

Couplage chaleur-force (CCF)

Document de connaissances de base, état: mars 2020

1. Synthèse

Environ la moitié 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 chaudières¹. 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, la combustion d'agents énergétiques fossiles ne semble pas raisonnable. Malgré la mise en œuvre des mesures d'efficacité énergétique, par exemple l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments et la baisse des degrés-jours de chauffage en raison du changement climatique, les besoins en chaleur resteront considérables (jusqu'à 50 à 70% de leur niveau actuel d'ici à 2050). Dans la mesure où des températures relativement élevées sont nécessaires, le recours à des installations de couplage chaleur-force peut être envisagé. En combinaison avec des combustibles renouvelables ou avec le captage du CO₂, ces installations pourraient être exploitées de manière neutre pour le climat.

Si certaines conditions-cadre sont mises en place, la production d'électricité par des installations CCF peut représenter, selon un scénario de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) jusqu'à 11,5 TWh. Aujourd'hui, le couplage chaleur-force n'est généralement pas rentable, mais c'est un principe énergétiquement plus efficace que la production séparée de chaleur et d'électricité à partir de combustibles fossiles. Pour atténuer la problématique du déficit hivernal croissant dans l'approvisionnement en électricité, les installations CCF sont tout simplement idéales. Dans l'hypothèse où les installations CCF devraient jouer à long terme un rôle dans l'approvisionnement énergétique, il convient de créer des conditions-cadre favorables.

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. 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 issue de combustibles, les installations CCF atteignent un rendement total plus élevé. Cela suppose un rendement le plus élevé possible de la chaleur produite et de l'électricité. Alors que l'électricité est utilisée localement et que les excédents sont injectés dans le réseau de distribution, la chaleur doit, elle, pouvoir être utilisée localement. À 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 du gaz. Une alternative au CCF

¹ Source: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2017 nach Verwendungszwecken, figure 7, OFEN 2018

serait notamment la combinaison d'une centrale à cycle combiné gaz-vapeur (CCC) et d'une pompe à chaleur (PC). Les centrales à cycle combiné permettent de produire de l'électricité avec un rendement particulièrement élevé. Le courant produit peut être utilisé ailleurs, grâce à des pompes à chaleur pour la production de chaleur confort. La chaleur résiduelle résultante dans les CCC peut en outre être injectée dans les réseaux de chaleur à distance. Le rendement global en est alors encore augmenté.

Le présent document s'intéresse aux installations CCF et aux piles à combustible alimentées par des combustibles fossiles. Les installations CCF fonctionnant à partir de la biomasse sont présentées dans le document de connaissances de base «Électricité à partir de la biomasse».

2.2 Le couplage chaleur-force en Suisse

Les installations CCF sont définies en Suisse comme des centrales thermiques transformant des agents fossiles ou biogènes en électricité et en chaleur grâce à un processus couplé. 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%.² Afin de pouvoir regrouper les technologies et les domaines d'application comparables, une distinction est faite entre petites et grandes installations CCF.

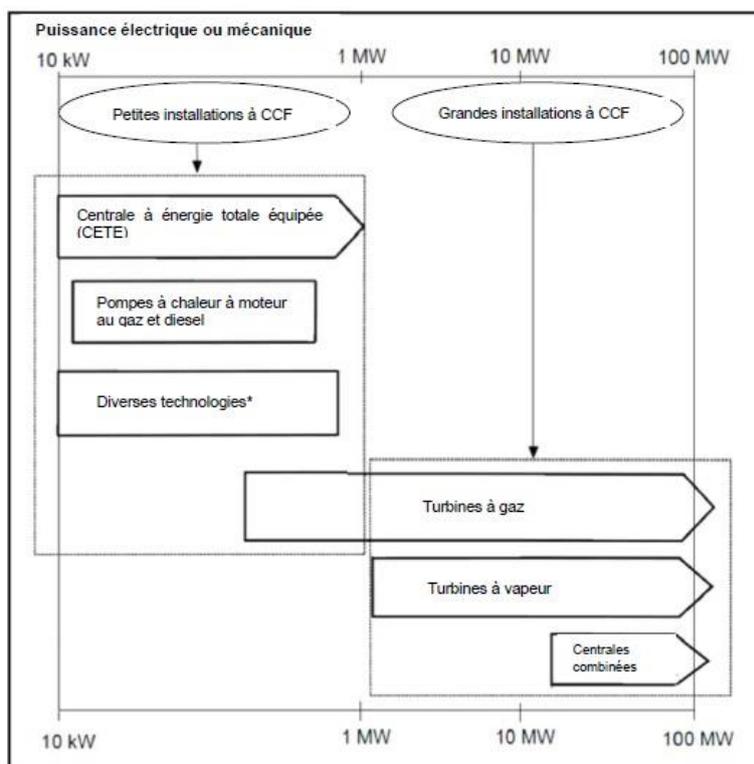


Illustration 1. Répartition des technologies et domaines d'application de CCF en petites et grandes installations CCF. Source: OFEN 2011.

* Font partie des «diverses technologies» p. ex. les piles à combustible, l'ORC ou les moteurs Stirling.

² Source: OFEN 2017

La Suisse compte environ 900 installations CCF en exploitation, pour une puissance électrique installée de près de 500 MW ³. Pour des raisons économiques, la puissance installée était en baisse ces dernières années. Quelques installations ont été fermées sans contrepartie. Ces installations produisent environ 1700 GWh d'électricité, ce qui représente quelque 2,5% de la production totale. Environ la moitié de la production d'électricité par CCF provient de sources renouvelables telles que le biogaz, le gaz d'épuration et le gaz de décharge.

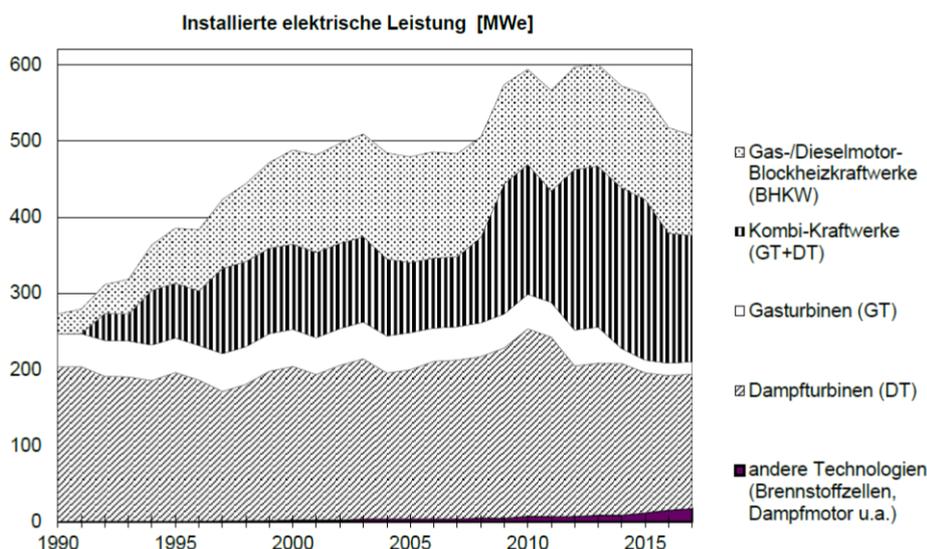


Illustration 2. Évolution de la puissance électrique des installations CCF selon les technologies 2017, OFEN

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

À l'heure actuelle, le couplage chaleur-force et ses applications n'ont pas percé en Suisse. Les raisons de cette situation ont été analysées dans le cadre d'une étude de l'OFEN⁴, qui a souhaité identifier les obstacles à l'utilisation de différentes technologies CCF dans plusieurs domaines d'application en Suisse.

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

³ Source: Statistique globale de l'énergie 2018, tableau 26, OFEN

⁴ Beseitigung von Hemmnissen bei der Verbreitung von Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz: OFEN 2009

- Économique: 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

Étant 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.

La technologie continuera pourtant de se développer. En combinaison avec le courant photovoltaïque en été, les installations CCF peuvent jouer un rôle décisif dans l'approvisionnement hivernal. Le courant photovoltaïque excédentaire peut être synthétisé en gaz renouvelable au moyen de la technologie power-to-gas. En hiver, ce gaz peut à son tour être transformé en chaleur ou en électricité au moyen d'installations CCF. Pour ce faire, dans le remplacement du gaz fossile, il n'y a même pas besoin de dispositifs de stockage saisonniers. La transformation d'électricité en gaz synthétique engendre des pertes de transformation élevées (chaleur résiduelle). Avec l'électrolyse, environ 80% de l'énergie est transformée en hydrogène. Avec une méthanisation en aval, le rendement est là aussi d'environ 80%. Les deux rendements ne sont aussi élevés que lorsque la chaleur résiduelle est utilisée. Autrement, les rendements sont de l'ordre de 30 – 50% pour les deux étapes. L'amélioration de l'efficacité est actuellement étudiée dans le cadre de nombreux projets de recherche. La chaleur résiduelle résultante est contraire au besoin saisonnier en chaleur pendant l'été. La rentabilité du power-to-gas dépend non seulement du rendement, mais surtout des coûts d'investissement. Actuellement, ceux-ci sont encore trop élevés, ce qui fait que l'amortissement n'est possible qu'avec un grand nombre d'heures à pleine charge sur l'année. Cela va une nouvelle fois à l'encontre de l'utilisation d'excédents de courant photovoltaïque, car ceux-ci surviennent principalement en été et pendant les heures de midi.

Les installations CCF ont une efficacité énergétique globale élevée. Le recours aux installations CCF est particulièrement approprié 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 immeubles anciens. Mais tant qu'on ne disposera pas sur le marché de piles à combustible peu onéreuses, il est probable que le marché CCF soit dominé surtout par de grandes installations.

3. État 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. 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.

À l'heure actuelle, les plus grandes installations CCF suisses se trouvent dans des usines d'incinération des ordures ou des installations industrielles dans lesquelles la combustion de déchets combustibles 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 de connaissances de base «Centrales à cycle combiné gaz-vapeur»). Le générateur d'électricité peut être entraîné par des moteurs à combustion, c'est-à-dire des moteurs diesel ou 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 laquelle 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 et l'oxydant, de l'oxygène. On annonce depuis un certain temps leur utilisation à de petites puissances pour des maisons individuelles ou mitoyennes, mais une production de masse n'est pas encore envisageable.

4. Potentiel

Le scénario «Nouvelle politique énergétique» élaboré par l'OFEN en mai 2011⁵ 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 à 2035 et 43% d'ici à 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. 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.⁶

La réduction des besoins énergétiques des bâtiments, causée par une meilleure isolation, limitera à l'avenir l'utilisation d'installations CCF. En effet, plus les durées de fonctionnement diminuent, plus le rendement et la rentabilité des installations baissent. Dans l'hypothèse d'un essor massif du CCF, les bâtiments et les installations de chauffage existant devraient être transformés. 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 prochaines années, il semble que, pour des raisons économiques et politiques, le potentiel théorique ne pourra pas être 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 injection dans le réseau, on parle d'installation commandée par le besoin en chaleur. Ce mode de

⁵ Source: OFEN 2011 (tableau 49)

⁶ 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.

fonctionnement permet de se servir de presque toute l'énergie utile. Alternativement, 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 allant jusqu'à 90%, il faut en règle générale que l'installation CCF soit commandée par le besoin en chaleur.

Une installation commandée par le besoin en chaleur atteint typiquement 3000 à 4500 heures d'exploitation par an.⁷ Certaines installations parviennent aussi à un nombre d'heures à pleine charge plus élevé (5000heures 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.

6. Coûts d'investissement

Pour les nouvelles installations dont la puissance électrique dépasse 200 kW, les coûts d'investissement s'élèvent actuellement à 900 CHF/kW. Pour les plus petites installations dont la puissance est de 110 kW, les coûts d'investissement s'élèvent à environ 1400 CHF.⁸

D'ici à 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 à 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. Conditions-cadre

Dans les conditions-cadre actuelles, les installations CCF ne devraient se développer que dans certains domaines d'application spécifiques présentant des besoins continus en chaleur et, partant, des durées de fonctionnement élevées, tels que les hôpitaux, les industries avec un cycle vapeur ou les centrales de chauffage à distance ou de proximité.

⁷ Source: Gruneko 2010

⁸ Source: WKK-Fachverband

8. Évaluation et analyse SWOT

Critère d'évaluation	2019	2035	2050
Coûts d'investissement et de revient	Coûts de revient supérieurs au prix du marché, dépendant des recettes liées à la chaleur	Coûts proches du prix du marché attendu	Coûts proches du prix du marché attendu
Compatibilité environnementale	Émissions de CO ₂ supérieures à celles du mix énergétique suisse dans la mesure où des agents énergétiques fossiles sont utilisés pour le fonctionnement	Émissions de CO ₂ supérieures à celles du mix énergétique suisse dans la mesure où des agents énergétiques fossiles sont utilisés pour le fonctionnement	Émissions de CO ₂ supérieures à celles du mix énergétique suisse dans la mesure où des agents énergétiques fossiles sont utilisés pour le fonctionnement
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. 1,7 TWh (2,5% 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	Conflit avec la nouvelle politique climatique	Conflit avec la nouvelle politique climatique	Conflit avec la nouvelle politique climatique

Tableau 1. Évaluation de la production d'électricité par couplage chaleur-force suivant différents critères en 2019, en 2035 et en 2050.

Vert: bon niveau, orange: niveau satisfaisant, rouge: niveau médiocre.

externes	<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déficit hivernal dans l’approvisionnement en électricité - Besoin de remplacer des chaudières à mazout (plus de 10 000) à la puissance thermique élevée - Meilleure compatibilité environnementale du gaz par rapport au mazout (dans l’optique du remplacement des chaudières à mazout) - Développement des piles à combustible - Combustibles renouvelables - 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 - La baisse de la demande en solutions CCF entraîne une offre plus petite - Technologies concurrentes telles que les pompes à chaleur en combinaison avec le photovoltaïque
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 - Économie de la rémunération pour l’utilisation du réseau en cas de consommation propre sur place 	<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 - Coûts de revient élevés - Émissions de CO₂ pour les combustibles fossiles - 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 2. Analyse SWOT.

9. Aperçu des principaux chiffres

Chiffre-clé	Année	Source	Valeur
Nombre d'installations CCF en Suisse	2018	OFEN, Statistique globale de l'électricité 2018, tableau 36	897
Puissance électrique des installations CCF en Suisse	2018	OFEN, Statistique globale de l'électricité 2018, tableau 36	496 MW
Production annuelle d'électricité provenant d'installations CCF en Suisse	2018	OFEN, Statistique globale de l'électricité 2018, tableau 36	1690 GWh
Part renouvelable de la production d'électricité CCF en Suisse	2017	OFEN, Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, édition 2017, chapitre 3.3	48%

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 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 2017	Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK), édition 2017, Office fédéral de l'énergie (OFEN)
OFEN 2018	Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2017 nach Verwendungszwecken, OFEN
OFEN 2018*	Statistique globale de l'énergie 2018, OFEN
V3E 2011	Wärme und Strom effizient kombinieren, Association pour une production efficace de l'énergie (V3E), Sarnen, 2011
WKK-Fachverband	Association professionnelle suisse pour le couplage chaleur-force, octobre 2017