

Du bon usage des pompes à chaleur

Olivier SIDLER – 11/07/2022

Faut-il ou non recourir massivement aux pompes à chaleur (PAC) pour réduire notre dépendance au gaz russe ? Certainement. Mais surtout pas n'importe comment au risque d'atteindre le résultat inverse.

La pompe à chaleur est une machine unique en son genre, capable de revaloriser une énergie dont la température est trop basse. Celle du sol, de l'air ou de l'eau qui nous environnent ne dépasse jamais 10 ou 12°C et ne permet donc pas de se chauffer avec. Mais la pompe à chaleur, grâce à un cycle thermodynamique astucieux, est capable de relever significativement le niveau de température de cette énergie très abondante, et de la rendre utilisable. Et cette opération a ceci de remarquable qu'en fournissant un kWh d'électricité à la pompe à chaleur, celle-ci restitue de 2 à 7 kWh de chaleur « empruntée » à l'environnement. **Elle constitue donc *a priori* une alliée essentielle dans la transition énergétique.**

Mais pour que ce miracle apparent puisse avoir lieu il faut que deux conditions soient impérativement satisfaites :

1 – Le **Coefficient de Performance (COP) d'une PAC est le rapport de la quantité de chaleur qu'elle fournit à la quantité d'électricité qu'on lui a fournie.** Le COP est inversement proportionnel à l'écart des températures de la chaleur fournie par la PAC et de l'énergie prise dans l'environnement. **Cet écart doit donc être le plus faible possible.** Ainsi le COP peut atteindre 6 ou 7 en prenant la chaleur dans le sol (10 à 15°C) et en la restituant dans un plancher chauffant (35°C), mais il peut ne valoir que 2 en puisant l'énergie dans l'air extérieur (température négative) et en soufflant de l'air à 60°C dans le logement. Dans le premier cas la PAC se justifie pleinement, dans le second très peu.

2 – **La température maximum que peut fournir par elle-même une PAC ordinaire est de 55-60°C¹.** Au-delà, la pression du fluide frigorigène devient beaucoup trop élevée. **Il faut donc toujours s'assurer que les usages en sortie de PAC peuvent se satisfaire de températures inférieures à 55°C.**

Pour la production d'eau chaude sanitaire, les constructeurs pallient ce handicap en dotant les PAC de résistances électriques pouvant porter l'eau à 70°.

¹ Il existe quelques modèles de PAC à « haute température » pouvant atteindre 80°C. Mais leurs performances sont très inférieures (donc on consomme plus d'électricité) et elles coûtent surtout deux fois plus cher.

Mais lorsque l'installation (en l'occurrence les émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants, etc)) nécessite des températures de départ plus élevées que 55°C (cas des vieux bâtiments non isolés), il est nécessaire, sauf à multiplier par au moins 2,5 la surface des radiateurs, de disposer **d'un complément de chauffage**. C'est le cas dès que la température extérieure est inférieure à 8 ou 9°C (exemple d'une installation avec loi d'eau « 90°C/70°C » en Ile de France). Ce complément est assuré obligatoirement par un **second système de chauffage** qui peut être soit la chaudière déjà en place (la pompe à chaleur est alors dite « en relève de chaudière »), soit une chaudière rapportée (c'est ce que proposent les PAC hybrides qui abritent sous le même capot une pompe à chaleur et une chaudière gaz à condensation), soit des convecteurs électriques, ces derniers pouvant être privilégiés pour leur faible coût et l'absence de recours au gaz ou au fioul. Et dans ce cas, par grand froid l'essentiel de la consommation d'électricité sera celle des convecteurs électriques. Ce qui aura une incidence très forte sur la période de pointe. Dans le cas des PAC hybrides ou des chaudières associées, l'essentiel de la consommation (60 à 70%) est assuré par la chaudière et on n'a donc guère progressé en matière de réduction des GES.

Les pompes à chaleur auront donc un fonctionnement optimal à la condition essentielle que la température de l'air ou de l'eau qu'elles fournissent ne dépasse pas 45°C. On disposera alors de COP très élevés² et de la garantie, selon les types de PAC, de ne pas ou peu recourir aux résistances électriques de la machine (qui sont censées porter à 55° ou 60°C la température en sortie de PAC si nécessaire). Mais ceci suppose que les émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants, ventilo-convecteurs) du logement soient eux-mêmes à basse température, ce qui a des conséquences importantes en rénovation.

Que va-t-il se passer si on substitue des PAC aux chaudières fioul et gaz de 50% des logements de classes F et G (objectif 2025-2026) ?

Nota : toutes les estimations de consommation, de puissance et d'émissions qui suivent ont été déterminées dans l'hypothèse où 50 % des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul (soit au total 2 868 000 logements) étaient équipés d'une PAC air/eau (objectif à 2028 pour respecter la trajectoire de la PPE). La consommation actuelle de ce sous ensemble est de 20,5 TWh de gaz et de 14,5 TWh de fioul. Les émissions s'élèvent pour le gaz comme pour le fioul à 4,7 M t CO₂.

Il existe quatre cas de figure :

■ **si le logement est doté d'un plancher chauffant fonctionnant à basse température** (par exemple 50/40), la PAC prendra le relais de la chaudière sans difficulté. La consommation en énergie primaire sera améliorée de 36 %, et celle en énergie finale sera divisée par 4,2. Les émissions de GES seront fortement réduites (d'un facteur 8 à 10). Mais les niveaux de consommation d'électricité, et peut-être surtout de puissance de pointe, seront importants : si la moitié des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul

² Comme en attestent toutes les campagnes de mesure faites : il existe des logements sociaux fonctionnant avec une PAC dont le COP annuel moyen est de 6,6. La consommation de chauffage n'est que de 4 kWh/m²/an d'électricité.

étaient de ce type (ce qui n'est absolument pas le cas), la consommation d'électricité induite s'élèverait à 5,2 TWh (soit la production annuelle d'un réacteur nucléaire actuel), ce qui serait raisonnable, mais la pointe (pour -5°C extérieur) augmenterait de 3,1 GWe (soit la puissance de 2 EPR). Quant à l'usager, il verrait sa facture de chauffage diminuer d'un facteur 2. C'est donc une solution qui serait intéressante en terme de consommation mais pas en terme de puissance de pointe. La raison principale en est que la consommation spécifique moyenne de cette fraction du parc serait encore de 130 kWh/m²/an (soit en classe C). Mais ce cas est tout à fait théorique car il n'existe pratiquement pas de logements anciens, donc non isolés et en classes F et G, chauffés par des planchers chauffants basse température (car la surface totale de plancher serait insuffisante !). Ce type d'installation n'apparaît qu'à partir de 1982, donc dans des bâtiments isolés correspondant à la seconde réglementation thermique.

■ **Si le régime de température du plancher chauffant (bâtiment des années 50-60) est de type 70°/60°, l'installation ne pourra pas fonctionner et il y aura insuffisance de chauffage (pour une température extérieure de -7°C la température intérieure sera de 14°C).** Donc sinistre et litige juridique. Aucune PAC ne devrait être posée dans de tels logements.

■ **Si le logement est équipé de radiateurs**, leur fonctionnement est simple : plus il fait froid, plus la température de l'eau qui les alimente est élevée. Dans les bâtiments d'avant 1975, cette température est en général de 80 ou 90 °C pour la température extérieure de base. Si on se contente de remplacer une chaudière par une PAC ordinaire, celle-ci ne pourra pas produire d'eau à plus de 55°C. Dès que la température extérieure sera inférieure à 8 ou 9°C, on aura une insuffisance de chauffage. Par une température extérieure de -7°C la température intérieure sera inférieure à 9°C... Il s'agit à nouveau d'une situation de sinistre conduisant à un litige juridique.

Pour éviter ce sinistre il existe deux possibilités :

✓ **Ajouter des radiateurs** dans le logement pour augmenter suffisamment la surface d'échange et faire en sorte que la température de l'eau de la PAC soit désormais suffisante : pour que les radiateurs fonctionnent en étant alimentés à 55°C il faudrait multiplier par 2,5 leur taille, mais pour avoir 45°C (ce qui conférerait à la PAC de très bonnes performances), il faudrait multiplier cette surface par 4,3 ce qui sera la plupart du temps impossible dans un cas comme dans l'autre,

✓ **Recourir massivement à des chauffages d'appoint :**

- Pour minimiser les coûts et les émissions de GES il s'agira souvent de **convecteurs électriques** (puisqu'on veut se passer de gaz). Les PAC fonctionneront en permanence et les convecteurs complèteront la demande lorsqu'elle sera insuffisante. Il s'ensuivra une augmentation de la pointe hivernale (+4,8 GWe, soit 3 réacteurs EPR, dont 3,4 GWe pour les convecteurs d'appoint) qui supposera la mise en marche...de centrales au gaz, ce même gaz dont on se proposait de réduire la consommation. On risque donc

d'atteindre l'inverse du résultat recherché. Sans évoquer les difficultés pour réguler ce type d'installation comportant deux sources de chaleur complémentaires fonctionnant simultanément. Quant à la consommation d'électricité, elle augmentera de 9,8 TWh (production annuelle d'un EPR).

- **La PAC peut aussi être associée à une chaudière.** Il peut s'agir de la chaudière existante. On parle alors d'une **PAC en relève de chaudière (PERCHE)** : la PAC fonctionne seule tant que la température extérieure est supérieure à 8 ou 9°C (point de bivalence pour laquelle l'eau de la PAC est au maximum : 55°C), et pour les températures inférieures, la PAC est à l'arrêt et c'est la chaudière qui fonctionne. Ce dispositif est coûteux, difficile à régler et suppose une disponibilité de place faisant souvent défaut.

Mais il peut aussi s'agir d'une **PAC hybride** : sous un même capot on a placé une PAC et une chaudière gaz à condensation. Le fonctionnement est identique au cas de la PAC en relève de chaudière. Dans cette configuration, la consommation électrique des PAC est de 3,9 TWh d'électricité, et celle des chaudières de 14,7 TWh de combustibles fossiles. Les émissions ne sont réduites que de 29 % (gain de 1,8 M t CO₂) dans le cas des PAC en relève de chaudière, mais de 46% (gain de 3,33 M tCO₂) dans le cas des PAC hybrides (si elles sont toutes associées au gaz). La réduction de GES n'est donc pas suffisante. Seul avantage : il n'y a pas de pointe électrique supplémentaire puisque ce sont les chaudières qui fonctionnent seules par grand froid. Pour les particuliers, il n'est pas certain que la réduction de consommation de gaz ou de fioul compense la consommation d'électricité de la PAC et la nécessité d'un double abonnement (électricité et gaz) avec des niveaux de puissance souscrite élevés.

■ Il existe des **pompes à chaleur « haute température »** capables d'atteindre 80°C. Ces machines pourraient fonctionner sur les bâtiments existants en minimisant les recours à un appoint électrique (uniquement lorsque la température de départ dépasse 80°C, ce qui est rare). Elles coûtent toutefois près de deux fois plus cher et leur performance est mécaniquement dégradée par les niveaux de température atteints. Elles nécessitent aussi une maintenance rigoureuse et de qualité. Enfin, l'unité extérieure est relativement volumineuse et bruyante. Ces machines pourraient donc dans certains cas, plutôt rares, être utilisées en remplacement de chaudières sans autre forme d'intervention. Par rapport à la solution précédente utilisant des convecteurs en appoint, les PAC haute température réduiraient la consommation électrique et les émissions de 10% (-1,0 TWh et -0,13 M t CO₂), et la pointe de seulement 13% (-0,6 GWe). Toutefois, les niveaux de consommation (8,8 TWh) et surtout de pointe (4,2 GWe) resteraient très problématiques. Cette solution évite donc le sinistre technique (insuffisance de chauffage) mais elle est coûteuse, délicate à maintenir techniquement, et ses performances ne sont pas très bonnes à cause du niveau

élevé des températures qui dégrade le COP. C'est donc une solution à ne préconiser que dans certains cas particuliers.

En conclusion, remplacer uniquement une chaudière par une PAC ne peut fonctionner que si l'émission de chaleur du logement est déjà assurée par un plancher chauffant basse température, ou si la PAC est à haute température. Dans tous les autres cas l'installation ne pourra pas chauffer correctement le bâtiment, sauf à associer un second système de chauffage à l'installation (convecteurs électriques ou chaudière). Mais toutes les solutions comportant une chaudière conduisent à des émissions beaucoup trop élevées (sauf à introduire du biogaz). Pour les solutions « tout électrique » (PAC haute température ou PAC+convecteurs), la réduction des émissions est très significative mais les niveaux atteints par la pointe électrique et la consommation restent incompatibles avec les capacités de l'offre dans les prochaines années.

La raison de cela tient à ce que l'isolation des bâtiments n'est pas envisagée dans ce qui précède si bien que la quantité d'électricité nécessaire et surtout la pointe additionnelle à cette substitution sont donc importantes. Enfin, dans peu de temps il faudra tout recommencer pour que le logement soit rénové au niveau BBC, ou devienne un logement à émission nulle comme le projette la révision de la Directive Européenne Bâtiment. Se contenter de mettre une PAC dans un logement existant sans rénovation préalable est donc une solution chère et finalement peu efficace globalement.

Comment utiliser efficacement les PAC en substitution de chaudières fioul et gaz ?

Pour que les PAC fonctionnent correctement il faut abaisser la température de l'eau nécessaire au chauffage des passoires énergétiques. Pour cela, il suffit que les radiateurs (ou tout autre type d'émetteurs) fonctionnent en régime de base à 45/35°C. Le moyen d'y parvenir est simple et il s'inscrit de façon urgente dans la transition énergétique : **il suffit de réduire les besoins du bâtiment en le rénovant, par exemple *a minima* au niveau BBC.**

Mais au cours de la rénovation la taille des radiateurs ne va pas changer, et il faut comprendre que ce sont donc eux qui vont imposer la puissance qu'ils sont susceptibles d'émettre avec ce nouveau régime de température, et **c'est cette puissance qui va fixer le niveau de déperditions du logement, donc finalement le niveau de réduction des besoins qu'il faudra mettre en œuvre dans la rénovation.** Pour passer d'un régime de température 90/70°C à un régime 45/35°C, il faut diviser par 4,5 le niveau total des déperditions (parois+ventilation), et grâce aux performances de la PAC, cela conduit finalement à diviser par plus de 10 la consommation en énergie primaire. Mais ce n'est pas vraiment un choix, c'est ce que contraint à faire la PAC si on veut qu'elle fonctionne correctement. Il est exact qu'on pourrait choisir un régime de température plus élevé, comme 55/45°C, ce qui réduirait un peu la contrainte sur les déperditions (qui devraient seulement être divisées par 2,5), mais cela multiplierait par 2,8 la consommation de la PAC ainsi que les émissions, et cela augmenterait d'un facteur 2,3 la puissance de pointe.

En visant une loi d'eau 45/35°C et en appliquant ces principes à la rénovation de 50% des logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz, mais en limitant à 70% des

besoins de base la puissance des PAC, on obtient une consommation d'électricité de 0,63 TWh (soit 10 % de la production annuelle d'un réacteur actuel ou 6,5 % de celle d'un EPR), une pointe électrique de 0,63 GWe (soit 40% de la puissance d'un EPR) et des émissions divisées par 80, réduites à 0,078 M t CO2/an. La consommation d'énergie primaire n'est plus que de 15 kWh/m²/an pour le chauffage seul, soit une division par 13. Le COP annuel est de 3,4. Les PAC ont un fonctionnement optimal et contribuent de façon magistrale à la réduction des émissions pour une contribution en électricité très réduite ne nécessitant pas de lourds investissements sur la production.

En conclusion, l'incitation à installer des PAC en substitution de chaudières ne pourra fonctionner correctement qu'à condition d'être obligatoirement accompagnée d'une rénovation des bâtiments *a minima* au niveau BBC. Ne pas le faire conduirait, soit à une insuffisance forte de chauffage, soit à une explosion de la pointe électrique en hiver et à un recours massif aux centrales au gaz compte tenu de l'échéance réduite (2026-2027). En revanche, respecter cette contrainte permet de faire fonctionner correctement les pompes à chaleur et d'obtenir des niveaux de consommation, de puissance électrique en pointe et surtout d'émissions extrêmement faibles.

Cette voie est la seule qui réponde à toutes les contraintes actuelles : elle supprime tous les combustibles fossiles, tire le meilleur parti possible de la PAC, réduit de façon drastique la consommation d'électricité nécessaire à l'élimination de tous les fossiles et ne nécessite qu'une puissance de pointe extrêmement réduite. Et ce, bien que les PAC soient dimensionnées pour n'offrir que 70 % de la puissance max, le relais étant pris par des résistances lorsque la température est inférieure à -2 ou -3°C. Il faut encore signaler que les performances de ces machines pourraient encore être améliorées de plusieurs dizaines de % par l'utilisation, aussi souvent que possible, de modèles de PAC eau/eau et de régulation de puissance par compresseur à vitesse variable (Inverter).

Synthèse des principaux résultats :

Solutions - France entière	Type de PAC	Puissance électrique [GWe] pour -5°C			Consommation annuelle [TWh]			Emissions CO2
		PAC	Appoint	Total	PAC	Appoint	Total	M tonnes/an
1 - Pac ordinaires sans rénovation préalable avec appoint par convecteurs électriques	Air/eau	1,4	3,4	4,8	7,6	2,2	9,8	1,23
2 - Pac ordinaires sans rénovation préalable avec appoint par chaudière		0,0	0,0	0,0	3,9	14,7 (fossile)	3,9	4,40 ou 2,88 si gaz seul
3 - Pac haute température sans réno préalable avec appoint par résistances électriques	Air/eau	3,7	0,5	4,2	8,8	0,0	8,8	1,10
4 - Pac ordinaires sur bâtiments rénovés BBC avec appoint par effet Joule intégré - TOR	Air/eau	0,40	0,23	0,63	0,63	0,00	0,63	0,078
Puissance appelée pour une température extérieure de -5°C et consommation annuelle d'électricité								
50% du parc de logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul								
Consommation actuelle : 20,5 TWh (gaz) et 14,5 TWh (fioul)								
Emissions actuelles : 4,7 Mt CO2 (gaz) et 4,7 Mt CO2 (fioul)								

Choisir de développer l'utilisation des PAC n'a donc de sens, d'intérêts économique, énergétique et environnemental qu'en associant ce développement à des rénovations très performantes divisant par 4 ou 5 les besoins des logements. Mais dans certains cas fort

nombreux et bénéficiant actuellement d'aides de l'Etat, l'utilisation des PAC va conduire à des sinistres et une insuffisance de chauffage.

Y a-t-il un type de PAC à éviter ?

Les principes de fonctionnement décrits précédemment incitent à conclure que :

1 – Les PAC air/air sont, hormis sur le bassin méditerranéen, disqualifiées à cause des écarts de températures auxquelles elles conduisent, mais aussi à cause de la très forte consommation d'électricité des deux ventilateurs associés. Elles ne peuvent de toute façon pas se substituer à une chaudière couplée à une distribution par eau. Elles ne bénéficient d'ailleurs plus d'aucune aide.

2 – Les PAC air/eau ne nécessitent pas de travaux de captage à l'extérieur (forage, nappe) et peuvent conduire à des performances acceptables à condition que la température de la chaleur fournie ne dépasse pas 40 ou 45°C. Se méfier du bruit de l'unité extérieure. Pour des raisons d'optimisation, elles ne sont pas dimensionnées pour fournir la puissance maximale par grand froid et recourent donc à un appoint électrique intégré à la machine pour les températures négatives.

3 – Les PAC eau/eau sont de très loin celles qui peuvent offrir les meilleures performances conduisant à des COP annuels entre 6 et 7 et à aucune consommation d'électricité par effet Joule. Mais elles supposent des travaux à l'extérieur (forage géothermique, nappe phréatique, captage rivière) et sont donc un peu plus chères.

4 – Les pompes à chaleur dites « à haute température » permettent d'atteindre des températures d'eau de 80°C, mais leurs performances sont mécaniquement dégradées par le haut niveau des températures et elles coûtent beaucoup plus cher que les modèles « ordinaires ».

5 – Les pompes à chaleur « hybrides » sont des PAC associées, sous un même capot, à une chaudière. C'est donc un dispositif basé sur le principe d'une PAC en relève de chaudière. Leur « avantage » est de pouvoir être mises en place dans un logement sans faire au préalable des travaux de rénovation. Leur inconvénient est de coûter assez cher, de ne réduire que très partiellement les émissions et de n'apporter que des solutions partielles aux problèmes posés, sans réduire le niveau général de consommation.