

Programme de recherche
Chaleur ambiante, rejets de chaleur et
couplage chaleur-force

Utilisation maximale de l'énergie primaire et réduction des rejets de CO₂ avec les systèmes de chauffage à pompe à chaleur

- **Systèmes de chauffage de plus grande efficacité thermodynamique**
- **Couplage chaleur-force ou centrale à cycle combiné?**
- **Rendement réalisable**
- **Bénéfices écologiques**
- **Potentiel d'amélioration**

élaboré par
Dr. Martin Zogg
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg

sur mandat de
l'Office fédéral de l'énergie

Avril 1999

Résumé

En Suisse, la chaleur basse température représente plus de 50 % de la demande d'énergie utile. A l'heure actuelle, la combinaison de grandes installations à couplage chaleur-force et de pompes à chaleur à compression (systèmes CCF-PAC) atteint déjà **des rendements égaux et supérieurs à 150 %** dans la production de chaleur basse température à partir de combustibles fossiles. Il en va de même pour les centrales à cycle combiné associées à des pompes à chaleur à compression (systèmes TAG-PAC). En revanche, les rendements des chaudières ne peuvent pas dépasser 100 %. Par conséquent, remplacer des chaudières par des systèmes de chauffage modernes à pompes à chaleur (CCF-PAC ou TAG-PAC) contribuerait à abaisser sensiblement la consommation de combustibles fossiles et les émissions de dioxyde de carbone.

L'énergie nécessaire au fonctionnement des installations à pompes à chaleur doit être prise de préférence sur la production d'électricité des **usines d'incinération des ordures** et sur les économies de courant résultant de la **substitution de pompes à chaleur à des chauffages électriques à résistances**. D'ici à l'an 2010, ces deux ressources parviendront à couvrir une grande partie de ces besoins [1]. Les considérations qui suivent s'appliquent à la demande résiduelle d'électricité pour les pompes à chaleur. On se limite à l'efficacité énergétique, et c'est délibérément qu'on n'aborde pas les aspects commerciaux et politiques.

La **zone délimitée pour dresser le bilan des systèmes de chauffage à pompe à chaleur analysés ci-après** est, pour les émissions polluantes également, un secteur dans lequel le courant électrique produit par toutes les unités à couplage chaleur-force correspond à la consommation totale des pompes à chaleur à compression (**système de chauffage à CCF-PAC à bilan électrique neutre**). Elle couvre l'ensemble de la Suisse parce qu'il n'est pas logique de l'étendre au-delà des frontières du territoire sur lequel il est possible d'agir sur le plan politique et technique.

Pour produire de la chaleur basse température à partir de combustibles en minimisant la consommation d'énergie primaire et, partant, la production de CO₂, il faut, en l'état actuel de la technique, s'en tenir aux thèses ci-après:

1. La production de chaleur basse température par la combinaison d'installations efficaces à couplage chaleur-force et de pompes à chaleur à compression modernes (**système CCF-PAC**) aboutit aujourd'hui déjà à des **économies de combustible** par rapport aux chaudières et réduit donc les émissions de CO₂ **de 35 à 50 %**¹
2. Pour réaliser cette économie substantielle de combustible, il faut que le **rendement électrique des installations à couplage chaleur-force atteigne au moins 33%**² et que les **pompes à chaleur à compression aient un coefficient de performance annuel d'au moins 3**.
3. Dans l'amélioration d'un système de CCF-PAC, **l'élévation du coefficient de performance annuel** revêt une priorité absolue.³

1 Rendements rapportés au **pouvoir calorifique inférieur** des combustibles utilisés.

2 Le coefficient de performance annuel du chauffage à pompe à chaleur a une grande incidence sur l'efficacité du système CCF-PAC. Cet élément comporte un **considérable potentiel d'amélioration**: voir "pour commande", figure 12.

4. S'il n'est pas possible d'installer un chauffage central approprié, des coefficients de performance annuels inférieurs à 3 sont autorisés lors du **remplacement de chauffages électriques à résistances en place dans des pièces individuelles** par des pompes à chaleur destinées également à chauffer ces pièces.
5. Les installations à CCF fonctionnant avec des **combustibles renouvelables** (bois, gaz d'épuration, gaz de décharge, biogaz, etc.) sont opportunes même si leur rendement électrique est inférieur à 33 %.
6. Les **centrales à énergie totale équipées de faible puissance** doivent également respecter l'ordonnance sur la protection de l'air et atteindre un rendement électrique de 33 % pour des rendements totaux d'au moins 90 %.⁴
7. Les **systèmes de chauffage CCF-PAC à bilan électrique neutre** permettent une utilisation maximale de la chaleur ambiante pour produire de la chaleur basse température. Par conséquent, ce sont eux qui **économisent le plus de combustible et réduisent le plus les émissions de CO₂**.
8. **Une production de courant par des installations à CCF efficaces** (fonctionnement CCF sans utilisation du courant par des pompes à chaleur) **dépassant la consommation propre des systèmes de chauffage CCF-PAC à bilan électrique neutre** est énergétiquement judicieuse si un fonctionnement en pompe à chaleur n'est pas réalisable, à cause des très hautes températures aller, s'il est difficile d'obtenir les sources de chaleur appropriées, ou si la chaleur est entièrement utilisée.⁵
9. Les installations à CCF fonctionnant au gaz naturel ne devraient pas dépasser les **valeurs limites d'émission** de l'ancienne ordonnance sur la protection de l'air (OPair92).⁶
10. Sous l'angle de l'énergie, la combinaison de **centrales à cycle combiné modernes sans récupération de chaleur** et de pompes à chaleur (système TAG-PAC) **équivalent** aux meilleurs systèmes de CCF-PAC à bilan électrique neutre.⁷

3 Parmi les **systèmes à piles à combustible** en cours de développement, on peut aussi escompter des rendements électriques supérieurs à 33 % même pour les petites unités, et cela, pour des émissions très faibles. En revanche, les **micro-centrales à énergie totale équipée** mises au point récemment et fonctionnant avec des moteurs à combustion classiques ou des moteurs stirling ont un rendement électrique bien inférieur aux 33 % requis. Si elles devaient tout de même s'imposer pour d'autres raisons (système de distribution de chaleur en place avec températures aller élevées, sources de chaleur problématiques pour la pompe à chaleur, infrastructure existante), il faudrait veiller à maintenir les émissions sous surveillance.

4 Le système de CCF-PAC à bilan électrique neutre se heurte à des limites lorsqu'il existe trop de systèmes de distribution de chaleur à très hautes températures aller chez les consommateurs à alimenter au moyen de pompes à chaleur, ou si l'obtention des sources de chaleur adéquates pose des problèmes. Pour couvrir la demande thermique des abonnés qu'il est difficile d'alimenter au moyen du système CCF-PAC à bilan électrique neutre, il est judicieux, sur le plan de l'énergie, de **produire du courant d'appoint au moyen de systèmes CCF efficaces**. En outre, le courant électrique devrait être produit à l'aide de centrales à cycle combiné de très haute efficacité afin de minimiser la consommation de combustible et de réduire au maximum les émissions de CO₂.

5 En vertu de la nouvelle OPair 98, les **émissions maximales admissibles d'oxydes d'azote** des CETE dépassent sensiblement celles des centrales à cycle combiné: figure 11. Respecter les dispositions de l'OPair 92 ne pose pas de problème sur le plan technique, mais bien sur le plan économique.

6 La combinaison de **centrales à cycle combiné modernes sans récupération de chaleur** et offrant des rendements électriques supérieurs à 55 % avec des pompes à chaleur (système TAG-PAC) atteint des rendements **tout à fait comparables** à ceux des meilleurs "systèmes CCF-PAC à bilan électrique neutre" (figure 7) – et ce, avec des émissions d'oxydes d'azote plus faibles en regard de l'OPair 98.

Un chauffage plus judicieux sur les plans thermodynamique et écologique

C'est une vérité de Lapalisse que de dire que les chaudières ne peuvent fournir à un consommateur (chauffage de locaux, production d'eau chaude sanitaire) que l'énergie (chaleur) libérée par la combustion: figure 1.

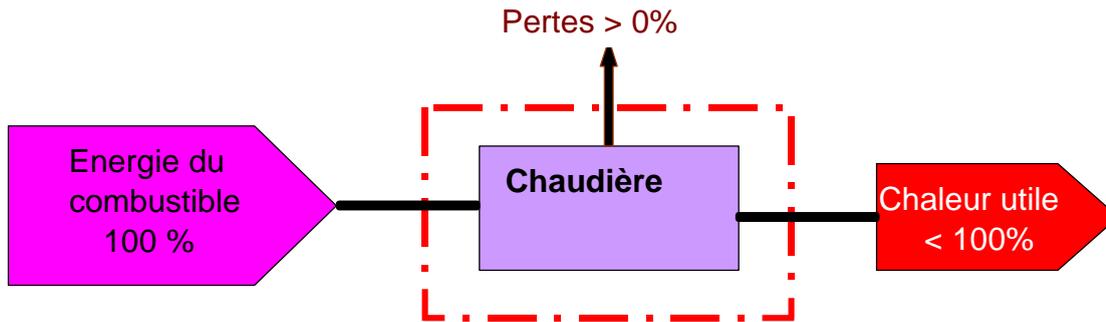


figure 1: Faible utilisation de l'énergie du combustible dans une chaudière.

Le rendement ou taux d'utilisation est le rapport entre la chaleur utile fournie au consommateur (système de chauffage des locaux, de production d'eau chaude sanitaire, chaleur industrielle basse température) et l'énergie fournie par le combustible:

$$\text{Rendement utile} = \frac{\text{chaleur utile dégagée}}{\text{énergie fournie par le combustible}}$$

Si l'on remplace la chaudière, comme indiqué à la figure 2, par un moteur à combustion qui entraîne le compresseur d'une pompe à chaleur par l'intermédiaire d'une transmission mécanique, il est possible d'atteindre des rendements supérieurs à 150%. Cela tient à l'utilisation de la chaleur ambiante par la pompe à chaleur. Toutefois ces systèmes à transmission mécanique de la puissance motrice de la machine à CCF (p.ex. moteur à combustion, turbine) jusqu'au compresseur de la pompe à chaleur sont peu flexibles à l'emploi et se sont révélés problématiques sur le plan mécanique (les deux machines ont des dynamiques différentes).

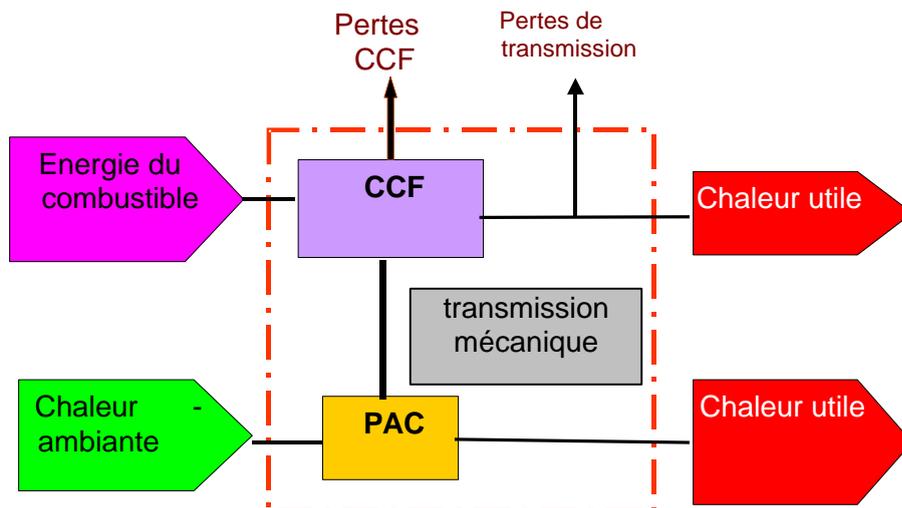


figure 2 : Combinaison d'une unité à CCF et d'une pompe à chaleur par l'intermédiaire d'une transmission mécanique (p.ex. moteur à combustion et compresseur de la pompe à chaleur en ligne directe sur un même arbre).

On obtient la solution la meilleure en remplaçant la transmission mécanique par une transmission électrique de l'énergie auxiliaire via une génératrice intégrée dans l'unité de CCF, puis le réseau électrique existant et des moteurs électriques incorporés aux pompes à chaleur: figure 3. Certes, il faut alors prendre en compte une légère réduction du rendement utile à cause des pertes dans la génératrice, les lignes électriques et le moteur électrique. Mais cette „faiblesse“ est compensée par la suppression des problèmes mécaniques liés au couplage direct de la pompe à chaleur ainsi que par la souplesse d'exploitation désormais possible.

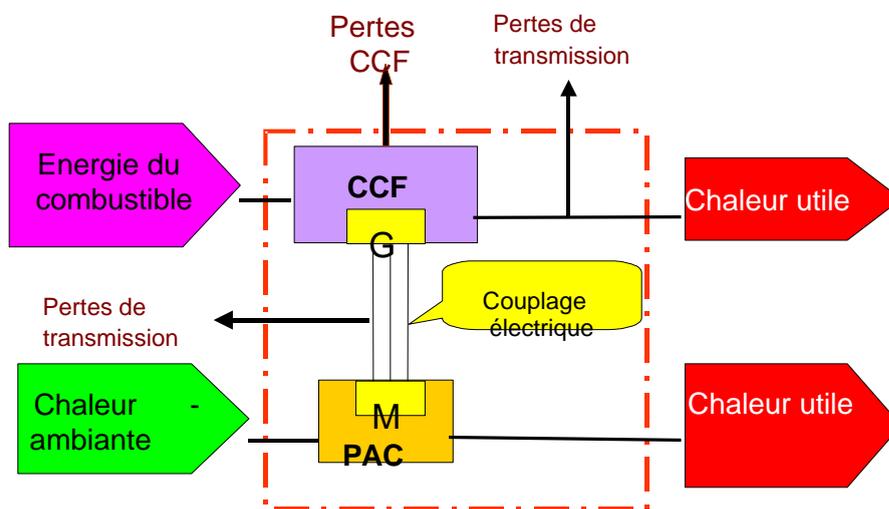


figure 3 : Combinaison d'une unité à CCF avec une pompe à chaleur par l'intermédiaire d'un couplage électrique.

La ou les pompes à chaleur peuvent être placées dans le même local que l'unité à CCF. En général, pourtant, le courant électrique produit est utilisé pour entraîner des pompes à chaleur externes. Bien sûr, on ne va pas tirer des lignes électriques spécifiques entre le CCF et les pompes à chaleur externes, mais utiliser le réseau en place. Le rendement utile et la réduction des émissions de CO₂ restent identiques, abstraction faite évidemment des légères pertes occasionnées par la transmission.

Lorsqu'il est question d'utiliser le réseau électrique public pour transmettre à des pompes à chaleur l'énergie produite par une unité à CCF, certains sceptiques relèvent que l'on devrait déterminer les émissions produites en considérant la production électrique globale. Seulement, la marge d'interprétation de la notion de "production électrique globale" est immense, puisqu'on peut y inclure le "mauvais" courant produit dans des pays d'Europe de l'Est à partir de la lignite, mais aussi le courant "propre" produit en Suisse par la force hydraulique, ainsi que tout l'éventail de combinaisons entre ces deux extrêmes, en y ajoutant encore ou non la part du transit. En comparant les systèmes de chauffages de la figure 2 et de la figure 3, on comprend aisément que cela n'a absolument aucune importance puisqu'ils opèrent tous deux avec un bilan électrique neutre. Si l'on néglige les pertes - relativement faibles - de transmission électrique, on constate que les deux systèmes provoquent les mêmes émissions et sont donc écologiquement équivalents!

Couplage chaleur-force ou centrale à cycle combiné?

Nous allons maintenant expliquer plus en détail l'origine de la supériorité des systèmes de chauffage à pompes à chaleur à l'aide de trois exemples décrivant les associations CCF-PAC et centrales à cycle combiné-PAC (TAG-PAC). En premier lieu, nous considérons l'exemple d'une grande centrale moderne à énergie totale équipée affichant un rendement électrique de 35 % et un rendement total de 90 % en interconnexion avec des installations modernes à pompes à chaleur ayant un coefficient de performance annuel de 3,5: figure 4. A partir des 100 % de l'énergie contenue dans le combustible et de l'utilisation de 85 % de la chaleur ambiante, ce système CCF-PAC produit de la chaleur utile avec un rendement total de 174%. Dans ce calcul, on considère que la transmission de l'énergie électrique dans le réseau basse tension et vers les pompes à chaleur à proximité de la CETE (p.ex. dans une commune) est grevée d'une perte moyenne de 2,5%.

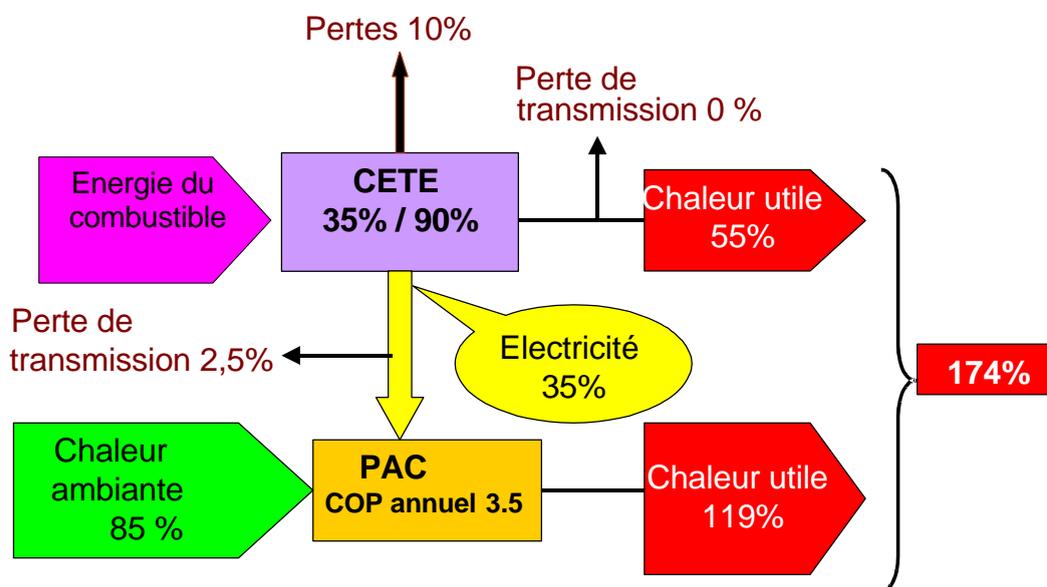


figure 4: Combinaison d'une centrale à énergie totale équipée et d'une pompe à chaleur à compression. Rendement total de la CETE 90%, rendement électrique 35%, coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur 3,5.

Si dans le système CCF-PAC, on remplace la centrale à énergie totale équipée par une centrale à cycle combiné, on peut même, à partir de la totalité de l'énergie du combustible, produire de la chaleur utile avec un rendement de 186 % : Figure 5. Cela quand bien même on admet que le rendement électrique de la centrale à cycle combiné est de 45 % seulement, que les pertes de transmission de la chaleur dans le réseau de chauffage à distance atteignent 10 % et que celles du transport de l'électricité dans le réseau haute tension sont de 7,5 % . L'exemple présenté est calculé en détail à l'annexe 2 de [2].

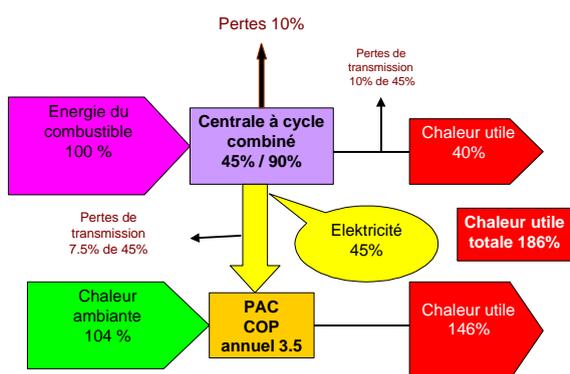


Figure 5: Système de chauffage d'une centrale à cycle combiné avec distribution de la chaleur par un réseau de chauffage à distance et des pompes à chaleur à compression. Rendement total 90%, rendement électrique 45%, coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur 3,5.

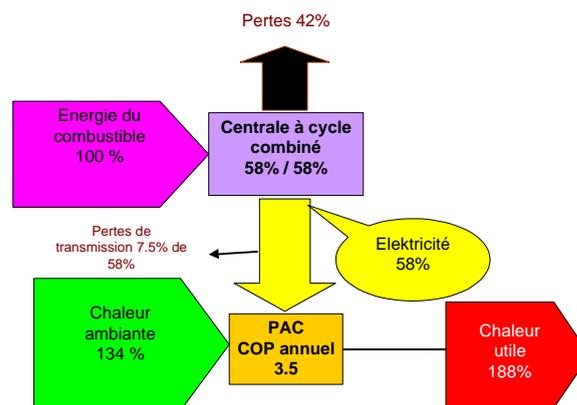


figure 6: Système de chauffage d'une centrale à cycle combiné sans récupération de chaleur. Rendement électrique 58%, coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur 3,5.

Plus le rendement électrique augmente, moins il est important d'utiliser les rejets thermiques de l'installation à CCF. Cela découle de l'importance primordiale qu'il y a d'utiliser au mieux l'exergie dans cette installation. Il n'est donc guère étonnant que l'on parvienne aussi à tirer d'une centrale à cycle combiné très efficace (installation à turbine à gaz et à vapeur TAG) des rendements utiles totaux très élevés même sans récupérer les rejets de chaleur: figure 6.

Rendement de systèmes de pompes à chaleur

La figure 7 étend les explications ci-dessus aux cas des combinaisons CCF-PAC et centrale à cycle combiné-PAC. Ce graphique confirme que la production centralisée de courant dans des centrales à cycle combiné reliées à des pompes à chaleur efficaces tire autant profit de l'énergie du combustible que de grandes centrales à énergie totale équipées (CETE) ayant des rendements électriques maxima de 40 %. En revanche, les petites CETE ayant un rendement électrique inférieur à 30% sont nettement moins favorables.

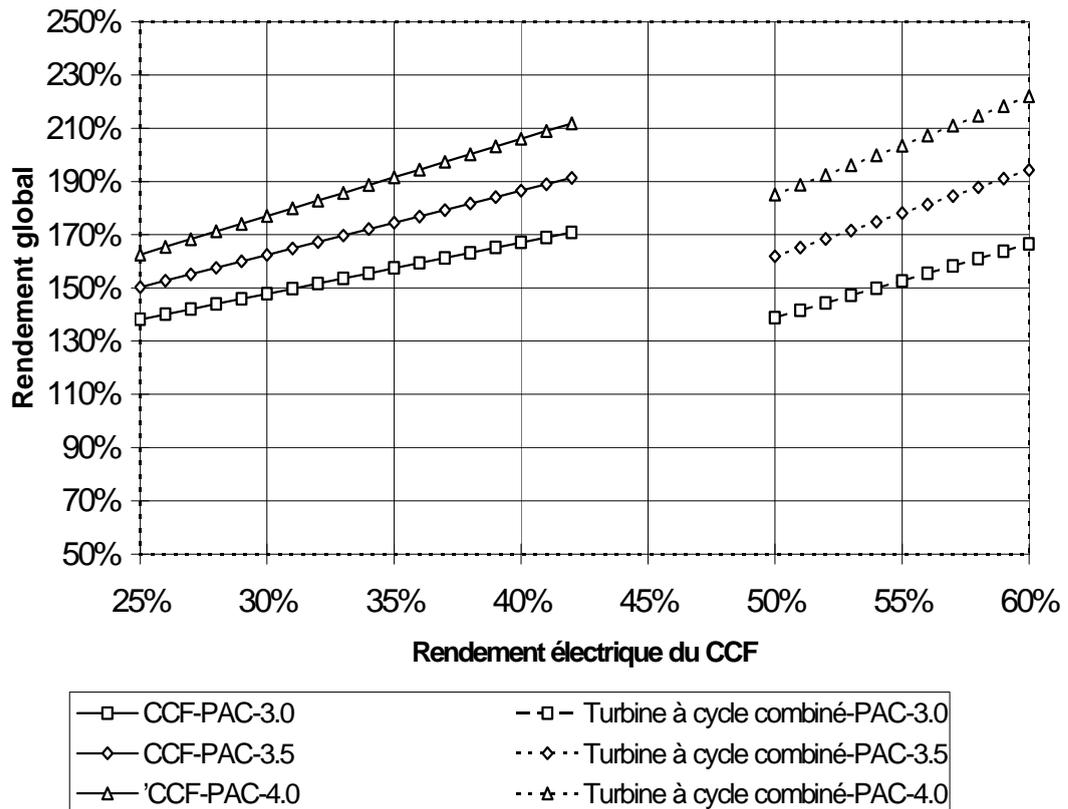


figure 7: Rendement total des systèmes de chauffage à pompes à chaleur pour la production décentralisée de courant dans une CCFE (groupe de courbes de gauche: rendement total 90%, pertes de transmission de l'électricité 2,5 %, pas de pertes dans la distribution de chaleur) et pour une production centralisée de courant dans une centrale à cycle combiné sans récupération de chaleur (groupe de courbes de droite: pertes de transmission de l'électricité 7,5%).

Comme le montre [5], on peut représenter d'une manière encore plus générale le rendement potentiel obtenu au moyen de systèmes de chauffage CCF-PAC: [figure 9](#). Dans ce graphique, on a reporté en abscisse les rendements électriques des unités de CCF et en ordonnée le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur. Les faisceaux de courbes indiquent le rendement utile du système CCF-PAC à bilan électrique neutre.

Un exemple permet de mieux comprendre comment utiliser ce diagramme. Admettons que le rendement électrique d'une installation de CCF est de 38 % et le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur à compression 3,2. Dans le graphique de la figure 8, on peut lire que le rendement total du système CCF-PAC est de 174 % sans les pertes de transmission. Dans une installation centrale distribuant le courant via le réseau haute tension (pertes de transmission électrique 7,5%) et la chaleur via le réseau de chauffage à distance (pertes de transmission thermique 7,5%), l'interpolation entre les faisceaux correspondants de courbes donne encore un rendement global de 161 %.

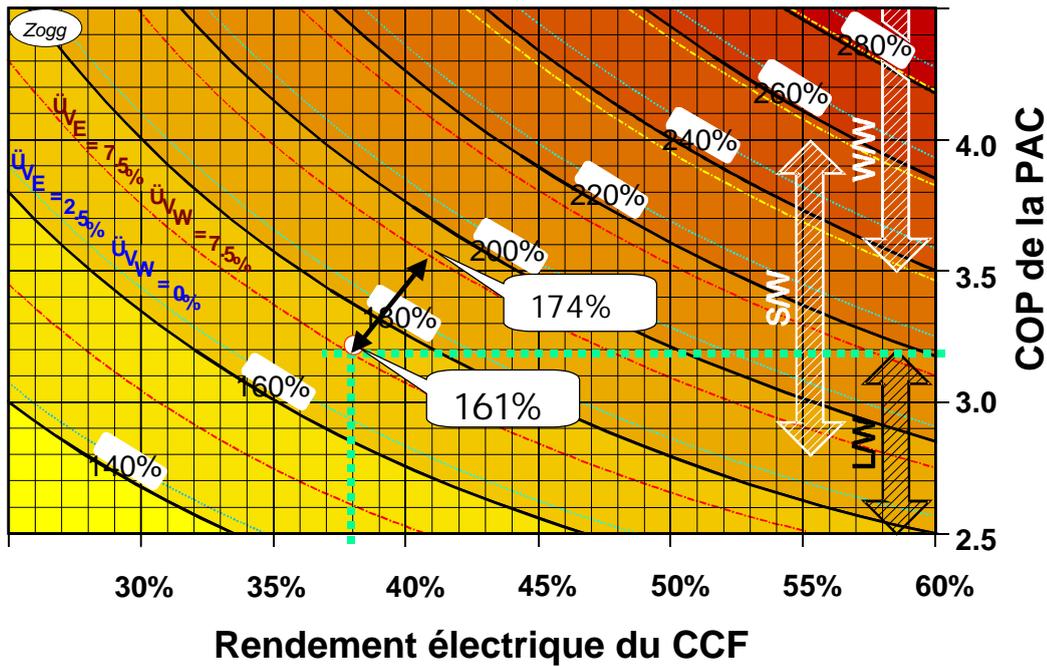


figure 8: Exemple d'application du diagramme du rendement utile selon la figure 9. A partir du rendement électrique du CCF, du coefficient de performance annuel (COP) de la PAC et des pertes de transmission électriques et thermiques, le diagramme donne le rendement global du système combiné.

La meilleure utilisation possible de l'énergie du combustible correspond à la partie supérieure droite du graphique de la figure 9. Pour aller dans la bonne direction, il faut donc élever le rendement électrique des installations à CCF ainsi que le coefficient de performance annuel des installations de chauffage à pompes à chaleur.

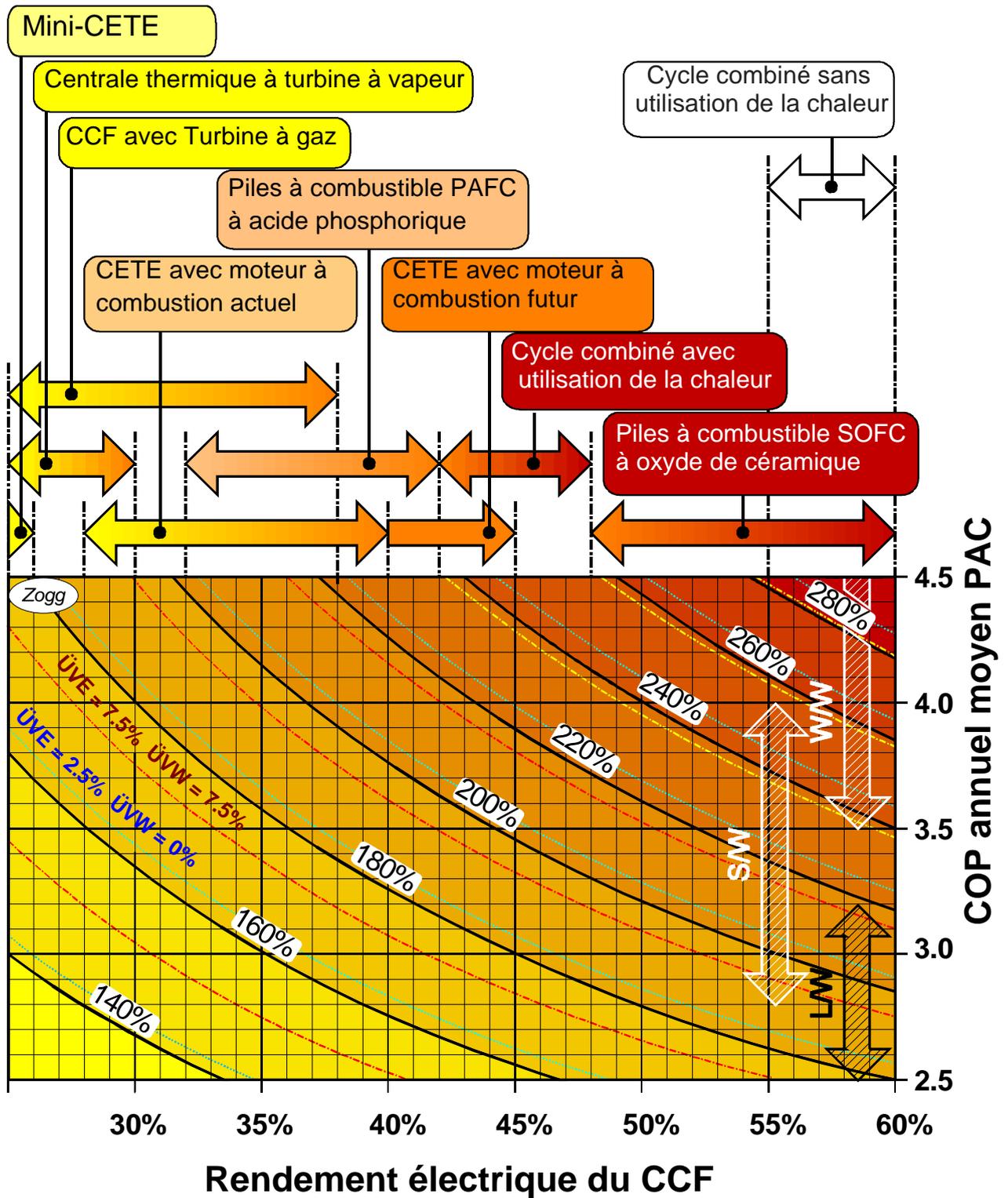


figure 9: Rendement de systèmes de chauffage CCF-PAC fonctionnant en bilan électrique neutre. Rendement total des installations à CCF 90 %. Lignes continues: sans pertes de transmission. Les courbes en traitillé fin s'appliquent aux centrales à énergie totale équipées chez le consommateur de chaleur (seulement 2,5% de pertes de transmission électrique [ÜVE] aux pompes à chaleur dans le voisinage) et pour les centrales à cycle combiné (7,5% pertes de transmission électriques [ÜVE] via le réseau haute tension et 7,5% de pertes de transmission thermiques [ÜVW] dans le réseau de chauffage à distance).

Bénéfices écologiques des systèmes de chauffage par pompes à chaleur

Il ne vient à l'idée de personne d'introduire dans son calcul une production électrique globale de quelque nature que ce soit pour évaluer l'écologie d'un système de CCF-PAC assorti d'une transmission mécanique du genre de celui de la figure 2. Dans le système PAC-CCF à bilan électrique neutre de la figure 3, les lignes du réseau électrique public – elles existent de toute manière – sont utilisées uniquement pour transmettre indirectement aux pompes à chaleur la puissance mécanique du moteur de l'unité de CCF. Le courant produit par les unités à CCF est consommé par les installations à PAC. Le système CCF-PAC à bilan électrique neutre est „électriquement autonome“. Il n'est donc assurément pas judicieux d'introduire une production électrique globale pour la simple raison que l'on remplace un arbre de transmission mécanique par un système de transmission électrique.

Parce que nous devons construire des unités à CCF et à PAC pour remplacer les chaudières, le périmètre du bilan décrit aux figures 2 et 3 est justifié. Mais pour la réalisation du système CCF-PAC à bilan électrique neutre, il est tout à fait sans intérêt de savoir si ce périmètre comporte seulement une unité CCF ou leur ensemble avec les pompes à chaleur correspondantes d'une zone d'action (p.ex. toute la Suisse).

Nous n'allons pas élaborer ici un bilan écologique complet du système CCF-PAC (voir [6]). Que ce soit pour les installations à CCF ou les pompes à chaleur, c'est de loin leur fonctionnement qui provoque les plus importantes atteintes à l'environnement. C'est pourquoi nous allons nous concentrer exclusivement sur les émissions de CO₂ (effet global) et d'oxydes d'azote (effet local). Il va de soi que le rendement du système CCP-PAC, sensiblement plus élevé que celui d'une chaudière, se traduit par une réduction de la consommation de combustible et, partant, de la production de dioxyde de carbone qui peut atteindre 50 % de la celle d'une chaudière: figure 10.

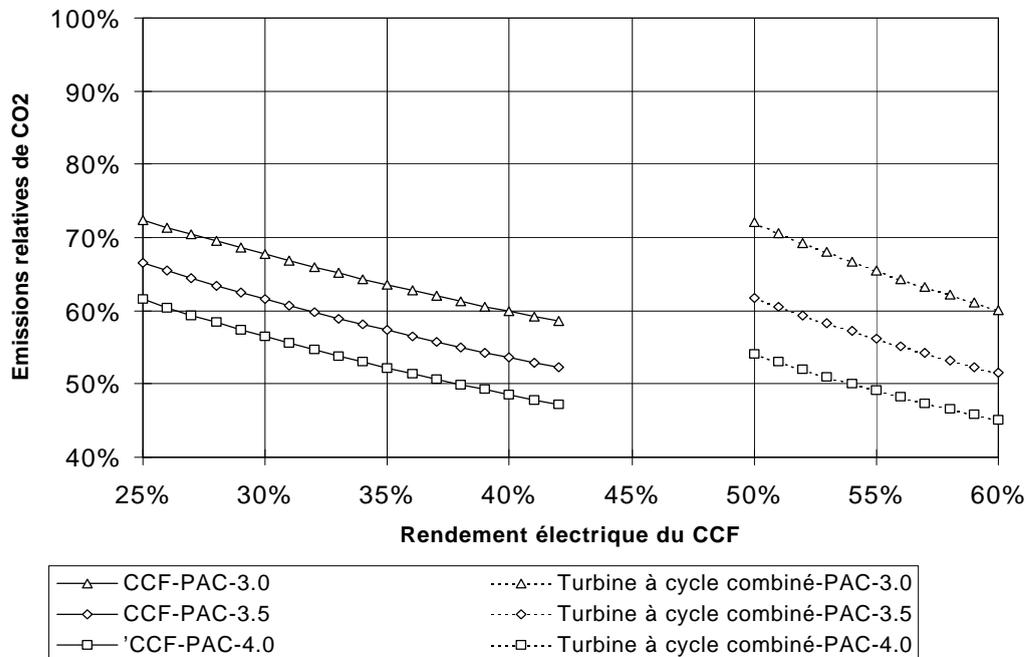


figure 10: Emissions de dioxyde de carbone des systèmes de chauffage à pompes à chaleur rapportées aux mêmes émissions d'une chaudière à gaz avec un rendement de 100% (rapporté au pouvoir calorifique inférieur) pour la production de la même quantité de chaleur utile. Paramètres identiques à ceux de la figure 7.

A production thermique égale, la consommation de combustible rapportée à celle d'une chaudière (avec un rendement de 100 % rapporté au pouvoir calorifique inférieur) et, par conséquent, la production de CO₂ est la valeur réciproque du rendement: [2], annexe 2). Les émissions d'oxydes d'azote des centrales à énergie totale équipées que tolère la nouvelle ordonnance sur la protection de l'air (OPair 98) [4] constitue un pas dans la mauvaise direction : figure 11

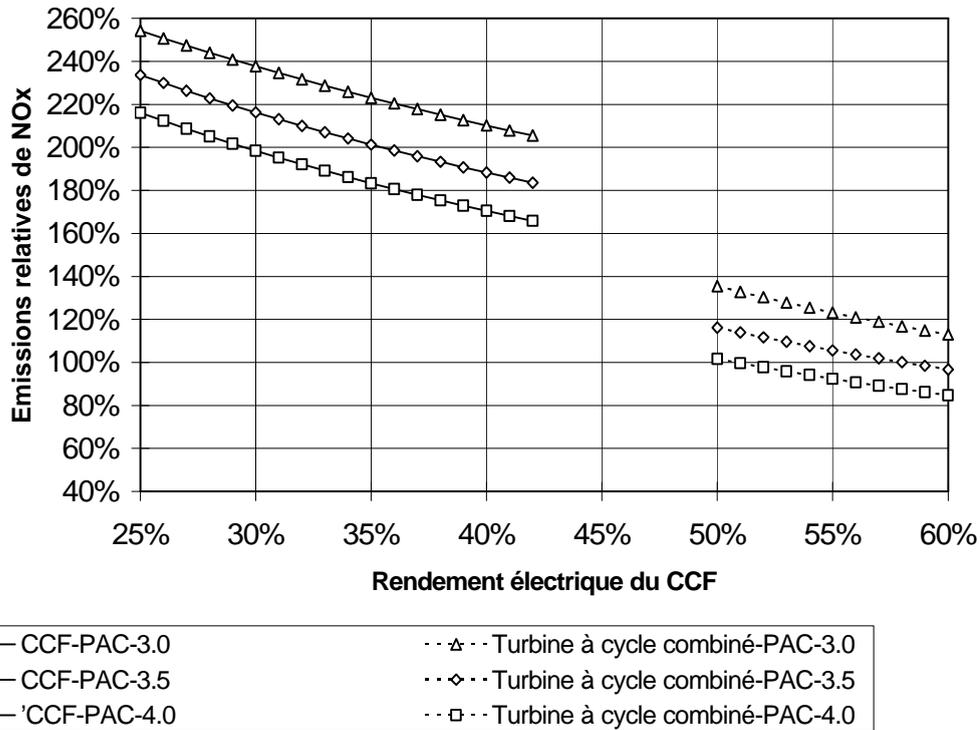


figure 11: Emissions maximales d'oxydes d'azote de systèmes de pompes à chaleur rapportées à la production d'oxydes d'azote d'une chaudière à gaz ayant un rendement de 100 % (rapporté au pouvoir calorifique inférieur) pour la production de la même quantité de chaleur utile. Base: valeurs limites d'émission selon l'OPair 98 tirées du tableau 1. Autres paramètres comme à la figure 7.

A production thermique équivalente, elles peuvent atteindre deux fois et demie celles d'une chaudière à gaz (exemple de calcul dans [2], annexe 3). Ce sont des considérations économiques qui ont malheureusement amené à tripler la valeur inscrite dans l'OPair 92 pour porter la nouvelle valeur limite à 250 mg/m_N³ pour 5 % vol. d'O₂. Les conséquences, certes favorables à la diffusion commerciale des CETE, sont:

- dans les moteurs à régime pauvre, un catalyseur à oxydation simple suffit pour réduire les émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures non brûlés et satisfaire aux nouvelles valeurs limites d'émission ;
- l'industrie du CCF met au point actuellement des systèmes fonctionnant sans catalyseur et répondant aux dispositions de l'OPair 98 ;
- on peut aussi renoncer à surveiller les émissions en service étant donné que nous avons toujours la réglementation la plus sévère d'Europe.

Pour notre part, nous constatons que la solution de la centrale à cycle combiné efficiente sans récupération de chaleur est clairement supérieure à la combinaison CETE-PAC pour ce qui est des émissions d'oxydes d'azote!

En outre, l'OPair 98 ne règle les émissions des moteurs stationnaires à combustion qu'à partir d'une puissance supérieure à 100 kW à l'arbre. Là où les prescriptions cantonales ne vont pas plus loin, des minicentrales à énergie totale équipée ne rendent pas seulement un mauvais service à l'efficacité énergétique, mais aussi à l'environnement. De telles centrales, de plus en plus commercialisées en Suisse, rejettent presque deux fois plus d'oxydes d'azote que les limites inscrites dans l'OPair 98! Les nouvelles valeurs limites ne sont donc acceptables que comme réglementation transitoire.

Dans le cadre du programme de recherche sur les CCF, l'Office fédéral de l'énergie cherche également de nouveaux types de moteurs à gaz sans catalyseurs produisant des émissions qui ne dépassent pas les nouvelles limites admises. Le tableau 1 montre les valeurs d'émission utilisées dans la figure 11.

Moteur à combustion pas de prescriptions pour les puissances calorifiques < 100 kW!	250 mg/m _N ³ à 5 vol % O ₂
Rapport à puissance calorifique (approximation pour le méthane)	282 mg/kWh
Turbine à gaz > 40 MW	50 mg/m _N ³ à 15 vol % O ₂
Rapport à puissance calorifique (approximation pour le méthane)	151 mg/kWh
Chaudière <= 350 kW	80 mg/m _N ³ à 3 vol % O ₂
Rapport à puissance calorifique (approximation pour le méthane)	80,3 mg/kWh

tableau 1: Emissions maximales d'oxydes d'azote selon l'OPair 98 [4], combustible utilisé: gaz naturel. Les valeurs rapportées à la puissance calorifique ont été calculées selon [2], annexe 3, par approximation pour le méthane.

Grand potentiel d'amélioration

Même la meilleure des chaudières ne peut produire que l'énergie (chaleur) qui lui est fournie par le combustible qui l'alimente. Comme il est impossible d'éviter des pertes, son rendement est toujours inférieur à 1. Il en va tout autrement du système CCF-PAC. Celui-ci exploite l'exergie de la combustion à des températures élevées [3] dans une machine thermique et entraîne ainsi des pompes à chaleur. Celles-ci "pompe" la chaleur ambiante jusqu'au niveau de température nécessaire et l'ensemble de ce processus permet d'atteindre des rendements supérieurs à 1.

La figure 12 illustre ce que l'on obtiendrait en combinant une installation idéale à couplage chaleur-force (machine de Carnot) avec une pompe à chaleur idéale (pompe à chaleur de Carnot) en admettant des processus de transmission idéaux. Pour une source de chaleur à la température de 1000 °C, une température dans la pièce de 20°C et une température ambiante de 0°C, des machines idéales sans pertes afficheraient des rendements supérieurs à 1100%. Cela signifie que ce système idéal de CCF-PAC permettrait de réduire de plus 90 % la consommation de combustible et les émissions de CO₂ en comparaison d'une chaudière idéale produisant la même quantité de chaleur! Cet exemple est présenté dans le détail dans [2], annexe 1. La figure montre également que la pompe à chaleur est l'élément qui contribue le plus, et de loin, à cette énorme revalorisation de la chaleur fournie par le combustible et que les rejets thermiques d'une installation idéale à CCF sont presque négligeables. Un fait que nous rencontrons aussi dans la combinaison réelle d'installations à CCF et de pompes à chaleur dont nous avons parlé plus haut. L'utilisation de l'exergie permet seulement d'utiliser la chaleur ambiante pour le chauffage des locaux. Le facteur déterminant est donc l'utilisation élevée de l'exergie du couplage chaleur-force (= rendement électrique élevé).

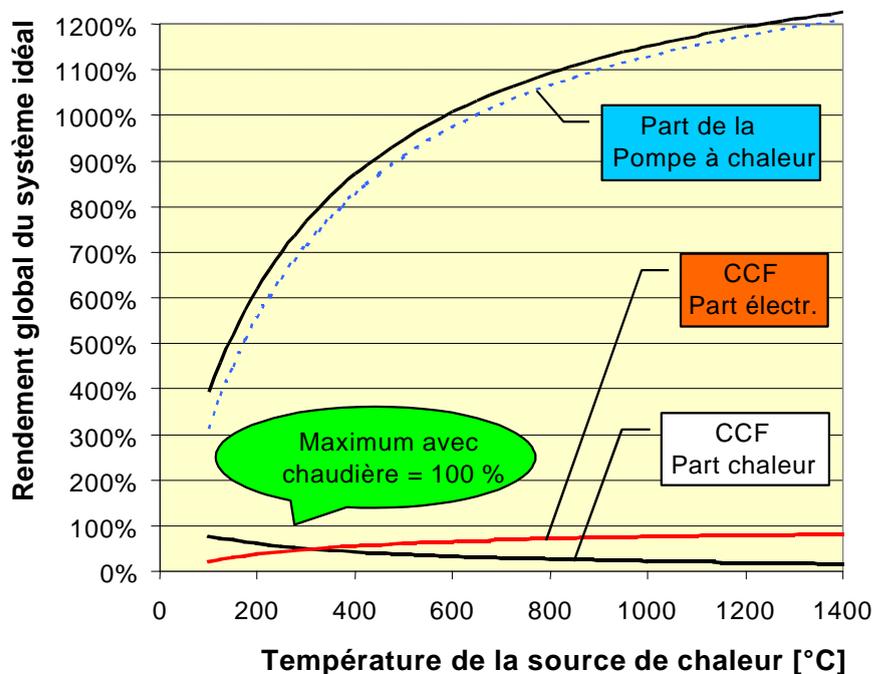


figure 12: Rendement de la combinaison d'une installation idéale à CCF et d'une pompe à chaleur idéale pour une température des locaux de 20°C et une température ambiante de 0° C.

Bibliographie

- [1] Rognon,F.: Bereichsplan 96-99, Umgebungwärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Office fédéral de l'énergie 1997, ENET-Nr. 610005/9.
- [2] Zogg, M.: Wärme-Kraft-Kopplung in Kombination mit Kompressionswärmepumpen, Tagungsband zur 5.UAW-Tagung "Wärme-Kraft-Kopplung - heute und morgen", Office fédéral de l'énergie 1998, ENET-Artikelnummer 30743 .
- [3] Baer, H.-D.: Thermodynamik, 8.Aufl., Springer-Verlag, Berlin u.a.O. 1992.
- [4] OPair 98: ordonnance du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air, modification du 15 décembre 1997.
- [5] Zogg, M.: Kleinsysteme für die Raumheizung - Nutzungsgrad über 150%?, Gas-Wasser-Abwasser, 76(96)3, 230/237.
- [6] Rognon, F.: Bilans écologiques des pompes à chaleur, Office fédéral de l'énergie 1998, <http://www.waermepumpe.ch/oek.html>