

Les usages de l'énergie

Les pompes à chaleur domestiques

Depuis quelques années, le recours aux principes de la thermodynamique trouve une application, de plus en plus fréquente, pour le chauffage et maintenant la génération d'eau chaude sanitaire dans les habitations essentiellement individuelles.

L'importance, statistiquement très relative, de l'usage de la thermodynamique et d'une des technologies qui l'utilise : la pompe à chaleur pour la génération de chaleur, doit nous interroger sur sa pertinence, sa validité et son efficacité technique, environnementale et économique.

Dans son principe théorique et dans de nombreuses applications, la thermodynamique donne satisfaction. De la génération de froid et de chaleur à la motricité, nous avons pu observer et mesurer son efficacité. La réflexion sur les usages des énergies en voie de raréfaction, sur la production de gaz à effet de serre, amène à reconsidérer l'usage d'énergies primaires fossiles pour la génération de chaleur.

Le pétrole viendra à se faire rare à terme (cf. le pic de l'énergie ou « peak oil » démontré en 1956 par Mr HUBBERT). Le gaz suivra ce chemin. L'uranium ne constitue pas à long terme une solution de remplacement, ne serait-ce parce qu'il devient rare et coûteux en termes économiques et environnementaux. Et le charbon, énergie fossile la plus polluante, n'est pas la solution alternative plausible et souhaitée.

Alors la pompe à chaleur ?

Laissons de côté le débat technique sur les procédés et les technologies mis en œuvre pour la fabrication des pompes à chaleur. Attardons-nous sur quelques questions rarement abordées et celle du bilan énergétique et économique de la filière.

Remarques préalables

1. Le langage ordinaire nous autorise l'expression « *énergie électrique* » pour désigner l'électricité que nous consommons à la maison pour de multiples applications toujours plus nombreuses.
2. Or, l'expression est impropre. L'électricité *n'est pas une énergie mais un vecteur*, un moyen de transporter de l'énergie depuis son lieu de conversion en électricité jusqu'à son lieu d'utilisation.
3. Produire de l'électricité nécessite, outre des usines spécialisées (centrales thermiques classiques et nucléaires ...), une source qui contient de l'énergie. En France, pour 80%, il s'agit d'uranium, complété, à hauteur de 20%, par du pétrole, du gaz et du charbon. Et d'autres sources énergétiques renouvelables.

4. L'exposé de la manière dont on produit de l'électricité peut être simplifié comme celui-ci :

Pétrole, gaz, charbon et uranium, par des procédés techniques différents, permettent de générer de la chaleur. Celle-ci permet d'obtenir de la vapeur dans des conditions de pressions et de températures particulières et adaptées. Sa force motrice entraîne une turbine qui entraîne à son tour un alternateur qui produit de l'électricité.

Pour des raisons, là encore techniques, la tension de l'électricité produite est élevée pour son transport, puis abaissée par paliers pour sa distribution finale à la maison, à l'atelier (220 ou 380 volts) à l'aide de transformateurs de tension.

5. Cet ensemble technique de production, de transport et de distribution de l'électricité en France génère des pertes significatives que l'on peut classer en trois catégories. Celles que l'on peut nommer les pertes de génération sont conséquentes, près de 65%, celles qu'occasionnent le transport et la

distribution, qui ne sont pas neutres, celles liées à l'élévation et l'abaissement de la tension et qui s'additionnent aux précédentes.

6. Ces pertes, que l'on sait parfaitement mesurer et apprécier, font que chaque fois que l'on consomme à la maison 1 kilowattheure d'électricité, il nous faut en produire **2.58**. Ce qui n'est pas rien. Encore faut-il que ce rapport entre énergie produite et énergie utilisée soit réel. Ce qui ne va pas de soi puisque de nombreuses études montrent qu'il est plus conséquent, c'est à dire égal à 3 ou 3.3 ⁽¹⁾. Il nous faudrait, alors, produire 3.3 kilowattheures pour n'en utiliser qu'un. Ce qui change beaucoup de choses.
7. L'énergie (contenu dans le pétrole, le gaz, l'uranium,...) qui sert notamment à produire de l'électricité est nommée **« énergie primaire »**. L'électricité que l'on consomme à la maison est, elle, désignée par le terme **« énergie finale »** et/ou secondaire. Nous pouvons donc dire que :
 - a. L'énergie finale exprimée en kilowattheure énergie primaire (kwhep) doit être multipliée par un coefficient de conversion/transformation qui prend en compte les pertes énergétiques lors de la conversion de l'énergie primaire en énergie finale. Ce **coefficient est donc de 2.58** pour l'électricité énergie finale et/ou secondaire.
 - b. Ce coefficient relève d'une convention et d'un compromis et est l'objet de discussions et surtout s'impose à nous. Il est fortement lié au type de production de l'électricité (électronucléaire en France à 80%) et varie d'un pays à l'autre en fonction des modes de production et de l'appréciation des pertes énergétiques de la production et de la distribution.

On a donc pour 1 kwh électrique acheté par le consommateur une production de 2.58 kwh. Pour les autres énergies finales : gasoil, essence, fuel domestique le coefficient est de 1*. Pour le bois de 0.6 (dans certains cas) *

8. Dès lors, quand il nous faudra calculer la performance énergétique d'une maison, d'un bâtiment nous le ferons en kilowattheure d'énergie primaire (kwhep). L'expression retenue est celle d'un ratio kwhep par an et par m² de surface chauffée : kwhep/an/m² (voir la Gibelotte de décembre 2009, les BBC). Ce mode de calcul est tout aussi valable pour l'ensemble des consommations énergétiques des bâtiments.

La pompe à chaleur : un moteur électrique

Restituer sous forme de chaleur au bâtiment l'énergie calorifique extraite de l'air ou du sol est la fonction de la pompe à chaleur. Pour mettre en œuvre le principe de la thermodynamique, nous avons besoin d'un moteur (compresseur) qui est avant tout un moteur électrique qui consomme de l'électricité donc de l'énergie finale.

Tout l'intérêt de cette technologie repose sur la possibilité technique et l'efficacité théorique de restituer plus d'énergie calorifique qu'il n'en faut pour extraire les calories contenues dans l'environnement.

Cette possibilité technique nous est donnée par la performance de la machine et nommée coefficient de performance (C_{op}). C'est une indication qui est fournie par le constructeur de la machine.

Cette performance se calcule en établissant le rapport puissance restituée (chaleur utile pour couvrir les besoins du bâtiment), puissance absorbée (la consommation d'électricité pour le fonctionnement de la machine) ou :

$$P_{\text{rest.}}/P_{\text{abso.}}$$

Les constructeurs nous disent que quand nous fournissons 8 kilowatts de chaleur à un bâtiment, nous avons besoin de 2 kilowatts pour y parvenir. La performance de la machine est donc de $8/2 = 4$; coefficient de performance (COP), qui d'un point de vue énergétique et économique paraît être intéressant.

Or, nous savons que les besoins de chaleur d'un bâtiment sont variables en puissance et dans le temps. Que la température du milieu dans lequel nous puisons les calories est au mieux stable, relativement, dans le temps (temp. du sol) ou fortement variable (l'air).

Les lois de la thermodynamique nous disent que l'efficacité théorique de la machine est en relation directe avec la température de ces deux sources que nous appellerons source froide (milieu d'extraction des calories) et source chaude (chaleur restituée).

Nous prendrons en compte leurs températures, en degré kelvin, nommées **tc** (source chaude) et **tf** (source froide).

Nous pouvons donc maintenant calculer l'efficacité théorique η de la machine ainsi :

$$\eta = tc/(tc-tf)$$

Soit, dans le cadre de la norme européenne EN 14511, qui définit les modalités de mesures de la performance : **tc** = 35°Celsius (308°Kelvin arrond.) et **tf** = 7°Celsius (280°Kelvin arrond.),

$$\eta = 11 = 308/(308-280)$$

Il nous reste donc maintenant à mettre en relation la performance de la machine exprimée par son Cop et l'efficacité théorique, sachant que le cop est donné pour une machine pour une technologie particulière, dans un possible technique donné et dans un cadre normatif défini.

Nous aurons donc, pour une machine dont la performance est de 4 pour $t_f = 7^\circ\text{C}$ et $t_c = 35^\circ\text{C}$ (norme 14511) une efficacité réelle de :

$$4 = (P_{\text{rest}}/P_{\text{abs}})\eta_a / \eta \text{ soit } ((8/2)11) / 11$$

Où η_a est $t_c/(t_c-t_f)$ et η $t_c/(t_c-t_f)$ valable pour températures EN 14511

Comme nous l'avons dit plus haut la température de la source froide dans laquelle nous puisons les calories (l'air extérieur) peut varier fortement.

Exemple : de 7°C elle devient 0°C (273°K) et les besoins en chaleur en regard nécessitent une source chaude de 55°C (2) (328°K).

En conséquence :

$$\eta_a = 6 \text{ (arrondi)} = 328/(328-273)$$

$$\text{et efficacité réelle } \eta_1 = 2.18 \text{ (arrondi)} = ((8/2)6)/11$$

Nous pourrions donc calculer pour chaque variation de t_c et t_f la valeur de l'efficacité réelle η_1 η_2 η_3 , etc. à coefficient de performance (cop), ici 4, constant pour η .

Ce qui nous permet de dire que l'efficacité réelle de la machine est proportionnellement dépendante de la température du milieu dans lequel l'énergie est puisée et des besoins de chaleur du bâtiment.

Première conclusion

La performance énergétique des bâtiments s'apprécie en kilowattheures d'énergie primaire (ep). Les consommations d'électricité des pompes à chaleur sont pour l'utilisateur mesurées en kilowattheures d'énergie finale. Il nous faut donc multiplier par 2.58 (coefficient de conversion ef/ep) pour connaître dans **l'ordre de la production d'électricité** la consommation d'une pompe à chaleur (pac).

Dans notre exemple, pour une hypothèse prenant en compte un cop de 4 et une puissance **P** de 8 kw, nous calculons : 2 kw (soit 8/4) x 2.58 = 5.16 kw x 1000 (heures de fonctionnement de la machine pendant une saison de chauffage) = 5160 kwh qui nous restitueront 5160 kwh x 4 = 20640 kwhep ou 8000 kwh d'énergie finale utile ⁽²⁾ et couvrant notre besoin annuel (8 x 1000). Ce que l'on peut mesurer en situation réelle de fonctionnement ne correspond pas du tout à cette hypothèse. L'efficacité réelle est largement inférieure à ce qui nous est dit, voir « martelé ». Cette efficacité que l'on appelle fréquemment le cop moyen de fonctionnement ou le cop annuel se calcule comme dit plus haut.

Et, il n'est pas possible, sans réelles mesures sérieuses avec un protocole précis, de calculer quelle sera l'efficacité à venir de la machine. Seules les consommations mesurées dans le temps (au moins 3 hivers) permettront de vali-

Pour que la performance de la pompe à chaleur présente un sérieux intérêt, il faut que l'efficacité réelle puisse être supérieure au coefficient de conversion ef/ep soit 2.58 (mieux et souhaitable 3.3), soit un cop moyen supérieur à 2.58 (mieux 3.3). Ce qui n'est jamais le cas pour les pompes à chaleur dites air/air, rarement le cas pour les pompes à chaleur dites air.eau

Deuxième conclusion

Dans l'hypothèse, tout à fait probable et vérifiable, où la pompe à chaleur offrirait une efficacité exprimée en kilowattheure d'énergie finale (kwh_{ef}) supérieure à 1, le gain économique procuré par l'installation de ce générateur de chaleur ne pourra être réel que si la performance mesurée, en fonctionnement, est supérieure à l'écart que l'on peut noter entre les prix par kilowattheure des différentes ressources énergétiques disponibles sur le marché pour répondre dans de bonnes conditions techniques et technologiques au besoin de chaleur. Le coût du kwh d'électricité est évalué en moyenne (06/2010 et hors tarifs spéciaux) à 0.11 cts d'euros abonnement compris. La ressource énergétique disponible sur le marché la moins chère s'achète 0.05 cts d'euros le kwh avec un coefficient de conversion ef/ep de 1.

Il faut donc que la pompe à chaleur ait une efficacité réelle de plus de 2 pour valider économiquement son utilité. Encore ne prend t-on pas en compte sa durée de vie, son coût d'installation. Dans ce cas il faut une efficacité réelle supérieure à 3 pour les systèmes air-eau.

Les svstèmes air-air sont disqualifiés et ne présentent aucune réelle efficacité

Troisième et dernière conclusion

La maîtrise de la demande d'électricité (MDE) est une question d'actualité. Le constat : la consommation d'électricité est en croissance régulière. L'appareil de production est stable et la quantité d'électricité produite ne pourra pas répondre à une demande de plus en plus forte. Il est donc sage de n'utiliser l'électricité que pour des usages intelligents, à renoncer à l'utilisation du chauffage électrique et n'avoir de recours à la pompe à chaleur que dans les cas où le **bâtiment est parfaitement isolé** soit entre 3 et 10 fois mieux que ce que l'on connaît. Ce qui n'induit que de faibles besoins de chaleur. Le prix du kwh d'électricité va connaître sur une période de trois ans une augmentation significative (voir 2^{ème} conclusion).

Installer une pompe à chaleur est possible

➤ si le bâtiment est parfaitement isolé et les besoins faibles à très faibles

- (1) Dans un rapport demandé par Mr Maugard ancien Président du CSTB, intitulé « Relevé de quelques dispositions réglementaires freinant la construction de bâtiments tendant vers le passif et le durable » Janvier 2008 p.2. Les auteurs font remarquer que certaines études relèvent un coefficient de 3.32.
- (2) Le choix a été fait ici de mettre entre parenthèses la question des rendements d'installation pour plus de simplicité.

*** Énergie primaire**

L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium (déf. INSEE)

*** Énergie finale**

L'énergie finale est l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (déf. INSEE)

*** Énergie secondaire**

L'énergie secondaire est toute l'énergie obtenue par la transformation d'une énergie primaire (en particulier : électricité d'origine thermique (déf. INSEE)

