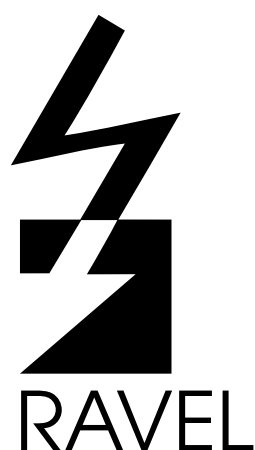


Couplage chaleur-force

**Couplages chaleur-force compacts à moteur à gaz
Planification, construction et
exploitation rationnelle**

**RAVEL dans le domaine de la chaleur
Cahier 4**



Couplage chaleur-force

Combiné à des pompes à chaleur, le couplage chaleur-force (CCF) représente pour un exploitant une alternative judicieuse sur le plan écologique et payante sur le plan économique, pour autant que les installations soient minutieusement planifiées et réalisées là où des conditions favorables sont réunies. La présente brochure explique les cas où ces conditions sont remplies et la façon de procéder pour les planificateurs(trices) lors du projet, du dimensionnement et de la réalisation d'installations de CCF, afin de garantir aux clients une rentabilité et une protection de l'environnement optimales. Dans le premier chapitre, les auteurs donnent un aperçu des différents types de CCF, leur principe de fonctionnement et les tendances futures. Le deuxième chapitre répond aux questions relatives aux possibilités d'application de la technologie de CCF telles que: Dans quels cas une installation de CCF s'avère-t-elle une alternative judicieuse? Quelles conditions-cadre doivent être remplies? Ou encore quelles normes sont à observer? Dans la partie centrale de cette publication, des experts présentent les connaissances fondamentales, les règles de base et les méthodes de calcul pour un dimensionnement, une planification et une réalisation corrects de chaque projet de CCF. Un exemple de cas clair, tiré de la pratique, constitue le fil conducteur à travers les différentes phases de la planification. Cet exemple facilite la tâche des lecteurs et lectrices et leur permet de contrôler leur connaissance des méthodes de dimensionnement sommaire, de la détermination des grandeurs de dimensionnement et des calculs de rentabilité. La dernière partie de cette brochure donne des recommandations pratiques, utiles à une exploitation sans problème; on y trouve également la façon de mener dans les règles de l'art l'entretien, la surveillance, l'optimisation de l'exploitation et le contrôle des résultats. Les spécialistes désirant s'initier au domaine du CCF, mais également les planificateurs(trices) qui ont déjà acquis de l'expérience dans ce domaine, trouveront dans ce document des renseignements utiles à la planification.

ISBN: 3-905233-76-2

Edition originale: ISBN 3-905233-16-9

1995

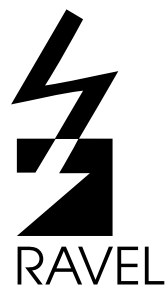
N° de commande: 724.358 f

Couplage chaleur-force

**Couplages chaleur-force compacts à moteur à gaz
Planification, construction et exploitation rationnelle**

RAVEL dans le domaine de la chaleur

Cahier 4



**Programme d'impulsions RAVEL
Office fédéral des questions conjoncturelles**

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

Rédacteur principal: Hans Rudolf Gabathuler

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

Cahier 1: Electricité et chaleur – document de base et annexes (N° de commande: 724.357 f)

Cahier 2: Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques
(N° de commande: 724.355 f)

Cahier 3: Pompes à chaleur
(N° de commande: 724.356 f)

Cahier 4: Couplage chaleur-force
(N° de commande: 724.358 f)

Cahier 5: Schémas standards
(N° de commande: 724.359 f)



Points importants



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



Bibliographie complémentaire



Renseignements sur le logiciel



Exemples de calculs



*Dénomination, formules et abréviations
à la page 60*

INDEX

Index aux pages 61 / 62

Auteurs

Hanspeter Eicher, Dr. Eicher + Pauli AG,
Oristalstrasse 85, 4410 Liestal
Jürg Weilenmann, Dr. Eicher + Pauli AG,
Hirschmattstrasse 16, 6003 Lucerne

Rédaction et réalisation

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

Traduction

Planair, Crêt 108A, 2314 La Sagne

Graphisme

Monika Ehrat, 8240 Thayngen

Mise en page et photocomposition

Consortium Dac/City Comp SA, Morges et Lausanne

Organisation de soutien

CCF Association suisse pour encouplage chaleur-
force, Bodenackerstrasse 19, 4410 Liestal

Patronage

ASCV Association suisse des entreprises de
chauffage et ventilation, Zurich
ASIG Association suisse de l'industrie du gaz
SBHI Ingénieurs-conseils suisses de la technique du
bâtiment et de l'énergie, Ittigen
SICC Société suisse des ingénieurs en chauffage et
climatisation, Berne
UCE Union suisse des consommateurs d'énergie de
l'industrie et des autres branches économiques,
Bâle
UCS Union des centrales suisses d'électricité, Zurich

Commission d'accompagnement

H.U. Bruderer (Saurer Thermotechnik AG, CCF); Ch. Erb
(Dr. Eicher + Pauli AG); E. Längin (EBM); E. Nussbaumer
(ADEV); P. Renaud (Planair, traduction française);
G. Schäfer (EBM); A. Spalinger (IWB); M. Stadelmann
(ASIG); R. Uetz (Infoenergie); Th. Wälchli (EBM).

ISBN 3-905233-16-9

Edition originale : ISBN 3-905233-76-2

Copyright © 1995 Office fédéral des questions conjoncturelles,
3003 Berne, février 1995. Reproduction d'extraits autorisée avec
indication de la source. Diffusion: Coordination romande du pro-
gramme d'action « Construction et Energie », EPFL-LESO, Case
postale 12, 1015 Lausanne (Numéro de commande 724.358 f).

Form 724.358 f

2.95

300

Avant-propos

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

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

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

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

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

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

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

Compétences

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

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

Documentation

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

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

Table des matières

T1.	Technique	7
1.1	RAVEL et le couplage chaleur-force	7
1.2	Concepts, classification	7
1.3	Couplage chaleur-force compact à moteur à gaz	7
	Moteur λ -1 à catalyseur	8
	Moteur λ -1 à catalyseur et recyclage des gaz d'échappement	8
	Moteur à combustion pauvre	9
1.4	Installations de couplage chaleur-force compactes à moteur diesel	9
1.5	Installations de couplage chaleur-force compactes à turbine à gaz	10
1.6	Installations à énergie totale	10
1.7	Pompes à chaleur avec moteur à gaz et à moteur diesel	11
1.8	Techniques spéciales	12
	Condensation des gaz d'échappement de CCFC à moteur à gaz	12
	Récupération des pertes par rayonnement	12
	Condensation des gaz d'échappement et/ou récupération des pertes par rayonnement ?	13
	Refroidissement à haute température	13
	Production de vapeur à basse pression	13
1.9	Tendances futures	13
	Couplage chaleur-force compact à moteur à gaz	13
	Couplage chaleur-force compact à moteur diesel	14
	Couplage chaleur-force compact à moteur Stirling	14
	Pile à combustible	14
2.	Possibilités d'application	15
2.1	Domaines d'application	15
	Secteur des services	15
	Secteur de l'habitat	15
	Réseau de chauffage	16
	Secteur de l'industrie	16
2.2	Concept énergétique	17
	Couplage chaleur-force comme élément d'un concept énergétique	17
	Couplage chaleur-force asservi aux besoins thermiques	17
	Couplage chaleur-force asservi aux besoins électriques	18
	Couplage chaleur-force comme générateur de secours	18
2.3	Combustibles	19
	Gaz naturel	19
	Gaz de station d'épuration	19
	Gaz de décharge	20
	Gaz liquide	20
	Huile de chauffage EL	20
	Bois	20
2.4	Exigences légales	21
	Utilisation de l'énergie	21
	Electricité	21
	Emissions de substances polluantes	22
2.5	Organisations de soutien	22
2.6	Contrats de livraison d'énergie	22
	Gaz naturel	22
	Electricité	23
	Chaleur	23
3.	Dimensionnement	24
3.1	Bases	24
3.2	Dimensionnement sommaire	25
	Dimensionnement sommaire	25
	Investissements spécifiques	26
	Evaluation de la rentabilité	26
3.3	Dimensionnement détaillé	28
	Calculs énergétiques à l'aide de programmes informatiques	29
	Calculs énergétiques à l'aide du diagramme des durées de fonctionnement cumulées	30
	Bilan énergétique	31
3.4	Calcul de la rentabilité	31
	Méthodes de calcul	32
	Durée d'amortissement	33
	Code des frais de construction	33
	Taux d'intérêts	33
	Frais de capitalisation	33
	Taux d'inflation	33
	Coûts et revenus de l'énergie	34

	Augmentation du prix de l'énergie	34
	Frais d'exploitation	34
	Prix de revient de la chaleur	36
3.5	Autres composants	36
	Chaudière d'appoint	36
	Accumulateur	37
4.	Impact sur l'environnement	38
4.1	Critères d'appréciation	38
4.2	Utilisation de l'énergie et émissions de CO ₂	38
4.3	Emissions de substances polluantes	39
	CCFC à moteur à gaz et catalyseur 3 voies	39
	Turbines à gaz avec dénitrification	40
4.4	Valeurs comparatives	40
5.	Directives pour la planification	41
5.1	Déroulement du projet	41
	Etude préalable	41
	Etude de faisabilité	41
	Concept global avec cahier des charges	41
	Projet et plan d'exécution	42
	Optimisation de l'exploitation et contrôle des résultats	42
5.2	Module CCFC	42
	Centrale de chauffage	42
	Emplacement	42
	Protection contre le bruit	43
	Alimentation au gaz naturel	43
	Alimentation au propane	43
	Alimentation à l'huile de chauffage	44
	Lubrification	44
	Installation de ventilation	44
5.3	Raccordement des installations hydrauliques	45
	Différences par rapport à une installation conventionnelle	45
	Distribution de la chaleur	46
	Branchement parallèle	46
	Branchement semi-parallèle	47
	Branchement série	47
	Accumulateur	47
	Valeurs d'enclenchement et de déclenchement	48
	Raccordements séparés à l'accumulateur	48
	Fonctionnement intermittent du chauffage à distance	49
	Chauffage de l'eau sanitaire	49
	Condensation des gaz d'échappement	50
	Pompe à chaleur à air recyclé	50
5.4	Raccordement des installations électriques	51
	Alimentation et mesurage	51
	Dispositifs de sécurité	51
	Production d'électricité de secours	52
5.5	Commande et régulation	52
	Principe de la commande	52
	Structure de la commande	53
	Effets dynamiques	53
5.6	Instrumentation	53
6.	Exploitation	55
6.1	Influence sur la rentabilité	55
6.2	Entretien	55
6.3	Surveillance du fonctionnement	56
6.4	Optimisation de l'exploitation et contrôle des résultats	56
Annexe		58
A1	Adresses	58
	Associations	58
	Fournisseurs d'installations de couplage chaleur-force	58
	Organisations de soutien	58
A2	Modèle de tableau pour le calcul du prix de revient de la chaleur	59
	Dénominations, symboles, abréviations	60
	Index	61
	Publications du programme d'impulsions RAVEL	63

1. Technique

1.1 RAVEL et le couplage chaleur-force

RAVEL considère le couplage chaleur-force comme faisant partie d'un concept global visant à la production efficace d'électricité et de chaleur: la réalisation d'installations de couplage chaleur-force et de pompes à chaleur doit reposer sur une stratégie de protection de l'environnement. Ceci est possible si le tiers de l'électricité produite par les installations de couplage chaleur-force est utilisé dans des amplificateurs électrothermiques (figure 1). L'exemple le plus représentatif d'un amplificateur électrothermique est la pompe à chaleur.

 *Cahier 1, paragraphes 2.5 et 3.4.*

1.2 Concepts, classification

Couplage chaleur-force (abréviation: CCF) signifie production combinée de chaleur (pour le chauffage et les procédés thermiques) et de force (surtout pour la production d'électricité). Sont appelés **couplages chaleur-force compacts** (abréviation: CCFC) les modules compacts de couplage chaleur-force dans une gamme de puissance inférieure à 1 MW_{el} dans le cas de moteur à combustion et de 1 à 10 MW_{el} dans le cas de turbines à gaz. Les **symboles** utilisés figurent à l'encadré 2 et la **classification** des couplages chaleur-force est présentée au tableau 4.

1.3 Couplage chaleur-force compact à moteur à gaz

Les **moteurs à gaz industriels** sont choisis comme systèmes d'entraînement pour les CCFC à moteur à gaz (figure 3). Leur durée de vie s'élève au minimum à 100 000 heures. Ces moteurs sont disponibles dans une gamme de puissance allant de 20 à 1000 kW_{el}. Les installations de plus grande importance sont composées de plusieurs modules. Les petites installations de CCFC, dont les puissances varient entre 5 et 20 kW_{el}, sont entraînées par des **moteurs d'automobiles** modifiés, qui ont une durée de vie nettement plus faible. Toutefois leur rentabilité soutient la comparaison, les moteurs d'automobiles étant meilleur marché. Les **CCFC standards** permettent une automatisation quasi totale, d'où une diminution des frais de fonctionnement (pas besoin de surveillant permanent).

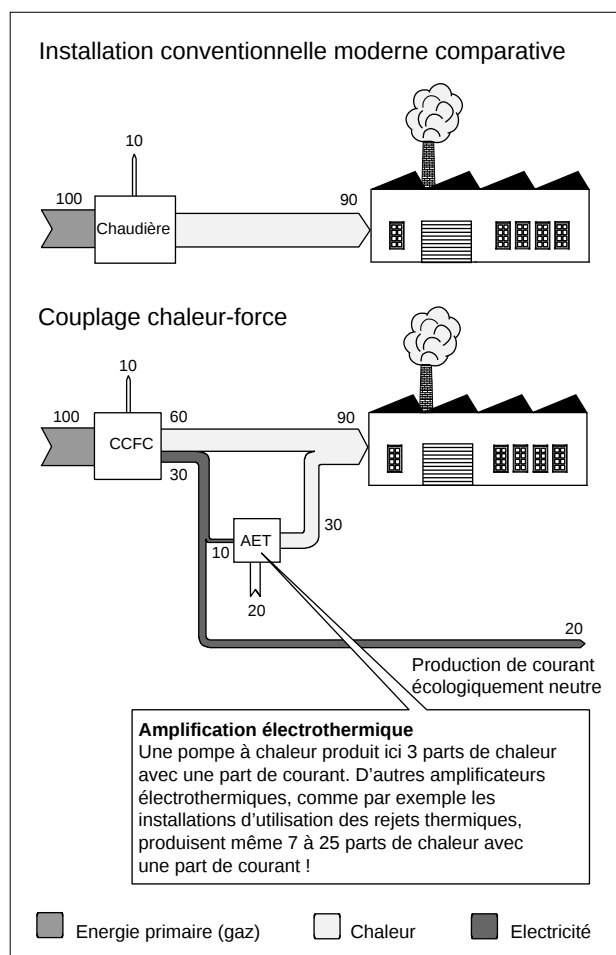


Figure 1: A l'aide d'installations de couplage chaleur-force compactes reliées à des amplificateurs électrothermiques – ici une pompe à chaleur – on peut produire de l'électricité pratiquement neutre du point de vue de l'environnement. Installation de couplage chaleur-force compact et pompe à chaleur ne doivent pas obligatoirement se trouver au même endroit.

Symboles

Puissance électrique	P_{el}	[kW, MW]
Puissance thermique	$\dot{Q}$	[kW, MW]
Puissance du combustible	$\dot{Q}_{CO}$	[kW, MW]
Indice de performance électrique	$s = P_{el} / \dot{Q}$	[-]
Rendement global	$\eta = (P_{el} + \dot{Q}) / \dot{Q}_{CO}$	[-]
Rendement électrique	$\eta_{el} = P_{el} / \dot{Q}_{CO}$	[-]
Rendement thermique	$\eta_{th} = \dot{Q} / \dot{Q}_{CO}$	[-]

L'énergie du combustible ($\dot{Q}_{CO}$) se réfère au pouvoir calorifique inférieur du chauffage (H_u) !

Encadré 2

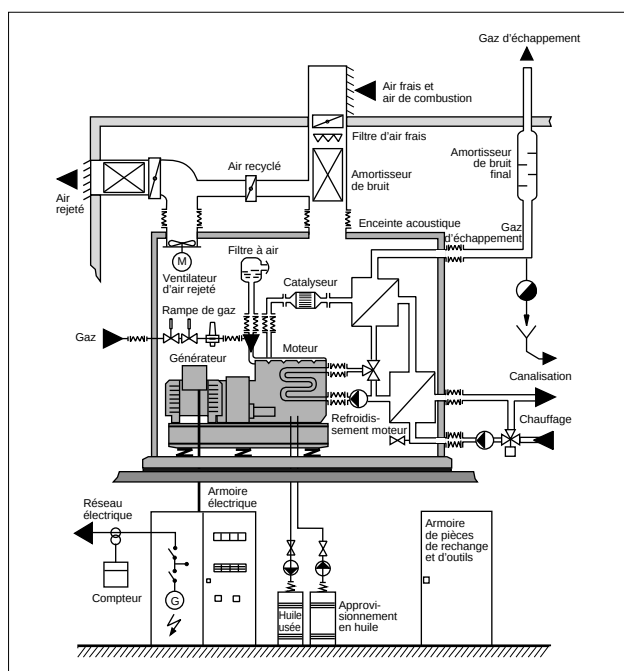


Figure 3: Construction d'un CCFC à moteur à gaz.

Moteur λ -1 à catalyseur

Comme illustré à la figure 5, le moteur à gaz fonctionne sans excès d'air (coefficient d'excès d'air $\lambda = 1$), condition sine qua non pour l'élimination des polluants par le catalyseur (catalyseur 3 voies, réduction catalytique non sélective). Cette technique peut être qualifiée de « technique éprouvée ». Par une planification, une surveillance et un entretien adéquats, on peut obtenir des valeurs d'émissions polluantes très faibles et une durée de vie du catalyseur dépassant 20 000 h.

Moteur λ -1 à catalyseur et recyclage des gaz d'échappement

Par rapport au moteur λ -1 sans recyclage des gaz d'échappement, le moteur λ -1 avec recyclage des gaz d'échappement réduit les émissions d'oxydes d'azote, par le mélange des gaz refroidis avec l'air de combustion. Ce système permet d'utiliser un catalyseur plus petit, d'élever la puissance du moteur et d'améliorer le rendement mécanique. En Suisse, les premières installations pilotes fonctionnent et les expériences effectuées jusqu'ici répondent aux attentes.

	Centrales chaleur-force (CCF)		Installations de couplage chaleur-force compactes (CCFC)		
	CCF avec turbine(s) à vapeur)	Install. chaleur-force combinée	CCFC avec turbines à gaz	CCFC avec moteur industriel	Petite CCFC avec moteur d'auto
Système d'entraînement	Turbine(s) à vapeur combinées	Turbine(s) à gaz et à vapeur	Turbines à gaz	Moteur à gaz industriel avec catalyseur à 3 voies, moteur à combustion pauvre, moteur diesel avec catalyseur SCR ⁴	Moteur automobile à gaz avec catalyseur à 3 voies
Carburant	Charbon, huile lourde (flammes tourbillonnantes) gaz naturel, mazout (chaudière à vapeur conventionnelle)	Gaz naturel ou liquide, mazout EL, charbon gazéifié (futur)		Gaz naturel ou liquide, pétrole vert, biogaz (par exemple dans station d'épuration) mazout EL ⁴	
Domaine principal d'application (exemples)	Raccordement à un chauffage à distance (p. ex. avec incinération des ordures)	Raccordement à un chauffage à distance	Procédé de chauffage pour industries, hôpitaux (vapeur, eau chaude)	Raccordement à un chauffage à distance local, grands bâtiments isolés	Quartiers industriels, grands bâtiments isolés (écoles, hôtels, bât. industriels, etc.)
Plage de puissance	5 à 1000 MW _{el}	20 à 100 ME _{el}	1 à 10 MW _{el}	20 à 1000 kW _{el} CCFC standard: 150 à 200 kW _{el} ^{2, 3}	7 à 15 kW _{el} ³
Indice de performance électrique¹	0,3 à 0,6	0,8 à 1,2	0,4 à 0,6	0,55 à 0,65	0,35 à 0,45
¹ Indice de performance électrique = électricité produite/chaleur produite			³ Couplage de plusieurs unités possible afin d'obtenir de plus grandes puissances		
² Meilleure plage de puissance par rapport à l'investissement et la puissance installée			⁴ Procédé SCR d'injection d'ammoniac cher, essais en cours avec urée, plus économique		

Tableau 4: Classification des couplages chaleur-force.

Moteur à combustion pauvre

Le moteur à combustion pauvre fonctionne avec un excès d'air important, afin de diminuer la production d'oxydes d'azote. Par ce système, les valeurs d'émission de $400 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ (basé sur 5% d'oxygène résiduel) ne sont pas dépassées et correspondent aux normes de l'Ordonnance sur la Protection de l'air pour les combustibles, tels le gaz de station d'épuration, le biogaz et le gaz de décharge, mais non pour le gaz naturel ou le gaz liquide. Si des valeurs limites inférieures sont exigées, les émissions d'oxydes d'azote peuvent être réduites par l'ajout d'un catalyseur (réduction catalytique sélective, SCR, par injection d'urée ou d'ammoniac). Le tableau 6 présente une comparaison entre le moteur λ -1 et le moteur à combustion pauvre.

1.4 Installations de couplage chaleur-force compactes à moteur diesel

L'installation de CCFC à moteur diesel (figure 7) se distingue de l'installation de CCFC à moteur à gaz surtout par le type de moteur, le combustible et la dépollution des gaz d'échappement. Le moteur diesel fonctionne au carburant diesel (qui correspond à l'huile de chauffage EL) ou – comme le moteur à allumage spontané – avec un mélange d'huile diesel (au moins 5%) et de gaz (gaz naturel, gaz liquide, gaz de décharge ou gaz de station d'épuration). L'allumage est produit par compression du mélange combustible/air, contrairement au moteur à gaz où il est produit par étincelles. C'est pourquoi le moteur diesel n'a pas besoin d'un système d'allumage séparé ou de bougies.

Les moteurs diesel modernes bien réglés obtiennent des valeurs d'émission de NO_x et de CO comparables, non pas à celles des moteurs à gaz λ -1 avec catalyseur, mais à celles des moteurs à combustion pauvre à gaz. Les émissions d'hydrocarbures posent beaucoup plus de problèmes, car elles contiennent entre autres des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), connus pour être cancérigènes.

La production d'électricité (et par là, le coefficient de performance électrique) est plus élevée que dans un moteur à gaz. Le rendement global dépend de l'utilisation thermique des gaz d'échappement.

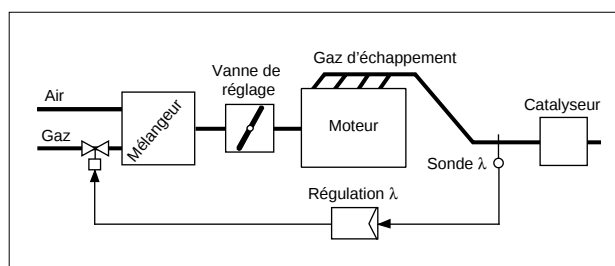


Figure 5: Moteur λ -1 à catalyseur.

	Moteur λ -1	Moteur à combustion pauvre
Types de moteur	Moteur otto à gaz Allumage séparé	Moteur otto à gaz Allumage séparé
Excès d'air	$\lambda = 1$	$\lambda = 1,6$ à $1,8$
Catalyseur	Catalyseur 3 voies	Catalyseur SCR
Fluide de réduction	Néant	Urée ou ammoniac
Substances polluantes réduites	NO_x , CO, HC	NO_x
Valeurs atteignables (à 5% O_2)	$\text{NO}_x < 10 \text{ mg/m}^3 \text{N}$ $\text{CO} < 60 \text{ mg/m}^3 \text{N}$ $\text{HC} < 10 \text{ mg/m}^3 \text{N}$	$\text{NO}_x < 50 \text{ mg/m}^3 \text{N}$ (dépend du dimensionnement du catalyseur)
Avantages	• Emissions très faibles • Pas besoin de fluide de réduction • Très répandu	• Faibles émissions au démarrage • Faible production de substances polluantes • Peu sensible aux variations des paramètres de fonctionnement
Problèmes	• Sonde λ sensible • Catalyseur sensible aux perturbations de fonctionnement • Catalyseur sensible aux impuretés contenues dans le gaz (gaz de décharge, gaz de station d'épuration) • Emissions de démarrage	• Besoin de fluide de réduction • Mauvais comportement au démarrage • Peu d'expériences • Besoin de place

Tableau 6: Comparaison des techniques d'épuration des gaz d'échappement des couplages chaleur-force compacts à moteur à gaz.

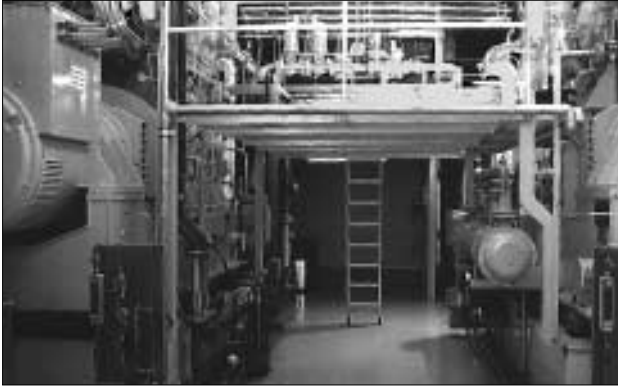


Figure 7: Deux CCFC à moteur diesel avec catalyseur SCR d'une puissance électrique de 580 kW chacun (Photo: SBV).

Avantages et inconvénients du CCFC à moteur diesel

Par rapport au CCFC à moteur à gaz, le CCFC à moteur diesel offre les avantages suivants:

- Rendement électrique plus élevé.
- N'est pas relié au réseau de gaz.

En revanche, il pose de nombreux problèmes:

- Sur le plan mondial, les filtres à particules diesel ne sont de loin pas satisfaisants sur une longue durée; en outre, quelques entreprises développent de tels filtres.
- Emissions d'hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA) cancérigènes.
- Vidanges d'huile 2 à 4 fois plus fréquentes, à cause des impuretés contenues dans le combustible, d'où des frais de service et d'entretien plus élevés.
- Frais plus élevés pour le nettoyage de l'échangeur thermique des gaz d'échappement.
- Rendement global plus faible (environ 82%) à cause de la température élevée des gaz d'échappement et au fort excès d'air.
- Très peu d'expériences en Suisse sur une longue durée de fonctionnement.

Encadré 8

Mesure	Problèmes, valeurs atteignables
Injection d'eau ou de vapeur dans la chambre de combustion	Frais d'entretien élevés
Catalyseur SCR (urée ou ammoniac)	Cher $\text{NO}_x < 10 \text{ mg/m}^3\text{N}$
Chambres de combustion Low- NO_x	En développement $\text{NO}_x < 50 \text{ mg/m}^3\text{N}$ (15% O_2)
Combustion à volume constant	En développement $\text{NO}_x < 50 \text{ mg/m}^3\text{N}$ (15% O_2)

Tableau 9: Possibilités de réduction des émissions d'oxydes d'azote dans les turbines à gaz.

Si les gaz d'échappement sont refroidis en dessous de 180°C dans l'échangeur, deux problèmes sont à considérer:

- L'acide résiduel obtenu par condensation du SO_2 attaque les matériaux de l'échangeur thermique.
- La condensation des hydrocarbures à haute température d'ébullition provoque un encrassement de l'échangeur thermique.

Afin d'éviter ces problèmes, les gaz d'échappement ne doivent pas être refroidis en dessous de 180°C.

Pour le recyclage des gaz d'échappement, deux procédés sont indispensables:

- dénitrification des gaz d'échappement avec catalyseur SCR (semblable au moteur à combustion pauvre à gaz);
- filtrage des particules de suie avant le catalyseur SCR (actuellement en développement).

Avantages et inconvénients du CCFC à moteur diesel sont énumérés dans l'encadré 8.

1.5 Installations de couplage chaleur-force compactes à turbines à gaz

Les turbines à gaz figurent au premier plan pour les applications industrielles ou pour la production thermique de grande puissance avec une température supérieure à 120°C. Ce n'est toutefois qu'à partir d'une puissance électrique de 1 MW que de telles installations deviennent rentables. La standardisation du couplage chaleur-force compact avec turbine à gaz n'a pas progressé autant que celle des moteurs à gaz. Différentes entreprises offrent néanmoins des modules «prêts à raccorder».

Dans le cas des turbines à gaz, le respect des normes sur les émissions polluantes exigent des mesures spéciales (cf. tableau 9).

1.6 Installations à énergie totale

Une installation à énergie totale (abréviation: TOTEM) est un CCFC couplé à une pompe à chaleur. Le moteur à gaz, le générateur et le compresseur de la pompe à chaleur sont montés sur un seul axe (figure 10). De cette façon, un fonctionnement en tant que CCFC, en tant que pompe à chaleur avec moteur à gaz ou en tant que pompe à chaleur avec moteur électrique est possible.

La réalisation d'un TOTEM est exigeante tant au niveau technique qu'au niveau planification et pose les problèmes suivants :

- Selon le mode de fonctionnement (CCFC, pompe à chaleur avec moteur à gaz ou électrique), l'installation délivre différentes puissances thermiques, de sorte que l'installation ne peut être dimensionnée de façon optimale que sur l'un des trois modes fonctionnement précités.
- Durant les périodes à forte demande de chaleur et à haut tarif électrique (par exemple les jours d'hiver), un fonctionnement de la pompe à chaleur avec moteur à gaz (production thermique élevée), tout comme un fonctionnement du CCFC (production électrique élevée) peuvent être sollicités (conflit de priorité !).
- Les TOTEM sont des installations « sur mesure », donc plus onéreuses que des éléments standards séparés (CCFC et pompe à chaleur avec moteur électrique).

1.7 Pompes à chaleur à moteur à gaz et à moteur diesel

La **pompe à chaleur à moteur à gaz** est un cas spécial du couplage chaleur-force : l'énergie mécanique produite par le moteur à gaz ne sert pas à la production d'électricité mais entraîne le compresseur d'une pompe à chaleur (figure 11).

La solution pompe à chaleur à moteur à gaz devrait toujours être comparée au **CCFC avec pompe à chaleur électrique** (figure 12). Dans ce cas, la force est transmise du moteur à gaz au compresseur avec un « détour » par le réseau électrique. Ce système apporte les avantages suivants :

- Le CCFC et la pompe à chaleur électrique sont disponibles sur le marché comme éléments standardisés ; il en résulte une fiabilité accrue pour un investissement à peine plus élevé.
- Une plus grande flexibilité de production électrique et thermique.

Les inconvénients à signaler sont : un rendement global un peu plus bas, du fait de la transformation en électricité, et un encombrement plus important. un raccordement électrique au réseau généreusement dimensionné est la condition à respecter.

La **pompe à chaleur à moteur diesel** est, de par son principe de fonctionnement, comparable à une pompe à chaleur à moteur à gaz. Le moteur d'entraînement et la dépollution des gaz d'échappement sont pareils à ceux du CCFC avec moteur diesel.

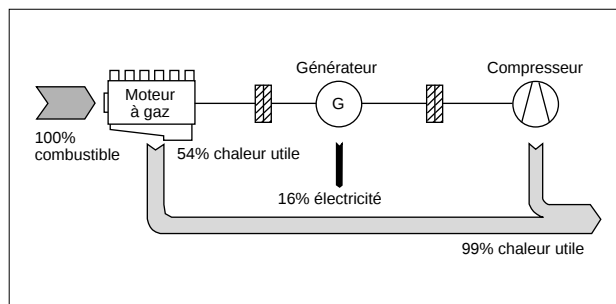


Figure 10 : Installation à énergie totale.

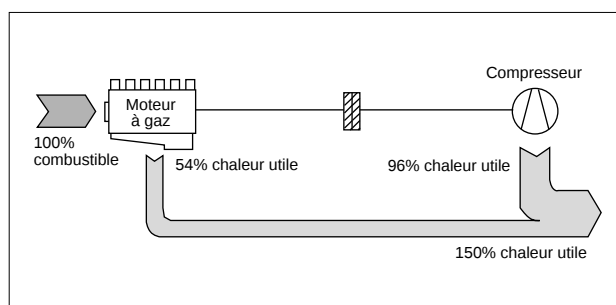


Figure 11 : Pompe à chaleur à moteur à gaz.

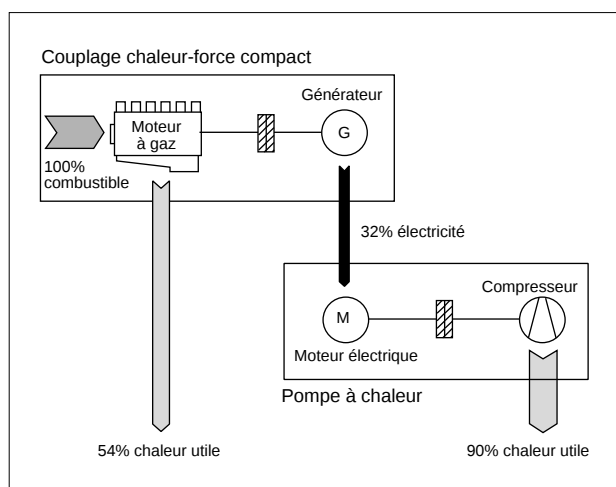


Figure 12 : Couplage chaleur-force compact et pompe à chaleur couplés électriquement.

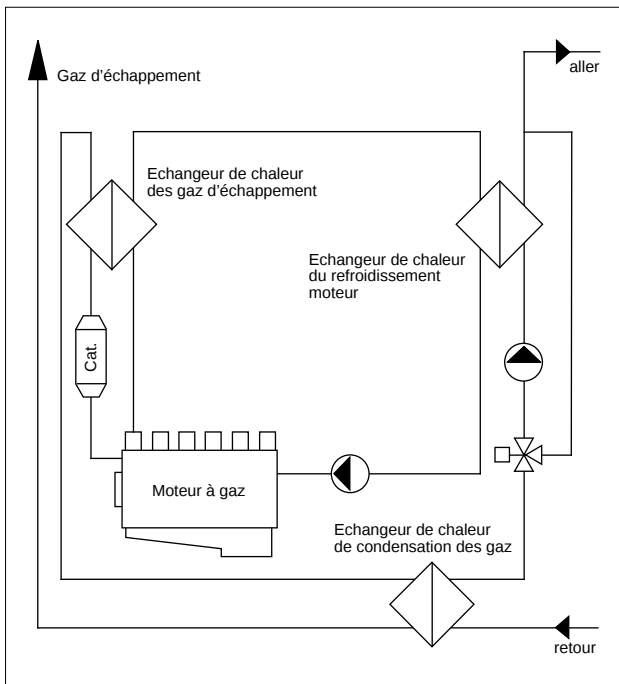


Figure 13: CCFC à moteur à gaz avec condensation des gaz d'échappement.

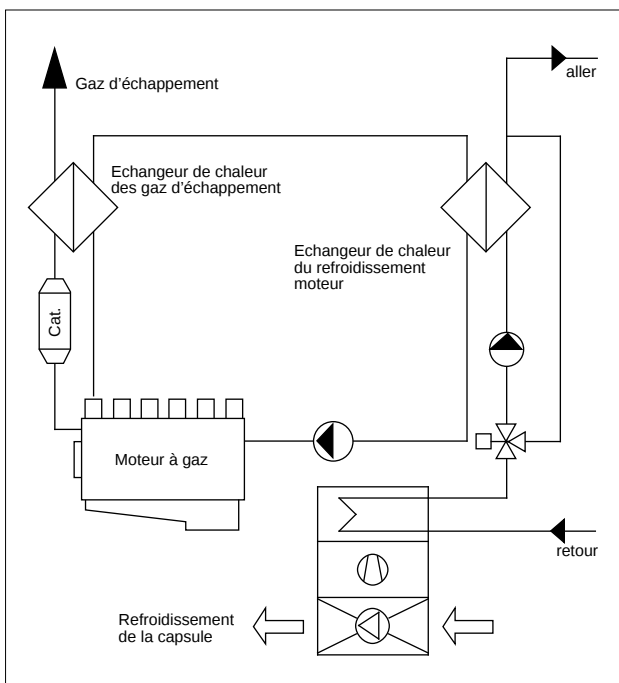


Figure 14: CCFC avec pompe à chaleur pour la récupération des pertes par rayonnement.

1.8 Techniques spéciales

Condensation des gaz d'échappements du CCFC à moteur à gaz

D'une manière similaire à une chaudière à condensation, la chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans les gaz d'échappement d'un CCFC à moteur à gaz peut être utilisée (figure 13). Un condenseur des gaz d'échappement peut être rentable, à condition toutefois que les températures de retour du système soient basses (max. 45 à 50°C). Il faut tenir compte des points suivants :

- Lors du dimensionnement du condenseur des gaz d'échappement, leur composition (excès d'air) doit être prise en considération.
- Le condenseur des gaz d'échappement doit être conçu pour des gaz pulsés (risques de rupture par vibrations).
- Le nettoyage et l'entretien du condenseur des gaz d'échappement doit être facile.
- Les matériaux choisis doivent résister aux condensats acides.

Récupération des pertes par rayonnement

Sous la capsule d'une installation de CCFC ou dans la centrale de chauffage (installation sans capsule), le moteur à gaz et le générateur électrique dégagent une chaleur de rayonnement qui peut être évacuée comme suit :

- depuis la capsule dans la centrale de chauffe et ensuite à l'air libre par la ventilation (possible, jusqu'à une puissance électrique de l'installation d'environ 100 kW) ;
- directement à l'extérieur par un système de ventilation du CCFC séparé.

Les pertes par rayonnement s'élèvent à 6 à 8% de la puissance de combustion. Selon les particularités de chaque installation ces rejets thermiques peuvent être utilisés au moyen d'une des méthodes suivantes :

- La pompe à chaleur soutire la chaleur de l'air de la capsule et la délivre au retour de chauffage (figure 14), à condition que la température de retour de l'eau de chauffage reste constamment plus basse que la température maximale tolérée à l'entrée du condenseur de la pompe à chaleur.
- Préchauffage de l'eau chaude par échange thermique avec l'air recyclé. Ce système suppose une forte consommation d'eau chaude pendant le fonctionnement du CCFC.
- Refroidissement de la hotte par un système de refroidissement indépendant. Ce procédé n'est judicieux que

si les rejets thermiques de la production de froid sont toujours utilisés pendant le fonctionnement du CCFC. Avec la garantie que les pertes par rayonnement peuvent être évacuées pendant toute la durée de fonctionnement du CCFC par l'une ou l'autre des méthodes susmentionnées, l'installation de ventilation du CCFC peut être fortement réduite (ceci n'est pas judicieux si le CCFC est conçu comme installation de secours). Une pompe à chaleur supplémentaire utilise de l'électricité. En cas de tarifs électriques élevés, il y a donc conflit entre optimisation « énergético-écologique » et optimisation « économique » de l'installation.

Condensation des gaz d'échappement et/ou récupération des pertes par rayonnement ?

Les deux systèmes augmentent le rendement global du module du CCFC; ils sont toutefois dépendant d'une basse température de retour du système. Les caractéristiques principales de chacun des deux systèmes sont comparées au tableau 15.

La réalisation des deux systèmes sur *une* installation n'est recommandée que pour des températures de retour très basses (jusqu'à 35°C environ). Les deux systèmes doivent ensuite être hydrauliquement branchés en série.

Refroidissement à haute température

Des moteurs à gaz de divers fabricants peuvent être équipés (avec un investissement supplémentaire relativement modeste) pour le refroidissement à haute température. Le circuit de refroidissement peut atteindre une température de départ de 130°C. Par un dimensionnement correct de l'échangeur thermique, on peut atteindre, côté chauffage, une température de départ de 125°C.

Production de vapeur à basse pression

Certains fabricants proposent des moteurs à gaz produisant – dans les chambres de refroidissement des cylindres – de la vapeur à basse pression jusqu'à une température de 130°C. Un accumulateur de vapeur avec détecteur de niveau doit alors être installé.

	Condensation des gaz d'échappement	Récupération des pertes thermiques par rayonnement
Puissance thermique supplémentaire (réf. à la consommation de gaz)	7 à 10 %	10 à 12 %
Energie électrique d'appoint (réf. à la consommation de gaz)	0 %	3 à 4 %
Avantages	• Système passif • Insensible aux perturbations	• Puissance thermique plus élevée • Ventilation plus petite
Problèmes	• Pulsation des gaz d'échappements • Choix de matériel • Encrassement	• Basse température de retour nécessaire • Réduction du rendement électrique
Rentable	• A partir d'environ 100 kW_{el} • Si le prix du gaz est élevé • Si le tarif électrique est élevé	• A partir d'environ 200 kW_{el} • Si le prix du gaz est élevé • Si le tarif électrique est bas
Rendement global – $\vartheta_{\text{ret}} = 40^\circ\text{C}$ – $\vartheta_{\text{ret}} = 50^\circ\text{C}$	96 à 98 % 94 à 96 %	98 à 102 % 96 à 100 %
Indice de performance électrique (CCFC seul environ 56 %)	50% ¹	43% ²
¹ La réduction du rendement électrique n'est que la conséquence de la puissance thermique plus élevée		
² Le rendement électrique est plus bas en raison de la puissance thermique plus élevée et de la production électrique plus faible		

Tableau 15: Condensation des gaz d'échappement et/ou récupération des pertes par rayonnement avec pompe à chaleur ?

1.9 Tendances futures

Couplage chaleur-force compact à moteur à gaz

Les CCFC à moteur à gaz sont actuellement à un stade de développement avancé. Dans un proche avenir, le

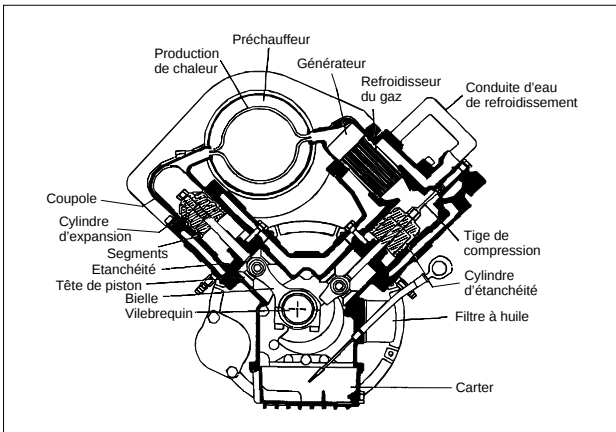


Figure 16: Moteur Stirling.

Piles à combustible

Actuellement, trois systèmes de piles à combustible à gaz naturel font l'objet de recherches et de développements. Ils se distinguent par le système d'électrolyte dans lequel se déroule le procédé électrochimique. Par rapport aux installations de CCF, tous les types de piles présentent l'avantage de produire de l'électricité sans bruit et pratiquement sans émissions polluantes.

Pile à combustible à acide phosphorique

Le combustible utilisé dans la production thermique est l'hydrogène. Il est obtenu par procédé chimique à partir du gaz naturel dans une phase avant l'introduction dans la pile (reformeur). A Genève, une installation-pilote d'une puissance électrique de 200 kW fonctionne avec succès depuis 1993. Le rendement électrique atteint 40 à 43%. La température de départ atteignable est de 75°C, alors que la température de retour doit s'élever à 50°C au maximum.

Pile à combustible à fusion de carbonate

Comme pour la pile à combustion à acide phosphorique, il faut produire tout d'abord de l'hydrogène à partir du gaz naturel. Actuellement, ce type de pile est au stade de la recherche.

Pile à combustible à électrolyte solide

Ce type de pile est le plus prometteur, bien qu'il n'ait pas encore quitté les laboratoires de recherche. Comme électrolytes, sont utilisés des membranes de céramique ou de polymère. La membrane en céramique présente deux grands avantages: elle permet d'une part d'utiliser directement le gaz naturel sans « détournement » par l'hydrogène et d'autre part le procédé ne nécessite aucune substance corrosive ou toxique.

Encadré 17

développement touchera les six domaines cités ci-dessous:

- surveillance permanente des émissions polluantes;
- faibles émissions au démarrage, par optimisation du démarrage ou par préchauffage du catalyseur;
- optimisation du recyclage des gaz d'échappement pour le moteur à combustion pauvre;
- développement d'une petite installation de CCFC avec une puissance électrique se situant entre 3 et 6 kW;
- améliorations du rendement par optimisation des modules;
- générateurs à refroidissement à eau.

Couplage chaleur-force compact à moteur diesel

Si une augmentation du nombre d'installations de CCFC à moteur diesel devait avoir lieu, des solutions aux problèmes ci-après devraient être trouvées et testées:

- amélioration du fonctionnement du filtre à particules diesel;
- augmentation jusqu'à 1000 h au minimum des intervalles d'entretien (ces intervalles sont actuellement de 200-400 h de fonctionnement) en prenant des mesures appropriées concernant le système de lubrification.

Couplage chaleur-force compact à moteur Stirling

Le moteur Stirling représente une alternative prometteuse pour le moteur à gaz ou diesel, car la combustion n'a pas lieu dans le moteur même, mais à l'extérieur (figure 16). Différentes conceptions de moteurs ont été réalisées avec de l'hélium, de l'hydrogène ou de l'air comme fluides de travail. Toutefois, des problèmes subsistent encore actuellement, à savoir:

- L'hélium et l'hydrogène sont des fluides permettant théoriquement d'atteindre un bon rendement mécanique. Cependant, le poids moléculaire de ces gaz pose d'importants problèmes d'étanchéité au niveau des pistons et, jusqu'à présent, aucune solution satisfaisante n'a été trouvée.
- L'hydrogène est un gaz explosif. En cas d'étanchéité imparfaite, le danger d'explosion est donc latent.
- L'air ne pose pas de problème, mais ne permet qu'un faible rendement mécanique.

Pile à combustible

La pile à combustible n'est pas une machine thermodynamique; l'électricité provient d'un procédé électrochimique qui provoque un dégagement de chaleur. Des explications à ce sujet sont données à l'encadré 17.

2. Possibilités d'application

2.1 Domaines d'application

L'objectif prioritaire des installations de couplage chaleur force est la production de chaleur pour un bâtiment déterminé. L'électricité produite est utilisée dans le même bâtiment ou est injectée dans le réseau de distribution électrique local. Le potentiel de production électrique est donc défini par les besoins thermiques du bâtiment en question.

La figure 18 indique les domaines d'application possibles en Suisse. Les procédés industriels et le chauffage des locaux représentent la majeure partie des besoins thermiques. Les besoins thermiques pour le chauffage des locaux sont répartis dans des secteurs d'utilisation tels que : l'habitat, les services, l'industrie et l'artisanat. La réalisation d'une installation de couplage chaleur force dépend pratiquement toujours de sa rentabilité. Le potentiel de production électrique (figure 19) est subordonné au prix de l'électricité produite. Le prix de revient de l'énergie électrique produite est avantageux si l'installation est dimensionnée avec soin et que les conditions-cadres sont favorables (encadré 20).



Dimensionnement, rentabilité, cf. chapitre 3.

Secteur des services

Dans le secteur des services (bâtiments abritant des bureaux, bâtiments administratifs, hôpitaux, écoles, hôtels, etc.), les installations de couplage chaleur force compactes peuvent devenir rentables déjà à partir d'une puissance thermique à installer de 500 à 800 kW, étant donné que la consommation propre et les tarifs électriques sont très souvent élevés. Pour des bâtiments ayant des gains internes ou des gains solaires passifs importants (figure 21), un dimensionnement minutieux est indispensable.

Secteur de l'habitat

Dans le secteur de l'habitat, les bâtiments isolés, les complexes d'immeubles locatifs ou les lotissements de maisons familiales conviennent à la réalisation d'installations de couplage chaleur force. Leur rentabilité ne dépend pas en premier lieu de la dimension de l'installation, mais des conditions de vente de la chaleur. Par exemple, si plusieurs bâtiments sont reliés par un

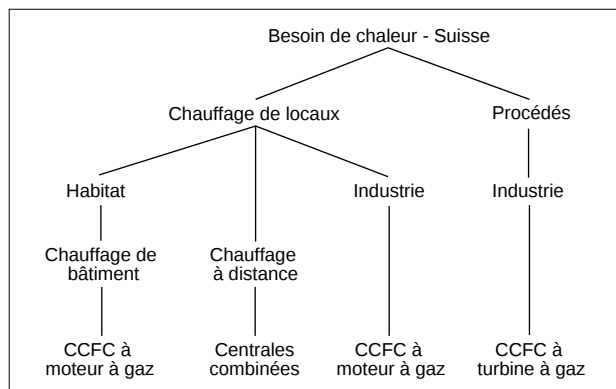


Figure 18: Domaines d'application des installations de couplage chaleur-force.

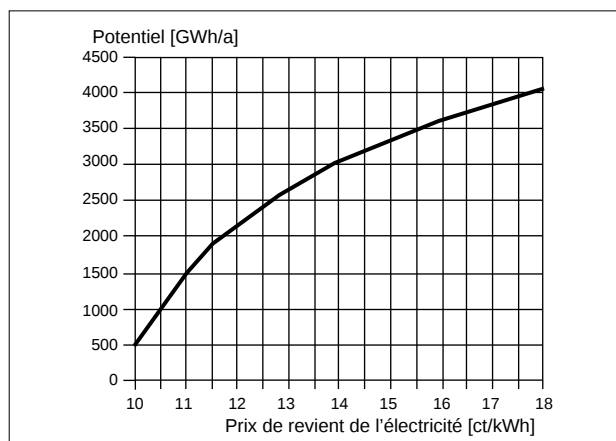


Figure 19: Potentiel de production électrique en fonction d'un prix de revient «électricité» admissible.

Conditions-cadre favorables à la réalisation d'un couplage chaleur-force

- Raccordement au réseau de gaz naturel déjà disponible dans le bâtiment ou réalisable à peu de frais.
- Locaux à disposition pour l'installation et l'accumulateur thermique (moins de frais pour les locaux).
- Température du système au point de dimensionnement ne dépassant pas 80 à 85°C.
- La puissance thermique à installer du bâtiment (et le cas échéant d'autres bâtiments reliés ultérieurement) dépasse 1000 kW, ce qui correspond à 2000 MWh/a.
- Longue période de besoins thermiques.
- Besoins propres en électricité élevés.
- Tarifs électriques élevés d'achat, le cas échéant de restitution.
- Disponibilité financière pour les investissements correspondants.

Encadré 20

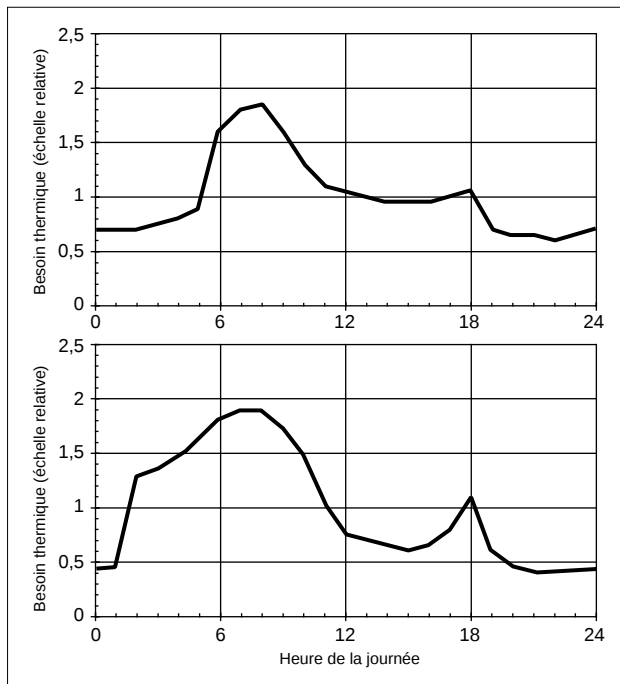


Figure 21: Evolution quotidienne de la consommation de chaleur dans un bâtiment de services existant (en haut) et nouveau (en bas). Les gains thermiques importants de l'après-midi, réduisent les besoins thermiques durant cette période.

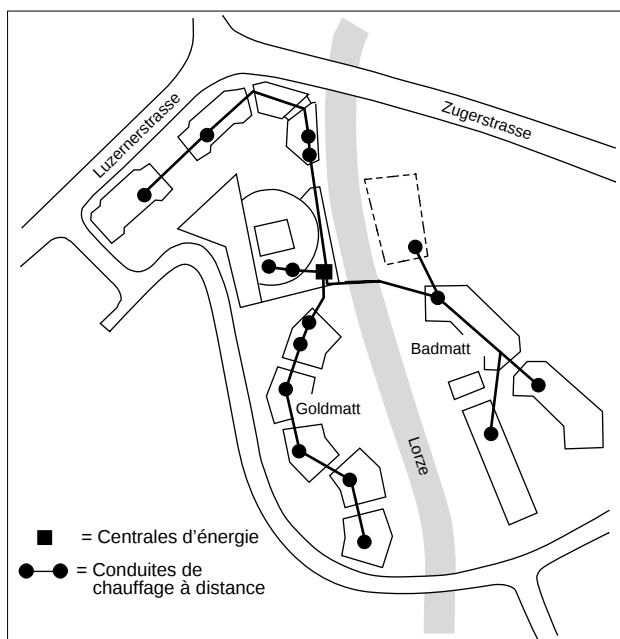


Figure 22: Exemple d'un chauffage à distance à Cham (ZG).

réseau de chauffage à distance, l'investissement pour les chaufferies individuelles peut être économisé. Cette somme peut être déduite des investissements pour l'installation de couplage chaleur force.

Pour un bâtiment isolé et selon les conditions-cadre, des installations d'une puissance électrique se situant entre 150 et 200 kW_{el}, sont rentables. Cela suppose un besoin de puissance thermique de l'installation de 700 à 1000 kW. Un besoin en énergie thermique quotidien constant et un éventuel chauffage de l'eau chaude sanitaire ont une influence positive sur les heures de fonctionnement de l'installation.

En revanche, il n'est pas rentable de restituer toute l'électricité produite à l'entreprise de distribution électrique, car l'exploitant de l'installation (propriétaire, organisation de soutien) possède sur le plan juridique un autre statut que les consommateurs d'électricité (locataires, propriétaires d'appartements par étage); ceci n'est naturellement pas valable, lorsque les tarifs de restitution sont plus élevés que les tarifs de consommation.

Réseau de chauffage

Un groupe de bâtiments peut être relié à un réseau de chauffage par des conduites de distribution de chaleur (la figure 22 en présente un exemple). Plus le réseau de chauffage est important, meilleure sera la rentabilité de l'installation de couplage chaleur force mais plus le système de distribution de chaleur sera coûteux. La dimension optimale dépend de très nombreuses conditions-cadre et doit être déterminée de cas en cas.

Secteur de l'industrie

Dans l'industrie, les conditions favorables à la réalisation d'installations de couplage chaleur force sont réunies si une importante demande pour les procédés thermiques et d'électricité existent simultanément. L'industrie, qui utilise de l'énergie thermique à température élevée, représente le plus important potentiel pour les turbines à gaz (par exemple dans l'industrie du papier et l'industrie chimique).

Suite à l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) et plus encore suite aux trains de mesures cantonales, on peut s'attendre à des assainissements d'installations de production de vapeur. Dès lors, il est vivement recommandé d'examiner chaque fois la possibilité d'installer une turbine à gaz ou une installation combinée (turbine combinée gaz/vapeur).

2.2 Concept énergétique

Le couplage chaleur-force comme élément d'un concept énergétique

Le couplage chaleur-force transforme, en tirant le meilleur parti de l'énergie (valorisation), des agents énergétiques utilisés actuellement principalement pour le chauffage (huile, gaz) en chaleur et *en électricité*. Par ce système, ni les besoins thermiques ni les besoins électriques du bâtiment concerné ne seront réduits. C'est pourquoi chaque point de l'encadré 23 devrait être étudié et si possible pris en considération. La figure 24 dépeint la complexité de l'intégration d'un couplage chaleur-force dans un concept énergétique.

Couplage chaleur-force asservi aux besoins thermiques

La plupart des installations réalisées en Suisse, en particulier pour des puissances électriques inférieures à 1000 kW_{el}, est asservie aux besoins thermiques (figure 25). Les installations fonctionnent alors en priorité pour satisfaire les besoins thermiques du bâtiment concerné. Selon les cas, l'exploitation peut se résumer ainsi :

- Arrêt de l'installation de couplage chaleur-force pendant les périodes de bas tarif électrique de consommation et/ou de restitution (par exemple semestre d'été, périodes à bas tarif), lorsque les frais d'exploitation dépassent les recettes générées par la vente de l'électricité produite.
 - Fonctionnement à charge partielle de l'installation de couplage chaleur-force, lorsque les besoins thermiques du bâtiment concerné sont faibles.
 - Fonctionnement à charge partielle de l'installation de couplage chaleur-force, lorsque les besoins thermiques du bâtiment sont élevés et ses besoins électriques faibles si, pour des motifs tarifaires, l'on renonce à restituer l'électricité excédentaire produite.
- A l'aide d'un accumulateur suffisamment grand, on parvient à équilibrer les différences temporaires des besoins électriques et thermiques. L'électricité produite par les installations de couplage chaleur-force asservies aux besoins thermiques est en général utilisée dans le bâtiment même et l'excédent est réinjecté dans le réseau. Une livraison directe à des tiers pose problème :
- Les entreprises de distribution électrique interdisent souvent la vente d'électricité à des tiers (cf. règlement interne de la centrale électrique concernée).

Réduction du besoin énergétique et intégration du couplage chaleur-force

Dans beaucoup de cas, les économies d'énergie sont à préconiser car plus sensées et/ou plus rentables que la mise en place d'une installation de couplage chaleur-force :

- **L'enveloppe** du bâtiment (façades, toit, sol, fenêtres) est-elle bien isolée thermiquement (par exemple selon les valeurs-cible de la norme SIA 380/1 «Energie dans le bâtiment») ? Il est possible à peu de frais d'améliorer thermiquement l'enveloppe d'un bâtiment, en particulier pour les nouvelles constructions. Une enveloppe isolée de façon optimale permet de maintenir les besoins thermiques et les frais y relatifs à un niveau bas pendant toute la durée de vie du système !
- Le système de **distribution de chaleur** (existant ou à installer) est-il isolé de manière optimale ? **L'émission de chaleur** est-elle adaptée aux exigences réelles de confort avec les appareils de réglage adéquats (réglage «intelligent» du chauffage, réglages individuels des locaux, vannes thermostatiques, etc) ?
- **Des installations électriques** économiques et adaptées aux besoins existent-elles ou sont-elles prévues (installations de ventilation, éclairage, pompes, groupes de froid, etc) ?



Les mesures mentionnées ne doivent toutefois pas être étudiées et réalisées **en lieu et place** d'une installation de couplage chaleur-force, mais **avant** la réalisation d'une installation de couplage chaleur-force !

Encadré 23

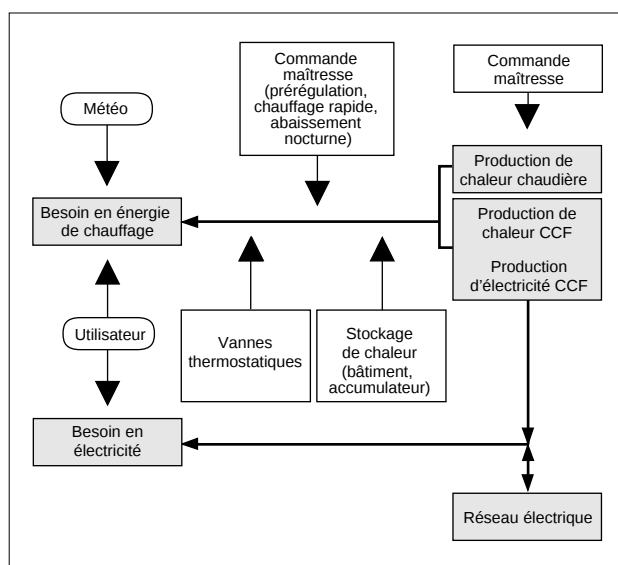


Figure 24: Couplage chaleur-force en tant qu'élément d'un concept énergétique.

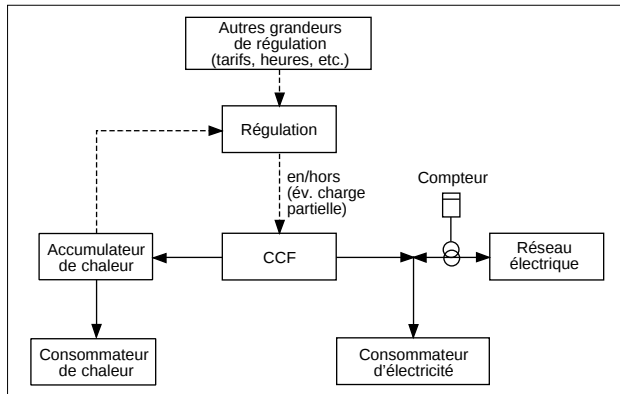


Figure 25: Installation de couplage chaleur-force asservie aux besoins thermiques.

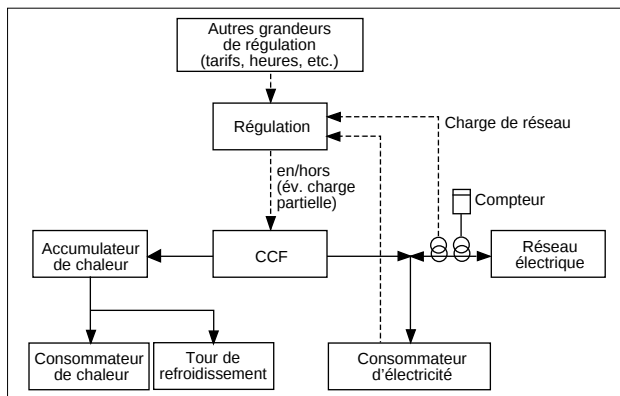


Figure 26: Installation de couplage chaleur-force asservie aux besoins électriques.

Problèmes dans les installations de couplage chaleur-force asservies aux besoins électriques

- Si, durant le fonctionnement de l'installation, aucun besoin de chaleur n'existe et si l'accumulateur est chargé, la chaleur doit être évacuée. Ce système peut se justifier économiquement, mais il ne correspond pas aux principes de base pour une utilisation rationnelle de l'énergie, et est souvent interdit (par exemple Ville de Zurich).
- Les centrales de distribution électrique ne sont pas tenues de reprendre l'électricité provenant des installations de couplage chaleur-force fonctionnant avec des agents fossiles sans utilisation de chaleur.
- Si l'on renonce à une restitution de l'électricité, la puissance de l'installation de couplage chaleur-force devra être adaptée à la consommation effective. Cela peut entraîner un fonctionnement de l'installation en charge partielle (par exemple en dessous de 70%) avec un rendement médiocre.
- Le réseau électrique doit malgré tout absorber de brusques variations de charge.

Encadré 27

- Le responsable d'une installation de couplage chaleur-force doit installer les éléments de contrôle pour l'électricité utilisée (compteurs privés), les gérer et établir les factures à l'intention des consommateurs.

Couplage chaleur-force asservi aux besoins électriques

Les installations asservies aux besoins électriques sont exploitées sur la base des besoins électriques du bâtiment concerné (figure 26). Dans ce cas, soit l'installation est enclenchée et déclenchée à un certain pourcentage des besoins électriques, soit la puissance de l'installation est réglée de manière à pouvoir couvrir les besoins électriques, sans restitution au réseau. En Suisse, pratiquement aucune installation de couplage chaleur-force asservie aux besoins électriques n'a pu être réalisée jusqu'ici, vu les nombreux problèmes qu'elle engendre (encadré 27).

Pour les installations asservies aux besoins électriques, il est important de savoir que, par un dimensionnement et une exploitation adéquats de l'accumulateur thermique, toute la chaleur peut être utilisée. Si cela n'est pas possible, il faut examiner, sur la base des lois sur l'énergie en vigueur, si une production électrique sans utilisation de chaleur – on ne peut dès lors plus parler de couplage chaleur-force! – est malgré tout permise. Les heures de fonctionnement de l'installation sans utilisation de chaleur doivent être réduites au strict minimum.

Couplage chaleur-force comme générateur électrique de secours

Les installations de couplage chaleur-force asservies aux besoins thermiques et électriques peuvent être équipées de façon à couvrir les besoins en électricité des consommateurs prioritaires en cas de panne de réseau. Ce fait est intéressant, car les investissements pour une installation de secours conventionnelle peuvent être économisés au profit d'une installation de couplage chaleur-force.

Lors de la réalisation d'une installation de couplage chaleur-force prévue comme générateur de secours, les points mentionnés à l'encadré 28 doivent être pris en compte (ceux-ci sont d'ailleurs aussi valables pour des générateurs de secours conventionnels!).

2.3 Combustibles

Gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible qui convient à toutes les installations de couplage chaleur-force. Pour les moteurs à allumage spontané, une petite quantité d'huile de chauffage EL est nécessaire. Il faut tenir compte des points suivants :

- Pour des bâtiments déjà raccordés au gaz, il faut vérifier si la capacité et la pression du gaz au raccordement suffisent à alimenter aussi bien les consommateurs existants que l'installation de couplage chaleur-force.
- Les turbines à gaz nécessitent une pression de gaz élevée (de 10 à 15 bar), de sorte qu'en plus du raccordement de forte puissance, un raccordement à moyenne pression (1 ou 5 bar), est indispensable.
- Le gaz du réseau est mis à la pression exigée par l'installation par des stations d'élévation, respectivement de réduction de pression (figure 29).
- La plupart des entreprises de distribution de gaz proposent des tarifs différents selon que le consommateur est interruptible ou non. Les installations de CCFC avec moteur à gaz bénéficient souvent d'un tarif séparé ou d'un tarif spécial. Les installations équipées de turbines à gaz doivent être conçues pour un fonctionnement bicomcombustible.
- Si la chaudière d'appoint est aussi alimentée par le gaz naturel, il est judicieux, selon le tarif du gaz, d'intégrer un brûleur bicomcombustible huile de chauffage/gaz (sauf pour des petites installations ayant une puissance thermique allant jusqu'à 200 kW environ).
- Lors de la phase de soumission d'une installation de couplage chaleur-force, il faut se renseigner auprès du distributeur de gaz sur la proportion de méthane contenue dans le gaz et vérifier si, pendant les heures de pointe du gaz liquide (propane, butane) est rajouté.

Gaz de station d'épuration

Le gaz de station d'épuration convient parfaitement à l'entraînement des CCFC à moteur à combustion pauvre (figure 30). Le gaz de station d'épuration est considéré comme énergie renouvelable et c'est pourquoi la valeur limite des émissions d'oxydes d'azote ($400 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$) est plus élevée que pour les CCFC alimentés au gaz naturel. Cette valeur limite peut être atteinte avec un moteur à combustion pauvre. Un taux d'émissions d'oxydes d'azote plus bas est possible avec un moteur λ -1 équipé

Installation de couplage chaleur-force fonctionnant comme générateur de secours

- La disponibilité du combustible de l'installation de couplage chaleur-force doit répondre aux mêmes exigences que celles des générateurs de secours.
- La disponibilité de l'installation de couplage chaleur-force doit répondre aux mêmes exigences que celles des générateurs de secours. La disponibilité peut être améliorée grâce à une installation de couplage chaleur-force composée de plusieurs modules.
- Les travaux d'entretien de l'installation devront être effectués pendant les périodes où la disponibilité comme générateur de secours n'est pas, ou presque pas, requise.
- Un système de refroidissement indépendant du système de chauffage est absolument indispensable au fonctionnement de l'installation de secours.
- L'installation de couplage chaleur-force doit pouvoir être déconnectée du réseau suffisamment rapidement.

Encadré 28

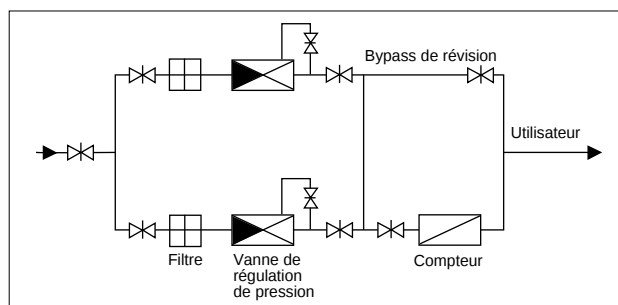


Figure 29: Station de régulation de pression et de comptage du gaz (rampe à gaz).

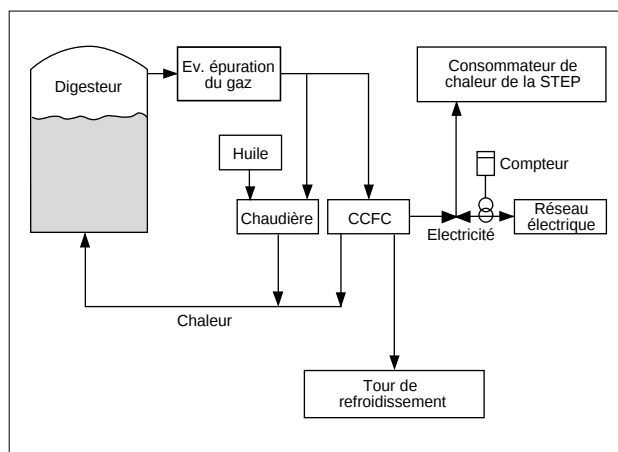


Figure 30: CCFC avec gaz de station d'épuration.



Figure 31: Exemple d'un approvisionnement au gaz propane à l'air libre (Photo: Basler + Hofmann AG).

Gaz liquide

- Pour les moteurs à gaz, il faut s'attendre à une réduction de la puissance des moteurs, étant donné le faible indice d'octane du propane et du butane.
- Le gaz liquide peut être stocké dans des citernes à l'air libre ou enterrées. Pour les installations dont le poids de remplissage dépasse 20 tonnes, une pièce justificative de sécurité selon l'Ordonnance sur les accidents majeurs est nécessaire.
- Le gaz liquide convient particulièrement aux installations de couplage chaleur-force conçues comme générateur de secours
- Le combustible des moteurs à gaz peut être le gaz liquide. L'avantage d'un tarif réduit interruptible est à comparer aux frais supplémentaires inhérents aux infrastructures pour le gaz liquide. Les dispositifs supplémentaires et les restrictions de fonctionnement sont spécifiques à chaque fabricant et doivent être demandés au fournisseur de moteurs à gaz.

Encadré 32

d'un catalyseur à 3 voies. Toutefois des vérifications détaillées concernant la teneur du gaz en soufre, fluor et autres substances doivent être effectuées, car ces substances abaissent l'efficacité du catalyseur.

Gaz de décharge

Les substances étrangères contenues dans le gaz de décharge obligent à utiliser des CCFC à moteur à combustion pauvre pour la combustion de ce gaz. Selon les normes de l'OPair, la valeur limite des émissions d'oxydes d'azote s'élève à 400 mg/m³N.

Gaz liquide

Une alimentation au gaz liquide (propane, butane) est à étudier dans les bâtiments ne pouvant être reliés au réseau de gaz naturel. Le gaz liquide peut être stocké dans des citernes à l'air libre (figure 31) ou enterrées. Les premières sont louées par les fournisseurs de gaz liquide alors que les secondes sont vendues. La livraison du gaz liquide est effectuée normalement par camion; si l'endroit à desservir se trouve à proximité d'un raccordement ferroviaire industriel ou près d'une gare de marchandises, la livraison par rail est meilleur marché. L'encadré 32 résume les mises en garde et les notes explicatives pour un CCFC à moteur à gaz alimenté au gaz liquide.

Huile de chauffage EL

L'huile de chauffage EL peut servir à alimenter les moteurs diesel et les turbines à gaz.



Les problèmes des CCFC à moteur diesel sont expliqués en détail au chapitre 1.4.

Bois

Le bois est un agent énergétique renouvelable, disponible en grande quantité à maints endroits. Le couplage chaleur-force peut être conçu de deux façons:

- Le bois est brûlé dans des **chaudières à vapeur** et la vapeur entraîne ensuite une turbine à vapeur ou un moteur à vapeur. Le rendement mécanique, qui se situe autour de 12 à 16%, dépend fortement de la température de condensation du circuit de vapeur, c'est-à-dire du niveau de température de l'utilisation thermique.
- Le bois subit une gazéification dans un **gazéificateur de bois**, il est ensuite nettoyé et refroidi pour être finalement brûlé dans un moteur à gaz. Les essais effectués jusqu'ici ont montré que la dépollution du gaz de bois exige des systèmes très coûteux.

2.4 Exigences légales

Utilisation de l'énergie

Sur le plan fédéral, dans l'**Arrêté sur l'énergie** et l'ordonnance qui l'accompagne (encadré 33), il est fait état uniquement du principe disant : « Toute énergie doit être utilisée de la manière la plus économe et la plus rationnelle possible ». Aucune mention spécifique des installations de couplage chaleur-force n'est prévue.

Des principes similaires sont également énoncés dans les lois cantonales et communales sur l'énergie. Le canton de Zurich dispose par exemple de prescriptions concrètes et spécifiques sur les installations de couplage chaleur-force. Une installation de couplage chaleur-force *peut* être prescrite pour des projets à partir d'une puissance thermique de 2 MW. Un grand nombre de textes de loi sur l'énergie interdit les installations de couplage chaleur-force qui n'utiliseraient pas la chaleur produite (par exemple la ville de Zurich).

Des renseignements peuvent être obtenus à ce propos auprès des services cantonaux ou communaux de l'énergie.

Electricité

Sur le plan fédéral, l'Arrêté sur l'énergie contraint les entreprises de distribution électrique à autoriser la connexion parallèle au réseau des installations de couplage chaleur-force, d'accepter et de **racheter** l'électricité injectée dans le réseau.

Ce rachat s'applique :

- Aux énergies non renouvelables « les prix payés se fondent sur les tarifs applicables à la fourniture d'une énergie équivalente par les réseaux régionaux de distribution ».
- Aux énergies renouvelables « les prix payés se fondent sur les tarifs applicables à l'énergie équivalente qui provient des nouvelles installations de production en Suisse ».

La classification des principaux vecteurs ou sources énergétiques en « énergies renouvelables » ou en « énergies non renouvelables » est présentée à l'encadré 34. Une commission nommée par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a émis des **recommandations** définissant le tarif de rachat de l'électricité injectée dans le réseau (cf. encadré 33). Dans certains cantons (par exemple Bâle-Campagne), les lois cantonales sur l'énergie fixent des tarifs de restitution élevés.

Lois, ordonnances, recommandations



Arrêté fédéral pour une utilisation économe et rationnelle de l'énergie (Arrêté sur l'énergie, AE) du 14 décembre 1990. (Source: OCFIM, 3000 Berne).



Ordonnance visant une utilisation économe et rationnelle de l'énergie (Ordonnance sur l'énergie, OEn) du 22 janvier 1992. (Source: OCFIM, 3000 Berne).



Empfehlungen für die Berechnung und die Festlegung der Vergütung der von Selbstversorgern abgegebenen Elektrizität. Bern: EVED, décembre 1992. (Source: OCFIM, 3000 Berne).



Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) du 16 décembre 1985, situation au 1^{er} janvier 1992. (Source: OCFIM, 3000 Berne).

Encadré 33

Energie renouvelable ou non renouvelable ?

Selon l'Arrêté sur l'énergie (encadré 33), les énergies renouvelables sont :

- Force hydraulique (limitation: jusqu'à 1 MW)
- Energie solaire
- Energie éolienne
- Biomasse
- Bois
- Gaz de station d'épuration
- Géothermie

Les énergies non renouvelables sont :

- Combustibles fossiles
- Déchets (gaz de décharge, combustion)

Encadré 34

Valeurs d'émissions (rapportées à la teneur en oxygène)	Moteur à gaz ¹ [mg/m ³ N] (5%)	Moteur diesel ² [mg/m ³ N] (5%)	Turbine à gaz ³ [mg/m ³ N] (15%)
Valeurs d'émissions selon OPair:			
– CO	650	650	100
– Particules solides	100	100	—
– Suie	—	—	2 à 4
– NO _x			
Combustibles fossiles	80	400	120
Gaz de station d'épuration, de décharge, biogaz	400	400	120
Valeurs d'émissions spéciales pour les NO _x :			
– ZH (sans la ville)	80	120	OPair
– Ville de Zurich	50	50	45
– BE ⁴	80	120	OPair
– SG ⁵			
Général	80	120	OPair
Gaz de station d'épuration	150	—	OPair
– BL/BS ⁶			
Gaz	70	—	40
Huile de chauffage	—	110	50

Tableau 35: Valeurs limites d'émissions pour les installations de couplage chaleur-force.

- ¹ OPair: à partir d'une consommation de combustible de 10 kg/h (40 kW_{el})
² OPair: à partir d'une consommation de combustible de 50 kg/h (200 kW_{el})
³ OPair: jusqu'à 60 MW de puissance thermique de chauffage
⁴ Région de Berne, Bienne, Thoune, Langenthal
⁵ Région de St-Gall, Rorschach, région de la Linth, Wil
⁶ Ville de Bâle et partie inférieure du canton de Bâle-Campagne

Emissions de substances polluantes

En Suisse, ce sont généralement les valeurs limites de l'Ordonnance sur la protection de l'air (encadré 33, tableau 35) qui font foi. Dans des secteurs à fortes émissions polluantes, on instaure des limites plus sévères (secteurs à mesures renforcées selon l'OPair).

2.5 Organisations de soutien

Dans de nombreux cas, le propriétaire du bâtiment fait construire et exploite l'installation de couplage chaleur-force. Toutefois certains motifs peuvent pousser le propriétaire à ne pas construire et/ou à ne pas exploiter lui-même l'installation de couplage chaleur-force:

- Le propriétaire ne veut ou ne peut supporter l'investissement supplémentaire de l'installation de couplage chaleur-force, même si c'est un investissement rentable.
- Le propriétaire n'a pas l'expérience nécessaire pour la construction et/ou l'exploitation d'une installation de couplage chaleur-force.
- Le propriétaire ne veut prendre aucun risque, ni sur le plan financier, ni sur le plan technique.

Dans de tels cas, une organisation de soutien (extérieure) peut prendre en charge le financement, la construction et/ou l'exploitation de l'installation de couplage chaleur-force. Les relations entre l'association de soutien et le propriétaire sont réglées par contrat.

Dans certaines régions de Suisse, des entreprises de distribution électrique, des entreprises générales de construction, des bureaux d'ingénieurs, des sociétés de financement et des associations coopératives proposent différents services de soutien (exposés au tableau 36). Ces entreprises offrent, selon le désir du client, certaines prestations, comme: service de piquet, télésurveillance, service de réparations en cas de panne, etc.

2.6 Contrats de livraison d'énergie

Gaz naturel

Pour des installations de grande puissance, la livraison de gaz pour le couplage chaleur-force et pour la chaudière d'appoint est souvent réglée par contrat spécial. Les petites installations peuvent se passer d'un tel arrangement car, très souvent, les règlements et les tarifs normaux suffisent.

Electricité

Selon l'Arrêté sur l'énergie, le raccordement au réseau d'une installation de couplage chaleur-force est réglé par contrat. Le contenu du contrat de raccordement est fixé par l'entreprise de distribution électrique.

Chaleur

Un contrat de livraison est utilisé lorsque l'exploitant de l'installation de couplage chaleur-force ne consomme pas lui-même la chaleur produite, mais qu'il la vend à des tiers. C'est en particulier le cas, lorsqu'une association de soutien construit et exploite l'installation. Le contrat de livraison de chaleur contient des prescriptions sur les droits et devoirs du fournisseur et du consommateur, des conditions de raccordements techniques et des dispositions financières sur la vente de la chaleur.

Le coût de l'énergie thermique contient les éléments essentiels suivants (cf. aussi encadré 37) :

- Une taxe de raccordement unique versée pour toute la durée contrat. Elle peut par exemple être établie sur la base des investissements économisés par le consommateur de chaleur qui renonce à sa propre production de chaleur.
- La taxe de base payée chaque année au fournisseur. Elle est définie en fonction de la puissance installée et n'est pas fonction de l'énergie thermique effectivement consommée.
- Le prix de l'énergie fixé par unité d'énergie thermique effectivement consommée (par exemple en ct/kWh). Il est formulé en fonction du prix du gaz, de l'huile de chauffage et des tarifs électriques et tient compte, le cas échéant, des frais de surveillance, d'entretien, d'assurance, de capitalisation et d'administration.

Dans le coût de l'énergie thermique, le prix de l'énergie doit représenter environ 70 % et la taxe de base environ 30 %.

- La taxe de base ne devrait pas être trop élevée, puisqu'elle est payée indépendamment de la consommation thermique et n'incite donc pas à économiser de la chaleur.
- La taxe de base ne peut toutefois pas être fixée trop bas, car certains frais du fournisseur d'énergie sont indépendants de la consommation thermique et courent aussi lorsque la consommation thermique est moins élevée que prévue ou qu'elle diminue grâce à des mesures d'économie d'énergie.

Organisation	Région	Installations
Elektra Birseck Münchenstein (EBM)	Région couverte par EBM	11
Elektra Baselland (EBL)	Région couverte par EBL	4 en projet
Forces Motrices Bernoises (FMB)	Canton de Berne	2
Centralschweizerische Kraftwerke (CKW)	Canton de Lucerne sans la ville	3 en projet
IWK AG, Zurich	Suisse et étranger	1 en projet
Schmeik + Schindler AG, Münchenstein	Suisse	—
Enerplan Invest AG, Lucerne	Suisse	5
Arbeitsgemeinschaft für dezentrale Energieversorgung (ADEV), Liestal et Berne	Suisse	10

Tableau 36: Organisations de soutien (adresses cf. annexe).

Conditions de vente de la chaleur (exemple)

Maisons familiales mitoyennes, besoin de puissance thermique de 10 kW

Raccordement au chauffage à distance :

– Contribution de raccordement (30 ans)	Fr	10 000.–
– Taxe de base	Fr	350.–
– Prix de l'énergie = 1,4 ¹ x prix du gaz	ct/kWh	5,2

Installation d'une chaudière conventionnelle :

– Investissements (chaudière, gaz, cheminée; 15 ans)	Fr	8 000.–
– Frais fixes (prix de base du gaz, ramoneur)	Fr/a	350.–
– Prix de l'énergie 1,1 ² x 1/0,85 ³ x prix du gaz	ct/kWh	4,8

Frais annuels [Fr/a]	Chauffage à distance	Chaudière à gaz
– Frais de capitalisation	810.–	880.–
– Frais fixes	350.–	350.–
– Frais de combustible (15 000 kWh/a)	780.–	720.–
– Total des frais annuels	1940.–	1950.–

1 Facteur du prix de l'énergie convenu

2 Facteur de conversion du pouvoir calorifique du gaz H₀ à H_u

3 Rendement annuel de la chaudière à gaz

Encadré 37

3. Dimensionnement

Données de base pour le dimensionnement sommaire (étude de faisabilité, concept global)

Nouvelles constructions :

- Concept de production de chaleur
- Volume construit et/ou surface de référence énergétique
- Indices de performance énergétique thermique et électrique à atteindre

Ces données permettent d'estimer le besoin thermique annuel et la puissance thermique à installer selon SIA 384/2.

Constructions existantes :

- Analyse du système de production de chaleur
- Projets de d'extension et/ou d'assainissement
- Consommation énergétique annuelle totale pour les cinq dernières années (base : factures d'huile de chauffage, de gaz et d'électricité)

Ces données permettent de calculer le besoin annuel en énergie de chauffage et la puissance thermique à installer approximative selon SIA 384/2.



La possibilité d'effectuer des mesures est un grand avantage dans les constructions existantes. Il faut alors procéder sans délai à une série de mesures des données d'exploitation les plus importantes (signature énergétique et courbes de chauffage). Les frais occasionnés par ces mesures sont compensés sans autre par des composants de l'installation plus petits et des taxes de raccordement réduites (suppression de facteurs de sécurité inutiles).

Données de base pour le dimensionnement détaillé (projet, exécution)

Nouvelles constructions :

- Concept de la production de chaleur
- Calcul détaillé de la puissance thermique à installer selon SIA 384/2
- Calcul détaillé du besoin thermique annuel effectué indépendamment par une deuxième méthode (par exemple selon SIA 380/1)
- Evaluation détaillée du besoin électrique (valeurs mensuelles ou valeurs estivales et hivernales pour haut et bas tarif)

Constructions existantes :

- Analyse détaillée du système de production de chaleur
- Signatures énergétiques et courbes de chauffage mesurées
- Contrôle de l'évolution journalière du besoin thermique (évolution journalière typique, dans des conditions habituelles d'utilisation, mesures détaillées pour des bâtiments à évolution journalière du besoin thermique spéciale)
- Vérification du besoin thermique annuel (base : consommation énergétique totale pour les 5 dernières années)
- Besoin électrique (valeurs mensuelles ou valeurs estivales et hivernales pour haut et bas tarifs ; dans des cas plus complexes : valeurs de mesure)

Encadré 38

3.1 Bases

Le dimensionnement de l'installation de couplage chaleur-force a une influence déterminante sur l'exploitation, le fonctionnement annuel et les frais d'exploitation. Tous ces facteurs à leur tour influencent la rentabilité dans une large mesure.

Lors du dimensionnement de l'installation, les éléments suivants entrent en jeu :

- **Dimensionnement** : détermination des puissances.
- **Calcul de rentabilité** : établissement des prix de revient de la chaleur et/ou de l'électricité.

Le dimensionnement passe par différentes phases de plus en plus approfondies.

- **Etude préalable** : étude des conditions-cadre sans autre calcul.
- **Etude de faisabilité, concept global** : dimensionnement sommaire par des règles simples et calcul du prix de revient de l'électricité (pas de calcul des frais annuels).
- **Projet, exécution** : dimensionnement détaillé, contenant en particulier un calcul approfondi de la rentabilité et du prix de revient de la chaleur.

Un dimensionnement exige des **données de base** exactes sur les besoins en énergie électrique et thermique du bâtiment. Ces dernières doivent être recherchées sur un plan global et analysées de manière critique. Selon la phase de planification, ces données de base doivent être utilisées de façon plus ou moins détaillée (encadré 38).

En outre, les facteurs suivants ont une influence décisive sur le projet :

- Tarifs de l'entreprise de distribution électrique concernée (tarifs de consommation, tarifs de restitution de l'électricité réinjectée dans le réseau).
- Besoin en électricité de secours, pour autant que l'installation de couplage chaleur-force soit prévue également comme générateur de secours.
- Infrastructure (possibilités de raccordement au gaz et à l'électricité ainsi qu'espace disponible).



Lors du dimensionnement d'un projet, il est impératif de disposer de données exactes, la précision des calculs jouant un rôle plutôt secondaire !

3.2 Dimensionnement sommaire

Lors d'études de faisabilité, de concepts et d'études pré-alables, un dimensionnement sommaire est suffisant :

- Le **dimensionnement sommaire** peut être effectué en utilisant les règles générales de l'encadré 39.
- L'**évaluation de la rentabilité** s'effectue à l'aide des investissements spécifiques de la figure 41 et nomogramme du prix de revient de l'électricité (figure 42).

Dimensionnement sommaire

Le dimensionnement sommaire est basé sur des valeurs expérimentales ayant débouché sur une rentabilité optimale pour la plupart des installations testées, installations dont la majeure partie du besoin thermique dépend de la température extérieure.

Le dimensionnement sommaire ne tient *pas* compte des points suivants :

- évolution annuelle et profil journalier du besoin thermique ;
- arrêt de l'installation de couplage chaleur-force, par exemple en fonction des périodes tarifaires.

Des **règles sommaires pour des constructions non habitées** sont plus difficiles à établir. Dans le cas ci-après et selon l'encadré 39, le dimensionnement sommaire devrait plutôt se baser sur la limite inférieure de puissance :

- faible part de consommateurs ne dépendant pas des températures extérieures ;
- part élevée de gain thermique (bonne utilisation de l'énergie solaire passive, charges internes élevées) ;
- périodes prolongées avec besoin thermique réduit (écoles).

Dans les cas suivants, le dimensionnement se base plutôt sur la limite supérieure de puissance :

- part importante de consommateurs ne dépendant pas des températures extérieures ;
- part élevée du besoin thermique pour les installations de ventilation avec longues périodes de fonctionnement (mais : peut-on les réduire, existe-t-il une récupération de chaleur ?) ;
- température élevée des locaux (hôpitaux, homes) ;
- tarifs électriques élevés (consommation, restitution).

L'encadré 40 présente un dimensionnement sommaire sur la base d'un exemple.

Règles générales pour le dimensionnement sommaire

On utilisera à cet effet (à la rigueur de estimations correspondant à ces valeurs, cf. encadré 38) :

- **Puissance thermique à installer** selon SIA 384/2 *sans supplément quelconque* (eau chaude sanitaire, pertes de distribution, etc.) ou besoin de puissance thermique mesurée, facteur de sécurité inclus.
- Besoin thermique annuel, calcul indépendant selon une deuxième méthode (par exemple SIA 380/1), le cas échéant *avec eau chaude sanitaire* ou besoin thermique annuel mesuré.

Bâtiments habités sans chauffage d'eau sanitaire :

- Puissance CCF = 0,35 fois la puissance thermique à installer.
- Puissance CCF = 0,70 fois besoin thermique annuel divisé par 4250 h de fonctionnement.

Bâtiments habités avec chauffage de l'eau :

- Puissance CCF = 0,40 fois la puissance thermique à installer.
- Puissance CCF = 0,70 fois besoin thermique annuel divisé par 4750 h de fonctionnement.

Constructions non habitées :

- Puissance CCF = 0,25 à 0,40 fois la puissance thermique à installer.
- Puissance CCF = 0,70 fois besoin thermique annuel divisé par 4500 h de fonctionnement.

Les 2 formules doivent toujours produire des valeur du même ordre. **Puissance électrique CCF** = 0,55 fois puissance thermique de l'installation de couplage chaleur-force choisie.

Encadré 39



Exemple, 1^{re} partie Dimensionnement sommaire

Règle générale « bâtiments habités sans chauffage d'eau sanitaire » :

- Puissance thermique à installer d'après la signature énergétique mesurée (au point de dimensionnement y compris sécurité) 1375 kW
- Consommation annuelle mesurée d'huile de chauffage 325 000 l/a
- Evaluation du rendement global annuel 0,85

Puissance CCF d'après par le besoin thermique annuel :

$$\dot{Q}_{\text{BAT}} = 1375 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{CCF}} = 0,35 \cdot \dot{Q}_{\text{BAT}} = 480 \text{ kW} \quad (\text{encadré 39})$$

Puissance CCF d'après le besoin thermique annuel :

$$Q_{\text{UTIL}} = 325\,000 \frac{\text{l}}{\text{a}} \cdot 0,84 \frac{\text{k}}{\text{l}} \cdot 0,85 \cdot 11,86 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{UTIL}} = 2\,750\,000 \text{ kWh}$$

$$\dot{Q}_{\text{CCF}} = 0,70 \frac{Q_{\text{UTIL}}}{4250} = 450 \text{ kW} \quad (\text{encadré 39})$$

Puissance de l'installation de couplage chaleur-force choisie :

$$\dot{Q}_{\text{CCF}} = 450 \text{ kW}$$

$$P_{\text{el}} = 0,55 \cdot 450 \text{ kW} = 250 \text{ kW}$$

Encadré 40

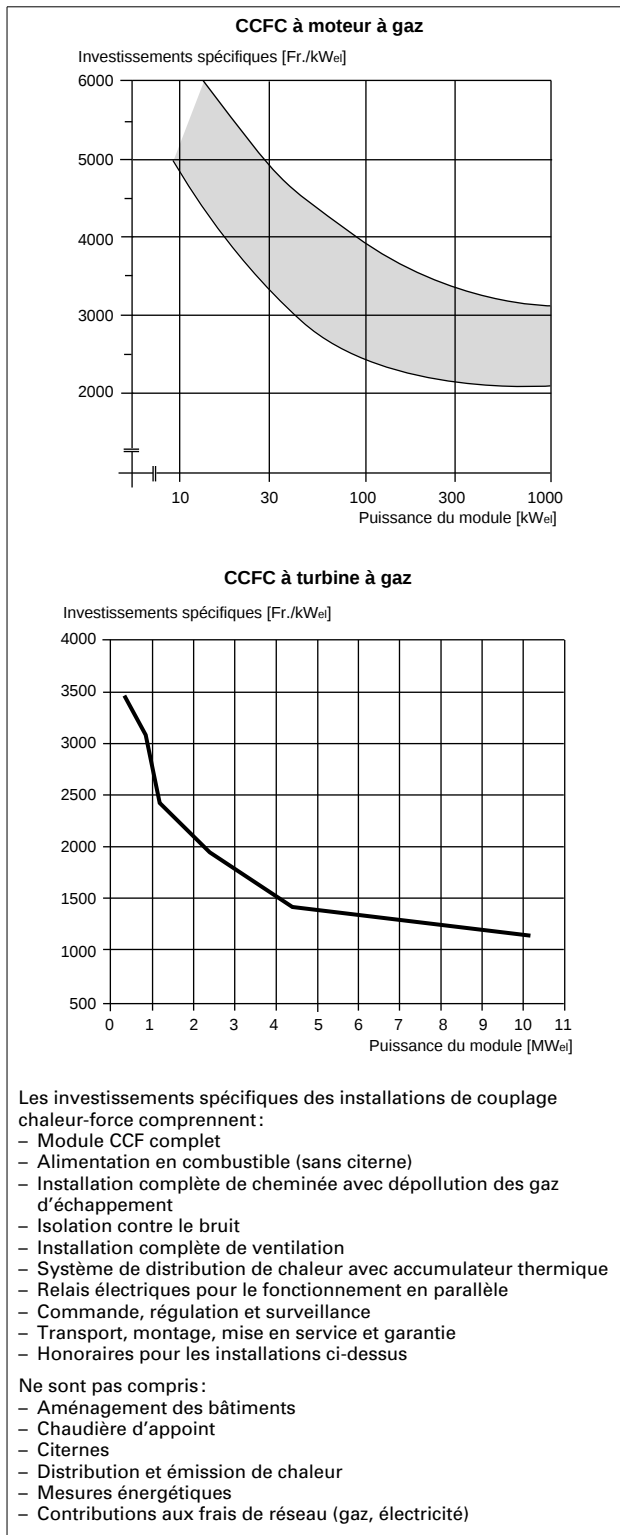


Figure 41: Investissements spécifiques.

Investissements spécifiques

Les investissements pour CCFC à moteur et à turbine à gaz dépendent essentiellement de la puissance électrique de l'installation: plus l'installation est grande, plus les investissements spécifiques sont faibles (investissements par puissance installée). Pour les études préalables et de faisabilité, une vérification à l'aide de la figure 41 ou un prix indicatif (marge d'erreur de 20%) suffit.

Les investissements présentés à la figure 41 pour les **CCFC à moteur à gaz** reposent sur des valeurs expérimentales provenant d'un grand nombre d'installations. Ces investissements sont basés sur les prix de 1993. Selon les conditions-cadre spécifiques à chaque cas et d'après la situation du marché, les investissements se situent dans une fourchette donnée.

Pour les investissements destinés aux **CCFC à turbines à gaz**, les valeurs expérimentales à disposition sont relativement peu nombreuses. Les investissements indiqués à la figure 41 doivent donc être considérés à titre indicatif pour des estimations sommaires. Lors d'études de faisabilité, il est absolument indispensable de demander un prix estimatif au fournisseur de l'installation.

Evaluation de la rentabilité

Les frais annuels globaux ne sont pas nécessaires à l'établissement du **prix de revient de l'électricité**; les données essentielles présentées ci-après de l'installation de couplage chaleur-force suffisent :

- investissements spécifiques (selon figure 41);
- annuités (selon la durée d'amortissement et le taux d'intérêts du tableau 55);
- durée annuelle de fonctionnement (selon dimensionnement sommaire de l'encadré 39);
- prix du combustible compte tenu du renchérissement (valeur moyenne selon tableau 55);
- frais d'exploitation (figure 56) compte tenu du renchérissement (valeur moyenne selon tableau 55).

L'emploi du nomogramme du prix de revient de l'électricité (figure 42) est très simple et rapide. Le tableau 43 nous décrit son fonctionnement à l'aide d'un exemple.

Les points suivants sont à considérer :

- Le nomogramme ne prend en compte que le côté électrique de l'installation de couplage chaleur-force (production d'électricité et consommation supplémentaire de combustible découlant de la production d'électricité).

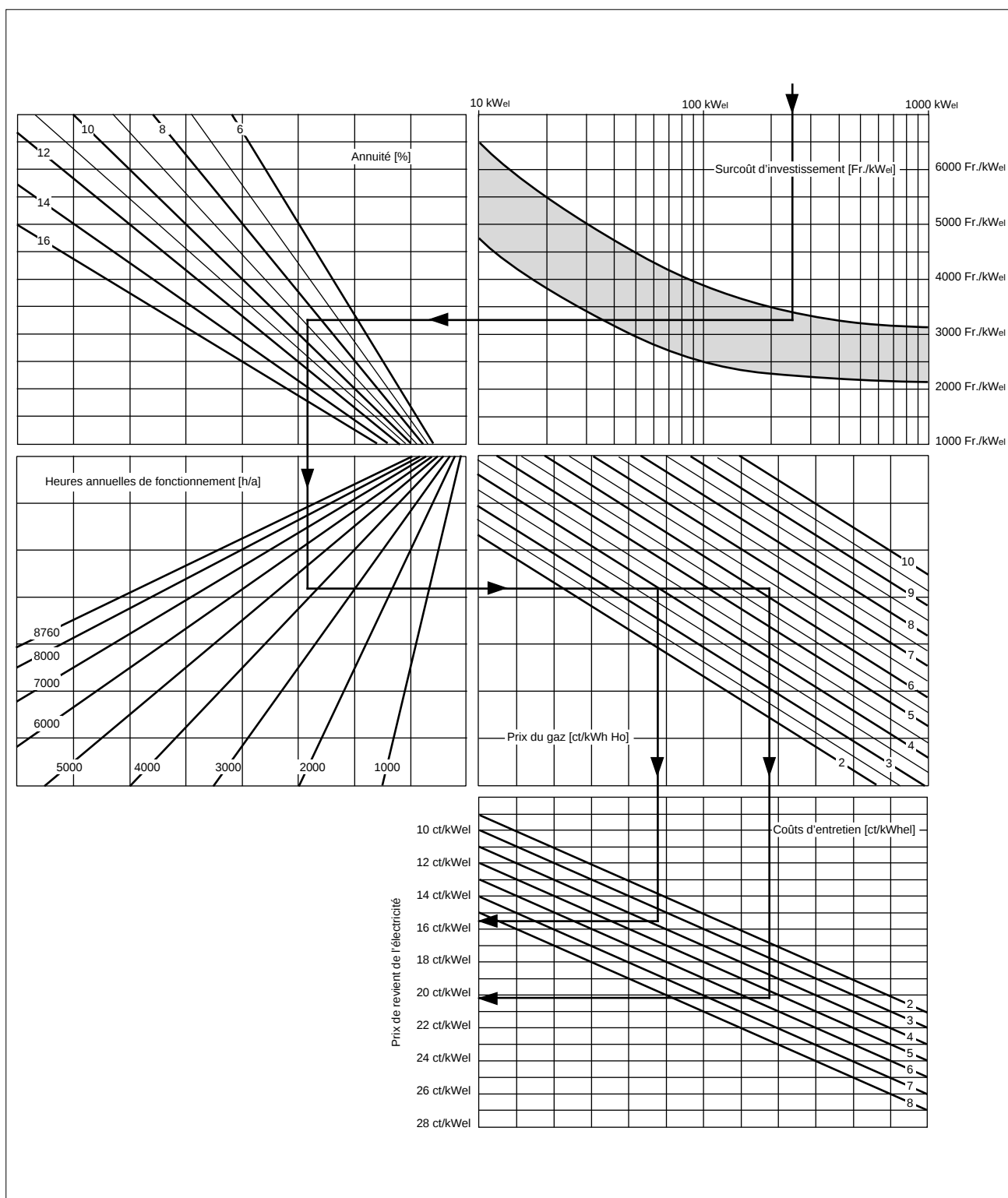


Figure 42: Nomogramme pour l'établissement du prix de revient de l'électricité (les flèches correspondent à l'exemple : cf. tableau 43).

 Exemple, 2 ^e partie	1 ^{re} année	Facteur moyen	Moyenne sur 20 ans ³
Investissements spécifiques selon figure 41 [Fr/kW _{el}] – CCFC 250 kW _{el}	3250	—	3250
Annuité selon tableau 55 – Amortissement sur 20 ans – Taux d'intérêts 6%	0,087	—	0,087
h de fonctionnement [h/a]	4250	—	4250
Prix du gaz [ct/kWh]	4,0	1,581 ¹	6,3
Frais d'entretien globaux spécifiques selon figure 56 [ct/kW _{el}]	3,7	1,463 ²	5,4
Prix de revient « électricité » [ct/kW _{el}] selon nomogramme figure 42	15,5	—	20,2

¹ 20 ans, 5% d'augmentation du prix de l'énergie (tableau 55)
² 20 ans, 4% d'augmentation des frais d'entretien (tableau 55)
³ Prix courants

Tableau 43: Exemple, deuxième partie – Estimation de la rentabilité à l'aide du nomogramme de la figure 42.

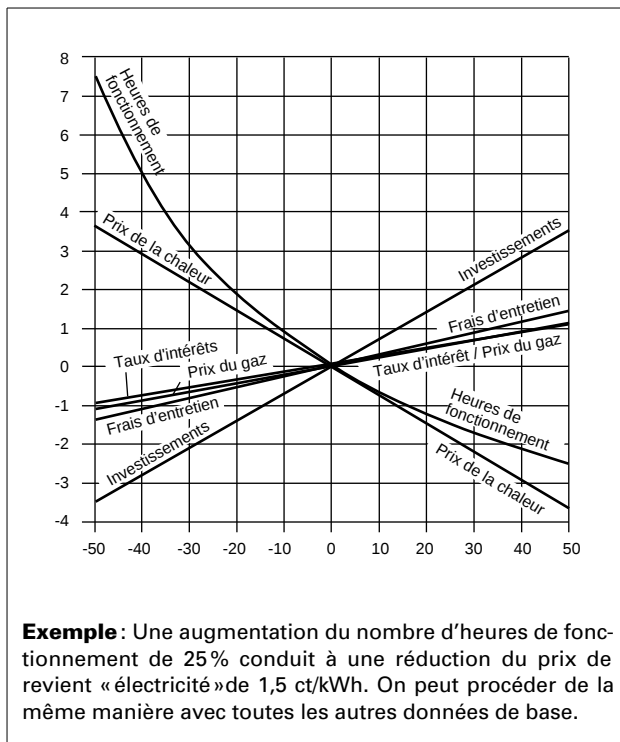


Figure 44: Analyse de sensibilité. Modification du prix de revient « électricité » en fonction des paramètres de base.

- Le nomogramme part du principe que la chaudière, avec ou sans couplage chaleur-force, occasionne les mêmes investissements et frais d'exploitation. Seuls les investissements supplémentaires par rapport à une installation avec chaudière conventionnelle sont considérés.
- Les frais d'énergie et d'entretien (prix actuels) doivent être multipliés par un facteur moyen, qui tient compte du renchérissement sur la durée d'amortissement de l'installation.

Une **analyse de sensibilité** permet, à partir d'un unique calcul de rentabilité, de déterminer l'influence des différents paramètres de base sur la rentabilité. La modification du prix de revient de l'électricité résultant d'une variation des paramètres de base sur une plage de $\pm 50\%$ est représentée à la figure 44. Lors d'une variation simultanée de plusieurs paramètres, les modifications du prix de revient de l'électricité peuvent être simplement additionnées.

3.3 Dimensionnement détaillé

Pour le projet et l'exécution du projet d'une installation de couplage chaleur-force, un dimensionnement détaillé est nécessaire:

- **Dimensionnement détaillé:** évaluation des données énergéto-techniques (en particulier le total des heures de fonctionnement pendant les diverses périodes tarifaires et détail des valeurs de consommation et de production qui en découlent).
- **Calcul de rentabilité:** évaluation des frais annuels au moyen des données énergéto-techniques et établissement du prix de revient de la chaleur pour la première année de fonctionnement et pour la moitié de la durée d'amortissement.

Pour le dimensionnement détaillé, les données de base suivantes sont nécessaires:

- puissance thermique à installer (calculée selon la norme SIA 384/2 pour les nouvelles constructions ou mesurage de la signature énergétique pour les constructions existantes);
- besoins thermiques annuels compte tenu des gains thermiques (par exemple calcul selon norme SIA 380/1 ou évaluation au moyen de la consommation de combustible);
- besoins thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire;
- évolution journalière et saisonnière des besoins thermiques et électriques.

Le dimensionnement se déroulera comme suit :

- Le dimensionnement sommaire permettra de déterminer approximativement la puissance thermique de l'installation de couplage chaleur-force (encadré 39).
- Les données énergéto-techniques seront calculées à l'aide d'un programme d'ordinateur ou « à la main » avec le diagramme des durées de fonctionnement cumulées. Elles serviront de base pour le calcul des frais annuels.
- Selon les résultats de calcul et l'expérience d'autres installations, d'autres calculs seront effectués en modifiant les puissances.

Calculs énergétiques à l'aide de programmes informatique

Les deux programmes ci-dessous utilisent le profil journalier typique du besoin thermique du bâtiment, permettant ainsi un calcul exact des données énergéto-techniques :



Logiciel « C-CALC » pour installations de production de chaleur, composé de modules « PAC-CALC » pour les installations de pompes à chaleur et « CCF-CALC » pour les installations de couplage chaleur-force. Berne : Office fédéral pour les questions conjoncturelles, 1994. (Source : Infoénergie, 5200 Windisch)

Ce programme a été développé sous mandat de la Confédération. En plus du profil journalier de la consommation thermique (figure 45), le module « CCF-CALC » tient compte notamment des besoins électriques journaliers du bâtiment, ce qui permet une division de la production électrique en deux parties : une pour les besoins propres du bâtiment et une autre pour l'injection dans le réseau. En outre, le calcul du prix de revient de la chaleur (selon la méthode décrite dans « RAVEL, une économie d'argent ») pour la première année de fonctionnement et pour la moitié de la durée d'amortissement sont intégrés à ce module.



Programme informatique « BHKW ». (Source : Elektra Birseck, Münchenstein, Weidenstrasse 27, 4142 Münchenstein)

Ce programme a été développé par Elektra Birseck. Une différenciation entre « électricité consommée » et « électricité réinjectée dans le réseau » n'est pas possible. Pendant la première année de fonctionnement, la rentabilité tiendra lieu de bilan des frais annuels.

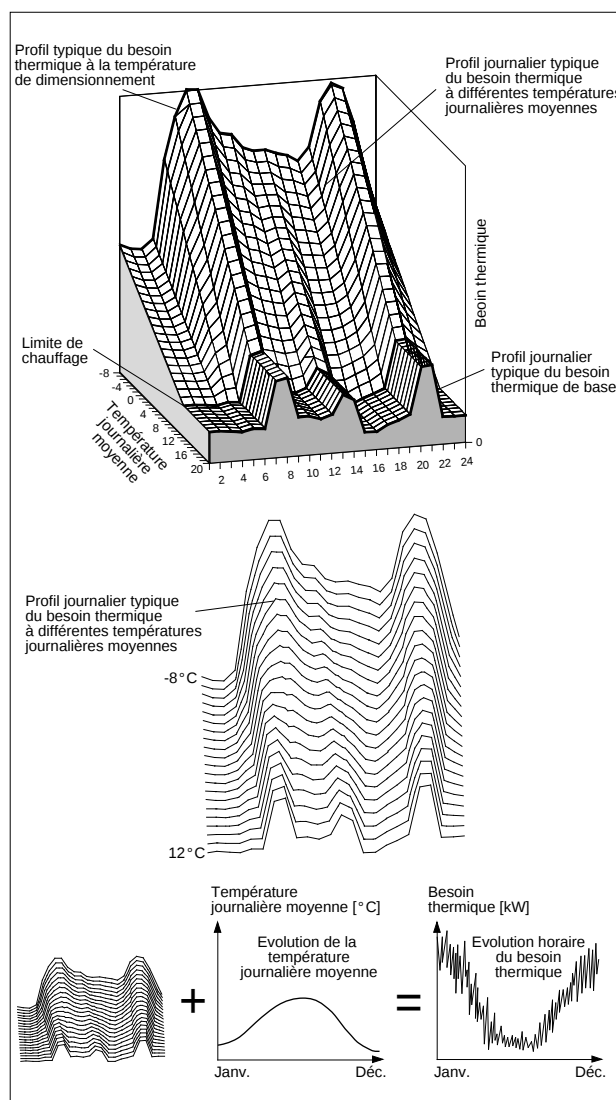


Figure 45: Le programme CCF-CALC utilise un profil journalier typique du besoin thermique du bâtiment étudié. Le même profil est utilisé pour toute l'année. A l'aide de la signature énergétique, on représente les profils journaliers typiques pour différentes températures journalières moyennes (en haut et au milieu). Les valeurs horaires du besoin thermique sont calculées sur la base de l'évolution annuelle des températures extérieures (en bas). La durée de fonctionnement de l'installation de couplage chaleur-force et la production thermique de la chaudière d'appoint peuvent être calculées heure par heure avec la période tarifaire correspondante.

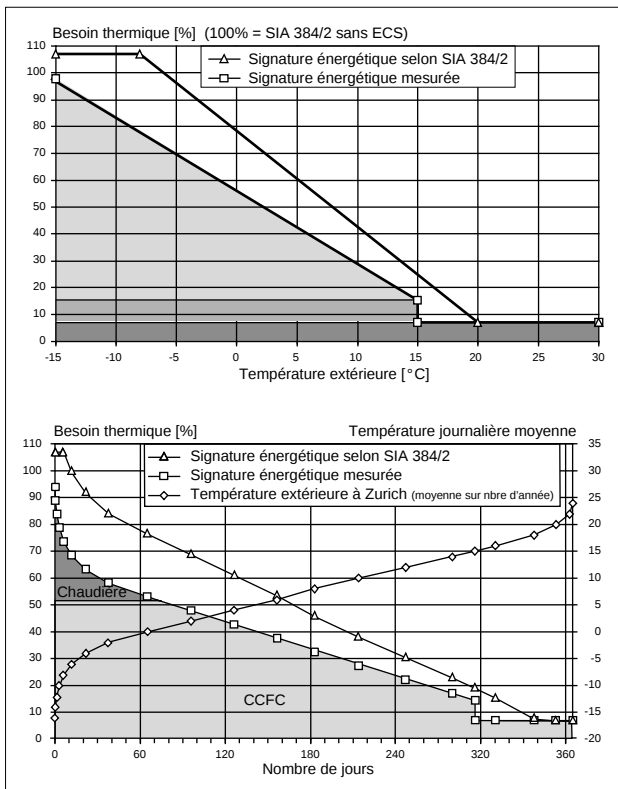


Figure 46: La **signature énergétique (diagramme du haut)** représente le besoin thermique journalier moyen en fonction de la température extérieure. La courbe inférieure de ce diagramme a été mesurée dans une installation en fonction. Le besoin thermique est composé de trois parties:

- une partie dépendante des conditions météorologiques jusqu'à la limite de chauffage (pertes par transmission et par renouvellement d'air);
 - une partie relativement grande non dépendante des conditions météorologiques jusqu'à la limite de chauffage (pertes de distribution, chauffage intensif, effets dynamiques dus à la régulation de la température de départ asservie aux conditions météorologiques) et
 - une partie non dépendante des conditions météorologiques durant toute l'année (production de l'eau chaude sanitaire).
- La signature énergétique comparative, représentée par la courbe supérieure du diagramme, correspond à la puissance thermique à installer selon SIA 384/2, plus la production d'eau chaude sanitaire (limite de chauffage et gains thermiques pas pris en compte).

Le **diagramme des durées de fonctionnement cumulées (diagramme inférieur)** montre la durée (nombre de jours) à un certain besoin thermique. Sont représentées ici les durées de fonctionnement cumulées calculées au moyen des deux signatures énergétiques. La surface située sous la courbe correspond chaque fois à la quantité de chaleur ($\text{kW} \cdot \text{h} = \text{kWh}$). La surface ombrée du CCFC sous la courbe mesurée aurait dû produire une durée de fonctionnement de 5100 h/a; les heures effectivement atteintes sont de 4200 h/a (cf. texte). Malgré un dimensionnement du CCFC relativement élevé, à 51% de la puissance thermique à installer selon SIA, le nombre d'heures de fonctionnement atteint peut être qualifié de bon.

Calculs énergétiques à l'aide du diagramme des durées de fonctionnement cumulées

Le diagramme des durées de fonctionnement cumulées et les problèmes qui en découlent ont déjà fait l'objet d'une description détaillée dans le cadre du dimensionnement d'une installation de pompe à chaleur.

☞ *Cahier 3, « Pompes à chaleur », chapitre 4.*

Le diagramme des durées de fonctionnement cumulées ne convient pas à l'installation de couplage chaleur-force, car seul le chiffre annuel des heures de fonctionnement peut être évalué. Sa répartition dans les différentes échelles tarifaires doit être estimée à l'aide d'autres hypothèses, ce qui peut avoir une grande influence sur le calcul de rentabilité. C'est pourquoi il est préférable de renoncer ici à une description de cas. En lieu et place, la figure 46 compare la signature énergétique mesurée dans une installation, avec celle dérivée du besoin de puissance thermique selon SIA 384/2. Les remarques suivantes sont à observer:

- La puissance thermique à installer, selon SIA 384/2 n'est valable que pour le dimensionnement des chaudières d'appoint et des systèmes de production de chaleur.
- Déduire uniquement de la puissance thermique à installer selon SIA 384/2 la signature énergétique ou la courbe des durées de fonctionnement cumulées n'est pas possible. En effet aucune règle plausible pour la prise en compte des gains thermiques et du besoin thermique non dépendant des conditions météorologiques ne peut être énoncée.
- Le calcul des heures de fonctionnement de l'installation de couplage chaleur-force à l'aide de la courbe des durées de fonctionnement cumulées est imprécis, étant donné que de nombreux paramètres ne sont pas pris en compte (commutation été-hiver, déblocage de la chaudière d'appoint, disponibilité, climat, etc.).



Les contradictions entre la théorie et la pratique concernant les conditions de charge sont traitées par CCF-CALC de la manière suivante:

- Pour les **nouvelles constructions**, il faut connaître les grandeurs ci-après:
 - puissance thermique à installer selon SIA 384/2 (pour l'établissement d'une signature énergétique comparative);
 - besoin annuel en énergie de chauffage calculé selon une 2^e méthode indépendante (p. ex. SIA 380/1);

- limite de chauffage et puissance thermique indépendante des conditions météorologiques y relatives ;
- besoin thermique pour la production d'eau chaude sanitaire ;
- besoin thermique pour les procédés industriels.

Le programme calcule la signature énergétique correspondante au besoin en énergie de chauffage annuel et la compare à la signature énergétique calculée à partir de la puissance thermique à installer selon SIA. Les deux signatures énergétiques doivent évoluer de manière plausible l'une par rapport à l'autre. En cas contraire, un réexamen des données de base est nécessaire.

• Pour les **constructions existantes**, la détermination de la signature énergétique au moyen de mesures est en principe recommandée. Elle peut être intégrée dans le programme par adaptation successive des paramètres décrits. Dans ce cas, une comparaison des signatures énergétiques n'est pas utile.

Bilan énergétique

Les **données énergéto-techniques** sont calculées sur la base du dimensionnement détaillé, « à la main » ou à l'aide de l'ordinateur (3^e partie de l'exemple, tableau 47). Elles servent en particulier à déterminer les dimensions suivantes :

- dimensionnement de tous les éléments composant l'installation ;
- évaluation des frais d'exploitation ;
- évaluation des frais énergétiques ;
- évaluation des revenus provenant de la production d'électricité.

La représentation graphique du diagramme du flux énergétique indique clairement les données énergéto-techniques (4^e partie de l'exemple, tableau 48)

3.4 Calcul de la rentabilité

Les installations de couplage chaleur-force représentent d'importants capitaux. Les investissements supplémentaires par rapport à une installation conventionnelle doivent être amortis par une production électrique de haute valeur. Ce fait est quantifié dans le calcul de rentabilité. A cet effet, il est nécessaire de considérer les investissements *actuels*, les frais annuels *futurs* et les revenus. Pour établir les flux de capitaux futurs, deux problèmes essentiels se posent :

- Pour les dépenses et les recettes futures, le taux de renchérissement doit être pris en compte.

 Exemple, 3 ^e partie	Puissance	en %
Puissance thermique à installer – SIA 384/2 à $\vartheta_e = -8^\circ\text{C}$ – Mesure à $\vartheta_e = -13^\circ\text{C}$ – Mesure à $\vartheta_e = 15^\circ\text{C}$	1375 kW 1250 kW* 125 kW*	100 91 9
Besoin thermique annuel – Chauffage dépendant des conditions météo – Chauffage non dépendant des conditions météo (lim. chauff. 15°C) – Chaleur pour procédés industriels – Chauffage d'eau sanitaire	2750 MWh/a 2100 MWh/a 650 MWh/a — —	100 76 24
Besoin électrique annuel	1000 MWh/a	
Puissance thermique – CCFC – Chaudière d'appoint	450 kW 1375 kW	33 100
Puissance électrique CCFC	250 kW	
Puissance du combustible – Gaz naturel CCFC (H_u) – Gaz naturel chaudière d'appoint (H_u) – Huile de chauff. EL chaudière d'ap. (H_u)	780 kW 1530 kW 1530 kW	
Production thermique – CCFC – Chaudière d'appoint à gaz – Chaudière d'appoint à huile de chauff.	2750 MWh/a 2000 MWh/a 650 MWh/a 100 MWh/a	100 73 23 4
Production électrique CCFC – Besoins propres – Restitution.	1110 MWh/a 600 MWh/a 500 MWh/a	100 55 45

* Signature énergétique mesurée sans facteur de sécurité.

Tableau 47 : Exemple, troisième partie – données énergétiques.

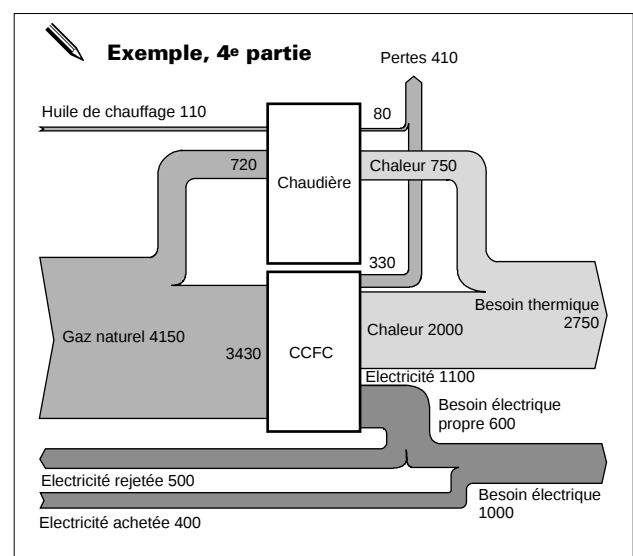


Figure 48 : Exemple, quatrième partie – Diagramme des flux énergétiques (unité : MWh/a).

Bibliographie RAVEL à propos de la rentabilité



Leemann, Robert: *Grundbegriffe der Energiewirtschaft (Glossar)*. Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992. (Source: OCFIM, 3000 Berne, N° de commande 724.397.12.51.1d)



Müller, André et Felix Walter: *RAVEL, une économie d'argent*. Berne: Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992 (Source: OCFIM, 3000 Berne, N° de commande 724.397.42.01f)

Encadré 49

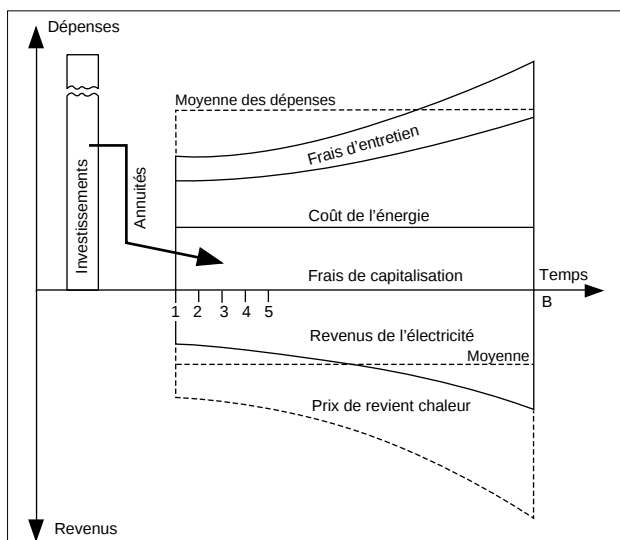


Figure 50: Dépenses et revenus.

Facteur moyen

Le facteur moyen donne le rapport entre les dépenses moyennes (respectivement recettes) pendant la durée d'amortissement et les dépenses (respectivement recettes) pendant la 1^{re} année de fonctionnement. Il dépend de la durée d'amortissement, du calcul du taux d'intérêts et du taux de renchérissement des dépenses (respectivement recettes).



Quelques facteurs moyens se trouvent au tableau 55 et des tableaux plus détaillés figurent dans « RAVEL, une économie d'argent » (cf. encadré 49).

Encadré 51

- Un franc a une plus grande valeur aujourd'hui que dans 5 ans (abstraction faite du renchérissement), étant donné que son placement pourrait rapporter des intérêts.

Pour pouvoir comparer correctement des flux de capitaux futurs avec les investissements actuels, un calcul de rentabilité dynamique devra être établi. La littérature RAVEL traitant de ce sujet est présentée à l'encadré 49.

Méthodes de calcul

Le calcul de la rentabilité d'une installation de couplage chaleur-force est basé sur les coûts et les revenus annuels (figure 50). A cet effet, on ne considère pas en premier lieu les coûts et revenus actuels, mais les flux de capitaux en vigueur pendant toute durée d'amortissement. Pour ce faire, les valeurs imputées aux coûts énergétiques et d'entretien pour la première année de fonctionnement ainsi que les revenus issus de la production thermique seront multipliés par un **facteur moyen** (encadré 51). Selon la phase de planification, l'un ou l'autre des points suivants pourra contribuer à l'appréciation de la rentabilité des installations de couplage chaleur-force :

- **Prix de revient de la chaleur** : il se compose du coût global moins le revenu de la production électrique. Le prix de revient spécifique de la chaleur est établi en divisant le prix de revient de la chaleur par la production thermique. Le prix de revient spécifique de la chaleur se prête particulièrement bien au calcul de la rentabilité lors du dimensionnement détaillé, de même qu'à la comparaison de diverses variantes de production thermique ; de cette façon, on tient compte aussi de la chaleur produite par la chaudière d'appoint. Le logiciel «CCF-CALC» calcule le prix de revient de la chaleur.
- **Bilan des coûts annuels** : il est formé par les revenus globaux après déduction des frais globaux. S'il est positif, l'installation est rentable. L'établissement du bilan des coûts annuels est également adéquat lorsque la chaleur est vendue à des tiers. Le logiciel «BHKW» calcule le bilan des coûts annuels pour la première année de fonctionnement.
- **Prix de revient de l'électricité** : l'évaluation du prix de revient de l'électricité est surtout utilisée pour une estimation rapide de la rentabilité lors du dimensionnement sommaire, comme expliqué au chapitre 3.2. Le calcul se fait de préférence à l'aide du nomogramme du prix de revient de l'électricité de la figure 42. La production thermique de l'installation de couplage

chaleur-force n'est pas prise en considération, mais seulement les frais énergétiques *supplémentaires* provoqués par la production électrique.

Durée d'amortissement

La durée d'amortissement est le facteur le plus important du calcul de la rentabilité (encadré 52). L'ensemble des flux de capitaux s'y rapporte. Cette période doit correspondre à la durée d'utilisation des éléments principaux (tableau 53).

Codes des frais de construction

Pour des projets de grande envergure en particulier, l'on procède à la classification de chaque position selon le code des frais de construction (CFC) (tableau 53). Ce classement permet un contrôle simplifié des coûts, principalement dans la phase d'exécution.

Taux d'intérêts

Le calcul du taux d'intérêts pour l'évaluation de la rentabilité sera établi d'entente avec le mandant. L'usage veut que l'on applique des taux d'intérêts différents (tableau 54) pour chaque secteur : habitat, services, arts et métiers, industrie. Lors de la définition du taux d'intérêts, on tiendra compte de la différence avec le taux d'inflation qui se monte *toujours* entre 2 et 3%.

Frais de capitalisation

Les frais de capitalisation sont définis dans la mesure où les investissements sont multipliés par le **facteur d'annuité**. Si les investissements se composent d'éléments avec des durées d'amortissement différentes, les frais de capitalisation des investissements sont à calculer séparément. Le facteur d'annuité est subordonné à la durée d'amortissement et au taux d'intérêts (tableau 55).

Taux d'inflation

Pour adopter un taux d'inflation réaliste, on ne peut que se référer au passé. Selon « RAVEL, une économie d'argent » (encadré 49), un taux d'inflation de 3% doit être utilisé dans le calcul de rentabilité (tableau 54).

Durée d'amortissement

Chauffage à distance pour installation de couplage chaleur-force _____ 30 ans

Installation de couplage chaleur-force avec moteur à combustion _____ 20 ans

La durée de vie des moteurs à combustion est de 10 ans environ ou 40 000 heures de fonctionnement. Le moteur est ensuite remplacé ou entièrement révisé (frais 10 à 20% du prix du module), ce qui lui redonne 40 000 heures supplémentaires de durée de vie. L'opération est répétée jusqu'à ce que les autres éléments du module aient atteint leur limite de durée de vie.

Encadré 52

CFC	Partie de l'installation	Durée d'utilisation [ans]	Frais d'entretien ¹ [%]
10	Travaux préparatoires	DA ²	—
20	Excavation	50	—
21	Gros œuvre 1	50	1,0
22	Gros œuvre 2	50	1,0
231	Appareils à courant fort	25	1,5
232	Installation de courant fort	25	1,5
235	Régulation et commande	15	1,5
241.1	Alimentation de gaz	50	1,0
241.2	citerne	25	1,5
242	Production de chaleur 1	15	3,0
242	Production de chaleur 2	30	3,0
243	Distribution de chaleur	30	1,0
244	Installations de ventilation	15	3,5
245	Instal. de condition. d'air	15	3,0
247.5	Conduits de fumée spéciaux	20	1,5
247.6	Installation CCFC	20	3
25	Installations sanitaires	30	1,5
26	Installations de transport	30	1,5
27	Aménagements intérieurs 1	40	1,0
28	Aménagements intérieurs 2	40	1,0
29	Honoraires	DA ²	—
50	Frais secondaires	DA ²	—
	Comptes d'attente	DA ²	—

¹ Frais d'entretien en % d'investissements
² DA = durée d'amortissement
³ Voir figure 56

Tableau 53: Durée d'utilisation et frais d'entretien classés selon le code des frais de construction (CFC).

Renchérissement	Minimal	Moyen	Maximal
Achat d'électricité	3%	4%	5%
Restitution d'électricité	3%	4,5%	6%
Huile de chauffage	3%	5%	7%
Gaz naturel	3%	4,5%	6%
Chaleur à distance	3%	4%	5%
Bois	3%	3%	3%
Frais d'entretien	3%	4%	5%
Taux d'inflation			3%
Taux d'intérêts	Secteur habitat		6%
	Services/Arts et Métiers		6,5%

Tableau 54: Bases pour le calcul de rentabilité.

Facteurs d'annuités				
Durée d'amortissement	Taux d'intérêts			
	5%	6%	7%	
10 ans	0,130	0,136	0,142	
15 ans	0,096	0,103	0,110	
20 ans	0,080	0,087	0,094	
Facteurs moyens pour un taux d'intérêts de 6 %				
Durée d'amortissement	Taux d'intérêts			
	4%	5%	6%	7%
10 ans	1,225	1,290	1,359	1,431
15 ans	1,331	1,433	1,544	1,666
20 ans	1,463	1,581	1,744	1,927

Explication:
Frais d'investissements x facteur d'annuités = frais annuels de capitalisation
Frais d'entretien x facteur moyen = frais d'entretien annuels moyens
Frais d'énergie x facteur moyen = frais d'énergie annuels moyens

Tableau 55: Facteurs choisis pour le calcul de rentabilité. Des tableaux exhaustifs sont présentés dans «RAVEL, une économie d'argent» (cf. encadré 49).

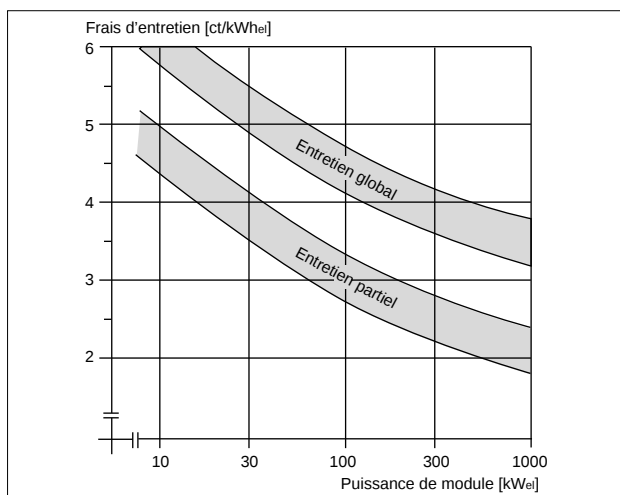


Figure 56: Frais d'entretien des CCFC.

Coûts et revenus énergétiques

Ils sont fixés à l'aide de renseignements spécifiques obtenus auprès des entreprises de distribution électrique concernées. Une attention toute particulière doit être portée aux points suivants :

- Selon les possibilités d'interruption des installations de CCF et de chaudière d'appoint, différents tarifs de gaz sont applicables.
- Pour le gaz naturel, il faut tenir compte des frais fixes, des frais variables et de la différence entre pouvoir calorifique supérieur H_o et pouvoir calorifique inférieur H_u .
- Pour les bâtiments dans lesquels sont réalisés des installations de couplage chaleur-force, on applique en général les tarifs d'été et d'hiver pour la consommation et la restitution électriques.
- Quel que soit le bâtiment ou l'installation, il faut tenir compte des frais d'électricité dus à la puissance électrique réactive.

Augmentation du prix de l'énergie

Les prévisions concernant de futures augmentations du prix de l'énergie doivent être traitées avec précaution. C'est pourquoi RAVEL a fixé une fourchette du renchérissement (tableau 54). Pour un calcul concret, spécifique à chaque cas, le taux de renchérissement sera choisi d'entente avec le mandant. Il est important de garder le même taux de renchérissement (minimal, moyen ou maximal) pour tous les agents énergétiques, afin d'éviter toute distorsion.

Frais d'exploitation

Sous cette appellation sont compris tous les frais annuels autres que les frais de capital ou d'énergie (figure 56) :

- frais d'entretien de l'installation de couplage chaleur-force selon contrat de service ;
- frais d'entretien de l'installation de la chaudière d'appoint et d'autres composants de l'installation (ramoneur, nettoyage de la citerne, service du brûleur, etc.) ;
- service ;
- assurances (pour autant qu'elles ne figurent pas dans le contrat d'entretien) ;
- frais administratifs.

Les frais d'exploitation des installations de couplage chaleur-force dépendent en premier lieu des heures de fonctionnement et en second lieu de l'énergie électrique ou mécanique produite. Les frais fixes (entretien, nettoyage et autres) ne jouent qu'un rôle secondaire.

 Exemple, 5^e partie Durée d'amortissement 20 ans Renchérissment (cf. tabl. 54): moyen Taux d'intérêt 6%	Base	Taux	Frais annuels durant la 1^{re} année	Facteur moyen	Frais annuels moyens sur la durée d'amortissement
Frais de capitalisation	Investissements	Annuités			
Durée d'utilisation 15 ans	193'000 Fr.	0,103	19'900 Fr./a	—	19'900 Fr./a
Durée d'utilisation 20 ans	892'000 Fr.	0,087	77'600 Fr./a	—	77'600 Fr./a
Durée d'utilisation 25 ans	77'000 Fr.	0,078	6'000 Fr./a	—	6'000 Fr./a
Durée d'utilisation 30 ans	83'000 Fr.	0,073	6'100 Fr./a	—	6'100 Fr./a
Durée d'utilisation 40 ans	44'000 Fr.	0,066	2'900 Fr./a	—	2'900 Fr./a
Durée d'utilisation 50 ans	163'000 Fr.	0,063	10'200 Fr./a	—	10'200 Fr./a
Total frais de capitalisation	1'452'000 Fr.		122'700 Fr./a		122'700 Fr./a
Frais énergétiques	Données énerg.	Taux			
CCFC à gaz					
– Taxe de base	—	0 Fr.	0 Fr./a	1,663	0 Fr./a
– Taxe de puissance	780 kW	8,3 Fr./kW	6'500 Fr./a	1,663	10'8'00 Fr./a
– Prix de l'énergie hiver	2'820 MWh	3,5 ct/kWh	98'700 Fr./a	1,663	164'100 Fr./a
– Prix de l'énergie été	610 MWh	2,3 ct/kWh	14'000 Fr./a	1,663	23'300 Fr./a
Chaudière à gaz					
– Taxe de base	—	0 Fr.	0 Fr./a	1,663	0 Fr./a
– Taxe de puissance	1'530 kW	8,3 Fr./kW	12'700 Fr./a	1,663	21'100 Fr./a
– Prix de l'énergie hiver	690 MWh	3,5 ct/kWh	24'200 Fr./a	1,663	40'200 Fr./a
– Prix de l'énergie été	30 MWh	2,3 ct/kWh	700 Fr./a	1,663	1'100 Fr./a
Huile de chauffage	9,3 t	400 Fr./t	3'700 Fr./a	1,744	6'500 Fr./a
Achat d'électricité (centrale)					
– Taxe de base	—	0 Fr.	0 Fr./a	1,581	0 Fr./a
– Puissance	0 kW	12,2 Fr./kW	0 Fr./a	1,581	0 Fr./a
– Hiver haut tarif	5,8 MWh	15,9 ct/kWh	900 Fr./a	1,581	1'500 Fr./a
– Hiver bas tarif	1,3 MWh	6,8 ct/kWh	100 Fr./a	1,581	100 Fr./a
– Été haut tarif	0,5 MWh	15,9 ct/kWh	100 Fr./a	1,581	100 Fr./a
– Été bas tarif	0,1 MWh	6,8 ct/kWh	0 Fr./a	1,581	0 Fr./a
Total frais énergétiques			161'600 Fr./a		268'800 Fr./a
Frais d'exploitation					
Fixes, installation CCF	—	—	5'000 Fr./a	1,581	7'900 Fr./a
Variables, installation CCF	1'100 MWh	3,2 ct/kWh	35'200 Fr./a	1,581	55'700 Fr./a
Fixes autres installations	—	—	16'100 Fr./a	1,581	25'500 Fr./a
Total frais d'exploitations			56'300 Fr./a		89'100 Fr./a
Total des dépenses			340'600 Fr./a		480'600 Fr./a
Revenus de la production électrique					
Besoins propres					
– Puissance	— kW	0 Fr./kW	0 Fr./a	1,581	0 Fr./a
– Hiver haut tarif	350 MWh	15,9 ct/kWh	55'700 Fr./a	1,581	88'000 Fr./a
– Hiver bas tarif	150 MWh	6,8 ct/kWh	10'200 Fr./a	1,581	16'100 Fr./a
– Été haut tarif	70 MWh	15,9 ct/kWh	11'100 Fr./a	1,581	17'600 Fr./a
– Été bas tarif	30 MWh	6,8 ct/kWh	2'000 Fr./a	1,581	3'200 Fr./a
Restitution					
– hiver tarif de pointe	80 MWh	25 ct/kWh	20'000 Fr./a	1,663	33'300 Fr./a
– Hiver haut tarif	200 MWh	19 ct/kWh	38'000 Fr./a	1,663	63'200 Fr./a
– Hiver bas tarif	130 MWh	11 ct/kWh	14'300 Fr./a	1,663	23'800 Fr./a
– Été tarif de pointe	20 MWh	19 ct/kWh	3'800 Fr./a	1,663	6'300 Fr./a
– Été haut tarif	50 MWh	11 ct/kWh	5'500 Fr./a	1,663	9'100 Fr./a
– Été bas tarif	20 MWh	7 ct/kWh	1'400 Fr./a	1,663	2'300 Fr./a
Total revenus de la prod. électrique			162'000 Fr./a		262'900 Fr./a
Prix de revient de la chaleur			178'600 Fr./a		217'700 Fr./a
Prix de revient spéc. de la chaleur Production de chaleur: 2750 MWh/a			6,5 ct/kWh		7,9 ct/kWh

Tableau 57: Exemple, 5^e partie – tableau pour le calcul du prix de revient de la chaleur.

Prix de revient spécifique de la chaleur

Le prix de revient spécifique de la chaleur est défini comme suit :

$$\frac{\text{Dépenses} - \text{revenus de la production d'électricité}}{\text{chaleur produite}}$$

L'unité est [ct/kWh] ou [Fr./MWh].

Encadré 58

Chaudière d'appoint – huile, gaz ou bicomcombustible ?

Selon l'importance du bâtiment, des tarifs énergétiques et d'autres conditions-cadre, un choix du combustible de la chaudière d'appoint est d'importance. Les avantages (+) et les inconvénients (–) sont (hypothèse : bâtiment raccordé au gaz) :

Huile de chauffage EL

- + 2^e agent énergétique
- + Possibilité de stockage
- + Brûleur bon marché
- Local pour citerne

Gaz naturel

- + Investissements modérés (pas de citerne, brûleur bon marché)
- Un seul agent énergétique pour toute l'installation
- Tarif du gaz plus élevé car non interruptible (valable la plupart du temps aussi pour l'installation de couplage chaleur-force)

Bicomcombustible (huile/gaz)

- + 2^e agent énergétique
- + Stockage possible
- + Tarif du gaz favorable
- Local pour citerne (toutefois meilleur marché que pour l'alimentation à l'huile de chauffage)
- Investissements élevés (citerne, raccordement au gaz, brûleur onéreux)

Encadré 59

Dans les frais d'exploitation, doivent figurer les éléments suivants :

- travaux d'entretien, de service et de contrôle ;
- travaux de révision ;
- pièces de rechange et pièces usées (par exemple catalyseur) ;
- huile de lubrification et autres produits d'entretien (par exemple substance réactive pour l'épuration catalytique des gaz d'échappement) ;
- traitement de l'huile usée ;
- réparation des pannes ;
- assurances (assurance bris de machine).

La plupart des fabricants de machines offre un contrat d'entretien adaptable aux exigences de chaque exploitant.



La plupart des contrats d'installations de couplage chaleur-force excluent la révision générale ou le remplacement du moteur. La durée de vie d'une installation de couplage chaleur-force est le double de celle du moteur, c'est pourquoi il est nécessaire de prévoir des réserves financières suffisantes au remplacement du moteur (encadré 52).

L'augmentation des frais d'exploitation sera choisie selon tableau 54.

Prix de revient de la chaleur

Pour définir le prix de revient de la chaleur, tous les frais annuels doivent être connus. Le prix de revient spécifique de la chaleur se calcule selon encadré 58. Les frais annuels de la première année de fonctionnement et les frais moyens durant la période d'amortissement peuvent être évalués à l'aide du tableau 57 (5^e partie de l'exemple). Le programme « CCF-CALC » propose une présentation analogue



Un modèle de présentation du tableau prix de revient de la chaleur figure dans l'annexe de cette brochure.

3.5 Autres composants

Chaudière d'appoint

Avec un dimensionnement correct, l'installation de couplage chaleur-force ne couvre qu'une partie des besoins thermiques. Le reste est fourni par la chaudière d'appoint (encadré 59). Son dimensionnement n'a pas une influence prépondérante sur la consommation

énergétique ou sur le rendement global, car sa durée de fonctionnement est faible. En revanche, la sécurité d'approvisionnement joue un rôle beaucoup plus important et les investissements y relatifs sont d'autant plus élevés. Les règles sommaires de dimensionnement de la chaudière d'appoint sont les suivants (en % de la puissance thermique à installer du bâtiment concerné) :

- 100 % de sécurité dans l'approvisionnement en énergie thermique stipulé dans le contrat de livraison de chaleur, hôpitaux, etc. ;
- 80 à 90 % de sécurité dans l'approvisionnement en énergie thermique d'habitations, d'écoles, de bâtiments administratifs, de bâtiments de services, etc.

Dans tous les cas, la puissance totale de l'installation de couplage chaleur-force et de la chaudière d'appoint doit être supérieure ou égale à la puissance à installer. L'installation doit pouvoir fournir le 100 % des prestations, même lors de la panne ou la révision d'un module (pour des installations à plusieurs modules).

Accumulateur

Des mises en marches fréquentes nuisent à une installation de couplage chaleur-force (encadré 60). C'est pourquoi un stockage thermique doit être prévu. Son dimensionnement vise à garantir une durée de fonctionnement minimale par enclenchement d'une heure lorsque la puissance consommée est à son niveau le plus bas.



Dans le dimensionnement de l'accumulateur, il faut tenir compte des niveaux de température effectives pendant la période critique correspondante (température basse de retour de l'eau de chauffage).

Un exemple de dimensionnement de l'accumulateur est représenté à l'encadré 61. Remarquons que les calculs indiquent le volume *utile*, c'est-à-dire le volume entre les points d'enclenchement et de déclenchement. Le volume effectif de l'accumulateur doit donc être de 10 à 20 % plus grand que le volume utile.

Pendant les périodes à faible besoin thermique, l'installation de couplage chaleur-force peut fonctionner à charge partielle. Ce système a toutefois le désavantage d'abaisser le rendement, mais permet un dimensionnement de l'installation de stockage réduit et une usure de l'installation de couplage chaleur-force plus faible. Pour les moteurs à combustion, le fonctionnement à charge partielle entre 70 et 100 % de la puissance nominale est raisonnable.

Usure au démarrage

Un démarrage de l'installation de couplage chaleur-force provoque la même usure que

Moteur Otto à gaz	_____	5 h de fonctionnement
Moteur diesel	_____	5 h de fonctionnement
Turbine à gaz	_____	25 h de fonctionnement

C'est pourquoi certains fabricants ont tendance à calculer l'entretien non seulement en fonction des heures de fonctionnement, mais aussi en fonction de la fréquence des démarrages.

Encadré 60



Exemple, 6^e partie – Accumulateur

Puissance thermique du CCFC	450 kW
Charge partielle CCFC	80 à 100 %
Durée de fonctionnement	1 h
Température de charge	80 °C
Température de retour en période critique	35 °C

L'énergie stockée dans l'accumulateur Q_{AC} suivant est disponible avec une charge partielle de 80 % pendant 1 heure de fonctionnement :

$$Q_{AC} = 0,8 \cdot 450 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 360 \text{ kWh}$$

Le calcul du volume utile nécessaire de l'accumulateur V_{AC} s'effectue selon la formule :

$$V_{AC} [\text{m}^3] = 0,86 \cdot \frac{Q [\text{kWh}]}{\Delta\vartheta [\text{K}]} = 0,86 \cdot \frac{360 \text{ kWh}}{(80 - 35) \text{ K}}$$

$$V_{AC} [\text{m}^3] = 6,9 \text{ m}^3 \text{ (volume utilisable !)}$$



Le thème « Accumulateur » est traité en détail dans le cahier 3 « Pompes à chaleur », chapitre 3.4.

Encadré 61

4. Impact sur l'environnement

Emissions de CO₂ des combustibles fossiles

Huile de chauffage EL	73 kg/GJ
Gaz naturel	55 kg/GJ
Gaz liquide	65 kg/GJ

Encadré 62

4.1 Critères d'appréciation

La compatibilité avec la sauvegarde de l'environnement des installations de couplage chaleur-force doit être jugée sur différents critères. Au premier plan figurent, sans aucun doute, les considérations sur la protection de l'air. Cependant, la consommation d'énergie primaire et les émissions de CO₂ qui l'accompagnent revêtent également une grande importance.

4.2 Utilisation de l'énergie et émissions de CO₂

Les installations de couplage chaleur-force produisent non seulement de la chaleur, mais aussi de l'énergie mécanique presque exclusivement utilisée pour la production électrique. L'électricité peut être engagée dans les pompes à chaleur ou dans d'autres procédés dans le but d'économiser l'énergie fossile (amplificateur électrothermique).



Ces sujets sont décrits en détail dans la brochure 1, « Electricité et chaleur ».

Pour l'**utilisation de l'énergie**, les faits suivants sont importants dans les installations de couplage chaleur-force :

- Pour une bonne utilisation de l'énergie, un rendement global et un indice de performance électrique élevés sont d'une importance primordiale.
- Les critères de valeur de différentes formes d'énergie permettent de juger objectivement si, dans un bâtiment où est prévu une installation de couplage chaleur-force, l'intégration d'un amplificateur électrothermique (pompe à chaleur, récupération de chaleur, etc.) est souhaitable.

Les **émissions de CO₂** dépendent directement de l'utilisation de l'énergie et du choix du combustible : par unité d'énergie, l'utilisation du gaz au lieu de l'huile de chauffage EL permet de diminuer de 20 % des émissions de CO₂ (encadré 62).

4.3 Emissions de substances polluantes

CCFC à moteur à gaz et catalyseur à 3 voies

Des mesures effectuées dans des CCFC à moteur à gaz et catalyseur à trois voies ont donné les résultats suivants :

- Ils ne produisent que de faibles émissions polluantes lorsqu'ils sont réglés et exploités de façon optimale.
- Par contre, les émissions de chaque installation peuvent être très variables.

Aussi bien le fabricant que les planificateurs (trices) peuvent influencer les émissions, par exemple en appliquant les mesures ci-après :

- réduction des enclenchements par optimisation de l'accumulateur, de la commande et du réglage ;
- réglage défini du mélange air/gaz à l'enclenchement (figure 63) ;
- réduction des substances polluantes par contrôle de la tension des sondes Lambda et de la différence de température à travers le catalyseur.

Concernant chaque substance polluante, les résultats ci-dessous ont été obtenus :

- **Oxydes d'azote (NO_x)** : la réduction du monoxyde d'azote NO contenue dans les gaz d'échappement est facilement réalisable. Les taux de réduction dépassent 99%, pour autant que le catalyseur et la régulation fonctionnent correctement.
- **Monoxyde de carbone (CO)** : la conversion de CO est sensible aux influences perturbatrices (valeur Lambda mal réglée, catalyseur sous-dimensionné). Une installation dimensionnée correctement peut atteindre des taux de conversion dépassant 95%.
- **Méthane (CH₄)** : les taux de conversion du méthane se situent autour de 50%. Les émissions de méthane ne sont pas significatives. En effet, jusqu'à 100 fois plus de méthane s'échappe lors du transport de gaz naturel que ce qu'il en subsiste dans les gaz d'échappement.
- **Hydrocarbures (HC)** : les hydrocarbures à chaîne plus longue que le méthane obtiennent une meilleure conversion. Les taux de conversion pour les hydrocarbures (globalement, sans méthane), tournent autour de 80%. Par ailleurs, il est important de constater que les hydrocarbures trouvées dans les gaz d'échappement sont celles déjà contenues dans le gaz naturel. Ici aussi, les émissions de HC dans les gaz d'échappement, comparées à celles se produisant lors de la production et du transport du gaz naturel, sont minimales.

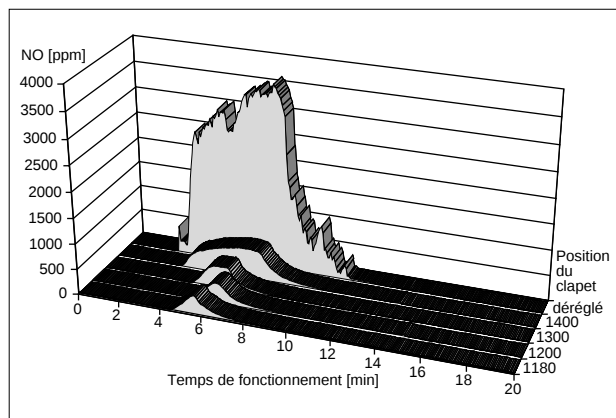


Figure 63: Les émissions au démarrage des CCFC à moteur à gaz avec catalyseur à 3 voies sont très élevées si le mélange air/gaz est dérégulé.

Réduction des substances polluantes dans les turbines à gaz

- **L'injection de vapeur, respectivement d'eau** provoque une baisse de la température de combustion, ce qui réduit les émissions d'oxydes d'azote. La puissance mécanique de la turbine augmente. L'injection de vapeur améliore le rendement mécanique, tandis que l'injection d'eau le détériore (ordre de grandeur 1% pour 1 kg d'eau/vapeur par kg de combustible).
- Dans les **chambres de combustion Low-NO_x**, l'air de combustion est mélangé au combustible dans une chambre séparée. On évite ainsi des pointes de température locales, ce qui permet une réduction des émissions d'oxydes d'azote.
- **Réduction catalytique sélective** (catalyseur SCR) avec injection d'ammoniac ou d'urée.

Encadré 64

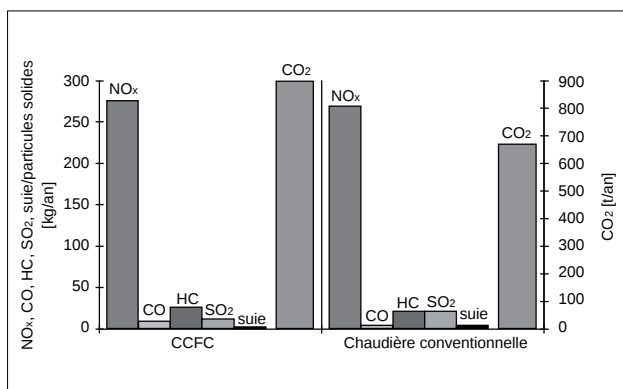
Type d'installation combustible	NO _x [g/GJ]	CO [g/GJ]	HC ^{2,3} [g/GJ]	CO ₂ [g/GJ]	SO ₂ [g/GJ]	Particules [g/GJ]
Moteur à gaz ¹ – Gaz naturel	15	45	20	55	0,5	0,1
Moteur diesel – sans SCR, cat. oxy.	1444	225	150	73	66	59
– avec SCR, cat. oxy.	32	16	8	73	66	13
Chaudière – Gaz naturel	30	50	10	55	0,5	0,1
– Huile de chauffage EL	60	20	10	73	66	0,2
Chaudière Low-NO _x – Gaz naturel	20	15	8	55	0,5	0,1
– Huile de chauffage EL	30	10	4	73	66	0,2
Turbine à gaz ⁴ – Gaz naturel	30	50	5	55	0,5	0,1

¹ Avec catalyseur trois voies en fonctionnement stationnaire après 3000 à 4000 h de fonctionnement
² Avec méthane
³ Risques différents selon combustible
⁴ Avec catalyseur SCR

Tableau 65: Taux d'émissions.

Substance polluante	Facteur d'émission	
	Gaz	Huile
NO _x	1	1
CO	0,0125	0,0125
HC	0,2	0,2
SO ₂	1	1
Particules	1	1

Tableau 66: Facteurs d'émissions.


Figure 67: Exemple, 7^e partie – Evaluation des émissions polluantes.

Turbines à gaz avec dénitrification

Le but premier recherché jusqu'ici dans le développement des turbines à gaz était l'obtention de meilleurs rendements; ceci par l'augmentation de la température d'entrée de la turbine et l'amélioration des composants (turbines, compresseurs). Les prescriptions concernant les émissions polluantes ont amené les fabricants de turbines à gaz à rechercher les solutions pour réduire les substances polluantes (encadré 64).

4.4 Valeurs comparatives

La pollution engendrée par une installation de couplage chaleur-force (CCFC avec chaudière d'appoint) est comparée ici à celle d'une installation avec chaudière conventionnelle. L'électricité produite n'est *pas* prise en considération. Cette comparaison part donc du principe que l'électricité est produite sans émissions polluantes. Ces dernières pourront être évaluées, pour autant que les agents énergétiques utilisés par le producteur thermique respectif soient multipliés par le **taux d'émission** correspondant (tableau 65).

Les substances polluantes ne présentent pas toutes le même degré de pollution; une échelle des valeurs doit donc être établie. Les valeurs limites d'émissions dictées par l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) servent d'échelle du degré de pollution des substances: plus le degré de pollution d'une substance est élevé, plus la valeur limite d'émission selon l'OPair est petite. Les **facteurs d'émission** (tableau 66) sont définis proportionnellement aux valeurs limites d'émissions de l'OPair. Le facteur d'émission pour les HC du gaz naturel a été fixé à 0,2, suite à des mesures révélant que le méthane représente l'essentiel des émissions de HC. Les deux programmes informatiques «CCF-CALC» et «BHKW» permettent de calculer les émissions de substances polluantes et de les comparer à une installation conventionnelle (le programme «BHKW» ne prend pas en compte les facteurs d'émission). La figure 67 présente les émissions polluantes calculées avec le programme «CCF-CALC» pour l'exemple de cas.

5. Planification

5.1 Déroulement du projet

Ce chapitre traitera les points importants de la planification de CCFC avec moteur à combustion. Ces données sont également valables pour les CCFC à turbine à gaz. En principe, le déroulement de la planification pour l'installation technique du bâtiment est réglé par la norme SIA 108. La définition du but et les prestations de l'ingénieur y sont décrites.



Certains aspects importants ne sont que partiellement couverts par la norme SIA 108. A ce propos, on peut consulter le cahier 1, chapitre 6, « Contrôle de qualité dans le déroulement de la planification ».

Pour des raisons économiques, il n'est pas seulement important de savoir qu'une installation de CCF fonctionne, mais aussi comment elle fonctionne. C'est pourquoi une méthode différente s'impose à chaque étape de la planification.

Etude préalable

L'exploitant potentiel d'une installation de CCFC n'a pas à supporter le coût élevé d'une étude pour savoir si un CCFC peut être réalisé dans son bâtiment. En un quart d'heure et par simple coup de téléphone, une réponse à ce problème peut être donnée. On peut déterminer au moyen de ces éclaircissements préalables si l'intégration d'une installation de CCFC est une solution judicieuse. La majeure partie des points énumérés à l'encadré 68 étant acquise, les conditions-cadre sont favorables à la mise en place d'une installation de CCFC.

Etude de faisabilité

Les conditions-cadre du chapitre précédent étant remplies, la prochaine étape est l'étude de faisabilité (encadré 69). Selon les dimensions et la complexité du projet, on doit s'attendre à des frais d'honoraires de Fr. 5000.- à Fr. 15 000.-. L'étude de faisabilité apporte au maître de l'ouvrage toutes les données indispensables à une décision de fond sur la réalisation d'un CCFC dans un bâtiment.

Concept global avec cahier des charges

Lorsque la décision d'opter pour une installation de CCF est prise, il s'agit de rechercher dans le cadre d'un concept énergétique global, une solution adaptée aux

Etude préalable

Les conditions-cadre favorables à la réalisation d'une installation de CCFC sont:

- La centrale de chauffage dispose d'un raccordement au gaz (gaz naturel ou gaz liquide) ou un tel raccordement peut être réalisé à peu de frais
- Des locaux sont disponibles. Pour un CCFC d'une puissance électrique de 150 à 200 kW, il faut disposer par exemple d'un local d'une surface minimale de 35 m² et d'une hauteur de 3 à 3,5 m (sans compter le volume de la chaudière et de l'accumulateur). Cette place est d'ailleurs souvent récupérée par le démontage d'une chaudière existante.
- Le système de distribution de chaleur a une température de départ maximale de 80 à 85°C – plus celle-ci est basse, mieux c'est. Pour des températures de 110 à 125°C, on choisira un CCFC modifié. Si l'on peut établir avec certitude que la température de retour ne dépasse pas 70°C, la température de départ peut être augmentée à l'aide d'une chaudière avec branchée en série.
- La puissance thermique installée dans un bâtiment (et au besoin dans les bâtiments pouvant s'y raccorder ultérieurement) dépasse 1000 kW, ce qui correspond à une consommation thermique annuelle d'environ 2000 MWh.
- Longue période de besoins thermiques.
- Besoins propres en électricité élevés.
- Tarifs électriques élevés d'achat et, le cas échéant, de restitution.
- Disponibilité financière pour les investissements correspondants.

Encadré 68

Etude de faisabilité

- Données de base:
 - Données sur le bâtiment (puissance thermique à installer, besoin thermique annuel, besoin en électricité).
 - Tarifs de l'énergie.
 - Paramètres de rentabilité.
- Concept de l'installation.
- Dimensionnement sommaire de l'installation de CCF.
- Investissement (marge d'erreur $\pm 20\%$).
- Rentabilité (prix de revient de l'électricité).
- Eventuellement aspects liés à l'environnement.
- Conseils pour la suite de la procédure.

Encadré 69

Planification et exécution

- Données de base actualisées suite à l'étude de faisabilité et au concept énergétique global.
- Dimensionnement détaillé de l'installation de couplage chaleur-force.
- Installations hydrauliques :
 - Schéma de principe (avec dimensionnement).
 - Description des fonctions de commande/régulation.
- Raccordements électriques :
 - Discussion préalable avec la centrale électrique.
 - Schéma de principe (avec dimensionnement).
- Alimentation en gaz (discussion préalable avec l'entreprise de distribution).
- Demandes, autorisations :
 - Demande de construction.
 - Demande de raccordement au réseau électrique.
 - Dépôt de plans à l'attention de l'inspecteur du courant fort.
- Projet et plans d'exécution.

Encadré 70

problèmes posés. Les exigences du concept énergétique global sont alors inscrites dans un cahier des charges qui servira de base au contrôle de qualité.

Planification et exécution

Les prestations des ingénieurs pour la planification et l'exécution sont définies globalement dans la norme SIA 108. Les points mentionnés à l'encadré 70 devront faire l'objet d'une attention toute particulière.

Optimisation de l'exploitation et contrôle des résultats

Après les étapes de mise en service et de réception de l'installation, viennent les phases d'optimisation de l'exploitation et de contrôle des résultats, pour déterminer avec certitude, si l'installation fonctionne réellement selon le cahier des charges.



Pour de plus amples informations, consulter le chapitre 6.4 « Optimisation de l'exploitation et contrôle des résultats ».

5.2 Module CCFC

Centrale de chauffage

Un couplage chaleur-force compact est le plus souvent intégré à une installation de production de chaleur existante. Les installations de grande puissance (par exemple turbine à gaz) exigent un volume important et il faut s'assurer que l'espace exigé est disponible. S'il est impossible de placer le CCFC et la chaudière d'appoint dans le même local, on peut les installer, par exemple, dans deux pièces voisines.

Emplacement

Dans le choix de l'emplacement, les espaces minimums requis par le fabricant de l'installation sont à observer de manière stricte. Ces espaces sont calculés de façon à garantir une bonne accessibilité. Si les volumes disponibles sont restreints, on peut renoncer par exemple à ce que les 4 parois latérales soient ouvrables ou démontables. Des indications complémentaires pour la réalisation d'une installation composée de deux modules sont données à l'encadré 71.

Protection contre le bruit

Pour définir les mesures de protection contre le bruit et le dimensionnement des éléments s'y rapportant, il est préférable de faire appel à un spécialiste en acoustique, surtout dans des cas avec des exigences élevées. Ces exigences figureront dans le cahier des charges de l'installation de CCFC et le respect des valeurs sera examiné lors de la réception de l'installation.

Les amortisseurs de bruit pour l'air neuf, l'air rejeté et les gaz d'échappement sont à dimensionner de façon à respecter les valeurs limites d'émissions aux fenêtres les plus proches ou au plus proche emplacement accessible au public (Ordonnance sur la protection contre le bruit).

Des fondations flottantes massives réduisent la transmission des vibrations du moteur au corps du bâtiment. Si cette réalisation n'est pas possible pour des raisons de statique ou si le local est trop bas, il faut alors absolument faire appel à un spécialiste en acoustique. Une double séparation acoustique (figure 72) ainsi qu'un montage soigneux sont indispensables pour éviter la transmission de vibrations au bâtiment.

Alimentation au gaz naturel

Si le bâtiment est déjà raccordé au gaz, il faut se renseigner auprès de l'entreprise de distribution de gaz pour déterminer si le raccordement est suffisant pour l'installation de CCFC. En cas de conditions tarifaires différentes pour le CCFC et la chaudière d'appoint, des compteurs à gaz séparés sont nécessaires.

Alimentation au propane

Le propane est livré sous forme liquide, dans des citernes spéciales, à une pression d'environ 8 bar. Pour les installations au propane, les points suivants sont à relever :

- Les citernes à l'air libre peuvent être soit louées, soit achetées.
- Les citernes enterrées doivent être achetées.
- Le propane étant plus lourd que l'air, il faut, en cas de problème (fuite de gaz), éviter à tout prix la formation d'un lac de propane.
- Les citernes à partir d'une capacité de 20 tonnes sont soumises à l'Ordonnance contre les accidents majeurs. Il est recommandé de suivre les conseils des spécialistes des entreprises de gaz liquide. Une série d'ouvrages y relatifs est proposée à l'encadré 73.

Installations composées de 2 modules

Afin d'établir si la puissance de l'installation de CCFC doit être produite par un ou deux modules, il est nécessaire de comparer en détail les deux systèmes. Les avantages (+) et les inconvénients (–) des installations composées de 2 modules sont les suivants :

- + La production de chaleur suit mieux les besoins.
- + Possibilité de réduire le volume de l'accumulateur.
- + Plus grande disponibilité.
- Investissements plus importants vu le prix unitaire élevé des modules.
- Besoin d'espace plus grand pour les modules (en revanche moins grand pour l'accumulateur!).
- Commande maîtresse plus coûteuse.



Si l'on dispose d'un espace suffisant, la réalisation d'une capsule anti-bruit par module est recommandée. Une capsule commune est possible, mais on constate en pratique que, lors de la révision d'un module, l'autre module doit aussi être déclenché à cause du bruit alors qu'il pourrait très bien continuer de fonctionner.

Encadré 71

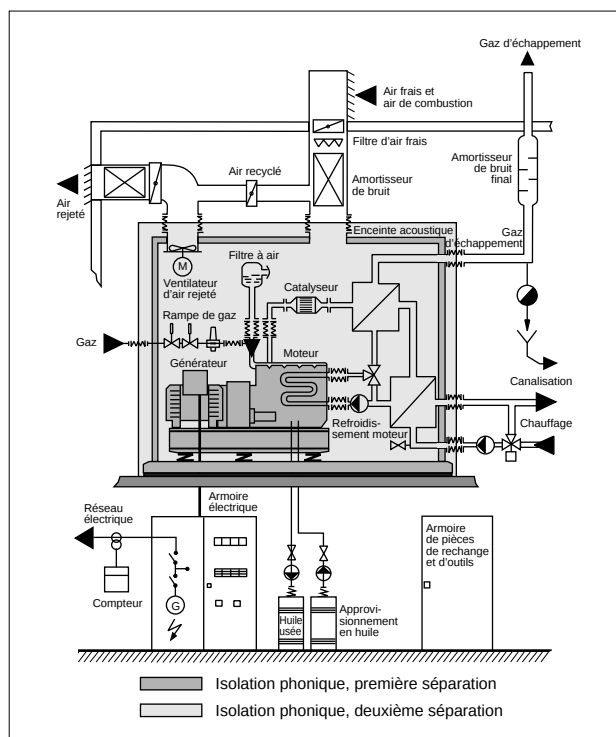


Figure 72: Isolation phonique efficace par double séparation acoustique.

Bibliographie sur le thème du gaz liquide



Directives concernant les gaz liquéfiés, 1^{re} partie: Récipients, stockage, transvasement et remplissage. Berne: Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail (RFST), 1990. (Source: CNA, Département sécurité du travail, case postale, 6002 Lucerne).



Directives concernant les gaz liquéfiés, 2^e partie: Utilisation domestique, artisanale et industrielle des gaz liquéfiés. (Source: CNA, Département sécurité du travail, case postale, 6002 Lucerne).



Zones-ex. Principes de prévention des explosions. Lucerne: CNA 1993. (Source: CNA, Département sécurité du travail, case postale, 6002 Lucerne).



Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen. Zürich: Basler + Hofmann AG, 1992. (Source: Basler + Hofmann AG, Forchstrasse 395, 8029 Zurich).

Encadré 73

Alimentation à l'huile de chauffage

Les installations de citernes pour CCFC à moteur diesel sont soumises aux mêmes prescriptions et recommandations que les chaudières. Une petite citerne posée à proximité de l'installation de CCFC doit être dimensionnée pour assurer un fonctionnement de 5 à 10 h.

Lubrification

La consommation d'huile de lubrification d'une installation de CCFC s'élève de 0,4 à 0,6 g par kWh d'électricité produite. Le circuit de lubrification doit être dimensionné pour assurer, sans remplissage, 14 jours de lubrification au minimum. Une citerne avec une capacité d'une année et un bac pour l'huile usée occasionnent des investissements supplémentaires mais facilitent l'entretien. L'emplacement idéal de la citerne d'huile de lubrification se situe à 2-3 m au-dessus du moteur, de sorte que l'huile puisse s'écouler dans le moteur sans l'aide d'une pompe. Selon les exigences de l'exploitant, on peut obtenir des systèmes simples ou sophistiqués, manuels ou automatiques, de remplissage et de vidange de l'huile de lubrification.

Installation de ventilation

L'installation de ventilation remplit deux fonctions:

- Aération minimale pour un CCFC à moteur à gaz, afin de rester, en cas de fuite de gaz, en deçà de la limite d'inflammabilité du mélange air/gaz (encadré 74).
- Evacuation de la chaleur de rayonnement du moteur et des pertes du générateur.

Lors du dimensionnement, il faut veiller aux points suivants:

- Si le système de sécurité et de régulation du gaz («rampe à gaz») est situé dans la capsule de protection contre le bruit, seule la capsule sera à équiper d'une aération minimale.
- A l'arrêt, l'ouverture des clapets d'aération suffit à assurer le renouvellement d'air par convection naturelle.
- Lors de la récupération des pertes par rayonnement, la quantité d'air peut être réglée sur le minimum de sécurité. Il faut souligner ici qu'en cas de panne du système de récupération de chaleur (par exemple de la pompe à chaleur), le fonctionnement du CCFC doit être interrompu.
- Si les pertes par rayonnement sont évacuées au moyen de l'installation de ventilation, les températures lors du fonctionnement de l'installation sont déterminantes (par exemple +15°C de température extérieure, si le CCFC ne fonctionne que durant la saison de chauffage).

- En pulsant l'air soufflé dans la partie la plus sensible à la température (générateur) et en l'aspirant vers le moteur, on peut augmenter l'élévation de température de l'air, et ainsi diminuer la quantité d'air et la puissance du ventilateur.
- Une trop grande chute de température dans la capsule (pertes de chaleur élevées et risque de gel) peut être évitée par un mélange d'air recyclé ou par réduction du débit d'air. Le renouvellement d'air doit toutefois respecter les normes techniques de sécurité.

Taux de renouvellement des CCFC à moteur à gaz

Les mêmes prescriptions que pour une chaudière à gaz sont valables:

Taux de renouvellement à l'arrêt _____ convectif

Taux de renouvellement minimal en fonctionnement _____ 3 x par h

Encadré 74

5.3 Raccordement des installations hydrauliques



Cahier 1, chapitre 4 « Principes de base pour la planification », chapitre 5 « Technique de raccordement ».



Cahier 5 « Raccordements standards ».

Différences par rapport à une installation conventionnelle

Le raccordement hydraulique d'une installation de couplage chaleur-force pose des exigences particulières, fondamentalement différentes de celles d'une installation conventionnelle de production thermique avec chaudière.

Si l'on souhaite que le CCFC ait une longue durée de vie et des frais d'exploitation peu élevés, il faut l'enclencher le moins souvent possible. Etant donné qu'un CCFC fonctionne en général à puissance constante, un **accumulateur** est à intégrer au système. Il permettra d'assurer une durée de fonctionnement d'au minimum une heure par enclenchement. Cette exigence est remplie lorsque la différence de température entre le départ et le retour de l'eau de chauffage est grande. Ceci n'est possible qu'avec un raccordement hydraulique correct.

Pour augmenter le rendement global, le CCFC peut être équipé d'une **pompe à chaleur à air recyclé** pour la récupération des pertes par de rayonnement et/ou d'un **échangeur thermique de condensation des gaz d'échappement**. Les deux systèmes ne fonctionnent toutefois que selon des règles bien établies, à savoir lorsque l'eau de chauffage a une température de retour au CCF suffisamment basse.

Adaptation de raccords existants



Attention lors de la modification d'un distributeur à injection avec vannes trois voies en un distributeur à injection avec vannes deux voies !

Le maintien d'une autorité suffisante de la vanne implique généralement que le changement d'une vanne trois voies par une vanne deux voies *ne peut être résolu uniquement par la mise hors service du by-pass*. Dans ce cas l'autorité de la vanne est totalement insuffisante. Une autorité suffisante de la vanne n'est obtenue que si la chute de pression à travers la vanne à débit nominal est égale à celle de la section à débit variable du circuit primaire. Cette dernière section provoque une plus grande perte de charge avec une vanne deux voies qu'avec une vanne trois voies.



Attention à la perte de charge admissible sur le circuit primaire pour les distributeurs à mélange sans pompe primaire !

Un distributeur à mélange sans pompe primaire ne peut fonctionner correctement que lorsque la perte de charge du côté primaire est faible, sinon les groupes s'influencent réciproquement. La règle sommaire en vigueur est la suivante : la perte de charge tolérée du côté primaire (à débit nominal) ne doit pas dépasser 20 % de la hauteur manométrique de la pompe du plus petit groupe.

Encadré 75

Distribution de la chaleur

Pour assurer une température de retour de chauffage la plus basse possible, le schéma hydraulique de la distribution de chaleur doit être minutieusement étudié. Une analyse détaillée s'impose, surtout dans les systèmes hydrauliques existants. Il ne suffit pas pour cela de contrôler seulement le schéma hydraulique de la centrale de chauffage (distributeur principal). Il faut encore examiner si, en dehors de la centrale de chauffage (par exemple dans les sous-stations), des circuits non adaptés existent. Sont appropriés :

- distributeurs à injection avec vannes 2 voies et pompe primaire asservie à la différence de pression ;
- distributeurs à mélange sans pompe primaire ;
- groupes en injection avec vannes 2 voies ;
- groupes en mélange sans by-pass primaire.

Sont à éviter :

- distributeurs à injection avec vannes 3 voies ;
- distributeurs à mélange avec pompe primaire (appelés : « distributeurs sans pression ») ;
- groupes en injection avec vannes 3 voies ;
- groupes en mélange avec by-pass primaire ;
- groupes en dérivation ;
- régulateurs à différence de pression fonctionnant selon le principe du flux excédentaire ;
- by-pass de toutes sortes qui dérivent sans contrôle l'eau de chauffage du départ vers le retour ;
- de plus, les distributeurs à large surface soudée entre le départ et le retour sont à éviter, car ici aussi la température de retour augmente sans aucun contrôle.

Quelques indications importantes pour l'adaptation de raccords existants figurent à l'encadré 75.

Branchement parallèle

Le branchement parallèle (figure 76) est adapté à la plupart des cas. Le CCFC et la chaudière sont alors disposés parallèlement à l'accumulateur et leur température de fonctionnement est la même.

Avantages :

- Commande et régulation aisément maîtrisables.
- Pour la chaudière, une durée minimale de fonctionnement par enclenchement est garantie.

Inconvénients :

- La chaudière charge également l'accumulateur ; lorsque la température extérieure est proche du point de bivalence, donc que les besoins thermiques diminuent ; il en résulte une perte de durée de fonctionnement pour le CCFC.

- Si la température de déclenchement de la chaudière est trop élevée, le CCFC peut tomber en panne.

Branchement semi-parallèle

Le branchement semi-parallèle peut servir de variante au branchement parallèle (figure 77). La pose de 2 accumulateurs n'occasionne pas de frais supplémentaires par rapport au branchement parallèle. **Avantage** : si la température de déclenchement de la chaudière est trop élevée, seul un accumulateur est chargé.

Branchement série

Avec le branchement série (figure 78), seul le CCFC travaille avec l'accumulateur. La chaudière est reliée en série sur le départ du chauffage. Ce système offre les **avantages** suivants :

- Avec la chaudière, la température principale de départ peut être réglée plus haut que la température de départ du CCFC ; ceci sous réserve, bien entendu, que la température de retour ne dépasse pas la valeur admise pour le CCFC.
- Pas de perte de durée de fonctionnement pour le CCFC par besoin thermique décroissant près du point de bivalence.

Par contre, les **inconvénients** de ce système sont :

- Exigences techniques plus grandes que pour le branchement parallèle sur le plan de l'hydraulique, de la commande et de la régulation.
- Courte durée de fonctionnement de la chaudière lors de températures extérieures autour du point de bivalence.

Accumulateur

L'accumulateur garantit une durée de fonctionnement minimale du CCFC et sert de découplage hydraulique entre producteurs et consommateurs thermiques. De plus, il est utilisé pour la commande principale des producteurs thermiques. Cela permet une bonne stratification qui peut être maintenue si les **principes de base du dimensionnement** suivants sont respectés :

- Rapport hauteur/diamètre plus grand que 2,5.
- Vitesses réduites d'entrée et de sortie (c'est-à-dire grandes sections de raccordement).
- Installation d'un système de distribution régulière de l'eau entrant (tuyau à trous, tôle perforée etc.).
- Isoler minutieusement tous les raccordements et bien appliquer l'isolation thermique (évite une déstratification par convection à l'intérieur de l'accumulateur).

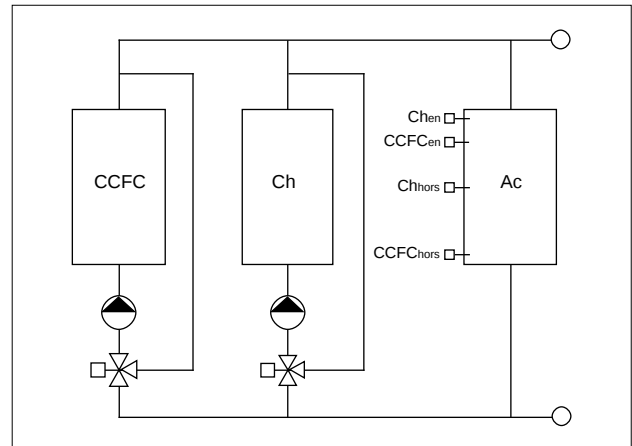


Figure 76: Branchement parallèle.

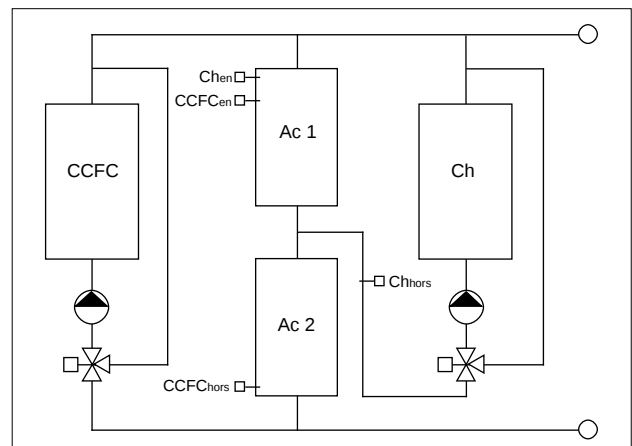


Figure 77: Branchement semi-parallèle.

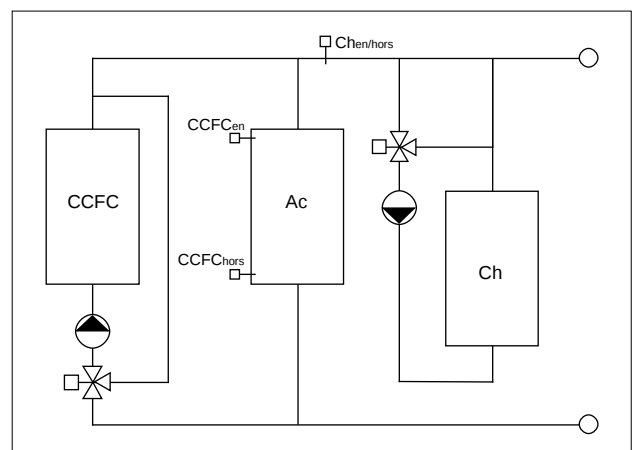


Figure 78: Branchement série.

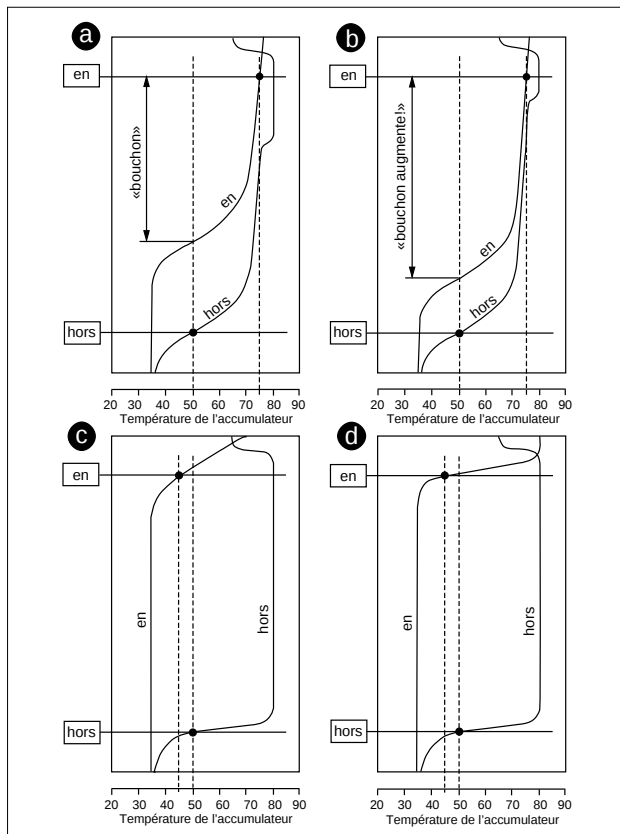


Figure 79: Régler incorrect (a, b) et réglage correct (c, d) des valeurs d'enclenchement et de déclenchement (cf. texte).

Règles d'ajustement des valeurs d'enclenchement et de déclenchement

Pour que le « bouchon » décrit à la figure 79 ne se forme pas, une première règle, est à respecter :

$$\vartheta_{en} \leq \vartheta_{décl}$$

La température de déclenchement $\vartheta_{décl}$ est limitée par la température maximale d'entrée du CCFC $\vartheta_{CCFC.E.MAX}$ (spécialement pour les pompes à chaleur à air recyclé), ce qui donne :

$$\vartheta_{décl} \leq \vartheta_{CCFC.E.MAX}$$

Pour être certain d'éviter, du côté de l'utilisation thermique, un « passage vide » au niveau de la température de retour, la température d'enclenchement ϑ_{en} doit s'élever au moins au niveau de la température maximale de retour $\vartheta_{ret. max}$. Cela donne de nouveau :

$$\vartheta_{en} \geq \vartheta_{ret. max}$$

Dans le cas le plus défavorable, une température de départ relativement basse, à peine au-dessus de ϑ_{en} peut se présenter. Ceci n'a normalement pas d'influence négative, étant donné que ce cas se présente rarement dans un fonctionnement normal (la prudence est toutefois de mise dans la ventilation sans RC et dans le chauffage de l'eau sanitaire).

Le passage de la zone chaude de l'eau du départ (par exemple 80°C) à la zone froide du retour (par exemple 50°C) ne peut pas s'effectuer brusquement dans un accumulateur partiellement chargé. Entre ces deux zones se forme une **zone de mélange** plus ou moins grande, dans laquelle la température passe de manière régulière de la température de la zone chaude à la température de la zone froide. Meilleure est la construction de l'accumulateur, plus la zone de mélange est petite.

Valeurs d'enclenchement et de déclenchement

Les valeurs d'enclenchement et de déclenchement d'un CCFC sont souvent fixées selon des **critères inexacts** :

- ENCLENCHEMENT, lorsque la température de l'accumulateur est plus basse que sa température de charge, par exemple $\vartheta_{en} = 75^\circ\text{C}$.
- DÉCLENCHEMENT, lorsque la température de l'accumulateur dépasse la température d'entrée admise du CCFC, par exemple $\vartheta_{décl} = 50^\circ\text{C}$.

On constate toutefois qu'une petite quantité d'eau (« bouchon ») dont la température se situe entre 50°C et 75°C, ne peut pas être évacuée de l'accumulateur ; cela conduit, surtout par faibles charges, aux problèmes suivants :

- Lorsque l'accumulateur partiellement rempli se refroidit juste en dessous de 75°C, le CCFC se met en marche et – selon la quantité d'eau du « bouchon » – il s'arrête de nouveau peu de temps après (figure 79a).
- Par décharge et/ou par refroidissement ultérieur, le CCFC se remet en marche pour s'arrêter à nouveau peu après (figure 79b). Le « bouchon » augmente toujours, les intervalles de temps raccourcissent et le CCFC s'enclenche et se déclenche sans arrêt !

Lorsque les **règles d'ajustement** de l'encadré 80 sont respectées, on évite les problèmes précités : l'accumulateur est chargé proprement, le « bouchon » d'eau en dessous de 45°C est évacué (figure 79c) et le volume de l'accumulateur est utilisé de façon optimale (figure 79d). L'encadré 81 présente le calcul pour l'exemple.

Raccordements séparés à l'accumulateur

Dans les cas épineux (CCFC avec pompe à chaleur à air recyclé), il est recommandé de raccorder à l'accumulateur le retour du circuit de chauffage et le départ au CCFC à une certaine distance l'un de l'autre (par exemple retour du circuit de chauffage avec tuyau à trous à

1 m de hauteur et départ au CCFC avec tuyaux dirigés vers le bas). Le volume entre ces deux raccordements conduit à un lissage de la température de l'eau allant au CCFC. Avec cette disposition, ne seront toutefois amortis que les dépassements à court terme de la température tolérée.

Fonctionnement intermittent du chauffage à distance

Dans le cas d'un chauffage à distance comprenant un nombre restreint de consommateurs (5 à 10), il est souhaitable, afin de réduire les pertes thermiques en été, que le chauffage à distance fonctionne le moins possible (1 à 2 fois par jour). Il faut savoir que dans ce mode de fonctionnement, l'eau de la conduite de départ se refroidit après chaque déclenchement de la pompe de circulation jusqu'au prochain enclenchement, si bien qu'elle ne pourra plus être utilisée pour le chauffage de l'eau (les chauffe-eau seraient froids). Ce problème peut être résolu de la façon suivante :

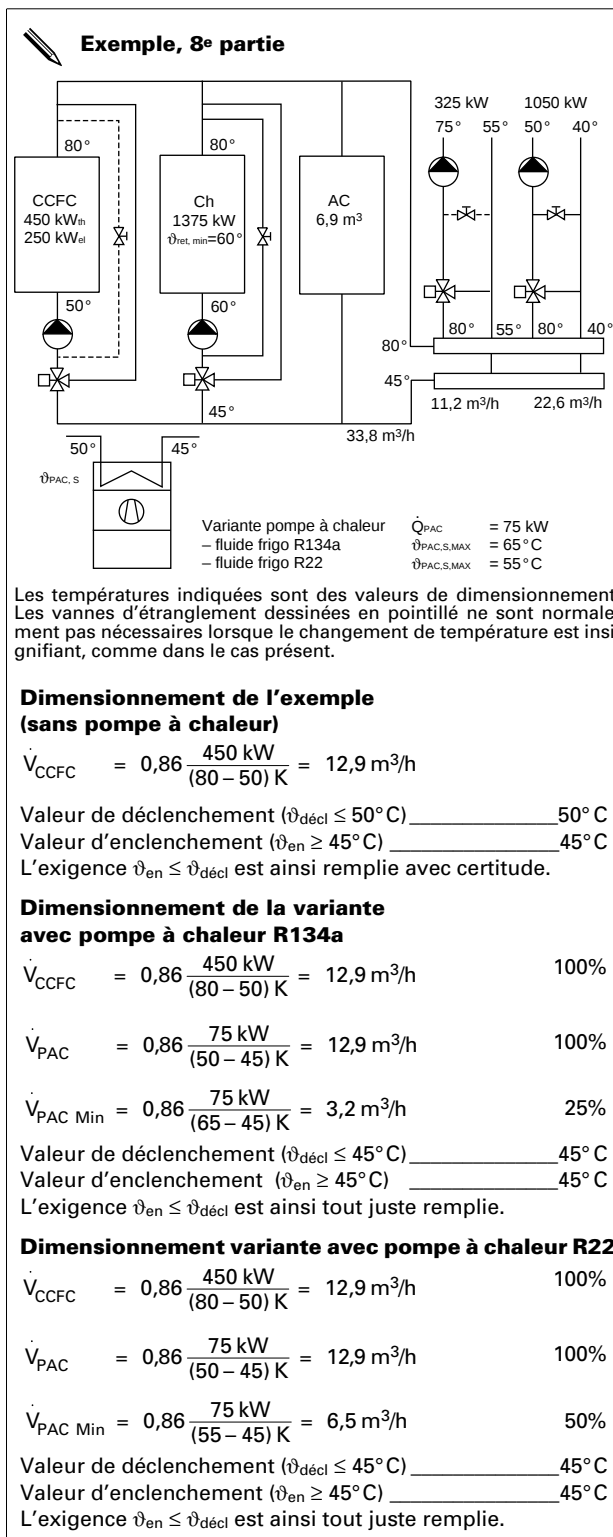
- Chauffage à bande électrique auto-réglable sur la conduite de départ (pour les petites installations).
- Evacuation de l'eau trop froide de la conduite de départ dans la conduite de retour, jusqu'à ce qu'une température de départ suffisamment élevée parvienne au chauffe-eau (attention : l'eau évacuée peut avoir une température plus élevée que celle tolérée à l'entrée de l'installation de CCFC).



Si un fonctionnement intermittent de la conduite à distance est réalisé, une quantité réduite d'eau de retour à une température élevée doit pouvoir être soutirée sans provoquer l'arrêt de l'installation (cf. chapitre « Raccordements d'accumulateurs séparés »).

Chauffage de l'eau sanitaire

Au cas où une température basse de retour (par exemple pompe à chaleur à air recyclé) s'avère indispensable, la production d'eau chaude sanitaire peut poser problème. Un registre de chauffage interne ne peut pas maintenir une température de retour à un niveau bas. Un système de charge avec un échangeur thermique externe (échangeur thermique à plaques) est alors indispensable. Dans ce cas, le dimensionnement doit être correct (par exemple 30/60°C sur le côté secondaire).



Encadré 81

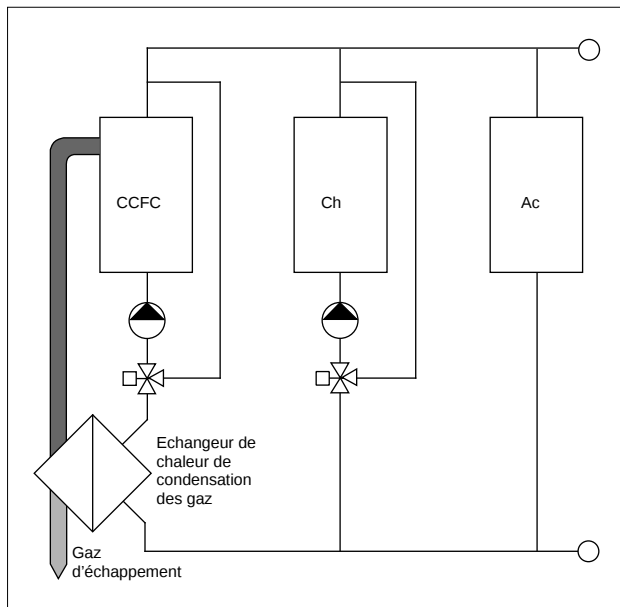


Figure 82: Condensation des gaz d'échappement.

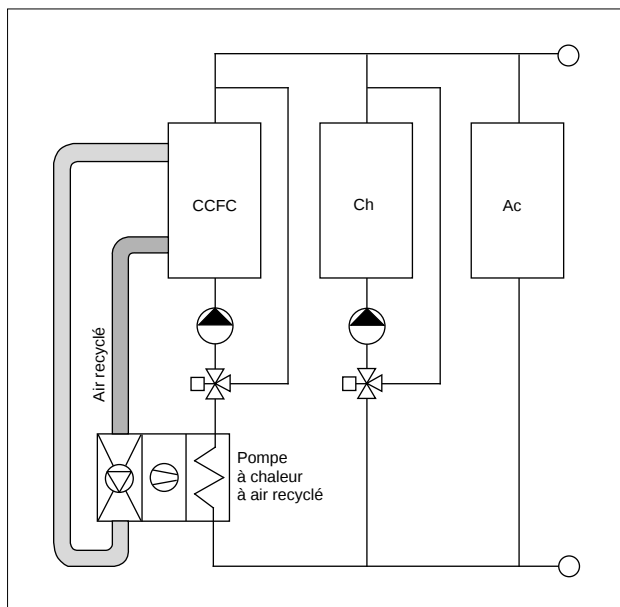


Figure 83: Pompe à chaleur à air recyclé.

Condensation des gaz d'échappement

Le raccordement de l'échangeur thermique pour la condensation des gaz d'échappement s'effectue en série avec le CCFC *avant* la vanne de régulation de charge (figure 82). Cet échange ayant lieu avec l'eau froide du retour, la récupération de chaleur est maximale.

Pompe à chaleur à air recyclé

L'installation d'une pompe à chaleur à air recyclé pour la récupération des pertes par rayonnement (figure 83) impose un maintien de la température de retour en dessous de la valeur maximale. L'enclenchement et le déclenchement exigent une attention toute particulière. Lors de l'**enclenchement** du CCFC, la pompe à chaleur ne doit être mise en marche qu'au moment où un débit minimal est assuré dans le condenseur.

Lors du **déclenchement** du CCFC, la pompe à chaleur doit fonctionner jusqu'à élimination de la chaleur résiduelle (environ 10 minutes). A cette fin, un volume de réserve correspondant doit être disponible dans la zone inférieure de l'accumulateur. Cela signifie que le détecteur de niveau inférieur ne doit pas être placé trop bas. La vanne de réglage de la charge se ferme graduellement et le débit à travers la pompe à chaleur baisse. La pompe à chaleur sera déclenchée, lorsque la pression maximale tolérée au condenseur est atteinte. Si des durées de fonctionnement ultérieur plus longues sont exigées, on peut procéder à une régulation de pression du condenseur agissant sur la vanne de réglage avec une température de charge constante la plus haute possible. En tous les cas, la limite inférieure de la température de charge est à déterminer avec précision. Des solutions compliquées avec circulateur fonctionnant à retardement et conduites séparées jusqu'à l'accumulateur ne seront appliquées qu'à titre exceptionnel.

L'encadré 81 présente non seulement l'exemple, mais également des calculs pour des variantes de pompes à chaleur à air recyclé avec fluide frigorigène R134a et R22. Comparé au R22, le fluide frigorigène R134a présente l'avantage d'une température maximale de sortie du condenseur plus élevée (65°C) et un débit minimal plus bas (25% de la valeur nominale) (R22: 55°C et 50%).

5.4 Raccordement des installations électriques

Alimentation et mesurage

Les couplages chaleur-force compacts peuvent en principe fonctionner parallèlement au réseau ou en îlot. Normalement, une installation fonctionne parallèlement au réseau ; ce n'est que lorsqu'elle est utilisée comme groupe de secours lors d'une panne de réseau qu'elle fonctionne en îlot.

Pour le fonctionnement parallèle, la manière d'injecter l'électricité dans le réseau est un problème à résoudre. Comme, la plupart du temps, l'exploitant paye plus cher l'électricité livrée par l'entreprise de distribution électrique que cette dernière ne lui ristourne pour l'électricité injectée, il couvrira donc tout d'abord ses propres besoins et n'injectera dans le réseau que le courant excédentaire, s'il y en a (figure 84). Dans ce cas, les points suivants sont à souligner :

- Ce principe de mesures ne peut être appliqué que si l'exploitant du CCFC et le consommateur représentent une seule et même personne sur le plan juridique. Si tel n'est pas le cas, l'entreprise de distribution électrique concernée devra décider si l'exploitant peut être considéré comme unique abonné et si ce dernier peut facturer aux consommateurs l'électricité qu'ils utilisent. Sinon toute l'électricité produite devra être restituée au réseau (figure 85).
- L'électricité produite par le générateur doit en tous les cas être mesurée (pour les besoins de la statistique électrique). L'entreprise de distribution décidera s'il faut installer un compteur privé ou un compteur de l'entreprise de distribution.
- Afin de détecter de manière sûre et rapide les pannes de réseau, le générateur travaillera avec un facteur de puissance ($\cos \varphi$) de 0,92 à 0,95 (inductif) (pour les générateurs synchrones et asynchrones consulter le tableau 86). Cela produit une augmentation du rapport entre la puissance réactive et la puissance active.

Dispositifs de sécurité

Lors de perturbations ou de pannes de réseau, le CCFC doit être déconnecté sans délai du réseau. S'il est équipé pour la production d'électricité de secours, il continuera de fonctionner et alimentera les consommateurs prioritaires (fonctionnement en îlot). Le générateur est relié au réseau par un disjoncteur de générateur et un disjoncteur de couplage au réseau. Afin de pouvoir travailler sans risque sur le réseau, un interrupteur doit être

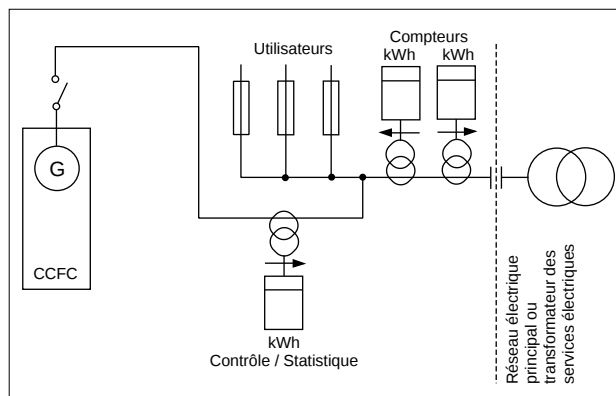


Figure 84: Couverture des besoins propres et restitution du solde au réseau.

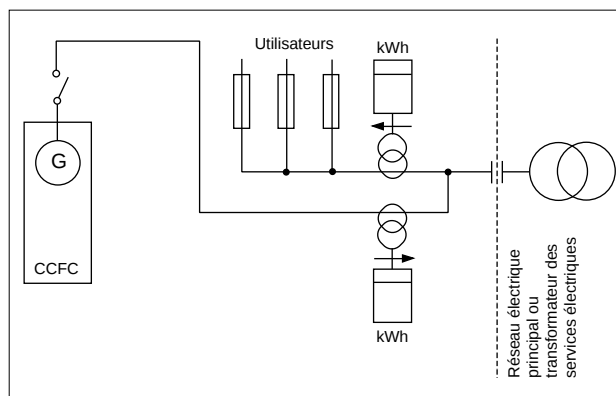


Figure 85: Restitution au réseau de la totalité de l'électricité produite.

	Générateur synchrone	Générateur asynchrone
Domaine d'utilisation	Toutes les puissances	Jusqu'à 100 kW _{el}
Facteur de puissance	Sélectionnable et réglable à volonté, capacitif ou inductif	Non compensé 0,75 à 0,8 compensé 0,92 à 0,95 inductif
Synchronisation	Nécessaire	Pas nécessaire
Fonctionnement en îlot, fonctionnement de secours	Possible	Pas possible
Rentabilité	A partir de 100 kW _{el}	Jusqu'à 100 kW _{el}

Tableau 86: Générateur synchrone et asynchrone.

Dispositifs de sécurité

Si la tension du réseau est nulle, aucun enclenchement du relais de couplage ne doit se produire (verrouillage). Un dispositif de découplage est exigé, lequel doit pouvoir déclencher très rapidement le relais de couplage :

- Surveillance des tensions triphasées à l'aide de relais de temporisation (max. et min.), ($\pm 10\%$, temps de réaction 0,1 à 0,3 seconde).
- Relais de fréquence, pour sur et sous-fréquences ($\pm 1\%$, temps de réaction 0,1 à 0,3 seconde).

Des fonctions de protection doivent agir sur l'**interrupteur du générateur** :

- Protection contre les surcharges.
- Protection contre les courts-circuits, pouvant survenir aussi bien côté réseau que côté générateur (temps de réaction $< 0,15$ seconde).
- Protection contre les surtensions.
- Protection contre la puissance de retour (facultative pour la protection de la machine, temps de réaction 0,1 à 0,3 seconde).

Suppression d'effets perturbateurs sur le réseau (mise en place d'un volant d'inertie pour atténuer les à-coups lors de l'utilisation des générateurs à pistons).

Encadré 87

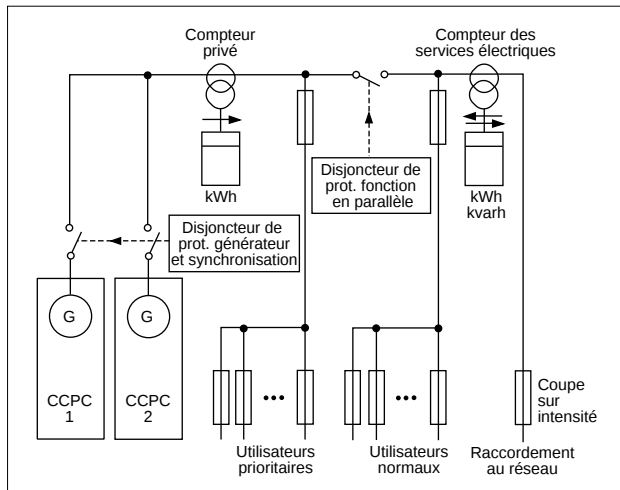


Figure 88: Schéma de principe des dispositifs de sécurité.

accessible dans la centrale de chauffe. Des mesures sont à prendre pour la protection des personnes et des objets (par exemple lors de pannes de réseau, de variations de tension et de fréquence, de brèves interruptions, d'enclenchements et de déclenchements des générateurs, de surtension, de compensation de la puissance réactive). D'autres informations sont données par les encadrés 87, 89 et à la figure 88.

Dans le cas d'une installation pas prévue comme groupe de secours, un disjoncteur suffit; le disjoncteur du générateur pouvant assumer la fonction du disjoncteur de couplage.

Production d'électricité de secours

Si une installation de CCFC est équipée pour la génération d'électricité de secours, les points suivants sont à étudier :

- L'alimentation en combustible (gaz naturel, diesel) doit être garantie en cas de panne du réseau (le cas échéant aussi en cas d'incendie).
- Le générateur doit être à même de délivrer la puissance active et réactive aux utilisateurs prioritaires. Selon les spécifications, de brèves surcharges sont tolérées (de l'ordre de 10 minutes).
- Le temps d'enclenchement du CCFC (depuis l'ordre d'enclenchement jusqu'à la production d'électricité de secours) doit correspondre aux exigences des utilisateurs prioritaires.
- Le CCFC a besoin d'une batterie de démarrage.
- Le CCFC a besoin d'un refroidissement de secours. Celui-ci sera indépendant du système de chauffage (tour de refroidissement ou refroidissement par de l'eau potable).
- Selon les exigences des utilisateurs d'électricité de secours, la synchronisation des tensions doit être assurée lors de la connexion du réseau de secours au réseau normal.

5.5 Commande et régulation

Principe de la commande

Aussi longtemps que le besoin de puissance thermique d'un bâtiment est plus élevé que la puissance du CCFC, ce dernier couvre la puissance de base; la puissance supplémentaire nécessaire étant assurée par la chaudière d'appoint (figure 90).

Lorsque le besoin de puissance thermique d'un système est plus faible que la puissance thermique du CCFC, ce dernier sera enclenché et déclenché en fonction du niveau

de charge de l'accumulateur. En introduisant d'autres critères de commande (période tarifaire, etc.), une meilleure rentabilisation de l'accumulateur est possible.

Structure de la commande

Il faut différencier systématiquement les fonctions gérées par la commande du CCFC de celles qui le sont par la commande maîtresse (aussi bien en ce qui concerne le matériel que le logiciel).

La **commande du CCFC** gère les éléments du CCFC (eau de refroidissement, catalyseur, puissance électrique, surveillance du réseau, etc.). Le planificateur (trice) fixe les conditions-cadre et le programme de régulation est réalisé par le fournisseur du CCFC.

Le choix de la **commande maîtresse** dépend de l'installation et doit être déterminé par le planificateur (trice) (cf. aussi encadré 91). Cette commande est composée des fonctions suivantes :

- ordres de mise en marche et de déclenchement du CCFC et de la chaudière (le cas échéant, commutation séquentielle de la chaudière) ;
- blocage respectivement déblocage selon les périodes tarifaires ;
- réserve pour le chauffage intensif du matin.

Les points ci-dessous sont aussi importants pour la commande du CCFC que pour la commande maîtresse :

- conception simple ;
- tâches clairement définies ;
- documentation complète ;
- modifications des paramètres de fonctionnement possibles en tous temps, sans adaptation coûteuse du logiciel.

Effets dynamiques

Des effets dynamiques imprévus (enclenchements et déclenchements répétés) se produisent surtout lorsque la puissance thermique du CCFC est soit la même, soit plus grande que le besoin de puissance thermique du bâtiment, c'est-à-dire pendant l'entre saison et en été. C'est donc déjà dans l'élaboration de la régulation, qu'il faut tenir compte des effets dynamiques prévisibles.

5.6 Instrumentation

Pour assurer le contrôle des résultats et une optimisation de l'exploitation, les **compteurs** suivants sont nécessaires :

- compteur de combustible du CCFC ;
- compteur d'heures de fonctionnement du CCFC ;
- compteur d'enclenchements du CCFC ;

Normes ASE



Concernant les répercussions sur les réseaux de production d'électricité, les normes suivantes sont en vigueur :

- ASE – EN 50006
- ASE 3600 –1
- ASE 3600 –2
- ASE 3601 –1/2/3

(Source : ASE, Seefeldstrasse 301, case postale, 8034 Zurich)

Encadré 89



Exemple, 9^e partie

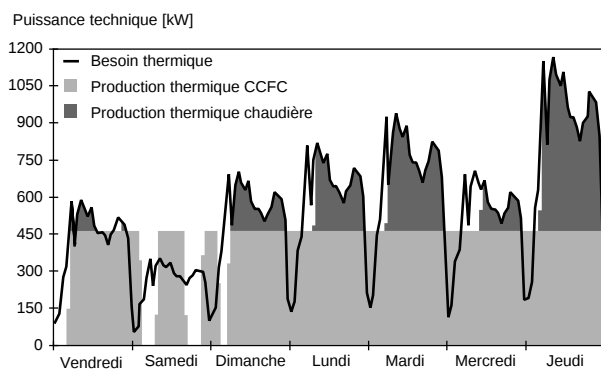


Figure 90: Exemple, 9^e partie – Profil journalier de la production et de la consommation thermique.

Gestion technique centralisée

Dans de grands bâtiments, un système de gestion technique centralisée est souvent prévu ou à disposition. Pour les installations de couplage chaleur-force, les points suivants doivent être pris en compte :

- La gestion technique centralisée prend avantageusement le rôle de commande maîtresse, de traitement et de transmission des signaux de panne et d'alarme.
- Le système de commande et régulation du CCFC doit impérativement être indépendant et conçu par le fournisseur du CCFC.
- Le système de commande et régulation du CCFC doit être équipé (ou du moins être prévu) de façon à pouvoir transmettre toutes les données importantes par interface série au système de gestion technique centralisée.

Encadré 91

- compteur électrique du CCFC ;
- compteur de chaleur du CCFC ;
- compteur de combustible de la chaudière d'appoint ;
- compteur d'heures de fonctionnement de la chaudière d'appoint ;
- compteur d'enclenchements de la chaudière d'appoint.

Pour procéder au besoin à des mesures temporaires avec enregistrement automatique des données, il ne faut poser que des compteurs à **sorties à impulsions** avec une résolution adaptée (supplément de prix insignifiant). Tous les compteurs doivent être équipés de compteurs mécaniques ou d'affichages LCD à pile (sauvegarde des données).

On renonce souvent à un **compteur de chaleur de CCFC** sous prétexte que sa résolution ne permet pas une détermination sûre du rendement. On peut rétorquer à cela, qu'un compteur de chaleur est ajustable – contrairement à un CCFC.



C'est en principe le maître de l'ouvrage qui décide – et non le planificateur (trice) ! – s'il veut renoncer ou non à la pose d'un compteur de chaleur d'un CCFC pour le contrôle des résultats et la surveillance du fonctionnement. La fonction essentielle du compteur de chaleur est le contrôle continu de la production thermique dans le cadre du bilan énergétique. Lors de la définition du rendement du CCFC basé sur la consommation de gaz, la production électrique et thermique, il faut absolument vérifier que les valeurs de mesures tiennent toujours compte des tolérances des appareils de mesures !

Les points de mesures importants *doivent* être équipés d'**instruments à affichage analogique** :

- pression d'huile du moteur ;
- température de l'eau de refroidissement du moteur ;
- température des gaz d'échappement (après l'échangeur thermique) ;
- température d'entrée et de sortie du CCFC ;
- température de retour de l'eau de chauffage avant la vanne de réglage de charge ;
- température d'entrée et de sortie de la chaudière d'appoint ;
- température de l'accumulateur (haut, milieu, bas) ;
- températures de départ et de retour de l'eau de chauffage sur les conduites principales.

Pour l'installation temporaire d'appareils de mesures, **des points de mesures** doivent être prévus (vannes 2 voies avec mesure de la différence de pression pour l'équilibrage hydraulique, pièces spéciales, doigts de gant, etc.).

6. Exploitation

6.1 Influence sur la rentabilité

Le succès d'une installation de couplage chaleur-force ne dépend pas seulement du fait que « ça chauffe » ; sa rentabilité doit aussi correspondre aux attentes. De son côté, la rentabilité est subordonnée au nombre d'heures de fonctionnement. Au-delà d'un dimensionnement précis de l'installation et d'une optimisation de l'exploitation, les interruptions du fonctionnement peuvent influencer fortement le nombre annuel d'heures de fonctionnement. Pour maintenir la durée et éviter de trop nombreux arrêts de fonctionnement, les mesures suivantes doivent être prises :

- Entretien régulier de l'installation de couplage chaleur-force.
- Réaction rapide en cas de panne ; cette opération est facilitée par des visites régulières de l'installation ou par transmission du signal de panne à un système de gestion technique centralisé, à un système de télégestion ou à un service de piquet mis sur pied par l'exploitant ou par le fournisseur de l'installation.
- Etablissement de statistiques de pannes de fonctionnement ; en cas de répétition d'une même panne, les causes seront analysées en détail.

Contrat d'entretien global ou partiel ?

Les prestations d'un **contrat global d'entretien** sont les suivantes :

- Travail et pièces de rechange pour travaux d'entretien.
- Travail et pièces de rechange pour révisions partielles.
- Par accord spécial, également travail et matériel pour révision générale ou échange du moteur.
- Catalyseur de remplacement (si disponible).
- Approvisionnement en huile de lubrification et son élimination.
- Assurance bris de machines.
- Garantie d'exploitation.

Dans le **contrat partiel d'entretien**, les prestations suivantes peuvent être *exclues* :

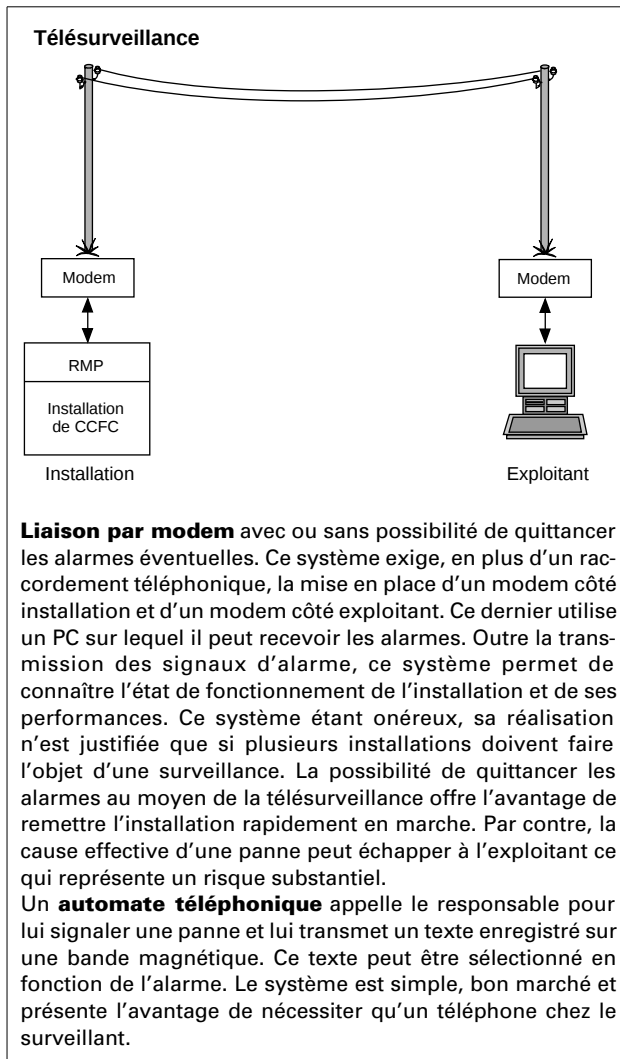
- Travail et pièces de rechange pour travaux d'entretien.
- Travail et pièces de rechange pour révision générale ou échange du moteur.
- Catalyseur de remplacement (si disponible).
- Approvisionnement en huile de lubrification et son élimination.
- Assurance bris de machines.
- Garantie d'exploitation.

Encadré 92

6.2 Entretien

Si parmi le personnel de l'entreprise concernée, personne ne possède les qualifications requises dans le domaine des moteurs et de la régulation, il est recommandé de signer un contrat d'entretien avec le fournisseur de l'installation de couplage chaleur-force. Du fait que les travaux de révision importants ne surgissent qu'après 15 000 à 30 000 heures de fonctionnement, il est souhaitable de conclure un contrat à long terme d'une durée de 5 ans minimum ou – mieux ! – de 10 ans. Le contrat d'entretien doit être signé en même temps que le contrat de vente ou le contrat d'entreprise.

Les fournisseurs d'installations de CCFC offrent un **contrat d'entretien global** basé sur un modèle de contrat établi par l'Association CCF. Le contrat d'entretien global contient toutes les prestations nécessaires au bon fonctionnement de l'installation. D'entente avec le fournisseur, la révision générale du moteur peut être incluse dans le contrat. Les fournisseurs proposent également des **contrats d'entretien partiels**, qui stipulent



Encadré 93

que certaines prestations (à inscrire dans le contrat) peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même ou, selon l'importance de la dépense, bonifiées au fournisseur. Les différences essentielles entre un contrat d'entretien global et un contrat d'entretien partiel sont citées à l'encadré 92. Dans un contrat d'entretien global, les frais d'entretien ont tendance à être plus élevés que dans un contrat d'entretien partiel avec réserves supplémentaires pour les prestations exclues; en revanche, un certain risque financier (gain ou perte) est pris par l'exploitant.

6.3 Surveillance du fonctionnement

Les couplages chaleur-force compacts sont en principe équipés pour un fonctionnement entièrement automatique. Toutefois, pour chaque installation, une personne responsable du fonctionnement doit être désignée; elle sera mise au courant par le planificateur(trice) et le fabricant de l'installation. La personne responsable connaît l'installation, participe périodiquement aux travaux de maintenance, quitte les alarmes de panne sauf celles du couplage chaleur-force lui-même. Dans le secteur industriel et des services, cette personne peut fort bien être la responsable des installations techniques du bâtiment. Dans des immeubles locatifs, la tâche peut être attribuée au concierge. Dans les installations exemptes de personnel de surveillance (par exemple centrale de chauffage à distance), un système de surveillance à distance de l'installation est recommandé. Ainsi, le responsable de l'exploitation est immédiatement informé des pannes de l'installation. Selon les exigences de l'exploitant de l'installation, différentes possibilités de surveillance à distance sont possibles (encadré 93).

6.4 Optimisation de l'exploitation et contrôle des résultats

L'optimisation de l'exploitation et le contrôle des résultats (encadré 94) représentent une partie importante du contrôle de qualité.



Cahier 1, chapitre 6 « Contrôle de qualité dans le déroulement de la planification ».



Chapitre 5.6 « Instrumentation ».

Les points suivants, qui souvent ne satisfont pas aux exigences posées sont à vérifier lors de l'optimisation de l'exploitation et le contrôle des résultats :

- commande maîtresse ;
- performances de l'installation ;

De plus, les **données affichées** doivent être saisies chaque semaine, si possible toujours au même moment :

- consommation de combustible CCFC ;
- heures de fonctionnement du CCFC ;
- nombre d'enclenchements du CCFC ;
- production électrique du CCFC ;
- production thermique du CCFC ;
- consommation de combustible de la chaudière d'appoint ;
- heures de fonctionnement de la chaudière d'appoint ;
- nombre d'enclenchements de la chaudière d'appoint ;
- température des gaz d'échappement après l'échangeur thermique.

Les mesures ci-dessous servent à vérifier le fonctionnement de la **commande maîtresse** par rapport aux données de dimensionnement :

- heures de fonctionnement mensuelles du CCFC ;
- nombre d'enclenchements mensuels du CCFC ;
- heures de fonctionnement mensuelles de la chaudière d'appoint ;
- nombre d'enclenchements mensuels de la chaudière d'appoint.

Les mesures ci-après servent à définir les **performances** de l'installation de couplage chaleur-force en regard des données de dimensionnement :

- consommation de combustible (consommation horaire) ;
- puissance électrique (production électrique par heure de fonctionnement) ;
- rendement électrique (production électrique par rapport à la consommation de combustible) ;
- rendement thermique (production thermique par rapport à la consommation de combustible) ;
- température des gaz d'échappement du CCFC.

Le mesurage de la température des gaz d'échappement sert comme indication de la puissance thermique de l'installation du couplage chaleur-force (de même que la température des fumées d'une chaudière sert au calcul du rendement technique). Une température des gaz d'échappement élevée peut être imputée à un échangeur thermique encrassé.

Optimisation de l'exploitation et contrôle des résultats

- Les éléments permettant le contrôle et les mesures indispensables à l'optimisation de l'exploitation et au contrôle des résultats sont à prévoir déjà dans la phase de conception. Ces instruments de mesure (doigts de gant, etc.) sont décrits dans la brochure « RAVEL – Schémas standards ».

 *Cahier 5 « Schémas standards ».*

- L'exploitant fera un relevé hebdomadaire (éventuellement journalier pendant une certaine période) des données d'exploitation sur une formule ad hoc. Il transmettra ces données chaque mois au planificateur(trice) qui analysera immédiatement ces valeurs, et décidera des améliorations à apporter au fonctionnement de l'installation.
- Dans des installations plus importantes et plus complexes – et toujours lorsque des problèmes surgissent – l'enregistrement automatique des données au moyen de data-logger est recommandé. Si les signaux nécessaires sont regroupés et facilement accessibles dans une armoire de commande, les dépenses se maintiendront dans des limites correctes.
- Une autre solution consiste à compléter la régulation à mémoire programmée (RMP) de l'installation de couplage chaleur-force par un module de mesures et de calcul relativement simple. Un avantage important de cette solution est la transmission des signaux d'alarme lorsque certaines valeurs limites sont dépassées. Si l'on dispose d'un système de gestion technique centralisée, l'enregistrement des données énergétiques peut être effectué par ce biais. Dans tous les cas, un accès aux valeurs d'exploitation importantes sous forme de fichier (par exemple ASCII) doit être possible pour permettre de retravailler ces valeurs dans un tableur. Il est important dans l'emploi d'une RMP ou d'un système de gestion technique centralisée que les conditions-cadre soient fixées dès le début dans le cahier des charges.
- Dans la première période de chauffage, l'installation ne fonctionne souvent pas dans des conditions normales (utilisation incomplète, séchage du bâtiment, etc.) ; dans ce cas, il est recommandé de suivre une phase d'optimisation d'exploitation avec contrôle des résultats sur deux ans.
- Les valeurs-limite (valeurs de garantie) et les valeurs-cible (valeurs de planification) pour le contrôle de qualité auront été inscrites auparavant dans un cahier des charges.

Encadré 94

Annexe

A 1 Adresses

Associations

Association suisse pour encouplage chaleur-force (association CCF)	Bodenackerstrasse 19 4410 Liestal	Tél. : 061 / 922 03 87 Fax : 061 / 921 99 25
Association suisse de l'industrie du Gaz (ASIG)	Grütlistrasse 44 8027 Zurich	Tél. : 01 / 288 31 31 Fax : 01 / 202 18 34
Union des centrales suisses d'électricité (UCS)	Bahnhofplatz 3 8023 Zurich	Tél. : 01 / 211 51 91 Fax : 01 / 221 04 42

Fournisseurs d'installations de couplage chaleur-force

Ammann Baumaschinen AG	Energiesysteme 4900 Langenthal	Tél. : 063 / 29 61 61 Fax : 063 / 22 68 03
DIMAG Dieselmotoren AG	Bachmatten 5 4435 Niederdorf	Tél. : 063 / 29 61 61 Fax : 061 / 951 24 58
Integrale Wärme Kraft AG (IWK)	Bellerivestrasse 55 8022 Zurich	Tél. : 01 / 385 24 36 Fax : 01 / 385 25 55
Sauber + Gisin AG	Wildbachstrasse 5 8340 Hinwil	Tél. : 01 / 937 22 22 Fax : 01 / 937 46 64
Saurer Thermotechnik AG	Schlossgasse 9320 Arbon	Tél. : 071 / 46 92 12 Fax : 071 / 46 67 05
Share Tech AG	Tösstalstrasse 91 8493 Saland	Tél. : 052 / 46 17 71 Fax : 052 / 46 32 86
Tuma Turbomach SA	6533 Lumino	Tél. : 092 / 29 11 13 Fax : 092 / 29 34 31

Organisations de soutien

Elektra Birseck Münchenstein (EBM)	Weidenstrasse 27 4142 Münchenstein	Tél. : 061 / 415 41 41 Fax : 061 / 415 46 46
Elektra Baselland (EBL)	Mühlemattstrasse 6 4410 Liestal	Tél. : 061 / 926 11 11 Fax : 061 / 921 15 82
Forces Motrices Bernoises (FMB)	Viktoriaplatz 2 3013 Berne	Tél. : 031 / 330 51 11 Fax : 031 / 330 56 35
Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW)	Hirschengraben 33 6002 Lucerne	Tél. : 041 / 26 51 11 Fax : 041 / 26 50 66
Integrale Wärme Kraft AG (IWK)	Bellerivestrasse 55 8022 Zurich	Tél. : 01 / 385 22 11 Fax : 01 / 385 25 55
Schmeik + Schindler AG	Grabenstrasse 8 4142 Münchenstein	Tél. : 061 / 415 87 87 Fax : 061 / 415 87 88
Enerplan Invest AG	Rösslimattstrasse 6 6005 Lucerne	Tél. : 041 / 44 93 70 Fax : 041 / 44 00 70
Arbeitsgemeinschaft für dezentrale Energieversorgung (ADEV)	Oristalstrasse 85 4410 Liestal	Tél. : 061 / 921 94 50 Fax : 061 / 922 08 31

A2 Modèle de tableau pour le calcul du prix de revient de la chaleur

Objet : _____		Base	Taux	Frais annuels durant la 1 ^{re} année	Facteur moyen	Moyenne des frais annuels sur la durée d'amortissement
Durée d'amortissement ans						
Calcul du taux d'intérêts %						
Frais de capitalisation		Investissements	Annuités			
Durée d'utilisation ans		Fr.		Fr./a	—	Fr./a
Durée d'utilisation ans		Fr.		Fr./a	—	Fr./a
Durée d'utilisation ans		Fr.		Fr./a	—	Fr./a
Durée d'utilisation ans		Fr.		Fr./a	—	Fr./a
Durée d'utilisation ans		Fr.		Fr./a	—	Fr./a
Durée d'utilisation ans		Fr.		Fr./a	—	Fr./a
Total des frais de capitalisation		Fr.		Fr./a		Fr./a
Frais énergétiques		Données énerg.	Taux			
CCFC à gaz						
– Taxe de base		—	Fr.	Fr./a		Fr./a
– Taxe de puissance		kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Prix de l'énergie, hiver		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Prix de l'énergie, été		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
Chaudière à gaz						
– Taxe de base		—	Fr.	Fr./a		Fr./a
– Taxe de puissance		kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Prix de l'énergie, hiver		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Prix de l'énergie, été		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
Huile de chauffage		t	Fr./t	Fr./a		Fr./a
Consommation d'électricité (centrale)						
– Taxe de base		—	Fr.	Fr./a		Fr./a
– Taxe de puissance		kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Hiver, haut tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Hiver, bas tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, haut tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, bas tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
Total des frais énergétiques				Fr./a		Fr./a
Frais d'exploitation						
Frais fixes de l'installation CCF		—	—	Fr./a		Fr./a
Frais variables de l'installation CCF		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
Autres frais fixes		—	—	Fr./a		Fr./a
Total des frais d'exploitation				Fr./a		Fr./a
Dépenses totales				Fr./a		Fr./a
Revenus de la production électrique						
Besoins propres						
– Puissance		kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Hiver, haut tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Hiver, bas tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, haut tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, bas tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
Restitution						
– Hiver, tarif de pointe		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Hiver, haut tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Hiver, bas tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, tarif de pointe		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, haut tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
– Été, bas tarif		MWh	ct/kWh	Fr./a		Fr./a
Total des revenus de la production électrique				Fr./a		Fr./a
Prix de revient de la chaleur				Fr./a		Fr./a
Prix de revient spéc. de la chaleur						
Production de chaleur MWh				ct/kWh		ct/kWh

Dénominations, symboles, abréviations

Dénominations et symboles

Amplification électrothermique [–]	AET
Chaleur spécifique [J/kgK, kWh/kgK]	c
Coefficient de performance annuel [–]	COPA
Cosinus phi, facteur de puissance [–]	cos φ
Courant électrique [A]	I
Débit [l/s, l/h, m³/h]	$\dot{V}$
Débit, flux massique [kg/s, kg/hh]	$\dot{m}$
Débit, flux volumique [l/s, l/h, m³/h]	$\dot{V}$
Débit volumique [l/s, l/h, m³/h]	$\dot{V}$
Différence de pression [kPa]	Δp
Différence de température [K]	Δθ, ΔT
Energie en général [J, MJ, Ws, kWh]	W
Energie thermique en général [J, MJ, Ws, kWh]	Q
Facteur de puissance, cosinus phi [–]	cos φ
Flux massique, débit [kg/s, kg/h]	$\dot{m}$
Flux thermique [W, kW]	$\dot{Q}$
Flux volumique, débit [l/s, l/h, m³/h]	$\dot{V}$
Fraction utile, rendement moyen [–]	η
Indice de performance électrique [–]	s
Indice de dépense énergétique [MJ/m²]	IDE
Indice de performance [–]	ε
Masse [kg]	m
Pouvoir calorifique supérieur [kWh/kg, kWh/m³]	H _o
Pouvoir calorifique inférieur [kWh, kWh/m³]	H _u
Pression [kPa]	p
Puissance, en général [W, kW]	P
Puissance active [W, kW]	P
Puissance apparente [VA, kVA]	P _s
Puissance du carburant	$\dot{Q}_{CA}$
Puissance électrique	P _{el}
Puissance hydraulique [kW]	P _{hydr}
Puissance réactive [var, kvar]	P _q
Puissance thermique [W, kW]	Q
Puissance thermique en général [W, kW]	$\dot{Q}$
Rendement en général [–]	η
Rendement électrique [–]	η _{el}
Rendement thermique [–]	η _{th}
Résistance [Ω]	R
Température [° C]	θ
Température absolue [K]	T
Température de déclenchement [° C]	θ _{décl}

Température de départ [° C]	θ _{dep}
Température d'enclenchement [° C]	θ _{en}
Température de retour [° C]	θ _{ret}
Temps [s, h]	t
Tension [V]	U
Valeur k _v [m³/h]	k _v
Vitesse [m/s]	v
Volume [l, m³]	V

Abréviations (aussi utilisées comme indices)

Accumulateur	Ac
Amplificateur électrothermique	ARET
Arrêté sur l'énergie	AE
Chaudière	Ch
Combustible ou carburant	CA
Couplage chaleur-force	CCF
Couplage chaleur-force compact	CCFC
Départ	dep
Eau chaude sanitaire	ECS
Electrique	el
Installation à énergie totale	TOTEM
Ordonnance sur l'énergie	OEn
Ordonnance sur la protection de l'air	OPair
Pompe à chaleur	PAC
Récupération de chaleur	RC
Retour	ret
Surface de référence énergétique	SRE
Thermique	th
Total	tot
Utilisation des rejets thermiques	URT
Valeur maximale	max
Valeur minimale	min
Valeur nominale	n



liste complète dans cahier 1 !

Index

- Abréviations, 60
Accumulateur, 37; 45; 47
Adresses, 58
Alimentation, 51
Amplificateur électrothermique, 7
Analyse de sensibilité, 28
Arrêté sur l'énergie, 21
Associations, 58
Augmentation du prix de l'énergie, 34
Besoin de puissance thermique, 25
Besoin thermique annuel, 25
Bibliographie, 21; 32; 44; 53
Bilan des coûts annuels, 32
Bilan énergétique, 31
Bois, 20
Branchement parallèle, 46
Branchement parallèle partiel, 47
Branchement en série, 47
Catalyseur, 8
Catalyseur à 3 voies, 8; 39
C-CALC (logiciel), 29
CCF-CALC (logiciel), 29; 30
Centrale chaleur-force, 8
Centrale de chauffage, 42
Chambres de combustion Low-Nox, 39
Charge partielle d'une installation de CCFC, 37
Chaudière d'appoint, 36
Chaudière à vapeur, 20
Chauffage de l'eau, 49
Chiffres caractéristiques, 7
Classification, 7
Code des frais de construction, 33
Combustibles, 19
Commande maîtresse, 53; 57
Commande et régulation, 52
Compteurs, 53
Concepts, 7
Concept énergétique, 17
Concept énergétique global, 41
Condensation des gaz d'échappements, 12; 45; 50
Conditions de vente de la chaleur, 23
Contrat d'entretien, 55
Contrat d'entretien global, 55
Contrat d'entretien partiel, 55
Contrat de livraison de la chaleur, 23
Contrats de livraison de l'énergie, 22
Contrôle de qualité, 53; 56
Contrôle des résultats, 42; 56; 57
Couplage chaleur-force (définition du concept), 7
Couplage chaleur-force compact, 8
Couplage chaleur-force compact (définition du concept), 7
Couplage chaleur-force compact à moteur diesel, 9; 14; 22
Couplage chaleur-force compact à moteur à gaz, 7; 22; 26
Couplage chaleur-force compact à moteur à gaz avec renouvellement minimum de l'air, 44
Couplage chaleur-force compact à turbine à gaz, 10; 22; 26
Couplage chaleur-force à moteur Stirling, 14
Couplage chaleur-force standard, 7
Coût énergétique, 34
Dénominations, 60
Déroulement de la planification, 41
Diagramme des durées de fonctionnement cumulées, 30
Diagramme du flux énergétique, 31
Dimensionnement, 24
Dimensionnement détaillé, 24; 28
Dimensionnement sommaire, 24; 25
Dispositifs de sécurité, 51; 52
Domaines d'applications, 15
Domaine de l'habitat, 15
Données énergéto-techniques, 29; 30; 31
Durée d'amortissement, 33
Durée d'utilisation, 33
Effets dynamiques, 53
Emissions de dioxyde de carbone des combustibles fossiles, 38
Emissions polluantes au démarrage des installations CCFC à moteur à gaz, 39
Emplacement, 42
Energies renouvelables, 21
Entretien, 55
Epuration des gaz d'échappements, 9
Etude de faisabilité, 24; 41
Etudes préalable, 24; 41
Exemple, 1^{re} partie, 25
Exemple, 2^e partie, 28
Exemple, 3^e partie, 31
Exemple, 4^e partie, 31
Exemple, 5^e partie, 35
Exemple, 6^e partie, 37
Exemple, 7^e partie, 40
Exemple, 8^e partie, 49
Exemple, 9^e partie, 53
Exploitation, 55
Facteur d'annuités, 33; 34
Facteurs d'émissions, 40
Facteur moyen, 32; 34
Fonctionnement intermittent de la conduite à distance, 49
Fournisseurs d'installations de couplage chaleur-force, 58
Frais de capitalisation, 33
Frais d'exploitation, 33; 34
Gaz de décharge, 20
Gaz liquide, 20; 44

- Gaz naturel, 19; 22, 43
- Gaz de station d'épuration, 19
- Gazéificateur de bois, 20
- Générateur asynchrone, 51
- Générateur synchrone, 51
- Huile de chauffage EL, 20; 44
- Hydrocarbures, 39
- Impact sur l'environnement, 38
- Indices, 60
- Indice de performance électrique, 7
- Injection d'eau, 39
- Injection de vapeur, 39
- Installation bimodulaires, 43
- Installation combinée de couplage chaleur-force, 8
- Installations de couplage chaleur-force asservies aux besoins électriques, 18
- Installations de couplage chaleur-force asservies aux besoins thermiques, 17
- Installation électrique de secours, 18; 19; 52
- Installation à énergie totale, 10
- Installation de ventilation, 44
- Instrumentation, 53
- Investissements spécifiques, 26
- Logiciel, 29; 30
- Lois, 21
- Lois sur l'énergie, 21
- Lubrification, 44
- Méthane, 39
- Modèle de tableau calcul du prix de revient de la chaleur, 59
- Modem, 56
- Monoxyde de carbone, 39
- Moteur automobile, 7
- Moteur à combustion pauvre, 9
- Moteur industriel à gaz, 7
- Moteur Lambda-1, 8
- Optimisation de l'exploitation, 42; 56; 57
- Ordonnances, 21
- Ordonnance sur l'énergie, 21
- Ordonnance sur la protection de l'air, 21; 22; 40
- Ordonnance sur la protection contre le bruit, 43
- Organisations de soutien, 22; 58
- Oxydes d'azote, 39
- PAC-CALC (logiciel), 29
- Performances, 57
- Petite installation de couplage chaleur-force compacte, 7; 8
- Pile à combustible, 14
- Pile à combustible à acide phosphorique, 14
- Pile à combustible à électrolyte solide, 14
- Pile à combustible à fusion de carbonate, 14
- Planification, 41
- Planification des travaux, 42
- Pompe à chaleur à air recyclé, 45; 49; 50
- Pompe à chaleur à moteur diesel, 11
- Pompe à chaleur à moteur à gaz, 11
- Pompe à chaleur pour la récupération des pertes par rayonnement, 12
- Prix de l'énergie, 34
- Prix de revient de la chaleur, 32; 36; 59
- Prix de revient de l'électricité, 26; 27; 32
- Programme informatique, 29; 30
- Propane, 43
- Protection contre le bruit, 43
- Puissance du combustible, 7
- Puissance électrique, 7
- Puissance thermique, 7
- Raccordement électrique, 51
- Raccordement hydraulique, 45
- Recommandations, 21
- Récupération des pertes par rayonnement, 12
- Réduction catalytique sélective, 39
- Refroidissement à haute température, 13
- Règles d'ajustement des valeurs d'enclenchement et de déclenchement, 48
- Règles générales pour le dimensionnement sommaire, 25
- Régulation, 52
- Rendement électrique, 7
- Rendement thermique, 7
- Rentabilité, 24; 26; 28; 31; 34; 55; 59
- Répercussions sur le réseau, 53
- Réseau de chauffage, 16
- Secteur industriel, 16
- Secteur des services, 15
- Signature énergétique, 30
- Sortie impulsionnelle, 54
- Station de téléphone automatique, 56
- Stratégie de protection de l'environnement, 7
- Substances polluantes, 39; 40
- Surveillance du fonctionnement, 56
- Symboles, 60
- Taux d'inflation, 33
- Taux d'intérêts, 33; 34
- Taxe de base, 23
- Taxe de raccordement, 23
- Techniques spéciales, 12
- Télesurveillance, 56
- Turbines à gaz, 39; 40
- Unités, 60
- Utilisation de la chaleur, 46
- Valeur d'enclenchement et de déclenchement, 48
- Valeurs limites d'émission, 22
- Vapeur à basse pression, 13

Organisation de soutien

CCF

Association suisse pour encouplage chaleur-force

Patronage

ASCV

Association suisse des entreprises
de chauffage et ventilation

ASIG

Association suisse de l'industrie du gaz

SBHI

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

SICC

Société suisse des ingénieurs
en chauffage et climatisation

UCE

Union suisse des consommateurs d'énergie
de l'industrie et des autres branches économiques

UCS

Union des centrales suisses d'électricité