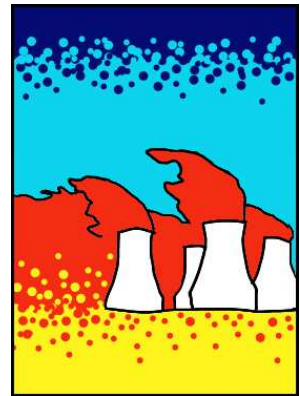


*Deuxième partie*

Faire la différence



## 21 Un chauffage plus intelligent

Dans le chapitre précédent, nous avons appris que l'électrification pouvait réduire la consommation d'énergie des transports à un cinquième de son niveau actuel, et que les transports publics et le vélo pouvaient être environ 40 fois plus efficaces en énergie que les déplacements en voiture. Qu'en est-il pour le chauffage ? Quelle quantité d'énergie peut-on économiser par un changement de technologie ou de comportement ?

Le calcul de la puissance consommée pour le chauffage d'un bâtiment repose sur trois termes :

$$\text{puissance consommée} = \frac{\text{différence moyenne de température} \times \text{déperditions du bâtiment}}{\text{rendement du système de chauffage}}.$$

Laissez-moi vous expliquer cette formule, qui est développée en détail dans le chapitre E avec un exemple. Ma maison, construite aux environs de 1940, est jumelée et comprend trois chambres (figure 21.1). L'écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur de la maison dépend du réglage du thermostat et du temps qu'il fait. Si le thermostat est en permanence à 20 °C, l'écart de température moyen est environ de 9 °C. Les pertes thermiques du bâtiment expriment à quelle vitesse la chaleur s'échappe à travers les murs, les fenêtres, les fissures, en fonction de l'écart de température. Les pertes thermiques sont parfois appelées *coefficient de pertes thermiques* du bâtiment. Ce coefficient est mesuré en kWh par jour et par degré d'écart de température. Dans le chapitre E, j'ai calculé que les déperditions thermiques de ma maison en 2006 étaient de 7,7 kWh/j/°C. Le produit

$$\text{différence de température moyenne} \times \text{déperditions du bâtiment}$$

représente le rythme des pertes de chaleur de la maison par conduction et par ventilation. Par exemple, si l'écart de température moyen est de 9 °C, alors la perte de chaleur est de :

$$9\text{ °C} \times 7,7\text{ kWh/j/°C} \simeq 70\text{ kWh/j.}$$

Enfin, pour calculer la puissance totale, il faut diviser la puissance perdue par le rendement du système de chauffage. Dans ma maison, la chaudière à condensation a un rendement de 90 %. Nous trouvons donc :

$$\text{puissance consommée} = \frac{9\text{ °C} \times 7,7\text{ kWh/j/°C}}{0,9} = 77\text{ kWh/j.}$$

Cette valeur est supérieure aux besoins que nous avons estimés dans le chapitre 7. Ceci pour 2 raisons : tout d'abord, cette formule suppose que



FIGURE 21.1. Ma maison.

toute la chaleur est fournie par la chaudière, alors qu'en fait, de la chaleur additionnelle gratuite est apportée par le dégagement de chaleur des occupants, par les appareils domestiques et le soleil. Ensuite, dans le chapitre 7, nous avons supposé qu'il n'y avait que deux pièces chauffées en permanence à 20 °C. Maintenir en permanence une maison entière à cette température exigerait plus d'énergie.

Alors, comment pouvons-nous réduire la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage ? De manière évidente, il y a trois approches possibles.

1. Réduire l'écart de température moyen. Cela peut être obtenu en réglant le thermostat plus bas (Ou, si vous avez des amis haut placés, en changeant le climat local...)
2. Réduire les pertes thermiques du bâtiment. Cela peut être fait en améliorant l'isolation du bâtiment — pensez au triple vitrage, au calfeutrage, et à une très bonne isolation du grenier — ou, de façon plus radicale, en démolissant le bâtiment et en le remplaçant par un bâtiment mieux isolé ; ou encore en vivant dans un logement ayant une plus petite surface par personne. (Les pertes augmentent avec la surface de plancher d'un bâtiment, parce que les surfaces des parois externes, les fenêtres, et le toit augmentent aussi.)
3. Accroître le rendement du système de chauffage. Vous pourriez penser qu'un rendement de 90 % soit difficile à dépasser, mais en fait, on peut faire beaucoup mieux.

## Le thermostat

Si l'on considère le rapport qualité-prix d'une technologie, le thermostat (accompagné d'un pull-over) est difficile à battre. Vous diminuez le réglage du thermostat, et votre logement consomme moins d'énergie. C'est magique ! En Grande-Bretagne, pour chaque degré en moins au thermostat, les pertes de chaleur diminuent d'environ 10 %. Baisser le thermostat de 20 °C à 15 °C diminue de près de moitié les pertes de chaleur. Et grâce aux apports de chaleur « gratuite », les économies d'énergie de chauffage sont encore plus grandes que les réductions des pertes.

Malheureusement, cette remarquable méthode d'économie d'énergie a des effets secondaires. Certaines personnes considèrent le fait de baisser le thermostat comme un changement de mode de vie, et cela les rend mécontents. Je ferai plus loin quelques suggestions sur le moyen de contourner ce problème de mode de vie. En attendant, pour prouver que « l'élément intelligent le plus important dans un immeuble équipé d'un chauffage intelligent, c'est l'occupant », la figure 21.2 montre les données d'une étude du « Carbon Trust \* », mesurant la consommation de chaleur dans douze maisons modernes identiques. Cette étude nous laisse bouche bée devant la famille numéro 1, dont la consommation de chaleur est deux fois plus grande que celle de M. et Mme Laineux au numéro 12. Toutefois,

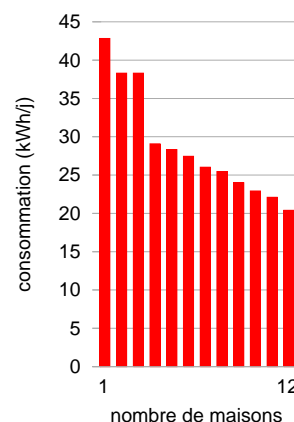


FIGURE 21.2. Consommation réelle de chaleur dans 12 maisons identiques disposant de systèmes de chauffage identiques. Toutes les maisons ont une surface habitable de 86 m<sup>2</sup> et ont été conçues pour avoir des déperditions thermiques de 2,7 kWh/j/°C.

Source : Carbon Trust (2007).

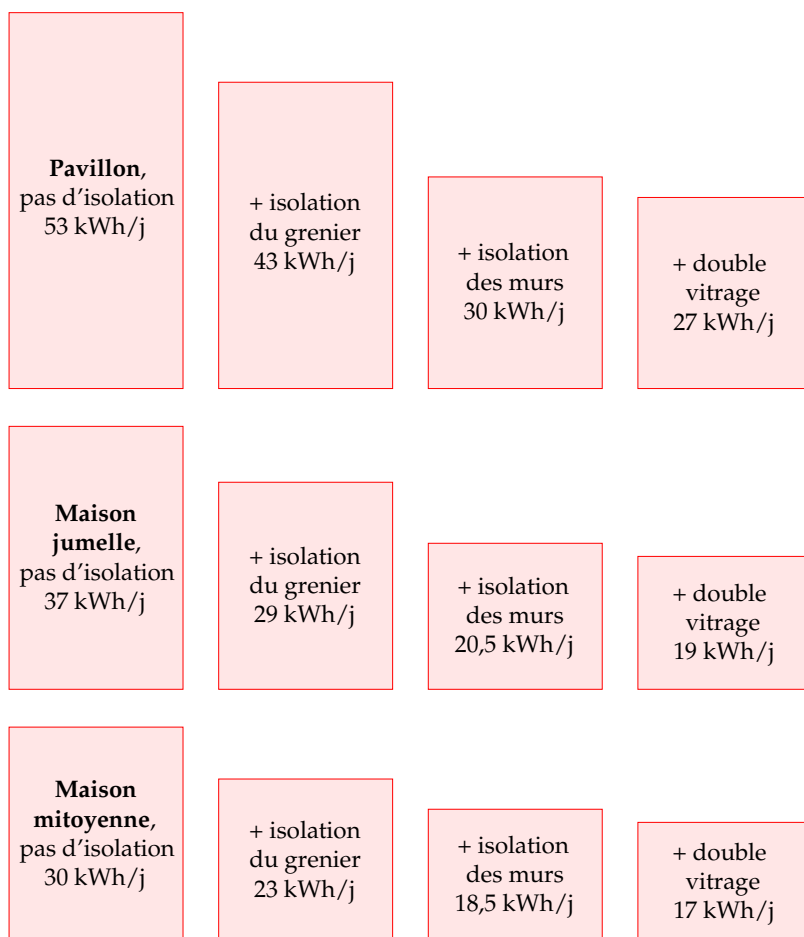


FIGURE 21.3. Estimations du chauffage d'air nécessaire pour différents types de maisons au Royaume-Uni. Les données proviennent de Eden et Bending (1985).

en prêtant plus attention aux chiffres, on réalise que la famille numéro 1 consomme 43 kWh par jour. Ce chiffre est si énorme qu'il en est choquant. Mais attendez. . . N'avais-je pas estimé il y a un instant que *ma propre* maison pouvait consommer encore plus que cela ? En effet, ma consommation moyenne de gaz de 1993 à 2003 a été d'un peu plus de 43 kWh par jour (figure 7.9, page 62). Et moi qui pensais que j'étais une personne économe ! Mais le problème, c'est la *maison*. Toutes les maisons modernes dans l'étude du « Carbon Trust » ont des pertes thermiques de  $2,7 \text{ kWh/j/}^\circ\text{C}$ , alors que ma maison avait des pertes de  $7,7 \text{ kWh/j/}^\circ\text{C}$  ! Ah, tous ces gens qui vivent dans des maisons bourrées de pertes thermiques. . .

## La guerre contre les pertes thermiques

Que peut-on faire face à de vieilles maisons qui laissent autant s'échapper la chaleur, à part appeler les bulldozers ? La figure 21.3 présente les

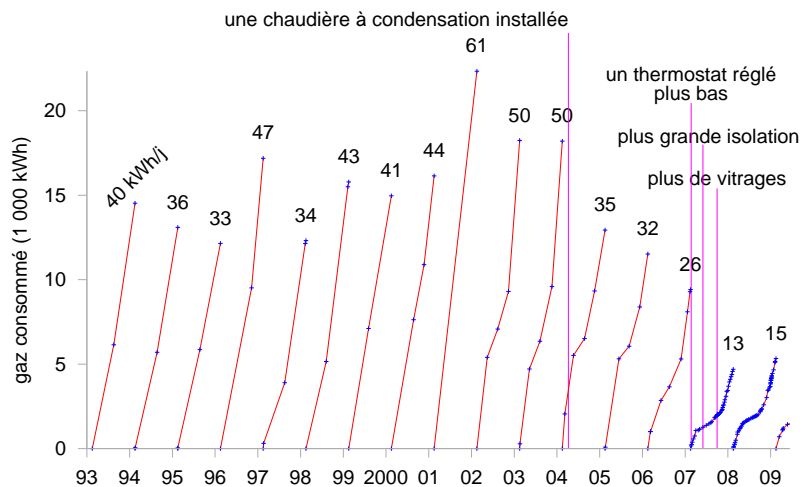


FIGURE 21.4. Ma consommation annuelle de gaz domestique, entre 1993 et 2007. Chaque ligne montre la consommation cumulée durant un an, en kWh. Le nombre à la fin de chaque année est le rythme de consommation moyen pour cette année-là, en kWh par jour. Les relevés au compteur sont indiqués par les points bleus. Évidemment, plus je relève ma consommation souvent, moins je consomme de gaz entre deux relevés !

estimations de chauffage nécessaire dans les maisons anciennes, en fonction de leur implantation : séparées des autres maisons ; partiellement attenantes ; attenantes. Isoler les combles et les murs doubles réduit les pertes de chaleur d'une vieille maison ordinaire d'environ 25 %. Grâce aux apports de chaleur secondaires, cette réduction de 25 % des pertes se traduit par une réduction d'environ 40 % dans la consommation de chauffage.

Mettons ces quelques idées à l'épreuve des faits.

## Une étude de cas

Je vous ai présenté ma maison quelques pages plus haut. Reprenons l'histoire. En 2004, j'avais fait installer une chaudière à condensation, en remplacement de l'ancienne chaudière à gaz. (Les chaudières à condensation utilisent un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur latente des gaz brûlés vers l'air entrant.) Dans le même temps, j'avais fait enlever le ballon d'eau chaude de la maison (de sorte que l'eau chaude ne soit produite que sur demande), et j'ai fait installer des thermostats sur tous les radiateurs des chambres. Avec la nouvelle chaudière à condensation, a été installé un nouveau régulateur de chauffage qui me permet de régler la température aux différents moments de la journée. Avec ces changements, ma consommation est passée de 50 kWh/j en moyenne à environ 32 kWh/j.

Cette réduction de 50 à 32 kWh/j est déjà très satisfaisante, mais ce n'est pas assez si l'objectif est de réduire l'empreinte énergétique en combustibles fossiles de chacun à moins d'une tonne de CO<sub>2</sub> par an. 32 kWh/j de gaz, cela correspond à plus de 2 tonnes de CO<sub>2</sub> par an.

En 2007, j'ai commencé à faire plus attention à mes compteurs d'énergie. J'ai fait isoler les murs doubles (figure 21.5) et amélioré l'isolation du grenier. J'ai remplacé la porte de service à simple vitrage par une porte à double vitrage, et j'ai ajouté une porte supplémentaire à double vitrage



FIGURE 21.5. Insertion d'une isolation des murs creux.



FIGURE 21.6. Une nouvelle porte d'entrée.

sur le perron (figure 21.6). Et ce qui est le plus important, j'ai fait plus attention aux réglages de mon thermostat. Tous ces efforts ont conduit à une réduction de moitié de la consommation de gaz. La consommation de la dernière année était de 13 kWh/j!

Ayant modifié en même temps différents éléments de ma maison et certains de mes comportements, il est difficile de savoir quels changements ont été les plus importants. Selon mes calculs (dans le chapitre E), les améliorations d'isolation ont réduit les pertes thermiques de 25 %, passant de 7,7 kWh/j/°C à 5,8 kWh/j/°C. soit une valeur qui reste supérieure à celle des maisons modernes. Qu'il est désespérément difficile de réduire les pertes d'une maison déjà construite!

Donc, mon conseil est, en priorité, de gérer astucieusement le thermostat. Que doit viser un réglage raisonnable du thermostat? De nos jours, beaucoup de gens semblent penser que 17 °C est insupportablement froid. Cependant en 1970, la température moyenne en hiver dans les maisons anglaises était de 13 °C! La perception de savoir si l'on se sent au chaud dépend de ce que l'on fait, et de ce que l'on a fait dans l'heure précédente. Ma suggestion est de *ne pas penser en termes de réglages de thermostat*. Plutôt que de fixer le thermostat à une valeur unique, laissez-le à une valeur très faible la plupart du temps (disons, 13 ou 15 °C), et augmentez-le temporairement lorsque vous avez froid. C'est comme les lumières dans une bibliothèque. Si vous vous posez la question « quel est le bon niveau de lumière sur les étagères? », alors vous répondrez sûrement « assez lumineux pour lire les titres des livres », et ainsi vous aurez des lumières fortes tout le temps. Cette question présuppose qu'il nous faut fixer un niveau de lumière, mais nous n'avons pas besoin de le faire. Nous pouvons placer des interrupteurs que le lecteur allumera, et qui se couperont après un temps approprié. De même, les thermostats ne doivent pas être laissés à 20 °C en permanence.

Avant de terminer avec les réglages du thermostat, je dois mentionner la climatisation. Est-ce que cela ne vous rend pas fou d'aller dans un bâtiment en été quand le thermostat de la climatisation est fixé à 18 °C? Ces farfelus de gérants d'immeubles soumettent tout le monde à des températures hivernales et ils vont se plaindre d'avoir froid! Au Japon, les directives gouvernementales recommandent que la climatisation soit réglée à 28 °C.

## De meilleures constructions

Si vous avez l'occasion de faire construire un nouveau bâtiment, alors il y a de nombreuses façons de veiller à ce que sa consommation de chauffage soit très inférieure à celle d'un vieux bâtiment. La figure 21.2 montre que les maisons modernes sont construites avec de bien meilleurs niveaux d'isolation que celles des années 1940. Mais les normes de construction en Grande-Bretagne pourraient être encore améliorées, comme l'indique

le chapitre E. Les trois idées-clés pour de meilleurs résultats sont les suivantes : (1) une isolation très épaisse pour les planchers, les murs et les toitures ; (2) s'assurer que le bâtiment est complètement étanche ; utiliser une ventilation mécanique pour introduire de l'air frais et évacuer l'air vicié et humide, avec des échangeurs récupérant une grande partie de la chaleur de l'air évacué ; (3) un bâtiment conçu pour exploiter autant que possible le soleil.

## Le coût énergétique du chauffage

Jusqu'à présent, ce chapitre a mis l'accent sur le **contrôle de la température** et les **pertes thermiques**. Maintenant tournons-nous vers le troisième facteur de l'équation :

$$\text{puissance consommée} = \frac{\text{différence moyenne de température} \times \text{déperditions du bâtiment}}{\text{rendement du système de chauffage}}.$$

Comment produire efficacement du chauffage ? Est-il possible d'obtenir de la chaleur bon marché ? Aujourd'hui en Grande-Bretagne, le chauffage est assuré principalement en brûlant un combustible fossile, le gaz naturel, dans des chaudières ayant des rendements de 78 % à 90 %. Est-il possible de se passer des combustibles fossiles, et d'améliorer en même temps l'efficacité du chauffage des bâtiments ?

Une technologie souvent présentée en Grande-Bretagne comme une réponse au problème du chauffage s'appelle la « cogénération » (ou production combinée de chaleur et d'électricité), ou bien sa cousine, la « micro-cogénération ». Je vais vous expliquer dans un instant en quoi consiste la cogénération, mais je suis arrivé à la conclusion que c'est une mauvaise idée, parce qu'il existe une meilleure technologie pour le chauffage, appelée pompe à chaleur, que je vais décrire dans quelques pages.

### *La production combinée de chaleur et d'électricité, ou cogénération*

De l'avis général, les grosses centrales électriques sont très inefficaces, gaspillant la chaleur à tire-larigot dans les cheminées et les tours de refroidissement. Un avis plus averti reconnaît que pour convertir l'énergie thermique en électricité, il est inévitable de déverser la chaleur dans un endroit froid (figure 21.8). C'est ainsi que fonctionnent les moteurs thermiques. Pour cela, il *faut* un endroit froid. Mais bien sûr, on pourrait utiliser des *bâtiments* comme lieu où déverser ces « déchets » de chaleur, au lieu de les jeter dans des tours de refroidissement ou dans l'eau de mer. Cette idée, on l'appelle « production combinée de chaleur et d'électricité », ou cogénération, et elle a été largement utilisée en Europe continentale durant des décennies. Dans de nombreuses villes, une centrale de grande puissance est intégrée à un système de chauffage urbain. Les partisans de

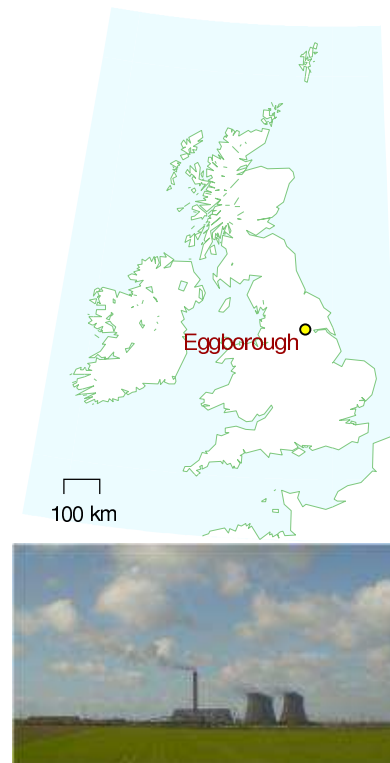


FIGURE 21.7. Eggborough. Pas vraiment une centrale électrique qui participe au chauffage intelligent.

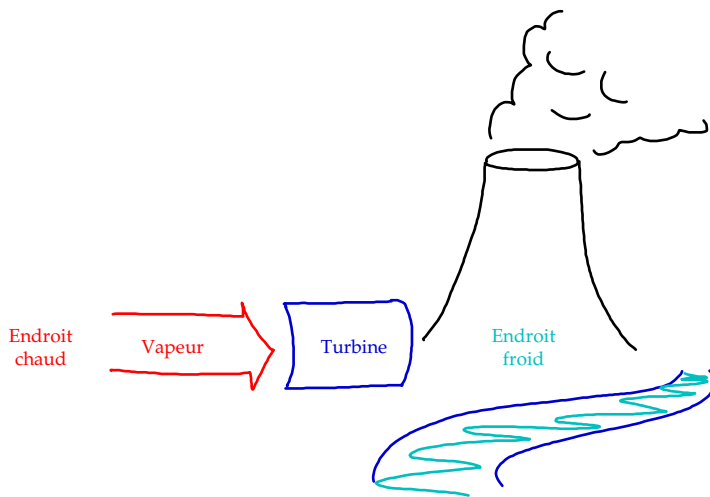


FIGURE 21.8. Comment fonctionne une centrale électrique. Il faut une zone froide pour condenser la vapeur qui va faire tourner la turbine. La zone froide est généralement une tour aéro-réfrigérante ou une rivière.

l'incarnation moderne de la cogénération, la « micro-cogénération », suggèrent que de toutes petites centrales devraient être créées au sein des bâtiments individuels ou des petites collectivités, pour fournir le chauffage et l'électricité pour ces bâtiments, et pouvoir exporter de l'électricité vers le réseau électrique public.

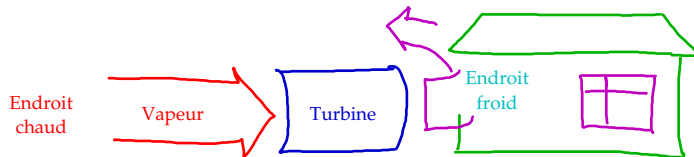


FIGURE 21.9. Cogénération. Le chauffage urbain absorbe la chaleur qui, sinon, aurait été vomie par une tour de refroidissement.

Il y a certainement du vrai dans l'idée que la Grande-Bretagne est en retard en matière de chauffage urbain et de production combinée de chaleur et d'électricité, mais la discussion est entravée par un manque de données chiffrées, et aussi par deux erreurs particulières. Tout d'abord, quand on compare les différentes manières d'utiliser du combustible, on utilise une mesure erronée du « rendement », en valorisant l'électricité à l'égal de la chaleur : dans les faits, l'électricité a plus de valeur que la chaleur. Deuxièmement, il est largement admis que les « déchets » de chaleur dans une centrale traditionnelle pourraient être capturés à des fins utiles *sans porter atteinte à la production d'électricité de la centrale*. Malheureusement, c'est faux, comme les chiffres vont nous le montrer dans un instant. Fournir de la chaleur utile à un client réduit toujours, dans une certaine mesure, l'électricité produite. Les gains nets réels de la cogénération sont souvent beaucoup plus faibles que ce que le battage médiatique pourrait vous faire croire.

Un dernier obstacle à une discussion rationnelle au sujet de la cogénération est la légende, apparue récemment, selon laquelle décentraliser



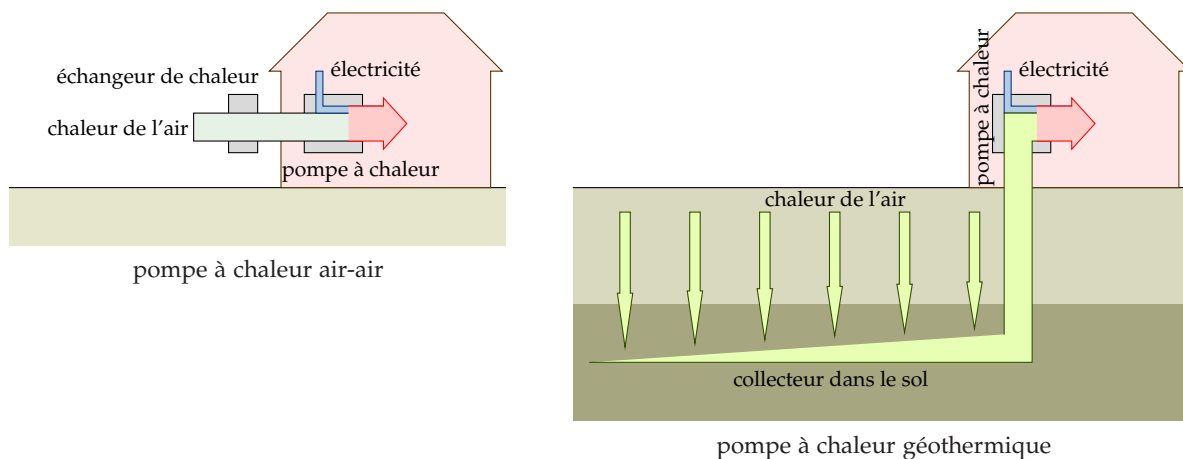


FIGURE 21.10. Pompes à chaleur.

une technologie la rend d'une manière ou d'une autre plus écologique. Ainsi, alors que les grosses centrales à combustibles fossiles seraient foncièrement « mauvaises », des foules de micro-centrales seraient considérées comme bonnes. Mais si la décentralisation était vraiment une si bonne idée que cela, alors l'avantage du « petit et beau » devrait sauter aux yeux à la lueur des chiffres. On ne devrait pas avoir besoin d'y croire pour que la décentralisation soit meilleure. Or ce que les chiffres montrent en réalité, c'est que la production d'électricité *centralisée* a de nombreux avantages sur la production décentralisée, tant en termes économiques qu'énergétiques. La production locale n'est un peu plus avantageuse que dans le cas des plus grands ensembles immobiliers, avec un avantage de seulement 10 % ou 20 %.

Le gouvernement britannique a pour objectif de porter la cogénération à 10 GW de capacité électrique d'ici 2010, mais je pense que cette croissance de la cogénération à partir du gaz est une erreur, car elle n'est pas du tout verte : elle consomme des combustibles fossiles, et elle nous enferme dans l'obligation de continuer à consommer des combustibles fossiles. Puisque les pompes à chaleur sont une meilleure technologie, nous devrions sauter l'étape de la cogénération qui brûle du gaz, et aller directement vers les pompes à chaleur.

### Les pompes à chaleur

Tout comme le chauffage urbain et la cogénération, les pompes à chaleur sont déjà largement utilisées en Europe continentale, mais elles le sont rarement en Grande-Bretagne. Les pompes à chaleur sont des réfrigérateurs inversés. Touchez la grille arrière de votre réfrigérateur : elle est *chaude*. Un réfrigérateur transfère de la chaleur d'un endroit (l'intérieur) vers un autre (la grille arrière). Ainsi, il est possible de chauffer un bâti-

ment en mettant un réfrigérateur à l'envers — mettre l'intérieur du réfrigérateur dans le jardin, et refroidir ainsi le jardin ; et laisser la grille arrière du réfrigérateur dans votre cuisine, pour réchauffer la maison. Ce qui n'est pas évident à comprendre, c'est que cette idée délirante est un moyen très efficace pour chauffer votre maison. Pour chaque kilowatt d'électricité provenant du réseau électrique, le réfrigérateur mis à l'envers peut pomper trois kilowatts de chaleur du jardin, de sorte qu'au total, quatre kilowatts de chaleur rentrent dans votre maison. Ainsi, les pompes à chaleur sont environ quatre fois plus efficaces qu'un convecteur électrique standard. Considérant que le rendement du radiateur électrique est de 100 %, celui de la pompe à chaleur est de 400 %. Le rendement d'une pompe à chaleur est généralement appelé son *coefficient de performance* ou CoP. Si le rendement est de 400 %, le coefficient de performance est de 4.

Les pompes à chaleur peuvent être configurées de différentes façons (figure 21.10). Une pompe à chaleur peut refroidir l'air de votre jardin en utilisant un échangeur de chaleur (typiquement un coffret blanc de 1 mètre de haut, comme celui de la figure 21.11), et chauffer l'air intérieur de la maison : dans ce cas, cela s'appelle une pompe à chaleur air-air, parce qu'elle prend de la chaleur de l'air pour l'injecter dans de l'air. Elle peut aussi refroidir l'air du jardin pour réchauffer de l'eau à l'intérieur de la maison : dans ce cas, on l'appelle une pompe à chaleur air-eau. Lorsque la pompe refroidit le sol plutôt que de l'air extérieur, grâce à de grandes boucles de tuyaux enterrés (de plusieurs dizaines de mètres de long), pour ensuite réchauffer l'air intérieur, cela s'appelle une pompe à chaleur géothermique. Enfin, la chaleur peut également être pompée dans les rivières et les lacs (pompes à chaleur eau-air ou eau-eau). Certaines pompes à chaleur peuvent transférer la chaleur dans les deux sens. Quand une pompe à chaleur air-air fonctionne en sens inverse, elle utilise l'électricité pour réchauffer l'air à l'extérieur du bâtiment et refroidir l'air à l'intérieur. C'est ce que l'on appelle de la climatisation. De nombreux climatiseurs sont en effet des pompes à chaleur travaillant précisément de cette manière. Les pompes à chaleur géothermiques peuvent également fonctionner comme des climatiseurs. Un seul matériel peut donc être utilisé pour fournir à la fois le chauffage en hiver et la climatisation en été.

Les gens disent parfois que les pompes à chaleur géothermiques utilisent « l'énergie géothermique », mais ce n'est pas le bon terme. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 16, dans la plupart des régions du monde, l'énergie géothermique offre une toute petite puissance par unité de surface (environ 50 mW/m<sup>2</sup>). Les pompes à chaleur n'ont rien à voir avec ce faible niveau de puissance, et peuvent être utilisées pour le chauffage et le refroidissement. Les pompes à chaleur géothermiques utilisent simplement le sol comme lieu d'extraction ou d'injection de la chaleur. Quand elles puisent la chaleur en permanence, la chaleur est, en fait, réapprovisionnée par les rayons du soleil.

Il nous reste deux choses à faire dans ce chapitre. Nous devons compa-



FIGURE 21.11. Les parties intérieures et extérieures d'une pompe à chaleur air-air qui a un coefficient de performance de 4. A la partie intérieure, on a joint un stylo à bille, pour l'échelle. Une seule de ces machines Fujitsu peut fournir 3,6 kW de chaleur en utilisant seulement 0,845 kW d'électricité. Elle peut également fonctionner de manière inversée, fournissant 2,6 kW de froid en consommant 0,655 kW d'électricité.

rer les pompes à chaleur avec la cogénération. Ensuite, nous discuterons des limites des pompes à chaleur géothermiques.

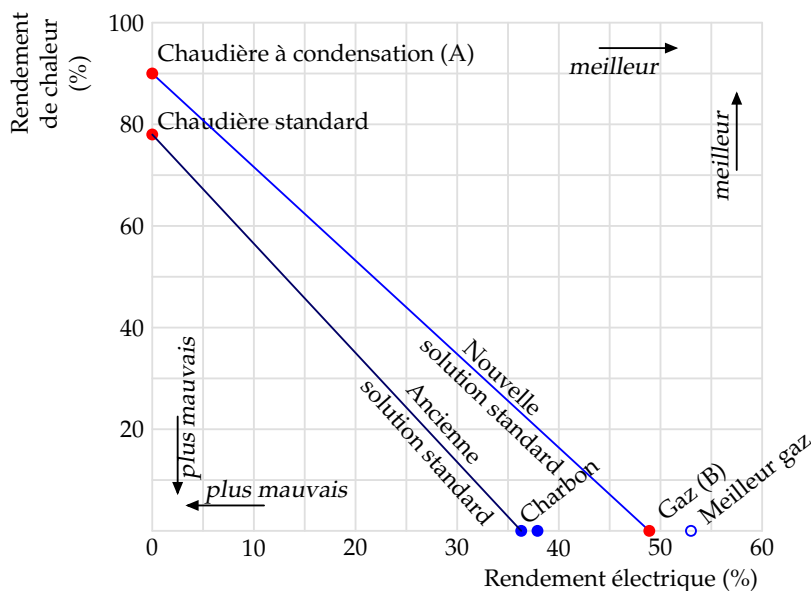
### *Pompes à chaleur comparées à la cogénération*

J'ai longtemps pensé que la cogénération allait de soi. « De toute évidence, on devrait utiliser la chaleur rejetée par les centrales électriques pour chauffer les bâtiments plutôt que de l'évacuer dans une tour de refroidissement ! » Toutefois, en regardant attentivement les chiffres décrivant la performance des systèmes réels de cogénération, j'en suis venu à la conclusion qu'il existe de meilleures façons de fournir de l'électricité et du chauffage domestique.

Je vais construire un diagramme en trois étapes, qui va montrer combien on peut obtenir d'énergie électrique ou thermique à partir de combustible. L'axe horizontal indique le rendement électrique, et l'axe vertical le rendement thermique.

#### *Solution standard sans cogénération*

Dans la première étape, nous faisons figurer des centrales électriques simples fournissant uniquement de l'électricité et des systèmes de chauffage fournissant uniquement de la chaleur.



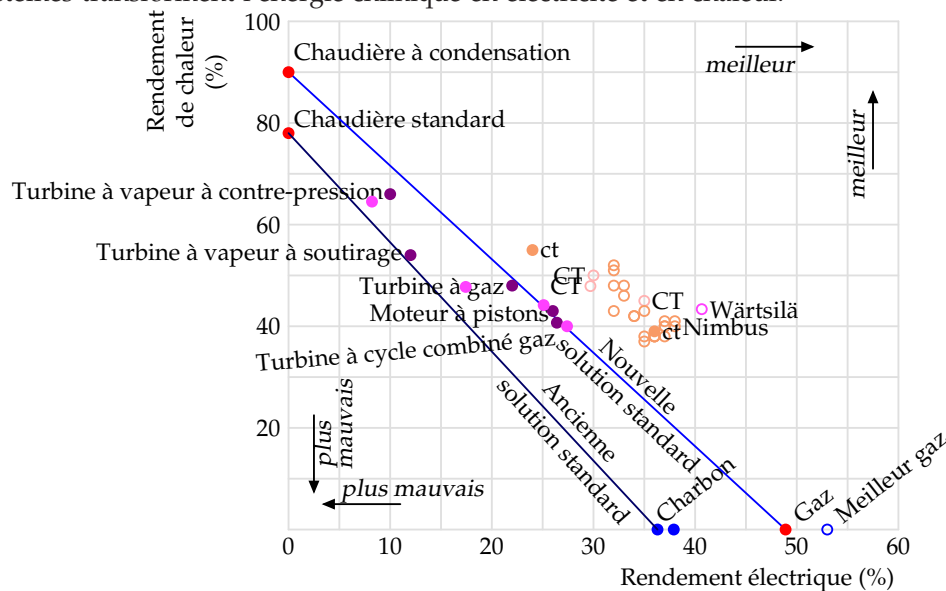
Les chaudières à condensation (point A, en haut à gauche) ont un rendement de 90 %, car 10 % de la chaleur part dans la cheminée. Les centrales électriques à gaz britanniques (point B, en bas à droite) qui transforment l'énergie chimique du gaz en électricité ont en réalité un rendement de 49 %. Si vous voulez produire n'importe quelle combinaison de chaleur et

d'électricité à partir du gaz naturel, vous pouvez l'obtenir en brûlant les quantités appropriées de gaz dans la centrale électrique et dans la chaudière. Ainsi, la nouvelle solution standard permet d'obtenir n'importe lequel des rendements électriques et calorifiques situés sur la ligne A-B, en utilisant deux installations séparées pour produire de l'électricité et de la chaleur.

Pour donner une perspective historique, le diagramme montre également l'ancienne méthode de chauffage (une chaudière ordinaire sans condensation, avec un rendement de 79 %) et la solution standard que l'on utilisait il y a quelques décennies pour produire de l'électricité (une centrale au charbon avec un rendement électrique d'environ 37 %).

### La cogénération

Ensuite, nous ajoutons sur le diagramme les systèmes de cogénération. Ces systèmes transforment l'énergie chimique en électricité et en chaleur.



Chacun des ronds pleins indique les performances moyennes réelles des systèmes de cogénération au Royaume-Uni, regroupés par type. Les ronds évidés marqués « CT » mentionnent les performances de systèmes idéaux de cogénération cités par le Carbon Trust, les ronds évidés marqués « Nimbus » sont les spécifications des produits d'un fabricant. Les ronds marqués « ct » sont les performances réelles données par le Carbon Trust pour deux systèmes installés (à l'hôpital Freeman et à Elizabeth House).

Ce qu'il faut remarquer sur ce diagramme, c'est que les rendements électriques des systèmes de cogénération sont beaucoup plus faibles que le rendement de 49 % des centrales à gaz produisant uniquement de l'électricité. Ainsi la chaleur n'est pas un « produit dérivé gratuit ». Accroître la production de chaleur se répercute sur la production d'électricité.

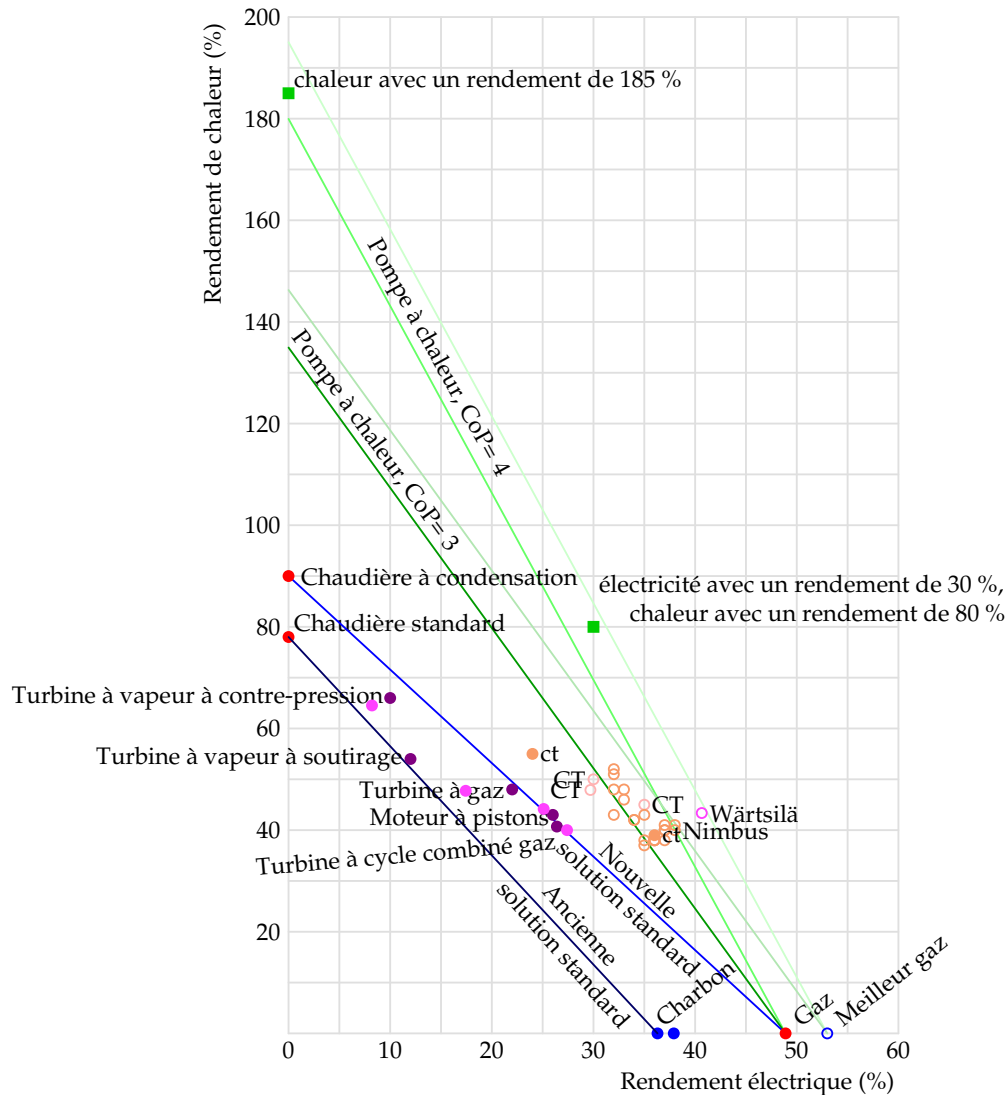
C'est une pratique courante d'amalgamer les deux chiffres (les rendements de la production d'électricité et de chaleur) en un seul « rendement total » — par exemple, les turbines à vapeur à contre-pression fournissant 10 % d'électricité et 66 % de chaleur seraient désignées comme ayant « 76 % de rendement » — mais je pense que c'est un résumé trompeur de leur performance. Après tout, selon ce mode de calcul, une chaudière à condensation avec 90 % de rendement serait « plus efficace » que n'importe quel système de cogénération ! Mais le fait est que l'énergie électrique est plus précieuse que la chaleur.

Bon nombre de ronds représentant la cogénération dans ce diagramme ont des performances supérieures à « l'ancienne méthode standard » (obtenant de l'électricité à partir du charbon et de la chaleur à partir d'une chaudière). Et les systèmes de cogénération sont légèrement mieux placés que « la nouvelle méthode standard » (obtenant de l'électricité à partir du gaz, et de la chaleur à partir de chaudières à condensation). Et à leur tour, les systèmes de cogénération idéaux sont légèrement mieux placés que « la nouvelle méthode standard » (obtenant de l'électricité à partir du gaz, et de la chaleur à partir de chaudières à condensation). Mais nous devons garder à l'esprit que cette légère supériorité a quelques inconvénients — un système de cogénération ne fournit de la chaleur qu'aux endroits où il est installé, tandis que les chaudières à condensation peuvent être implantées à n'importe quel endroit où se trouve une conduite de gaz. Comparés à la nouvelle méthode standard, les systèmes de cogénération ne sont pas aussi flexibles dans le mélange de la production de chaleur et d'électricité. Un système de cogénération fonctionnera de manière optimale quand il délivrera un certain mélange d'électricité et de chaleur. Ce manque de flexibilité rend parfois le système peu efficace, par exemple quand le système produit plus de chaleur que voulue. De la même manière, dans une maison normale, la demande d'électricité est en général sous forme de pics relativement courts, peu corrélés avec la demande de chauffage. Un dernier problème avec certains systèmes de micro-cogénération : en cas de surplus d'électricité produite, ils ne peuvent pas toujours la réinjecter dans le réseau de la meilleure façon possible.

Enfin, nous ajoutons au schéma les pompes à chaleur utilisant l'électricité du réseau pour transférer la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments.

Les lignes vertes indiquent les combinaisons d'électricité et de chaleur que vous pouvez obtenir en supposant : que les pompes à chaleur ont un coefficient de performance de 3 ou 4 ; que l'électricité supplémentaire nécessaire pour les pompes à chaleur est générée par une centrale à gaz normale ou par une centrale à gaz de haut de gamme ; et en admettant une perte de 8 % dans le réseau national d'électricité (entre la centrale et les bâtiments chauffés par les pompes à chaleur). La centrale à gaz haut de gamme a un rendement de 53 %, en supposant qu'elle fonctionne de façon optimale. (J'imagine que le Carbon Trust et Nimbus ont fait une

hypothèse similaire pour les performances des systèmes de cogénération indiqués sur ce diagramme.) A l'avenir, les pompes à chaleur seront probablement encore meilleures que je le suppose ici. Au Japon, grâce à une législation favorisant l'amélioration de l'efficacité, les pompes à chaleur sont aujourd'hui disponibles avec un coefficient de performance de 4,9.



Notez que les pompes à chaleur offrent un système qui peut avoir « un rendement supérieur à 100 % ». Par exemple la « meilleure centrale à gaz » alimentant des pompes à chaleur peut délivrer une combinaison de 30 % de rendement pour l'électricité et 80 % pour la chaleur, soit un « rendement total » de 110 %. Aucun système bi-énergie ne pourra jamais égaler cette performance.

Permettez-moi d'apporter une précision. Le rendement des pompes à chaleur est supérieur à celui des chaudières à condensation, même si les pompes à chaleur sont alimentées par l'électricité produite à partir d'une centrale brûlant du gaz naturel. Si vous voulez chauffer beaucoup de bâtiments en utilisant le gaz naturel, vous pourriez installer des chaudières à condensation, qui ont un « rendement de 90 % », ou vous pourriez envoyer le même gaz à une nouvelle centrale au gaz produisant de l'électricité et installer dans tous les bâtiments des pompes à chaleur alimentées en électricité ; le rendement de la seconde solution serait situé entre 140 % et 185 %. Il n'est pas nécessaire de creuser de gros trous dans le jardin et d'installer un chauffage au sol pour tirer les avantages des pompes à chaleur ; la meilleure pompe à chaleur air-eau (qui n'exige qu'un petit coffret extérieur grand comme un climatiseur) peut fournir de l'eau chaude dans des radiateurs ordinaires avec un coefficient de performance supérieur à 3. La pompe à chaleur air-air de la figure 21.11 (page 175) fournit directement de l'air chaud dans un bureau.

J'en conclus que la cogénération n'est probablement pas le meilleur moyen pour chauffer les bâtiments et produire de l'électricité en utilisant le gaz naturel — même si cela semble une bonne idée — lorsque des pompes à chaleur air-air ou géothermiques peuvent être installées dans des bâtiments. La solution utilisant des pompes à chaleur a aussi d'autres avantages qui doivent être soulignés : les pompes à chaleur peuvent être installées dans tous les bâtiments raccordés au réseau électrique, et leur alimentation électrique peut provenir de sources différentes, de sorte qu'elles peuvent continuer à fonctionner lorsque le prix du gaz s'envole ou que le gaz est épuisé ; les pompes à chaleur sont flexibles d'utilisation : elles peuvent être démarrées ou arrêtées à la demande des occupants du bâtiment.

Je tiens à souligner que cette comparaison critique ne signifie pas que la cogénération est toujours une mauvaise idée. Ce que je compare ici, ce sont les méthodes de chauffage de bâtiments ordinaires, qui n'exigent seulement que de la chaleur à basse température. La cogénération peut également être utilisée pour produire de la chaleur à haute température (à 200 °C, par exemple) pour des utilisations industrielles. Dans ces installations, les pompes à chaleur ne sont pas susceptibles d'être aussi avantageuses car leur coefficient de performance sera inférieur.

### *Les limites à la croissance (des pompes à chaleur)*

Parce que la température du sol, à quelques mètres sous terre, reste paresseusement à près de 11 °C été comme hiver, et que la température de l'air, en plein hiver, peut être 10 ou 15 °C plus basse que celle du sol, le sol est, pour une pompe à chaleur, un meilleur endroit que l'air pour y puiser de la chaleur, du moins en théorie. Les spécialistes en pompe à chaleur encouragent donc le choix d'une source géothermique plutôt qu'une source

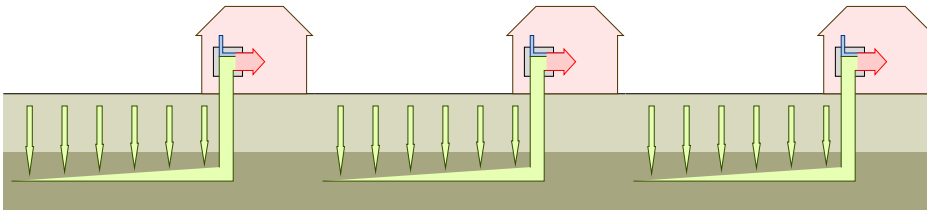


FIGURE 21.12. Jusqu'à quel point peut-on rapprocher les pompes à chaleur géothermiques les unes des autres ?

d'air lorsque cela est possible. (Les pompes à chaleur fonctionnent moins bien lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est grande.)

Cependant, le sol n'est pas une source inépuisable de chaleur. La chaleur doit venir de quelque part, et la terre est un conducteur thermique assez mauvais. Si l'on absorbe la chaleur du sol trop rapidement, la terre deviendra aussi froide que de la glace, et les avantages de la pompe à chaleur géothermique seront réduits.

En Grande-Bretagne, l'objectif principal des pompes à chaleur est de fournir de la chaleur en hiver. La source première de cette chaleur est le soleil, qui restitue la chaleur dans le sol par rayonnement direct et par conduction dans l'air. Le rythme auquel la chaleur est prélevée du sol doit satisfaire deux contraintes : il ne doit pas provoquer une chute trop importante de la température du sol pendant l'hiver et la chaleur prise en hiver doit être réapprovisionnée durant l'été. S'il y a un risque que le réchauffement *naturel* en été ne compense pas la chaleur extraite en hiver, alors le réapprovisionnement doit être conduit *de manière active* — par exemple en faisant fonctionner le système en sens inverse en été, et en renvoyant la chaleur dans le sol (et en produisant ainsi de la climatisation).

Ajoutons quelques chiffres dans cette discussion. De quelle surface de terrain une pompe à chaleur géothermique a-t-elle besoin ? Supposons que nous ayons un quartier avec une assez forte densité de population — par exemple 6 200 personnes par  $\text{km}^2$  (160  $\text{m}^2$  par personne), soit la densité courante d'une banlieue anglaise. Est-ce que *tout le monde* peut utiliser une pompe à chaleur géothermique, sans une restitution active en été ? Le calcul du chapitre E (page 356) tente d'y apporter une réponse, et conclut que *non* : si l'on voulait que tout le monde dans le quartier puisse être en mesure de tirer du sol un flux de chaleur d'environ 48 kWh/j par personne (mon estimation de nos besoins de chaleur en hiver), on finirait par faire geler le sol en hiver. Pour éviter un refroidissement excessif du sol, le prélèvement doit être inférieur à 12 kWh/j par personne. Ainsi, si l'on passe aux pompes à chaleur géothermiques, il nous faut envisager d'inclure dans notre étude une réinjection substantielle de chaleur en été, de manière à compenser la chaleur extraite du sol en hiver. Cette chaleur réinjectée l'été pourrait utiliser la chaleur provenant de la climatisation, ou de panneaux solaires à eau chaude situés sur les toits. (La communauté canadienne « Drake Landing Solar Community » utilise le stockage



de chaleur solaire d'été dans le sol pour une utilisation ultérieure en hiver [www.d1sc.ca].) A défaut, on pourrait s'attendre à devoir utiliser aussi les pompes à chaleur air-air ; on serait alors en mesure d'obtenir toute la chaleur que l'on veut — aussi longtemps que l'on dispose de l'électricité nécessaire au transfert de cette chaleur. Au Royaume-Uni, la température de l'air ne descend pas beaucoup en dessous de zéro ; aussi les préoccupations au sujet de la mauvaise performance hivernale des pompes à chaleur air-air peuvent concerner l'Amérique du Nord ou la Scandinavie, mais ne s'appliquent pas vraiment en Grande-Bretagne.

Ma conclusion est la suivante : peut-on réduire l'énergie que nous consommons pour le chauffage ? Oui. Peut-on en même temps s'affranchir des combustibles fossiles ? Oui. En remplaçant tous nos appareils de chauffage à combustibles fossiles par des pompes à chaleur électriques, sans oublier de faire tout ce qui est facile à réaliser — comme l'isolation des bâtiments et une meilleure utilisation des thermostats, par exemple — on peut réduire la quantité d'énergie qui nous est nécessaire à seulement un quart des niveaux actuels. Et même si l'électricité supplémentaire provient de centrales à gaz, cela resterait encore une bien meilleure façon de se chauffer que celle utilisée aujourd'hui, qui brûle directement du gaz. Les pompes à chaleur sont une solution à l'épreuve de l'avenir, en nous permettant de chauffer les bâtiments efficacement à partir de n'importe quelle source d'électricité.

Certains opposants systématiques objecteront que le coefficient de performance des pompes à chaleur air-air n'est pas bon — seulement de 2 ou 3. Mais leurs informations commencent sérieusement à dater. Si l'on fait bien attention à acheter des pompes à chaleur dernier cri, on peut faire beaucoup mieux. Le gouvernement japonais a légiféré depuis une décennie pour accroître l'efficacité énergétique, ce qui a considérablement amélioré les performances des climatiseurs ; grâce à cette action, il existe maintenant des pompes à chaleur à air ayant un coefficient de performance de 4,9 ; ces pompes à chaleur peuvent produire de l'eau chaude ou de l'air chaud.

Une autre objection faite aux pompes à chaleur est celle-ci : « oh, mais on ne va pas laisser les gens s'équiper de pompes à chaleur, sinon ils vont les utiliser pour avoir la climatisation en été ! » Allons ! Comme tout le monde, j'ai horreur de l'utilisation abusive de la climatisation, mais ces pompes à chaleur sont quatre fois plus efficaces que toute autre méthode de chauffage en hiver ! Indiquez-moi un meilleur choix. Les granulés de bois ? Bien sûr, un certain nombre de consommateurs peuvent en brûler. Mais il n'y a pas assez de bois pour que tout le monde puisse le faire. Pour les gens qui habitent dans la forêt, il y a du bois ; pour les autres, il y a des pompes à chaleur.

## Notes et bibliographie

superficie par personne (m <sup>2</sup> )	
Bangalore	37
Manhattan	39
Paris	40
Chelsea	66
Tokyo	72
Moscou	97
Taipei	104
La Hague	152
San Francisco	156
Singapour	156
Cambridge (USA)	164
Sydney	174
Portsmouth	213

TABLEAU 21.13. Quelques densités de population urbaines.



- 170 *L'isolation des murs creux réduit de près d'un quart les pertes de chaleur dans une maison normale.* Eden et Bending (1985).
- 171 *La température intérieure moyenne dans les maisons britanniques en 1970 était de 13 °C!* Source : Department of Trade and Industry (2002a, para 3.11)
- 173 *La Grande-Bretagne est en retard en matière de chauffage urbain et de cogénération.* La chaleur rejetée par les centrales électriques du Royaume-Uni pourrait répondre aux besoins de chauffage du pays tout entier (Wood, 1985). En 1985 au Danemark, les systèmes de chauffage urbains fournissaient 42 % du chauffage, la chaleur étant transmise à 20 km ou plus par de l'eau sous pression. En Allemagne de l'Ouest, en 1985, 4 millions de logements recevait chacun 7 kW du chauffage urbain. Deux tiers de la chaleur fournie provenaient des centrales électriques. À Vasteras, en Suède, en 1985, 98 % de la chaleur de la ville était fournie par les centrales électriques.
- 175 *Les pompes à chaleur sont à peu près quatre fois plus efficaces qu'un radiateur électrique standard.* Voir [www.gshp.org.uk](http://www.gshp.org.uk).  
 Certaines pompes à chaleur disponibles au Royaume-Uni ont déjà un coefficient de performance supérieur à 4,0 [yok2nw]. En effet, il y a une subvention du gouvernement pour les pompes à chaleur eau-eau et eau-air, qui ne s'applique qu'aux pompes dont le coefficient de performance est supérieur à 4,4 [2dtx8z].  
 Des pompes à chaleur géothermiques sont disponibles dans le commerce avec un coefficient de performance de 5,4 pour le refroidissement, et 4,9 pour le chauffage [2fd8ar].
- 182 *Des pompes à chaleur à air avec un coefficient de performance de 4,9...* Selon HPTCJ (2007), des pompes à chaleur avec un coefficient de performance de 6,6 sont disponibles au Japon depuis 2006. Les coefficients de performance des pompes à chaleur au Japon sont passés de 3 à 6 en une décennie grâce à la réglementation gouvernementale. HPTCJ (2007) décrit une pompe à chaleur air-eau appelée Eco Cute, qui a un coefficient de performance de 4,9. Eco Cute est arrivée sur le marché en 2001. [www.ecosystem-japan.com](http://www.ecosystem-japan.com).

Pour en savoir plus sur les pompes à chaleur : European Heat Pump Network [ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/](http://ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/),  
[www.kensaengineering.com](http://www.kensaengineering.com),  
[www.heatking.co.uk](http://www.heatking.co.uk),  
[www.iceenergy.co.uk](http://www.iceenergy.co.uk).

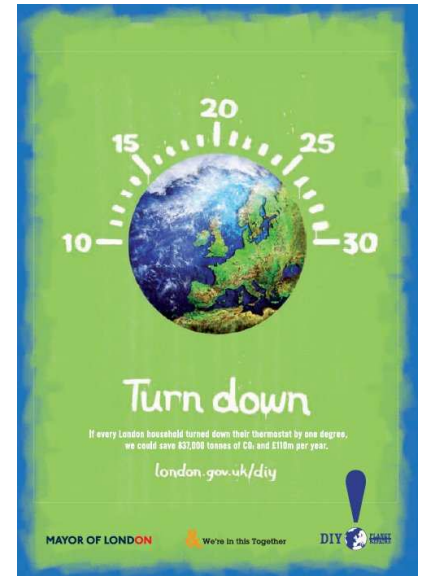


FIGURE 21.14. Publicité faisant partie de la campagne « Do-It-Yourself planet repairs » lancée en 2007 par le maire de Londres, Ken Livingston. Le texte dit : « **Baissez** la température. Si chaque foyer londonien baissait son thermostat d'un degré, on pourrait économiser 837 000 tonnes de CO<sub>2</sub> et 130 millions d'euros par an. » [london.gov.uk/diy] Exprimé sous la forme d'économies par personne, cela fait 0,12 tonne de CO<sub>2</sub> par personne, c'est-à-dire environ 1 % des émissions totales d'une personne (11 tonnes). C'est donc *effectivement* un bon conseil. Bravo, Ken !