le fluide, la température à la sortie du compresseur peut atteindre jusqu'à 70°C. Mais la majeure partie des rejets thermiques, lors de la condensation, se situe aux alentours de 40°C.

*La congélation de denrées alimentaires exige une puissance de refroidissement de 10 kW. Cette opération dégage une puissance calorifique de 14 kW. Avec un condenseur refroidi à l'air, on peut chauffer 3000 m<sup>3</sup>/h d'air à environ 20°C. L'intégration d'un condenseur refroidi à l'eau permet de chauffer environ 4 l/min d'eau à une température d'environ 40°C.*

#### Production d'air comprimé

Dans ce système, le compresseur ne doit pas dépasser une certaine température. Pour des raisons de sécurité d'exploitation, le refroidissement est assuré par l'eau ou l'air; on améliore ainsi également le rendement. Souvent, il faut procéder aussi au séchage de l'air comprimé. Le 90% environ de l'énergie mécanique se transforme alors en rejets thermiques.

Selon la situation, l'air froid réchauffé peut servir à l'aération des halles pendant la saison froide ou l'eau froide réchauffée peut être utilisée pour le chauffage des locaux ou le chauffage de l'eau. Des températures de 80 à 90°C sont atteignables selon le système de refroidissement choisi.

#### Situation générale dans l'industrie

Dans les procédés industriels et artisanaux, l'énergie ne joue pas le même rôle que dans le secteur du confort. L'utilisation de l'énergie peut être différenciée comme suit:

- énergie pour le travail mécanique (entraînements)
- + énergie pour les procédés
- = énergie pour la production
- énergie pour la production
- + énergie pour le confort
- = consommation énergétique globale

Lors de la fabrication d'un produit, outre les grandeurs pouvant influencer la consommation énergétique, une quantité d'autres facteurs participent au calcul du prix de revient du produit, respectivement de la rentabilité d'un processus.

Il ressort d'une part que pour bon nombre de marchandises le coût de l'énergie nécessaire au produit fini est souvent minime: les modifications du prix de l'énergie ont donc une influence modérée sur le prix du produit. D'autre part, de nombreux processus exigent une énergie intensive, permettant aisément de les considérer comme des systèmes à part entière.

Ces dernières années, des efforts ont été entrepris afin d'améliorer la situation des grands consommateurs d'énergie: par exemple améliorations dans les méthodes de production et recherche d'appareils pouvant utiliser plusieurs fois de l'énergie. A ce propos, les aspects principaux relatifs à la RC/URT sont résumés à l'encadré 63. Des mesures d'économie d'énergie importantes sont souvent fort simples à instaurer. Par exemple pour les processus de séchage – consommateurs énergétiques relativement importants – dans lesquels le prolongement du temps de séchage abaisse la température de consigne. Dans ce cas, la qualité du produit séché s'en trouve souvent améliorée.

La vapeur est fréquemment utilisée pour couvrir les besoins de chaleur. La production de chaleur a lieu essentiellement à l'intérieur de l'exploitation. Dans de nombreux procédés, la vapeur fabriquée atteint des températures inutilement élevées, et doit ensuite être ramenée par transformation aux températures exigées. Avec une production appropriée, on peut économiser beaucoup d'énergie.

#### Exemple de l'industrie chimique

Dans les procédés de production chimique, le démarrage de réactions en chaîne puis la séparation des éléments exigent de l'énergie. Lorsqu'elle a été engagée dans un processus, l'énergie doit à nouveau être dégagée, en tant que chaleur, souvent à un niveau plus bas. Pour les procédés exothermiques, la chaleur libérée doit en plus être évacuée.

Certains procédés de fabrication ont certes constamment été améliorés au fil des ans, souvent au moyen de combinaisons de machines et d'appareils existants, ce qui a permis de substantielles économies. Jusqu'ici tous les procédés n'ont de loin pas atteint la même « maturité énergétique ». Il existe encore beaucoup de procédés pour lesquels l'incitation à rechercher des économies d'énergie n'est pas suffisante en ces temps où l'énergie est très bon marché.

Branches de l'industrie suisse consommant une bonne part des énergies de procédés

L'industrie métallurgique et l'industrie des machines figurent au deuxième rang des principaux consommateurs de chaleur de procédés. Par rapport à leur consommation énergétique globale, la part de chaleur de procédé nécessaire à chacune de ces deux industries est importante. Plus de 95 % de la chaleur est injectée dans des procédés dépassant 300°C. Cette situation semble favorable à une progression de l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Dans la production de matériel de construction prédominent les hautes températures et les hautes puissances. Les chaleurs de combustion à température supérieure à 1000°C et les rejets thermiques couvrent normalement la plupart des besoins d'énergie situés en dessous de 300°C.

Une consommation élevée de vapeur, à pression moyenne à forte, voilà ce qui caractérise les flux calorifiques importants rencontrés dans l'industrie du papier. La structure des besoins de chaleur de ce secteur industriel varie fortement.

L'industrie textile, du cuir et des chaussures, comparée à d'autres, n'exige pas de très hautes températures. Plus de 80 % de la chaleur produite sont destinés à des procédés, dont la température se situe en dessous de 300°C. La majeure partie de cette énergie est utilisée dans des procédés de séchage.

Sur le plan de sa consommation de chaleur, l'industrie chimique est la plus importante de toutes. Dans chacune de ses exploitations, la consommation de vapeur, d'eau chaude de même que la température varient très fortement. Cette situation représente un potentiel non négligeable de diversification dans l'utilisation de la chaleur, sous forme de RC et d'URT, en particulier pour le chauffage de l'eau fraîche.

L'industrie des denrées alimentaires offre une très large palette de technologies aux températures les plus diverses. Le dégagement de vapeur et de condensat, en tant que source de chaleur d'une part, et, d'autre part, le besoin d'eau comme utilisateur de chaleur, laissent entrevoir des possibilités favorables pour la RC et l'URT.



*Sonnenenergie für die Erzeugung industrieller Prozesswärme. Ausgearbeitet durch die Georg Fischer AG, Schaffhausen. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), 1981. (BEW-Schriftenreihe, Studie Nr. 15; source: OCFIM, 3000 Berne, N° de commande 805.715 d).*

Encadré 63

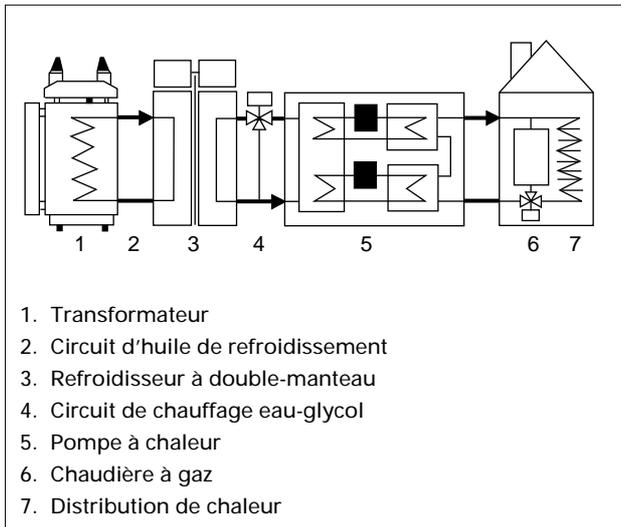


Figure 64 : Schéma d'une installation de transformateur avec circuit de sécurité pour l'URT [source: Jahrbuch der Wärmereckgewinnung, 6. Ausgabe, Essen Vulkan-Verlag, 1989].

### Transmission de chaleur à travers des barrières de sécurité

Les rejets thermiques dans l'industrie ne sont pas redistribués sans autre si le transfert vers d'autres lieux d'utilisation met en danger l'installation, le produit ou les eaux usées. Une utilisation est toutefois possible au moyen de la pose de « barrières ». Une solution à ce problème, encore peu connue, est apportée par le système à double-manteau : dans ce cas, le circuit de sécurité devient inutile. La transmission de chaleur est assurée à travers un échangeur (figure 64).

### Couplage chaleur-force

Le couplage chaleur-force signifie production combinée de chaleur (pour le chauffage et les procédés thermiques) et de force (surtout pour la production d'électricité) au moyen de turbines à vapeur, de turbines à gaz, de moteurs Diesel ou à gaz. Ce thème fait l'objet d'une brochure dans cette même série.

 Cahier 4 ; cahier 1, paragraphe 2.5 et 3.4.

### Installations ORC

Les installations ORC (Organic Rankine Cycle) sont des installations thermiques dans lesquelles, via un circuit fermé, on produit de l'énergie électrique grâce à des rejets thermiques entre 16 et 300°C. Les premières expériences réalisées montrent que, dans des cas isolés, les installations ORC sont tout à fait aptes à utiliser des rejets thermiques. Toutefois, on ne peut pas s'attendre à une part importante d'ORC dans les systèmes d'URT.

## B. Exemples

### Industrie de développement de films

Données et but : dans une entreprise de 350 personnes, une installation importante d'utilisation des rejets thermiques équipée de pompes à chaleur et d'échangeurs de chaleur doit être installée.

Concept : les départements « photochimie », « traitement » et « climatisation » doivent être réunis dans un concept global (figure 66).

Description de l'installation : la connexion entre la climatisation et le département « traitement » s'effectue dans les échangeurs de chaleur, qui desservent le système de refroidissement de l'air pour les installations d'informatique et les installations générales de climatisation. L'eau, ainsi réchauffée de 6°C, est injectée dans les évaporateurs des machines de refroidissements. Du fait que la consommation d'eau varie fortement dans le procédé des « traitements », un accumulateur préliminaire de 42 m<sup>3</sup> est inséré dans le circuit d'eau ; cet accumulateur est alimenté principalement par l'eau d'une machine frigorifique à basse température de condensation. L'eau de l'accumulateur préliminaire est ensuite chauffée à environ 45°C dans un accumulateur de 6 m<sup>3</sup>

Entreprise de développements de films

Concept : Innovent Zurich AG.

La comparaison des chiffres de consommation d'énergie de 1984 à 1990, pour une production semblable, fait ressortir une hausse de la consommation de courant électrique d'environ 150 MWh/a et une économie de mazout équivalent à 640 MWh/a.

Il en résulte une amplification électrothermique de :  
 $AET = 640 / 150 = 4,27$ .

Encadré 65

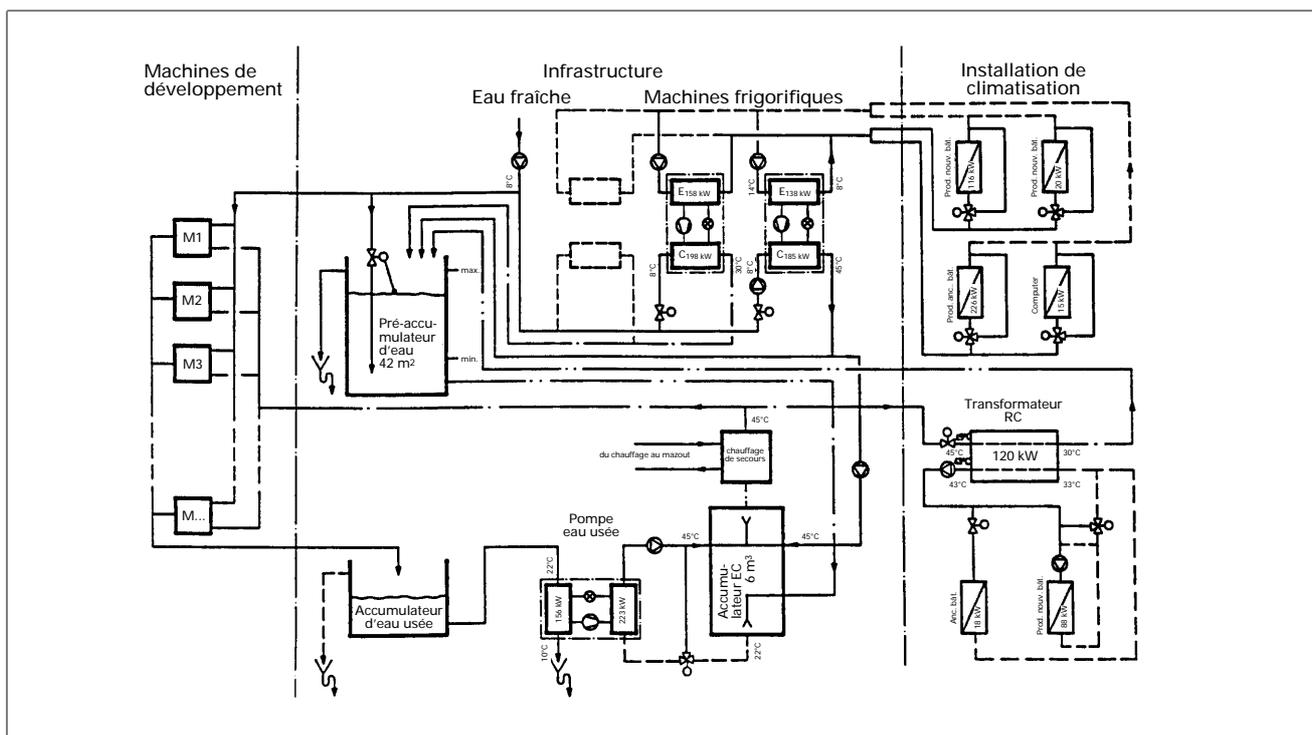


Figure 66 : Schéma de principe de l'exemple de cas « industrie de développements de films ».

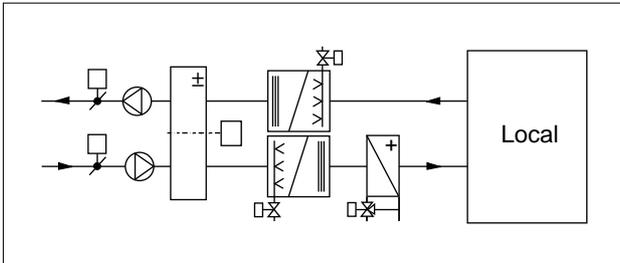


Figure 67 : Schéma de principe de l'exemple de cas « refroidissement doux ».

#### « Refroidissement doux »

Concept: Gähler + Partner AG, Ennetbaden.

Bâtiment à 4 étages abritant des bureaux :

- Heures d'ouverture (5 jours par semaine) 12 h/jour
- Renouvellement d'air/h 1,7 à 2,6

Echangeur thermique rotatif avec condensation :

- Rendement de température environ 75 %
- Rendement d'humidité environ 15 à 75 %
- Amplification électrothermique environ 16

Confort hivernal :

- Température des locaux 20 à 22° C
- Humidité des locaux min. 35 %

Confort estival :

- Température des locaux sans PC jusqu'à 28° C
- Température des locaux avec PC jusqu'à 30° C
- Humidité des locaux jusqu'à 70 %

Rentabilité comparée à une installation conventionnelle :

	Refruid. mécanique	Refruid. doux	Economie %
Investissements	550 000 fr.	326 000 fr.	41
Electricité	62,0 MWh/a	32,4 MWh/a	48
Mazout	7,320 kg/a	4,750 kg/a	36
Frais capitalisation	52 000 fr./a	30 800 fr./a	41
Frais d'entretien	25 600 fr./a	15 200 fr./a	41
Frais d'énergie	16 600 fr./a	9300 fr./a	44
Frais annuels	94 200 fr./a	55 300 fr./a	41

Base: prix du mazout 0,4 Fr./kg, prix moyen du courant 12 ct/kWh, intérêts 7 %, hausse de prix pour électricité et frais d'exploitation 5 %, hausse de prix pour mazout 6 %, durée moyenne d'utilisation 20 ans.

#### Encadré 68

alimenté par une pompe à chaleur électrique utilisant les rejets thermiques provenant des machines de développement. Selon l'état de charge, l'eau à 45° C provenant de la machine frigorifique à haute température de condensation peut être dirigée vers l'accumulateur préliminaire ou vers l'accumulateur d'eau chaude. L'eau de l'accumulateur d'eau chaude alimente les machines de traitement, où la température souhaitée est atteinte par adjonction d'eau froide. Le chauffage des locaux est également relié à l'accumulateur d'eau chaude par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. En cas d'insuffisance des rejets thermiques, un chauffage d'appoint à mazout est enclenché.

Rentabilité : dans cette entreprise, on recherche constamment à améliorer les installations (encadré 65). Les frais qui en découlent sont reportés sur les frais d'entretien. Il n'est pas prévu de plan d'amortissement pour chacune de ces mesures.

#### « Refroidissement doux »

Données et buts : au moyen d'une planification intégrale doublée de calculs de simulation pour des flux énergétiques non stationnaires, il s'agit de développer un concept aéraulique, en substituant un système de refroidissement mécanique par un système d'évaporation combiné à une RC. La méthode dite de « refroidissement modéré » s'avère très avantageuse du point de vue coût, mais ne fournit pas un confort optimal.

Concept : une RC équipée d'un système de refroidissement par évaporation dans l'air évacué sert au refroidissement de l'air des locaux. Pour des questions de coût d'exploitation, on installera un humidificateur spécial pour de l'eau potable non traitée. Le chauffage de base couvre 100 % des besoins énergétiques en chauffage. Une protection solaire extérieure, assurée par des stores à lamelles mobiles et un éclairage optimal des locaux dégageant un minimum de chaleur réduisent fortement les apports thermiques en été. Afin de limiter les apports thermiques des appareils, on admet un ordinateur personnel par place de travail. Les avantages par rapport aux solutions conventionnelles sont : des frais d'installation et d'énergie plus bas et une quantité d'air proportionnellement plus petite, ainsi que des frais d'entretien et de surveillance moins élevés. Le désavantage se limite à une réduction passagère du confort des locaux en été (pendant les périodes de canicule : température relativement élevée des locaux équipés d'ordinateurs), ce qui est d'ailleurs sciemment pris en compte.

Description de l'installation : à travers un ventilateur d'air pulsé, une RC et un chauffage de l'air, l'air est amené dans le local à travers des grilles de pulsion (figure 67). L'air évacué passe par l'humidificateur adiabatique laminaire, puis par la RC, le ventilateur, la gaine d'évacuation, pour terminer sa course à l'air libre. L'installation travaille avec une quantité d'air constante. En hiver, le système RC est en service. Il préchauffe l'air pulsé qui est aussi humidifié par la condensation de l'air évacué (lorsque les températures extérieures sont basses). Si nécessaire, l'air pulsé est encore humidifié et amené à une température de consigne variable.

En été, en mode de refroidissement diurne, l'air évacué dans l'humidificateur adiabatique laminaire peut être refroidi jusqu'à environ 22°C, avec près de 95% d'humidité relative. Après enclenchement de la RC, l'air évacué (froid) refroidit sans échange d'humidité l'air neuf (chaud) (y compris les rejets thermiques du ventilateur d'air neuf). Le refroidissement nocturne fonctionne par basse température de l'air avec les ventilateurs d'air pulsé/évacué et partiellement avec l'humidificateur de l'air évacué. Les utilisateurs sont en général satisfaits du confort apporté par ce système. En été toutefois, la température des locaux informatiques peut devenir très vite éprouvante. Pour rendre la situation plus confortable, des raccordements pour une climatisation mécanique (environ 30 kW) sont prévus. D'autres données sont énumérées à l'encadré 68.

Rentabilité : un taux minime de renouvellement d'air et la suppression du refroidissement mécanique permettent une économie d'électricité d'environ 30 MWh. (La consommation supplémentaire de 20 m<sup>3</sup> d'eau par an pour l'humidification de l'air ne joue pas un rôle très important). La diminution des frais de capitalisation, d'entretien et d'énergie permet une épargne évaluée à 41% ou Fr. 39 000.- par an. Elle se fait toutefois au détriment des exigences du confort (par températures extérieures caniculaires, la température des locaux d'informatique atteint jusqu'à 30°C), ce qui est difficile à chiffrer. Par conséquent, chaque cas exige un examen individuel approfondi, avant de pouvoir être englobé dans un tel concept.

### Production de froid en hiver

Données et but : les besoins minimes de froid en hiver devraient être couverts par une source « froide » disponible et sans le concours de compresseurs frigorifiques travaillant à un mauvais rendement en raison de leur faible charge.

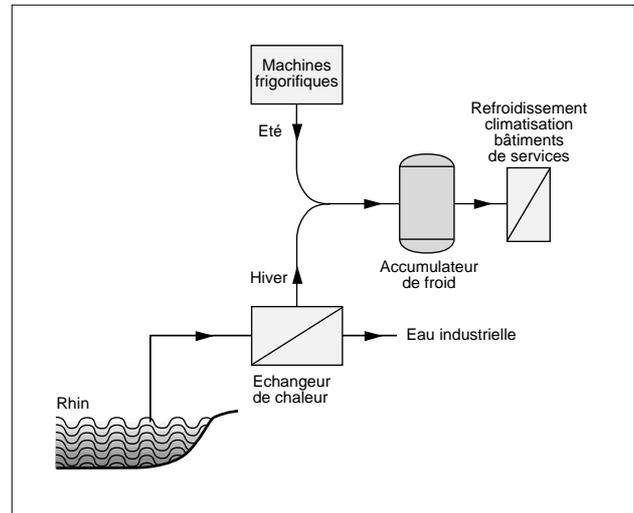


Figure 69 : Schéma de principe d'un exemple de cas « climatisation pour refroidissement hivernal ».

### Climatisation pour refroidissement hivernal

Concept : Hoffmann-La Roche SA, Bâle.

Puissance d'entraînement des turbo-compresseurs :

- 1 turbo de refroidissement de 699 kW	699 kW
- 2 turbos de refroidissement de 681 kW	1362 kW
- 2 turbos de refroidissement de 368 kW	736 kW
- Total	2797 kW

Accumulateur de froid 66 m<sup>3</sup>

Echangeur à plaques :

- Puissance	900 kW
- Température du circuit froid	4/11°C

Rentabilité :

- Economie d'électricité	400 MWh/a
- Frais d'investissement supplémentaires	Fr. 125 000.-
- Frais annuels de capitalisation	Fr. 13 750.-/a
- Economie annuelle moyenne de frais d'énergie	Fr. 56 850.-/a
- Economie annuelle moyenne nette	Fr. 43 100.-/a

Base : Prix du courant 10 ct/kWh, intérêts 7%, hausse du prix de l'électricité 5%, durée d'utilisation 15 ans.

Encadré 70

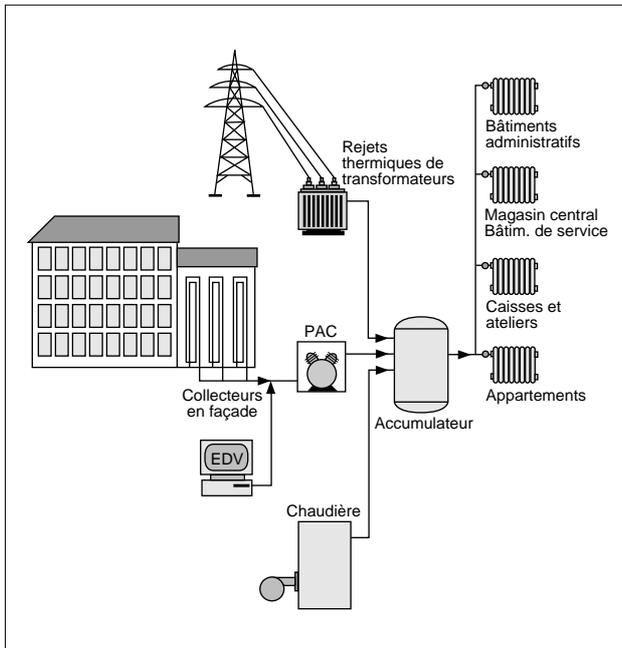


Figure 71 : Schéma de principe d'un exemple de cas de raccordement « chaud et froid ».

Concept : en raccordant la source « froide » (en l'occurrence l'eau du Rhin) sur le circuit de l'eau industrielle, les machines de refroidissement peuvent être déclenchées en hiver. Le couplage au réseau de froid se fait par l'intermédiaire d'un échangeur thermique à plaques. Si le réchauffement de l'eau industrielle est faible, elle peut encore être utilisée dans d'autres procédés de réfrigération. Les machines de refroidissement ne sont actionnées qu'en été.

Description de l'installation : la figure 69 décrit schématiquement l'installation de climatisation avec accumulation de froid. L'échangeur thermique à plaques (données techniques dans l'encadré 70) est inséré au retour du circuit de l'eau industrielle. La commutation sur les machines frigorifiques a lieu dès que l'eau industrielle atteint une température trop élevée.

Rentabilité : cette méthode d'exploitation permet, avec des frais d'investissements de Fr. 125 000.- pour les installations supplémentaires de refroidissement par les eaux du Rhin, une économie de 400 000 kWh/an d'électricité, ce qui correspond à une somme de Fr. 43 100.-. Le délai de remboursement des investissements est de moins de 3,5 ans. En outre, ce système permet d'éviter de coûteuses pointes de consommation de courant. A ces avantages, viennent encore s'ajouter une diminution des pertes de fluides frigorigènes, moins de travaux d'entretien et moins de bruit au niveau des turbos-compresseurs.

### Raccordement chaud et froid

Données et buts : un raccordement de chaud et froid devrait assurer le chauffage de bureaux et d'ateliers avec un minimum d'énergie externe. La rentabilité et la diversification de la fourniture d'énergie sont évaluées sur la base de calculs.

Concept : utilisation des rejets thermiques des transformateurs et des appareils informatiques ainsi que de la chaleur de l'environnement au moyen d'absorbeurs en façade et d'une pompe à chaleur pour la puissance de base (figure 71). Les chaudières existantes assainies seront enclenchées uniquement pour couvrir les pointes de consommation.

Description de l'installation : la couverture de la puissance de base est assurée d'une part par les rejets thermiques de deux transformateurs, via un échangeur de chaleur à double paroi eau-huile. D'autre part, la chaleur de l'environnement, absorbée par les surfaces ensoleillées des façades (côté sud est et sud ouest) dans lesquelles sont bétonnées des conduites en matière

synthétique, est mise en valeur à l'aide de pompes à chaleur à entraînement électrique. La séparation hydraulique des deux surfaces de collecteurs permet une meilleure répartition des charges. Le rôle de la chaudière se limitera à couvrir les rares pointes de consommation. Grâce aux rejets thermiques des consommateurs, les PAC ne travaillent que jusqu'à concurrence de 8°C de température extérieure. Durant la période intermédiaire (température extérieure de 8 à 16°C, correspondant à environ 3000 heures), les rejets thermiques des appareils informatiques sont évacués par l'intermédiaire des collecteurs placés en façade. Un système de commande intégré permet de piloter l'installation en continu de manière optimale. Les distributeurs de chauffage existants ont été adaptés pour fonctionner avec débits variables et le chauffage des radiateurs a pu être aligné sur une température de retour maximale de 50°C. Les données techniques sont mentionnées à l'encadré 72.

Rentabilité: les frais d'investissement globaux se montent à Fr. 1 560 000.-. Il en résulte Fr. 160 000.- de frais annuels (selon taux en vigueur). Traduit en prix actuels, on obtient des frais dus à l'inflation pour un total de Fr. 100 000.-/an. Une diminution du besoin de chaleur de 1000 MWh/an entraîne un coût spécifique d'environ 10 centimes par kWh. Dans la phase finale de l'aménagement, on prévoit une diminution du besoin de chaleur de 2000 MWh/an, ce qui entraînera un coût final d'environ 5 ct/kWh.

### C. Méthode du pincement ou Pinch Design Method (abrégé: PDM)

Une installation technique de chauffage peut être représentée par un réseau de transferts thermiques. Pour des conditions stationnaires, on peut définir à l'aide de la PDM le minimum théorique d'énergie à fournir de l'extérieur pour une série de flux à chauffer ou à refroidir et des températures initiales et finales connues. Le PDM doit son appellation au pincement typique (en anglais: Pinch) des courbes composites dans le diagramme enthalpie/température (figure 73).

Les deux courbes composites (chaud, froid) représentent chacune sur l'échelle de l'enthalpie, dans les intervalles de température considérés, tous les apports (chauffage)

Raccordement « chaud et froid »

Concept: Elektra Birseck Münchenstein

Puissance de chauffage

- 1<sup>re</sup> étape 700 kW
- Aménagement final environ 1300 kW

2 transformateurs:

- Tension 150/13 kV
- Puissance apparente 40 MVA
- Puissance des rejets thermiques 50 à 120 kW

Accumulateur d'eau chaude 30 m<sup>3</sup>

Pompe à chaleur:

- Puissance thermique 260 kW
- Puissance électrique utile 92 kW
- 4 circulateurs, en tout 8 kW
- Surface de la façade 1590 m<sup>2</sup>

Puissance de refroidissement – Installation de climatisation des locaux informatiques

- Ordinateurs 80 kW
- Alimentation de secours 10 kW

Groupe frigorifique (2 compresseurs):

- Puissance de refroidissement 122 kW
- Puissance électrique utile 56 kW

Production de chaleur globale:

- 1<sup>re</sup> étape 1009 MWh/a
- Aménagement final environ 2000 MWh/a

Amplification électrothermique 4

Rentabilité:

- Frais d'investissements globaux 156 000.- Fr.
- Frais annuels aux prix actuels 160 000.-/Fr./a
- Frais annuels tenant compte de l'inflation 100 000.-/Fr./a
- Coûts spécifiques de la chaleur
- 1<sup>re</sup> étape 10 ct/kWh
- Aménagement final environ 5 ct/kWh

Base: prix du mazout 0,4 Fr./kg, prix moyen du courant 12 ct/kWh, taux d'inflation 4%, intérêts 7%, hausse de prix pour électricité et frais d'investissement 5%, hausse de prix pour le mazout 6%, durée moyenne d'utilisation 30 ans.

Encadré 72

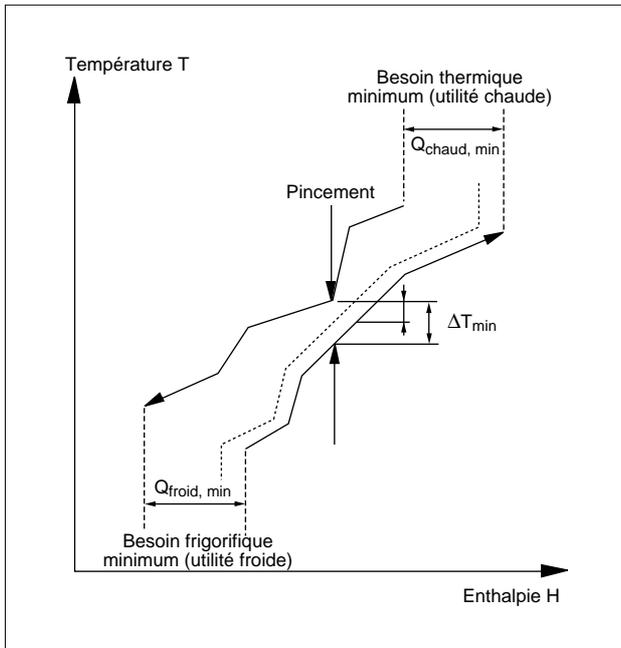


Figure 73: Méthode du pincement avec courbes composites « chaud » (en haut) et « froid » (en bas). La ligne pointillée décrit la situation lors d'un déplacement à gauche de la courbe composite « froid ». Dans ce cas,  $\Delta T_{\min}$  diminue, tout comme les besoins minimum en énergie de chauffage et de refroidissement.

et les rejets (refroidissement) thermiques dans le flux de matière<sup>3</sup>). Cette différence de température minimale apparaît au pincement  $\Delta T_{\min}$  à une enthalpie déterminée. La zone de recouvrement des courbes parallèlement à l'axe d'enthalpie définit le gain thermique maximum possible. Le besoin minimum en énergie de chauffage est désigné par  $Q_{\text{chaud, min}}$  et en énergie de refroidissement par  $Q_{\text{froid, min}}$ . Dans un procédé, la température au pincement fixe la limite de la chaleur interchangeable. Avec cette méthode, on peut élaborer différents réseaux de transferts thermiques de manière globale. En définissant l'écart minimal de température, on peut calculer le gain thermique maximum, les grandeurs du réseau et estimer les coûts. Le PDM est un outil d'analyse et d'optimisation d'un réseau de transferts thermiques. Il peut être complété par des méthodes d'optimisation s'appliquant à tout un ensemble de conditions d'exploitation pouvant se modifier.

Une surconsommation énergétique peut survenir dans un procédé, lorsqu'une erreur est commise dans l'un des points suivants :

- Refroidir avec de l'air ou de l'eau en dessus du pincement.
- Chauffer avec de l'énergie externe en dessous du pincement.
- Chauffer un flux de matière en dessous du pincement avec un flux de matière chaude situé en dessus du pincement.



Linhoff, B., et. al.: *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Rugby Institution of Chemical Engineers, 1982.

Reinmann, K.A.: *The Consideration of Dynamics and Control in the Design of the Heat Exchanger Networks*. Zurich: Eidg. Technische Hochschule (ETHZ), 1986. (Dissertation ETHZ N° 7916)

Körner, H.: *Optimaler Energieeinsatz in der chemischen Industrie*. In: *Chemieingenieur- Technik*, Bd. 60, 1988, S. 511-518. (Ausleihe: ETH-Bibliothek, Sign. P513924: 60)

Favrat, D., Staine F.: *Intégration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement*. Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, 1994. (Source: OCFIM, 3003 Berne, N° de commande 724.321 f)

<sup>3</sup>) La PDM propose, pour un processus donné, des flux de chaleur et des températures y relatives.

## D. Aide-mémoire RAVEL

A l'occasion d'une mise en exploitation, on remplit un aide-mémoire pour chaque émetteur et chaque utilisateur d'énergie (désigné ci-après par « récepteur »). Des exemples d'émetteurs et de récepteurs figurent dans les tableaux 74 et 75. Les formulaires sont utilisables aussi bien dans les techniques du bâtiment que dans les techniques industrielles.

 Explication des paramètres au chapitre 4.

 Pour effectuer une analyse globale, les valeurs spécifiées devraient être introduites sur la base de valeurs de mesures fiables. Si cela n'est pas réalisable, il faut procéder à des estimations au plus près de la réalité et ensuite seulement se reporter à des valeurs acquises par expérience.

### Aide-mémoire RAVEL « source de chaleur »

Les trois dernières cases servent à l'examen de la source. Dans la case \*\*\* figurent les propriétés qui ne posent pas de problèmes. Avec un degré progressif dans la difficulté technique, les inscriptions devront être placées dans la case \*\* ou \*. Chaque propriété jouira du même poids.

La toute dernière ligne est réservée aux totaux. Si les enregistrements de la case \* dominant, des difficultés pour la réalisation sont à craindre. Dès lors, une utilisation n'est souvent judicieuse qu'en présence d'une grande quantité de chaleur. Si une dimension ne figure que dans la case \* ou \*\*, des renseignements précis sur les positions y relatives s'avéreront nécessaires. Au cas où les premiers examens n'apportent pas de solution acceptables, c'est que la source ne convient pas pour cette utilisation.

### Aide-mémoire RAVEL « récepteur de chaleur »

Pour analyser le récepteur, on différencie entre les appréciations « sans problème », « possible » et « difficile ». « Forme d'utilisation » et « lieu d'utilisation » sont des appréciations déterminantes.

### Raccordements

Pour établir la liaison entre la source et le récepteur, les différentes dimensions contenues dans l'aide-mémoire

Genre de source	Vecteur de chaleur	Exemple
Electrique/ électrique	Air chaud Eau chaude Fluide de refroidis.	Transformateur Poste de radio Ordinateur
Electrique/ mécanique	Air chaud Eau chaude Fluide de refroidis.	Machines
Electrique/ thermique	Air chaud Eau chaude	Fours de fusion
Electrique/ lumière	Air chaud	Eclairage avec refroidissement
Mécanique/ électrique	Air chaud Eau chaude Fluide de refroidis.	Générateur
Mécanique/ mécanique	Air chaud Eau chaude Fluide de refroidis.	Transmission, techniques de procédés mécaniques
Procédés de combustion (combustible)	Eau chaude Air chaud Gaz de fumée Vapeur	Chauffage de locaux Appareils à vapeur
Réacteur chimique en général	Air chaud Eau chaude Fluide de refroidis.	Réactions exothermiques dans cuves mélangeuses
Procédés de production	Air chaud Eau chaude Fluide de refroidis.	Installations de séchage

Tableau 74: Différents genres de sources de chaleur avec exemples et fluides possibles pour le transport de la chaleur.

Genre d'utilisateur	Vecteur de chaleur	Exemple
Chaleur de confort	Eau chaude	Corps de chauffe
	Eau chaude Air chaud	Chauffage à air
	Eau chaude Vapeur	Chauffe-eau
Chaleur de procédés	Chaleur de vapeur Huile thermique	Producteur de vapeur
	Eau chaude Vapeur	Réacteur à double parois
	Eau froide Eau/glycol	Refroidisseur d'air

Tableau 75: Différents genres d'utilisateurs de chaleur avec exemples.

Description	Valeur	Cas A	Cas B
Différence de température Source-utilisateur TS-TU	_____ K	> 0 K	< 0 K
Rapport de l'énergie de la source à l'utilisateur ES-EU	_____	> 1	< 1
Intervalle horaire des offres et besoins maximaux PP (S-U)	_____ h	0 à 99 h	> 100 h
Distance entre source et utilisateur DD (S-U)	_____ m	0 à 99 m	> 100 m

Tableau 76: Liste de raccordements pour des paires « source-utilisateur » directement reliées.

Dimensions du réseau	Conséquences	
	Cas A	Cas B
TS-TU	Echangeur de chaleur	Pompe à chaleur
ES/EU	Surplus Gestion de la charge	Couverture partielle gestion énergétique
PP (S-U)	Grandeur de l'accumulateur (courte durée) Adaptation	Grandeur de l'accumulateur (longue durée) Stratégie d'exploitation
D (S-U)	Coût du transport : faible Pertes : faibles	Coût de transport : élevé Pertes : élevées

Tableau 77: Dimensions des réseaux et conséquences des systèmes.

	U1 (Estimation)	U2 (Estimation)	U3 (Estimation)
S1 (Estimation)	TS1-TU1 ES1/EU1 PP (S1-U1) D (S1-U1)	TS1-TU2 ES1/EU2 PP (S1-U2) D (S1-U2)	TS1-TU3 ES1/EU3 PP (S1-U3) D (S1-U3)
S2 (Estimation)	TS2-TU1 ES2/EU1 PP (S2-U1) D (S2-U1)	TS2-TU2 ES2/EU2 PP (S2-U2) D (S2-U2)	TS2-TU3 ES2/EU3 PP (S2-U3) D (S2-U3)
S3 (Estimation)	TS3-TU1 ES3/EU1 PP (S3-U1) D (S3-U1)	TS3-TU2 ES3/EU2 PP (S3-U2) D (S3-U2)	TS3-TU3 ES3/EU3 PP (S3-U3) D (S3-U3)

Tableau 78: Matrice de mise en réseau pour 3 sources et utilisateurs de chaleur.

doivent être comparées les unes aux autres. Les critères principaux sont :

- différence de température entre source m et utilisateur n : TSm et TUn ;
- rapport offre d'énergie m/besoin d'énergie n : ESm/EUn ;
- distance horaire des maxima d'offres m et besoins n : PP (Sm-Un) ;
- distance (éloignement) entre émetteur m et utilisateur : D (Sm-Un).

Dans les cas simples, une source peut être branchée directement à un récepteur. Dans les cas complexes, plusieurs sources peuvent être connectées à plusieurs utilisateurs. Les caractéristiques de raccordement les plus importantes seront portées sur la liste de raccordements en fonction des paires « source-utilisateur » (tableau 76).

Ces caractéristiques de raccordement déterminent le choix du système. Le tableau 77 présente des points de repère sommaires. Le cas « A » est souvent plus avantageux du point de vue des exigences techniques et des coûts que le cas « B ».

En résumé, la situation peut être représentée au moyen d'une matrice où les sources sont représentées en ordonnée et les utilisateurs en abscisse (tableau 78). Les quatre dimensions de raccordement seront reportées dans chacun des champs. Certes, par cette opération, on obtient rarement une paire « source-utilisateur » offrant un maximum de concordances de tous les points. C'est pourquoi une évaluation des différents critères sera nécessaire.

En général, la création de paires « source-utilisateur » autonomes n'offre pas une solution optimale mais une ébauche de solution. Seul un calcul exergétique de l'utilisation des différentes sources et des différents utilisateurs rattachés à un réseau de distribution de chaleur permet une exploitation rationnelle de l'énergie. Un examen plus approfondi de la solution retenue implique une représentation sous forme de schéma de flux énergétiques, ce qui permet une analyse sommaire du problème. Les questions concernant les volumes des flux énergétiques et les conditions-limites conduisent au cœur du procédé de résolution du problème.

Les limites du traitement manuel et de sa précision sont atteintes avec 3 paires « source-utilisateur ». Pour des configurations plus complexes, on aura avantage à recourir à un programme informatique.

 Méthode du pincement à l'appendice C.

.....  
 Désignation **S** .....  
 SOURCE  Environnement  Combustion  Procédés  
 N° de référence

DONNEES D'INSTALLATION	
Période d'observation	Année, période de chauff., etc.
Consommation d'énergie	kWh par période
Pertes	% de la consom. d'énergie
Rejets thermiques	% de la consom. d'énergie
Flux de rejets thermiques	kWh par période
Débit	m <sup>3</sup> /h
Vitesse du courant	m/s
Pression	Pa
Humidité	% h. r.
Densité	kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique	kJ/kg K
Puissance	
Valeur minimale: .....	kW
Valeur moyenne: .....	kW
Valeur maximale: .....	kW
Température	
Valeur minimale: .... / .... °C	
Valeur moyenne: .... / .... °C	
Valeur maximale: .... / .... °C	
Durée de fonctionnement	
Valeur minimale: .....	h/d
Valeur moyenne: .....	h/d
Valeur maximale: .....	h/d
Dimension (esquisse)	

ANALYSE		***	**	*
Mode de fonctionnement	<input type="checkbox"/> continu *** <input type="checkbox"/> intermittent ** <input type="checkbox"/> fonction de la charge **... * <input type="checkbox"/>			
Forme du producteur de chaleur	<input type="checkbox"/> lié à des conduites *** <input type="checkbox"/> diffus **... *			
Vecteur de chaleur	<input type="checkbox"/> eau, air *** <input type="checkbox"/> liquide, gaz ** <input type="checkbox"/> solide *			
Caractéristique du courant	<input type="checkbox"/> convection forcée *** <input type="checkbox"/> convection libre **... *			
Caractéristiques physiques	<input type="checkbox"/> homogène *** <input type="checkbox"/> dispersé (laiteux), fumées <input type="checkbox"/> abrasif (poli à l'émeri), salissant <input type="checkbox"/>			
Caractéristiques chimiques	<input type="checkbox"/> inerte, neutre *** <input type="checkbox"/> corrosif, nocif à l'environnement **... * <input type="checkbox"/> inflammable, explosif * <input type="checkbox"/>			
Caractéristiques physiologiques	<input type="checkbox"/> sans problème *** <input type="checkbox"/> toxique **... * <input type="checkbox"/> sale, contaminé **... * <input type="checkbox"/>			
Age de l'installation	<input type="checkbox"/> installation nouvelle *** <input type="checkbox"/> en milieu de vie **... * <input type="checkbox"/> en fin de vie, à changer * <input type="checkbox"/>			
Situation	<input type="checkbox"/> centralisé *** <input type="checkbox"/> décentralisé **... * <input type="checkbox"/>			
Particularités (prescriptions, risques, dépendances, accès, etc.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Jugement	<input type="checkbox"/> accepté, bon *** <input type="checkbox"/> possible, utilisable ** <input type="checkbox"/> douteux, problématique *			

.....  
 Désignation **U** .....  
 N° de référence

**UTILISATEUR**

Chaleur de confort     Chaleur industrielle   

Refroidissement     Froid industriel   

DONNEES D'INSTALLATION	
Période d'observation	Année, période de chauff., etc.
Besoin chaud/froid	kWh par période
Débit	m³/h
Vitesse de courant	m/s
Pression	Pa
Humidité	% h. r.
Densité	kg/m³
Chaleur spécifique	kJ/kg K
Puissance nécessaire	
Valeur minimale: .....	kw
Valeur moyenne: .....	kw
Valeur maximale: .....	kw
Température	
Valeur minimale: ... / ... ° C	
Valeur moyenne: ... / ... ° C	
Valeur maximale: ... / ... ° C	
Durée de fonctionnement	
Valeur minimale: .....	h/d
Valeur moyenne: .....	h/d
Valeur maximale: .....	h/d
Dimension (esquisse)	

ANALYSE		***	**	*
Mode de fonctionnement	<input type="checkbox"/> continu *** <input type="checkbox"/> intermittent ** <input type="checkbox"/> fonction de la charge **... * <input type="checkbox"/>			
Vecteur de chaleur	<input type="checkbox"/> eau, air *** <input type="checkbox"/> vapeur ** <input type="checkbox"/> huile thermique * <input type="checkbox"/>			
Caractéristique du courant	<input type="checkbox"/> convection forcée *** <input type="checkbox"/> convection libre **... * <input type="checkbox"/>			
Age de l'installation	<input type="checkbox"/> installation nouvelle *** <input type="checkbox"/> en milieu de vie ***... ** <input type="checkbox"/> en fin de vie, à changer * <input type="checkbox"/>			
Lieu d'utilisation	<input type="checkbox"/> à l'intérieur du procédé (RC) *** <input type="checkbox"/> à l'intérieur de l'entreprise (URT) ***... * <input type="checkbox"/> externe (URT) * <input type="checkbox"/>			
Particularités (prescriptions, risques, dépendances, accès, etc.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			
Jugement	<input type="checkbox"/> sans problème *** <input type="checkbox"/> possible ** <input type="checkbox"/> difficile *			
Remarques				

# Dénominations, symboles, abréviations

## Dénominations et symboles

Amplification électrothermique [-]	AET
Chaleur spécifique [J/kgK, kWh/kgK]	c
Coefficient de transmission thermique (W/m <sup>2</sup> K)	k
Débit, flux massique [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Débit, flux volumique [m <sup>3</sup> /h]	$\dot{V}$
Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$
Différence de pression [Pa, kPa]	$\Delta p$
Différence de température [K]	$\Delta\vartheta, \Delta T$
Différence de température logarithmique moyenne [K]	$\Delta\vartheta_m$
Durée de fonctionnement [h]	t <sub>f</sub>
Energie d'appoint [MJ, kWh]	W <sub>a</sub>
Energie en général [J, MJ, Ws, kWh]	W
Energie nette récupérée [MJ, kWh]	ER <sub>n</sub>
Energie récupérée [MJ, kWh]	ER
Enthalpie [J/kg, kJ/kg, kWh/kg]	h
Facteur de charge [-]	f <sub>c</sub>
Facteur de correction, général [-]	f
Flux calorifique [W, kW]	$\dot{Q}$
Flux de chaleur spécifique [MJ/m <sup>3</sup> , kWh/m <sup>3</sup> ]	q
Flux massique [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Flux volumique [m <sup>3</sup> /h]	$\dot{V}$
Humidité absolue [g/kg]	x
Humidité relative [%]	$\varphi$
Masse [kg]	m
Pression [kPa]	p
Puissance, en général [W, kW]	P
Puissance thermique [W, kW]	$\dot{Q}$
Quantité de chaleur [J, kJ, Ws, kWh]	Q
Rendement [-]	$\eta$
Rendement d'enthalpie [-]	$\eta_h$
Rendement d'humidité [-]	$\eta_x$
Rendement de température [-]	$\eta_\vartheta$
Surface [m <sup>2</sup> ]	A
Taux de renouvellement d'air [-]	n
Température [°C]	$\vartheta$
Température absolue [K]	T
Temps [s, h]	t
Vitesse [m/s]	v

## Indices

Entrée	-1
Milieu producteur de chaleur	1-
Milieu absorbeur de chaleur	2-
Sortie	-2

## Abréviations

Accumulateur	Ac
Air évacué	AE
Air neuf	AN
Air recyclé	AC
Air rejeté	AR
Air soufflé	AS
Pompe à chaleur	PAC
Récupération de chaleur	RC
Source	S
Utilisateur	U
Utilisation des rejets thermiques	URT



Liste complète dans le cahier 1!

# Index

- Aide-mémoire, 35
- Aide-mémoire « source de chaleur », 53
- Aide-mémoire « récepteur de chaleur », 53
- Amplificateur électrothermique, 8; 29
- Aspect à la livraison, 16
- Assainissement, 35
- Barrières de sécurité, 46
- Caloduc, 21
- Catégories I à IV, 11
- Chaleur diffuse, 25
- Chaleur récupérée, 30
- Circuit fermé, 20
- Coefficient de transmission de chaleur, 26
- Compression bi-étagée, 23
- Concept énergétique, 7
- Concepts RC et URT, 7
- Condenseur, 19
- Connexion entre source et utilisateur, 53
- Consommation d'énergie, 40
- Contamination, 13
- Couplage chaleur-force, 46
- Coûts externes, 39
- Différence de température, 26; 36; 38
- Différence de température logarithmique, 26
- Domaines d'application, 43
- Domaines d'utilisation en relation avec RAVEL, 4
- Dénominations, 57
- Diagramme de Sankey, 25
- Distance entre source et utilisateur, 37; 38
- Durée de vie de l'installation, 38
- Echangeur de chaleur à faisceaux de tubes, 19
- Echangeur de chaleur
  - à faisceaux de tubes pour l'air, 16
- Echangeur de chaleur à plaques pour air, 16
- Echangeur de chaleur à plaques pour liquides, 17
- Echangeur de chaleur spiralé, 18
- Echangeur de chaleur en céramique, 20
- Echangeur de chaleur en graphite, 19
- Echangeur de chaleur en matière plastique, 20
- Echangeur de chaleur rotatif, 21
- Echangeur de chaleur tubulaire, 18
- Echangeur de chaleur à double manteau, 18
- Echelonnement des dispositions, 7
- Energie d'appoint, 13; 27
- Exemples, 47
- Formules de transfert de chaleur, 26
- Gain financier, 32
- Gel, 13
- Grandeurs caractéristiques, 28
- Indications de puissance, 16
- Indices, 57
- Industrie, 43; 44
- Industrie chimique, 45
- Installations de refroidissement, 43
- Installation existante, 35
- Installation nouvelle, 35
- Méthode du pincement, 51
- Méthodes informatiques, 36
- Méthodes de mesure, 39
- Nettoyage, 13
- Optimisation, 32
- Organic Rankine Cycle, 46
- Paramètres de connexion, 36
- Paramètres de la source, 36; 37
- Paramètres de l'utilisateur, 36; 37
- Pertes de charge, 27
- Planification, 35
- Phases de la planification, 42
- Pointes de puissance, 36; 39
- Pompes à chaleur, 22
- Problèmes posés par les polluants, 43
- Procédés industriels de ventilation, 43
- Production d'air comprimé, 44
- Protection contre le gel, 13
- Rapport entre offre et besoin énergétiques, 36; 38
- RC sur air évacué, 11
- Récupérateur, 11
- Récupération de chaleur, 7
- Récupération nette d'énergie, 32
- Régénérateur, 11
- Régulation de la puissance, 12
- Rejets de chaleur intrinsèques, 25
- Rejets thermiques, 25
- Rendement, 28
- Rendements de moteurs et de ventilateurs, 30
- Rendement d'enthalpie, 28
- Rendement de température, 28; 29
- Rendement d'humidité, 28
- Rendement selon SICC 89/1, 32
- Rentabilité, 33; 38
- Schémas hydrauliques, 12
- Séparation de substances, 38
- Situation de RC/URT dans le cadre de RAVEL, 7
- Symboles, 57
- Systèmes du type « récupérateur », 16
- Température de l'air extérieur, 30
- Transfert de chaleur, 26
- Transformateur de chaleur, 24
- Unités, 57
- URT externe, 7
- URT interne, 7
- Utilisation des rejets thermiques, 7

# Organisation de soutien

---

## SBHI

Société suisse des ingénieurs conseils  
de la technique du bâtiment  
et de l'énergie

## Patronage

---

### ASCV

Association suisse des entreprises  
de chauffage et de ventilation

---

### SICC

Société suisse des ingénieurs  
en chauffage et climatisation

---

### USTSC

Union suisse des professionnels  
de la technique sanitaire et chauffage

---

### UTS

Union technique suisse

---