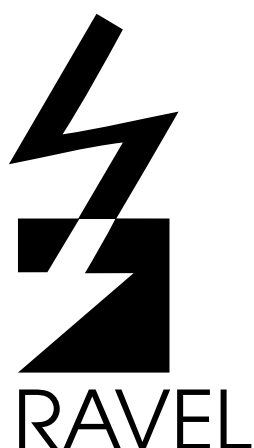


Electricité et chaleur

Données fondamentales

Ravel dans le domaine de la chaleur

Cahier 1



Electricité et chaleur

Utiliser l'électricité, énergie noble, pour le chauffage, est-ce encore pensable aujourd'hui ? Certainement pas, si l'on se réfère aux chauffages à résistance électriques actuels, qui provoquent un énorme gaspillage d'énergie. Toutefois, l'importance de l'électricité en matière de production de chaleur ne fait que croître. En effet, de nouvelles technologies plus performantes pour produire de la chaleur font appel à l'électricité, qui sert par exemple d'énergie d'appoint dans des installations de récupération de chaleur et d'utilisation de rejets thermiques. L'énergie électrique peut servir également à l'entraînement des pompes à chaleur. Rien à objecter sur ce point, car par rapport aux techniques de chauffage conventionnelles, la chaleur obtenue par ces nouvelles technologies est un multiple de l'énergie investie. La tendance à une prise de conscience des problèmes énergétiques favorise un attrait certain pour les nouvelles technologies. Un regain d'intérêt est notamment sensible dans le secteur des pompes à chaleur, de la récupération de chaleur et de l'utilisation des rejets thermiques, sans oublier le couplage chaleur-force combiné à des pompes à chaleur, qui offre une alternative intéressante sur le plan économique et écologique. Planificateurs et planificatrices se retrouvent face à un défi : contrairement aux installations conventionnelles, les nouvelles technologies impliquent des exigences fortement accrues de la part des équipes de planification. Des erreurs insignifiantes peuvent avoir une influence décisive sur le rendement énergétique, et, par là, sur les aspects économiques et écologiques d'une exploitation. De telles erreurs ne peuvent être évitées que grâce à des compétences professionnelles toujours plus poussées. Appartenant aux cinq brochures de la série «RAVEL dans le domaine de la chaleur», le présent cahier N° 1 expose les principes de base spécifiques de ces compétences professionnelles. Cette publication présente une vue d'ensemble des nouvelles techniques appliquées aux différents systèmes : «Pompes à chaleur», «Récupération de

chaleur et utilisation des rejets thermiques», ainsi que «Couplages chaleur-force». Elle constitue pour les planificateurs(trices) une mine de renseignements utiles et met en exergue les relations entre les trois technologies précitées. Quels avantages offrent ces nouvelles techniques pour une utilisation rationnelle de l'énergie ? Comment fonctionnent-elles ? Quels types de fabrication sont actuellement à disposition sur le marché ? Où trouver d'éventuels champs d'application ? L'auteur répond à ces questions et en déduit des bases de planification. La présente brochure présente des directives concernant l'élaboration d'un projet, explique comment les planificateurs(trices) peuvent assurer une conception hydraulique optimale et par là garantir sa parfaite intégration dans un système global. Un chapitre entier dudit cahier est consacré aux thèmes «Technique de raccordement», «Assurance qualité dans le déroulement de la planification» et «Rentabilité». Par la richesse de son contenu et ses nombreux «tuyaux» pratiques, cette brochure constitue une source de références convenant même à des planificateurs(trices) avertis(es), sur laquelle peuvent venir se greffer les compétences professionnelles nécessaires à une réalisation réussie d'installations de pompes à chaleur, de couplages chaleur-force, de récupération de chaleur et d'utilisation des rejets thermiques.

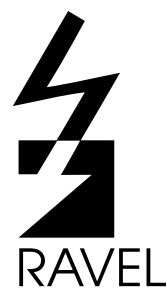
La série de publications «RAVEL dans le domaine de la chaleur» :

- Cahier 1 : Electricité et chaleur – Données fondamentales et complémentaires
- Cahier 2 : Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques
- Cahier 3 : Pompes à chaleur
- Cahier 4 : Couplage chaleur-force
- Cahier 5 : Schémas standards

Electricité et chaleur

Données fondamentales
et complémentaires

RAVEL dans le domaine de la chaleur
Cahier 1



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 – données fondamentales et complémentaires
(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)

Auteurs, 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
Dac, 1006 Lausanne
City Comp SA, 1110 Morges

Organisations de soutien
ASMFA Association suisse des maîtres ferblantiers et appareilleurs
CCF Association suisse pour le couplage chaleur-force
INFEL Centre d'information pour les applications de l'électricité
SBHI Ingénieurs-conseils suisses de la technique du bâtiment et de l'énergie



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 59*

INDEX

Index à la page 61

ISBN 3-905233-93-2

Edition originale : ISBN 3-905233-15-0

Copyright © 1995 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, avril 1995. Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source. Diffusion : Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie», EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (Numéro de commande 724.357 f).

Form 724.357 f 8.95 300 U 27612

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 Walther, 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.	RAVEL dans le domaine de la chaleur	7
1.1	L'électricité, une forme d'énergie noble	7
1.2	Engager les formes d'énergie selon leur valeur !	8
1.3	Installations de couplage chaleur-force compactes et amplificateurs électrothermiques	8
1.4	Publications du domaine « Chaleur »	10
2.	Transformation de l'énergie	11
2.1	Cycles thermodynamiques	11
	Cycle de Carnot	11
	Cycle de la pompe à chaleur, respectivement de la machine frigorifique	11
2.2	Valeur de différentes formes d'énergie	13
2.3	Calcul exact de la valeur du point de vue physique	14
	Exergie, anergie	14
	Rendement exergetique	15
2.4	Règles générales sous forme de facteurs d'évaluation	15
	Problèmes relatifs à l'utilisation pratique de la notion d'exergie	15
	Etat de la technique	16
	Facteurs d'évaluation	16
2.5	Amplification électrothermique	17
3.	Techniques énergétiques efficientes	19
3.1	Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques	19
	Fonctionnement	19
	Composants et domaines d'application	19
	Caractéristiques techniques importantes	21
3.2	Pompes à chaleur	21
	Fonctionnement	21
	Composants et domaines d'application	22
	Caractéristiques techniques importantes	23
3.3	Couplages chaleur-force	24
	Fonctionnement	24
	Types de construction et domaines d'application	25
	Caractéristiques techniques importantes	26
3.4	Répercussions sur la consommation énergétique et la production de dioxyde de carbone	27
	Stratégies	27
	Mesures de promotion et de soutien	29
4.	Bases de planification	31
4.1	Principes hydrauliques de base	31
	Quel rôle joue l'hydraulique dans les économies d'électricité ?	31
	Trois formules importantes	31
	Les quatre raccordements hydrauliques de base	31
	Vannes de réglage	31
	Autorité de la vanne	32
	Courbe caractéristique de la vanne	34
	Courbe caractéristique de la pompe	34
	Courbe caractéristique du réseau	35
	Autorité de l'utilisateur	35
	Objectif : une installation stable et silencieuse !	36

4.2	Pompes de circulation	37
	Consommation de courant électrique	37
	Pompes de circulation à courbes caractéristiques inclinées	39
	Pompes de circulation à courbes caractéristiques plates	39
	Pompes de circulation à vitesse réglable avec courbes caractéristiques plates ajustables	40
	Pompes de circulation à vitesse réglable avec courbes caractéristiques négatives	40
	Appareils de réglage du nombre de tours	40
	Régulation de la différence de pression dans les installations avec vannes thermostatiques	41
	Régulation de la différence de pression dans les conduites à distance	42
	Fonctionnement de la pompe par débit nul	42
4.3	Mesurage de l'énergie	43
	Electricité	43
	Gaz naturel	44
	Huile de chauffage	44
	Chaleur et froid	45
	Sorties impulsionsnelles	46
5.	Technique de raccordement	47
5.1	Problèmes de raccordements	47
5.2	Schémas standards RAVEL	48
5.3	Production de chaleur, accumulateur et distributeur décentralisés	48
5.4	Equilibrage hydraulique	49
	Un équilibrage hydraulique est-il vraiment nécessaire?	49
	Equilibrage par colonne	50
	Equilibrage côté utilisateur	50
5.5	Directives de dimensionnement	51
6.	Assurance qualité dans le déroulement de la planification	53
6.1	Assurance qualité	53
6.2	Réglementation SIA 108 concernant les honoraires	55
6.3	Le maître de l'ouvrage doit décider...	56
7.	Rentabilité	57
7.1	Problèmes de compréhension	57
7.2	Rendement économique acceptable	57
7.3	Procédure	58
	Dénominations, symboles, abréviations	59
	Index	61
	Publications du programme d'impulsions RAVEL	63

1. RAVEL dans le domaine de la chaleur

1.1 L'électricité, une forme d'énergie noble

En Suisse, 39% (398,6 PJ) de l'énergie primaire globale (1019,4 PJ) sont utilisés pour la production de courant (figure 1, en haut). De ce pourcentage, 43% seulement peuvent être transformés en électricité (figure 1, au milieu et en bas). Pour des raisons physiques et techniques, les agents énergétiques primaires ne permettent pas un meilleur rendement. L'électricité est donc une forme d'énergie qui nécessite beaucoup d'énergie primaire et que l'on ne devrait engager que là où sa haute valeur est absolument indispensable.

Outre les considérations énergétiques (unités : kWh, MJ, PJ), des critères de puissance (unités kW, GW) doivent également être pris en compte. Le courant électrique doit être produit pour être utilisé car son stockage n'est que difficilement envisageable. Les différences saisonnières (en hiver, le besoin de puissance est plus élevé qu'en été) et les différences journalières (à certaines heures de pointe, le besoin de puissance est sensiblement plus élevé qu'en temps normal) jouent ici un rôle particulier.

Les chauffages par résistance électrique exploitent très mal la haute valeur de l'électricité; une pompe à chaleur électrique, par exemple, utilise le courant trois fois mieux. C'est pourquoi l'arrêté sur l'énergie prévoit que toute nouvelle installation fixe de chauffage électrique sera soumise à la clause du besoin énergétique. Il ressort de la figure 1 que les besoins pour le chauffage de locaux (pompes à chaleur comprises) couverts par l'électricité représentent aujourd'hui 7,4% (12,1 PJ) de la consommation finale de courant (163,8 PJ).

Une part à peu près égale de courant électrique est utilisée pour le chauffage de l'eau (12,0 PJ). Toutefois, les critères de jugement seront ici plus favorables que pour les chauffages électriques, étant donné que par rapport au système conventionnel du chauffage de l'eau centralisé (par exemple chaudière combinée), quelques avantages doivent être retenus: pas de pertes de circulation, pas de pertes dues au rendement de la chaudière en été, décompte individuel.

En ce qui concerne la production de chaleur, la chaleur industrielle représente le plus important besoin de courant électrique avec 31% (50,0 PJ) de la consommation finale de courant électrique (163,8 PJ). Dans le cas présent, comme les niveaux de températures se situent beaucoup plus haut que pour les chauffages par résistance électrique, la perte de valeur est proportionnellement

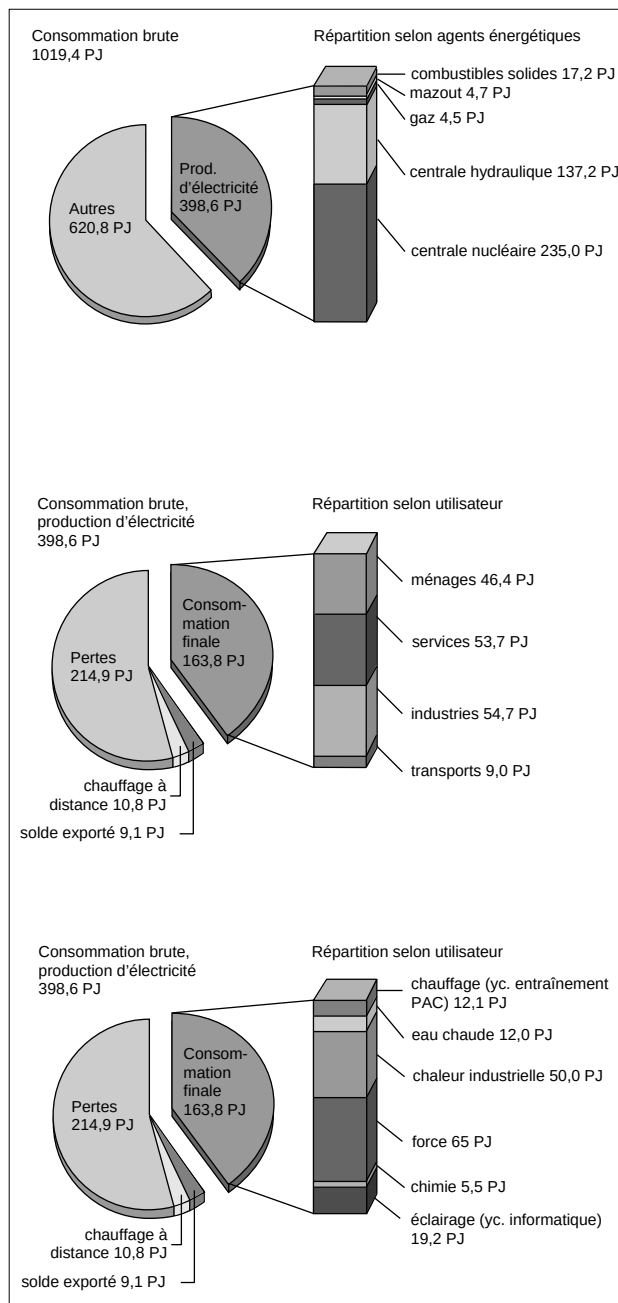


Figure 1 : Bilan énergétique de la Suisse pour l'année 1989 (base : statistique globale suisse de l'énergie; 1 PJ = 278 000 000 kWh). La partie «autres» de 620,8 PJ non engagée dans la production de courant se décompose ainsi : 521,7 PJ pour les combustibles, 66,4 PJ pour le gaz et 32,7 PJ pour les combustibles solides.

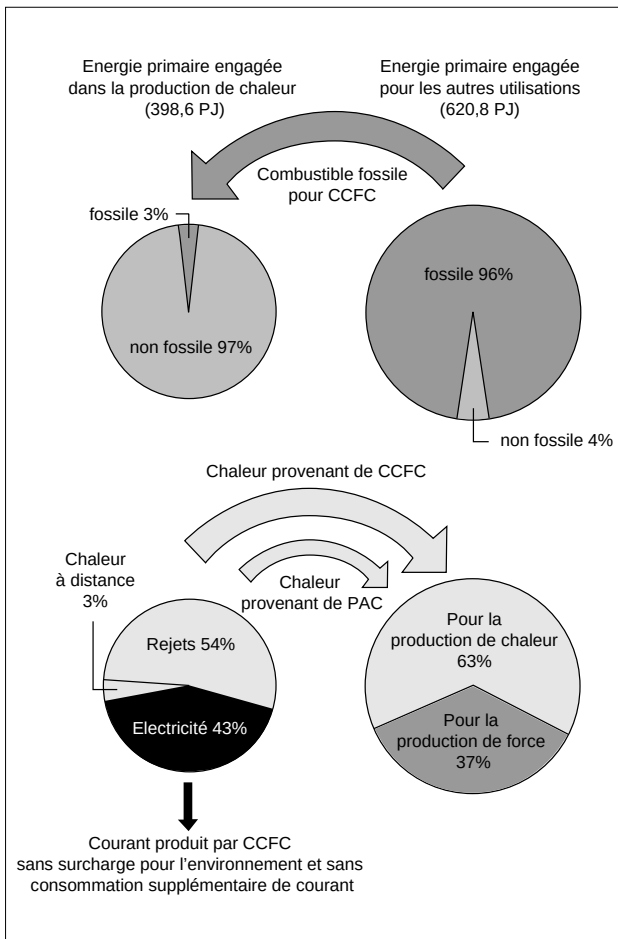


Figure 2 : Les diagrammes circulaires de gauche montrent que l'énergie primaire actuellement engagée est presque uniquement d'origine non fossile et que les inévitables rejets thermiques dégagés ne sont utilisés que dans une très faible proportion. Les diagrammes circulaires de droite reflètent les autres utilisations de l'énergie primaire. Contrairement au côté gauche, cette énergie est presque essentiellement d'origine fossile. Elle est utilisée à 63% pour la production de chaleur. Si davantage de carburant fossile pouvait être transféré du côté droit au côté gauche dans des installations de couplage chaleur-force compactes et qu'en compensation, leurs rejets thermiques ainsi que la chaleur issue des pompes à chaleur venaient à alimenter le côté droit, une importante quantité de courant pourrait être produite sans surcharge pour l'environnement et sans consommation supplémentaire d'énergie ! Remarque : les diagrammes circulaires représentant la situation actuelle et les flèches signifient uniquement un échange possible ; la figure 3 propose un aperçu chiffré.

moins importante. En outre, on applique dans ce domaine des méthodes de production beaucoup plus puissantes (arcs électriques, haute fréquence, infrarouge, induction).

1.2 Engager les formes d'énergie selon leur valeur !

L'électricité, énergie de haute valeur, se voit mise toujours plus à contribution, et le besoin de nouvelles applications va sans cesse croissant. Les technologies récentes, moins avides en énergie, ont également besoin de courant, qu'il s'agisse par exemple de l'entraînement des pompes à chaleur ou de l'énergie d'appoint dans les installations de récupération de chaleur et d'utilisation des rejets thermiques. Cette démarche ne peut être critiquée, dès l'instant où elle permet une économie substantielle d'autres formes d'énergie. En fin de compte, ce qui est déterminant, ce n'est pas seulement la consommation de courant, mais bien la consommation globale d'énergie.



C'est pourquoi l'objectif à atteindre est la diminution de la consommation globale d'énergie. Cela signifie tout d'abord qu'il y a lieu de baisser la consommation inutile d'énergie et de réduire les pertes. Un progrès décisif ne peut être réalisé que si des formes énergétiques de haute valeur, telles que l'électricité, le gaz et les produits pétroliers, sont engagés à l'avenir conformément à leur valeur respective.

1.3 Installations de couplage chaleur-force compactes et amplificateurs électrothermiques

En Suisse, la part d'énergie primaire fossile (produits pétroliers, gaz, charbon) engagée dans la production d'électricité est très faible, tandis qu'elle est très forte dans les autres applications (figure 2, en haut). De plus, au niveau de la production d'électricité, la chaleur résiduelle n'est utilisée que dans une faible mesure, alors que d'un autre côté, une énorme quantité d'agents énergétiques fossiles doit être brûlée, afin de pouvoir fournir la chaleur nécessaire (figure 2, en bas).

On pourrait améliorer considérablement le bilan énergétique global, si davantage de rejets thermiques provenant des centrales thermiques pouvaient être utilisés dans des réseaux de chauffage à distance. Malheu-

reusement cette opération ne représente actuellement qu'un timide 3% de la production d'énergie primaire, y compris la chaleur en provenance des centrales de chauffe (figure 2 en bas). Dans le secteur de la technologie lourde, il est peu vraisemblable à l'avenir de voir des progrès décisifs se réaliser, étant donné les coûts souvent très élevés et difficiles à rentabiliser, ainsi qu'une absence de volonté politique à l'égard du transport de chaleur entre la centrale et l'utilisateur.

Les figures 2 et 3 montrent cependant une amorce de solution intéressante, relevant plutôt de la technologie légère: le couplage chaleur-force (CCF): au niveau de la production de chaleur, ne serait-il pas judicieux d'engager une partie de l'énergie fossile – qui actuellement encore est brûlée dans des chaudières – dans des installations de couplage chaleur-force compactes (CCFC) et de décentraliser ainsi l'utilisation de la chaleur? Cette stratégie offre l'avantage de ne pas surcharger l'environnement, pour autant que la condition suivante soit remplie: un tiers au moins du courant produit doit être engagé dans des amplifications électrothermiques (cf. plus bas), ceci afin de compenser l'énergie fossile utilisée pour la production d'électricité, qui n'est plus disponible à présent pour la production de chaleur. Si plus de ce tiers du courant produit est affecté à l'amplification électrothermique, il en résulte, malgré la production de courant fossile, une nette diminution de la pollution.

Les pompes à chaleur et les installations d'utilisation des rejets thermiques sont des exemples d'amplificateurs électrothermiques (AET) qui font d'une part de courant multiple en chaleur de chauffage. La figure 3 présente une amplification électrothermique de 3,0, valeur moyenne valable à peu près pour toutes les installations.



La stratégie décrite dans les figures 2 et 3 offre cet important avantage: les centrales de couplage chaleur-force compactes et les amplificateurs électrothermiques (par exemple pompes à chaleur) ne doivent pas nécessairement se situer au même endroit. En d'autres termes, les centrales de couplage chaleur-force compactes devraient être construites là où un nombre suffisant d'utilisateurs intéressés peut être réuni, et les pompes à chaleur devraient être installées là où source de chaleur et système de restitution de chaleur fonctionnent de façon optimale.



Vue d'ensemble détaillée, descriptions de techniques plus performantes et stratégies sont présentées au chapitre 3.

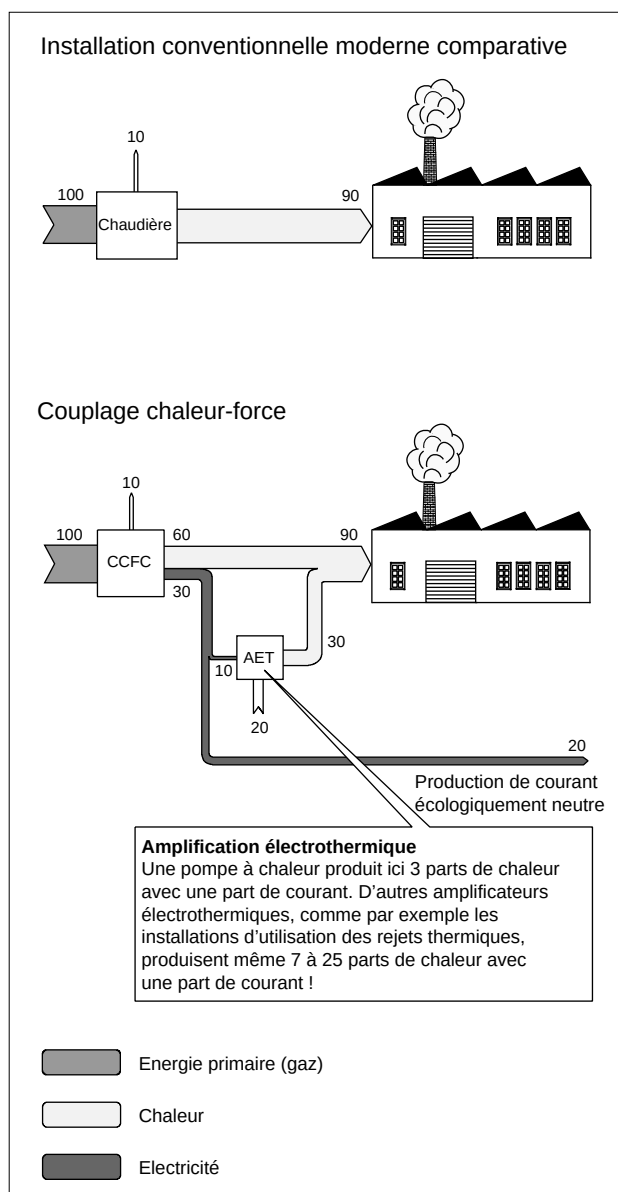


Figure 3: La combinaison couplage chaleur-force avec amplification électrothermique permet une production de courant sans surcharge pour l'environnement: par rapport à une installation moderne conventionnelle on peut, avec 100 unités de gaz, produire 20 unités de courant sans nuire à l'environnement ! Ici on suppose une amplification électrothermique de 3, chiffre souvent atteint dans de bonnes installations de pompes à chaleur. D'autres amplificateurs électrothermiques obtiennent des coefficients encore plus performants.

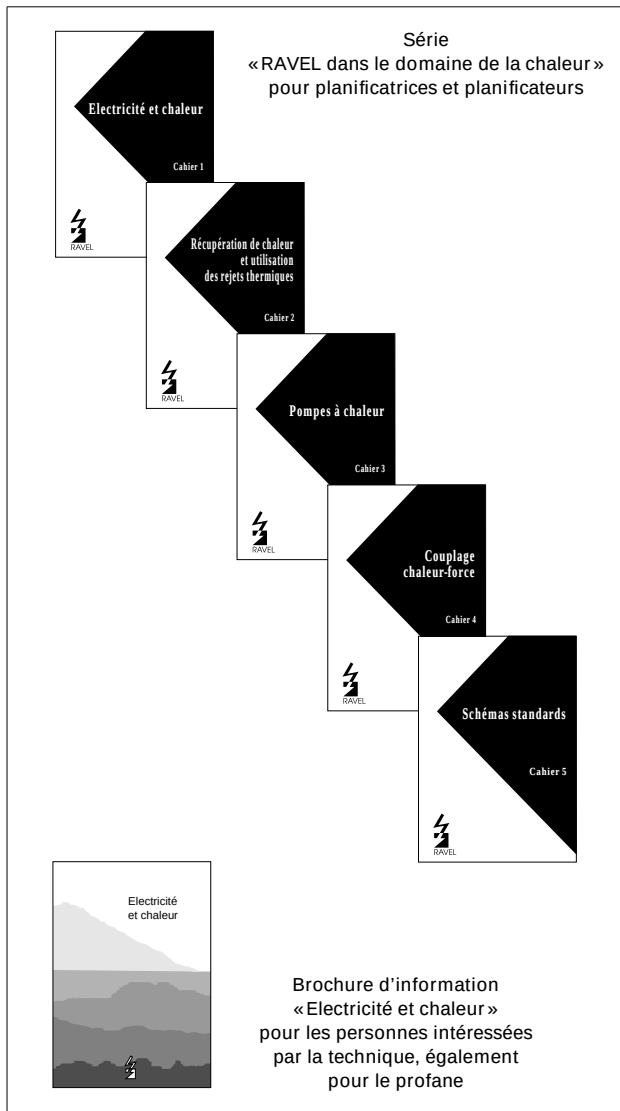


Figure 4 : Publications du secteur « Chaleur ». Elles sont disponibles auprès de l'Office central fédéral des imprimés et du matériel (OCFIM). Les numéros de commande des 5 brochures composant la série se trouvent à la page 2 de chaque cahier. Le numéro de commande de la brochure d'information « Electricité et chaleur » est le 724.354 f.

1.4 Publications du domaine « Chaleur »

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 thermique », « 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 5 cahiers.

- Le présent cahier N° 1 « Electricité et chaleur » définit un ensemble de données fondamentales et décrit les relations entre les trois domaines concernés.
- Le cahier N° 2 « Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques », le cahier N° 3 « Pompes à chaleur » et le cahier N° 4 « Couplage chaleur-force » traitent de la planification, de la construction et du fonctionnement de telles installations, du point de vue de la pratique.
- Le cahier N° 5 « Schémas standards » donne un aperçu des solutions éprouvées sur le plan pratique concernant les trois domaines en question.

Alors que la série des 5 cahiers s'adresse exclusivement aux planificateurs(trices), la brochure d'information « Electricité et chaleur » (figure 4 en bas) intéresse non seulement les spécialistes, mais tous les responsables potentiels de telles installations. Elle fournit un bon aperçu sur l'ensemble des domaines.

2. Transformation de l'énergie

2.1 Cycles thermodynamiques

Cycle de Carnot

Les procédés, dans lesquels la phase d'origine est à nouveau atteinte, après plusieurs changement de phase successifs, sont appelés «cycles thermodynamiques». Toutes les machines chaleur-force fournissant un travail périodique suivent de tels procédés. On a alors une transformation de chaleur en travail mécanique. Les pompes à chaleur, respectivement les machines frigorifiques exécutent le procédé en sens contraire: par l'engagement d'un travail mécanique, on produit de la chaleur, respectivement du froid.

Le physicien Nicolas L. Sadi Carnot (1796-1832) a défini les caractéristiques d'un cycle – en l'occurrence le cycle de Carnot – permettant d'obtenir un rendement maximal. Le rendement maximal possible (machine chaleur-force), respectivement le coefficient de performance le plus élevé (pompe à chaleur, machine frigorifique) du cycle de Carnot sont expliqués à l'encadré 5.

Cycle de la pompe à chaleur, respectivement de la machine frigorifique

A l'aide d'un échangeur de chaleur, une transmission de chaleur peut être effectuée d'un milieu chaud à un milieu froid. Cette opération est facilement compréhensible. En revanche, le phénomène inverse, c'est-à-dire une transmission de chaleur d'un milieu froid à un milieu chaud, moyennant adjonction d'un travail mécanique, est beaucoup plus difficile à assimiler. Ce procédé, en tant que cycle, vaut aussi bien pour les pompes à chaleur que pour les machines frigorifiques. Dans le cas de la pompe à chaleur, la production de chaleur figure au premier plan, tandis que pour la machine frigorifique, le but recherché est la production de froid. Pour mieux comprendre ces phénomènes, le plus simple est de consulter le diagramme pression-enthalpie de la figure 6 (en haut), qui illustre parfaitement la situation. Dans ce graphique, la pression est représentée logarithmiquement et la quantité de chaleur contenue dans le fluide frigorigène est définie par l'enthalpie. Etant donné que seules les différences enthalpiques nous intéressent, le point zéro sur l'échelle peut être défini selon convenance.

Comme fluide frigorigène, on utilise des matières volatiles, dont la température d'évaporation (point d'ébullition) par pression normale est relativement basse. Le fluide frigorigène R22, par exemple, bout à -41°C .

Cycle de Carnot

Dans le cycle de Carnot, le rendement thermique maximal d'une machine chaleur-force est défini par les deux températures-limites entre lesquelles se déroule le cycle:

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

η_c = rendement de Carnot [-]
 T_1 = température maximale [K]
 T_2 = température minimale [K]

Dans le déroulement inverse du cycle de la pompe à chaleur, respectivement des machines de refroidissement, le rendement de Carnot est atteint par la valeur inversée de la formule ci-dessus. Dans ce cas, il faut en outre considérer que le froid est une énergie utilisable:

$$\epsilon_{C, PAC} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\epsilon_{C, MF} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

$\epsilon_{C, PAC}$ = coefficient de performance de Carnot pour la pompe à chaleur [-]
 $\epsilon_{C, MF}$ = coefficient de performance de Carnot de la machine de refroidissement [-]
 T_1 = Température de condensation [K]
 T_2 = Température d'évaporation [K]

Encadré 5

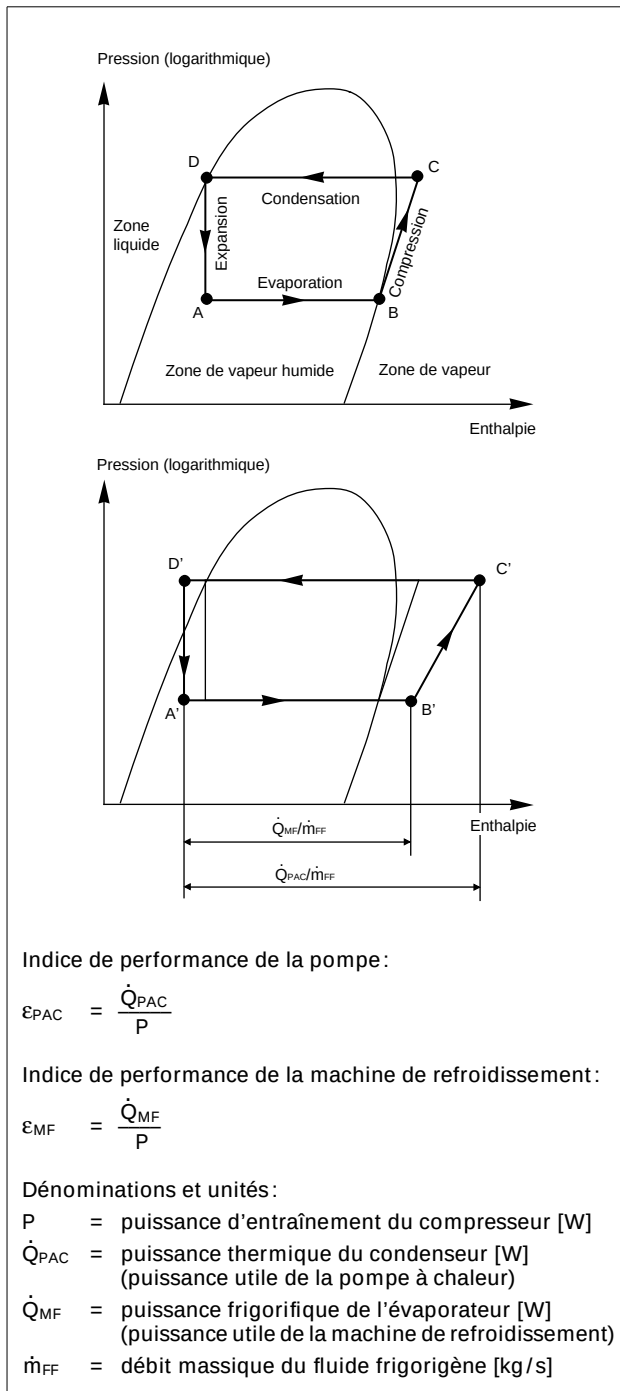


Figure 6: Cycle représenté dans le diagramme pression-enthalpie. Comme enthalpie, on prend ici la quantité de chaleur contenue dans le fluide frigorigène. Selon l'emplacement du point dans le diagramme, le fluide sera sous forme de liquide, de vapeur humide ou de vapeur. Le diagramme du haut reproduit le cycle idéalisé et le diagramme du bas reproduit le cycle réel.

L'évaporation se déroule le long de la ligne A-B, par pression constante du fluide frigorigène. Ensuite, par refroidissement du milieu caloporteur dans l'évaporateur on obtient de la chaleur latente dans le fluide frigorigène; c'est pourquoi la température d'évaporation du fluide frigorigène est constante.

Puis, par le biais de la compression, la vapeur du fluide frigorigène est surchauffée le long de la ligne B-C et « pompée » à un niveau de température supérieur. L'énergie nécessaire à cette opération sera fournie au compresseur sous la forme d'un travail mécanique (par exemple à l'aide d'un moteur électrique).

Au cours de l'étape suivante, qui est la condensation, la chaleur latente de la vapeur surchauffée du fluide frigorigène est transmise, le long de la ligne C-D, au caloporteur du condenseur. Il en résulte tout d'abord une vapeur saturée et ensuite le fluide frigorigène est continuellement liquéfié à température constante.

Au point D, le fluide frigorigène se retrouve certes à l'état liquide, mais la pression et la température sont encore trop élevées. Pour retrouver le point de départ du cycle, une détente (expansion) du fluide frigorigène doit avoir lieu sur la ligne D-A.

Le cycle représenté dans la partie supérieure de la figure 6 est idéalisé. Pour des raisons d'ordre technique, on tend vers une surchauffe au point B et un sous-refroidissement au point D. En outre, on relève des pertes de pression, de chaleur et par frottement mécanique. C'est pourquoi le déroulement réel (figure 6 en bas) diverge du déroulement idéalisé.

Etant donné que l'on utilise la puissance thermique du condenseur pour la pompe à chaleur et la puissance de refroidissement de l'évaporateur pour la machine frigorifique, on obtient évidemment différentes définitions du coefficient de performance (figure 6).

2.2 Valeur de différentes formes d'énergie

Le premier principe de la thermodynamique (encadré 7) est souvent décrit comme étant «la loi de la conservation de la chaleur», car il affirme ni plus ni moins que la somme de toutes les formes d'énergie doit être constante. Ainsi l'énergie ne peut être ni produite, ni détruite. Ne sont possibles, selon ce principe, que des procédés de transformations d'une forme d'énergie à une autre (le terme technique usuel «production d'énergie» devrait alors être remplacé par «transformation d'énergie»), pour que cette notion soit physiquement respectée. Ces affirmations sont relativement faciles à comprendre.

En revanche, le deuxième principe de la thermodynamique (encadré 8) est plus difficilement assimilable. La fin du texte stipule que différentes formes d'énergie ne peuvent pas être transformées entre elles à volonté. En pratique, cela explique par exemple, que pour une turbine à vapeur, le tiers environ de l'énergie engagée peut être transformé en travail mécanique de haute valeur, alors que les deux tiers environ sont des rejets thermiques de moindre valeur, rejetés dans l'atmosphère par les tours de refroidissement (excepté si une installation d'utilisation des rejets thermiques se soit révélée rentable).

Dans le cas contraire et à des fins de chauffage, on peut, au moyen d'une pompe à chaleur électrique, amener de la chaleur environnante à un niveau de température suffisamment élevé, soit 40 à 50 K. Pour cette opération, on utilisera un tiers d'électricité (énergie noble) pour produire, avec deux tiers d'une chaleur environnante de moindre valeur – mais sans frais –, trois tiers d'une chaleur de chauffage de qualité moyenne.

La possibilité de transformer une forme d'énergie déterminée représente certainement un critère de qualité très important. C'est pourquoi d'une façon très générale, on peut parler de valeurs différentes, en comparant diverses formes d'énergie les unes aux autres: l'électricité possède par exemple un critère de qualité nettement meilleur que la chaleur de chauffage.

Aujourd'hui, la comparaison de différentes formes d'énergie ne se réfère en général qu'aux kilowattheures consommés: 1 kilowattheure d'électricité sera par exemple comparé à 1 kilowattheure de chaleur de chauffage. Cette analyse est à la fois trop simple et insuffisante. Une meilleure appréciation, tenant notamment

Premier principe de la thermodynamique

L'expérience montre qu'il n'est pas possible de construire une machine qui délivre davantage d'énergie qu'elle n'en reçoit: impossibilité du mouvement perpétuel de premier ordre. Le premier principe de la thermodynamique peut être formulé ainsi:

La somme de la chaleur extérieure introduite dans un système et du travail mécanique externe introduit dans ce système est égale à l'augmentation de l'énergie interne.

Encadré 7

Deuxième principe de la thermodynamique

Outre l'impossibilité d'un mouvement perpétuel de premier ordre, l'impossibilité d'un mouvement perpétuel de deuxième ordre peut être formulée:

Il n'existe aucune machine capable de produire un travail mécanique continu, en étant reliée à un seul accumulateur de chaleur.

Ou formulé différemment: Il est impossible de transformer intégralement de la chaleur en travail mécanique, alors que l'inverse est toujours possible.

Tout comme le mouvement perpétuel du premier ordre, il s'agit, pour le mouvement perpétuel du deuxième ordre, d'une expérience confirmée. Elle résulte par exemple de la régularité du principe des cycles. Ainsi, le deuxième principe de la thermodynamique peut être formulé aussi bien par rapport à la machine de couplage chaleur-force que par rapport à la pompe à chaleur, respectivement à la machine de refroidissement:

Machine chaleur-force: la chaleur ne peut être transformée en travail mécanique que lorsqu'une partie de la chaleur est transmise simultanément d'un milieu chaud à un milieu froid.

Pompe à chaleur respectivement machine de refroidissement: la chaleur ne peut être transmise d'un milieu froid à un milieu chaud qu'avec un apport de travail mécanique.

Encadré 8

Exergie et Anergie

Pour le cycle de Carnot (cf. encadré 5), on sait que le rendement maximal est défini par les deux températures-limites, dans lesquelles se déroule le cycle :

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_E}$$

Ce rapport décrit parfaitement la partie de courant calorifique qui peut être entièrement transformée en énergie mécanique et qui est appelée courant exergétique :

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

La partie qui ne peut pas être transformée en énergie mécanique est appelée courant anergétique :

$$\dot{Q}_A = T_2/T_1 \cdot \dot{Q}$$

Le courant thermique représente donc la somme du courant exergétique et du courant anergétique :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_E + \dot{Q}_A$$

Dénominations et unités :

η_C = rendement de Carnot [-]

$\dot{Q}$ = courant thermique [W]

$\dot{Q}_E$ = courant exergétique [W]

$\dot{Q}_A$ = courant anergétique [W]

T_1 = température maximale [K]

T_2 = température minimale = température environnante [K]

Encadré 9

compte de la valeur énergétique, doit être appliquée. A cet effet, il existe deux possibilités :

- par des calculs précis de physique (cf. au chapitre 2.3) ;
- par l'établissement de règles générales sous forme de facteurs d'évaluation correspondant à la situation actuelle des techniques de transformation (cf. chapitre 2.4).

2.3 Calcul exact de la valeur du point de vue physique

Exergie, anergie

Comment décrire la valeur d'une forme d'énergie définie ? Une solution nous est offerte (cf. encadré 9) grâce aux notions physiques d'« exergie » et d'« anergie » déterminées avec exactitude comme suit :

- l'exergie est la partie de l'énergie qui peut être transformée en travail mécanique ;
- l'anergie est la partie de l'énergie qui ne peut pas être transformée en travail mécanique.

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

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

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

Une pompe à chaleur permet d'injecter de l'exergie dans la chaleur environnante (= anergie) à l'aide d'une énergie noble (par exemple l'électricité) et obtenir, par ce mélange, un niveau de température plus élevé.

 A l'aide des formules de l'encadré 9, on peut par exemple calculer que, par 0°C de température environnante (273 K), 15% d'exergie seulement sont nécessaires pour produire de l'eau chauffée à 50°C (323 K) :

$$\dot{Q}_E = (1 - 273 \text{ K} / 323 \text{ K}) \cdot \dot{Q} = 0,15 \cdot \dot{Q}$$

L'électricité (100 % d'exergie) est ainsi 6,5 fois plus précieuse qu'une chaleur de chauffage à 50°C (15 % d'exergie).

Rendement exergétique

L'exemple de calcul peut être également interprété différemment : une pompe à chaleur idéale pourrait produire de l'énergie thermique à 50°C, à partir d'une chaleur environnante de 0°C, avec un indice de puissance de 6,5. Il s'agit bel et bien de l'indice de puissance de Carnot, selon encadré 5 :

$$\varepsilon_{C, PAC} = \frac{323}{323 - 273} = 6,5$$

Les expériences pratiques montrent cependant qu'une pompe à chaleur soumise à une telle élévation de température (de l'ordre de 50 K) pourrait probablement atteindre un coefficient de performance de 3,0 ; le « coefficient de performance » d'un chauffage par résistance électrique ne se monterait qu'à 0,9.

Pour être à même de définir les caractéristiques d'une transformation d'énergie, il faut introduire la notion de « rendement exergétique » (cf. encadré 10).



Dans l'exemple qui nous occupe, le rendement exergétique de la pompe à chaleur se monterait à :

$$\xi_{PAC} = 3,0/6,5 = 0,46$$

et pour le chauffage par résistance électrique (accumulateur central avec 50°C de température de départ), le rendement exergétique serait de :

$$\xi_{\text{chauffage électrique}} = 0,9/6,5 = 0,14.$$

Rendement exergétique

La qualité d'une transformation énergétique dépend de la quantité maximale d'énergie qui peut être réellement transformée. Elle sera définie par le rendement exergétique (souvent appelé aussi degré de qualité) :

$$\xi = \frac{\eta}{\eta_C}$$

ξ = rendement exergétique

η = rendement

η_C = rendement de Carnot

$$\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_C}$$

ξ = rendement exergétique

ε = coefficient de performance

ε_C = coefficient de performance de Carnot

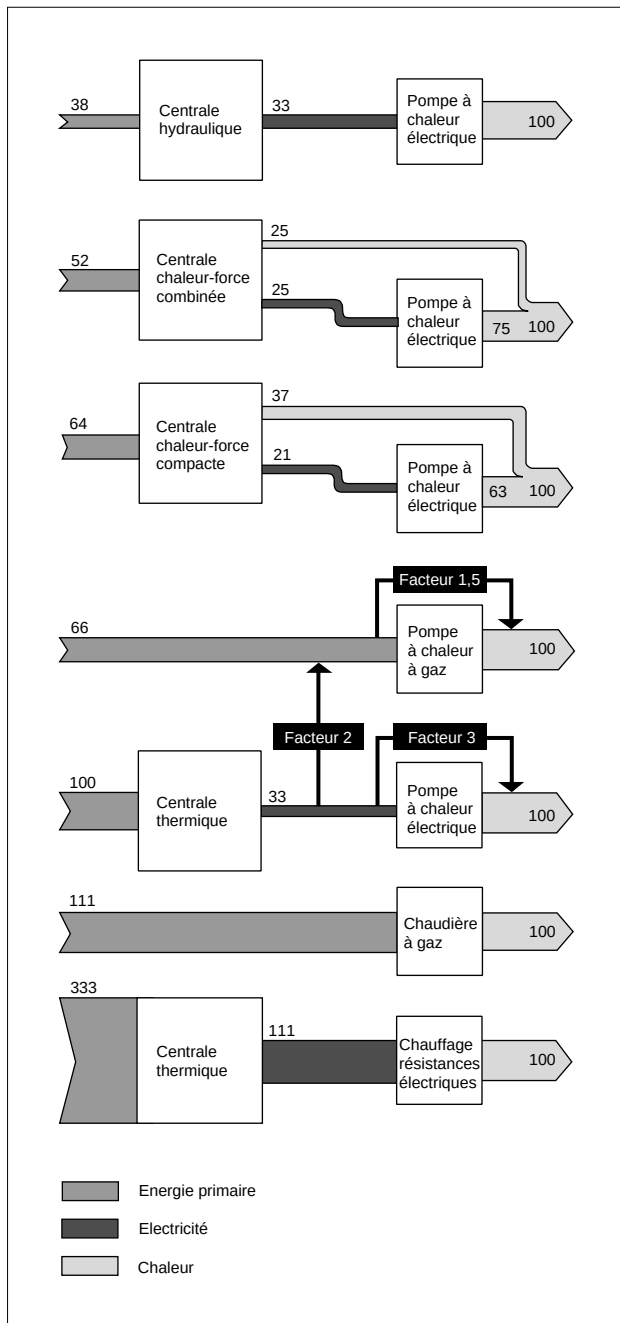
Encadré 10

2.4 Règles générales sous forme de facteurs d'évaluation

Problèmes relatifs à l'utilisation pratique de la notion d'exergie

Les considérations entourant la notion d'exergie sont certes très intéressantes, malheureusement elles représentent parfois des obstacles dans l'exercice de la pratique :

- pour les spécialistes en technique du bâtiment, les notions d'exergie et d'anergie sont pratiquement inconnues ;
- les rendements exergétiques réalisables en pratique sont très variés et divergent fortement des notions théoriques ;
- en pratique, la notion exergétique ne tient pas compte de certains aspects aussi importants que les emplacements et les horaires.



Figures 11 : Les différentes formes d'énergie et leur valeur sont très diversement utilisées par les techniques actuelles de production de chaleur.

Par conséquent, la question est de savoir s'il n'est pas plus judicieux pour les praticiens et les praticiennes d'établir de simples règles générales sur les notions de valeurs des formes énergétiques les plus importantes, plutôt que de s'encombrer de fastidieuses formules.

Etat de la technique

Si l'on considère aujourd'hui les techniques de production de chaleur à disposition (figure 11), il ressort que la qualité de la transformation de l'énergie est très diverse. Pour produire 100 unités de chaleur, la consommation d'énergie primaire peut passer – selon les techniques de transformation – de 38 à 333 unités.

La figure 11 propose également les techniques les plus performantes de transformation de chaleur actuellement disponibles et utilisables dans une très large mesure. Ce sont :

- la pompe à chaleur électrique qui, par le biais de l'électricité, multiplie par trois la chaleur de chauffage ;
- la pompe à chaleur avec moteur à gaz qui, par le gaz, multiplie par 1,5 la chaleur de chauffage ;
- l'installation de couplage chaleur-force compacte, combinée à une pompe à chaleur électrique, atteint le même facteur d'amélioration de 1,5 (ici le couplage mécanique de la pompe à chaleur avec moteur à gaz est remplacé par le couplage électrique) ;
- il ressort des affirmations émises jusqu'ici que l'électricité est environ 2 fois plus précieuse qu'un combustible fossile tel que le gaz ou les produits pétroliers (réciproquement la même valeur apparaît d'ailleurs aussi dans les installations chaleur-force combinées).

Facteurs d'évaluation

A l'aide de la figure 11, des facteurs d'évaluation évidents, définis au plus près de la pratique et reflétant les technologies et la rentabilité actuelles, peuvent par conséquent être établis :

- ➡ La valeur de l'électricité est environ trois fois plus importante que celle de la chaleur de chauffage.
- ➡ La valeur du gaz ou du mazout est environ une fois et demie plus élevée que la chaleur de chauffage.
- ➡ La valeur de l'électricité est environ deux fois plus élevée que celle du mazout ou du gaz.

2.5 Amplification électrothermique

Dans le secteur de la chaleur, la même question revient régulièrement : quelle quantité de chaleur puis-je produire avec une quantité d'électricité déterminée ? Le fait que d'autres formes d'énergie soient associées à cette question (chaleur environnante, rejets thermiques, etc.) ne joue aucun rôle, si ces dernières ne provoquent pas de frais supplémentaires et sont obtenues en respectant l'environnement. C'est pourquoi il semble judicieux de définir une sorte de « boîte noire » ayant une grandeur d'entrée « électricité » et une grandeur de sortie « énergie thermique », que l'on pourrait tout simplement nommer « amplificateur électrothermique » (voir figure 12). Cet amplificateur électrothermique sera caractérisé par l'indice amplification électrothermique AET et défini comme suit :

$$AET = \frac{\text{chaleur produite par substitution de combustible fossile}}{\text{besoins électriques supplémentaires découlant de cette substitution}}$$

De manière encore plus générale, on pourrait qualifier la pompe à chaleur avec moteur électrique d'amplificateur électrothermique défini par :

$$AET_{PAC} = 3$$

(à l'aide du courant électrique, on produit 3 fois plus de chaleur de chauffage).

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

- Avec l'électricité comme énergie d'appoint injectée dans la récupération de chaleur ou l'utilisation des rejets thermiques, on obtient sans problème des facteurs d'amplification électrothermiques allant de 7 à 25.
- Des installations modernes de renouvellement d'air obtiennent des facteurs d'amplification électrothermiques de l'ordre de 5 à 10.
- Des véhicules électriques légers utilisent pour la même distance 5 à 10 fois moins d'énergie qu'une voiture normale. L'économie d'énergie fossile ainsi réalisée correspond à un facteur d'amplification électrothermique

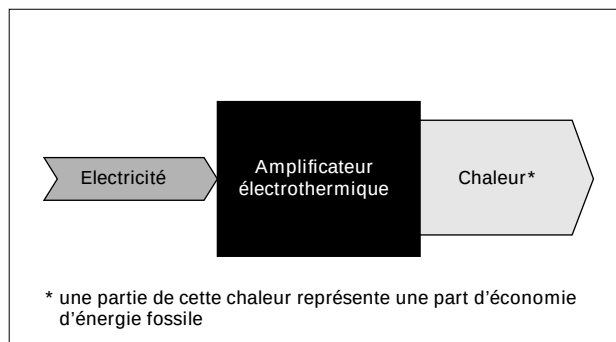


Figure 12: Amplificateur électrothermique.

de 5 à 10 (la comparaison avec un véhicule léger à moteur à combustion donne toutefois des valeurs plus basses).

- Les meilleurs amplificateurs électrothermiques sont les installations solaires. Une installation de collecteurs solaires pour le chauffage de l'eau avec circulateur a, par exemple, une amplification électrothermique d'environ 100 et une installation de thermosiphon obtient un même facteur tendant vers l'infini !

3. Techniques énergétiques efficaces

Une description détaillée de chacune des techniques est développée dans les cahiers 2 à 4 spécifiques à chaque thème. Ici, les techniques ne seront décrites que si les explications sont absolument nécessaires à la bonne compréhension du sujet.

3.1 Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques

Fonctionnement

En considérant le flux thermique dans un système défini, nous trouvons deux formes fondamentalement différentes d'utilisation des rejets thermiques. Ces derniers peuvent être employés à l'intérieur du système ou en élargissant les limites du système. Dans le premier cas, on parle de récupération de chaleur (figure 13) et dans le deuxième cas, d'utilisation des rejets thermiques (figure 14).

Composants et domaines d'application

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

Les échangeurs de chaleur sont parcourus par des fluides caloporteurs (gazeux ou liquides). Des processus physiques de transmission de chaleur par conduction et par convection interviennent. En cas de modification de phase, de la chaleur latente, respectivement de la chaleur sensible est libérée. L'échange de chaleur peut se faire directement (récupérateur) ou par accumulation temporaire dans un certain milieu (régénérateur). La figure 15 nous montre différents exemples représentatifs d'échangeurs de chaleur.

L'échangeur de chaleur à plaques (« récupérateur ») est composé de surfaces de séparation perméables à la chaleur, mais non à la matière. La transmission de chaleur s'effectue directement à travers les surfaces de séparation. Il existe plusieurs types d'échangeurs : à plaques, à double manteau, tubulaires, etc. L'échangeur peut se présenter comme un composant séparé ou faire partie intégrante de l'installation.

Si le système se compose d'échangeurs de chaleur reliés par un circuit caloporteur fermé, pour l'accumulation et le transfert de chaleur, on parle d'échangeur de chaleur à fluide intermédiaire (régénérateur).

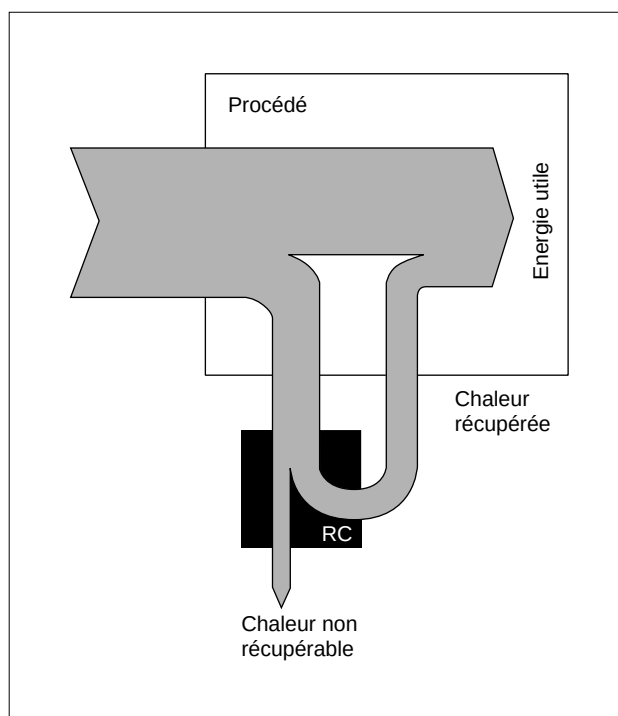


Figure 13 : La récupération de chaleur (abréviation RC) permet, dans un procédé ou une installation quelconque, la récupération de l'excès de chaleur réutilisable et la réinjection de cette énergie dans le même procédé ou la même installation sans décalage de temps. Par cette mesure, on améliore le coefficient d'efficacité de l'installation. Le système offre l'avantage de voir la quantité d'énergie récupérée croître proportionnellement aux besoins thermiques.

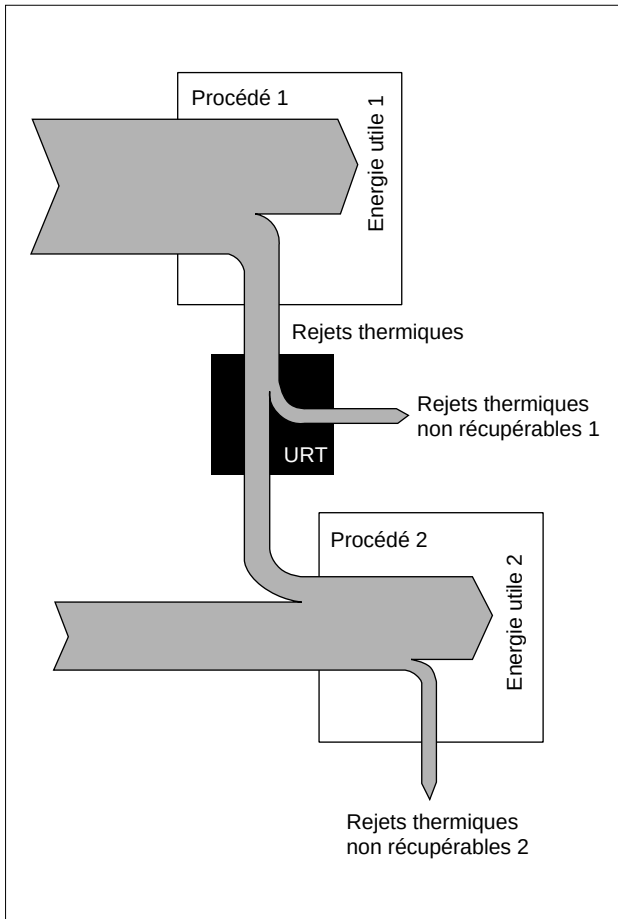


Figure 14: L'utilisation des rejets thermiques (abréviation URT) permet, dans un procédé ou une installation, la récupération de l'excès de chaleur réutilisable et l'injection de cette énergie dans d'autres procédés ou installations en même temps ou avec des décalages horaires considérables. Sur une installation isolée, on n'attend aucune amélioration du coefficient d'efficacité. Par contre, sur plusieurs installations interconnectées, le rendement énergétique est meilleur. Dans l'utilisation des rejets thermiques, il faut s'assurer que l'offre et la demande de chaleur coïncident dans le temps ou alors que la chaleur puisse être stockée dans un accumulateur de chaleur. Pendant toute la durée de la consommation de chaleur, la source de chaleur doit être disponible, afin que les investissements puissent être amortis.

Si le circuit fermé intermédiaire est formé d'un accumulateur rotatif, on a affaire à un échangeur de chaleur rotatif (régénérateur à surfaces de contact). La charge et la décharge périodiques de la masse d'accumulation en chaleur et en vapeur s'effectue sans mélange des fluides froids et chauds, sur les surfaces de contacts. En ce qui concerne la pompe à chaleur, l'échange de chaleur exige de l'énergie supplémentaire pour l'élévation de température (cf. chapitre 3.2). La qualité de la source de chaleur détermine le choix et les conditions de fonctionnement de la pompe à chaleur. Le cycle de la pompe à chaleur peut faire partie d'une machine autonome ou être intégré dans un processus industriel. Se rapportant à RAVEL et son utilisation rationnelle de l'électricité, on distingue les quatre principaux domaines d'application suivants:

- Production d'électricité par les rejets thermiques à haute température: dans l'industrie, la température des rejets thermiques est souvent si élevée, qu'il est possible de produire tout d'abord du courant électrique à l'aide de turbines à vapeur et ensuite de réaliser encore une utilisation des rejets thermiques à un niveau de température plus bas.
- Utilisation de rejets thermiques provenant d'installations électriques: l'entraînement électrique de grosses machines ou d'appareils (centre de calcul, transformateur) entraîne souvent des rejets thermiques importants dont l'utilisation s'avère rentable. Ce n'est malheureusement pas le cas pour la mise en valeur de rejets thermiques issus de nombreux petits appareils, qui nécessiteraient d'importantes dépenses.
- Substitution de procédés électrothermiques par l'utilisation de rejets thermiques: les procédés utilisant de basses températures (applications domestiques, préchauffage, etc.) conviennent souvent à la mise en valeur des rejets thermiques. Le réchauffement de l'eau sanitaire par rejets thermiques est un bon exemple de substitution de l'électricité.
- Utilisation rationnelle de l'électricité comme énergie d'appoint dans les installations RC et URT: les composants supplémentaires indispensables à la transmission et au transport de chaleur (pompes, ventilateurs etc.) utilisés dans les installations thermiques conduisent à un besoin accru en électricité. L'adjonction d'échangeurs de chaleur supplémentaires augmente les pertes de charges; il s'ensuit alors un accroissement de la consommation électrique des ventilateurs et des pompes. Afin

d'obtenir la meilleure amplification électrothermique possible, les moteurs, pompes et ventilateurs devront atteindre un rendement optimal.

Les quatre domaines d'application décrits ci-dessus ne doivent toutefois pas être pris dans un sens trop étroit, c'est-à-dire pas seulement en regard d'utilisations purement électriques: l'économie d'énergie thermique aussi – particulièrement lorsqu'elle est d'origine fossile – est fermement préconisée par RAVEL.

Caractéristiques techniques importantes

Dans les nouvelles installations techniques de ventilation, la récupération de chaleur fait partie des technologies habituelles et, dans certains cantons, elle est même soumise à des prescriptions légales. Dans ce contexte, c'est surtout le rendement défini en fonction de température (ou rendement de récupération de chaleur) qui est important, car il donne le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie maximale récupérable. Valeurs typiques relatives à la figure 15:

- échangeur de chaleur à plaques 0,40 à 0,60
- échangeur de chaleur à fluide intermédiaire 0,40 à 0,70
- échangeur de chaleur rotatif 0,50 à 0,75

Une autre sujet intéresse spécialement RAVEL: l'amplification électrothermique. Le besoin énergétique supplémentaire nécessaire à l'entraînement et à la compensation des pertes de charge se situent à environ 4 à 15% de la chaleur récupérée. Cela correspond à une amplification électrothermique de 7 à 25.

3.2 Pompes à chaleur

Fonctionnement

Une transmission de chaleur faite uniquement avec un échangeur de chaleur n'est possible que si la température de la source de chaleur est plus élevée que celle à délivrer. Mais l'énergie d'une source de chaleur à plus basse température peut être utilisée à l'aide d'une pompe à chaleur (abréviation: PAC) qui, en «pompant», relève le niveau de la température. Avec l'aide d'une énergie noble (par exemple l'électricité), il est notamment possible d'élever une chaleur d'un niveau de température bas à un niveau plus élevé (application du cycle thermodynamique de Carnot présenté au paragraphe 2.1).

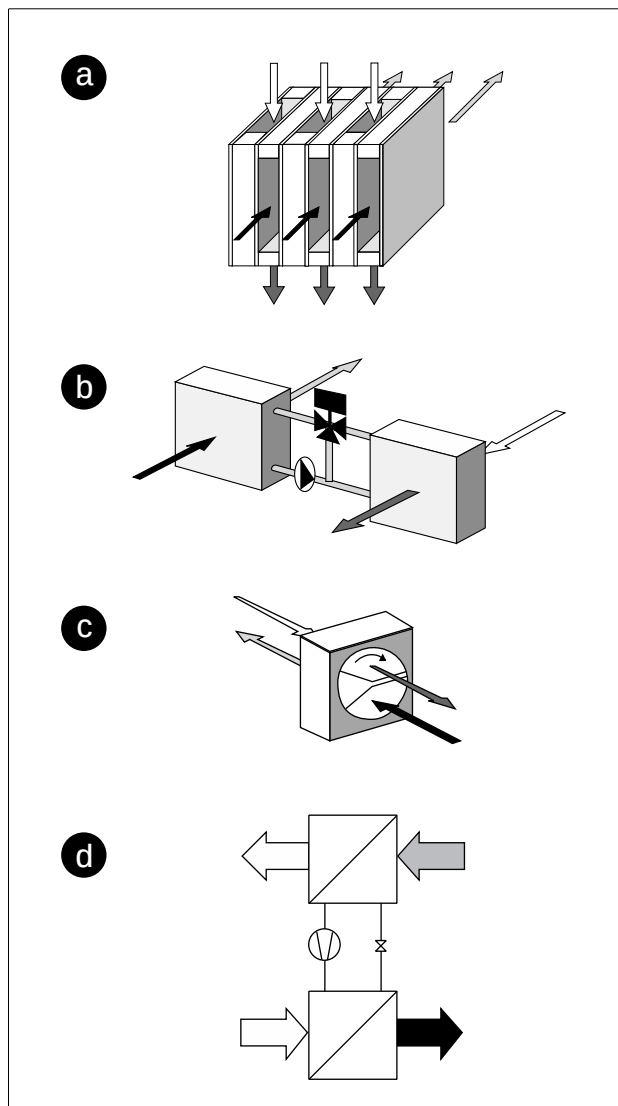


Figure 15: Modèles d'échangeurs:
a) Échangeur de chaleur à plaques.
b) Échangeur de chaleur à fluide intermédiaire.
c) Échangeur de chaleur rotatif.
d) Pompe à chaleur.

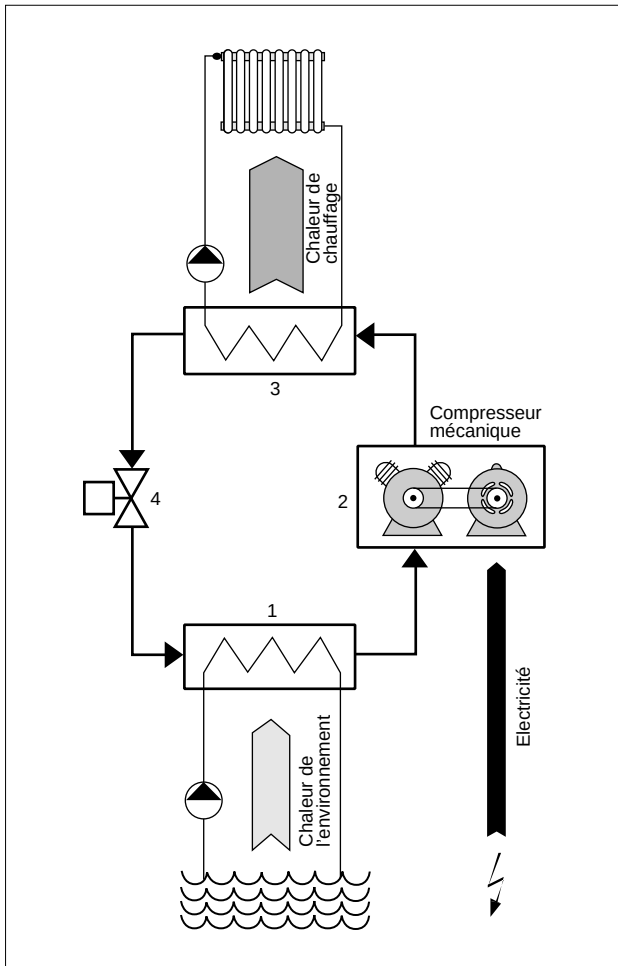


Figure 16: Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à compression. Par l'intermédiaire de l'évaporateur (1), la source de chaleur porte le fluide frigorigène à ébullition à basse température. La vapeur ainsi obtenue est comprimée dans le compresseur (2), ce qui a pour effet d'augmenter fortement la température du fluide. La chaleur à haute température ainsi obtenue peut être transmise au travers du condenseur (3) à l'eau de chauffage. Le fluide frigorigène reprend alors son état liquide. Dans la vanne de détente (4), ce fluide est ramené à pression basse et le cycle peut recommencer.

Composants et domaines d'application

La pompe à chaleur à compression, dont le fonctionnement est décrit à la figure 16, est actuellement le système le plus répandu pour l'opération décrite ci-dessus. L'entraînement des pompes à chaleur à compression est assuré aujourd'hui principalement par des moteurs électriques; pour des pompes à chaleur de plus gros calibre, on a recours aussi à des moteurs Diesel ou à gaz. Lorsqu'on parle de compresseurs mécaniques, on pense surtout à des compresseurs à piston; pour des installations plus importantes, on aura recours à des compresseurs à vis ou à des turbocompresseurs. Le compresseur Scroll (compresseur à spirales) représente une des principales nouveautés et permet l'entraînement par moteur électrique à vitesse variable.

À côté des compresseurs mécaniques, il existe les compresseurs thermiques utilisés dans les pompes à chaleur à absorption. Ces dernières travaillent à l'aide de deux matières: le fluide frigorigène propre et le fluide d'absorption (figure 17). L'énergie à haute valeur est amenée par de la chaleur à haute température (par exemple rejets thermiques). Le fonctionnement de la pompe à chaleur à absorption exige très peu d'énergie électrique. Les pompes à chaleur utilisent principalement des fluides frigorigènes de type «R 22», ce qui limite la température de départ chauffage à un maximum de 50°C. Seuls les systèmes d'apport thermique à basse température remplissent cette condition durant toute la période de chauffage: ce sont principalement les chauffages par le sol et par le plafond. De nouveaux radiateurs, utilisables à basse température, sont aussi apparus sur le marché. Les radiateurs conventionnels ne remplissent que très rarement ces exigences (d'anciennes installations fortement surdimensionnées fonctionnent entre 55 et 65°C et dépassent malheureusement de peu la limite des 50°C). Dans ce cas également, un chauffage avec pompe à chaleur est possible pendant la plus grande partie de l'année, pour autant que l'on dispose, pour le peu de jours nécessitant une température de fonctionnement de plus de 50°C, d'un deuxième générateur de chaleur fonctionnant avec un autre agent énergétique (fonctionnement bivalent).

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

- pompes à chaleur eau / eau pour sources de chaleur en dessous de 0°C (par exemple nappe phréatique, eau de surface, eau usée);

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

Les installations de pompes à chaleur dont la source de chaleur offre une puissance plus ou moins constante, et devant fournir un apport d'énergie thermique à basse température, ont la plupart du temps un mode de fonctionnement de type monovalent, sans deuxième producteur de chaleur. Lorsque la source de chaleur est fortement dépendante de la température extérieure (par exemple air extérieur) et lorsque les systèmes d'apport d'énergie thermique accusent des températures de départ dépassant 50°C, un système bivalent avec un deuxième générateur de chaleur s'avère nécessaire.

Les pompes à chaleur de chauffage peuvent aussi servir au chauffage de l'eau sanitaire. Pour le chauffage de l'eau uniquement, il existe des pompes à chaleur/boilers (plus correctement: pompes à chaleur/chauffe-eau). Celles-ci soutirent la chaleur d'une pièce non chauffée et utilisent ainsi deux à trois fois moins de courant qu'un chauffe-eau électrique conventionnel. La chaleur étant intentionnellement soutirée du local, il faudra veiller à ne pas la réintroduire malencontreusement par le chauffage !

Caractéristiques techniques importantes

La pompe à chaleur est l'amplificateur électrothermique par excellence. Le rapport entre l'électricité engagée et la quantité de chaleur utilisable dépend au minimum des trois conditions suivantes :

- limite de bilan ;
- temps d'observation ;
- écart de température entre la source de chaleur (température à l'entrée de l'évaporateur) et le chauffage (température à la sortie du condenseur).

Le coefficient de performance (respectivement COP) définit une valeur momentanée basée sur une courte durée et soumise à des conditions-limites déterminées, associée à la pompe à chaleur. Il permet de comparer entre eux les composants de la pompe à chaleur, mais dévoile peu de choses sur l'installation de la pompe à chaleur elle-même.

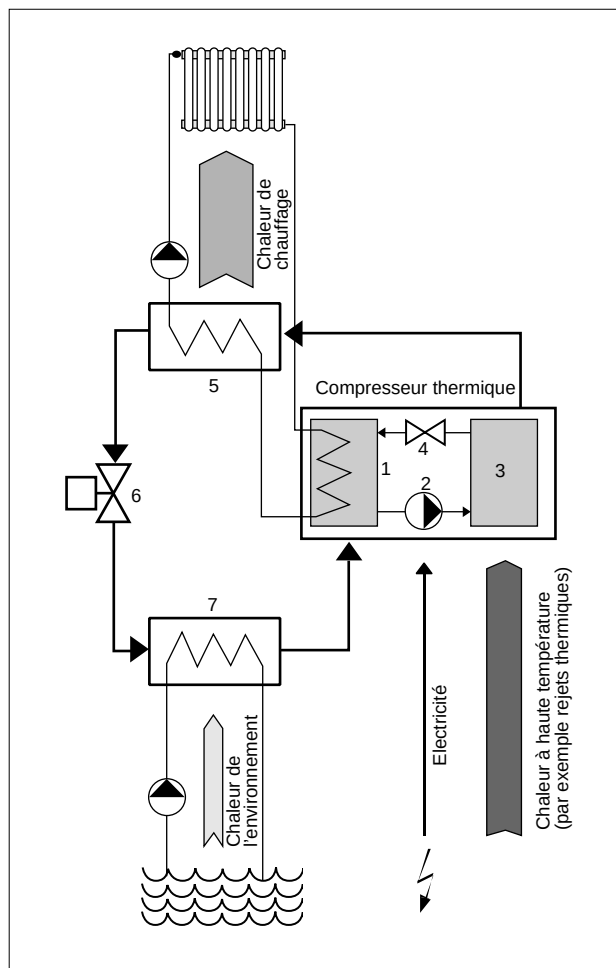


Figure 17: Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à absorption. Dans l'absorbeur (1), le fluide frigorigène est absorbé par le fluide d'absorption. Là, la chaleur est ainsi transmise une 1re fois au chauffage. La pompe (2) injecte le mélange des solutions sous pression dans le concentrateur (3) d'où, avec adjonction de chaleur, le fluide est à nouveau évacué. Le liquide d'absorption a rempli son rôle de compresseur thermique et traverse de nouveau la vanne de détente pour arriver dans l'absorbeur (1). Le cycle du second fluide se poursuit presque de la même façon que celui de la pompe à chaleur à compression (figure 16): apport thermique au chauffage dans le condenseur (5), dilatation dans la vanne (6) et prise de chaleur de moindre valeur dans l'évaporateur (7).

Source de chaleur Mode de fonctionnement Utilisation	Coefficient de performance annuel
Nappe phréatique, monovalent – utilisation directe – utilisation indirecte	3,0 à 3,5 2,8 à 3,3
Eaux de surface, monovalent, utilisation indirecte	2,6 à 3,1
Eaux usées, monovalent, utilisation indirecte	2,9 à 3,4
Sous-sol, monovalent – serpentins – sondes géothermiques	2,6 à 2,9 2,8 à 3,1
Air extérieur – villa individuelle, monovalent – bivalent-parallèle – bivalent-alternatif	2,0 à 2,5 2,3 à 2,7 2,5 à 2,9

Tableau 18: valeurs-cible pour rendement annuel global de pompes à chaleur électriques valables pour des sources de chaleur situées sur le Plateau suisse avec restitution de chaleur à basse température pour des installations monovalentes. Lors d'une utilisation directe, la source de chaleur passe directement par l'évaporateur; lors d'une utilisation indirecte, on trouve un circuit intermédiaire.



Figure 19: Centrale de chaleur-force combinée de « Merwedekanaal » près d'Utrecht en Hollande avec une puissance électrique de 225 MW.

L'indice le plus important pour l'installation d'une pompe à chaleur est le coefficient de performance annuel. Il définit le rapport entre la chaleur extraite et l'énergie introduite. La durée d'observation est d'une année et la limite de bilan comprend: prestation de la source de chaleur, pompe du condenseur, commande/régulation, système de dégivrage, chauffage carter et stockage. Le tableau 18 donne les valeurs possibles pour les pompes à chaleur à moteur électrique par rapport aux techniques actuelles (pour les pompes à chaleur à moteur à gaz, les coefficients annuels réalistes sont environ 1,5, et 1,3 pour les pompes à chaleur à absorption).

Comme valeur pour l'amplification électrothermique on peut utiliser en pratique et avec suffisamment de précision le coefficient de performance annuel. Il ressort du tableau 18 qu'un coefficient de performance annuel proche de 3,0 est possible pour les pompes à chaleur à moteur électrique. Si l'on admet en outre que des améliorations techniques sont toujours possibles et que d'autres amplificateurs électrothermiques indiquent des valeurs dépassant de beaucoup 3,0, RAVEL n'exagère pas en déclarant une amplification électrothermique de 3,0 valable pour toutes les installations.

3.3 Couplages chaleur-force

Fonctionnement

Le transport de chaleur étant beaucoup plus cher que le transport de l'électricité, les rejets thermiques des grandes centrales électriques se perdent la plupart du temps dans la nature. Une utilisation économiquement rentable des rejets n'est possible que si l'on trouve aux abords de la centrale des utilisateurs intéressés en nombre suffisant. On peut dès lors se demander s'il ne serait pas judicieux de décentraliser une partie de la production électrique, afin de se rapprocher des consommateurs de chaleur.

Cette solution s'appelle: couplage chaleur-force (abréviation: CCF). Au premier plan y figurent les installations de couplage chaleur-force compactes (abréviation: CCFC) avec moteurs à combustion ou turbines à gaz, générateurs et échangeurs de chaleur assemblés en un seul bloc. Ainsi, en plus de la chaleur, de l'électricité d'une plus grande valeur énergétique peut être produite.

Types de construction et domaines d'application

Les installations de couplage chaleur-force peuvent être des centrales chaleur-force établies dans des quartiers citadins, la chaleur étant distribuée par un réseau de chauffage à distance aux maisons environnantes et l'électricité alimentant le réseau public. Ici les centrales chaleur-force combinées (figure 19) sont particulièrement intéressantes : au moyen d'une combinaison turbine à gaz/turbine à vapeur, on peut atteindre un rendement électrique particulièrement important (environ 50%). Les grandes exploitations industrielles se prêtent fort bien à ce genre de centrales combinées.

Pour le couplage chaleur-force, l'industrie présente une certaine importance, puisqu'aussi bien électricité que chaleur sont utilisées souvent sur les lieux mêmes. Suite à l'aggravation des émissions polluantes, de nombreuses installations industrielles devront subir un prochain assainissement. Au vu des conditions-limites favorables, les installations de couplage chaleur-force compactes avec turbines à gaz (figure 20) sont spécialement indiquées pour la production de chaleur industrielle (eau bouillante, vapeur).

Dans les secteurs « ménages » et « services », on installe encore et surtout des chaudières à mazout et à gaz pour la production de chaleur. Les installations de couplage chaleur-force compactes avec moteur à gaz (figure 21) représentent ici une alternative intéressante, pour autant que les conditions soient favorables (chauffage d'un grand complexe de bâtiments ou raccordement d'un lotissement voisin par chauffage à distance). Comme combustible on prendra, en tout premier lieu, le gaz naturel ; mais le biogaz (station d'épuration) et le gaz liquide sont aussi envisageables. Les installations avec moteur à gaz sont aujourd'hui, grâce au catalyseur à 3 voies, aussi peu polluantes que les chaudières à gaz équipées d'un système Low-NOx.

Pour des installations électriques de moindre importance (environ 5 à 15 kW), il existe de petites installations de couplage chaleur-force compactes avec moteur d'automobile à gaz relativement faciles à installer (figure 22). Elles sont dotées d'un catalyseur à 3 voies et peuvent être interconnectées pour de plus grandes puissances. Toutefois l'entretien en est relativement onéreux, étant donné que le moteur de voiture doit être totalement révisé ou changé tous les cinq ans environ (échange standard).

En principe, une installation de couplage chaleur-force peut être asservie aux besoins thermiques ou aux

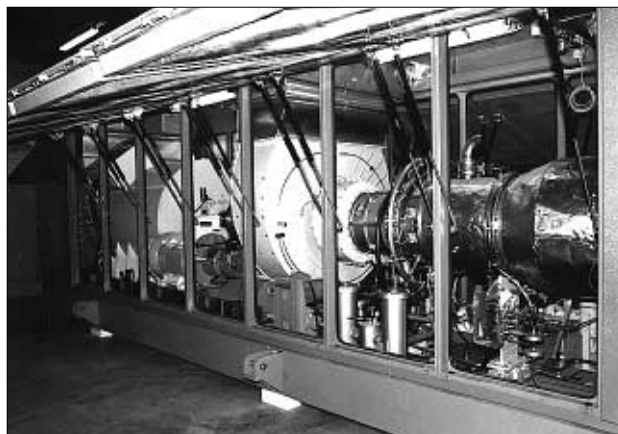


Figure 20: Installation de couplage chaleur-force compacte avec turbine à gaz ; turbine à gaz (droite) et générateur (gauche) sont construits en « bloc ».

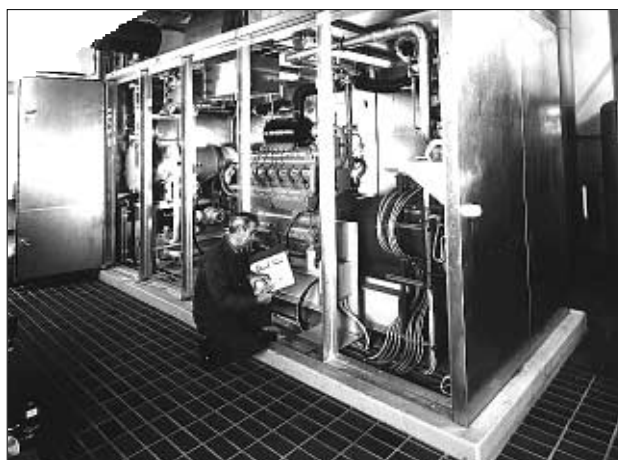


Figure 21: Installation de couplage chaleur-force compacte avec moteur à gaz, à Dietikon. Moteur à gaz (milieu), générateur (droite) et échangeur de chaleur (gauche) sont coiffés d'un caisson phonique commun.



Figure 22: Quatre petites installations de couplage chaleur-force avec une puissance électrique de 4 X 15 kW donnent ensemble une puissance de chauffage de 156 kW.

besoins électriques. Cependant seul le fonctionnement en tant que générateur de chaleur est plus judicieux du point de vue énergétique, c'est-à-dire que l'installation doit fonctionner selon les besoins thermiques du moment. Le rôle de la chaleur ne doit donc pas être négligé. C'est pourquoi il faudrait admettre l'asservissement aux besoins thermiques dans le déroulement de la planification.

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

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

Pour des raisons économiques, on recherchera un fonctionnement annuel de l'installation de couplage chaleur-force le plus long possible (plus de 4000 h/a), ainsi l'installation ne sera pas dimensionnée en fonction des besoins calorifiques maximaux, mais une chaudière d'appoint servira à couvrir les pointes de puissance par temps froid. Par rapport à un besoin calorifique de 100%, selon les normes SIA 384/2, la puissance thermique de l'installation CCF seule est évaluée de 25 à 35%, ce qui permet de couvrir 60 à 75% des besoins thermiques annuels.

Caractéristiques techniques importantes

En général, la valeur de transformation de l'énergie est exprimée à l'aide du rendement global qui représente le rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie fournie. Le rendement global annuel relatif à différents systèmes est mentionné au tableau 23. Le rendement global étant normalement calculé en Suisse par rapport au pouvoir calorifique inférieur, des valeurs supérieures à 1 sont possibles (valeur-limite théorique pour le gaz naturel: 1,11). Le rendement global d'une installation de couplage chaleur-force est à peine meilleur que celui d'une installation conventionnelle. La différence décisive provient du fait que l'énergie disponible – grâce à la production d'électricité – est alors plus précieuse. C'est

pourquoi on indique souvent un rendement global annuel thermique et électrique. La somme de ces deux rendements donne le rendement global annuel «tout inclus».

Pour une comparaison concrète, il ne faut prendre en considération qu'un seul chiffre caractéristique. C'est dans ce but que le tableau 23 indique un rendement global annuel pondéré. Cette valeur correspondrait à une installation où le courant produit servirait uniquement à faire fonctionner un amplificateur électrothermique dont le coefficient d'amplification de 3,0 pourrait transformer le courant en chaleur (par exemple une pompe à chaleur électrique). Ce chiffre démontre clairement qu'une installation de CCF équipée d'un moteur à gaz, par exemple, utilise l'énergie à disposition une fois et demie mieux que la chaudière la plus moderne !

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

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

Tableau 23 : Rendement global annuel de différentes installations de production de chaleur.

3.4 Répercussions sur la consommation énergétique et la production de dioxyde de carbone

Stratégies

Le couplage chaleur-force combiné avec les pompes à chaleur électriques peut amener, par l'utilisation appropriée des différentes valeurs des formes d'énergies, une économie d'énergie primaire et un plus grand respect de l'environnement. Les bilans énergétiques de la figure 24 montrent trois cas limites typiques comparés à une installation conventionnelle A. Pour des raisons de clarté, on a admis des pompes à chaleur avec des rendements globaux annuels de 3,0.

Cas limite B : un respect maximal de l'environnement est atteint, si tout le courant du CCF sert à actionner des pompes à chaleur. Le fait que ces pompes à chaleur appartiennent ou non à cette installation ne joue aucun rôle. Résultat : 40 % de consommation d'énergie primaire en moins et abaissement proportionnel des éléments polluants et du dioxyde de carbone.

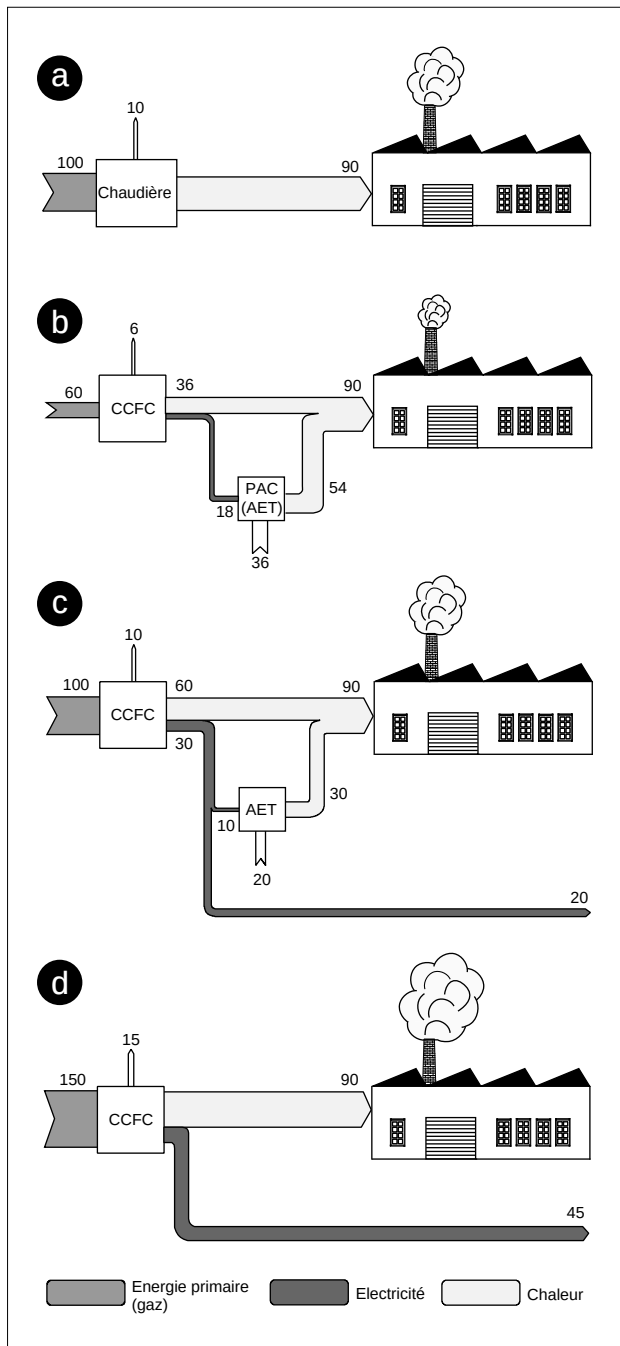


Figure 24 : Bilans énergétiques (à comparer avec figure 25).
a) Installation moderne conventionnelle de référence.
b) Respect maximal de l'environnement.
c) Production maximale de courant neutre pour l'environnement.
d) Production maximale de courant.

Cas limite C : une production électrique maximale sans surcharge pour l'environnement est possible, si un tiers environ du courant provenant du CCF sert à actionner des pompes à chaleur. Résultat : avec la même consommation d'énergie primaire et sans atteintes supplémentaires à l'environnement par des émissions polluantes et du dioxyde de carbone, les deux tiers du courant obtenu par le CCF sont mis à disposition de l'approvisionnement général, ce qui correspond à 20 % environ de l'énergie primaire utilisée. Le paradoxe réside dans le fait qu'une production de courant à « tarif écologique zéro » est possible et ceci malgré l'utilisation d'énergie primaire fossile !

Cas limite D : si l'on doit produire beaucoup d'électricité sans renoncer au chauffage, l'énergie engagée peut atteindre 150 % au maximum. Résultat : production électrique maximale de 45 %, avec évidemment 50 % de plus d'énergie primaire et une augmentation correspondante des émissions polluantes et du dioxyde de carbone. Cette stratégie n'a de sens que pour la substitution des centrales thermiques sans couplage de chaleur, puisque ces dernières, pour produire la même quantité d'électricité, utilisent deux à trois fois plus d'énergie et polluent beaucoup plus qu'une installation avec couplage chaleur-force.

Il est évident qu'en réalité, aucune installation ne correspondra exactement à l'un des trois cas cités plus haut. Le plus souvent, nous trouverons une combinaison de deux des trois cas. La figure 25 présente deux variantes possibles, fondamentalement différentes :

- si plus d'un tiers du courant du CCF est injecté pour alimenter des amplificateurs électrothermiques (par exemple pompes à chaleur), on adopte une stratégie de protection de l'environnement. La valeur accordée à la sauvegarde de l'environnement et la quantité d'électricité produite sans surcharges sur l'environnement sont à mettre en balance ;
- si moins d'un tiers du courant produit par le CCF est injecté pour alimenter des amplificateurs électrothermiques, il en résulte une stratégie de production électrique par énergie fossile produisant des charges polluantes supplémentaires.

La production de courant en Suisse s'effectuant pratiquement sans émission de dioxyde de carbone, il existe très peu de possibilités de substitution de centrales thermiques de production d'électricité fossile par des centrales avec couplage chaleur-force, contrairement à l'Allemagne, par exemple.

La figure 25 compare une installation conventionnelle avec chaudière à gaz et une installation de CCF avec moteur à gaz. Nous voyons que la réduction, respectivement l'augmentation des rejets de dioxyde de carbone dépendent de la consommation d'énergie. Si l'on remplace le mazout par le gaz, on diminuera encore davantage les émanations de dioxyde de carbone, puisque le gaz naturel produit, par unité de chaleur, un quart de moins de dioxyde de carbone que l'huile de chauffage.

Mesures de promotion et de soutien

Le chapitre précédent montre que l'examen seul d'une installation unique ne suffit pas. Il est beaucoup plus utile d'examiner le développement dans son ensemble. Le rapport entre le courant produit par CCF et le courant injecté dans les amplificateurs électrothermiques joue un rôle particulièrement important. Si l'on doit diminuer notre production d'éléments polluants et de dioxyde de carbone, une politique de protection de l'environnement doit être poursuivie. Ce qui est donc important ici, c'est de bien comprendre qu'il n'existe aucune contrainte de situation ou de propriété entre les installations de couplage chaleur-force et les amplificateurs électrothermiques. Répartie sur quelques années, la durée des réalisations ne joue pas un rôle prépondérant. Parallèlement à l'arrêt sur l'énergie du Conseil fédéral et aux différentes lois cantonales sur l'utilisation de l'énergie qui favorisent la promotion et l'utilisation d'une énergie économique, rationnelle et respectueuse de l'environnement, il faut non seulement encourager la promotion rapide du couplage chaleur-force mais aussi celle des amplificateurs électrothermiques. Des mesures de promotion et de soutien sont décrites dans l'encadré 26. Ces mesures devraient être si possible appliquées dans un cadre local. A l'intérieur d'une commune, d'une ville ou d'un canton, on pourrait par exemple installer en même temps des couplages chaleur-force et des amplificateurs électrothermiques. En premier lieu, il faut promouvoir des installations jouissant de conditions particulièrement favorables (encadré 27). Le choix de ces installations sera basé sur des analyses sommaires de tous les bâtiments concernés. Les cas les plus intéressants seront ensuite soumis à une analyse détaillée. Cette manière de procéder a fait ses preuves depuis quelques années dans le domaine de l'assainissement énergétique des bâtiments et peut sans autre s'appliquer aux projets formulés plus haut.

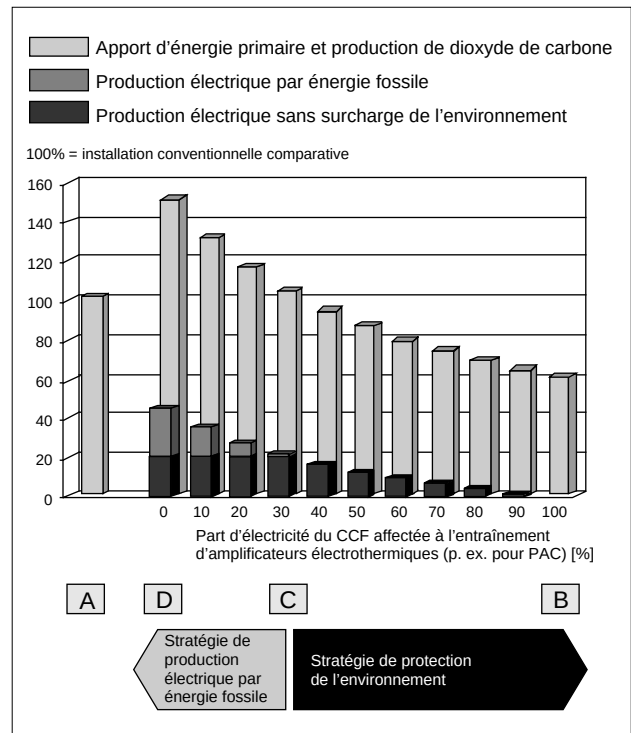


Figure 25: Selon la quantité de courant utilisée dans l'amplificateur électrothermique (par exemple pour l'entraînement des pompes à chaleur), il existe différentes stratégies. L'installation conventionnelle A et les cas-limites B, C et D correspondent aux bilans énergétiques de la figure 24. Les calculs sont effectués avec une amplification électrothermique de 3,0.

Mesures de promotion et de soutien

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

Encadré 26

CCF, PAC et installations de RC et d'URT seront tout d'abord construites là où les conditions préalables sont favorables !

Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques : dispositions favorables des emplacements, horaires et niveaux de températures entre source de chaleur et consommateurs d'énergie ; source de chaleur la plus dense possible, ce qui implique principalement l'eau.

Pompes à chaleur : source de chaleur appropriée avec une disponibilité suffisamment grande, une élévation de température la plus faible possible entre source de chaleur et apport thermique (chauffage à basse température).

Couplage chaleur-force : production de chaleur assurée pour 4000 h au moins de fonctionnement annuel, conditions préalables favorables à un chauffage à distance, conditions de branchement au réseau électrique intéressantes.

Finalement il faut bien admettre que les installations de couplage chaleur-force, les pompes à chaleur et les systèmes de récupération de chaleur sont relativement complexes, par rapport aux installations conventionnelles. Une attention toute particulière doit donc être vouée à tout le déroulement du projet, afin d'éviter des surprises désagréables. C'est pourquoi il est recommandé de toujours lier les mesures d'encouragement à des obligations relatives à la planification, à l'optimisation du fonctionnement et au contrôle des résultats du projet. Et l'on peut même se demander si l'on devrait pas effectuer un accompagnement de projet pour un contrôle de qualité qui serait pris en charge et financé par un planificateur indépendant (cf. chapitre 6).

Encadré 27

4. Bases de planification

4.1 Principes hydrauliques de base

Quel rôle joue l'hydraulique dans les économies d'électricité ?

Le domaine hydraulique joue un rôle important dans les économies d'électricité, car il s'agit d'investir le plus intelligemment possible l'électricité de haute valeur, qui aujourd'hui encore est utilisée pour la production et la distribution de chaleur. Cette opération est souvent difficile à réaliser, à cause de l'hydraulique justement.



L'utilisation rationnelle de l'électricité dans le secteur de la chaleur exige une conception hydraulique irréprochable, pour obtenir une distribution efficace de la chaleur.

Trois formules importantes

Lorsqu'une installation est à l'étude, trois mêmes questions se posent toujours : « Quelle importance doit avoir le débit ? », « Quelle est la différence de pression liée à ce débit ? », « A combien se monte la puissance requise pour obtenir un tel débit ? » ; les formules simplifiées de l'encadré 29 répondent dans le détail à ces trois questions.

Les quatre raccords hydrauliques de base

Pratiquement tous les raccords qui interviennent dans les techniques du bâtiment reposent sur les quatre raccords de base selon tableau 30 :

- schéma de montage en mélange ;
- schéma de montage en dérivation ;
- schéma d'injection avec vanne à trois voies ;
- schéma de montage avec étranglement (très souvent exécuté comme le schéma d'injection avec vannes à deux voies).

Vannes de réglage

Dans chacun des quatre schémas de base ci-dessus, les vannes de réglage existent sous différentes formes :

- vannes à 2 voies (vannes de passage) avec une entrée et une sortie ;
- vannes à trois voies avec deux entrées et une sortie (vannes de mélange, représentées ici) ou une entrée et deux sorties (vannes de distribution, non représentées ici car rarement utilisées).

Bibliographie complémentaire



Dimensionnement et exploitation optimale des circulateurs. Berne : Programme d'impulsion RAVEL, Office fédéral des questions conjoncturelles, 1991. (Source : OCFIM, 3000 Berne, N° de commande 724.330 f).

Un chapitre entier est consacré aux petites installations, aux installations avec distributeur, aux grandes installations et aux installations spéciales (froid, récupération de chaleur, eau chaude). Cette brochure contient, en plus des connaissances de base, de nombreux exemples de calculs chiffrés.



Equilibrage hydraulique des chauffages centraux. Berne : Programme d'impulsion : Techniques du bâtiment, Office fédéral des questions conjoncturelles, 1988. (Source OCFIM, 3000 Berne, N° de commande 724.620 f).

Dans cette brochure sont énoncés les principes fondamentaux nécessaires à un équilibrage hydraulique irréprochable, base saine et solide pour une exploitation de premier ordre. On y trouve également un exemple de cas entièrement chiffré. La première partie est destinée surtout aux praticiens, tandis que la deuxième partie est consacrée au développement des bases théoriques.



Commande et régulation des installations de chauffage et de ventilation. Berne : Programme d'impulsions : Techniques du bâtiment, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^e édition, 1987. (Source OCFIM, Berne, N° de commande 724.606 f).

Cette publication édicte les bases des techniques de commande, de régulation et des questions hydrauliques. Elle traite particulièrement de la technique du bâtiment pratiquée actuellement en Suisse. Bien que cette brochure date de 8 ans déjà, seul le chapitre « Technique des appareils » est quelque peu dépassé.

Encadré 28

Débit	
$\dot{V}$ [m³/h]	$= 0,86 \frac{\dot{Q} \text{ [kW]}}{\Delta\vartheta \text{ [K]}}$
Différence de pression	
Δp [kPa]	$= 100 \cdot \left(\frac{\dot{V} \text{ [m³/h]}}{k_v \text{ [m³/h]}} \right)^2$
ou inversement:	
$\dot{V}$ [m³/h]	$= 0,1 \cdot k_v \text{ [m³/h]} \cdot \sqrt{\Delta p \text{ [kPa]}}$
Puissance de la pompe	
$P_{\text{hydraul.}}$ [kW]	$= \frac{\Delta p \text{ [kPa]} \cdot \dot{V} \text{ [m³/h]}}{3600}$
ou avec $\eta_{\text{pompe}} = P_{\text{hydraul.}}/P_{\text{pompe}}$	
P_{pompe} [kW]	$= \frac{\Delta p \text{ [kPa]} \cdot \dot{V} \text{ [m³/h]}}{3600 \cdot \eta_{\text{pompe}} [-]}$
Symboles et dénominations	
$\dot{V}$	= débit [m³/h]
$\dot{Q}$	= puissance thermique [kW]
$\Delta\vartheta$	= différence de température [K]
Δp	= différence de pression [kPa]
k_v	= caractéristique de la vanne [m³/h]
$P_{\text{hydraul.}}$	= puissance hydraulique de la pompe [kW]
P_{pompe}	= puissance absorbée par la pompe [kW]
η_{pompe}	= rendement de la pompe [-]
Conseil important : ces formules sont valables pour l'eau de 5 à 95°C. Il s'agit d'équations mathématiques qui impliquent que les facteurs qui les composent appartiennent à un même système cohérent d'unités, ce qui se rencontre rarement en pratique.	
Le facteur «0,86» considère la capacité de chaleur spécifique et la densité de l'eau :	
$0,86 \text{ [m³K/kWh]} = \frac{3600 \text{ [s/h]} \cdot 1000 \text{ [W/kW]}}{4190 \text{ [Ws/kgK]} \cdot 1000 \text{ [kg/m³]}}$	
Les 2 facteurs «100» respectivement «0,1» considèrent la pression de référence de 1 bar, pression à laquelle les valeurs « k_v » sont définies par mesures techniques :	
$100 \text{ [kPa]} = 1 \text{ [bar]}$	
$0,1 \text{ [1/\sqrt{kPa}]} = \sqrt{1/100 \text{ [kPa]}}$	
Et finalement, le facteur «3600» convertit encore les heures en secondes :	
$3600 \text{ [s/h]} = 3600 \text{ [s]/1 [h]}$	

Encadré 29

Le comportement hydraulique des vannes de réglage est défini par des courbes caractéristiques correspondant à une perte de pression constante de 1 bar. La vanne de passage, ainsi que la vanne à trois voies, sont habituellement représentées par deux courbes bien distinctes :

- courbe caractéristique linéaire : à une même modification de l'ouverture de la vanne correspond une même modification de débit ;
- courbe caractéristique à pourcentage identique : à une modification de l'ouverture de la vanne correspond un pourcentage identique de modification du débit actuel.

Lorsqu'une vanne est intégrée dans une installation hydraulique, son comportement ne correspond plus à la courbe caractéristique de base, car la différence de pression dans la vanne devient une partie variable des pertes de charges totales de l'installation. Par conséquent, la courbe caractéristique de base est plus ou moins déformée. Si la déformation s'accroît, elle entravera toujours plus la précision et la vitesse de régulation et, cas extrême, le cycle de réglage deviendra instable et se mettra à osciller.

Autorité de la vanne

Pour mesurer la déformation de la courbe caractéristique de base, on utilise l'autorité de la vanne. Elle est définie comme le rapport entre la différence de pression dans le réseau régulé avec vanne ouverte et débit nominal et la différence de pression totale de ce même réseau avec vanne fermée. Le tableau 30 présente les formules de calcul de l'autorité de la vanne AV pour les quatre schémas de base. La perte de pression dans la partie concernée du raccordement, où le débit est influencé par la vanne, joue un rôle important (en caractères gras au tableau 30). En général, on peut admettre qu'aucun problème ne se pose, tant que

$$AV = \frac{\Delta p_{v.100}}{\Delta p_{v.100} + \Delta p_{var.100}} \geq 0,5 \text{ est valable.}$$

Il en résulte :

$$\Delta p_{v.100} \geq \Delta p_{var.100}$$



La perte de charge par vanne de réglage ouverte ($\Delta p_{v.100}$) doit être identique ou plus grande que la perte de charge sur le secteur à débit variable ($\Delta p_{var.100}$).

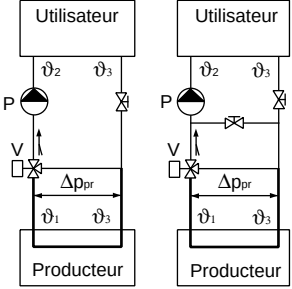
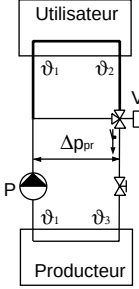
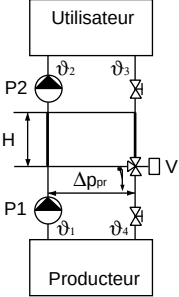
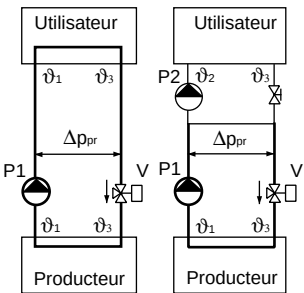
 Le schéma illustre deux configurations de montage en mélange. Dans la première, un utilisateur est connecté à un producteur via une pompe P et une vanne V. Les températures sont notées θ₁, θ₂ et θ₃. La différence de pression côté producteur est Δp_{pr}. Dans la seconde configuration, une vanne V est ajoutée en dérivation sur le circuit primaire.	Schéma de montage en mélange - Différence de pression côté producteur la plus faible possible → $\Delta p_{pr} \leq 3 \text{ kPa}$ - Débit variable dans le circuit primaire - Débit constant dans le circuit secondaire → réglage de la température - Si le point de dimensionnement $\theta_1 > \theta_2$, appliquer le schéma de droite - Application : distributeur sans pompe principale, distributeur à différence de pression nulle	Débit de la vanne $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_3 [\text{K}]}$ Débit de la pompe $\dot{V}_P [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_2 - \theta_3 [\text{K}]}$ Autorité de la vanne $AV = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$
 Le schéma illustre un montage en dérivation. Un utilisateur est connecté à un producteur via une pompe P. Une vanne V est installée en dérivation sur le circuit primaire. Les températures sont notées θ₁, θ₂ et θ₃. La différence de pression côté producteur est Δp_{pr}.	Schéma de montage en dérivation - Différence de pression côté producteur Δp_{pr} constante → perte de pression côté utilisateur compensée par la pompe primaire - Débit constant dans le circuit primaire - Débit variable dans le circuit secondaire → réglage du débit - Si charge partielle, risque de stratification → application limitée dans le domaine du confort - Application : réglage de la charge de l'accumulateur, refroidisseur avec déshumidification	Débit de la vanne $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_2 [\text{K}]}$ Débit de la pompe $\dot{V}_P [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_3 [\text{K}]}$ Autorité de la vanne $AV = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$
 Le schéma illustre un montage d'injection avec vanne à trois voies. Un utilisateur est connecté à un producteur via une pompe P1. Une vanne V est installée en dérivation sur le circuit primaire. Les températures sont notées θ₁, θ₂, θ₃ et θ₄. La différence de pression côté producteur est Δp_{pr}. La hauteur H est indiquée.	Schéma d'injection avec vanne à trois voies - Différence de pression côté producteur Δp_{pr} constante → perte de pression de la vanne compensée par la pompe primaire - Débit constant dans le circuit primaire - Débit constant dans le circuit secondaire → réglage de la température - Risque de circulation dans une seule conduite → $H \geq 10$ diamètre de la conduite - Inconvénient : température de retour θ₄ fortement mélangée - Application : chauffage à air et distribution par injection avec température de retour élevée	Débit de la vanne $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_3 [\text{K}]}$ Débit de la pompe $\dot{V}_{P1} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_4 [\text{K}]}$ $\dot{V}_{P2} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_2 - \theta_3 [\text{K}]}$ Autorité de la vanne $AV = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$
 Le schéma illustre un montage avec étrangleur (injection avec vanne de passage). Un utilisateur est connecté à un producteur via une pompe P1. Une vanne V est installée en dérivation sur le circuit primaire. Les températures sont notées θ₁, θ₂, θ₃ et θ₄. La différence de pression côté producteur est Δp_{pr}.	Schéma de montage avec étrangleur (injection avec vanne de passage) - Différence de pression côté producteur Δp_{pr} constante → comme le débit est variable, le réglage de la différence de pression est sensé - Débit variable → réglage du débit - Pour débit constant dans le circuit secondaire, appliquer le schéma de droite - Avantage : température de retour non mélangée - Application : chauffage à air et distribution par injection avec basse température de retour	Débit de la vanne $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_3 [\text{K}]}$ Débit de la pompe $\dot{V}_{P1} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_1 - \theta_3 [\text{K}]}$ $\dot{V}_{P2} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\theta_2 - \theta_3 [\text{K}]}$ Autorité de la vanne $AV = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,0}}$

Tableau 30: Les quatre schémas hydrauliques de base. $\Delta p_{V,100}$ représente la perte de charge de la vanne par 100% de débit, $\Delta p_{V,0}$ par 0% de débit. $\Delta p_{var,100}$ représente la perte de charge par débit variable sur le secteur dessiné en gras.

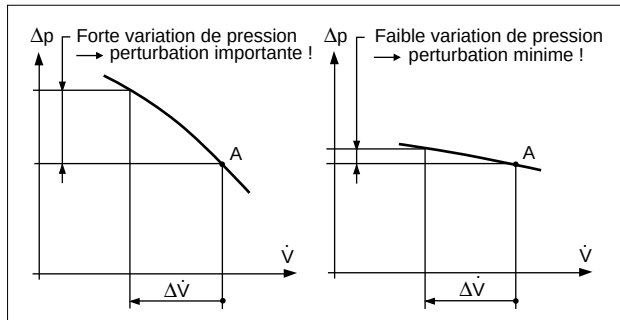


Figure 31: Courbe caractéristique de la pompe: inclinée (à gauche) et plate (à droite).

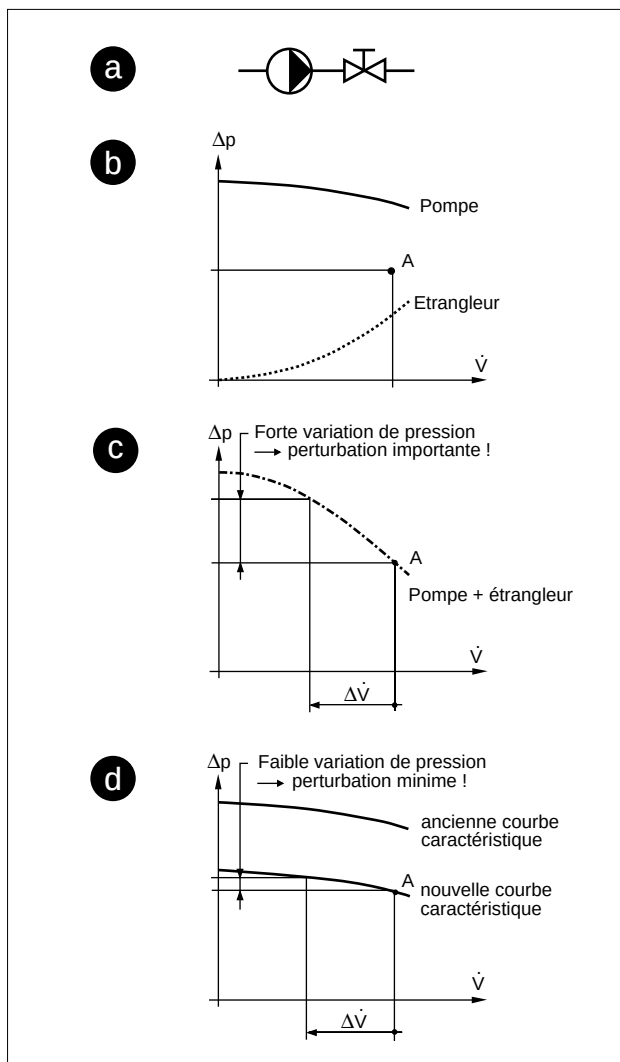


Figure 32: Démonstration de l'effet d'étranglement d'une pompe de circulation.

Courbe caractéristique de la vanne

Outre l'autorité de la vanne, le comportement du transfert de chaleur dans les éventuels échangeurs de chaleur (chauffages à air, refroidisseurs à air) joue également un rôle, défini par la valeur a (commande et réglage dans les techniques de chauffage et de ventilation, encadré 28). Le calcul de la valeur « a » étant relativement compliqué, on préfère en général définir la courbe caractéristique de base appropriée. Cette simplification est habituellement autorisée pour autant que l'autorité de la vanne puisse être maintenue à 0,5. Ainsi, des directives simplifiées peuvent être déterminées pour le choix de la courbe caractéristique.



Circuit de réglage sans échangeur de chaleur: vanne de réglage avec courbe caractéristique linéaire. **Circuit de réglage avec chauffage à air ou refroidisseur à air:** vanne de réglage avec courbe caractéristique à pourcentage identique ou vanne à clapet avec entraînement magnétique constant (courbe caractéristique linéaire à tracé concave dans la phase terminale).

Courbe caractéristique de la pompe

La courbe caractéristique de la pompe montre la hauteur manométrique (différence de pression) en fonction du débit utile (flux). On peut différencier les courbes plates des pompes à bas régime et les courbes inclinées des pompes à régime moyen et élevé (figure 31). Dans les installations de chauffage, le débit étant souvent variable (par exemple vannes thermostatiques) et les variations de pression non souhaitées (danger de propagation du bruit), il faut éviter d'installer des pompes de circulation à courbes inclinées dans des réseaux à débit variable. Ce genre de pompes de circulation ne convient qu'à des réseaux à débit constant, c'est-à-dire à des installations sans vannes thermostatiques ou à des chauffe-eau et des chauffages à air.



On constate souvent qu'une pompe de circulation déjà installée est trop grande (figure 32a). Une question se pose donc: une pompe équipée d'un étrangleur peut-elle provoquer des désavantages sur le plan hydraulique? La figure 32b montre la courbe plate d'une telle pompe de circulation, fonctionnant à bas régime et surdimensionnée. Ici, le débit devra être soumis à un équilibrage à l'aide d'une vanne étrangleuse, située au point A. La figure 32c donne le résultat: la courbe plate d'une pompe de circulation (coûteuse) fonctionnant à bas régime est devenue une courbe inclinée, comme si elle représentait une pompe de circulation (bon marché)

à haut régime; un étranglement de la pompe de circulation provoque des désavantages hydrauliques certains ! La figure 32d donne la solution : en passant à une vitesse plus petite, ou en changeant la roue d'entraînement, ou encore en remplaçant la pompe de circulation, la courbe reste à peu près parallèle et est poussée vers le bas au point A.

Courbe caractéristique du réseau

Comme pour la courbe caractéristique de la pompe de circulation, on peut aussi représenter graphiquement la perte de pression en fonction du débit pour le réseau et les utilisateurs, conformément aux équations d'équilibre de l'encadré 29. On appelle ce graphique : courbe caractéristique du réseau.

A la figure 33, on peut comparer les courbes caractéristiques d'un réseau dimensionné plutôt largement (N1) avec celles d'un réseau dimensionné plus chichement (N2), avec les courbes caractéristiques des pompes y relatives (P1, P2). Au débit nominal, les courbes caractéristiques du réseau et celles des pompes se recoupent aux points de travail A1, respectivement A2.

Autorité de l'utilisateur

Il s'est avéré opportun de grouper sous le terme général d'« utilisateur » tous les éléments situés entre les points de raccordement de la distribution (cf. figure 34), c'est-à-dire : vanne de radiateur, respectivement de chauffage par le sol (vanne manuelle ou thermostatique), radiateurs, respectivement circuit de chauffage au sol et raccord de réglage (avec ou sans préréglage). Une autorité de l'utilisateur, très pratique pour déterminer l'équilibrage hydraulique, peut ainsi être définie. Elle représente un critère d'évaluation des dérangements causés à un utilisateur par des variations du débit dans l'installation. L'autorité de l'utilisateur sera définie comme étant le rapport entre la différence de pression de l'utilisateur (par exemple vanne thermostatique + radiateur + clapet de retenue) pour un débit nominal et la différence de pression maximum sur l'utilisateur par débit maximal.

 Ces affirmations doivent encore être illustrées par un exemple. Dans les diagrammes 35a et 35b, les rapports de pression sont présentés de façon à ce que la hauteur dessinée corresponde à la différence de pression de la partie y relative de l'installation :

- les lignes en trait plein indiquent les rapports de pression par débit nominal : à la figure 35a, les pertes de pression du réseau de raccordement sont plus petites qu'à la figure 35b (identifiable au plus petit angle α);

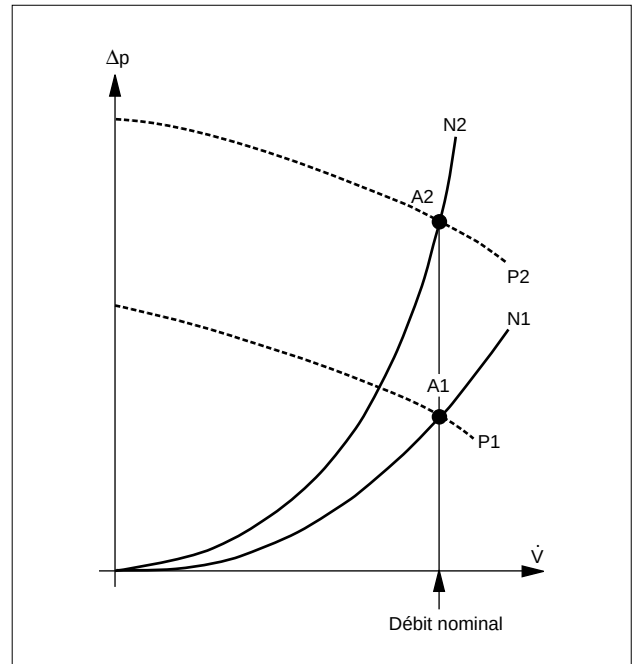


Figure 33: Courbes caractéristiques d'un réseau dimensionné plutôt largement (N1) et d'un réseau (N2) dimensionné plus chichement, avec les courbes caractéristiques correspondantes des pompes y relatives (P1, P2) et les points de travail (A1, A2).

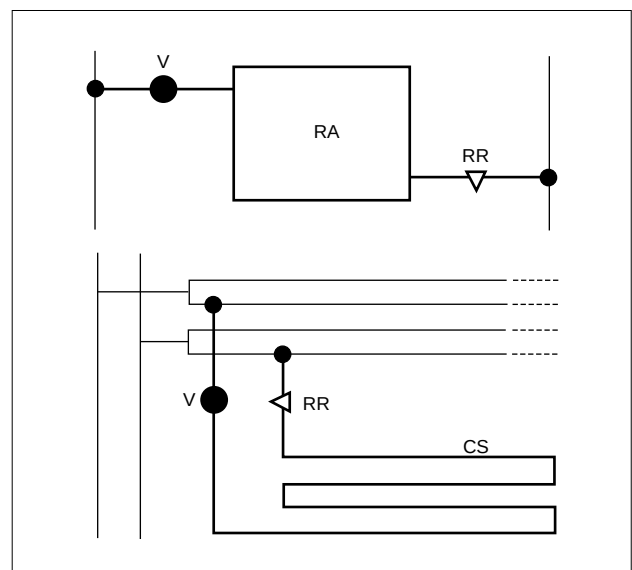


Figure 34: Sous le terme « utilisateur » sont compris tous les éléments entre les points de raccordement de la distribution ; V = vanne, RR = raccord de réglage, RA = radiateur, CS = chauffage par le sol.

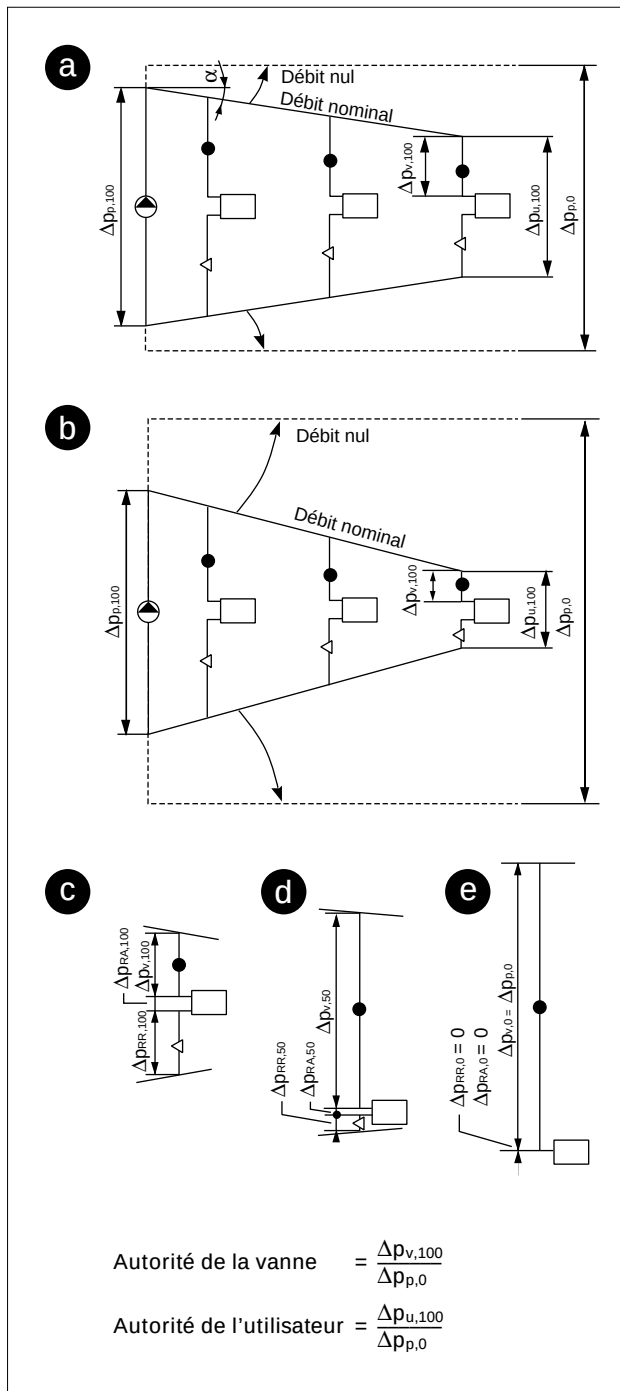


Figure 35: Diagrammes de pression illustrant le texte: réseau à courbe caractéristique plate avec autorité relative grande de la vanne et de l'utilisateur (a); réseau à courbe caractéristique inclinée avec autorité relative petite de la vanne et de l'utilisateur (b); répartition de la pression au niveau du troisième utilisateur de (a) par débit nominal (c), par 50 % de débit (d) et par débit nul (e).

- les lignes pointillées indiquent les rapports de pression par débit nul: à la figure 35a, il s'agit d'une pompe à courbe caractéristique plate et à la figure 35b, il s'agit d'une pompe à courbe caractéristique inclinée (identifiable à la plus grande différence de pression de la pompe entre débit nominal et débit nul).

L'autorité de la vanne et l'autorité de l'utilisateur représentent des dimensions qui permettent d'évaluer les variations dues de la différence de pression dans un cas extrême sur la vanne (autorité de la vanne) et sur l'utilisateur (autorité de l'utilisateur). On remarque très vite que l'autorité de la vanne et l'autorité de l'utilisateur sont bien meilleures à la figure 35a qu'à la figure 35b.

Le comportement entre débit nominal et débit nul est décrit dans les figures 35c à 35e (par mesure de simplification, il est admis que les vannes thermostatiques se ferment toutes de façon identique):

- figure 35c: toutes les vannes thermostatiques sont positionnées sur le débit nominal (=100 %);
- figure 35d: toutes les vannes thermostatiques sont positionnées sur un débit de 50 %. La pression de la pompe est montée proportionnellement à la courbe caractéristique de la pompe. Les pertes de pression du radiateur et du raccord de réglage sont tombées à un quart;
- figure 35e: tous les thermostats sont fermés. La pression de la pompe est montée proportionnellement à sa courbe caractéristique pour atteindre la valeur maximale par débit nul. Les pertes de pression du radiateur et du raccord de réglage sont tombées à zéro et la différence de pression maximale et complète se situe maintenant entièrement à travers les vannes thermostatiques.

Objectif: une installation stable et silencieuse !

Pour savoir quelle est l'influence réciproque de l'utilisateur en cas de variations de pression dans le réseau de distribution, il est opportun d'examiner l'ampleur des variations dans l'utilisateur, donc l'autorité de l'utilisateur. Cette autorité est un critère de stabilité du réseau.

Par contre, l'évolution de la puissance délivrée lorsque la vanne de réglage modifie sa position et l'effet des perturbations de l'installation sur le comportement du réglage sont fonction de l'ampleur des variations de la différence de pression à travers la vanne de réglage, c'est-à-dire de l'autorité de la vanne. Si l'autorité de la vanne est trop petite, un mouvement de la vanne de

quelques centièmes de millimètre correspond à la pleine puissance de chauffage, et le système de régulation fonctionne alors pratiquement selon le principe «tout ou rien». (On peut partiellement remédier à cette situation par une courbe caractéristique non linéaire de la vanne.)

Dans la pratique, une autre question se pose souvent : Quel ordre de grandeur peut avoir la différence de pression maximale sur la section à débit variable dans un distribution sans pompe principale ? Si cette différence de pression s'avère beaucoup trop importante, chacun des groupes s'influence réciproquement. Pour pallier à ce phénomène – en plus de l'ordre de priorité de la vanne –, il faut observer la règle suivante :

➡ *Dans une distribution sans pompe principale, la différence de pression maximale sur le secteur à débit variable ne doit pas dépasser 20% de la hauteur manométrique de la plus petite pompe de groupe au point de dimensionnement.*

Cependant, les problèmes de bruit doivent aussi être examinés attentivement, en particulier en raison du sifflement des vannes thermostatiques. En respectant la règle suivante, on se met en général à l'abri des surprises :

➡ *La différence de pression dans les vannes thermostatiques pour maisons familiales ne doit en aucun cas dépasser 20 kPa (immeubles non habités : 30 kPa).*

Les caractéristiques de dimensionnement les plus importantes aptes à maîtriser le comportement des éléments de l'installation sont groupées au tableau 36.

Valeurs de dimensionnement	Valeur-cible	Valeur-limite
Autorité de l'utilisateur	0,5	0,3
Autorité de la vanne – vannes de réglage – vannes thermostatiques	0,5 0,3	0,3 0,1
Différence de pression maximale sur les secteurs à débit variable avec distribution sans pompe principale	20% de la hauteur manométrique de la plus petite pompe de groupe	
Différence de pression maximale dans les vannes thermostatiques – constructions habitées – constructions non habitées	20 kPa 30 kPa	

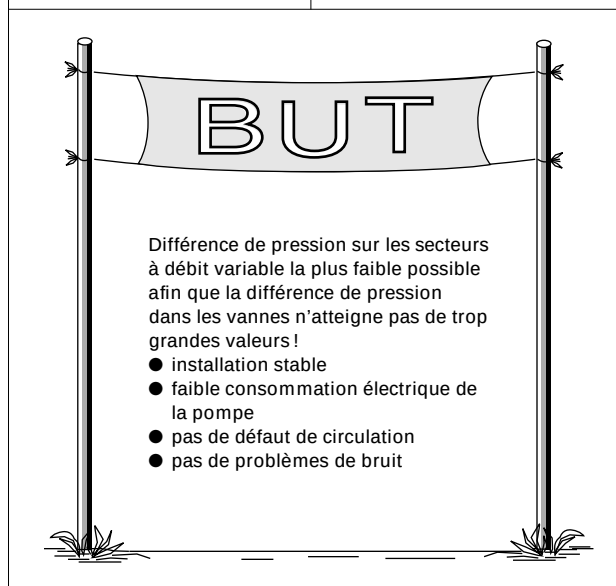


Tableau 36 : Recommandations pour le dimensionnement des grandeurs caractéristiques. L'objectif du dimensionnement est une installation stable, sans problèmes de bruit, qui travaille selon les critères les plus avantageux au niveau énergétique.

4.2 Pompes de circulation

Consommation de courant électrique

Le choix et le dimensionnement des pompes de circulation est avant tout un problème hydraulique. Mais dès le début, il faut porter son attention sur la question de la consommation de courant. La consommation de courant électrique des pompes de circulation devrait être inférieure à 1% de la consommation énergétique finale. Ce qui, traduit en valeurs cibles SIA 380/1, donne les valeurs du tableau 37.

Bâtiments	SIA 380/1 E _{thermique} [MJ/m²a]	RAVEL E _{électrique pompe} [MJ/m²a]
Maison individuelle	310	3,1
Maison locative	280	2,8
Bâtiment administratif	240	2,4
Ecole	240	2,4

Tableau 37 : Valeurs-cible pour une consommation finale d'énergie thermique selon SIA 380/1 et valeurs-limite qui en découlent pour la consommation de courant des pompes de circulation.

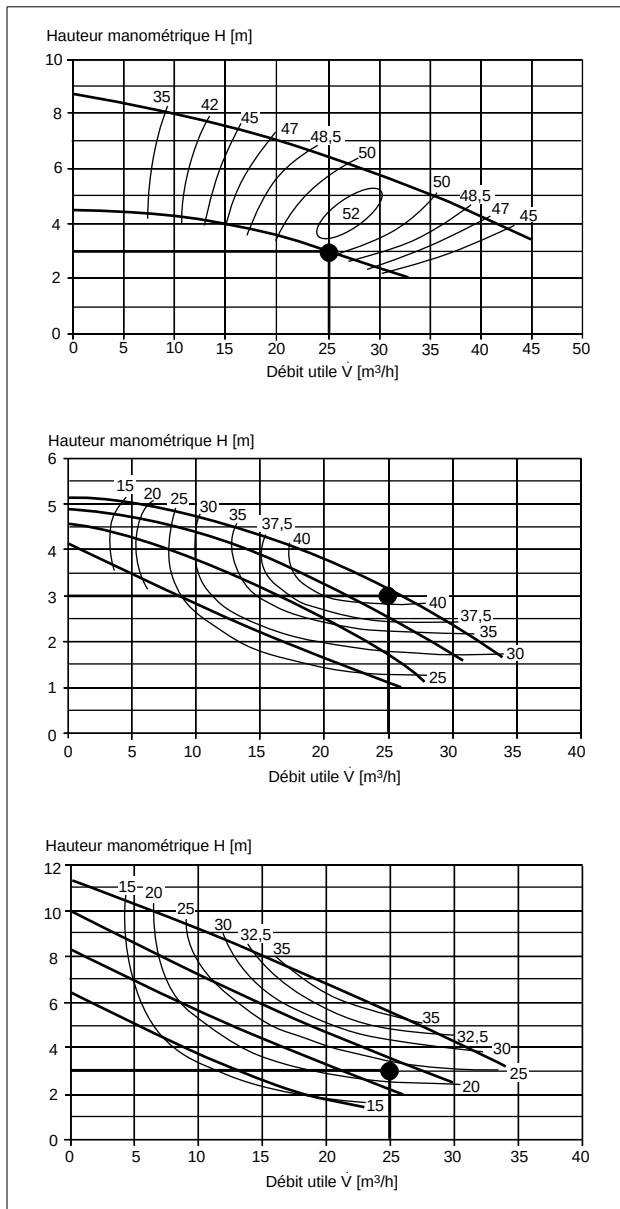


Figure 38: Exemple de dimensionnement d'une pompe principale de 3 mWS et 25 m³/h : selon le modèle de fabrication et la situation du point de travail, différents rendements sont possibles !

De prime abord, un dimensionnement exact, sans réserves inutiles, est une condition sine qua non pour une consommation énergétique modeste. Vitesse de rotation, débit, différence de pression et puissance d'entraînement évoluent de la façon suivante :

- le débit varie proportionnellement à la vitesse de rotation. La division par deux de la vitesse de rotation donne par conséquent une division par deux du débit (exemple : une roue hydraulique qui fonctionne à mi-régime ne fournit que la moitié d'aubes pleines par unité de temps) ;
- la différence de pression varie selon le carré de la vitesse de rotation respectivement du débit. Lorsque l'on divise par deux la vitesse de rotation respectivement le débit, la différence de pression est divisée par quatre ;
- la puissance d'entraînement nécessaire varie à la puissance 3 de la vitesse de rotation respectivement du débit. Lorsque l'on divise par deux la vitesse de rotation respectivement le débit, la puissance d'entraînement n'est – théoriquement – plus que de un huitième de la puissance initiale.

Mais il est également important que les pompes de circulation soient dimensionnées pour assurer un bon rendement. Entre les divers modèles, types de fabrication et produits manufacturés, on constate d'importantes différences. Une simple comparaison serait possible si, dans le diagramme de la pompe, on ajoutait les courbes de rendement. Malheureusement ceci n'est le cas actuellement que dans le cas de grosses pompes sur socles. C'est pourquoi dans un cas normal, le rendement de la pompe – du moins au point de travail – doit être calculé au moyen de la formule de puissance de la pompe, selon encadré 29.

A la figure 38, on trouve des diagrammes avec courbes de rendement et l'exemple suivant démontre comment on calcule les rendements au point de travail en l'absence de ces courbes.

 A combien se montent les rendements des trois pompes de la figure 38 au point de travail, pour une hauteur manométrique de 3 mWS et un débit utile de 25 m³/h ? Les feuilles de données indiquent des puissances nominales de 415 W (pompe Inline), 520 W (rotor noyé, bas régime) et 900 W (rotor noyé, haut régime). La puissance hydraulique est bien entendu identique pour les 3 pompes, soit (voir encadré 29) :

$$P_{\text{hydraul.}} = \frac{30 \text{ kPa} \cdot 25 \text{ m}^3/\text{h}}{3600} = 0,208 \text{ kW} = 208 \text{ W}$$

Il s'ensuit les rendements suivants :

$$\eta = \frac{208 \text{ W}}{415 \text{ W}} = 0,50 \quad (\text{pompe Inline})$$

$$\eta = \frac{208 \text{ W}}{520 \text{ W}} = 0,40 \quad (\text{circulateur à rotor noyé, bas régime})$$

$$\eta = \frac{208 \text{ W}}{900 \text{ W}} = 0,23 \quad (\text{circulateur à rotor noyé, haut régime})$$

Il est donc utile de comparer les pompes de circulation entre elles : selon le type de fabrication et l'emplacement du point de travail, les rendements varient fortement, dans l'exemple entre 23 et 50%. Au point de travail optimal, le rendement des petites pompes dépassent rarement 15%. En résumé, on peut dire ceci :

- les petits modèles de pompes ont tendance à avoir un rendement plus faible que les grands modèles ;
- les pompes de circulation à moteur ventilé standard (pompe Inline et pompe sur socle) sont meilleures que les circulateurs à rotor noyé et moteur à gaine intégré ;
- concernant le rendement, il n'y a pas de différence significative entre haut et bas régime d'un circulateur avec rotor noyé ; en revanche, en comparant divers modèles, on constate des différences notables ;
- l'emplacement du point de travail dans le diagramme de la pompe influence fortement le rendement ; le rendement optimal se situe souvent au milieu du tiers médian de la courbe caractéristique, pour la vitesse de rotation la plus élevée ; toutefois il y a des exceptions.

Pompes de circulation à courbes caractéristiques inclinées

Dans le domaine des petites pompes à rotor noyé, les circulateurs tournant entre 1900 et 2400 tours par minute sont largement répandus aujourd'hui vu la modicité de leur prix. Cependant, pour débit variable, les courbes caractéristiques inclinées (figure 39) entraînent d'importantes variations de la différence de pression, provoquant des problèmes de bruit et de réglage. C'est pourquoi on ne devrait installer des pompes de circulation à moyen et à haut régime (sans réglage de vitesse) que dans le cas d'un débit constant, comme par exemple dans des installations sans vannes thermostatiques ou comme pompe pour le chauffage de l'eau et de l'air.

Pompe de circulation à courbes caractéristiques plates

Par rapport aux modèles à haut régime (figure 39), les pompes de circulation à bas régime (1300 à 1400 tours par minute) offrent des courbes caractéristiques très plates (figure 40). De ce fait, elles conviennent également

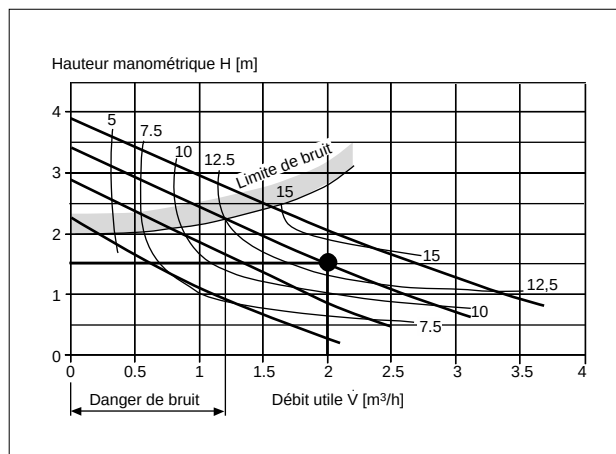


Figure 39: Exemple de dimensionnement de la pompe d'un groupe de chauffage avec courbe caractéristique inclinée pour 1,5 mWS et 2,0 m³/h : si le débit tombe en dessous de 1,2 m³/h (fermeture des vannes thermostatiques), la limite du bruit est dépassée et on court le risque d'être incommodé par le bruit des vannes thermostatiques ; en outre, l'autorité des vannes thermostatiques sera obligatoirement mauvaise.

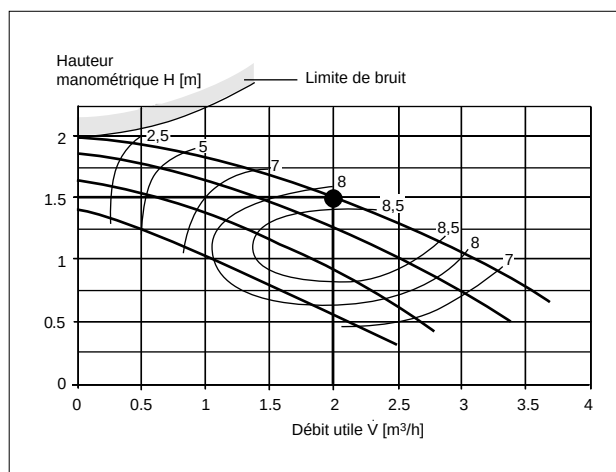


Figure 40: Le même exemple de dimensionnement qu'à la figure 39, mais avec une pompe de circulation avec courbe caractéristique plate, ne pose en revanche aucun problème : la limite du bruit n'est pas dépassée, même par débit nul, et l'autorité des vannes thermostatiques demeure possible ! (Le rendement, en revanche, n'est pas très bon, mais il s'agit vraisemblablement d'un problème lié au modèle de la pompe, plutôt qu'une question de haut ou de bas régime).

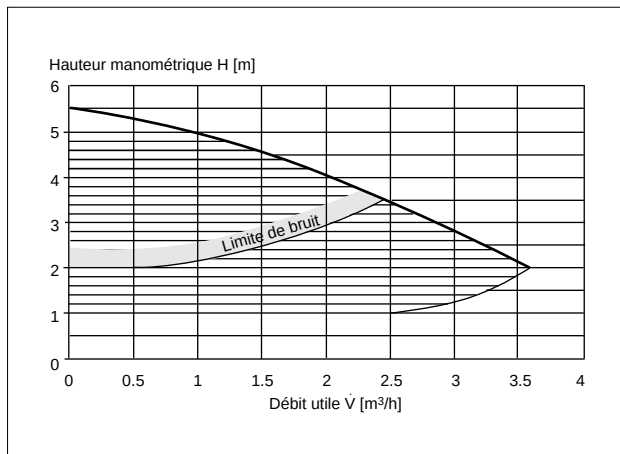


Figure 41: Exemple du champ des courbes caractéristiques d'une pompe de circulation à vitesse réglable avec courbe caractéristique plate ajustable.

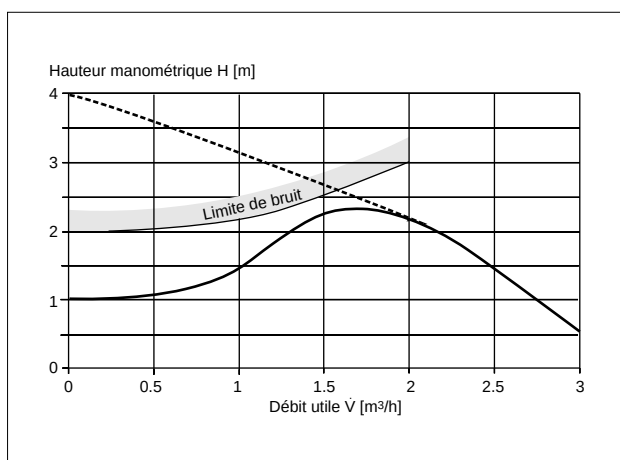


Figure 42: Exemple d'une pompe de circulation avec courbe caractéristique «négative»: chaque point de travail est très éloigné de la limite du bruit!

aux installations à débit variable: dans des installations avec vannes thermostatiques, aucune mesure pour la limitation de la différence de pression n'est nécessaire, jusqu'à une hauteur manométrique de dimensionnement d'environ 1,5 mWS. Cet avantage est toutefois marqué par un prix plus élevé.

Pompes de circulation à vitesse réglable avec courbes caractéristiques plates ajustables

Le circulateur à rotor noyé et vitesse réglable incorporée prennent toujours plus d'importance. Ce type de construction peut être réglé exactement sur la hauteur manométrique souhaitée et cette valeur reste constante dans tout le secteur du débit utile (figure 41). Il en résulte ainsi une courbe caractéristique parfaitement plate qui, dans des limites précises, peut être en outre librement choisie. Les pompes de circulation avec vitesse réglable peuvent donc être précisément réglés à 2 mWS de hauteur manométrique, sans provoquer le moindre problème de bruit.

Pompes de circulation à vitesse réglable avec courbes caractéristiques négatives

Des hauteurs manométriques plus importantes mais restant éloignées de la limite du bruit sont possibles, et cela grâce aux pompes de circulation à vitesse réglable avec courbes caractéristiques dite «négatives»: en présence de petits débits, la hauteur manométrique n'augmente pas mais au contraire diminue (figure 42).

Appareils de réglage du nombre de tours

Il existe essentiellement deux sortes de commandes à vitesse réglable:

- les appareils de coupure de phase convenant seulement aux pompes avec circulateur à rotor noyé avec moteur à gaine (sources de problèmes lors de pannes électriques du secteur; soumis à autorisation par la plupart des services électriques si la puissance de raccordement dépasse 1 kW);
- les convertisseurs de fréquence, adaptés à toutes les pompes équipées d'un moteur asynchrone; provoquent nettement moins de pertes que l'appareil de coupure de phase.

Etant donné que les pompes de circulation à vitesse réglable intégrée sont relativement bon marché, les appareils de réglage du nombre de tours indépendants seront en principe réservés aux pompes de grande puissance. Il ne faut cependant pas perdre de vue que les

appareils de réglage de vitesse séparés offrent des avantages certains :

- liberté de choix pour les pompes de circulation ;
- liberté de choix de la grandeur de réglage (différence de pression, différence de température, etc.) ;
- liberté de choix de l'emplacement du point de mesure.

Régulation de la différence de pression dans des installations avec vannes thermostatiques

A ce sujet, les discussions tournent toujours autour de la même question : où doit être placée la sonde de mesure de différence de pression pour une pompe de circulation à vitesse réglable dans un groupe de chauffage équipé de vannes thermostatiques ? Les différentes possibilités sont exposées à la figure 43.

Cas A : sans pompe à vitesse réglable et avec la courbe caractéristique (relativement inclinée) de la pompe, l'installation peut être équipée d'un système de réglage avec une hauteur manométrique de $\Delta p_{\max} = 12$ kPa. Ainsi, par débit nul, on atteint juste la limite du bruit de 20 kPa (= 2 mWS).

Cas B : la mesure de la différence de pression de la pompe donne effectivement une courbe caractéristique très plate. Mais ce qui est décisif, c'est la courbe caractéristique au point H tenant compte de la perte de pression sur le secteur Z1. Ainsi, on peut choisir une hauteur manométrique à peine plus élevée ($\Delta p_{\max} = 15$ kPa). Si, sur le secteur Z1, la perte de pression est très faible (par exemple schéma d'injection), il en résulte une courbe caractéristique au point H infiniment meilleure, comme pour le cas C.

Cas C : seul une mesure de la différence de pression au départ et au retour permet un fonctionnement effectif de la pompe à la limite du bruit ($\Delta p_{\max} = 20$ kPa), car les pertes de pression sur le secteur Z2 seront ainsi compensées.

Cas D : une hauteur manométrique de dimensionnement encore plus élevée ($\Delta p_{\max} = 27$ kPa) est atteinte, lorsque la mesure de la différence de pression du réseau est effectué au point X.

Le cas B correspond à tous points de vue à une pompe de circulation à vitesse réglable intégrée avec courbe caractéristique plate (figure 41). Le cas D dénote un comportement identique à celui d'une pompe de circulation avec courbe caractéristique négative (figure 42). En effet, ce dernier cas a pour avantage de ne nécessiter aucune mesure onéreuse de la différence de pression du réseau. Dans cet exemple-ci, on économise du courant avec la pompe de circulation à vitesse réglable en charge partielle

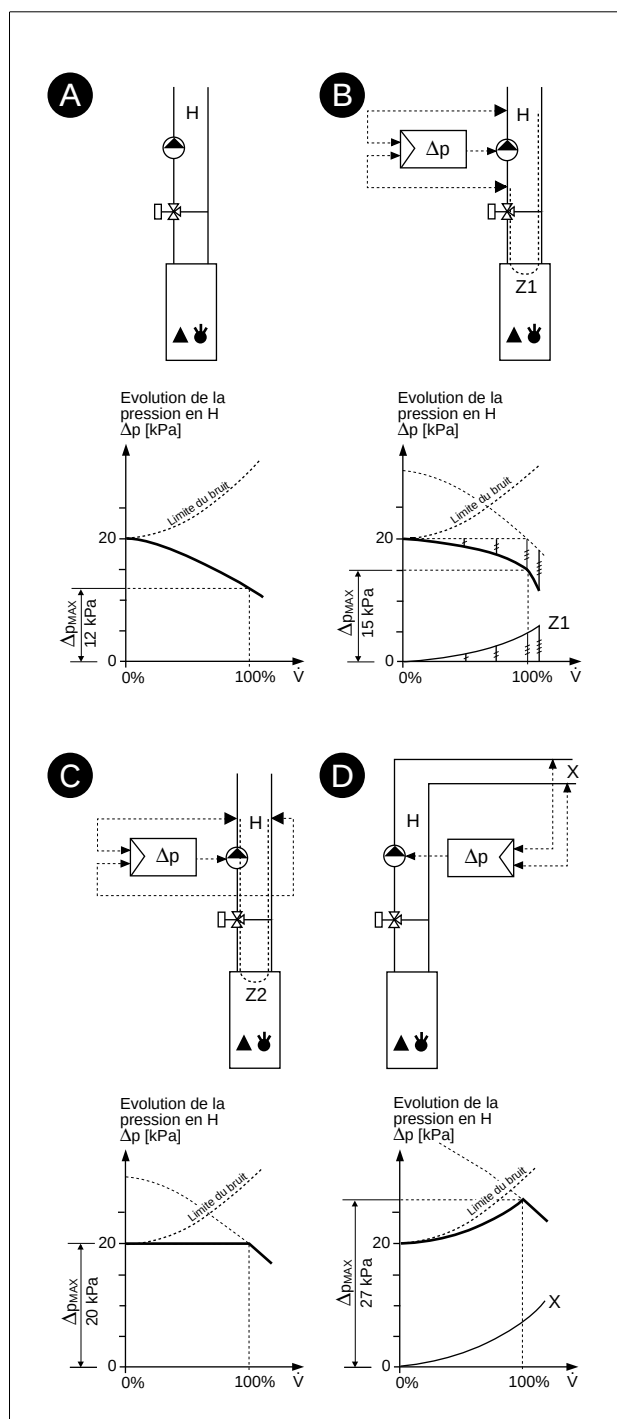


Figure 43: Régulation de la différence de pression dans une installation avec vannes thermostatiques.

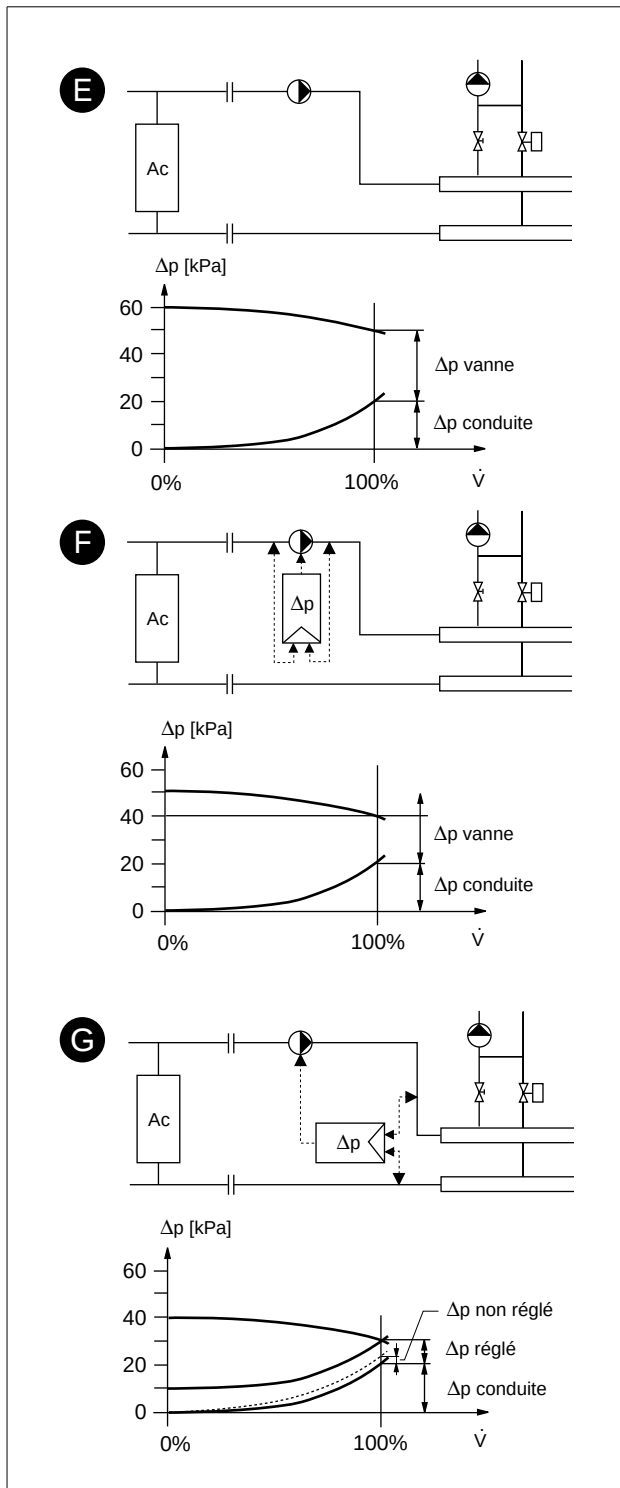


Figure 44: Régulation de la différence de pression d'une pompe de chauffage à distance pour un distributeur à injection avec vannes de passage.

et, de plus, un réseau nettement plus étendu peut être réalisé, sans problèmes de bruit : dans le cas D, le réseau peut être environ deux fois plus grand que celui du cas A.

Régulation de la différence de pression dans les conduites à distance

Des problèmes similaires se présentent avec les conduites à distance pour la répartition par injection avec vannes de passage. La figure 44 montre un exemple de conduite à distance avec perte de pression de 20 kPa, par débit nominal.

Cas E : sans pompe de circulation à vitesse réglable, la perte de pression de la vanne doit être de 30 kPa, afin de pouvoir maintenir une autorité de la vanne de $AV = 30 \text{ kPa} / 60 \text{ kPa} = 0,5$

La dimension de la pompe de circulation sera aussi choisie selon ces critères.

Cas F : la mesure de la différence de pression de la pompe ou la mise en place d'une pompe avec réglage de vitesse incorporé permet d'éliminer l'influence de la courbe inclinée de la pompe. A cet effet, la perte de pression de la vanne ne doit se monter qu'à 20 kPa pour une priorité de la vanne de :

$$AV = 20 \text{ kPa} / 40 \text{ kPa} = 0,5$$

et la pompe est plus petite qu'au cas E.

Cas G : les conditions seraient optimales, si la différence de pression était mesurée directement sur le distributeur. L'idéal serait de pouvoir effectuer le réglage sur une différence de pression « zéro » (surtout s'il s'agit d'un distributeur sans pression déjà existant). Les exigences techniques inhérentes à cette opération sont malheureusement beaucoup trop élevées, car le réglage doit être fixé sur une différence de pression minimale d'environ 10 kPa. Si l'on admet que la perte de charge restante, non réglée, se monte encore à 2 kPa, il en résulte une autorité de la vanne de

$$AV (10 - 2) \text{ kPa} / 10 \text{ kPa} = 0,8$$

et la pompe devient encore plus petite !

Cet exemple démontre clairement qu'une régulation de la différence de pression permet à la fois d'économiser du courant électrique dans la zone de charge partielle et de réduire notablement la puissance de la pompe en raison des avantages hydrauliques du système.

Fonctionnement de la pompe par débit nul

La question du fonctionnement de la pompe par débit nul revient régulièrement : peut-elle fonctionner lorsque la circulation de l'eau est réduite à zéro (glissière fermée) ? Par mesure de sécurité, il vaudrait mieux poser la

question au fabricant de la pompe. Mais, en général, on peut répondre :

- les pompes de circulation à rotor noyé, dont la puissance à l'axe se situe en dessous de 1 kW, ne souffrent aucun dommage, même après un fonctionnement prolongé par débit nul, pour autant que la température de fonctionnement soit au moins 10 K en dessous de la température maximale autorisée et qu'aucune circulation en retour n'apparaisse ;
- les pompes de circulation à rotor noyé, dont la puissance à l'axe se situe en dessus de 1 kW ainsi que toutes les pompes de circulation à moteur ventilé ne souffrent aucun dommage en cas de fonctionnement de courte durée (quelques minutes) par débit nul ; pour de plus longues durées du fonctionnement, il faut pouvoir garantir un flux utile minimum d'environ 10 %.

Les réseaux équipés de vannes thermostatiques, dont la régulation de température au départ est irréprochable, ne devraient pas poser de problèmes. En revanche, la prudence est de mise en cas de pompes de circulation avec conduites à distance pour les répartiteurs à injection avec vannes à deux voies. Ici, un déclenchement automatique de la pompe de circulation devrait toujours être prévu (par exemple par fin de course sur les vannes de réglage). Ce procédé est en outre judicieux pour des raisons d'économie de courant !

4.3 Mesurage de l'énergie

Lors de la mise en service pour l'optimisation du fonctionnement et le contrôle des résultats, ainsi pour le fonctionnement proprement dit, la surveillance des flux énergétiques joue un rôle important. Pourtant, une grave erreur est commise : on n'installe que les compteurs strictement nécessaires au décompte des frais. Ainsi, pour des opérations telles que : choix et définition d'une installation, construction, aucune estimation valable des coûts n'est possible. Pour tenter de combler cette lacune, voici quelques conseils sur les moyens de mesure d'énergie les plus importants.

Electricité

L'enregistrement de l'énergie électrique s'effectue partout et très consciencieusement là où un intérêt pour le décompte des frais se manifeste, c'est-à-dire là où les services électriques ont posé des compteurs. On renonce aux compteurs ayant un intérêt purement technique pour des raisons financières (exemple typique : un

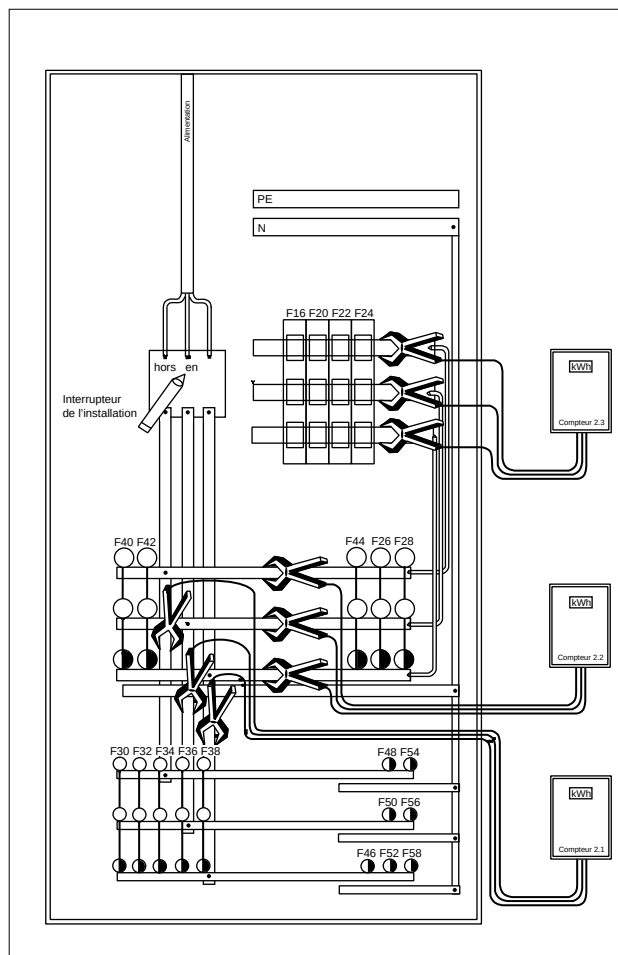


Figure 45 : Exemple de mesures temporaires dans une armoire de sous-distribution à l'aide de pinces ampèremétriques et de compteurs électriques.

Gaz naturel

Pour une conversion approximative de m³ de gaz naturel en kWh (basé sur le pouvoir calorifique inférieure de chauffage !), on peut appliquer la formule suivante (qui peut s'avérer très inexacte selon les circonstances):

$$\text{Energie [kWh]} = 9,4 \times \text{mètres cubes d'exploitation}$$

Pour des calculs plus précis, il faut impérativement se renseigner auprès du distributeur de gaz compétent, afin d'obtenir des facteurs de conversion actuels, car le gaz naturel subit des variations importantes. En outre, il faut souligner que les chiffres délivrés sont basés la plupart du temps sur le pouvoir calorifique supérieur; ils doivent donc être recalculés sur la base du pouvoir calorifique inférieur.

Encadré 46

Mazout EL

La conversion de litres, respectivement de kilogrammes de mazout EL en kilowattheures peut être effectuée sur la base de la formule suivante:

$$\text{Energie [kWh]} = 11,9 \times \text{masse [kg]}$$

$$\text{Energie [kWh]} = 10,0 \times \text{volume [l]}$$

La valeur de chauffage et la densité du mazout EL étant relativement constantes, la formule ci-dessus est généralement assez précise.

Encadré 47

Modèle	A	B	C	D
Diamètre nominal [mm]	15	20	25	32
Débit minimal [l/h]	30	30	70	70
Débit de passage [l/h]	120	120	280	280
Débit nominal [m ³ /h]	1,5	2,5	3,5	5,0
Débit maximal [m ³ /h]	3,0	5,0	7,0	10,0
Valeur k _v [m ³ /h]	3,3	5,0	10,0	12,0

Tableau 48: Caractéristiques de compteurs de chaleur conventionnels fabriqués en série (roues à ailettes).

compteur spécial pour la pompe à chaleur). Pourtant plusieurs distributeurs seraient prêts, pour une somme modeste ou même gratuitement, de poser des compteurs dits « privés ». L'achat d'un compteur ne représente pas une dépense immodérée: pour environ Fr. 600.– déjà, on peut se procurer des compteurs à trois phases tout à fait appropriés.

Les compteurs électriques usuels ne peuvent être relevés que visuellement; ils n'ont donc pas de sorties impulsions. Les tendances actuelles sont de plus en plus dirigées vers un enregistrement automatique; il est donc préférable de commander des nouveaux compteurs à impulsions, le supplément de prix étant négligeable. Les compteurs existants peuvent aussi être équipés d'un module d'affichage.

Pour effectuer des mesures temporaires, il faut saisir la tension et le courant et les transmettre à un appareil mesurant la puissance ou l'énergie (figure 45). Pour ne pas être obligé d'interrompre les raccordements lorsque l'on mesure le courant, on utilisera des pinces ampèremétriques. Les câbles, souvent très épais, seront séparés sur une longueur suffisante pour permettre la mise en place des pinces sur chacun d'entre eux.

Gaz naturel

Les compteurs à gaz, comme les compteurs électriques, sont installés par les fournisseurs d'énergie pour le décompte des frais. A l'avenir, il faudra être encore plus attentif au fait que les compteurs soient équipés de sorties impulsions. En général, un compteur principal suffit, les répartitions pouvant être définies en fonction de compteurs horaires. L'important ici, c'est que les heures d'exploitation soient enregistrées avec précision pour chaque étape, c'est-à-dire sans durée de préinçage et avec arrêt du compteur en cas de panne.

En outre, on relèvera encore que le compteur à gaz mesure des soi-disants « m³ d'exploitation », selon les conditions locales (température, pression de l'air, humidité). Un calcul approximatif peut être effectué selon encadré 46; les facteurs exacts de calculs sont à demander impérativement au service du gaz.

Huile de chauffage

L'enregistrement de la consommation annuelle d'huile de chauffage (par exemple pour le décompte des frais de chauffage) s'effectue au moyen d'une jauge placée dans la citerne. Pour une lecture répétée, en particulier pour déterminer la signature énergétique, l'installation d'un compteur à impulsions est vivement recommandée. L'évaluation de la durée de fonctionnement du brûleur et

des litres consommés est possible, mais relativement chère. La conversion des kilogrammes, respectivement des litres de mazout EL (extra léger) en kilowattheures peut être calculée selon l'encadré 47.

Chaleur et froid

La mesure de la chaleur et du froid réserve inévitablement des surprises désagréables. Le slogan «avoir confiance, c'est bien, contrôler c'est mieux» convient parfaitement dans ce cas. Les mesures de contrôle appropriées sont :

- compteur global, contrôlant plusieurs compteurs subordonnés;
- comparaison entre les consommations de courant électrique, d'huile de chauffage et de gaz.

Une conception minutieuse et ultérieurement une surveillance et des contrôles périodiques conduisent à des résultats satisfaisants. Les trois parties : sonde de température, mesures de débit et calculateur doivent être compatibles entre eux pour assurer un réglage optimal. Les mesures sont d'autant plus précises que la différence de température est grande.

C'est pourquoi les principes de raccordement dont les différences de température sont élevées auront la préférence. De plus, par un équilibrage hydraulique minutieux, il faudra s'assurer que la différence de température calculée corresponde bien à la réalité. Lors du choix et de la mise en place d'une sonde de température, il faut au préalable :

- garantir une bonne circulation autour de la sonde;
- assurer une distribution régulière de température dans le diamètre de la conduite (éviter de placer la sonde dans les points de mélange);
- adapter les constantes de température de la sonde (constante de température d'autant plus petite que le changement de température doit être rapidement constaté, très important par exemple pour l'eau chaude).



Le tableau 48 présente les données techniques d'une série courante de compteurs d'eau chaude.

Quelles sont les pertes de charge constatées par débit nominal? La formule des différences de pression de l'encadré 29 indique les valeurs suivantes :

$$\Delta p_A = 100 \cdot (1,5 \text{ m}^3/\text{h} / 3,3 \text{ m}^3/\text{h})^2 = 21 \text{ kPa}$$

$$\Delta p_B = 100 \cdot (2,5 \text{ m}^3/\text{h} / 5,0 \text{ m}^3/\text{h})^2 = 25 \text{ kPa}$$

$$\Delta p_C = 100 \cdot (3,5 \text{ m}^3/\text{h} / 10,0 \text{ m}^3/\text{h})^2 = 12 \text{ kPa}$$

$$\Delta p_D = 100 \cdot (5,0 \text{ m}^3/\text{h} / 12,0 \text{ m}^3/\text{h})^2 = 17 \text{ kPa}$$

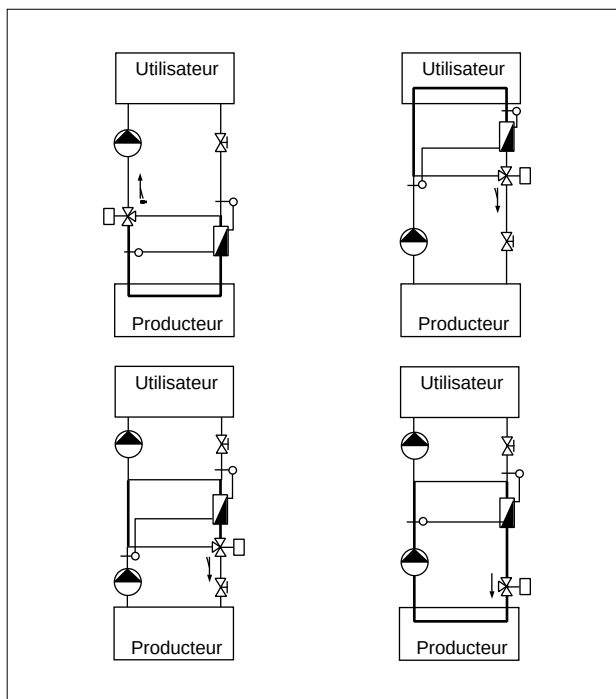


Figure 49 : Les fabricants de compteurs de chaleur recommandent d'installer le compteur de débit sur le secteur à débit variable. Mais attention : cela peut porter préjudice à l'autorité de la vanne !

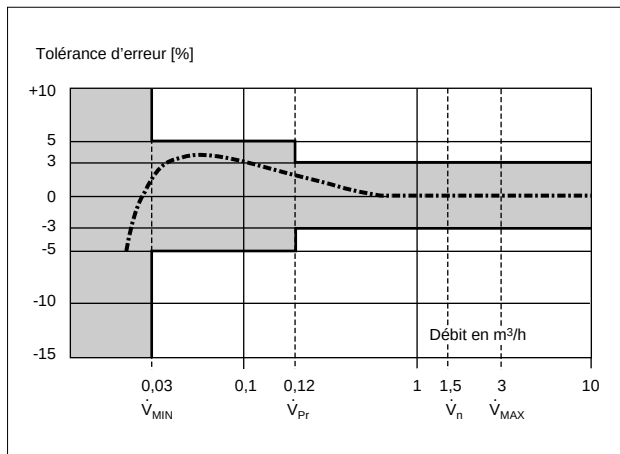


Figure 50: Exemple d'une courbe d'erreur de mesure d'un compteur de chaleur pour un débit nominal de 1500 l/h : à 30 l/h, le compteur est entraîné de telle sorte qu'une tolérance de mesure de $\pm 5\%$ peut être donnée; cette tolérance est valable pour une zone de passage allant jusqu'à 120 l/h, ensuite de quoi la tolérance passe à $\pm 3\%$; un débit maximal de 3000 l/h n'est admis que pour un laps de temps très bref (quelques minutes). Les pointillés indiquent une courbe typique d'erreur de mesure.

Ces pertes de charges importantes correspondant au débit nominal conduisent inévitablement à des définitions erronées: le compteur de débit est en l'occurrence souvent placé sur un secteur à débit variable (figure 49), afin que la différence de température qui lui est liée soit la plus grande possible (meilleure précision de mesure). En conséquence, et cela est souvent oublié par plupart des planificateurs(trices), l'autorité de la vanne de réglage s'en trouve détérioré! On se retrouve alors devant un paradoxe: on désire obtenir une perte de charge à travers compteur la plus petite possible pour garantir une bonne autorité de la vanne, et une faible perte de charge entraîne une diminution de la précision du réglage dans la zone inférieure des débits (figure 50). La diversité des modèles de fabrication permet cependant de trouver des solutions appropriées.

La longueur maximale autorisée des câbles de raccordement entre sonde de température et calculateur est souvent très courte (résistance des câbles). C'est pourquoi le calculateur est fréquemment installé, parfois sans protection, près du distributeur. Dans ce cas, il faut faire particulièrement attention au risque d'encrassement et au maintien de la température ambiante tolérée. En choisissant le calculateur, il faut tenir compte de:

- la résolution appropriée de l'affichage;
- des sorties impulsionnelles pour débit et énergie avec une résolution suffisante.

Sorties impulsionnelles

Il a été maintes fois mentionné que les appareils de mesure d'énergie devraient en principe être équipés d'une sortie impulsionnelle, peu importe que celle-ci soit utilisée immédiatement ou prévue pour usage ultérieure. Dans la pratique, les relais read et les sorties optocouplées sont éprouvés. Tous les deux sont libres de potentiel. Les sorties à transistors potentiellement liées sont plutôt à déconseiller, car leur raccordement à un data-logger est sensiblement plus critique.

En outre, il faut porter une certaine attention au degré de résolution. La fréquence conseillée des sorties devrait se situer entre 0,1 et 1 Hz, ou autrement dit, une impulsion toutes les 1 à 10 secondes. Mais attention: des fréquences de sortie trop élevées ne sont pas possibles pour des contacts à relais.

5. Technique de raccordement

5.1 Problèmes de raccordements

Des études entreprises dans le cadre de projets de recherches, d'installations-pilotes et de démonstration, optimisations d'exploitations, expertises, etc. aboutissent toujours à la même conclusion : le fonctionnement des installations-pilotes elles-mêmes est si médiocre que le rendement n'est de loin pas atteint. Le plus souvent ce sont des problèmes de commande, de régulation et d'hydraulique qui en sont la cause.

Plus une installation est complexe, plus les exigences à l'encontre du planificateur deviennent importantes et, bien entendu, plus le danger de défectuosité devient aigu. Ces dernières années, la situation s'est encore aggravée, car on encourage de plus en plus les installations avec débit variable, ce qui en augmente d'autant la complexité. Les problèmes les plus importants surviennent lorsque de nouvelles installations de production de chaleur plus performantes doivent être raccordées à des installations existantes dont les niveaux de températures de retour sont élevées ; et ce cas se présente beaucoup plus fréquemment que, par exemple, la réalisation entièrement nouvelle d'une installation (figure 51).

Actuellement, il est très rare de trouver une documentation de soumission indépendante d'une marque de fabrication. En revanche, l'éventail des dépliants publicitaire est très vaste. Des documents faisant référence à une marque de fabrication sont certes plus faciles à manipuler que des documents neutres, car à un problème de réglage bien déterminé correspond souvent un régulateur approprié. Dans ce cas, une planification et une soumission neutres sont pratiquement impossibles.

Mis à disposition essentiellement par des fabricants, des schémas sont offerts selon le principe des « éléments de construction » (schéma en bande) : 5 à 10 « composants » suffisent à élaborer un schéma qui peut ensuite être photocopié. La combinaison infinie des variantes possibles conduit à un véritable flot de solutions de plus en plus difficile à comprendre et à comparer.

C'est pourquoi le développement futur devrait être axé beaucoup plus sur des principes de régulation standards neutres et non rattachés à des fabricants. Cette proposition a le grand avantage de contraindre les fabricants d'appareils de réglage à offrir pour les schémas de raccordement les plus fréquents des appareils de réglage compacts et des schémas électriques standards (pour des situations simples, c'est déjà le cas actuellement).

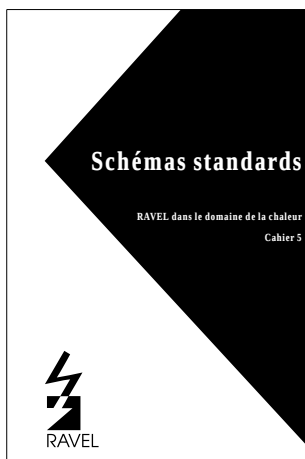


Figure 51: L'intégration d'installations d'un niveau énergétique élevé dans des systèmes existants pose problème. On dispose par exemple souvent de distributeurs à injection équipés de vannes à trois voies qui provoquent un trop fort mélange du retour. Dans ce cas, une seule solution s'impose : installer des vannes de passage !

Bibliographie relative aux schémas de raccordement

Dans la brochure N° 5 «Schémas standards» de la présente série «RAVEL dans le domaine de la chaleur», on trouve les descriptions de trois types de schémas standards pouvant être couplés sans autre. Il s'agit de:

- installations de production de chaleur;
- installations d'utilisation de chaleur;
- installations pour le chauffage de l'eau.



Groupés sous le thème «Pompes à chaleur», nous recommandons en outre la série d'ouvrages de la Société Suisse des Ingénieurs en chauffage et en Climatisation (SICC), dans lesquels sont traités, spécifiquement et en détail, les raccordements d'installations de sources de chaleur.



SICC directive 92-1: Couplages hydrauliques d'installations de chauffage par pompes à chaleur. Berne: Société Suisse des Ingénieurs en Chauffage et Climatisation (SICC), 1992. (Source: SICC, case postale, 3001 Berne).

Encadré 52

5.2 Schémas standards RAVEL

Sur la base des problèmes soulevés plus haut, RAVEL a sélectionné des schémas éprouvés et les a rassemblés dans le cahier 5 de la série de publications à laquelle appartient la présente brochure. Dans ce contexte, il est important de parler non de standardisation de composants (par exemple centrale chaleur-force standard), mais de standardisation côté installation.



*Cahier 5 «Schémas standards»
cf. aussi encadré 52!*

5.3 Production de chaleur, accumulateur et distributeur décentralisés

Un problème qui resurgit à intervalle régulier, c'est le raccordement hydraulique avec accumulateur respectivement distributeur décentralisé. La figure 53 donne des explications claires et précises sur les variantes de raccordement les plus importantes avec une pompe à chaleur comme producteur de chaleur:

Schéma A: ce raccordement ne pose pas de problème, car la perte de charge de l'accumulateur est faible.

Schéma B: l'accumulateur se trouve très éloigné de la pompe à chaleur et du distributeur. La perte de charge Δp dans la conduite à distance et dans l'accumulateur provoque, si la conduite est trop longue, une variation intolérable de la différence de pression dans le raccordement du distributeur «sans pression», qui est de $+\Delta p$ à la charge et $-\Delta p$ à la décharge. Si le dimensionnement de la vanne de réglage est précis, l'expérience a démontré qu'une variation d'environ ± 3 kPa de la différence de pression est supportable.

Schéma C: un distributeur placé à distance pose des problèmes, car dans ce cas précis, le distributeur «sans pression» est mis sous pression proportionnellement à la perte de charge dans la conduite à distance et dans le distributeur. Toutefois, la variation de la différence de pression du raccordement n'a lieu ici que dans un sens, contrairement au schéma B. A la question: «Quelle est la différence de pression maximale supportable dans un raccordement?», on répondra:

- la perte de charge dans chaque vanne de réglage du distributeur doit obligatoirement être plus grande que la différence de pression dans le raccordement (autorité

de la vanne $\geq 0,5$); en pratique, la perte de charge de la vanne de réglage dans les distributeurs existants dépasse rarement 3 à 5 kPa; la différence de pression dans le raccordement ne peut donc assurément pas être plus grande;

- en outre, la perte de charge dans la conduite à distance ne doit pas dépasser 20% de la hauteur utile de la plus petite des pompes du groupe.

Schéma D : une pompe à distance et un bypass dans le distributeur ne sont malheureusement pas une solution, car ce système provoque un important mélange de la température de retour

Schéma E : cette solution peut éventuellement convenir : si l'accumulateur est posé près du distributeur, la perte de charge du raccordement du distributeur est suffisamment petite. Il faut toutefois veiller à ce que :

- la vanne de charge soit installée le plus près possible de la pompe à chaleur (pas de temps mort)

et

- la perte de pression dans la vanne de charge soit au moins égale à la perte de pression dans la conduite à distance et dans l'accumulateur (autorité de la vanne $\geq 0,5$).

Schéma F : une solution qui convient toujours, c'est la répartition par injection avec vannes de passage et régulation de la différence de pression au moyen d'un réglage de la vitesse de la pompe à distance.

5.4 Equilibrage hydraulique

L'appellation «équilibrage hydraulique» désigne ici un équilibrage technique (supplémentaire). L'équilibrage mathématique (calcul des ajustements) est admis comme étant aujourd'hui une réalité indiscutable.

 *Bibliographie relative à ce sujet : voir encadré 28.*

Un équilibrage hydraulique est-il vraiment nécessaire ?

Les installations techniques du bâtiment accusent constamment les mêmes défauts :

- émission irrégulière de chaleur dans les locaux ;
- problèmes de bruit provenant des vannes thermostatiques ;
- installations nécessitant toujours de grosses différences de température (utilisation d'accumulateurs,

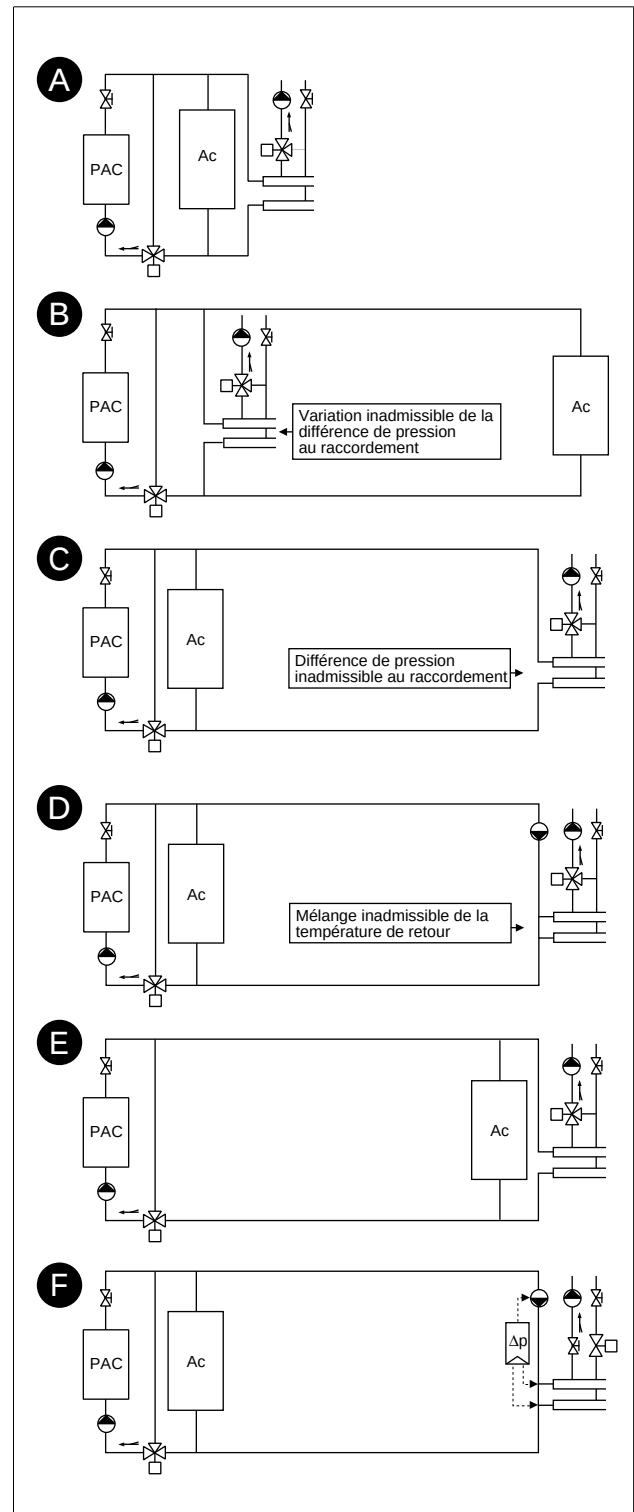


Figure 53 : Emplacement du producteur, de l'accumulateur et du distributeur de chaleur.

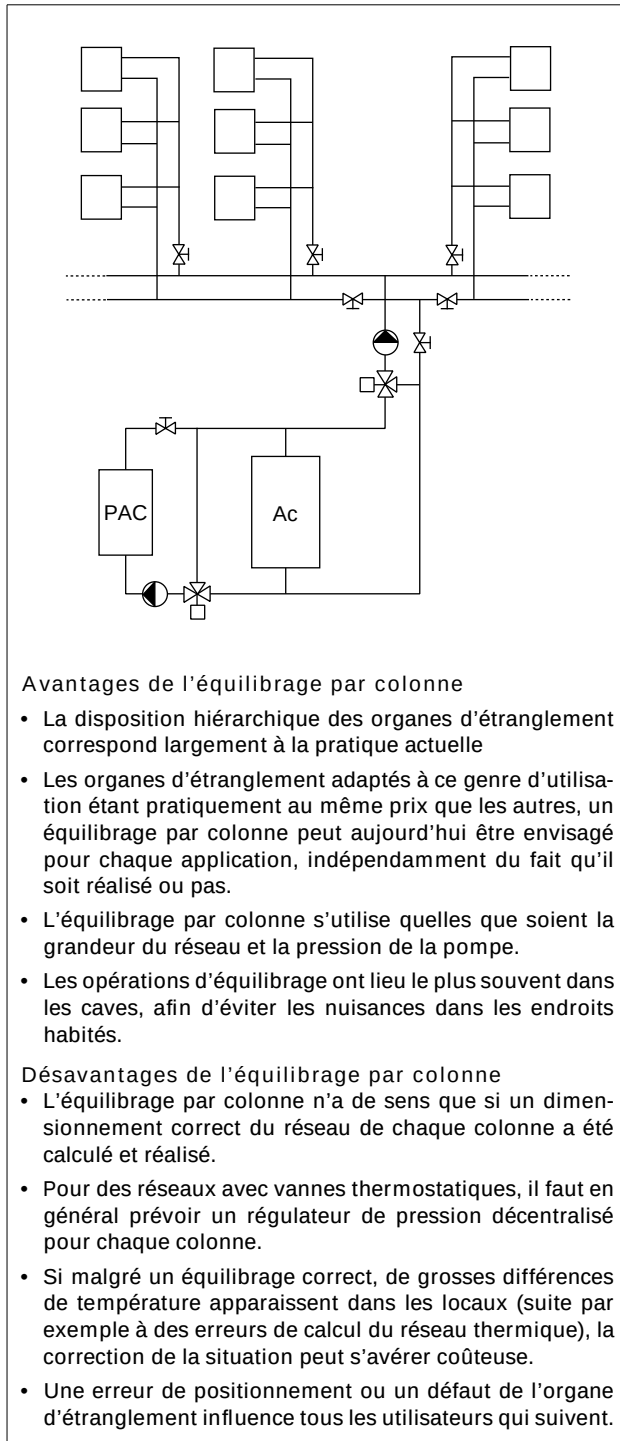


Figure 54: Equilibrage par colonne.

chaudières à condensation, raccords de chauffages à distance, etc.) ne correspondent pas aux différences de température prescrites;

- problèmes de mesure et de réglages techniques provoqués par des débits trop importants.

Ces défauts reflètent certes un problème général des techniques du bâtiment, mais les répercussions négatives qu'ils engendrent s'accroissent encore dans les installations de couplage chaleur-force, de pompes à chaleur, de récupération de chaleur et d'utilisation des rejets thermiques. C'est pourquoi un équilibrage hydraulique pour ces nouvelles techniques énergétiques performantes s'avère absolument indispensable.

Equilibrage par colonne

Lors de la réalisation d'un équilibrage par colonne, toutes les colonnes doivent être équipées de systèmes d'étranglement, et si l'équilibrage doit être effectué par mesure du débit, les segments de mesure nécessaires seront prévus. Pour équilibrer les colonnes, on procède hiérarchiquement: on commence par la colonne montante, puis les colonnes latérales et enfin la colonne principale. A l'intérieur de chaque colonne montante, un équilibrage purement mathématique s'effectue par les ajustements calculés des vannes de radiateurs ou des raccords de réglage. La figure 54 indique l'ordre des organes d'étranglements d'un équilibrage par colonne dans une installation de pompe à chaleur avec charge par stratification.

Equilibrage côté utilisateur

Concernant cette deuxième stratégie d'équilibrage, la pression n'est réduite que vers l'utilisateur. Chaque utilisateur doit alors être équipé d'un système étrangleur approprié et – au cas où un équilibrage avec mesurage du débit est nécessaire – des segments de mesure nécessaires. La figure 55 indique dans quel ordre sont placés ces organes étrangleurs, en cas d'équilibrage côté utilisateur.

Il faut noter que, pour chaque réglage de radiateur, les débits du radiateur déjà réglé varient eux aussi, suite aux rapports de pression variables dans les conduites. C'est pourquoi il est important, pour ce système d'équilibrage, que la pompe et le réseau correspondent le mieux possible à une source de pression ne réagissant que faiblement aux variations de débit. Par une utilisation adéquate du système «équilibrage côté utilisateur», des réseaux très vastes peuvent être réalisés avec une pompe de 20 kPa, principalement quand l'installation est définie par une valeur R moyenne (perte de charge dans une conduite rectiligne) de moins de 70 Pa/m.

5.5 Directives de dimensionnement

Ces dernières années, de nombreuses expériences ont été réalisées sur les réseaux à débits variables. Si les directives de dimensionnement du tableau 56 sont respectées, il en ressort aucun problème significatif. Certaines valeurs-cibles exigées étant parfois difficiles à mettre en application, on peut les remplacer par des valeurs limites. Toutefois, l'utilisation de ces dernières devrait garder un caractère exceptionnel !

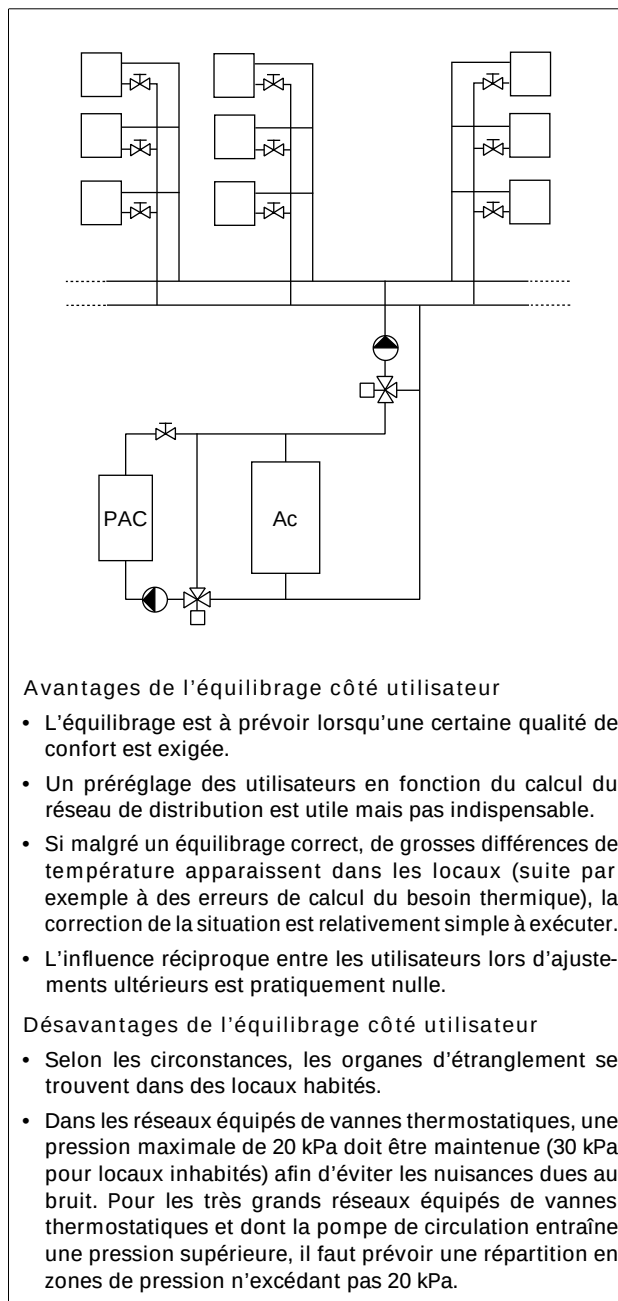


Figure 55: Equilibrage côté utilisateurs.

Directives de dimensionnement

- N'utiliser que des raccords qui se rapportent précisément aux quatre schémas hydrauliques de base.
- Ne jamais laisser agir plus d'une pompe sur un circuit hydraulique.
- Surveiller le bon fonctionnement du découplage du circuit hydraulique, c'est-à-dire dimensionner généreusement les bypass et les raccords d'accumulateurs. Les groupes et distributeurs «sans pression» doivent pour le moins être prévus avec une faible différence de pression.
- Les producteurs, accumulateurs et distributeurs de chaleur doivent être installés à proximité les uns des autres; cela évite bien des problèmes hydrauliques.
- Les accumulateurs doivent toujours fonctionner du côté secondaire avec des débits variables.
- Les variations de pression de l'utilisateur de 1:2 jusqu'à maximum 1:3 ne provoquent généralement pas de dérangements notables. Il s'ensuit pour l'autorité de l'utilisateur:
 - Valeur-cible = 0,3
 - Valeur-limite = 0,5
- Pour les vannes de réglage, une autorité de la vanne de 0,5 est conseillée. Pourtant la pratique démontre que des valeurs allant jusqu'à moins de 0,3 sont tolérées la plupart du temps. Ces valeurs sont en principe aussi valables pour des vannes thermostatiques. Bien qu'une vanne thermostatique travaillant uniquement sur la position «ouvert/fermé» ne présente pas d'inconvénient majeur, on peut octroyer des valeurs à peine plus basses aux vannes thermostatiques:
 - Vannes de réglage Valeur-cible = 0,5
 Valeur-limite = 0,3
 - Vannes thermostatiques Valeur-cible = 0,3
 Valeur-limite = 0,1
- Pour éviter des nuisances sonores dans les vannes thermostatiques, une différence de pression maximale acceptable doit être maintenue dans les vannes thermostatiques:
 - Maisons familiales 20 kPa
 - Constructions non habitées 30 kPa
- Les réseaux équipés de vannes thermostatiques devraient si possible être prévus de telle façon que l'on puisse installer une pompe de circulation à courbe caractéristique plate ou une pompe à vitesse réglable, dont la hauteur manométrique par débit nul soit maximum de 20 kPa (constructions non habitées: maximum 30 kPa). On évite ainsi les problèmes de bruit.
- Si une pompe de 20 kPa (constructions non habitées 30 kPa) ne suffit pas, il faut installer des régulateurs de différence de pression décentralisés (par exemple vannes de régulation dans les colonnes montantes).
- Ne jamais poser d'étrangleurs dans une pompe; en revanche réduire la vitesse, changer le rotor ou changer la pompe.
- Les revues spécialisées recommandent des pertes de charge moyennes dans la conduite rectiligne (valeur R) de 100 à 200 Pa/m pour les distributions habituelles et de 200 à 400 Pa/m pour les systèmes à conduite unique, les conduites à distance (coûteuses), etc. Ces valeurs ne devraient être utilisées que dans des réseaux conventionnels avec débit constant. Pour des réseaux avec débit variable, les valeurs R maximales suivantes (résistances particulières incluses) sont conseillées:
 - Valeur-cible 70 Pa/m
 - Valeur-limite 100 Pa/m
- Dans la pratique actuelle, on ne rencontre plus guère de différences de température entre «départ» et «retour» de plus de 5 K. Si l'équilibrage est effectué correctement, les valeurs de planification de 10 à 20 K usuelles peuvent sans autre être atteintes. Il n'est pas conseillé d'aller au-delà de 30 K, car cela poserait d'autres problèmes, parfois difficiles à résoudre. Ainsi les petites valeurs k_v imposées ne pourraient pas être réglées du tout, ou encore le risque d'encrassement augmenterait par débit trop faible (particules d'impuretés non évacuées). C'est pourquoi on recommande les écarts de température suivants:
 - 10 à 15 K pour des températures de départ allant jusqu'à 50°C;
 - 15 à 30 K pour des températures de départ de 50 à 90°C.

Encadré 52

6. Assurance qualité dans le déroulement de la planification

6.1 Assurance qualité

L'expérience démontre – et cela a déjà été âprement discuté – qu'un grand nombre d'installations techniques du bâtiment ne travaillent pas comme l'aurait souhaité le planificateur(trice) (cf. explications à l'encadré 57). Ce sujet a été étudié dans deux publications RAVEL (encadré 58 en bas). Il y est fait mention des possibilités d'amélioration dans le déroulement de la planification, dans le but d'offrir un contrôle de qualité digne de ce nom.

Dans la technique du bâtiment, chaque installation est pratiquement un « prototype ». Ainsi, le problème majeur du contrôle de qualité réside beaucoup moins au niveau des composants (par exemple examen des types de construction), qu'au niveau de l'installation. Ceci s'aggrave encore par le fait que les partenaires du projet se contrôlent eux-mêmes, de sorte que personne n'assume véritablement le rôle de responsable principal. Pour remédier à cette situation, les auteurs des publications RAVEL précitées sollicitent la désignation d'un (ou d'une) spécialiste en énergie qualifié(e) et indépendant(e), et prônent la nécessité d'une optimisation de l'exploitation et d'un contrôle des résultats (encadré 58).

Certaines règles de base pour une utilisation rationnelle de l'énergie doivent être respectées. Cela n'est possible que si le problème est considéré tout d'abord dans son ensemble. Les décisions prises dans cette première phase fixent tous les points importants et les erreurs commises ici se répercutent en s'aggravant sur la consommation d'énergie et sur l'environnement. Il est regrettable que la liste des mesures impératives à prendre, selon figure 59, soit si souvent négligée. Le planificateur(trice) doit donc établir en premier lieu un concept global qui servira de base à un cahier des charges détaillé. Dans ce dernier et en collaboration avec les responsables de la planification, les valeurs-cibles (comme base de planification) et les valeurs-limite (comme valeurs de garantie) seront définies et vérifiées lors du contrôle des résultats.

Les étapes de « mise en service » et « réception de l'installation » seront placées sous la responsabilité du maître de l'ouvrage. Ce serait une lourde erreur de considérer, à ce moment-là, que l'installation travaille à son rendement optimal et de déclarer toute rectification de la régulation superflue pour la suite : une optimisation du fonctionnement de l'installation par la planificatrice ou le planificateur est indispensable !

L'optimisation de l'exploitation s'achèvera par un contrôle des résultats. A cet effet, il faut que soit inscrit

Termes utilisés

Planificateur(trice) : généralement responsable du chauffage, de la ventilation, de la climatisation, des installations sanitaires et électriques, etc.

Spécialiste en énergie : responsable du contrôle de la qualité dans le domaine de l'énergie.

Conseiller(ère) en énergie : conseille le maître de l'ouvrage dans les questions énergétiques (experts énergétiques cantonaux, infoénergie, etc.).

Encadré 57

Optimisation du fonctionnement et contrôle des résultats

- Les éléments de contrôle et de mesure indispensables à l'optimisation de l'exploitation et aux contrôles des résultats seront prévus déjà dans la phase de conception du projet. Les instruments de mesure indispensables, comme doigts de gant etc., figurent sur la brochure des schémas standards RAVEL.



Cahier 5 : « Schémas standards ».

- L'enregistrement des mesures indispensables de l'exploitation sur des formulaires adéquats se fera chaque semaine (pour un certain temps éventuellement chaque jour) par la personne responsable. Cette dernière transmettra ces données chaque mois au planificateur(trice) responsable, qui analysera immédiatement ces valeurs, afin d'améliorer l'optimisation du fonctionnement.
- Dans des installations plus importantes et plus complexes – et toujours lorsque les problèmes surgissent – il est recommandé de se servir d'un enregistrement automatique des mesures avec Datalogger. Si les signaux nécessaires à ces enregistrements sont branchés dès le début sur un bornier de raccordement placé dans l'armoire de distribution et facilement accessible, les dépenses se maintiendront dans des limites raisonnables.
- Des installations commandées par ordinateur (système d'automates programmables, gestion centralisée) doivent permettre l'enregistrement et la restitution des données importantes (par exemple sous forme de fichier ASCII).
- Dans la première période de chauffage, l'installation ne fonctionne souvent pas très régulièrement (utilisation incomplète, séchage du bâtiment, etc.) ; dans ce cas, introduire si possible une phase d'optimisation de l'exploitation s'étendant sur une période de deux ans.
- Les valeurs-limite (valeurs de garantie) et les valeurs-cibles (valeurs de planification) pour le contrôle des résultats doivent au préalable être définies et inscrites dans un cahier des charges.



R. Bühler et R. Mayer : *Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle von Wärmepumpen- und Wärmekraftkopplungsanlagen*. Bern : Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993. (Bezugsquelle : EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.397.31.57 d)*.

U. Steinmann et al. : *Die Bedeutung organisatorischer Fragen für die Planung energetisch guter Gebäude und Haustechnikanlagen*. Bern : Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993. (Bezugsquelle : EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.397.41.57 d)*.

* n'existe pas en français

Encadré 58

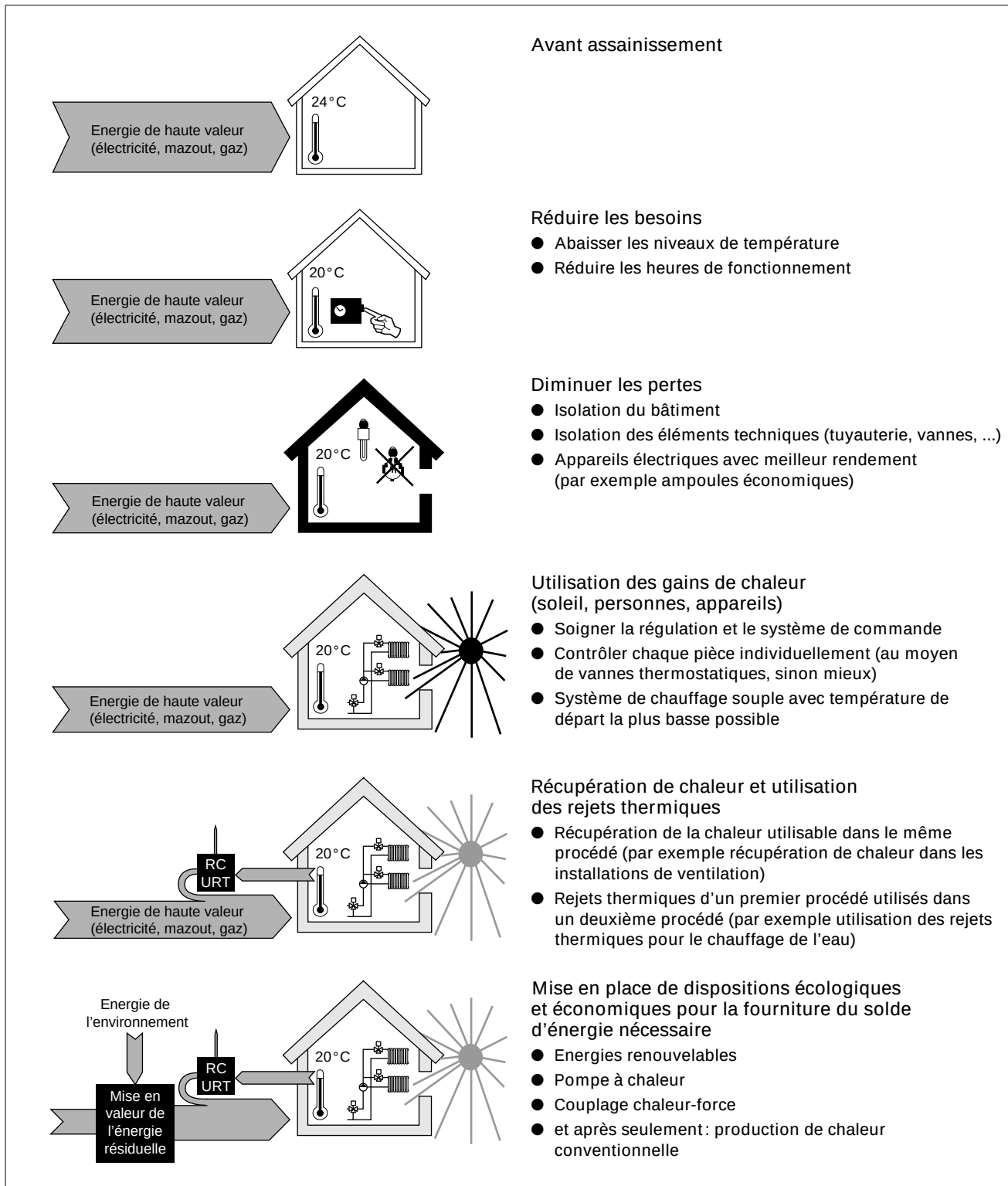


Figure 59: Liste de mesures rationnelles au niveau énergétique.

au préalable dans un cahier des charges tout ce qui devra être contrôlé et quelles sont les valeurs de garantie qui doivent être respectées: il faut éviter à tout prix que les personnes à contrôler se contrôlent elles-mêmes.

6.2 Réglementation SIA 108 concernant les honoraires

La réglementation des honoraires SIA 108 représente la base des planifications en matière de technique du bâtiment. Elle différencie les phases et les prestations partielles énumérées au tableau 60. Il s'agit avant tout de savoir quelles phases respectivement prestations partielles sont concernées, de quelle façon elles doivent être honorées et qui en est responsable.



Le concept global et le cahier des charges seront classés en phase 0 «phase des études préalables». Dans cette rubrique, les prestations partielles n'étant pas définies, le règlement des honoraires s'effectuera au tarif temps ou selon forfait. Dans le sens d'un contrôle de qualité authentique, ces opérations seront exécutées par un ou une spécialiste des problèmes énergétiques, qui ultérieurement s'occupera en outre du contrôle des résultats.

Afin de déterminer dans quelle mesure l'avant-projet (phase 1) fait encore partie ou non du concept global et du cahier des charges, les décisions seront prises de cas en cas. De toute manière, le projet (phase 2) et la préparation de l'exécution (phase 3) sont l'affaire du (ou de la) planificateur(trice).

Après la conclusion des contrats d'entreprise, on passe à la planification détaillée et à l'exécution (phase 4). Si la conception du projet est claire depuis le début, il ne devrait pas surgir plus de problèmes que pour la construction d'une installation conventionnelle. Les travaux de réglage et de mise en service doivent être menés avec un soin particulier. Comme il s'agit, en règle générale, d'installations impliquant des débits hydrauliques variables, un équilibrage hydraulique s'avère indispensable.

Les choses se compliquent au niveau de la phase finale 5: des rubriques comme «optimisation du fonctionnement» et «contrôle des résultats» sont vainement recherchées sous la rubrique «prestations partielles». En tous cas, le contrôle des résultats pourrait figurer dans: prestation partielle 15 «travaux de garantie», si ce contrôle est à effectuer par le planificateur(trice) lui(elle)-même.

Phases	Prestations partielles	Description
0		Phase des études préalables Aucune prestation partielle définie
1	1 2	Phase de l'avant-projet Avant-projet Estimation des coûts et des délais
2	3 4 5	Phase du projet Projet de construction Devis estimatif des coûts Procédures d'autorisation
3	6 7 8 9	Phase de préparation à l'exécution Plans de soumissions Soumissions Analyse des offres-contrats d'adjudication Plans des délais
4	10 11 12	Phase d'exécution Contrats avec entreprises et fournisseurs Dossiers d'exécution Direction des travaux
5	13 14 15	Phase finale Décompte final Dossier d'exploitation Travaux de garantie



Réglementation SIA 108: réglementation pour prestations et honoraires des ingénieurs en machine et ingénieurs en électricité ainsi que des ingénieurs spécialisés en installations pour bâtiments. Zurich: Société Suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA), 1984. (Source: SIA, case postale, 8039 Zurich)

Tableau 60: Phases et prestations partielles selon réglementation SIA 108.

Contrôle de qualité pour les petites installations

Les mêmes règles de contrôle de qualité sont en principe appliquées aux petites comme aux grandes installations. Du fait de leur moins grande complexité, les phases d'optimisation et de contrôle des résultats des petites installations ne sont pas trop coûteuses; toutefois exécutant et planificateur étant souvent représentés par une seule et même personne, un contrôle s'avère d'autant plus indispensable. Des solutions plus simples sont envisageables:

- Demander l'appui d'un conseiller(ère) en énergie pour l'établissement d'un cahier des charges simple (valeurs-cibles et valeurs-limite avec instrumentation nécessaire à leur enregistrement) et pour collaborer au contrôle des résultats après un ou deux ans (convenir d'un montant forfaitaire pour les honoraires!)
- Des maîtres de l'ouvrage plus ou moins experts en technique peuvent également se faire conseiller (délégués cantonaux à l'énergie, infoénergie, etc.) et établir leur propre cahier des charges pour effectuer le contrôle des résultats.

Encadré 61

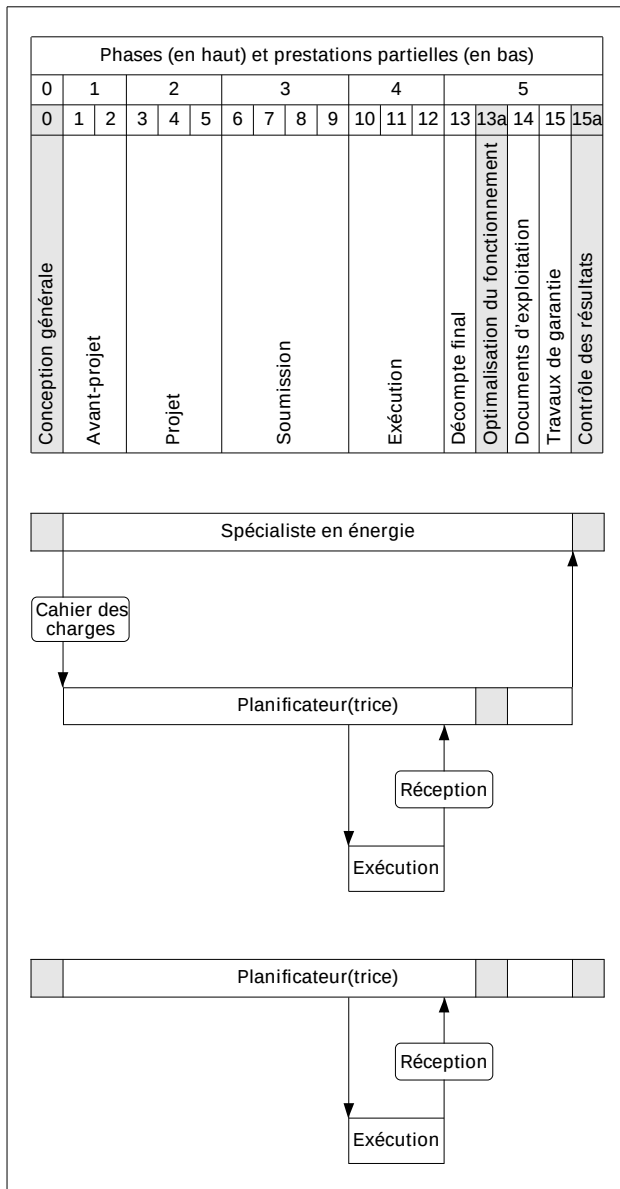


Figure 62: En haut, le déroulement de la planification est représenté selon réglementation des honoraires 108; les prestations partielles 0, 13a et 15a non (encore) réglées sont mises en évidence (ombrées). Avec un planificateur(trice) indépendant(e), on peut parler d'un contrôle de qualité réel (au milieu). En revanche, au moment où le planificateur(trice) établit son propre cahier des charges et qu'ensuite il le contrôle lui-même, il incombe finalement au maître de l'ouvrage de décider s'il veut faire entière confiance au planificateur(trice) (en bas).

➡ L'optimisation du fonctionnement est l'affaire du planificateur(trice). Cette phase n'est pas définie comme prestation partielle mais on peut proposer qu'elle soit honorée au tarif temps ou selon forfait. Il faut aussi considérer que l'exigence juridique garantissant des installations tout à fait aptes à fonctionner subsiste, et si ce fonctionnement est garanti sans une optimisation de l'exploitation, la situation peut devenir extrêmement délicate !

➡ Au cas où le contrôle des résultats – dans le sens d'un contrôle de qualité – est exécuté par un (ou une) spécialiste indépendant(e), il ne fait dès lors pas partie des prestations partielles et doit donc être réglé au tarif temps ou selon forfait. Si, par suite de déficiences, des révisions s'avéraient nécessaires, ces dernières seraient entièrement à charge du responsable.

Il serait souhaitable que la réglementation SIA des honoraires soit rapidement réadaptée. La figure 62 propose une représentation graphique du déroulement de la planification et l'encadré 61 donne des renseignements supplémentaires pour des petites installations.

6.3 Le maître de l'ouvrage doit décider...

En dernier ressort, le maître de l'ouvrage doit décider :

- s'il est prêt à financer une instrumentation adéquate rendant tout simplement possibles une optimisation de l'exploitation et un contrôle des résultats;
- s'il veut faire appel à un (ou une) spécialiste en énergie indépendant(e) pour le contrôle de qualité (figure 62 au milieu);
- ou bien s'il fait entière confiance à son planificateur(trice) qui fera tout son possible au niveau du contrôle de qualité et se portera garant en cas d'erreurs éventuelles (figure 62 en bas).

D'une façon ou d'une autre, un contrôle de qualité de premier ordre est lié à des frais supplémentaires. Il en découle de nombreux avantages, qui compensent sans aucun doute largement les investissements supplémentaires :

- une meilleure coordination entre les partenaires du projet signifie moins de temps morts;
- des limites de responsabilité clairement définies diminuent les insécurités et les risques;
- en lieu et place des frais d'investissement, ce sont les frais annuels qui sont diminués, ce qui est nettement plus rationnel sur le plan économique.

7. Rentabilité

7.1 Problèmes de compréhension

Les planificateurs(trices) en technique du bâtiment ne sont pas des spécialistes des problèmes économiques et vice-versa, ce qui provoque très souvent des problèmes de compréhension :

- les spécialistes en technique du bâtiment manquent d'expérience dans le domaine des calculs de rentabilité ;
- les économistes comparent simplement les économies d'énergie aux investissements supplémentaires nécessaires, mais ne se préoccupent pas de savoir comment ces chiffres ont été obtenus, ni quels avantages cela représente pour la protection de l'environnement.

La marche à suivre pour les calculs de rentabilité (brochure «RAVEL, une économie d'argent», encadré 63) pourrait améliorer quelque peu la compréhension réciproque : par une méthode de calculs uniformisée, une certaine transparence peut être apportée aux deux parties.

Les spécialistes en technique du bâtiment feront surtout en sorte de conserver un certain pragmatisme dans les questions d'économie d'énergie et d'investissements supplémentaires. A cet effet, le mieux serait de comparer entre eux deux cas entièrement calculés, comme par exemple :

- situation antérieure – situation postérieure (assainissement);
- installation projetée – installation comparative fictive (nouvelle construction).

Les nouvelles techniques énergétiques efficaces traitées ici doivent être mises en exergue et le côté « bénéfique pour l'environnement » doit être bien vendu !

Calcul uniformisé de rentabilité,
programme d'impulsion RAVEL



Müller André et Félix Walter: *RAVEL, une économie d'argent. Guide pratique pour les calculs de rentabilité*. Berne: Programme d'impulsion RAVEL, Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992. Source: OCFIM, 3000 Berne, N° de commande 724.397.42.01 f.

Cette publication décrit une procédure dynamique, facile à utiliser et qui conduit à des résultats concluants (méthode des annuités). Certains aspects fiscaux y sont en outre évoqués ainsi qu'une démarche vers la prise en compte des frais liés au respect de l'environnement. Au niveau des systèmes manuels de calcul, on dispose d'un nombre impressionnant de tables. Cependant l'utilisation d'un programme de calcul est aussi possible et la brochure met à disposition les formules y relatives, nécessaires aux programmes les plus courants.

Encadré 63

7.2 Rendement économique acceptable

La rentabilité peut être déjà perçue au moment du choix du système, de sorte que les nouvelles technologies dans le domaine de la production de chaleur ont une chance d'être réalisées, pour autant qu'elles soient rentables. Pour être qualifiée de rentable, une installation doit être au moins à même de compenser durant sa durée de vie l'investissement supplémentaire qu'elle provoque, par des économies d'énergie ou par une production énergétique supplémentaire.

Travaux d'approche et explications préliminaires

Nouvelle installation :

- Concept global pour le corps du bâtiment et la technique.
- Evaluation des besoins en chauffage et en électricité.
- Liste des sources de chaleur et des utilisateurs de chaleur à l'intérieur et aux alentours du bâtiment, à établir selon le lieu, l'heure, la quantité et la température.
- Concept pour la distribution et l'émission de chaleur
 - commande, réglage;
 - système d'émission de chaleur.
- Définition des agents énergétiques disponibles
 - électricité;
 - gaz (gaz naturel, gaz liquide, biogaz);
 - huile de chauffage;
 - bois de feu (bûches, bois déchiqueté, copeaux).

Assainissement :

- Mesures au niveau de l'exploitation, du bâtiment, des appareils
 - réduction des besoins;
 - diminution des pertes.
- Saisie des données (manuelle/avec datalogger)
 - besoin de chaleur (courbes caractéristiques énergétiques);
 - températures d'émission de chaleur (courbes de chauffage);
 - besoins en électricité (courbes de charge).
- Liste des sources de chaleur et des utilisateurs de chaleur à l'intérieur et aux alentours du bâtiment, selon le lieu, le temps, la quantité et la température.
- Concept d'assainissement pour la répartition de chaleur et l'émission de chaleur.
 - réglage individuel pour chaque local, vannes thermostatiques;
 - optimisation des pompes et ventilateurs;
 - agrandissement éventuel des surfaces de chauffe.
- Définition des agents énergétiques disponibles
 - électricité;
 - gaz (gaz naturel, gaz liquide, biogaz);
 - huile de chauffage;
 - bois de chauffage (bûches, bois d'échiqueté, copeaux).

Encadré 64

Là-dessus vient encore se greffer le problème de la liste des mesures à prendre. Une installation de couplage chaleur-force, par exemple, peut se révéler à priori tout à fait rentable, si toute l'énergie produite est consommée. Mais cette même installation peut apparaître non rentable si des mesures d'économie d'énergie supplémentaires sont prises: la consommation de chaleur et de courant devient insuffisante pour la grandeur de l'installation.

En ce qui concerne les nouvelles technologies plus performantes au niveau énergétiques, il faudrait mettre d'avantage l'accent sur le critère du «rendement économique acceptable». De nombreux projets, favorables à une production de chaleur énergétiquement économique, pourraient totalement correspondre au critère ci-dessus, si la notion d'utilisation de l'environnement était estimée à sa juste valeur et prise dans le sens d'une rentabilité globale.

7.3 Procédure

Comment reconnaître une installation susceptible d'être rentable et présentant des conditions favorables à l'application de techniques efficaces au niveau énergétique? La réponse est simple: en inversant le poids des arguments. Ce n'est pas la rentabilité dans son sens étroit qui doit être prouvée, mais le choix d'un système doit démontrer quelles techniques efficaces sur le plan énergétique sont inacceptables du point de vue rentabilité. Pour faciliter ce choix, différents travaux préliminaires et explications sont nécessaires. On les trouvera à l'encadré 64. A partir de ces éléments de base, il est dès lors possible de déterminer laquelle de ces techniques de production de chaleur, dans une circonstance donnée, montrera des dispositions favorables à un rendement économique ou économiquement acceptable. Les techniques de production de chaleur, qui ne peuvent pas être éliminées d'office suite à des conditions défavorables, seront soumises à un examen de rentabilité des plus objectif et ensuite incorporés dans le choix d'un système, après en avoir étudié les effets sur l'environnement.

 De nombreux exemples de calculs de rentabilité figurent dans les cahiers 2 à 4, spécialisés en la matière.

Dénominations, symboles, abréviations

Dénominations et symboles

Amplification électrothermique [-]	AET
Autorité de la vanne [-]	AV
Autorité de l'utilisateur [-]	AU
Capacité de l'accumulateur [kWh]	Q_{Ac}
Caractéristique de la vanne	k_v
Chaleur spécifique [J/kgK, kWh/kgK]	c
Coefficient de performance annuel [-]	COPA
Coefficient de performance, cycle de Carnot [-]	ε_c
Coefficient k (coefficient de transmission thermique) [W/m ² K]	k
Consommation d'énergie pour commande/réglage [kWh]	W_{Cr}
Consommation d'énergie auxiliaire de la chaudière [kWh]	$W_{Ch,aux}$
Consommation de combustible de la chaudière [kWh]	W_{Ch}
Consommation d'énergie de la pompe de l'évaporateur [kWh]	$W_{P,Ev}$
Consommation d'énergie du compresseur [kWh]	W_{Comp}
Consommation d'énergie de la pompe du condenseur [kWh]	$W_{P,Cond}$
Consommation d'énergie du dispositif antigel [kWh]	W_A
Consommation d'énergie du chauffage carter [kWh]	W_C
Constante de temps [s, h]	τ
Contenance de l'accumulateur [m ³]	V_{Ac}
Cosinus phi, facteur de puissance [-]	$\cos\phi$
Courant de blocage [A]	LRA
Courant exergétique [W, kW]	$\dot{Q}_E$
Courant anergétique [W, kW]	$\dot{Q}_A$
Courant électrique [A]	I
Courant de démarrage [A]	I_{dem}
Courant de fonctionnement maximum [A]	I_{max}
Débit du condenseur [m ³ /h]	$\dot{V}_{Cond}$
Débit, flux massique [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Débit, flux volumique [l/s, l/h, m ³ /h]	$\dot{V}$
Débit massique du fluide frigorigène [kg/s, kg/h]	$\dot{m}_{FF}$
Densité [kg/m ³]	ρ
Déperdition chaleur installation accumulateur [kWh]	Q_{IAC}
Différence de température dep-ret au point de dimensionnement [K]	$\Delta\vartheta_{dim}$
Différence de pression sur distance à débit variable [Pa, kPa]	$P_{var,100}$
Différence de température dep-ret au point de bivalence [K]	$\Delta\vartheta_{biv}$
Différence de température [K]	$\Delta\vartheta, \Delta T$
Différence de pression [Pa, kPa]	Δp
Différence de température dans le condenseur [K]	$\Delta\vartheta_{Cond}$
Différence de pression par vanne fermée [Pa, kPa]	$\Delta P_{v,o}$
Différence de température, logarithmique moyenne [K]	$\Delta\vartheta_m$

Différence de pression par vanne

ouverte [Pa, kPa]	$\Delta P_{v,100}$
Durée de fonctionnement [h]	t_f
Energie d'appoint [MJ, kWh]	W_a
Energie récupérée [MJ, kWh]	ER
Energie, général [J, MJ, Ws, kWh]	W
Energie nette récupérée [MJ, kWh]	ER_n
Enthalpie [J/kg, kJ/kg, kWh/kg]	h
Facteur de correction, général [-]	f
Facteur de charge [-]	f_c
Facteur de puissance, cosinus phi [-]	$\cos\phi$
Flux thermique [W, kW]	$\dot{Q}$
Flux thermique spécifique [MJ/m ³ , kWh/m ³]	q
Flux, débit massique [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Flux, débit volumique [l/s, l/h, m ³ /h]	$\dot{V}$
Fréquence d'enclenchement maximale [1/h]	n_{max}
Hauteur manométrique [mWS, Pa, kPa]	H
Humidité absolue [g/kg]	x
Humidité relative [%]	ϕ
Indice de performance de la pompe à chaleur [-]	ε_{PAC}
Indice de dépense énergétique [MJ/m ² a]	IDE
Indice de performance machine frigorifique [-]	ε_{MF}
Indice de performance électrique [-]	s
Indice de performance [-]	ε
Masse [kg]	m
Part de puissance pour perte de pression évaporateur [kW]	P_{Ev}
Part de puissance pour perte de pression condenseur [kW]	P_{Cond}
Pouvoir calorifique supérieur [kWh/kg, kWh/m ³]	H_o
Pouvoir calorifique inférieur [kWh, kWh/m ³]	H_u
Pression [Pa, kPa]	p
Puissance réactive [var, kvar]	P_q
Puissance thermique, général [W, kW]	$\dot{Q}$
Puissance absorbée par le dispositif antigel [kW]	P_A
Puissance du chauffage du condenseur [kW]	$\dot{Q}_{Cond}, \dot{Q}_{PAC}$
Puissance thermique de la pompe à chaleur [kW]	$\dot{Q}_{PAC}$
Puissance nominale aux conditions normales [kWh]	P_{NT}
Puissance absorbée par la pompe [kW]	P_{Pompe}
Puissance hydraulique [W, kW]	$P_{hydraul}$
Puissance active [W, kW]	P
Puissance absorbée par la commande/régulation [kW]	P_{CR}
Puissance, général [W, kW]	P
Puissance thermique [W, kW]	$\dot{Q}$
Puissance apparente [VA, kVA]	P_s
Puissance absorbée par le compresseur [kW]	P_{Comp}
Puissance de refroidissement des machines frigorifiques [kW]	$\dot{Q}_{MF}$
Quantité de chaleur installation de production de chaleur [kWh]	Q_{IPC}
Quantité de chaleur pompe à chaleur [kWh]	Q_{PAC}
Quantité de chaleur, général [J, MJ, Ws, kWh]	Q
Rendement d'enthalpie [-]	η_h
Rendement exergétique [-]	ξ
Rendement [-]	η

Rendement de la pompe [-] η_{Pompe}
 Rendement de température [-] η_{ϑ}
 Rendement d'humidité [-] η_x
 Rendement de Carnot [-] η_c
 Rendement global annuel chaudière [-] $\eta_{\text{ch,a}}$
 Résistance [-] R
 Surface [m²] A
 Taux de renouvellement d'air [-] n_A
 Température de condensation [°C] $\vartheta_{\text{condensation}}$
 Température minimale
 d'évaporation [°C] $\vartheta_{\text{évaporation min}}$
 Température absolue [K] T
 Température maximale de
 condensation [°C] $\vartheta_{\text{condensation max}}$
 Température de sortie du condenseur [°C] $\vartheta_{\text{Cond, s}}$
 Température de charge [°C] ϑ_{char}
 Température de retour [°C] ϑ_{ret}
 Température minimale de sortie
 de l'évaporateur [°C] $\vartheta_{\text{Ev, s min}}$
 Température maximale de sortie
 du condenseur [°C] $\vartheta_{\text{Cond, s max}}$
 Température de déclenchement [°C] $\vartheta_{\text{décl}}$
 Température d'évaporation [°C] $\vartheta_{\text{évaporation}}$
 Température d'enclenchement [°C] ϑ_{en}
 Température [°C] ϑ
 Température de départ [°C] $\vartheta_{\text{départ}}$
 Temps [s, h] t
 Tension [V] U
 Valeur k_v (coefficient de débit) [m³/h] k_v
 Valeur k_{vs} (valeur nominale pour vanne
 ouverte) [m³/h] k_{vs}
 Vitesse [m/s] v
 Volume [l, m³] V

Indices

Entrée 1
 Milieu producteur de chaleur 1
 Milieu absorbeur de chaleur 2
 Sortie 2
 ouvert (100%) 100
 fermé (0%) 0

Abréviations (utilisées aussi comme indices)

Accumulateur Ac
 Air soufflé AS
 Air rejeté AR
 Air recyclé AC
 Air neuf AN
 Air évacué AE
 Couplage chaleur-force compact $CCFC$
 Chaudière Ch
 Chauffage par le sol CS
 Combustible CA
 Commande/régulation CR
 Condenseur $Cond$

Couplage chaleur-force CCF
 Départ dep
 Distribution de chaleur DC
 Eau chaude sanitaire ECS
 électrique el
 Emission de chaleur EC
 Entrée e
 Etrangleur Et
 Evaporateur Ev
 extérieur ext
 Fluide frigorigène FF
 Installation utilisation de chaleur IUC
 Installation de chauffage IC
 Installation de chauffage avec
 pompe à chaleur $ICPAC$
 Installation de la chaudière ICH
 Installation de pompe à chaleur $IPAC$
 Installation source de chaleur ISC
 Installation de production de chaleur IPC
 Installation de l'accumulateur IAC
 intérieur int
 Machine frigorifique MF
 Pompe à chaleur PAC
 Pompe P
 Radiateur RA
 Récupération de chaleur RC
 Retour ret
 Sortie s
 Source de chaleur SC
 Source S
 Surface de référence énergétique SRE
 thermique th
 Total tot
 Producteur Pr
 Utilisateur U
 Utilisation des rejets thermiques URT
 Valeur de consigne V_c
 Valeur instantanée V_i
 Valeur maximale max
 Valeur minimale min
 Valeur nominale n
 Vanne thermostatique VT
 Vanne V
 variable var

Index

- Abréviations, 59
Accumulateur, 48
Accumulateur de chaleur, 26
Amplification électrothermique, 9; 17; 21; 24
Analyse détaillée, 29
Analyse sommaire, 29
Anergie, 14
Appareil à coupure de phases, 40
Appareils à vitesse réglable, 40
Arrêté sur l'énergie, 29
Asservissement aux besoins thermiques, 25
Asservissement aux besoins électriques, 25
Assurance qualité, 53
Autorité de l'utilisateur, 35; 36; 52
Autorité de la vanne, 32; 36; 45; 52
Besoin de chaleur annuel, 26
Bilan énergétique de la Suisse, 7
Cahier des charges, 31; 55
Carnot, Nicolas L. Sadi (1796-1832), 11
Chaleur de l'environnement, 14
Chaleur industrielle, 7
Chaleur de chauffage, 14
Chaudière d'appoint, 26
Chauffage à résistance électrique, 7; 15; 16
Chauffage électrique de l'eau, 7
Chauffage à distance, 8; 42
Circulateur, cf. pompe de circulation
Coefficient de performance annuel, 24
Coefficient de performance de Carnot, 11; 15
Compression, 12
Compteur de froid, 45
Compteur à gaz, 44
Compteur de chaleur, 45
Compteur électrique, 43
Concept global, 53; 55
Condensation, 12
Conduite à distance, 42
Conseiller(ère) en énergie, 53
Consommation énergétique, 27
Consommation électrique de la pompe, 37
Contrôle des résultats, 53; 55; 56
Convertisseur de fréquence, 40
COP, 23
Couplage chaleur-force, 9; 24
Courbe caractéristique de la vanne, 34
Courbe caractéristique à pourcentage identique, 32
Courbe caractéristique négative de la pompe, 40
Courbe caractéristique inclinée de la pompe, 39
Courbe caractéristique de la pompe, 34
Courbe caractéristique du réseau, 35
Courbe caractéristique linéaire de base, 32
Courbe caractéristique d'une vanne de réglage, 32
Courbe caractéristique plate de la pompe, 39
Cycle thermodynamique, 11
Cycle de Carnot, 11; 14
Débit utile, 33
Débit nul, 42
Débit, 32; 38
Dénominations, 59
Déroulement de la planification, 53
Détente, 12
Deuxième principe de la thermodynamique, 13
Diagramme pression/enthalpie, 11
Différence de pression, 32; 38
Différence de température départ/retour, 52
Directives de dimensionnement, 51; 52
Distributeur, 48
Distributeur sans pompe principale, 37
Echangeur de chaleur, 34
Echangeur de chaleur rotatif, 20
Echangeur de chaleur à fluide intermédiaire, 19
Echangeur de chaleur à plaques, 19
Emissions de dioxyde de carbone, 27
Enchaînement des mesures à prendre, 54
Energie primaire, 7
Energie mécanique, 14
Energie de transformation chimique, 14
Energie électrique, 14
Energie, lois cantonales, 29
Enthalpie, 11
Equilibrage hydraulique, 49
Equilibrage côté utilisateur, 50
Equilibrage par colonne, 50
Erreur de mesure d'un compteur de chaleur, 46
Etat de la technique, 16
Evaporation, 12
Exergie, 14; 15
Facteurs d'évaluation, 15; 16
Fluide frigorigène, 11
Fonctionnement de la pompe par débit nul, 42
Formules importantes, 31
Gaz naturel, 44
Hauteur manométrique, 34
Hydraulique, 31
Indice de performance, 15; 23
Indice de performance machine frigorifique, 12
Indice de performance électrique, 27
Indice de performance pompe à chaleur, 12
Indices, 60
Installation couplage chaleur-force compacte, 8; 16; 24
Installation solaire, 18
Installation électrique de secours, 26
Installation d'une centrale de couplage chaleur-force compacte avec moteur à gaz, 25
Installation combinée de couplage chaleur-force, 16; 24
Installation de couplage chaleur-force compacte avec turbine à gaz, 25
Installation de renouvellement d'air, 17
Lois cantonales sur l'énergie, 29
Machine chaleur-force, 11; 13
Machine frigorifique, 11; 13
Maître de l'ouvrage, 56
Mazout, 44
Mesurage de l'énergie, 43
Mesures de promotion et de soutien, 29
Optimisation de l'exploitation, 53; 56
Petite centrale chaleur-force, 25
Planificateur(trice) en énergie, 53

- Pompe, 37; 52
- Pompe à chaleur, 8; 11; 13; 14; 16; 17; 20; 21
- Pompe à chaleur à absorption, 22
- Pompe à chaleur à compression, 22
- Pompe à chaleur/boiler, 23
- Pompe à chaleur air/eau, 23
- Pompe à chaleur avec moteur à gaz, 16
- Pompe à chaleur eau/eau, 22
- Pompe à chaleur saumure/eau, 23
- Pompe de circulation, 37; 52
- Pompe de circulation à vitesse réglable, 40
- Pouvoir calorifique du gaz naturel, 44
- Pouvoir calorifique de l'huile de chauffage, 44
- Premier principe de la thermodynamique, 13
- Principes de la thermodynamique, 13
- Problèmes de bruit, 37
- Problèmes de raccordement, 47
- Production électrique sans surcharge de l'environnement, 27
- Publications du domaine «Chaleur», 10
- Puissance de la pompe, 32
- Puissance d'entraînement, 38
- Puissance thermique nécessaire, 26
- Récupération de chaleur, 8; 17; 19
- Références bibliographiques, 10; 31; 48; 53; 55; 57
- Réglementation des honoraires, 55
- Règles générales pour facteurs d'évaluation, 15
- Régulation de la différence de pression, 41; 42; 52
- Rendement, 15; 38
- Rendement de Carnot, 11; 15
- Rendement de la pompe, 38
- Rendement exergétique, 15
- Rendement global, 26
- Rendement global annuel, 26
- Rendement global annuel pondéré, 27
- Rendement de température, 21
- Rentabilité, 57
- Répartition par injection avec vannes à 3 voies, 47
- Schéma de montage avec étrangleur, 31
- Schéma de montage en dérivation, 31
- Schéma de montage en mélange, 31
- Schéma d'injection avec vanne à 3 voies, 31
- Schéma d'injection avec vanne de passage, 31
- Schémas hydrauliques de base, 31; 33
- Schémas standards, 48
- Séries de publications «RAVEL dans le domaine de la chaleur», 10
- Sorties impulsionsnelles, 46
- Spécialiste, 53
- Stratégies, 27
- Stratégie de production de courant d'origine fossile, 28
- Stratégie de protection de l'environnement, 28; 29
- Symboles, 59
- Système d'émission de chaleur à basse température, 22
- Techniques de production de chaleur, 16
- Technique de raccordement, 47
- Transformation de l'énergie, 11; 16
- Turbine à vapeur, 13
- Unités, 59
- Utilisateur, 35
- Utilisation des rejets thermiques, 8; 17; 19
- Valeur R, 52
- Valorisation, 8; 13; 15
- Vanne, 31
- Vanne à trois voies, 31
- Vanne de passage, 31
- Vanne de réglage, 31
- Vanne thermostatique, 36; 41; 52
- Véhicule électrique léger, 17

Organisations de soutien

ASMFA

Association suisse des maîtres
ferblantiers et appareilleurs

CCF

Association suisse
pour le couplage chaleur-force

INFEL

Centre d'information
pour les applications de l'électricité

SBHI

Ingénieurs-conseils suisses
de la technique
du bâtiment et de l'énergie
