

Les pompes à chaleur dans le scénario négaWatt 2017-2050

Il existe dans l'environnement (l'air, l'eau, le sol), d'immenses quantités d'énergie, mais cette énergie est à un niveau de température insuffisant pour pouvoir être utilisée, par exemple pour se chauffer. Ainsi, avec toute l'énergie du lac Léman, on ne peut même pas faire cuire un œuf. Ce qui précède fait une distinction entre la température d'une énergie, et la température d'un fluide. La température d'une énergie qualifie en réalité sa valeur. Des kWh à 1000°C ont plus de valeur que les mêmes kWh à 100°C.

Mais il faut savoir qu'une énergie est au « niveau zéro » de sa valeur lorsque sa température est de 0 K (soit - 273 °C).

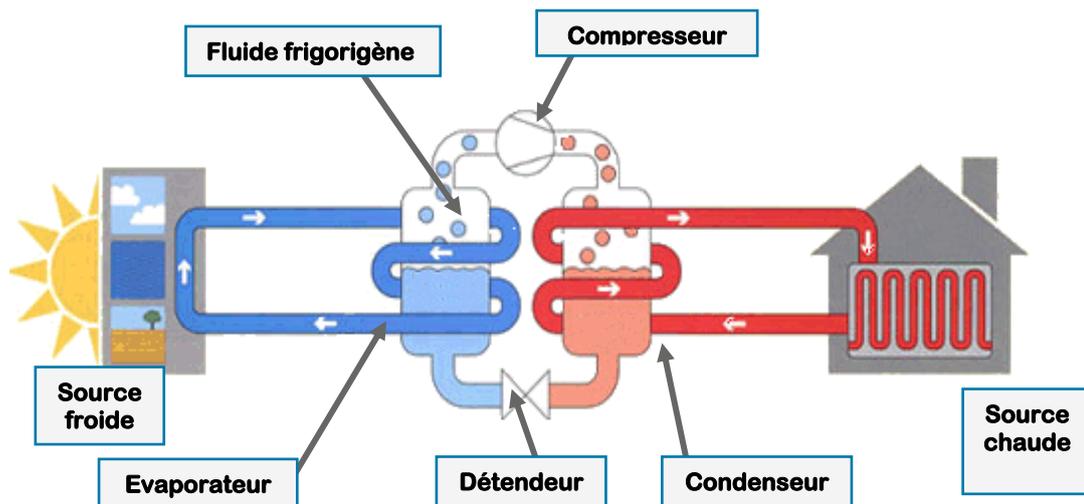
La question est donc : est-ce que cette très grande quantité d'énergie présente dans l'environnement peut être utilisée (et si oui, comment ?), ou bien est-elle perdue à jamais pour les usages que pourrait en faire l'Homme ?

C'est là qu'intervient la pompe à chaleur. C'est en effet la seule machine capable, grâce à un cycle thermodynamique astucieux, de relever le niveau de température d'une énergie, donc de lui redonner de la valeur (on pourrait aussi dire « de l'intérêt »). Et ceci moyennant une dépense énergétique assez faible. Ainsi un kWh à 10°C pourra être transformé en un kWh à 40°C par exemple. Mais « l'effort » à faire est somme toute limité si on considère que, en température absolue, il suffit de faire passer le kWh d'énergie de 283 K à 313 K, ce qui constitue une augmentation (de 11 %) assez mineure.

01. Comment fonctionne une pompe à chaleur ?

C'est ce qu'on appelle une machine « bi-source » parce qu'elle a besoin - pour fonctionner - d'échanger de la chaleur avec deux sources : une froide et une chaude.

La machine est construite autour d'un circuit comprenant un fluide dit frigorigène circulant dans un évaporateur (qui est l'échangeur de chaleur placé en contact avec la source froide), dont le rôle est de donner de la chaleur (prise à la source froide) au fluide ce qui va conduire à l'évaporer. Puis le fluide (désormais à l'état gazeux) passe dans un compresseur qui le comprime fortement (plusieurs dizaines de bars), ce qui exige une consommation d'électricité, mais permet d'augmenter sa température de façon importante. C'est dans cette phase que le niveau de température de l'énergie est augmentée et l'énergie valorisée grâce à l'électricité consommée. Le gaz sous pression passe alors dans un second échangeur, le condenseur, qui est en contact avec la source chaude à qui il cède sa chaleur en se condensant (un fluide qui se condense libère la chaleur qui avait permis de le faire passer de l'état liquide à l'état gazeux). C'est à cet instant que la chaleur prise à basse température à la source froide est cédée à plus haute température à la source chaude. Sortant à l'état liquide du condenseur le fluide traverse ensuite un détendeur (c'est une sorte de vanne cassant la pression) qui réduit la pression du fluide et le refroidit en même temps. Puis le cycle recommence et le fluide pénètre à nouveau dans l'évaporateur.



Cette machine et ce cycle thermodynamique ont de multiples usages :

- elle peut servir de machine à faire du froid, comme dans le cas d'un réfrigérateur. Dans ce cas, l'évaporateur est placé à l'intérieur du réfrigérateur, et le condenseur est la grille noire placée à l'arrière du réfrigérateur. On prend ainsi la chaleur qui est dans le réfrigérateur (c'est pour cela que sa température baisse) et on la rejette à l'arrière (c'est pour cela que la grille noire est toujours chaude). Les groupes frigorifiques fonctionnent exactement sur le même principe.
- elle peut servir de chaudière. Dans ce cas, l'évaporateur est placé à l'extérieur du bâtiment (dans « l'environnement »). Ce peut être dans l'air, dans l'eau d'une rivière, d'un lac, d'une nappe phréatique, ou dans le sol. C'est là qu'il prend son énergie. Le condenseur quant à lui est placé à l'intérieur du bâtiment. Il cèdera l'énergie qu'il a prise à l'extérieur après avoir relevé son niveau de température. Les choses réelles sont parfois un peu différentes car l'évaporateur et le condenseur peuvent être dans la pompe à chaleur, et il existe alors des réseaux d'eau reliant l'environnement et l'évaporateur d'une part, et le condenseur et les émetteurs de chaleur d'autre part.

02. Quelles sont les performances d'une pompe à chaleur fonctionnant en chauffage ?

Une pompe à chaleur prend une quantité d'énergie E_f dans l'environnement (donc gratuite) au niveau de l'évaporateur, elle en augmente la température en consommant de l'électricité (E_e) au niveau du compresseur, et elle libère l'ensemble E_c ($=E_f + E_e$ aux pertes près) dans le logement, au niveau du condenseur.

Le bilan de ces flux énergétiques est exprimé par le coefficient de performance (COP) qui est égal à :

$$\text{COP} = E_c / E_e$$

C'est le rapport de l'énergie récupérée à l'énergie investie. En principe ce COP est toujours largement supérieur à un, ce qui fait tout l'intérêt des pompes à chaleur. Mais la valeur du COP n'est pas une fatalité et elle doit même faire l'objet d'une véritable optimisation. Car la valeur théorique du COP définie par Carnot vaut :

$$COP_{théorique} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Où T_c et T_f sont les températures des sources chaude et froide exprimées en Kelvin.

On voit que le COP est inversement proportionnel à l'écart de température entre les sources chaude et froide : les températures de ces deux sources doivent être les plus proches possibles. Le concepteur devra donc faire très attention au choix de ces deux sources. Pour avoir un ordre de grandeur du résultat final, on pourra retenir que le COP réel vaut, selon les configurations, à peu près la moitié du COP théorique :

$$COP_{réel} = (0,45 \text{ à } 0,55) * COP_{théorique}$$

Ceci montre que la performance d'une PAC sera définie essentiellement par le choix du régime de température des sources chaude et froide. Prenons deux exemples :

- soit une pompe à chaleur air/air. Si la température extérieure est de 0°C et la température de soufflage d'air de 60°C, ce qui correspond approximativement aux valeurs des températures des sources chaude et froide, le COP réel vaut à peu près :

$$COP_{réel} = (333 / (333 - 273)) * 0,45 = 2,5$$

- soit une pompe à chaleur eau/eau fonctionnant avec des sondes sèches verticales placées dans le sol et associée à un plancher chauffant. La température de l'eau sortant du sol est à 12°C et le plancher chauffant est alimenté à 35°C. Le COP réel vaut à peu près :

$$COP_{réel} = (308 / (308 - 285)) * 0,45 = 6,0$$

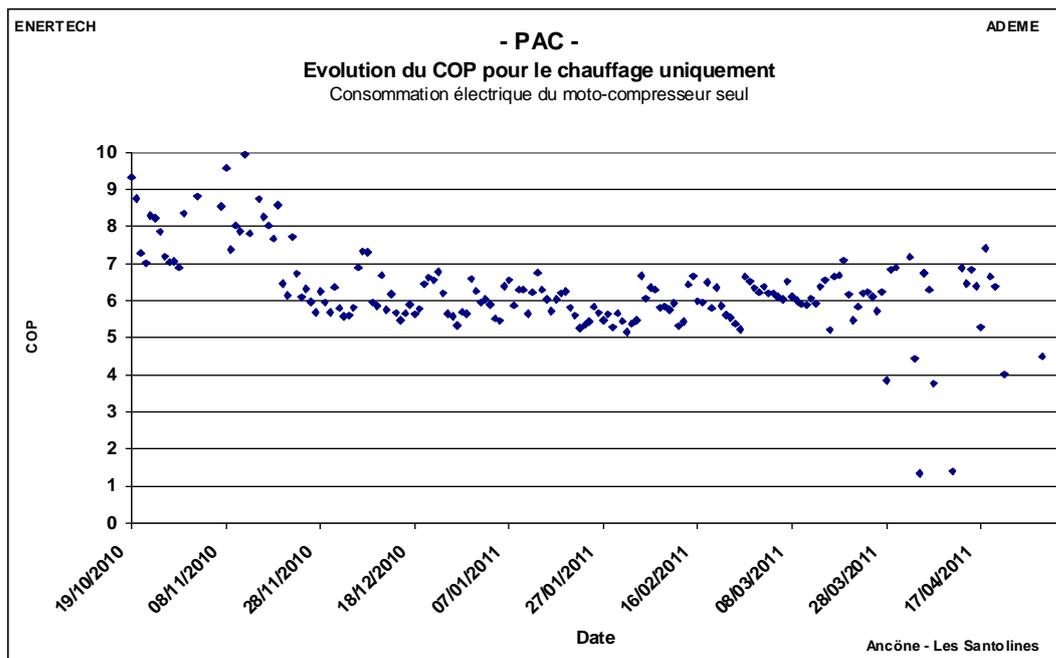
On voit que par un choix judicieux de température on peut orienter très fortement la valeur du COP.

Mais dans la réalité, il faut tenir compte de la consommation électrique des auxiliaires. Il s'agit des pompes et des ventilateurs associés spécifiquement à la pompe à chaleur, donc essentiellement ce qui concerne le circuit évaporateur/source froide. Par exemple, une PAC air/air a besoin d'un ventilateur brassant l'air extérieur sur l'évaporateur. Or l'air est un très mauvais caloporteur et il faut donc des débits d'air très importants pour véhiculer la chaleur. Il s'ensuit que la consommation du ventilateur associé à une PAC air/air est très élevée et réduit considérablement le COP effectif de la PAC. Il est donc toujours mieux d'utiliser de l'eau comme caloporteur car les débits d'eau nécessaires, et la consommation des pompes associées, sont donc faibles. On évitera toujours d'aller chercher de l'eau en profondeur dans une nappe phréatique car il faut la « monter » et c'est une grosse dépense énergétique. Il vaudra toujours mieux faire circuler l'eau dans un circuit fermé, comme les sondes sèches dans le sol, car la consommation sera alors toujours réduite.

Le recours aux principes précédents conduit toujours à des COP au moins égaux à 4.

La mise en œuvre dans des logements sociaux près de Montélimar d'une pompe à chaleur eau/eau sur une nappe phréatique à 3 m de profondeur associée à des radiateurs dimensionnés pour un régime à 45° a fait l'objet d'une campagne de mesure¹ d'une année. La consommation d'électricité pour le chauffage a été de 4,2 kWh/m²/an. Sur l'année, le COP moyen de la machine a été de 6,6 :

¹ [Évaluation des performances énergétiques et environnementales de bâtiments démonstrateurs à haute performance énergétique en Région Rhône Alpes, Enertech](#), Août 2012.



03. Fluides frigorigènes et dérèglement climatique

Toutes les machines thermodynamiques basées sur le principe de la pompe à chaleur utilisent des fluides frigorigènes. Cela concerne, outre les pompes à chaleur, les groupes froids, qu'il s'agisse de froid commercial (supermarché, camions frigos, etc), industriel ou domestique. Cela concerne aussi toute la climatisation.

Le premier des fluides frigorigènes utilisé abondamment, au début du XX^{ème} siècle et jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale, a été l'ammoniac. Mais sa dangerosité et sa toxicité en cas de fuite importante l'ont rapidement fait remplacer par une nouvelle génération de gaz appelés « les fréons » dans le langage courant. Il s'agissait des CFC (chloro-fluoro-carbure) comme le R11, le R12, et des HCFC, ou hydrochlorofluorocarbure, comme le R22, c'est à dire des fluides purs organiques non oxygénés, non sulfurés, contenant du carbone, éventuellement de l'hydrogène, du fluor et/ou du chlore. Mais ces gaz se sont révélés être à l'origine du trou dans la couche d'ozone (à cause de la présence de chlore). Leur disparition a donc été programmée dès 1987 et ils ont quasiment disparu aujourd'hui.

Ils ont été remplacés dans les années 90 par les HFC (hydrofluorocarbure), composés de carbone, d'hydrogène et de fluor, beaucoup moins nocifs pour la couche d'ozone... mais dont certains se sont révélés en revanche être de très dangereux gaz à effet de serre ! Ainsi le R 134a a un Potentiel de Réchauffement Global (PRG, ou GWP en anglais) de 1430 (c'est à dire qu'un kg de ce gaz a le même effet à long terme sur le dérèglement climatique que 1430 kg de CO₂), celui du R 404a de 1760, du 407c de 2550, etc. Leur abandon est donc à nouveau programmé mais de manière lente (ils représenteront encore 21 % des mises sur le marché en 2030), et ils restent très présents dans toutes les machines, sauf dans le froid ménager où l'isobutane (dont le PRG vaut 4) est désormais le seul gaz autorisé.

Depuis dix ans, les laboratoires se sont mis à la recherche de nouveaux fluides frigorigènes dont l'impact sur le dérèglement climatique serait limité, si bien qu'aujourd'hui il existe plusieurs fluides ne portant plus préjudice ni à la couche d'ozone, ni au climat. Pour certains, comme l'ammoniac, c'est un retour en grâce : son PRG vaut... 0. Il n'a aucun impact sur l'effet de serre. Et en plus c'est le plus efficace des fluides frigorigènes car son pouvoir frigorigène est plus élevé que tous les autres. Il n'a jamais cessé d'être utilisé dans

l'industrie, les bateaux de pêche, le froid commercial. Malheureusement il est depuis peu réservé à des machines de puissance supérieure à 300 kW. A Grenoble, la pompe à chaleur du centre commercial de la ZAC de Bonne (800 kW) fonctionne à l'ammoniac, de même que celle de l'extension de l'Ecole des Ponts et Chaussées à Marne la Vallée (80 kW), ou celle de l'Ecole Polytechnique de Lausanne (4 MW).

Le CO₂ lui-même (PRG = 1) et l'isobutane (PRG de 4) déjà cité sont des gaz de plus en plus utilisés. Mais d'autres gaz comme le R1234 (PRG de 4) se développent très vite. La découverte d'un nouveau fluide ne signifie pas la mise immédiate sur le marché de machines fonctionnant avec ce gaz : il faut en effet dix ans pour que les industriels maîtrisent les nouveaux paramètres et livrent les premiers équipements.

En conclusion, on notera que les pompes à chaleur actuelles utiliseront encore pour quelques années des fluides frigorigènes ayant un impact fort sur le dérèglement climatique, mais que de nouveaux fluides sont désormais disponibles sur le marché et que de nouvelles machines utilisant ces gaz apparaîtront dans un délai de 10 ans. D'ici là rien n'interdit d'utiliser les machines à l'ammoniac ou au CO₂ puisqu'elles existent déjà.

04. Est-ce pertinent d'utiliser des pompes à chaleur si elles nécessitent des fluides frigorigènes ayant un impact sur le climat ?

On peut effectivement se poser la question de savoir si c'est pertinent d'utiliser aujourd'hui une pompe à chaleur puisque les gaz frigorigènes utilisés contribuent à l'effet de serre.

La meilleure façon de répondre consiste à comparer sur la durée de vie des machines, une pompe à chaleur et une chaudière à condensation.

Les hypothèses prises pour ce calcul sont les suivantes :

- durée de vie des équipements : 15 ans
- rendement annuel de la chaudière à condensation : 80 % sur pcs
- contenu carbone du gaz naturel : 243 g/kWh_{pcs}
- consommation d'électricité de la chaudière : 0,8 kWh_{el}/m²Shab

- COP annuel global de la pompe à chaleur : 5
- Fluide frigorigène utilisé : R 134a
- charge de fluide : 0,4 kg/kW
- PRG du fluide frigorigène : 1430
- Taux de fuite annuel : 2 %
- Taux de fuite lors de la récupération des gaz, en fin de vie : 5 %

Contenu carbone du kWh électrique (usage chauffage) selon 3 hypothèses :

- kWh moyen fourni par le réseau EDF actuel : 180 g/kWh (cette valeur peut d'ailleurs atteindre au moment de la pointe 480 à 690 g/kWh),
- kWh fourni exclusivement par des ENR aujourd'hui : 12,1 g/kWh
- kWh fourni par le réseau (100 % ENR) en 2050 : 0 g/kWh

Sur ces bases les résultats sont indépendants des besoins énergétiques et sont les suivants :

- avec l'électricité du réseau actuel, la PAC libère 6,9 fois moins de CO₂ que la chaudière gaz à condensation,
- avec l'électricité ENR actuelle, la PAC libère 28,2 fois moins de gaz carbonique sur sa durée de vie que la chaudière gaz,
- avec l'électricité totalement décarbonnée en 2050, la PAC libère 36,4 fois moins de CO₂ que la chaudière gaz.

Dans la réalité, ces résultats seront encore améliorés car les machines utiliseront bientôt des fluides à très faible PRG. Si on fait le calcul avec un fluide dont le PRG est de 4 (comme le R 1234), les facteurs de réduction d'émission de CO₂ de la PAC comparée à la chaudière deviennent respectivement 8,5 avec le mix actuel de production d'électricité, 124 pour le courant d'origine ENR actuel et...13 018 (!) avec un courant 100 % ENR en 2050.

Mais tout ce qui précède est construit autour d'un COP de 5 qui peut s'obtenir avec des pompes à chaleur eau/eau, mais plus difficilement avec des pompes à chaleur dont la source froide est constituée de l'air extérieur. Deux éléments rendent confiants à ce sujet :

- si dans le calcul précédent, en conservant les fluides frigorigènes actuels, le COP annuel ne vaut plus 5 mais 2,5 l'intérêt de la pompe à chaleur subsiste puisque les émissions de CO₂ de la chaudière sont encore 3,8 fois plus élevées que celles de la PAC avec l'électricité du réseau actuel, 23 fois plus élevées si le courant est produit à partir des ENR actuelles, et 36 avec le courant 100 % ENR en 2050, Si on fait l'hypothèse d'un fluide frigorigène avec PRG de 4, ces valeurs deviennent respectivement 4,3, 62 et 13018.
- de nouvelles pompes à chaleur air/eau basées sur la technologie « Inverter » (il s'agit de la variation de vitesse électronique du moteur du compresseur) sont récemment apparues sur le marché : le COP pour une température extérieure de 7°C est de 5,1 ce qui signifie que le COP annuel sera proche de cette valeur. Cette innovation permet donc d'envisager des performances élevées pour les pompes à chaleur, quelle que soit la technologie choisie, du moment que l'émission se fait avec de l'eau.

L'intérêt des pompes à chaleur, même avec les fluides frigorigènes actuels, est évident.

05. Pourquoi le scénario négaWatt utilise-t-il les pompes à chaleur massivement ?

Ce qui précède montre que :

- même dans le contexte actuel caractérisé par l'utilisation de fluides frigorigènes néfastes pour le climat et par un courant électrique encore très carboné pour son utilisation chauffage, la pompe à chaleur est plus vertueuse qu'une chaudière à gaz pour autant qu'elle soit correctement mise en oeuvre, c'est à dire avec un écart de température minimisé entre sources chaude et froide,
- avec l'arrivée sur le marché des nouveaux fluides frigorigènes à très faible PRG, l'intérêt des pompes à chaleur au regard des émissions de CO₂ sera encore plus significatif. Ceci est déjà possible sur les installations les plus importantes avec le retour dans le secteur résidentiel et tertiaire des pompes à chaleur à l'ammoniac,
- la montée en puissance de l'électricité renouvelable va aussi amplifier l'intérêt de la pompe à chaleur qui va devenir le moyen le plus intéressant de se chauffer, bien avant tous les autres sans aucune exception, hormis peut-être le bois. Cet exemple

fait penser que l'électricité peut, si on lui en donne les moyens, être une solution d'excellence même en secteur concurrentiel, ce qui justifie de la privilégier pour cela.

Ces raisons ont donc milité pour l'introduction massive de la PAC dans le scénario négaWatt : en 2050, 50 % des logements seront chauffés à l'électricité par pompe à chaleur. Cette approche s'appuie sur deux autres considérations stratégiques :

- le scénario négaWatt n'a pas voulu utiliser la biomasse de façon trop intensive (on aurait en effet pu privilégier le chauffage au bois) de manière à pouvoir l'utiliser sur d'autres usages et d'autres activités où elle était irremplaçable,
- l'électricité est le seul vecteur distribué absolument sur tout le territoire, à l'inverse de pratiquement tous les autres, ce qui donne une souplesse d'adaptation notamment aux programmes de rénovation.