

Couplage chaleur-force (CCF)

Document connaissances de base, état: juin 2016

1. Synthèse

Tout juste un tiers de la consommation finale d'énergie est aujourd'hui utilisée pour la production de chaleur, la plupart du temps par la combustion directe de mazout ou de gaz naturel dans des chaudières. Pour des raisons liées à la protection de l'environnement et en particulier du climat, à l'évolution incertaine des coûts et à la dépendance vis-à-vis de l'étranger, le maintien de ce modèle sur le long terme ne semble pas raisonnable. Même en mettant en œuvre des mesures d'efficacité énergétique, par exemple en améliorant l'isolation thermique des bâtiments, les besoins en chaleur resteront considérables et atteindront en 2050, selon la politique énergétique, 50 à 70 % de leur niveau actuel. Une part non négligeable de ces besoins devra être couverte par l'utilisation de combustibles fossiles. Dans la mesure où les besoins en chaleur sont importants et pratiquement constants, et où des températures relativement élevées sont nécessaires, le recours à des installations de couplage chaleur-force pourrait s'envisager.

Si certaines conditions-cadre sont mises en place, la production d'électricité par des installations CCF pourrait représenter, selon un scénario de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) jusqu'à 11,5 TWh. Le couplage chaleur-force n'est pas nécessairement la solution la plus économique, mais c'est un principe énergétiquement plus efficace que la production séparée de chaleur et d'électricité à partir de combustibles fossiles. Dans l'hypothèse où les installations CCF devraient jouer à long terme un rôle important dans l'approvisionnement énergétique, il convient de créer des conditions-cadre favorables afin de dépasser les obstacles qui se présentent aujourd'hui sur les plans technique et économique. Le développement du CCF nécessite des mesures d'encouragement.

2. Situation actuelle en Suisse

2.1 Remarque préliminaire

Les installations de couplage chaleur-force (CCF) sont des systèmes produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur. L'électricité est générée grâce à un moteur ou à une pile à combustible, et la chaleur résiduelle est utilisée en même temps à des fins de chauffage (chaleur confort) ou pour des processus de production (chaleur de processus). Par rapport à une production entièrement séparée de chaleur et d'électricité à partir de combustibles fossiles, les installations CCF atteignent un rendement total plus élevé et rejettent donc moins de CO₂. Cela suppose cependant que les deux produits de l'installation, c'est-à-dire la chaleur et l'électricité, soient entièrement utilisés. Alors que l'électricité est injectée dans le réseau de distribution général, la chaleur doit, elle, pouvoir être utilisée localement. A la différence des centrales thermiques produisant uniquement de l'électricité, les installations CCF visent donc d'abord à satisfaire les besoins en chaleur.

C'est la raison pour laquelle l'approvisionnement en chaleur doit systématiquement être pris en compte lorsque l'on évalue de futures stratégies de production d'électricité à partir de combustibles fossiles. Une alternative au CCF serait notamment la combinaison d'une centrale à cycle combiné gaz-vapeur (CCG) et d'une pompe à chaleur (PC). Les centrales à cycle combiné permettent de produire de l'électricité avec un rende-

ment particulièrement élevé et de faire fonctionner des pompes à chaleur pour la production de chaleur confort.

Le présent document s'intéresse aux installations CCF alimentés par des combustibles fossiles. Les installations CCF fonctionnant à partir de la biomasse sont présentées dans le document connaissances de base «Electricité à partir de la biomasse». Les installations basées sur l'hydrogène fonctionnent avec des piles à combustible. Ces dernières transforment les combustibles fossiles en hydrogène, qui est utilisé comme un vecteur énergétique.

2.2 Le couplage chaleur-force en Suisse

Les installations CCF sont définies en Suisse comme des centrales thermiques alimentées par des agents fossiles ou biogènes avec une production couplée, donc simultanée, d'électricité et de chaleur. Il faut également qu'elles remplissent les critères suivants: au moins 5 % de l'énergie utilisée doit être transformée en électricité, et le rendement total (chaleur et électricité) doit atteindre au moins 60 %.¹ Afin de pouvoir regrouper les technologies et les domaines d'application comparables, une distinction est faite entre petites et grandes installations CCF.

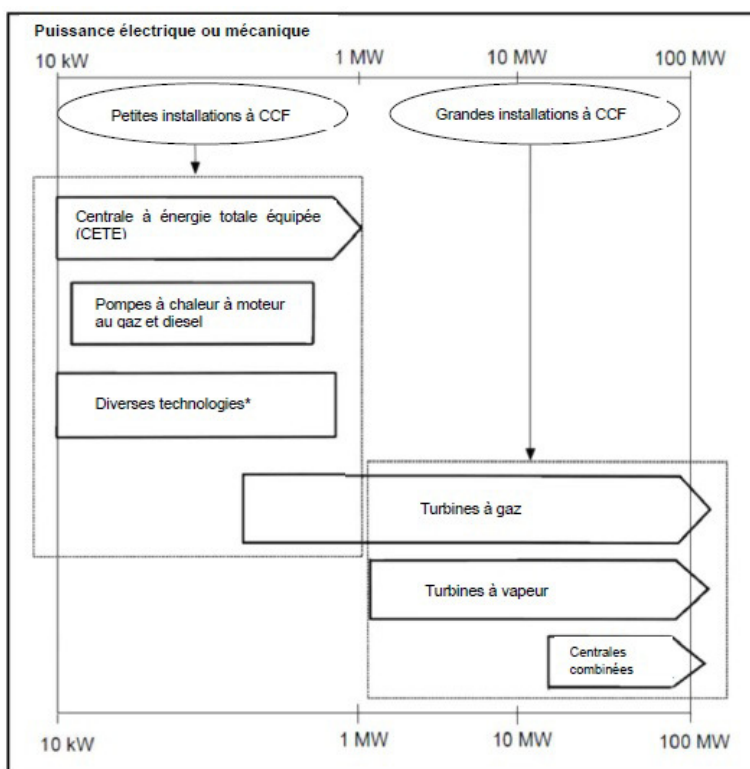


Illustration 1 Répartition des technologies et domaines d'application de CCF en petites et grandes installations CCF. Source: OFEN 2011.

¹ Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK), édition 2012, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 2013

La Suisse comptait en 2014 un total de 990 installations CCF en exploitation, pour une puissance électrique installée de 574 MW (combustibles renouvelables ou non). Ces installations ont produit 1660 GWh d'électricité, ce qui représente 2,4% de la production totale, et 45% de la production provenait de sources renouvelables.

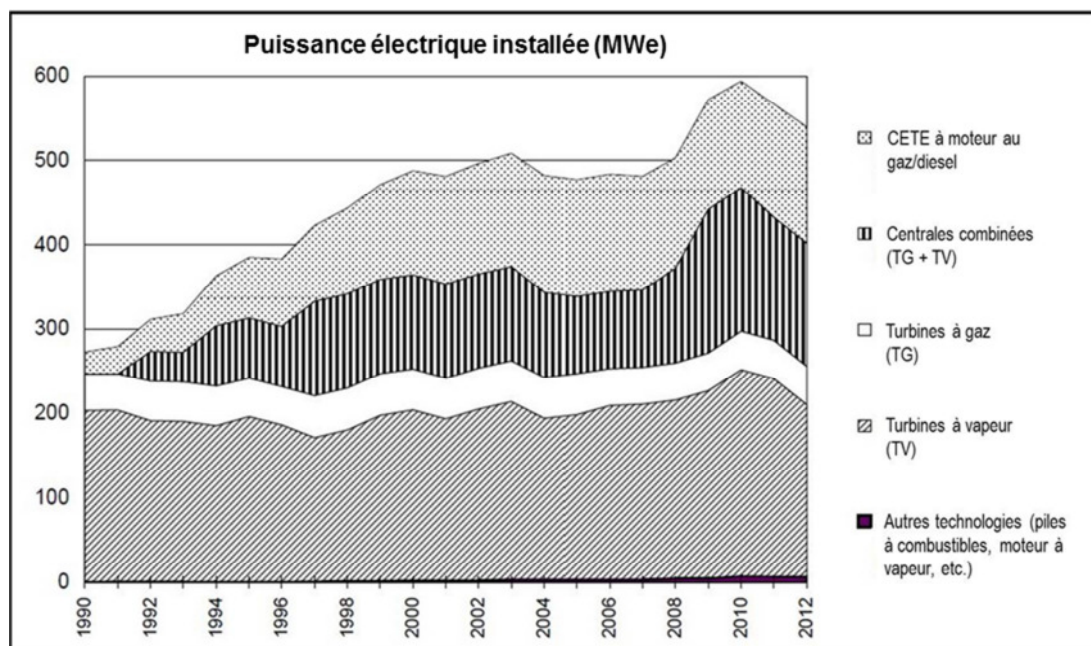


Illustration 2 Evolution de la puissance électrique des installations CCF selon les technologies. Source: OFEN 2015.

Sur la période 2000-2008, la production d'électricité des installations CCF en Suisse a stagné aux alentours de 1600 GWh, ce qui correspond à 3200 heures à pleine charge. Entre 2006 et 2013, la puissance électrique installée a augmenté de 9 MW_{el}/a et la production d'électricité de 51,3 GWh_{el}/a. Cette hausse s'explique principalement par la mise en service à Monthey d'une installation de production de chaleur de processus pour un usage industriel. En 2014, le nombre d'installations CCF a été réduit de 5 installations. La puissance installée des installations CCF a même diminué de 27 MW.

Les installations CCF sont soumises à différentes dispositions légales: Constitution fédérale, Loi sur l'énergie, Ordonnance sur l'énergie et Ordonnance sur la taxe sur le CO₂. L'existence de législations strictes et différentes aux niveaux national, cantonal et communal aboutit en Suisse à des conditions-cadre complexes. En revanche, les installations CCF ne rencontrent généralement pas de problème d'acceptation au sein de la population.

2.3 Analyse des obstacles par l'OFEN

A l'heure actuelle, le couplage chaleur-force et ses applications n'ont pas véritablement percé en Suisse. Les raisons de cette situation ont été analysées dans le cadre d'une étude de l'OFEN², qui a souhaité identifier les obstacles à l'utilisation de différentes technologies CCF dans plusieurs domaines d'application en Suisse.

² Beseitigung von Hemmnissen bei der Verbreitung von Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 2009

L'OFEN a relevé la présence d'obstacles sur différents plans:

- Juridique: plusieurs textes législatifs, notamment les lois sur le CO₂, dispositions définies par la Confédération, le canton et la commune
- Technique: technologies relativement récentes pour les installations alimentant un seul bâtiment d'habitation; image de la technique
- Economique: prix de l'énergie (mazout, gaz naturel, électricité); tarifs de rachat de l'électricité; compétences de l'exploitant de petite installation; coûts du transport de chaleur pour les grandes installations
- Politique: acceptation auprès des acteurs de la politique énergétique (grandes installations); programme de la Confédération en matière de politique énergétique; information des habitants et acceptation pour les grandes installations

Etant donné le nombre et la diversité des obstacles constatés, l'analyse conclut qu'aucune application du couplage chaleur-force ne semble en mesure de s'implanter d'elle-même sur le marché au cours des prochaines années.

Il est cependant probable que la technologie continue de se développer, car le potentiel technique est important et le prix de revient de l'électricité produite est plus bas que dans le cas des énergies renouvelables. En outre, les installations CCF présentent un bon rendement énergétique total. Le recours à des installations CCF pourrait se justifier dans les cas où une température d'entrée élevée est nécessaire, par exemple afin de produire de la chaleur destinée à des processus industriels ou de la chaleur confort pour des bâtiments dont l'assainissement énergétique n'est pas envisagé, ou encore pour remplacer une chaudière brûlant directement du gaz naturel ou du mazout. Mais tant qu'on ne disposera pas sur le marché de piles à combustibles peu onéreuses et éprouvées, le développement du couplage chaleur-force se cantonnera sans doute d'abord aux grandes installations.

3. Etat de la technologie et développement futur

La plupart des installations CCF sont des centrales à énergie totale équipées (CETE), qui sont composées d'un moteur à combustion et d'un générateur. Le moteur produit de l'énergie mécanique utilisée pour entraîner le générateur et produire de l'électricité. La chaleur résiduelle utilisée provient du refroidissement du moteur et des gaz d'échappement. Les installations CCF peuvent être utilisées dans le secteur de l'industrie pour alimenter les entreprises en électricité et en chaleur de processus.³ Une autre des applications possibles concerne les habitations. Les installations peuvent produire de la chaleur (chauffage à distance et de proximité) pour des zones entières d'habitation, pour des immeubles collectifs d'une taille minimale de 10 logements environ, ou même pour des habitations individuelles.

A l'heure actuelle, les plus grandes installations CCF suisses sont des usines d'incinération des ordures ou des installations industrielles dans lesquelles la combustion d'un combustible produit de la vapeur utilisée pour entraîner une turbine à vapeur (centrale à gaz à cycle combiné avec production couplée de chaleur – voir également le document connaissances de base «Centrales à cycle combiné gaz-vapeur (CCC)»). Le générateur d'électricité peut être entraîné par des moteurs à combustion, c'est-à-dire des moteurs diesel ou

³ Pour la part d'électricité que le client consomme (pour l'exploitation de ses propres installations) sur le même site que l'installation CCF (même point de raccordement), il n'a pas à verser de rémunération pour l'utilisation du réseau (LApEI, art. 14): cela peut constituer pour lui un intérêt économique.

à gaz, mais aussi par des turbines à gaz ou des moteurs Stirling. Les moteurs Stirling et les piles à combustible appartiennent vraisemblablement aux technologies de l'avenir.

Le **moteur Stirling** est une machine thermique à deux cylindres, dans lequel un gaz de travail confiné est tour à tour réchauffé et refroidi en deux endroits différents, depuis une source extérieure. Le gaz se détend et se comprime en actionnant un piston, ce qui produit de l'énergie mécanique. Le moteur fonctionne en circuit fermé. C'est un exemple de transformation d'une forme d'énergie difficilement utilisable (l'énergie thermique) en énergie plus exploitable (l'énergie mécanique).

Les **piles à combustible** permettent également le couplage chaleur-force. Une pile à combustible est une cellule galvanique qui transforme en électricité l'énergie dégagée par la réaction chimique entre un combustible et un oxydant. Le combustible est généralement de l'hydrogène provenant de gaz naturel, de biogaz, d'acide formique ou d'alcool, l'oxydant étant de l'oxygène. A moyen terme, seul un développement des piles à combustible semble possible. Bien que l'on annonce depuis un certain temps leur utilisation à de petites puissances pour des maisons individuelles ou mitoyennes, une production de masse n'est pas encore envisageable. D'autres développements pourraient être réalisés concernant de nouveaux combustibles.

4. Potentiel

Le scénario «Nouvelle politique énergétique» élaboré par l'OFEN en mai 2011⁴ suppose que la mise en place de conditions-cadre plus strictes amèneront ces prochaines décennies à une diminution de la consommation énergétique liée au chauffage domestique et à la chaleur de processus (amélioration de l'efficacité, meilleure isolation thermique), de l'ordre de 31 % environ d'ici 2035 et 43 % d'ici 2050. La contribution des combustibles fossiles s'élève dans ce scénario à 137 PJ en 2035 et 108 PJ en 2050. L'utilisation d'installations CCF pourrait théoriquement permettre de produire environ 13,5 TWh d'électricité en 2035 et 15 TWh en 2050 (hypothèses pour 2035: η_{el} CCF = 0,45, COP annuel PC = 4,0; hypothèses pour 2050: η_{el} CCF = 0,6, COP annuel PC = 5,0). Dans les Fondements pour la stratégie énergétique du Conseil fédéral (printemps 2011), la production envisagée pour 2050 s'élève à 13,45 TWh_{el}, ce qui correspond pratiquement au potentiel théorique et technique.⁵

La réduction des besoins énergétiques des bâtiments, causée par une meilleure isolation, limitera à l'avenir l'utilisation d'installations CCF. En effet, plus la puissance est faible et plus le rendement et la rentabilité des installations diminue. Dans l'hypothèse d'un essor massif du CCF, les bâtiments et les installations de chauffage existant devraient être transformés, et dans certains cas les réseaux de gaz naturel devraient être étendus. Même si des progrès techniques permettent d'augmenter le rendement des installations CCF et le coefficient de performance annuel de pompes à chaleur au cours des 40 prochaines années, il semble qu'en l'absence d'encouragement particulier, seulement 40 % du potentiel théorique sera exploité.

5. Estimation de la puissance disponible et de la qualité de l'énergie

Les installations CCF peuvent théoriquement être exploitées de deux manières. Lorsque la priorité est donnée au besoin en chaleur et que l'on considère comme un sous-produit la production d'électricité et son

⁴ Fondements pour la stratégie énergétique du Conseil fédéral, actualisation des perspectives énergétiques 2035 (printemps 2011) Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 2011 (tableau 49)

⁵ Dans sa publication «Wärme und Strom effizient kombinieren» (printemps 2011), l'association V3E évoque un potentiel de 12 % en 2030, ce qui correspond à 7 TWh.

injection dans le réseau, on parle d'installation commandée par le besoin en chaleur. Ce mode de fonctionnement permet de se servir de l'ensemble de l'énergie utile. A l'inverse, l'installation peut être commandée par le besoin en électricité. Mais la chaleur, à la différence de l'électricité, ne peut être utilisée que localement: on ne peut donc se servir de l'ensemble de l'énergie utile qu'en stockant le surplus de chaleur produite. Une installation commandée par le besoin en électricité doit disposer d'un accumulateur de chaleur ou d'une source de chaleur supplémentaire pour pouvoir utiliser la chaleur excédentaire ou compenser la chaleur manquante. Même avec un dispositif de taille suffisante, les pertes de chaleur diminuent le rendement total de l'installation.

Pour atteindre des rendements élevés atteignant jusqu'à 90 %, il faut en règle générale que l'installation CCF soit commandée par le besoin en chaleur. Le prix de revient de l'électricité est cependant plus élevé dans cette configuration que pour une centrale commandée par le besoin en électricité, car les investissements nécessaires à l'installation sont répartis sur une production d'électricité moins importante.

Une installation commandée par le besoin en chaleur atteint typiquement 3000 à 4500 heures d'exploitation par an.⁶ Certaines installations parviennent certes à un nombre d'heures à pleine charge plus élevé (5000 heures par an et plus), mais il s'agit de cas particuliers tels que des hôpitaux ou des maisons de retraite, dans lesquels les besoins en chaleur sont plus importants (chaleur confort et éventuellement chaleur de processus). Les installations situées dans des lotissements résidentiels, dans des immeubles de services ou sur des sites industriels atteignent environ 4000 heures à pleine charge par an lorsque l'essentiel des besoins en chaleur est couvert par le CCF.

Puissance disponible (MW)	2013	2035	2050
Charge moyenne ⁷	500	1000	1500

Tableau 1 Puissance disponible de la technologie durant le semestre hivernal, jusqu'en 2050.⁸

Du point de vue de l'exploitation journalière, on peut se baser sur la répartition suivante:⁹

Période estivale	25 %
dont exploitation en journée (6h-22h)	75 %
dont exploitation de nuit (22h-6h)	25 %
Période hivernale	75 %
dont exploitation en journée (6h-22h)	60 %
dont exploitation de nuit (22h-6h)	40 %

⁶ Untersuchung Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen, Gruneko Schweiz AG, Bâle, juillet 2010

⁷ Pour le CCF: 100 % de la puissance installée

⁸ Perspectives énergétiques 2035 – tome 5, Analyse et évaluation de l'offre d'électricité, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, juin 2007 (Tableau 2.44)

⁹ Perspectives énergétiques 2035 – tome 5, Analyse et évaluation de l'offre d'électricité, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, juin 2007 (Tableau 7.17)

6. Prix de revient

Pour les nouvelles installations dont la puissance électrique dépasse 200 kW, les coûts d'investissement s'élèvent actuellement à 2500 CHF/kW. D'ici 2035, on peut s'attendre à une diminution des coûts en raison de l'amélioration du rendement électrique et de l'augmentation de la puissance moyenne des nouvelles installations.

Il est très probable que les piles à combustible atteignent d'ici 2050 un rendement électrique de 60 %. On peut supposer que les coûts d'investissement diminuent proportionnellement à l'augmentation du rendement. Des puissances plus élevées contribuent également à réduire les coûts d'exploitation et de maintenance. En outre, les piles à combustible ne contiennent aucune pièce en mouvement, ce qui signifie qu'il n'y a aucune usure mécanique ou pneumatique.

7. Environnement et climat

Les émissions de CO₂ du couplage chaleur-force sont calculées pour l'ensemble de l'énergie utile (chaleur et électricité). On ne répartit généralement pas ces émissions entre les formes d'énergie produite.

La production d'1 kWh d'électricité et de 1,8 kWh de chaleur produit:

- CETE 50 kWel: 336 g CO₂/ kWh¹⁰
- CETE 160 kWel: 314 g CO₂/ kWh
- CETE 1000 kWel: 325 g CO₂/ kWh

En comparaison: CCF biogaz¹¹: aujourd'hui 77 g CO₂/kWh, en 2030 et 2050 37 g CO₂/kWh.

8. Conditions-cadre

Dans les conditions-cadre actuelles, les installations CCF fonctionnant avec des combustibles fossiles ne devraient se développer que dans certains domaines d'application spécifiques présentant des besoins continus en chaleur, tels que les hôpitaux, les industries avec un cycle vapeur ou les centrales de chauffage à distance ou de proximité. Le remplacement de plus de 10 000 chaudières au mazout, à la puissance thermique élevée et anciennes de plus de 20 ans, pourrait cependant constituer une opportunité de développement du CCF. L'option d'une installation CCF devrait donc être examinée dans tous les cas d'utilisation de combustibles fossiles. Un véritable essor de cette technologie ne pourrait vraisemblablement se produire qu'avec un encouragement relativement important (lois ou ordonnances, tarifs de rachat, exemptions de taxes, fonction de modèle lors de la transformation de bâtiments officiels, etc.).

¹⁰ PSI, Axpo: Systemvergleich von Strom- und Wärmeversorgung mit zentralen und dezentralen Anlagen, Energie Dialog Schweiz, mai 2009 (conversion de la fig. 5.4)

¹¹ Electricité durable: vœu pieux ou bientôt réalité?, Institut Paul Scherrer (PSI): Le Point sur l'Energie n°20, juin 2010

9. Evaluation et analyse SWOT

Critère d'évaluation	2016	2035	2050
Investissement et prix de revient	Prix de revient supérieur au prix du marché, dépendant des recettes liées à la chaleur. Généralement moins onéreux que les énergies renouvelables	Coûts proches du prix du marché attendu, dépendant des progrès techniques	Coûts proches du prix du marché attendu, dépendant des progrès techniques
Compatibilité avec l'environnement	Emissions de CO ₂ supérieures à celles du mix énergétique suisse	Emissions de CO ₂ supérieures à celles du mix énergétique suisse	Emissions de CO ₂ supérieures à celles du mix énergétique suisse
Disponibilité de l'énergie	Charge de base et charge moyenne, particulièrement en hiver	Charge de base et charge moyenne, particulièrement en hiver	Charge de base et charge moyenne, particulièrement en hiver
Potentiel de production	Env. 1,1 TWh (1,9 % de la consommation électrique)	Env. 3,8 TWh	Env. 6 TWh
Acceptation sociale	Pas de problème particulier	Pas de problème particulier	Pas de problème particulier
Acceptation politique	Pas de problème particulier	Pas de problème particulier	Pas de problème particulier

Tableau 2 Evaluation de la production d'électricité par couplage chaleur-force suivant différents critères en 2016, en 2035 et en 2050. Vert: bon niveau, orange: niveau satisfaisant, rouge: niveau médiocre

externes	<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Volonté politique de ne pas poursuivre l'exploitation du nucléaire - Besoin de remplacer des chaudières à mazout (plus de 10 000) à la puissance thermique élevée et anciennes de plus de 20 ans - Meilleure compatibilité environnementale du gaz par rapport au mazout (dans l'optique du remplacement des chaudières à mazout) - Développement des piles à combustible - Efficacité énergétique globale élevée - Simple autorisation nécessaire 	<p>Risques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Forte augmentation de la taxe sur le CO₂ - Problème de bruit - Diminution des besoins en chaleur en raison de l'amélioration de l'isolation thermique - Incertitude concernant les coûts de transformation des installations de chauffage existantes - Modification de la Loi sur le CO₂, coûts du CO₂ plus élevés avec des répercussions sur les prix de l'électricité et de la chaleur
internes	<p>Points forts</p> <ul style="list-style-type: none"> - Technologie mature, pas de surprises - Intérêt pour les fournisseurs d'énergie en raison du «contracting» - Savoir-faire important des fournisseurs d'énergie - Possibilité pour les industries de payer leur consommation électrique dans l'enceinte de l'entreprise, pas de rémunération pour l'utilisation du réseau 	<p>Points faibles</p> <ul style="list-style-type: none"> - Faible possibilité de réglage en cas d'installation commandée par le besoin en chaleur - Dépendance des besoins en chaleur - Prix de revient encore élevé - Technologie émettrice de CO₂ - Nécessité de développer le réseau de gaz, primauté du CCF et densification des raccordements au gaz - Fort développement uniquement possible sur le marché du renouvellement, avec des coûts d'adaptation élevés

Tableau 3 Analyse SWOT

10. Sources

Eurelectric 2007	Statistics and prospects for the European electricity sector (Eurprog 2007), Eurelectric, Bruxelles, 2007
Gruneko 2010	Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen, Gruneko Schweiz AG, Bâle, 2010
OFEN 2007	Perspectives énergétiques 2035 – tome 5, Analyse et évaluation de l'offre d'électricité, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, juin 2007
OFEN 2009	Beseitigung von Hemmnissen bei der Verbreitung von Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 2009
OFEN 2011	Fondements pour la stratégie énergétique du Conseil fédéral, actualisation des perspectives énergétiques 2035 (printemps 2011), Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 2011
OFEN 2015	Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK), édition 2014, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne, 2015
PSI 2009	PSI, Axpo: Systemvergleich von Strom- und Wärmeversorgung mit zentralen und dezentralen Anlagen, Triologue Energie Suisse, mai 2009
PSI 2010	Electricité durable: vœu pieux ou bientôt réalité?, Institut Paul Scherrer (PSI): Le Point sur l'Énergie n°20, juin 2010
V3E 2011	Wärme und Strom effizient kombinieren, Association pour une production efficace de l'énergie (V3E), Sarnen, 2011