



F. Rognon, novembre 2008

Utilisation plus efficace des combustibles fossiles et réduction des émissions de CO₂ pour le chauffage des bâtiments et la production d'électricité en Suisse

**Définitions et propriétés des centrales nucléaires, centrales au gaz,
centrales à cycle combiné et centrales à couplage chaleur-force**

**Couverture des besoins en chaleur et en électricité par
combinaison avec les pompes à chaleur, le chauffage à bois et les
installations solaires thermiques**



Auteur:
OFEN
Section des énergies renouvelables
F. Rognon
Responsable-marché des domaines pompe à chaleur, froid, cogénération et centrales
thermiques2020



Sommaire

1.	Résumé	4
2.	De quoi parlons-nous?.....	5
3.	Comment l'électricité est-elle produite à partir de combustibles?	5
4.	Quel est la puissance des différentes centrales?	8
5.	Quelle est l'efficacité des différentes centrales?	9
6.	Faut-il toujours utiliser les rejets de chaleur?	10
7.	Quels sont les effets principaux sur l'environnement?	13
8.	Quel est le prix du courant?.....	14
9.	Comment compenser le CO ₂ émis par la production d'électricité à partir de combustibles fossiles?.....	15
10.	De combien de centrales avons-nous besoin?	18
11.	Abréviations.....	22
12.	Bibliographie.....	23
13.	Hypothèses.....	24
14.	Calculs.....	25



1. Résumé

En 2020, l'utilisation de 400'000 pompes à chaleur permettrait de réduire les émissions de CO₂ de 8%. Au rythme actuel des rénovations du million de chaudières existantes, ce potentiel est tout à fait réaliste. L'électricité d'entraînement pourrait provenir de 10'000 installations de couplages chaleur-force qui remplacent ou complètent des chauffages existants.

Le potentiel de substitution de chaudières à mazout et à gaz par des énergies renouvelables et de l'électricité fossile est bien plus important : remplacer 1 000 000 de chaudières à mazout ou à gaz par 400 000 chaudières à bois, 600 000 pompes à chaleur et 30 000 installations fossiles à couplage chaleur-force ainsi que par la construction de 2 centrales à cycle combiné réduit de 20 % le volume de CO₂ émis en Suisse tout en augmentant la production d'électricité de 12 TWh, ce qui équivaut à 20 % de la consommation de l'année 2007.

Les meilleurs rendements électriques sont obtenus par les centrales fossiles à cycle combiné sans découplage de la chaleur et par les installations à couplage chaleur-force dont la puissance électrique est supérieure à 100 kW.

Exploiter la chaleur par découplage diminue le rendement électrique des centrales à vapeur, donc des centrales nucléaires, à gaz ou à charbon ainsi que celles à cycle combiné. Cette solution demande ainsi une analyse soignée des besoins à couvrir (quantités de chaleur et températures).

Globalement, l'efficacité des centrales à cycle combiné sans découplage est meilleure que celle des centrales à cycle combiné avec exploitation de la chaleur à distance, lorsqu'un tiers au moins du courant est employé pour l'entraînement de pompes à chaleur.

Le rendement global des installations à couplage chaleur-force dont la puissance électrique est supérieure à 100 kW est aussi bon, ou meilleur, que celui des centrales à cycle combiné, pour autant que la chaleur soit employée complètement et que les émissions de polluants soient maintenues au niveau de celles des chaudières à mazout ou à gaz, par des mesures correspondant à l'état actuel de la technique.



2. De quoi parlons-nous?

Il est rare que l'on discute de l'avenir de l'approvisionnement en électricité sans mentionner les nouvelles centrales thermiques. Nous commençons donc par présenter différents types de centrales, en donnant leur définition, leurs caractéristiques et les possibilités qu'elles offrent.

Souvent, deux variantes extrêmes sont envisagées, voire opposées: d'une part, l'approvisionnement serait décentralisé prenant la forme de plusieurs centaines de milliers de petites installations à couplage chaleur-force (CCF) de quelques kW chacune; d'autre part, deux à trois centrales produisant quelques centaines de mégawatt chacune assureraient une fourniture centralisée. Or une autre voie est également envisageable, sous forme de centrales de CCF de puissance moyenne (200 kW à 5000 kW de chaleur), dimensionnées pour les besoins en chaleur.

Le présent document ne procède pas plus à des comparaisons qu'à des évaluations. L'ordre dans lequel les systèmes sont présentés ne constitue pas une classification. Ils sont simplement décrits et des potentiels sont indiqués: il n'est pas fait de prévision, pas plus qu'une stratégie n'est élaborée. Les considérations se limitent volontairement aux centrales pertinentes à l'intérieur des frontières de la Suisse. Et seuls les composants et systèmes disponibles sur le marché pour la Suisse en 2007 sont pris en compte.

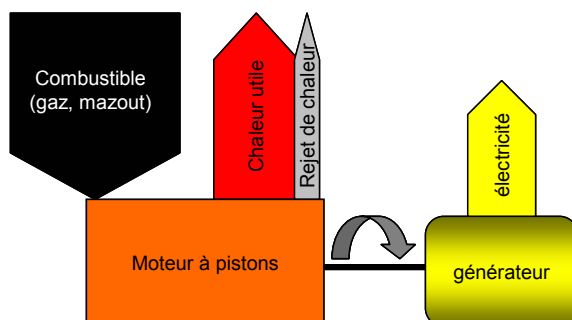
3. Comment l'électricité est-elle produite à partir de combustibles?

Dans une centrale thermique, l'énergie chimique contenue dans un combustible est transformée en chaleur et en courant (ou électricité). Pour obtenir cette énergie, on brûle le combustible ou alors on divise les noyaux d'atomes lourds (dans le cas de la fission nucléaire). On distingue, parmi la grande variété des technologies utilisées, deux types principaux.

Type 1

L'énergie produite par la combustion est directement transformée en un mouvement mécanique et en chaleur. Une machine (moteur, turbine) utilise un combustible (gaz, biogaz, diesel, essence bio, éthanol) à l'état liquide ou gazeux pour entraîner un générateur de courant (exemples: centrale à énergie totale à moteur à gaz, turbines à gaz). Les centrales de type 1 sont souvent appelées centrales de couplage chaleur force ou cogénération, abrégées CCF.

Schéma illustrant ce principe



Les centrales CCF décentralisées (type 1) couramment disponibles sur le marché se présentent sous forme de modules de production de courant et de chaleur complets, prêts à être raccordés. Elles sont pour la plupart équipées de moteurs à piston, mais aussi de petites turbines, de moteurs Stirling ou encore de piles à combustible.

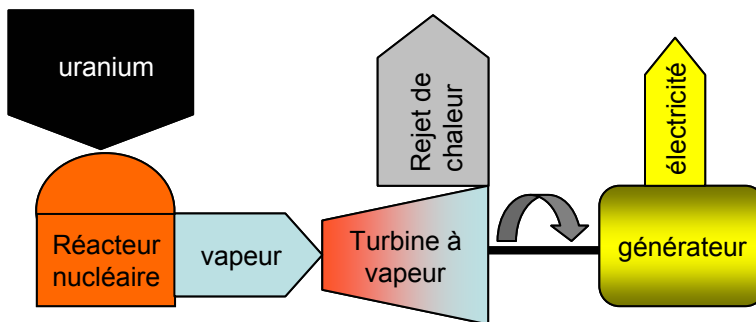


Type 2

L'énergie chimique est transformée en chaleur, puis transmise à un caloporteur et ensuite transformée en mouvement. Le plus souvent, la combustion du combustible à l'état solide, gazeux ou liquide (charbon, bois, essence, gaz, hydrogène) dans une chaudière produit de la vapeur d'eau brûlante à forte pression. Cette vapeur entraîne une turbine – à vapeur – qui à son tour entraîne le générateur de courant. Parmi les centrales de ce type les plus utilisées, voici celles qui sont envisagées pour le futur approvisionnement électrique de la Suisse.

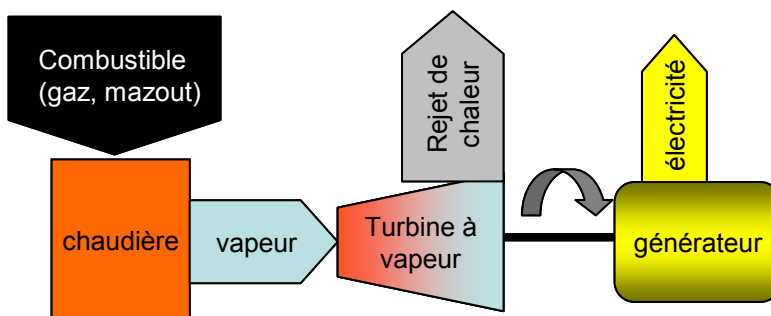
- Centrale nucléaire: la fission (division) d'atomes (d'uranium enrichi) libère de la chaleur. Cette chaleur chauffe de la vapeur. Une turbine à vapeur entraîne le générateur de courant.

Schéma illustrant ce principe



- Centrale fossile: la combustion (le fait de brûler) d'un agent énergétique fossile dans une chaudière produit de la vapeur. La turbine à vapeur entraîne le générateur de courant. Plusieurs combustibles peuvent être utilisés, par exemple le charbon, les huiles lourdes, le mazout, le gaz, le gaz liquide, les gaz synthétiques.

Schéma illustrant ce principe



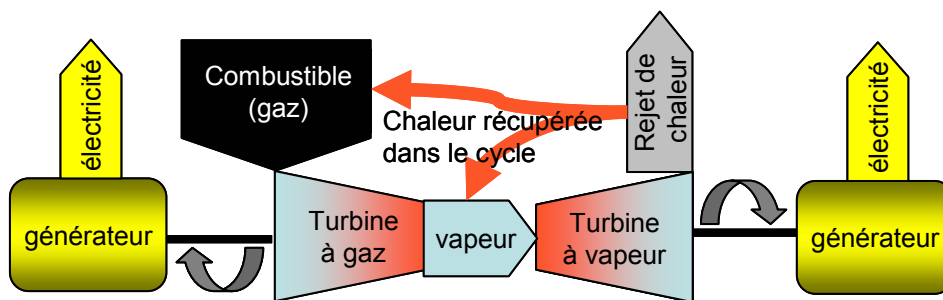
- Centrales à vapeur fonctionnant avec des énergies renouvelables. Les énergies envisagées sont la géothermie profonde et la biomasse.



Combinaison des types 1 et 2

Centrale à cycle combiné: ce type de centrale combine une machine de combustion avec une installation à vapeur. Le combustible (essence, gaz, gaz liquide, combustibles bio, gaz synthétiques) est brûlé dans une turbine à gaz, qui entraîne un premier générateur de courant. La chaleur qui se dégage des gaz d'échappement brûlants est utilisée pour produire de la vapeur. Une turbine à vapeur entraîne un deuxième générateur de courant. Exemple: centrale à turbine à gaz et à cycle vapeur combinés (CCC).

Schéma illustrant ce principe



Principes fondamentaux valables pour les types 1 et 2

Couplage chaleur-force (CCF): cette centrale thermique produit simultanément et à priorité égale de l'électricité ET de la chaleur utile. Les rejets de chaleur des machines de combustion (le plus souvent des moteurs à piston, mais aussi des moteurs Stirling, des piles à combustibles ou encore des turbines à gaz) sont utilisés, sans diminution du rendement électrique. Ces installations CCF sont dimensionnées selon les besoins en chaleur, et non pas en fonction des besoins en électricité, pour permettre l'exploitation de la totalité de la chaleur produite.

La chaleur peut aussi être fournie par les processus liés au cycle de la vapeur et directement exploitée en tant que telle (découplage de la chaleur du cycle de vapeur), ce qui diminue le rendement électrique de l'installation. Selon la température et la quantité du prélèvement de vapeur, la diminution du rendement est toutefois en général de l'ordre d'un quart à un huitième seulement de la chaleur découplée. Se reporter au chapitre 6 pour plus de détails.

Compte tenu des expériences faites jusqu'à aujourd'hui, le terme d'installation CCF désigne, en Suisse, les installations de type 1.



4. Quel est la puissance des différentes centrales?

La puissance électrique des différentes centrales varie considérablement. Elle est présentée ci-après par ordre décroissant.

Les centrales CCF décentralisées (type 1) couramment disponible sur le marché se présentent sous forme de modules de production de courant et de chaleur complets, prêts à être raccordés. Elles sont pour la plupart équipées de moteurs à piston, mais aussi de petites turbines, de moteurs Stirling ou encore de piles à combustible.

Type de centrale	Puissance électrique maximale		Utilisation habituelle
	par unité	par installation Etat actuel	
Centrale nucléaire	300 à 1600 MW	1600 MW	En général, production d'électricité sans utilisation de chaleur. La chaleur rejetée après le cycle de vapeur est à une température trop basse pour être injectée dans un réseau de chaleur à distance.
Centrale à gaz	10 à 100 MW	500 MW	
Centrale à cycle combiné	100 à 500 MW	1600 MW	
"Grande" CCF (mazout)	1 à 17 MW	200 MW	Production d'électricité avec utilisation partielle ou totale de la chaleur.
"Grande" CCF (gaz)	1 à 16 MW	200 MW	
CCF de taille "moyenne" (gaz)	0,10 à 1 MW	10 MW	Production d'électricité avec utilisation totale de la chaleur.
CCF de taille "moyenne" (mazout)	0,10 à 1 MW	10 MW	
"Petite" CCF (gaz)	0,01 à 0,1 MW	1 MW	

Tableau 1: Centrales couramment vendues, puissances par module et par installation

La diversité des technologies permet des applications diversifiées. A titre de comparaison, la ville de Berne utilise en moyenne une puissance électrique de 200 MW.



5. Quelle est l'efficacité des différentes centrales?

L'efficacité est exprimée au moyen du rendement et du rendement annuel moyen, deux notions qu'il est utile de distinguer.

Le rendement est un rapport entre deux puissances. Le rendement thermique et le rendement électrique sont additionnés et divisés par la consommation de combustible pour donner le rendement global. Le rendement enregistre donc un moment du système dans un état donné de l'exploitation de ce système.

Le rendement annuel moyen est le rapport entre deux quantités volumes d'énergie sur une un intervalle de temps, en général une année. Ainsi, le rendement annuel moyen est la division des énergies thermique et électrique produites annuellement divisées par l'énergie fournie par le combustible consommé annuellement.

Le rendement électrique et le rendement annuel moyen qui lui est associé peuvent varier fortement selon la taille et le type d'une installation. Les caractéristiques énergétiques des différentes technologies sont présentées ci-après. Elles s'appliquent aux systèmes couramment vendus et correspondent à l'état des techniques disponibles en 2007. Le rendement annuel moyen est la moyenne annuelle de l'énergie électrique produite divisée par la consommation d'énergie primaire de la totalité de l'installation, c'est-à-dire y compris la consommation par les auxiliaires et les agrégats annexes.

Type de centrale	Rendement annuel moyen Etat actuel		Commentaire
	Minimum	Maximum	
Centrale nucléaire	30 %	35 %	La chaleur rejetée de après le cycle de vapeur est à température trop basse pour être injectée dans un réseau de chaleur à distance.
Centrale à gaz	25 %	45 %	
Centrale à cycle combiné	45 %	58 %	
CCF de 1 à 20 MW	38 %	47 %	Installations de type 1, page 5.
CCF de 0,1 à 1 MW	30 %	41 %	Les valeurs dépendent du combustible (gaz ou mazout) et de la taille de l'agrégat.
CCF de moins de 0,1 MW	20 %	35 %	

Tableau 2: Centrales couramment vendues, rendement annuel moyen annuel par classe de puissance, pour une production de courant maximale

Le rendement annuel moyen des installations CCF augmente avec la puissance électrique. Les rendements électriques annuels moyens des centrales nucléaires et des centrales à gaz sont les plus bas pour ces classes de puissance, alors que ceux des centrales à cycles combinés (CCC) sont les plus élevés.



6. Faut-il toujours utiliser les rejets de chaleur?

Comparer les données qui décrivent l'efficacité des différents types de centrales n'est pas aisé. Les chiffres sont de 58 % pour une centrale à cycle combiné (électricité, sans utilisation des rejets de chaleur), de 90 % pour une centrale CCF (électricité: 35 %, chaleur: 55 %) et de 100 % pour une chaudière à gaz (chaleur seulement, pas d'électricité). Quel est le système qui sera plus efficace qu'un autre? Peut-on tout simplement ajouter les différentes efficacités les unes aux autres?

Pour répondre à ces questions, précisons d'abord que les propriétés physiques des deux formes d'énergie que sont la chaleur et le courant diffèrent. Voici en quoi.

- Le courant, c'est-à-dire l'électricité, est très facile à transporter, sur des distances courtes ou longues. Il est aussi convertible à loisir, et presque sans déperdition, dans d'autres formes d'énergie: par un branchement de prise, on produit de la lumière, on chauffe de l'eau, on fait fonctionner un aspirateur, et la liste n'est pas close.
- La chaleur n'est pas facile à transporter sur de longues distances. Pour une puissance comparable à celle de l'électricité, il faut employer une infrastructure plus lourde (conduites destinées au chauffage à distance, isolation thermique, énergie de pompage). De surcroît, la convertir dans d'autres formes d'énergie n'est pas facile, ni très varié. Exemple: la transformation « en retour » de la chaleur d'un réseau de chauffage à distance d'une température de départ de 110 °C en électricité demande une technique compliquée pour un rendement de seulement 5 % au maximum!

La chaleur produite dans une centrale est utilisée le plus possible pour des processus internes, par exemple pour préchauffer les eaux d'alimentation du cycle de vapeur d'une centrale nucléaire ou d'une centrale à gaz, ou encore pour préchauffer le combustible et l'air de la chambre de combustion d'une CCC. Cette utilisation interne maximise le rendement annuel moyen. La température des rejets thermiques résiduels est trop basse – elle est de 30 à 35°C – pour être utilisable.

Pour être utilisable à l'extérieur, via un réseau de distribution de chaleur à distance – ou de proximité – la chaleur d'une centrale doit quitter celle-ci à une température de 110°C environ. Il n'est pas possible d'utiliser les rejets de chaleur à l'extérieur après le cycle vapeur mais dans le cycle ce qui diminue le rendement électrique.

La figure 1 ci-dessous présente le rendement annuel moyen en fonction de la part de chaleur utilisée pour une centrale à cycle combiné (CCC) (source pour les valeurs: [12]). Le maximum de chaleur utile (100%) est la quantité de chaleur provenant du cycle vapeur techniquement utilisable à 110°C, pour le chauffage à distance, sans chauffage d'appoint.

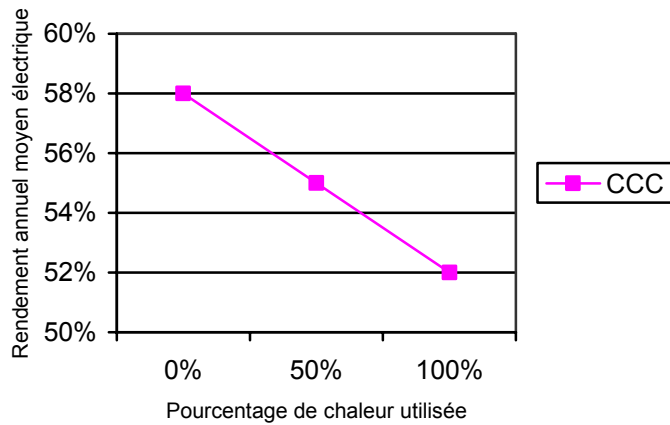


Figure 1: Rendement annuel moyen de l'électricité en fonction de la part de chaleur utilisée

Utiliser la chaleur diminue l'efficacité électrique. Les caractéristiques du cycle de vapeur limitent le rendement et le rendement annuel moyen thermique ou électrique à certaines valeurs maximales. La figure 2 ci-dessous présente le rendement annuel moyen total (électricité et chaleur) en fonction du rendement annuel moyen électrique.

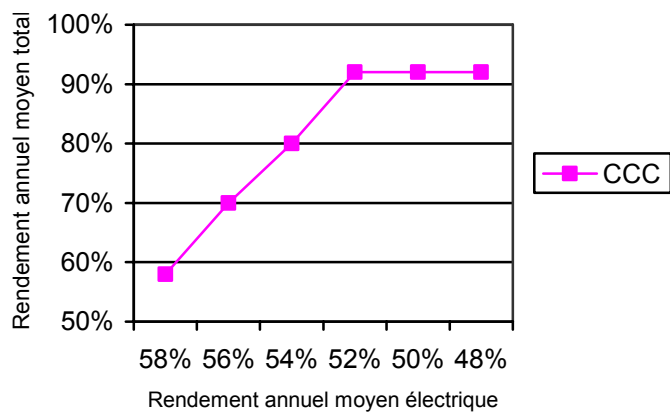


Figure 2: Rendement annuel moyen total (électricité et chaleur) en fonction du rendement annuel moyen de électrique

Lorsque le rendement annuel moyen électrique diminue, le rendement annuel moyen total augmente. Il atteint son maximum de 92 % lorsque le rendement annuel moyen électrique est de 52 %. Une diminution supplémentaire du rendement annuel moyen électrique n'apporte pas d'avantage énergétique.



Les deux conditions suivantes doivent être remplies un découplage efficace de la chaleur:

1. Il faut que suffisamment d'acheteurs soient à proximité de la centrale.
2. Les acheteurs doivent avoir besoin de chaleur au moment où la centrale est en fonctionnement. Les centrales fonctionnent entre 3500 et 5000 heures par année. Or la production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaires fonctionne 1800 à 2400 heures par année dont à peine 200 heures à pleine puissance.

La chaleur produite par une centrale ne peut donc couvrir que les besoins en ruban pour le chauffage de locaux et l'eau chaude sanitaire, ce qui correspond environ à un sixième de la pointe de puissance en hiver. Voici un exemple en chiffres: lorsque le découplage de la chaleur est optimal, une centrale à cycle combiné de 400 MW fournit suffisamment d'énergie de chauffage pour un demi-million d'habitants environ.

En Suisse, le nombre d'habitants vivant à proximité d'une centrale n'est en général pas suffisant. L'exploitation optimale de la chaleur à distance à des coûts raisonnables n'est guère réaliste. Il faut donc procéder à une analyse soignée des besoins en ce qui concerne le découplage de la chaleur produite par une CCC, une centrale au gaz ou une centrale nucléaire.

Toutefois, il est possible de produire de la chaleur au moyen de pompes à chaleur fonctionnant à l'électricité. Si le courant nécessaire provient d'une CCC sans production de chaleur, le volume net de courant injecté dans le réseau est diminué. La comparaison avec l'exploitation de la chaleur à distance est présentée dans la figure 3 ci-dessous.

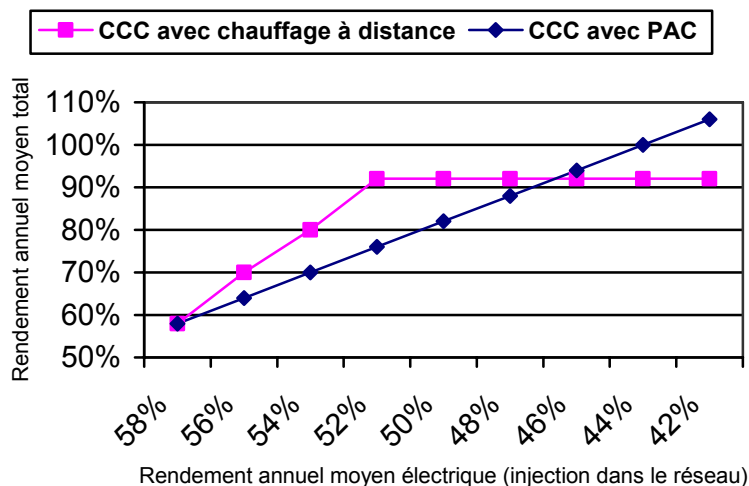


Figure 3: Rendement annuel moyen total (électricité et chaleur) en fonction du rendement annuel moyen électrique

Utilisant des pompes à chaleur actionnées à l'électricité, cette solution que nous qualifions d'indirecte est énergétiquement avantageuse dès qu'un tiers du courant provenant de la CCC alimente des pompes à chaleur. Cette solution est décrite plus en détail au chapitre 9.



7. Quels sont les effets principaux sur l'environnement?

L'exploitation d'une centrale nucléaire ne produit pour ainsi dire pas d'émissions de CO₂. L'uranium (combustible) et les déchets radioactifs qui en découlent doivent être traités puis stockés, ce qui requiert notamment des énergies d'origine fossile.

Les centrales brûlant des combustibles fossiles produisent divers polluants, du NO_x et de la suie, ainsi que le CO₂, un gaz à effet de serre, principalement. Traités techniquement, le NO_x et la suie sont facilement réductibles à des quantités négligeables. Pour le CO₂ par contre, les quantités approximatives suivantes restent, par kWh de courant produit: pour une CCC à gaz, 360 g; pour une centrale au gaz, 500 g; pour une centrale CCF à gaz 250 g; pour une centrale CCF à diesel 350 g (avec utilisation complète de la chaleur). Une centrale à charbon atteint environ 1000 g par kWh. Il est possible de diminuer l'impact sur l'environnement en adoptant les mesures ci-après, présentées par technologie.

- Centrale nucléaire: réduction des volumes et des déchets par des améliorations dans les processus. Le traitement puis le stockage final des déchets reste nécessaire;
- Centrale à cycle combiné et centrale à gaz:
 - o les processus de séparation et de capture du CO₂ (avec stockage dans des couches géologiques adaptées) permettent d'en éliminer jusqu'à 90%. La séparation s'effectue soit avant la combustion (par décarbonisation du gaz naturel puis combustion d'hydrogène pur), soit après la combustion (par séparation chimique dans les gaz d'échappement). Consommateurs d'énergie, ces deux processus diminuent le rendement annuel moyen total de 10 à 15 % (en chiffres absolus). On les abrège en général par le sigle CCS (de l'anglais *carbone capture and storage*).
 - o mélanger des combustibles bio à des combustibles fossiles (via le réseau de gaz ou sur place) peut faire diminuer les émissions de CO₂ jusqu'à 25 % (pour une grande CCC). Le rendement annuel diminue guère de 5 % environ en chiffres absolus.
- CCF: mélanger des combustibles bio à des combustibles fossiles (via le réseau de gaz ou sur place) peut faire diminuer les émissions de CO₂ jusqu'à 100 %. En raison de leur taille, les centrales CCF sont idéales pour l'utilisation sur place des combustibles biogènes.

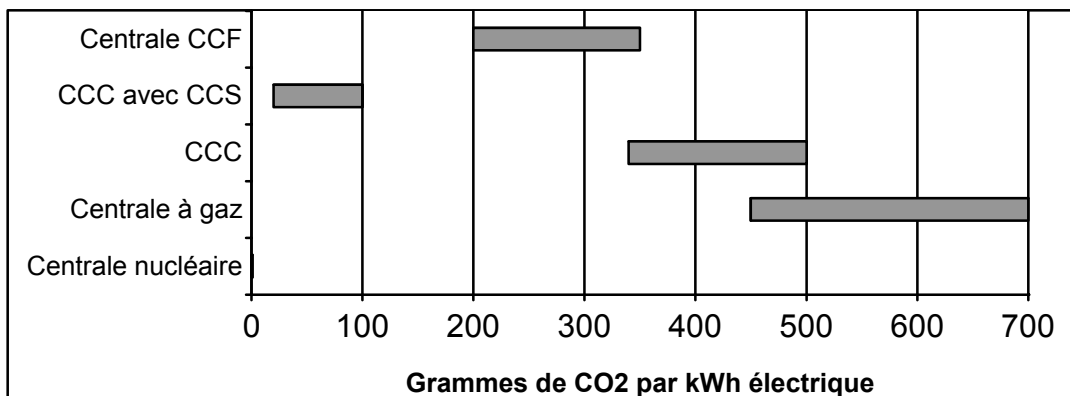


Figure 4: Fourchettes des émissions de CO₂, en gramme par kWh de courant, pendant l'exploitation



8. Quel est le prix du courant?

Le tableau ci-après présente les coûts de production du courant au départ d'une centrale.

Type de centrale	Coûts de production du courant, arrondis au demi centime (sans taxe sur le CO ₂ , cours du pétrole: 2006)	Facteur influençant le plus les coûts
Centrale nucléaire	4 à 5,5	Coûts des capitaux Durée de fonctionnement annuelle
Centrale à gaz	6,5 à 11	Prix des combustibles Durée de fonctionnement annuelle
CCC	5 à 6,5	
CCC avec CCS	7 à 11	
Centrale CCF de 1 à 20 MW	8 à 15	Prix des combustibles Durée de fonctionnement annuelle
Centrale CCF de 0,1 à 1 MW	10 à 15	
Centrale CCF de moins de 0,1 MW	13 à 28	

Tableau 3: Coûts de production du courant de différentes centrales

Une centrale nucléaire demande des investissements importants, les frais de capitaux sont donc élevés. Les frais de combustibles par contre sont relativement faibles. Une centrale nucléaire entraîne aussi des coûts de préparation de l'uranium et d'entreposage des déchets radioactifs. Pour une centrale à gaz, à mazout ou à charbon, les combustibles représentent 70 à 75 % des coûts annuels. Une centrale CCF a en général des frais d'entretien plutôt élevés, notamment en raison de la durée annuelle de leur fonctionnement. Les conditions de vente de la chaleur influencent fortement les coûts.

La prudence est de mise si l'on veut comparer des prix. L'électricité produite dans une grande centrale est en général injectée dans le réseau à haute tension. Elle est transportée jusqu'au consommateur final et transformée pour passer à une tension basse. Une centrale CCF produit du courant à une tension moyenne ou basse. Plus proche du consommateur final, elle occasionne moins de frais de transport et de transformation. Elle peut aussi contribuer à la production de pointe, ce qui peut avoir des répercussions financières positives pour l'exploitation.

Souvent, des remarques valables en général ne sont donc pas applicables à un cas d'espèce. Il convient de procéder systématiquement à une analyse et à une appréciation soignées des besoins du consommateur et de l'environnement du producteur.



9. Comment compenser le CO₂ émis par la production d'électricité au moyen de combustibles fossiles?

Pour compenser le CO₂ émis par la production d'électricité au moyen de combustibles fossiles, le plus simple est d'agir là où beaucoup de CO₂ est produit, et là où des solutions existent. Autrement dit, là où il y a du chauffage.

En Suisse, la chaleur à basse température qui est utilisée pour la production de chaleur ambiante et d'eau chaude sanitaire est fournie à 80 % par la combustion. En 2000, un million de chaudières à gaz ou à mazout étaient en fonctionnement en Suisse. Elles généraient près de la moitié des 41,1 millions de tonnes de CO₂ émises dans le pays. Le CO₂ émis pour la production d'électricité au moyen de combustibles fossiles peut être très facilement compensé par la substitution et/ou l'ajout, dans le parc actuel de chaudières à gaz ou à mazout, de pompes à chaleur, de chaudières à bois ou de collecteurs solaires/solaires thermiques.

Voici comment la forme que peut prendre la substitution. La figure ci-dessous présente la production actuelle de la chaleur ambiante en Suisse.

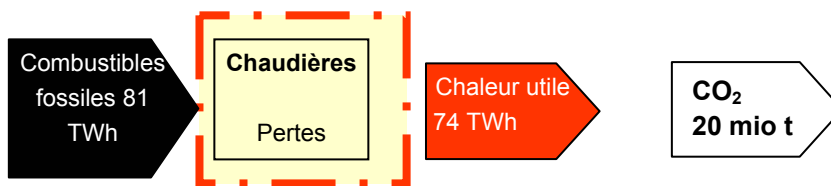


Figure 5: Production de chaleur utile au moyen des 800 000 chaudières à mazout et des 200 000 chaudières à gaz

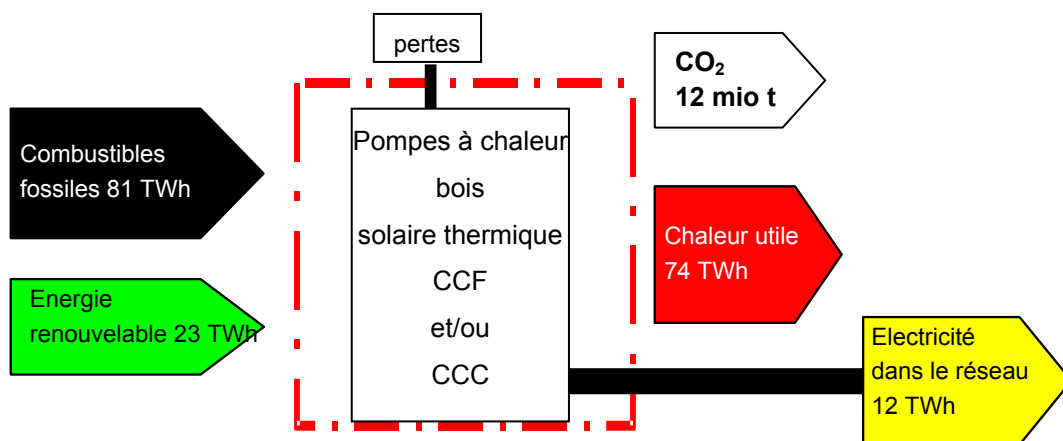


Figure 6: Substitution de chaudières à gaz ou à mazout par des systèmes de chauffage à énergies renouvelables combinés avec la production fossile d'électricité. Centrale CCF: couplage chaleur-force; CCC: centrale à cycle combiné (turbine à gaz – turbine à vapeur)



La quantité de chaleur utile est égale à celle de la chaudière avant substitution de la figure 5. Du courant supplémentaire est injecté dans le réseau. Le combustible est employé plus efficacement, les énergies renouvelables sont utilisées, les volumes de CO₂ sont diminués.

Le tableau 4 présente le principe de substitution du point de vue qualitatif.

Mesures	Effet sur les émissions de CO ₂	Effet sur la production d'électricité
Production fossile d'électricité par couplage chaleur-force et au moyen de centrales à cycle combiné	Augmentation	Forte augmentation
Production de chaleur et d'eau chaude sanitaire par des énergies renouvelables, plus particulièrement au moyen de pompes à chaleur, chauffages au bois et collecteurs solaires remplaçant des chaudières à gaz ou à mazout	Forte diminution	Diminution
BILAN	Diminution	Augmentation

Tableau 4: Principe de la substitution du chauffage fossile par du chauffage et de la production d'électricité fondés sur des énergies renouvelables

Penchons-nous maintenant sur les deux systèmes les plus efficaces, les centrales à cycle combiné (même sans utilisation des rejets thermiques) et le couplage chaleur-force, avec utilisation complète de la chaleur.

Figure 6: Substitution de chaudières à gaz ou à mazout par des systèmes de chauffage à énergies renouvelables combinés avec la production fossile d'électricité. Centrale CCF: couplage chaleur-force; CCC: centrale à cycle combiné (turbine à gaz – turbine à vapeur) présente les émissions de CO₂ par la production de chaleur au moyen de pompes à chaleur, en fonction du rendement annuel moyen de la production fossile de courant au moyen des deux systèmes.

Le chauffage par chaudière à gaz à condensation sert de référence. Pour le chauffage par pompe à chaleur, deux coefficients de performance annuels sont pris en compte, selon des mesures *in situ* [5]: 2,7 pour la transformation de chauffages existants et 3,5 pour de nouvelles constructions. Pour de futures installations, ces valeurs sont plutôt conservatrices.

Compte tenu du niveau technique des systèmes aujourd'hui les plus couramment en vente, on considère les plages de rendement électrique suivantes : 20 à 50 % pour le couplage chaleur-force et de 50 à 60 % pour les centrales à cycle combiné.

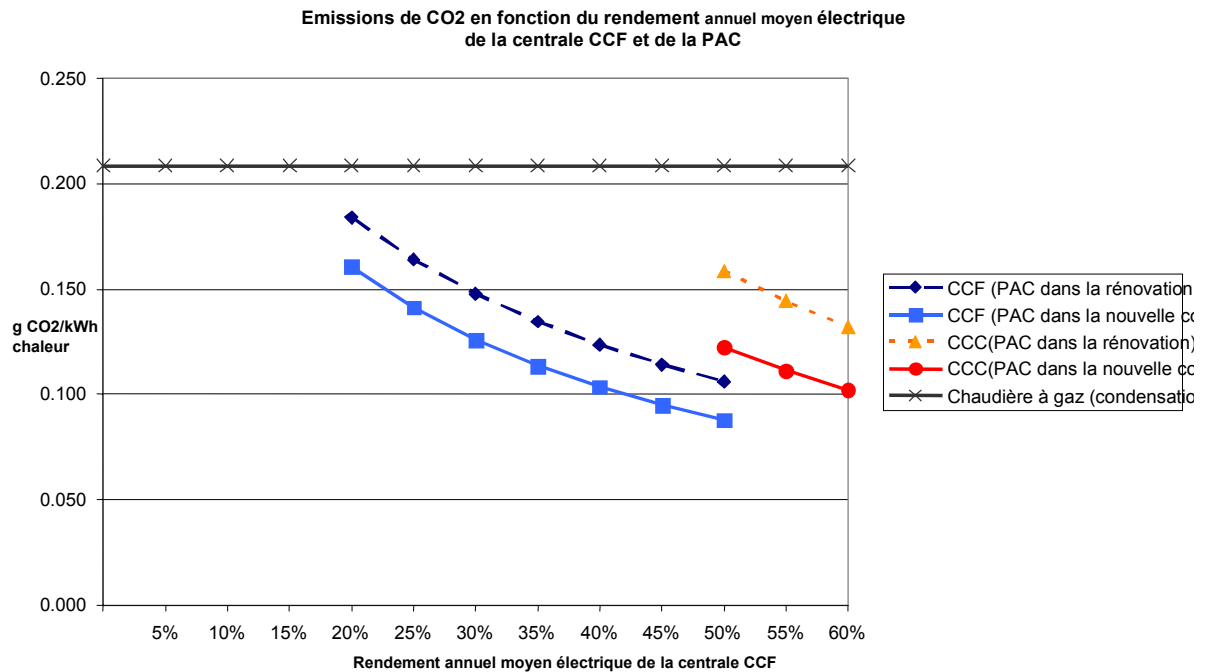


Figure 7: émissions de CO₂ en fonction du rendement annuel moyen de la production d'électricité. Centrale CCF: couplage chaleur-force avec utilisation complète de chaleur, CCC: centrale à cycle combiné (turbine à gaz – turbine à vapeur) sans utilisation de la chaleur, PAC: pompe à chaleur. Efficacité de la PAC: 2,7 pour les transformations, 3,5 pour les nouvelles constructions (source des valeurs: mesures *in situ* 1995-2003).

La figure 7 démontre que les installations de couplage chaleur-force dont le rendement annuel moyen est inférieur à 30 % ne présentent pas d'avantage par rapport aux centrales à cycle combiné (sans utilisation des rejets thermiques). Ceci correspond à une puissance électrique de 100 kW et une puissance thermique de 150 kW. L'hypothèse concernant l'efficacité des PAC est conservatrice: 2,7 pour les transformations et 3,5 pour les nouvelles constructions.

L'efficacité des installations à couplage chaleur-force dont la puissance thermique est comprise entre 150 et 5000 kW – et dont le rendement électrique est supérieur à 35 % - est systématiquement au moins aussi bonne, ou légèrement meilleure que celle des centrales à cycle combiné (sans utilisation des rejets de chaleur), pour autant que les émissions spécifiques de monoxyde d'azote (NO_x) soient portées au niveau de celles d'une chaudière. Pour cette classe de puissance, cette condition est techniquement simple et financièrement réaliste. Les centrales CCF de taille moyenne constituent de ce fait une troisième voie, s'ajoutant aux micro-centrales CCF, très décentralisées, et à la production centralisée des très grandes centrales.

L'utilisation de l'énergie renouvelable permet une diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de 30 % à 100 % selon le type de système, comme le montre le tableau 5.



Système de chauffage	Emissions de CO ₂ , en gramme par kWh de chaleur utile, état: 2007	Comparaison du CO ₂ émis (base: chaudière à mazout)
Chaudière à mazout	300	100 % (référence)
Chaudière à gaz	220	75 %
Pompe à chaleur, électricité d'une CCF fossile	90 à 180	30 à 60 %
Pompe à chaleur, électricité d'une CCC	100 à 160	33 à 53 %
Chaudière à bois	0	0 %
Energie solaire	0	0 %

Tableau 5: Intensité du CO₂ émis par divers systèmes de chauffage, avec comparaison sur la base des émissions d'une chaudière à mazout. Centrale CCF: couplage chaleur-force fossile, CCC: centrale à cycle combié (turbine à gaz – turbine à vapeur).
Efficacité de la PAC: 2,7 pour les transformations, 3,5 pour les pour les nouvelles constructions (source des valeurs: mesures *in situ* 1995-2003).

10. De combien de centrales avons-nous besoin?

Des mesures telles que le remplacement toutes les chaudières à gaz ou à mazout par des installations à couplage chaleur-force, des pompes à chaleur, des chaudières à bois ou des installations solaires d'une part, et l'amélioration des enveloppes de bâtiments d'autre part, offrent une multitude de combinaisons. Une combinaison des systèmes disponibles dans les différentes classes de puissance permet d'obtenir des résultats différents en matière de diminution des émissions de CO₂ tout en augmentant la production de courant.

Cinq variantes ont été calculées, elles sont présentées ci-après.

- a) Sans réduction de CO₂, mais avec augmentation de 50 % de la production d'électricité

Le but consiste à maximiser la production d'électricité sans augmenter les émissions de CO₂.

Mesures	Effet sur les émissions de CO ₂	Effet sur la production d'électricité
Production fossile d'électricité au moyen de 46'000 installations de couplage chaleur-force et de 7 centrales à cycle combiné	+ 14.4 millions t + 5.5 millions t	+ 22.5 TWh + 15.4 TWh
Production de chauffage et d'eau chaude sanitaire au moyen de 800 000 pompes à chaleur; 200 000 chauffages à bois et collecteurs solaires qui remplacent un million de chaudières.	- 20 millions t	- 9.3 TWh
200 000 chaudières sont maintenues et combinées avec des centrales CCF et des PAC pour couvrir les pointes de puissance	+ 0.1 millions t	0
BILAN	Neutral	+ 28.6 TWh



b) Réduction de 20 % du CO₂, augmentation de 20 % de la production d'électricité

Selon le sommet sur de Bali de 2008, la variante b) vise à réduire les émissions de CO₂ de 20% ce qui permet d'augmenter encore la production d'électricité de 20%.

Mesures	Effet sur les émissions de CO ₂	Effet sur la production d'électricité
Production fossile d'électricité au moyen de 30'000 installations de couplage chaleur-force et de 2 centrales à cycle combiné	+ 9.4 millions t + 1.6 millions t	+ 14.7 TWh + 4.3 TWh
Production de chauffage et d'eau chaude sanitaire au moyen de 600'000 pompes à chaleur; 400'000 chauffages à bois et collecteurs solaires remplacent un million de chaudières.	- 20 millions t	- 7 TWh
200 000 chaudières sont maintenues et combinées avec des centrales CCF et des PAC pour couvrir les puissances de pointe	+ 1 millions t	0
BILAN	- 8 millions t	+ 12 TWh

Cette variante correspond à l'exemple de la figure 6, page 16.

c) Réduction de 30 % du CO₂, sans augmentation de la production d'électricité

Il s'agit de la variante située à l'autre extrême part rapport à la variante a) : réduction maximale du CO₂ sans augmentation de la production d'électricité.

Mesures	Effet sur les émissions de CO ₂	Effet sur la production d'électricité
Production fossile d'électricité au moyen de 13 000 installations de couplage chaleur-force	+ 4 millions t	+ 6 TWh
Production de chauffage et d'eau chaude sanitaire au moyen de 500 000 pompes à chaleur; 500 000 chauffages à bois et collecteurs solaires remplacent un million de chaudières.	- 20 millions t	- 6 TWh
240 000 chaudières sont maintenues et combinées avec des centrales CCF et des PAC pour couvrir les puissances de pointe	+ 4 millions t	0
BILAN	- 12 millions t	Neutre



Les deux dernières variantes représentent des étapes intermédiaires entre aujourd'hui et la variante b) qui pourraient vraisemblablement être réalisée en 2020 déjà.

d) Réduction de 8% du CO₂, sans augmentation de la production d'électricité

L'électricité provient exclusivement de couplages chaleur-force.

Mesures	Effet sur les émissions de CO ₂	Effet sur la production d'électricité
Production fossile d'électricité au moyen de 10 000 installations de couplage chaleur-force	+ 3.1 millions t	+ 5 TWh
Production de chauffage et d'eau chaude sanitaire au moyen de 400 000 pompes à chaleur qui remplacent des chaudières	- 8.2 millions t	- 5 TWh
140'000 chaudières sont maintenues et combinées avec des centrales CCF et des PAC pour couvrir les puissances de pointe	+ 1.7 millions t	0
BILAN	- 3.4 millions t	Neutral

e) Réduction de 8% du CO₂, sans augmentation de la production d'électricité

L'électricité provient essentiellement de 2 centrales à cycle combiné et de quelques couplages chaleur-force

Mesures	Effet sur les émissions de CO ₂	Effet sur la production d'électricité
Production fossile d'électricité au moyen de 10 000 installations de couplage chaleur-force et de 2 centrales à cycle combiné	+ 3.1 millions t	+ 5 TWh
Production de chauffage et d'eau chaude sanitaire au moyen de 400 000 pompes à chaleur qui remplacent des chaudières	- 8.2 millions t	- 5 TWh
140'000 chaudières sont maintenues et combinées avec des centrales CCF et des PAC pour couvrir les puissances de pointe	+ 1.7 millions t	0
BILAN	- 3.1 millions t	Neutral

Les valeurs indiquées pour la production d'électricité par des centrales CCF, comprises entre 6 et 21 TWh, constituent-elles un potentiel réaliste?



La réponse est oui. Selon les perspectives de l'OFEN pour 2005, le potentiel de production d'électricité par des centrales CCF est compris entre 7,6 (scénario IV, variantes D & E) et 17,4 TWh (scénario III, variante D). Selon les variantes D & E du scénario III, il est de 12,1 TWh. Des études antérieures (PSI 2001, Dr. Eicher+Pauli AG 2003, Prognos AG 2003, Jochem & Jakob 2004), évaluent que le potentiel atteignable – c'est-à-dire techniquement réaliste – est compris entre 5 et 33 TWh.

Il existe de multiples façons d'associer les différentes technologies existantes. Les exemples ci-dessus montrent l'étendue des possibilités qui s'offrent pour remplacer le million de chaudières à gaz ou à mazout aujourd'hui en service.

Deux thèses opposées ont souvent été présentées par le passé: on produisait l'électricité soit de manière centralisée, au moyen d'un nombre restreint de centrales géantes, soit de manière décentralisée – presque dans chaque ménage – au moyen d'un très grand nombre de petites centrales. Or une voie médiane existe, celle des installations de couplage chaleur-force de puissance moyenne.

Les grandes centrales, de type cycle combiné ou nucléaire, couvrent les besoins en ruban du réseau. Les installations de couplage chaleur-force de puissance moyenne peuvent aussi assurer cette tâche. En lieu et place de quelques grandes centrales, de multiples unités – en nombre toutefois fini – fournissent l'électricité désirée en toute fiabilité. La puissance électrique de 3000 installations de couplage chaleur-force est d'environ 400 MW, ce qui correspond à une centrale à cycle combiné. Les deux peuvent se compléter dans le réseau.

La mise en réseau joue un rôle croissant, comme en témoigne de manière exemplaire le domaine de l'informatique: si, au début de leur développement, des unités centrales de traitement de l'information tendaient à être conçues pour être toujours plus puissantes, on améliore aujourd'hui la capacité de millions de petites unités en les reliant les unes aux autres au moyen d'Internet, ce qui crée un ordinateur virtuel dont la puissance n'est guère concevable pour une seule unité centrale.

De la même manière, l'approvisionnement en électricité pourra prendre la forme d'une centrale virtuelle. L'industrie électrique suisse dispose déjà d'un tel système décentralisé, jouant sur la complémentarité de différents types de centrales: à l'heure actuelle, l'électricité est produite dans plus de 2700 sites (installations reliées au réseau seulement). La Suisse constitue d'ores et déjà une centrale virtuelle, qui peut être agrandie et consolidée. Son réseau est employé de manière optimale: une production proche du consommateur diminue les infrastructures nécessaires, mais aussi les pertes dues au transport et à la transformation.

Les centrales CCF moyennes se fondent parfaitement dans un tel paysage: elles injectent du courant de tension moyenne, et non pas de tension basse. Elles diminuent les charges de pointe à proximité des consommateurs. L'utilisation du réseau existant est nettement améliorée, puisque des pointes locales sont gérables sans devoir étendre celui-ci. Enfin, les centrales de CCF sont situées à proximité des consommateurs de chaleur.



11. Abréviations

CCC	Centrale à cycle combiné (centrale à turbine à gaz et à turbine à vapeur)
CCS	carbon capture and storage, séparation et capture du CO ₂ avec stockage dans des couches géologiques adaptées)
g	Gramme
kg	Kilogramme
kW	Kilowatt. Unité de mesure de puissance égale à 1000 watts
kWh	Kilowattheure. Unité de mesure de l'énergie fournie par 1000 watts pendant une heure.
MW	Mégawatt (1 million de watts)
t	Tonne (1000 kg)
TW	Térawatt. Unité de mesure de puissance égale à 1 000 000 000 000 de watts, c'est-à-dire à un milliard de watts.
TWh	Térawattheure. Unité de mesure de l'énergie fournie par un térawatt pendant une heure.
CCF	Couplage chaleur-force
PAC	Pompe à chaleur



12. Bibliographie

- [1] Objectifs du programme SuisseEnergie, objectifs sectoriels et contributions cibles 2001 et 2002, OFEN, Berne, février 2004

Les données figurent aux chapitres 6.1, page 28, 3.4, page 12 et 3.3, page 11: la consommation d'énergie des combustibles fossiles pour le chauffage et la production d'eau chaude dans les immeubles d'habitation et de bureaux se monte au total à 223 670 + 67 413 = 291 083 TJ, ou 81 TWh environ. Objectif SuisseEnergie pour combustibles, total: 50 503 TJ ou 14 TWh. Objectif SuisseEnergie pour combustibles, contribution cible nécessaire des énergies renouvelables: 10'800 TJ ou 3 TWh.

- [2] Statistique globale suisse de l'énergie 2005, OFEN, Berne, août 2006
<http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr>
- [3] Emissions selon la loi sur le CO₂, OFEV
<http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/00494/00496/index.html?lang=fr>
- [4] Office fédéral de la statistique, recensement de la population 2000, chiffres-clés sur les bâtiments et les logements, sous http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/bau-_und_wohnungswesen.html.
- [5] Le couplage chaleur-force dans le programme SuisseEnergie, OFEN, août 2003 (réf. 003692950)
- [6] M. Ehrbar, M. Erb, P. Hubacher, analyse in situ d'installations de PAC (ANIS) 1996-2003, rapport final, avril 2004, ENET 240016
- [7] P. Hofer, A. Kirchner, M. Wunsch (Prognos), HU. Schärer (OFEN), Perspectives énergétiques, digression 16: Pompes à chaleur et électricité nécessaire pour produire de la chaleur, Berne, janvier 2007.
- [8] F. Rognon, Potentiel énergétique des pompes à chaleur combinées au couplage chaleur-force, OFEN, Berne, juin 2005
- [9] F. Rognon, Förderung der erneuerbaren Energien durch das Bundesamt für Energie: Ziele für Wärmepumpen und Umfeld für grosse Wärmepumpen, im Tagungsband der 9. UAW-Tagung vom 2002, ENET-Nr.220358
- [10] Martin Zogg, Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend, OFEN, mai 2002
- [11] R. Dettli, M. Baur, D. Philippen, M. Kernen, Potential erneuerbarer Energien in grösseren fossilen Feuerungen, BFE, Bern, Januar 2007
- [12] VDI-Berichte Nr. 1495, 1999, Seiten 95-111 und 1594, 2001, Seiten 99-112.
- [13] IEA heat pump programme, Heat pumps can cut global CO₂ emissions by nearly 8%, heat pump centre, Boras, 2008
- [14] Heat Pump & Thermal Storage technology Center of Japan, Heat Pumps long awaited way out of the global warming, The Denki Shimbun, Tokyo, 2007 (www.hptcj.or.jp)



13. Hypothèses

- Les calculs sont des potentiels, pas des prévisions.
- Par simplification, les calculs n'intègrent pas les contributions énergétiques des collecteurs solaires ou des améliorations apportées aux enveloppes de bâtiments. Les résultats sont donc conservateurs.
- Les puissances thermiques moyennes choisies pour les pompes à chaleur et les chaudières à bois tiennent compte d'études de potentiels et des Perspectives 2005 de l'OFEN. Les puissances moyennes posées comme hypothèses sont inférieures de 15 à 50 % de celles des chaudières actuelles. Explication: pour les grands objets, les pompes à chaleur sont exploitées en bivalence avec une chaudière.
- Le rendement thermique moyen choisi pour installations à couplage chaleur-force est choisi compte tenu des études de potentiels [6], [7], [9] et [10].
- La plupart des centrales à CCF fonctionnent en bivalence avec une chaudière: elles couvrent les besoins en énergie de ruban, la chaudière assure la couverture des moments de pointe. On prend donc l'hypothèse d'une exploitation annuelle de 3500 heures. L'énergie de chauffage produite est déterminante pour le nombre maximal de pompes à chaleur, de chaudières à bois et d'installations CCF. Cette énergie ne peut dépasser celle de la chaudière qu'elle remplace. Cette hypothèse limite principalement le nombre de centrales CCF.
- La puissance moyenne de la chaleur produite par les pompes à chaleur, les chaudières à bois et les installations CCF ne peut pas dépasser celle des chaudières qui sont remplacées.
- Les efficacités annuelles sont choisies de manière conservatrice, en particulier pour les pompes à chaleur. Explication: il s'agit surtout de rénovations de chauffages, sans changement en profondeur de l'enveloppe du bâtiment ou du système de distribution du chauffage.
- Tous les systèmes de chauffage sont dimensionnés selon la norme SIA: la production de chaleur couvre la totalité des besoins jusqu'à la température de dimensionnement (qui est en général de -8 °C sur le Plateau). Si la température passe au-dessous de cette référence, les besoins ne sont plus couverts: la température dans le bâtiment est inférieure à 20 °C , sans utilisation d'un autre chauffage. Mais l'expérience montre que les systèmes de chauffages réglés selon cette norme couvrent les besoins de chauffage jusqu'à une température de -10 °C (le calcul selon la norme est conservateur).
- Pour les installations à couplage chaleur-force, on présuppose que l'OPair92 est respectée, c'est-à-dire que les valeurs-limites du NOx sont les mêmes que pour les chaudières à bois.
- Pour les centrales à cycle combiné, les 5000 heures annuelles sont des heures à pleine puissance.



14. Calculs

Variante a) Sans réduction de CO₂, mais avec augmentation de 50% de la production d'électricité

Entrée:		cellules sur fond gris							
Pour 1 installation	1	2	3	4	5	6	7	8	
Type	Puissance thermique (kW)	Heure de fonctionnement par an (h/a)	Energie thermique [1]*[8] (kWh par an)	Emissions spécifiques de CO ₂ (gaz 0.198, huile EL 0.263) kgCO ₂ /kWh	Emissions de CO ₂ [3]*[4] (t par an)	Rendement annuel	Puissance électrique [1]/[6] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [7]*[2]	
PAC	20.0	1800	36000	0.000	0	3.10	-6.45	-11613	
Bois	35.0	1800	63000	0.000	0	0.90	0	0	
CCF	200	3500	700000	0.224	314	0.35	140	490000	
CCC	0	5500	0	0.198	792000	0.55	400000	220000000	
Chaudières	41	1800	73800	0.250	21	0.90			
Emissions spécifiques de CO ₂ des CCF: 60 % pour le gaz et 40 % pour le diesel				Emissions CO ₂ de toute la Suisse		41000000		mio t par année	
Emissions spécifiques de CO ₂ des chaudières: 20 % pour le gaz, 80 % pour le mazout				Consommation électrique totale CH		57.4		TWh	
Pour plusieurs installations:	10	11	12	13	14	15			
Besoins actuels	Nombre	Puissance thermique [1]*[10] (kW)	Energie thermique [3]*[10] (kWh par an)	Emissions de CO ₂ (t par an)	Puissance électrique [7]*[10] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [8]*[10]			
	1'000'000	41'000'000	73'800'000'000	20'500'000	0	0			
SUBSTITUTION:									
PAC	800'000	16'000'000	28'800'000'000	0	-5'161'290	-9'290'322'581			
Bois	200'000	7'000'000	12'600'000'000	0	0	0			
CCF	46'000	9'200'000	32'200'000'000	14'425'600	6'440'000	22'540'000'000			
CCC	7	0	0	5'544'000	2'800'000	15'400'000'000			
Somme des substitutions		32'200'000	73'600'000'000	19'969'600	4'078'710	28'649'677'419			
Chaudières d'appoint	214'634	8'800'000	200'000'000	50'000					
Réduction après substitution		0	0	-480'400	4'078'710	28'649'677'419			
En % de tout le pays				-1.2%		49.9%			
Puissance thermique moyenne PAC Bois CCF			31	kW					
Conso combustibles de CCF+CCC +chaudières d'appoint			92.6	TWh					
Conso combustible CCF+CCC +chaudières d'appoint			333.4	PJ					
Conso combustibles chaudières avant substitution			82.0	TWh					
Conso combustibles chaudières avant substitution			295.2	PJ					
Electricité nette dans réseau divisée par conso combustible			31.01%						



Variante b) réduction de 20% du CO₂, augmentation de 20% de la production d'électricité

Entrée: cellules sur fond gris								
Pour 1 installation								
Type	1	2	3	4	5	6	7	8
	Puissance thermique (kW)	Heure de fonctionnement par an (h/a)	Energie thermique [1]*[8] (kWh par an)	Emissions spécifiques de CO ₂ (gaz 0.198, huile EL 0.263) kgCO ₂ /kWh	Emissions de CO ₂ [3]*[4] (t par an)	Rendement annuel	Puissance électrique [1]/[6] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [7]*[2]
PAC	20.0	1800	36000	0.000	0	3.10	-6.45	-11613
Bois	35.0	1800	63000	0.000	0	0.90	0	0
CCF	200	3500	700000	0.224	314	0.35	140	490000
CCC	0	5500	0	0.198	792000	0.55	400000	2200000000
chaudières	41	1800	73800	0.250	21	0.90		
Emissions spécifiques de CO ₂ des CCF: 60 % pour le gaz et 40 % pour le diesel				Emissions CO ₂ de toute la Suisse		41000000		mio t par année
Emissions spécifiques de CO ₂ des chaudières: 20 % pour le gaz, 80 % pour le mazout				Consommation électrique totale CH		57.4		TWh
Pour plusieurs installations:								
	10	11	12	13	14	15	Energie	
	Nombre	Puissance thermique [1]*[10] (kW)	Energie thermique [3]*[10] (kWh par an)	Emissions de CO ₂ (t par an)	Puissance électrique [7]*[10] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [8]*[10]		
Besoins actuels	1'000'000	41'000'000	73'800'000'000	20'500'000	0	0		
SUBSTITUTION:								
Bedarf Gebäude ändert um (minus = Reduktion)	0%	0	0	0				
PAC	600'000	12'000'000	21'600'000'000	0	-3'870'968	-6'967'741'935		
Bois	400'000	14'000'000	25'200'000'000	0	0	0		
CCF	30'000	6'000'000	21'000'000'000	9'408'000	4'200'000	14'700'000'000		
CCC	2	0	0	1'584'000	800'000	4'400'000'000		
Somme des substitutions		32'000'000	67'800'000'000	10'992'000	1'129'032	12'132'258'065		
Chaudières d'appoint	219'512	9'000'000	6'000'000'000	1'500'000				
Réduction après substitution		0	0	-8'008'000	1'129'032	12'132'258'065		
En % de tout le pays				-19.5%		21.1%		
Puissance thermique moyenne PAC_Bois_CCF			31	kW				
Conso combustibles de CCF+CCC+chaudières d'appoint			56.7	TWh				
Conso combustible CCF+CCC+chaudières d'appoint			204.0	PJ				
Conso combustibles chaudières avant substitution			82.0	TWh				
Conso combustibles chaudières avant substitution			295.2	PJ				
Electricité nette dans réseau divisée par input combustible			24.26%					



Variante c) réduction de 30% du CO₂, sans augmentation de la production d'électricité

Entrée: cellules sur fond gris		1	2	3	4	5	6	7	8	
Type	Puissance thermique (kW)	Heure de fonctionnement par an (h/a)	Energie thermique [1]*[8] (kWh par an)	Emissions spécifiques de CO ₂ (gaz 0.198, huile EL 0.263) kgCO ₂ /kWh	Emissions de CO ₂ [3]*[4] (t par an)	Rendement annuel	Puissance électrique [1]/[6] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [7]*[2]		
PAC	22.0	1800	39600	0.000	0	3.10	-7.10	-12774		
Bois	35.0	1800	63000	0.000	0	0.90	0	0		
CCF	200	3500	700000	0.224	314	0.35	140	490000		
CCC	0	5500	0	0.198	792000	0.55	400000	2200000000		
chaudières	41	1800	73800	0.250	21	0.90				
Emissions spécifiques de CO ₂ des CCF: 60 % pour le gaz et 40 % pour le diesel				Emissions CO ₂ de toute la Suisse			41000000		mio t par année	
Emissions spécifiques de CO ₂ des chaudières: 20 % pour le gaz, 80 % pour le mazout				Consommation électrique totale CH			57.4		TWh	
Pour plusieurs installations:		10	11	12	13	14	15			
	Nombre	Puissance thermique [1]*[10] (kW)	Energie thermique [3]*[10] (kWh par an)	Emissions de CO ₂ (t par an)	Puissance électrique [7]*[10] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [8]*[10]				
Besoins actuels	1'000'000	41'000'000	73'800'000'000	20'500'000	0	0				
SUBSTITUTION:										
Bedarf Gebäude ändert um (minus = Reduktion)										
PAC	0%	0	0	0	-3'548'387	-6'387'096'774				
Bois	500'000	11'000'000	19'800'000'000	0	0	0				
CCF	13'000	2'600'000	9'100'000'000	4'076'800	1'820'000	6'370'000'000				
CCC	0	0	0	0	0	0				
Somme des substitutions		31'100'000	60'400'000'000	4'076'800	-1'728'387	-17'096'774				
Chaudières d'appoint	241'463	9'900'000	13'400'000'000	3'350'000						
Réduction après substitution		0	0	-13'073'200	-1'728'387	-17'096'774				
En % de tout le pays				-31.9%		0.0%				
Puissance thermique moyenne PAC_Bois_CCF		31		kW						
Conso combustibles de CCF+CCC+chaudières d'appoint		33.1		TWh						
Conso combustible CCF+CCC+chaudières d'appoint		119.1		PJ						
Conso combustibles chaudières avant substitution		82.0		TWh						
Conso combustibles chaudières avant substitution		295.2		PJ						
Electricité nette dans réseau divisée par input combustible				-0.09%						



Variante d) réduction de 8% du CO₂, sans augmentation de la production d'électricité

Entrée: cellules sur fond gris								
Pour 1 installation								
Type	Puissance thermique (kW)	Heure de fonctionnement par an (h/a)	Energie thermique [1]*[8] (kWh par an)	Emissions spécifiques de CO ₂ (gaz 0.198, huile EL 0.263) kgCO ₂ /kWh	Emissions de CO ₂ [3]*[4] (t par an)	Rendement annuel	Puissance électrique [1]/[6] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [7]*[2]
PAC	22.0	1800	39600	0.000	0	3.10	-7.10	-12774
Bois	35.0	1800	63000	0.000	0	0.90	0	0
CCF	200	3500	700000	0.224	314	0.35	140	490000
CCC	0	5500	0	0.198	792000	0.55	400000	220000000
chaudières	41	1800	73800	0.250	21	0.90		
Emissions spécifiques de CO ₂ des CCF: 60 % pour le gaz et 40 % pour le diesel				Emissions CO ₂ de toute la Suisse		41000000		mio t par année
Emissions spécifiques de CO ₂ des chaudières: 20 % pour le gaz, 80 % pour le mazout				Consommation électrique totale CH		57.4		TWh
Pour plusieurs installations:								
	Nombre	Puissance thermique [1]*[10] (kW)	Energie thermique [3]*[10] (kWh par an)	Emissions de CO ₂ (t par an)	Puissance électrique [7]*[10] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [8]*[10]		
Besoins actuels	400'000	16'400'000	29'520'000'000	8'200'000	0	0		
SUBSTITUTION:								
Bedarf Gebäude ändert um (minus = Reduktion)	0%	0	0	0				
PAC	400'000	8'800'000	15'840'000'000	0	-2'838'710	-5'109'677'419		
Bois	0	0	0	0	0	0		
CCF	10'000	2'000'000	7'000'000'000	3'136'000	1'400'000	4'900'000'000		
CCC	0	0	0	0	0	0		
Somme des substitutions		10'800'000	22'840'000'000	3'136'000	-1'438'710	-209'677'419		
Chaudières d'appoint	136'585	5'600'000	6'680'000'000	1'670'000				
Réduction après substitution		0	0	-3'394'000	-1'438'710	-209'677'419		
En % de tout le pays				-8.3%		-0.4%		
Puissance thermique moyenne PAC Bois CCF				26	kW			
Conso combustibles de CCF+CCC+chaudières d'appoint			21.4	TWh				
Conso combustible CCF+CCC+chaudières d'appoint			77.1	PJ				
Conso combustibles chaudières avant substitution			32.8	TWh				
Conso combustibles chaudières avant substitution			118.1	PJ				
Electricité nette dans réseau divisée par input combustible				-1.50%				



Variante e) réduction de 8% du CO₂, sans augmentation de la production d'électricité

Entrée: cellules sur fond gris								
Pour 1 installation								
Type	Puissance thermique (kW)	Heure de fonctionnement par an (h/a)	Energie thermique [1]*[8] (kWh par an)	Emissions spécifiques de CO2 (gaz 0.198, huile EL 0.263) kgCO2/kWh	Emissions de CO2 [3]*[4] (t par an)	Rendement annuel	Puissance électrique [1]/[6] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [7]*[2]
PAC	22.0	1800	39600	0.000	0	3.10	-7.10	-12774
Bois	35.0	1800	63000	0.000	0	0.90	0	0
CCF	200	3500	700000	0.224	314	0.35	140	490000
CCC	0	5500	0	0.198	792000	0.55	400000	2200000000
chaudières	41	1800	73800	0.250	21	0.90		
Emissions spécifiques de CO2 des CCF: 60 % pour le gaz et 40 % pour le diesel				Emissions CO2 de toute la Suisse		41000000		mio t par année
Emissions spécifiques de CO2 des chaudières: 20 % pour le gaz, 80 % pour le mazout				Consommation électrique totale CH		57.4		TWh
Pour plusieurs installations:								
	Nombre	Puissance thermique [1]*[10] (kW)	Energie thermique [3]*[10] (kWh par an)	Emissions de CO2 (t par an)	Puissance électrique [7]*[10] (kW)	Energie électrique par an (kWh) [8]*[10]		
Besoins actuels	400'000	16'400'000	29'520'000'000	8'200'000	0	0		
SUBSTITUTION:								
Bedarf Gebäude ändert um (minus = Reduktion)	0%	0	0	0				
PAC	400'000	8'800'000	15'840'000'000	0	-2'838'710	-5'109'677'419		
Bois	0	0	0	0	0	0		
CCF	1'000	200'000	700'000'000	313'600	140'000	490'000'000		
CCC	2	0	0	1'584'000	800'000	4'400'000'000		
Somme des substitutions		9'000'000	16'540'000'000	1'897'600	-1'898'710	-2'19'677'419		
Chaudières d'appoint	180'488	7'400'000	12'980'000'000	3'245'000				
Réduction après substitution		0	0	-3'057'400	-1'898'710	-2'19'677'419		
En % de tout le pays				-7.5%		-0.4%		
Puissance thermique moyenne PAC Bois CCF			22	kW				
Conso combustibles de CCF+CCC+chaudières d'appoint			23.8	TWh				
Conso combustible CCF+CCC+chaudières d'appoint			85.8	PJ				
Conso combustibles chaudières avant substitution			32.8	TWh				
Conso combustibles chaudières avant substitution			118.1	PJ				
Electricité nette dans réseau divisée par input combustible			-2.34%					