



ASSOCIATION  
**négaWatt**

# Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation

---

Rapport — Novembre 2022



# Résumé

---

L'objet de cette étude est d'identifier les conditions de fonctionnement impérativement requises pour qu'une pompe à chaleur (PAC) puisse être installée à la place d'une chaudière, et accessoirement quelles sont les conditions optimales de cette substitution. Dès lors seul le parc de chaudières à combustible se trouve concerné. Afin de quantifier l'impact des différentes mesures abordées et de mieux appréhender les enjeux de chaque solution, un modèle de fonctionnement des PAC a été construit et appliqué à 50 % du parc de logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz. Cet échantillon focalisé sur les « passoires thermiques » est effectivement prioritaire par le niveau de consommation et d'émissions de GES des logements qui le composent. Le taux de 50% a été choisi car il conduit à environ 1,4 millions de logements. Donc, s'ils devaient tous être rénovés d'ici 2028, il faudrait en rénover 287 000 par an, soit un nombre parfaitement compatible avec les objectifs fixés à cette échéance par la PPE qui est, en principe, la feuille de route de la France.

Il ressort de ces analyses que le rôle joué par les pompes à chaleur (PAC) dans la politique de rénovation sera très différent selon que son développement est correctement encadré ou non. L'absence de règles et d'obligations suffisamment claires et respectées sur les conditions d'installation des PAC est susceptible de conduire à des désordres graves manquant de surcroît les cibles de performance visées. A l'inverse, la compréhension de leurs contraintes de fonctionnement et de leur bonne utilisation, permet un fonctionnement optimal des PAC qui constituent alors, et sans appel, une des solutions majeures de décarbonation du bâtiment.

L'étude démontre en effet que :

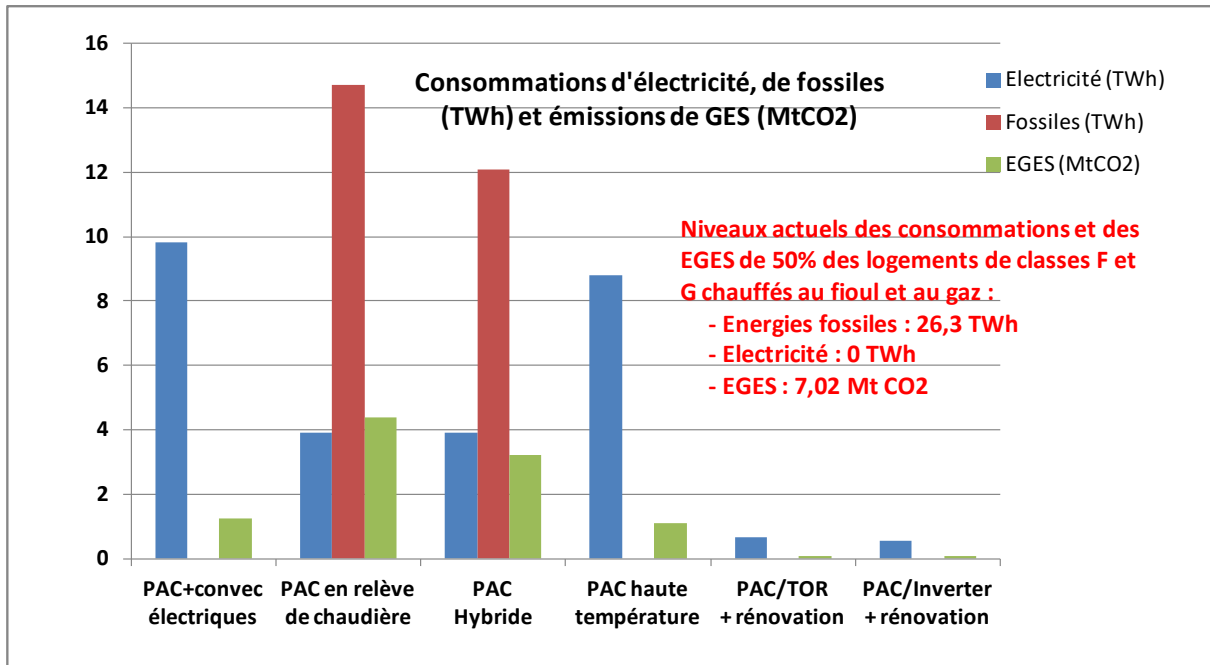
- **Il est impossible d'uniquement remplacer une chaudière par une PAC ordinaire dans un bâtiment ancien (datant d'avant 1975),** car le niveau de température nécessaire dans les émetteurs (radiateurs) de ce dernier est beaucoup trop élevé au regard des températures que peut fournir une PAC (55°C). **On retiendra qu'une PAC n'est pas une chaudière car plus il fait froid, plus la puissance qu'elle peut délivrer diminue (à l'inverse d'une chaudière).**
- A défaut de rénover préalablement les bâtiments, la mise en œuvre d'une PAC suppose de disposer ou de mettre en place une installation de chauffage complémentaire. Cela peut-être des convecteurs électriques, le fonctionnement de la PAC « en relève de la chaudière existante », une PAC hybride (c'est-à-dire une PAC et une chaudière placées sous le même capot), ou une PAC à haute température.
- Ces solutions, malgré l'existence assez fréquente d'un surdimensionnement initial de l'installation de chauffage en place, réduisent insuffisamment les émissions de GES, mais surtout elles génèrent de nouvelles consommations d'électricité et des puissances appelées très problématiques par leur importance. Elles ne constituent donc pas une bonne réponse pour la rénovation des bâtiments, en plus d'être très coûteuses.
- En revanche, si on rénove préalablement les bâtiments pour faire en sorte que la température de départ vers les émetteurs en place ne soit plus 90°C mais 45°C, les PAC fonctionnent alors dans des conditions exceptionnelles conduisant à des émissions de GES, des consommations et des appels de puissance extrêmement faibles (pour les logements de classes F et G chauffés par hydrocarbure, on observe une **division par 100 des émissions de GES et par 15 des consommations d'énergie primaire**).

Les graphiques suivants sont basés sur une simulation dans laquelle seraient mises en œuvre les différentes hypothèses d'installation des PAC dans 50% des logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz. Elles montrent que les solutions réduisant le moins les émissions de GES sont celles associant, en l'absence de rénovation, une PAC et une chaudière en complément. L'utilisation des convecteurs électriques en appoint est bon marché à l'installation mais génère de très fortes consommations d'électricité et des pointes difficiles à absorber. Les PAC haute température améliorent un peu les émissions, mais de façon insuffisante. Elles coûtent très cher, sont très encombrantes, délicates à régler et nécessitent un entretien très rigoureux.

La mise en œuvre de PAC associées à une rénovation réduisant les besoins de chauffage d'un facteur 4 conduit à des bilans exceptionnels que ce soit en consommation, en puissance ou en émission. Ces performances sont encore meilleures avec les régulations de type Inverter plutôt que celles de type TOR (Tout ou Rien). La rénovation « facteur 4 » permet en effet, en laissant en place les émetteurs (radiateurs) existants, d'abaisser jusqu'à 45°C leur température et d'offrir des conditions optimales de

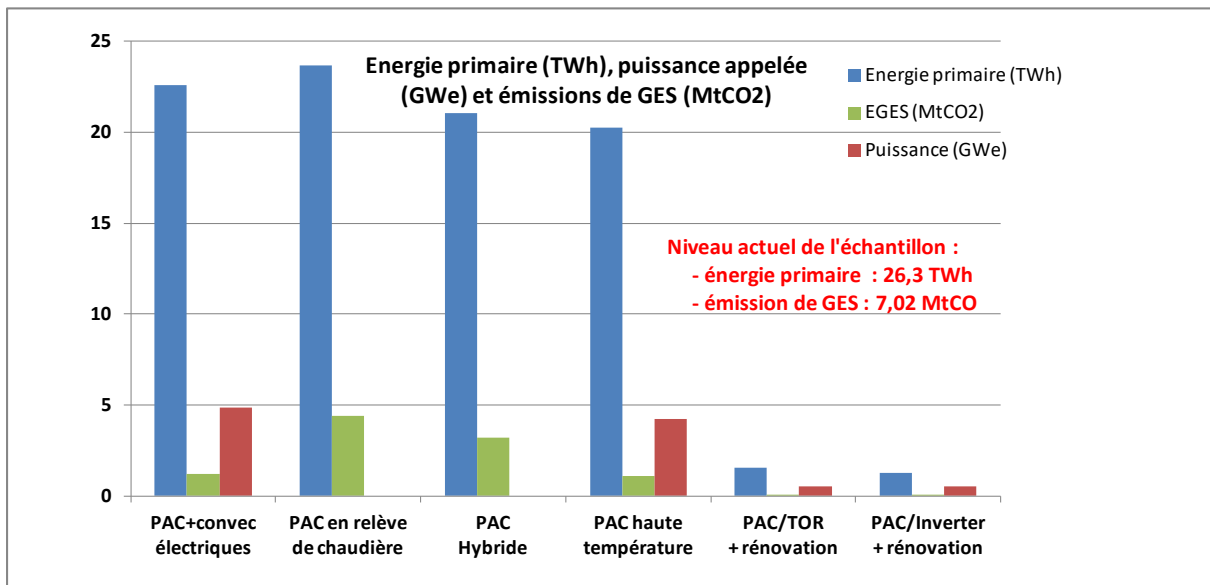
fonctionnement aux PAC. Ainsi, la consommation d'électricité pour le chauffage n'est plus que de 5 ou 6 kWh/m<sup>2</sup>/an et les émissions de l'ordre de 0,7 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an.

Ceci suppose à l'évidence que la température de sortie du condenseur soit effectivement programmée en fonction de la température extérieure (loi d'eau) et que les circuits auxiliaires soient conçus pour être les plus efficaces et donc les plus économes possibles.



*Consommations d'électricité, d'énergie fossile et émissions de GES des différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur*

*Cible de l'évaluation : 50% des logements de classes F et G équipés de chaudières gaz et fioul*



*Consommation d'énergie primaire, puissance électrique de pointe et émissions de GES des différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur*

*Cible de l'évaluation : 50% des logements de classes F et G équipés de chaudières gaz et fioul*

Ceci ouvre de nouvelles perspectives très intéressantes en matière de rénovation :

- Lors d'une rénovation complète et performante, et pour un coût total sensiblement équivalent, il est préférable de mettre en place une PAC plutôt qu'une chaudière car cela permet de réduire à moins de 1,0 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an les émissions de GES du chauffage.
- Si tous les logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul étaient rénovés de la sorte, la puissance appelée pour une température extérieure de -5°C induite par ces travaux ne serait que de 1,0 GWe, soit 60% de la puissance d'un seul réacteur EPR. Ceci correspond à une puissance de 4,5 W/m<sup>2</sup>. Développée à grande échelle, cette stratégie permettrait de sortir des situations de pointes hivernales que rencontre la France depuis des années, de limiter les importations d'électricité ainsi que la taille du programme de production à construire et les coûts afférents.
- Cette façon de procéder accélérerait fortement la réduction des émissions, ce qui offrirait à la France l'occasion de réduire le retard accumulé depuis plusieurs années en matière de rénovation.

Par ailleurs ce développement sera d'autant plus performant que :

- Les PAC eau/eau seront privilégiées, dans la mesure du possible et des dispositions locales, par rapport aux PAC air/eau car elles réduisent encore de 25% la puissance de pointe et de 14 à 18% la consommation et les émissions selon que le mode de régulation des PAC est TOR (tout ou rien) ou de technologie Inverter. Elles ne présentent pas l'inconvénient des PAC air/eau dont le bruit est souvent gênant pour le voisinage s'il n'est pas correctement traité.
- La source froide pourra provenir du sous-sol (nappe phréatique peu profonde ou sondes sèches jusqu'à 140 m. Celles-ci apportent 50 W/ml de chaleur à l'évaporateur).
- L'optimisation (visant à minimiser la puissance appelée) du taux de charge à la température de base des PAC conduit à une valeur, indépendante de la nature des PAC, de 87% pour les PAC régulées en TOR et de 100% pour les PAC régulées par technologie Inverter.

Les pompes à chaleur sont donc appelées non pas à remplacer uniquement des chaudières comme c'est actuellement le cas, au risque de dysfonctionnements graves, mais à être couplées avec des rénovations complètes et performantes ambitieuses. Le résultat obtenu en termes de performance n'a aucun égal et lui seul permettra de pouvoir encore espérer atteindre la neutralité carbone en 2050. Le résultat est exceptionnel tant pour la réduction des émissions de GES que pour le faible niveau des consommations et des puissances appelées atteint.

L'étude démontre l'ensemble de ces éléments en s'appuyant sur une modélisation simplifiée du parc de logements et du fonctionnement des pompes à chaleur.

# Table des matières

---

<b>RESUME.....</b>	<b>1</b>
TABLE DES MATIERES.....	5
<b>1 – Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>2 – Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur.....</b>	<b>8</b>
2.1 Principe général.....	8
2.2 Les limites des pompes à chaleur.....	11
2.2.1 L'influence sur le COP de la température des sources chaude et froide.....	11
2.2.2 Limitation du niveau de température de la source chaude.....	11
2.2.3 Nature du fluide frigorigène.....	11
2.2.4 Les différents types de pompe à chaleur.....	12
<b>3 – Utilisation des pompes à chaleur dans les bâtiments neufs.....</b>	<b>15</b>
<b>4 – Rappels techniques relatifs à la rénovation des bâtiments.....</b>	<b>16</b>
4.1 Caractéristiques principales des opérations de rénovation.....	16
4.2 Conditions de l'équilibre thermique d'un local chauffé.....	17
<b>5 – Cas particuliers des Logements chauffés par convecteurs électriques.....</b>	<b>19</b>
<b>6 – Remplacement des chaudières existantes par des pompes à chaleur.....</b>	<b>20</b>
6.1 Modélisation simplifiée du parc et périmètre adopté.....	20
6.2 Peut-on uniquement remplacer une chaudière par une PAC ?.....	20
6.2.1 L'incompatibilité des niveaux de température.....	20
6.2.2 Influence du surdimensionnement initial des installations de chauffage.....	22
6.2.3 Conclusion.....	23
6.3 Logements équipés d'émetteurs de chaleur à basse température (<50°C).....	24
6.4 Logements équipés d'émetteurs de chaleur à haute température (>60°C).....	24
6.4.1 Augmentation de la surface des émetteurs.....	25
6.4.2 Adjonction d'un second mode de chauffage en complément de la PAC.....	25
6.4.3 Utilisation des pompes à chaleur haute température.....	29
6.5 Conclusion sur la substitution d'une PAC à une chaudière sans rénovation.....	31
<b>7 – Comment utiliser efficacement une PAC en substitution de chaudières fioul ou gaz ?.....</b>	<b>32</b>
7.1 Rénover pour rendre compatible la température des émetteurs avec les PAC.....	32
7.2 Bilan avec des pompes à chaleur régulées par tout ou rien.....	32
7.3 Bilan avec des PAC régulées par la technologie Inverter.....	34
7.4 Optimisation du taux de sous dimensionnement des PAC.....	35
7.5 Conclusion sur l'association d'une PAC et d'une rénovation performante.....	38
<b>8 – Ce qu'enseignent les campagnes de mesure.....</b>	<b>39</b>
8.1 Logements sociaux à Ancône (Drôme).....	40
8.2 Presqu'île Grenoble (Isère) - Logements collectifs.....	41
8.3 Bourg lès Valence (Drôme) : 60 logements sociaux.....	43
8.4 Rénovation du siège de la FFB Drôme-Ardèche à Valence(Drôme).....	44
<b>9 – Conclusion générale.....</b>	<b>46</b>
<b>Annexe 1 : Détermination de la loi d'eau.....</b>	<b>51</b>
<b>Annexe 2 : Description sommaire du modèle de calcul.....</b>	<b>52</b>
1 – Périmètre de l'étude.....	52
2 – Modélisation des charges thermiques du parc.....	53
2.1 Les conditions de l'équilibre thermique d'un parc de logements.....	53
2.2 Contribution des pompes à chaleur au chauffage des locaux non rénovés.....	56
2.3 Contribution des pompes à chaleur au chauffage des locaux rénovés.....	57

# 1 — Introduction

---

La France est aujourd'hui confrontée à un double défi : réduire de manière massive ses émissions de gaz à effet de serre (GES) afin de limiter les impacts du changement climatique, et gérer une crise des ressources énergétiques consécutive à la fois à la guerre en Ukraine et aux aléas de la production électrique. L'une des solutions à ces défis passe par la réduction drastique des consommations d'énergie.

Avec une part désormais établie à 49% le bâtiment est en France la première source de consommation d'énergie finale et le second secteur pour les émissions de GES après les transports. Il est donc légitime de s'intéresser aux solutions techniques susceptibles de contribuer à relever ce double défi. La pompe à chaleur fait partie de ces technologies dotées d'un très fort potentiel, mais son fonctionnement est un peu contre intuitif et il est nécessaire de bien en saisir les mécanismes pour pouvoir l'utiliser de manière optimale.

Préalablement à toute chose, il conviendra de comprendre qu'**une pompe à chaleur n'est pas une chaudière** : sa mise en œuvre et son utilisation nécessitent le respect de certaines règles sans lesquelles il existe un risque avéré de sinistre dans certains cas, et de sévères contreperformances.

La pompe à chaleur est aujourd'hui principalement mise en avant pour réduire les émissions importantes des chaudières gaz et fioul. **La présente étude s'est donc focalisée sur cette question d'actualité de la substitution d'une PAC à une chaudière.** Il serait erroné d'en conclure que les logements chauffés actuellement par convecteurs électriques ne sont pas concernés par l'utilisation des PAC. En effet, s'ils sont moins émetteurs de GES, ils n'échappent pas à la nécessité d'une rénovation urgente car ils font peser une menace de plus en plus forte sur la pointe d'électricité hivernale lors des périodes de grand froid, et représentent une source importante de difficultés économiques pour les ménages, notamment ceux qui sont en situation de précarité énergétique, du fait du prix élevé de l'électricité (y compris hors guerre en Ukraine).

Les logements de classes F et G sont donc les premiers concernés et doivent faire l'objet d'une réduction massive de consommation d'énergie et d'émissions de GES.

Or aujourd'hui, certains pensent que la réduction des GES est suffisante et qu'elle ne nécessite pas obligatoirement une réduction concomitante des consommations d'énergie. Ils font partie des promoteurs de la pompe à chaleur (PAC) en tant que simple substitut aux générateurs de chaleur à hydrocarbures, cette mesure facile à mettre en œuvre leur paraissant suffisante au regard du problème posé. C'est oublier la pénurie des ressources, que celle-ci soit consécutive à une raréfaction physique ou à un envol des coûts, susceptible de conduire à des difficultés sociales, économiques et stratégiques nécessitant rationnements et délestages.

L'objet de cette étude est donc d'examiner quelles sont les conditions de fonctionnement impérativement requises pour qu'une pompe à chaleur (PAC) puisse être installée à la place d'une chaudière, et accessoirement quelles sont les conditions optimales de cette substitution. Afin de quantifier l'impact des différentes mesures abordées et de mieux appréhender les enjeux de chacune d'elle, un modèle de fonctionnement des PAC a été construit et appliqué à 50 % des logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz puisqu'ils sont prioritaires. Le taux de 50% a été choisi car il représente un parc d'environ 1,4 millions de logements. Donc, s'ils devaient tous être rénovés d'ici 2028, il faudrait en rénover 287 000 par an, soit un nombre s'inscrivant parfaitement dans les objectifs globaux fixés à cette échéance par la PPE qui est, en principe, la feuille de route de la France.

Afin de conserver des repères par rapport à la situation existante et aux consommations et émissions de l'échantillon servant aux évaluations, on gardera à l'esprit les éléments suivants :

- La contribution du chauffage des logements à la pointe électrique maximale a été observée en février 2012 pour une température moyenne sur l'ensemble de la France de - 5°C. Elle était d'environ 28 GWe.
- L'échantillon de 50% de logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul :
  - Consomme 26,3 TWh/an d'hydrocarbures, qui est aussi le niveau de consommation d'énergie finale et, conventionnellement, d'énergie primaire.
  - Emet 7,02 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent par an.
  - N'impacte ni la pointe électrique (0 GWe), ni la consommation d'électricité (0 TWh) au titre de la production de chaleur.

La connaissance des caractéristiques exactes du parc de logements de classes F et G fait l'objet de controverses aujourd'hui en France<sup>1</sup>. Nous nous sommes donc basés sur l'estimation qui nous paraît la plus pertinente<sup>2</sup> et que semblent confirmer tous les DPE réalisés récemment<sup>3</sup>, ainsi que les travaux de l'équipe de Robin Girard à l'Ecole des Mines de Paris<sup>4</sup> :

Classes	Elec	Gaz	Fioul	Bois	Autres	Total	S <sub>hab</sub> moyen [m <sup>2</sup> ]
F	1 169 847	829 471	547 456	716 538	50 774	3 314 086	80,45
G	1 374 701	757 841	733 305	769 790	25 954	3 661 590	79,00
<b>Total F et G</b>	2 544 548	1 587 312	1 280 761	1 486 328	76 728	6 975 677	
<b>Ensemble du parc (A à G)</b>	9 113 027	10 731 733	2 510 142	5 256 798	1 372 300	28 984 000	

Source : O. Sidler – A partir de la campagne Phébus mise à jour

Figure 1 : Nombre de logements par classe et par type d'énergie

Les surfaces habitables totales correspondantes sont les suivantes :

Classes	Gaz	Fioul
F	66,73	44,04
G	59,87	57,93
<b>Total classes F et G</b>	126,60	101,97

En millions de m<sup>2</sup>

Figure 2 : surface habitable totale des logements par classe et par type d'énergie

1 <https://www.enertech.fr/il-y-a-bien-7-a-8-million-de-passoires-thermiques-en-france/>

2 [https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/2021/06/210901\\_OS\\_Insuffisances\\_strategie\\_renovation\\_-\\_ANNEXES.pdf](https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/2021/06/210901_OS_Insuffisances_strategie_renovation_-_ANNEXES.pdf)

3 <https://www.actu-environnement.com/blogs/olivier-sidler/346/non-methode-calcul-dpe-pas-fausse-475.html>

4 <https://www.energy-alternatives.eu/2021/11/10/DPE-passoires.html>

## 2 — Principes de fonctionnement d'une pompe à chaleur

### 2.1 Principe général

Il existe dans l'environnement (l'air, l'eau, le sol), d'immenses quantités d'énergie (sous forme de chaleur), mais cette énergie est à un niveau de température insuffisant pour pouvoir être utilisée, par exemple pour se chauffer. Cette affirmation s'appuie sur la distinction faite entre la température d'une énergie, et la température d'un fluide. En thermodynamique la température d'une d'énergie qualifie en réalité sa valeur et l'intérêt qu'elle présente. Avec un océan d'eau à 14°C, qui constitue une formidable quantité d'énergie thermique, on ne peut pas faire grand-chose, même pas cuire un œuf. Avec quelques kWh de chaleur à 40 ou 50°C on peut déjà chauffer des logements. Avec de la chaleur à 100 ou 200°C on peut en plus cuire la nourriture et alimenter certains process industriels. Avec de la chaleur à 1000°C on peut évidemment faire tout ce qui précède mais on peut en plus fondre des métaux et pourvoir à de nombreux process industriels. Il apparaît que plus la température d'une énergie est élevée plus le nombre d'usages qu'elle peut satisfaire l'est aussi, ce qui en fait sa « valeur ».

Mais il faut rappeler 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 de chaleur à basse température 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 de chaleur à 10°C pourra être transformé en un kWh à 40°C par exemple. Mais « l'effort » à faire est somme tout 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. 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.

### Comment fonctionne une pompe à chaleur ?

C'est ce qu'on appelle une machine « bi-source » parce que pour fonctionner elle a besoin d'échanger de la chaleur avec deux sources : une froide (à laquelle elle prend de la chaleur) et une chaude (à laquelle elle restitue cette chaleur après en avoir augmenté la température).

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 (comme dans une pompe à vélo). C'est dans cette phase que le niveau de température de l'énergie est augmenté 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.



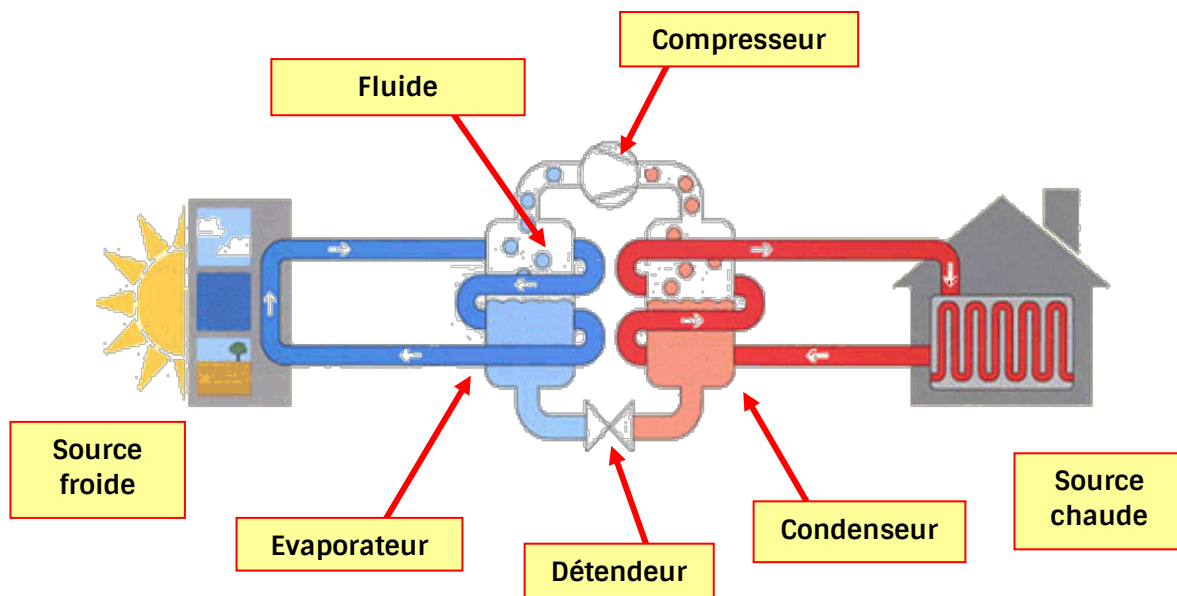


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

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 (que ce soit pour conserver les denrées ou pour faire de la climatisation) fonctionnent exactement sur le même principe.
- Elle peut servir de source de chaleur pour le chauffage. 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 ou d'air reliant l'environnement et l'évaporateur d'une part, et le condenseur aux émetteurs de chaleur d'autre part.

## 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 des températures de ces sources. Mais le COP sera aussi affecté par la consommation des « auxiliaires » (les pompes et ventilateurs nécessaires essentiellement autour de l'évaporateur, le dégivrage) et les imperfections de la technique (efficacité des échangeurs de chaleur, frottements, etc.) si bien que la valeur réelle du COP sera très sensiblement inférieure à sa valeur théorique.

Pour avoir un ordre de grandeur du résultat final à la température extérieure de base (c'est la température la plus défavorable), on pourra retenir que le COP global réel (incluant les auxiliaires) vaut, selon le type de PAC, les configurations et le mode de régulation, à peu près un tiers du COP théorique :

$$COP_{réel} = (0,30 \text{ à } 0,38) * COP_{théorique}$$

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 (=273°K) et la température de soufflage d'air de 50°C (=273+50=323°K), ce qui correspond approximativement aux valeurs des températures des sources chaude et froide, le COP réel vaut à peu près :

$$COP_{réel} = (323 / (323 - 273)) * 0,35 = 2,26$$

- 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 (soit 273+12 = 285°K) et le plancher chauffant est alimenté à 40°C (= 273+40 soit 313°K). Le COP réel vaut à peu près :

$$COP_{réel} = (313 / (313 - 285)) * 0,35 = 3,91$$

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

Il convient de rappeler le rôle de la consommation électrique des auxiliaires évoqué précédemment, et notamment celui des ventilateurs associés spécifiquement à la pompe à chaleur, essentiellement autour du circuit évaporateur/source froide. L'air est un très mauvais caloporteur ce qui induit des débits volumiques élevés (3 500 fois plus importants que l'eau) pour véhiculer la chaleur. Il s'ensuit que la consommation du ventilateur associé à une PAC air/X est conséquente et affecte significativement le COP de la PAC. **Il est donc toujours préférable d'utiliser l'eau comme caloporteur car les débits nécessaires, et la consommation des pompes associées, seront beaucoup plus faibles.** On évitera d'aller chercher de l'eau en grande profondeur dans une nappe phréatique car il faut la « monter » et c'est une grosse dépense énergétique qui ne peut être récupérée lors de sa réinjection dans la nappe. Si on s'intéresse à l'énergie du sous-sol, il sera toujours préférable de faire circuler l'eau en circuit fermé, comme dans le cas des sondes sèches. L'énergie alors nécessaire se borne aux pertes de charges (frottements) et la consommation du circulateur en est fortement réduite.

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

Enfin, il est bon de rappeler ce qui différencie une chaudière et une pompe à chaleur. Dans une installation de chauffage, la puissance des besoins de chaleur augmente lorsque la température extérieure décroît. Une chaudière classique s'adapte à cette demande croissante en modulant sa puissance ou en augmentant la fréquence des trains de chaleur qu'elle envoie dans l'installation. Mais dans le cas d'une PAC, lorsqu'il fait de plus en plus froid la température de la source chaude doit augmenter et celle de la source froide ne peut en principe que baisser si bien que le COP ne peut que diminuer. Il s'ensuit que la puissance délivrée par la PAC, à l'inverse de la chaudière, décroît lorsque la température extérieure baisse. Il s'agit là d'une différence fondamentale avec les chaudières dont il conviendra de tenir compte dans les conditions d'installations et de massification de l'utilisation des PAC.

## 2.2 Les limites des pompes à chaleur

### 2.2.1 L'influence sur le COP de la température des sources chaude et froide

Comme indiqué précédemment, l'intérêt d'une PAC dépend de la valeur de son COP. Celui-ci est le rapport de la quantité de chaleur qu'elle fournit à la quantité d'électricité qu'elle absorbe. Il faut que ce COP soit le plus élevé possible, et en tout cas supérieur à 3 afin que le bilan en énergie primaire reste favorable à la PAC. Ceci a une conséquence directe sur le choix des températures des sources chaude et froide, donc sur le choix de la source froide de chaleur (l'air extérieur, l'eau de surface, le sous-sol) et sur la valeur de la température qu'imposent les émetteurs de chaleur de l'installation de chauffage (radiateurs, planchers chauffants, soufflage air chaud, etc.). Le non-respect de ces règles simples conduira à des contre-performances dommageables.

### 2.2.2 Limitation du niveau de température de la source chaude

La température de la source chaude est, à quelques degrés près, la même que celle du fluide qui se trouve dans l'installation de chauffage.

Or l'immense majorité des pompes à chaleur sur le marché, celles qui sont les plus simples, les plus courantes et les moins chères, peuvent difficilement produire au condenseur des températures supérieures à 55°C. Cette barrière est essentiellement due au niveau de pression atteint dans le circuit frigorifique (plusieurs dizaines de bars) qui ne peut être dépassé. Cette limite de la température que peuvent produire les pompes à chaleur « ordinaires » est extrêmement importante en rénovation car la plupart des installations de chauffage à rénover ont été conçues « à l'époque » pour fonctionner avec des niveaux de température beaucoup plus élevés atteignant souvent 90°C. Chacun comprend alors que, en-dehors de tout autre type d'intervention, une pompe à chaleur ordinaire ne peut se substituer à une chaudière dans un bâtiment dont l'installation de chauffage est de ce type, même si les hivers sont désormais moins froids qu'il y a 50 ans.

### 2.2.3 Nature du fluide frigorigène

Toutes les machines thermodynamiques basées sur le même principe que 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<sup>ème</sup> siècle et jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale, a été l'ammoniac (car c'est celui qui a les meilleures performances). Mais sa toxicité en cas de fuite importante l'ont fait remplacer, à partir de 1945, par une nouvelle génération de gaz appelés « fréons » dans le langage courant. Il s'agissait des CFC (chlorofluorocarbure) 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 on n'en utilise quasiment plus 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 Potentiel de Réchauffement Global (PRG, ou GWP en anglais) du R 134a est de 1430 (c'est à dire qu'un kg de ce gaz a le même effet à long terme sur le réchauffement climatique que 1430 kg de CO<sub>2</sub>), 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 (R600a), dont le PRG vaut 3, est désormais le seul gaz autorisé.

Depuis dix ans, les laboratoires ont mis au point de nouveaux fluides frigorigènes dont l'impact sur le réchauffement climatique est limité, si bien qu'aujourd'hui il existe plusieurs fluides ne portant plus

préjudice ni à la couche d'ozone, ni au réchauffement climatique. Pour certains, comme l'ammoniac (R717), c'est un retour en grâce : son PRG vaut... 0. Il n'a aucun impact sur l'effet de serre, et c'est de surcroît le plus efficace des fluides frigorigènes. 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 CO<sub>2</sub> lui-même (PRG = 1) et l'isobutane (PRG de 3) 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.

Les pompes à chaleur actuelles utiliseront encore pour quelques années des fluides frigorigènes ayant un impact fort sur le réchauffement climatique, mais de nouveaux fluides sont désormais disponibles sur le marché et de nouvelles machines utilisant ces gaz apparaîtront dans un délai assez court.

### **Dans ces conditions est-ce pertinent d'utiliser des pompes à chaleur si elles nécessitent des fluides frigorigènes ayant un impact fort sur le climat ?**

On peut effectivement se poser la question de savoir s'il est pertinent d'utiliser aujourd'hui une pompe à chaleur puisque les gaz frigorigènes qu'elle contient contribuent à l'effet de serre. Dans les faits, il n'y a que deux occasions que ces GES s'échappent de la machine. D'abord pendant la vie de l'appareil, à cause des pressions très importantes du circuit : des fuites même infimes peuvent exister. Mais elles sont assez limitées. C'est surtout en fin de vie, au moment de la récupération des fluides (qui est une obligation des professionnels), que les fuites les plus importantes ont lieu.

La meilleure façon de répondre à la question posée consiste à comparer sur la durée de vie des machines, une pompe à chaleur et une chaudière gaz à condensation<sup>5</sup> fournissant le même service dans un logement. Avec le contenu carbone du kWh électrique de chauffage en 2022 et une PAC utilisant les fluides frigo actuels (donc à fort PRG), la PAC libère 7 fois moins de CO<sub>2eq</sub> que la chaudière gaz à condensation. Si l'électricité n'était plus produite qu'avec les sources les moins carbonées, la PAC libérerait 36 fois moins de CO<sub>2eq</sub> 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 CO<sub>2</sub> de la PAC comparée à la chaudière deviennent respectivement 12,2 pour le courant actuel du réseau, 124 pour le courant le moins carboné.

L'intérêt des pompes à chaleur, même avec les fluides frigorigènes actuels, est évident et ne peut être remis en cause.

## **2.2.4 Les différents types de pompe à chaleur**

Il existe plusieurs manières de différencier et classer les pompes à chaleur :

### **1 — Par la nature des fluides caloporteurs des sources chaude et froide**

C'est ainsi que l'on distingue :

#### **○ Les pompes à chaleur « air/air »**

Le caloporteur autour de l'évaporateur et du condenseur est de l'air. Cela exige d'avoir des ventilateurs à l'intérieur (en général des ventilo-convecteurs) et à l'extérieur du logement.

En rénovation ces PAC peuvent être mises en place dans les logements qui ne comportent pas de réseau de distribution, comme les logements initialement chauffés par convecteurs électriques (voir §5). Elles peuvent poser des problèmes de bruit pour le voisinage, et même pour les usagers. Mais la consommation importante des ventilateurs les handicape et, généralement, l'écart de température entre les sources chaude et froide est plutôt élevé, ce qui conduit à des performances

<sup>5</sup> Les hypothèses du calcul sont disponibles en p.5 de la note disponible ici : [https://negawatt.org/IMG/pdf/fiche\\_pac.pdf](https://negawatt.org/IMG/pdf/fiche_pac.pdf)

médiocres. Le COP annuel de ces machines se situe entre 1,8 et 2,5.

Il n'y a plus d'aides de l'Etat pour l'acquisition d'une PAC air/air. Mais il reste les CEE et le prêt à taux zéro.

Ces PAC nécessitant en rénovation la pose d'un réseau de distribution intérieur et d'émetteurs de chaleur (généralement des ventilo-convecteurs) leur coût total est plus élevé que celui des PAC air/eau pour lesquelles le réseau de distribution et les émetteurs existent déjà. Le coût moyen d'une PAC air/air dans un logement préalablement bien rénové se situe entre 110 et 135 € TTC/m<sup>2</sup>.

#### ○ **Les pompes à chaleur « air/eau »**

Rien ne change à l'extérieur par rapport à la solution précédente. En revanche à l'intérieur l'irrigation du condenseur se fera par de l'eau, tout comme la distribution de chaleur dans le logement. Ce type de machine s'adresse aux logements équipés d'une installation de chauffage à eau, quelle que soit la nature des émetteurs (radiateurs, planchers chauffants, ventilo-convecteurs, etc.). Elles présentent de meilleures performances que les PAC air/air (le COP annuel de ces machines se situe entre 3 et 4). Elles posent les mêmes problèmes de bruit par rapport au voisinage.

Le coût de ces machines se compose du coût des matériels qui vaut en moyenne 3 500 à 5 000 €, auquel s'ajoutent deux jours de main d'œuvre. Pour un logement préalablement très bien rénové, le coût d'une PAC air/eau vaut en moyenne de 90 à 110 € TTC/m<sup>2</sup>.

#### ○ **Les pompes à chaleur « eau/eau »**

Ce sont sans conteste celles qui présentent potentiellement les performances les plus élevées, aidées en cela par la relativement faible consommation des circulateurs (par comparaison aux ventilateurs) et très souvent par une différence de température des sources chaude et froide plutôt faible. La plupart du temps leurs performances ne sont pas affectées par la température extérieure (car la source froide n'est pas ou peu affectée par celle-ci).

Ce dispositif permet en effet d'alimenter la PAC à partir d'eau de surface (rivières, lacs) ou d'eau souterraine (nappes phréatiques) ou de plus en plus fréquemment à partir de « sondes sèches » pénétrant profondément dans le sol (jusqu'à 140 m de profondeur) et récupérant ainsi la chaleur du sous-sol sans être en contact avec ses ressources hydriques (il s'agit là de « géothermie à basse température » que valorise la pompe à chaleur). Or la caractéristique de ces sources de chaleur est d'être à une température relativement élevée et stable pendant l'hiver (14°C dans la nappe phréatique de Grenoble), ce qui est très favorable pour les performances de la pompe à chaleur.

Ces solutions ne peuvent évidemment pas être préconisées partout et ce sont aussi celles qui nécessitent les travaux « périphériques » les plus importants et coûteux (forages, etc.). L'offre en matériel est moins abondante que pour les PAC air/eau.

Le COP annuel de ces machines se situe fréquemment au-delà de 4 et peut même dépasser 6.

Le prix de ces PAC est en maison individuelle environ 20 à 30% plus élevé que celui des PAC air/eau, à quoi s'ajoute le coût des aménagements extérieurs éventuels (forage). C'est surtout pour les bâtiments collectifs ou tertiaires que cette solution est très adaptée.

## **2 – Par le niveau de température disponible au condenseur**

C'est ainsi que l'on distingue :

#### ○ **Les pompes à chaleur dites « basse température »**

Comme évoqué précédemment elles ne peuvent délivrer de chaleur à plus de 55°C. Elles sont donc adaptées à des émetteurs fonctionnant à basse température, ce qui est fréquemment le cas dans la construction neuve mais beaucoup plus rarement celui des constructions anciennes qui sont justement celles à rénover.

Ces PAC sont en général équipées de résistances électriques complémentaires car les règles pratiques de dimensionnement utilisées conduisent à ce que la machine n'assure qu'une partie de la charge maximum nécessaire pour la température de base (entre 70 et 90 %). Les résistances électriques, placées en sortie du condenseur, sont donc là pour apporter un complément de chaleur au fluide dont la température restera la plupart du temps inférieure à 55°C (ce schéma concerne les installations de chauffage disposant d'émetteurs à basse température uniquement). Dans beaucoup de machines, ces résistances sont enclenchées automatiquement dès que la température extérieure est inférieure à -2°C.

### ○ **Les pompes à chaleur dites « haute température »**

Les constructeurs proposent des modèles de pompe à chaleur permettant d'atteindre 80°C. L'avantage de ces machines est évidemment de pouvoir s'adapter à des installations de chauffage fonctionnant avec des émetteurs haute température. Mais ce sont des machines beaucoup plus complexes comprenant bien souvent deux pompes à chaleur en cascade ce qui les rend effectivement pratiquement deux fois plus chères. Elles n'échappent pas non plus aux règles établies par Carnot et leur COP est dégradé d'une façon mécanique par le niveau de température élevé qui est atteint (leur COP annuel ne dépasse pas 2). Elles sont aussi beaucoup plus volumineuses, donc difficile à intégrer, et posent des problèmes de bruit encore accru à l'extérieur. Enfin, elles sont délicates à régler et nécessitent une maintenance de très grande qualité. On ne peut donc pas les considérer comme une solution à banaliser.

Toutefois le marché des PAC haute température est en très forte baisse selon la profession et il est peu probable qu'elles aient un avenir autre que celui de niches.

Une des raisons de cette situation est leur coût. Le prix HT des machines seules se situent entre 8 et 14 000 € HT selon le niveau de puissance, à quoi s'ajoute la main d'œuvre pour la pose.

## **3 – Par diverses caractéristiques spécifiques**

### ○ **Les pompes à chaleur hybrides**

Il s'agit de pompes à chaleur « basse température » associées sous un même capot à une chaudière, généralement au gaz, et bénéficiant d'un dispositif optimisant le fonctionnement des deux sources de chaleur. Les limites en température de la PAC ne lui permettant pas d'assurer en toute circonstance le chauffage des bâtiments non rénovés, elle fonctionne lorsque la température extérieure est supérieure à une température dite de « bivalence » (voir son mode de calcul au § 2-2-1 de l'Annexe 2) qui se situe autour de 7 à 9°C, et la chaudière prend le relais pour les températures les plus froides. C'est donc une solution relativement coûteuse puisqu'elle nécessite souvent deux machines de production de chaleur, ce qui pose aussi des problèmes d'encombrement. On ne peut pas non plus dire qu'elle apporte une réponse très satisfaisante à l'émission des GES puisque la plus grosse partie de la charge thermique du logement est assurée par la chaudière. En revanche ses promoteurs rappellent que c'est celle-ci qui fonctionne quand il fait le plus froid, donc lors des pointes importantes, c'est-à-dire au moment où le kWh électrique est le plus chargé en GES, affirmant que les émissions de la chaudière à ce moment-là sont bien plus faibles que celles de n'importe quelle PAC placée dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Son COP est celui d'une PAC air/eau.

Le coût est assez élevé. La machine seule vaut 5 à 6 000 € HT de plus qu'une PAC air/eau. Le prix du matériel dépend fortement de la puissance thermique de la PAC.

### ○ **Les pompes à chaleur utilisant le CO<sub>2</sub> comme fluide frigorigène**

Par convention le PRG de ce gaz vaut 1, ce qui est donc excellent. Ses caractéristiques physiques sont intéressantes puisqu'il permet, sans avoir besoin de coupler deux PAC en cascade, d'atteindre au condenseur la température de 90°C. Toutefois, ceci ne permet pas pour autant d'échapper aux règles de Carnot, si bien que le COP est relativement dégradé. Enfin, ce sont des machines deux fois plus chères que les PAC basse température (compter de 15 à 20 000 €).

### ○ **Mode de régulation des PAC : Tout Ou Rien (TOR), ou Inverter**

La régulation des PAC peut s'effectuer soit par marche /arrêt du compresseur (régulation Tout Ou Rien (TOR)) soit au moyen d'un dispositif de variation de vitesse du compresseur (Inverter). Dans le premier cas le compresseur fonctionne à pleine puissance en régulant par marche/arrêt : il ne peut pas s'adapter de manière fine au niveau de température demandé au condenseur alors que dans le second cas c'est possible puisque le compresseur adapte parfaitement sa puissance aux besoins réels. Il s'ensuit que les performances obtenues avec les systèmes Inverter sont meilleures d'environ 20% à celles obtenues avec les dispositifs de régulation TOR.

### ○ **PAC simple ou double service**

Les premières assurent le chauffage, et les secondes le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Mais cette production nécessite parfois (si telle est la volonté de l'utilisateur) des températures de l'ordre de 60, voire 65°C, que ne peut atteindre le compresseur de la PAC, si bien que celle-ci est équipée de résistances électriques fournissant le complément de chaleur nécessaire. Mais ceci présente des risques, surtout si la consigne de température est élevée dans le ballon ECS, car cela génère des consommations électriques par effet Joule importantes.

### 3 – Utilisation des pompes à chaleur dans les bâtiments neufs

---

L'objet de cette note technique n'est pas d'examiner le sujet des bâtiments neufs. Il est néanmoins intéressant d'observer que les bâtiments neufs constituent un domaine d'action très privilégié pour le développement des PAC. Car le concepteur dispose de tous les degrés de liberté nécessaires permettant de répondre aux contraintes spécifiques des PAC. Il peut généralement choisir de façon optimum la source froide, puis décider de la nature des émetteurs de chaleur autorisant une température de fonctionnement la plus basse possible, ce qui garantira un écart de température entre les sources chaude et froide le plus faible possible assurant ainsi à la machine un COP élevé.

Pour autant que ce concepteur ne néglige pas les réglages de la machine à qui il imposera une loi d'eau en sortie de condenseur correctement calée sur les besoins dictés par la température extérieure, les niveaux de consommation et donc d'émissions de GES seront particulièrement faibles.

Contrairement à une idée reçue, les pompes à chaleur en construction neuve concernent aussi bien la maison individuelle que les bâtiments de logements collectifs, comme en témoigne le quartier Presqu'île à Grenoble dont tous les bâtiments neufs sans exception sont – ou seront – chauffés au moyen de pompes à chaleur (au total près de 300 000 m<sup>2</sup>). Pourtant il s'agit pour la plupart de bâtiments dépassant 10 niveaux.

## 4 — Rappels techniques relatifs à la rénovation des bâtiments

---

### 4.1 Caractéristiques principales des opérations de rénovation

Les bâtiments à rénover sur le plan énergétique le sont évidemment parce qu'ils ne sont pas ou peu calorifugés, mais aussi parce que l'installation de production, de distribution, d'émission et de régulation de chaleur n'est pas particulièrement performante, ce qui induit des consommations d'énergie et des émissions de GES très importantes.

Lorsqu'on cherche uniquement à réduire les émissions de GES, on peut être tenté de ne s'intéresser qu'à l'installation de chauffage et se dire qu'en mettant en place un générateur plus performant on réduira plus ou moins massivement les émissions de GES.

De ce point de vue, la mise en place d'une pompe à chaleur en remplacement d'une chaudière usagée peut sembler une bonne réponse.

Mais, répétons-le, une pompe à chaleur n'est pas une chaudière et ce qui les différencie peut-être fatal à l'opération de substitution. Trois éléments doivent être examinés avec un soin extrême avant cette substitution :

- **La nature des émetteurs en place et leur « régime de température »**

Un émetteur de chaleur se caractérise par sa surface d'échange, son mode d'émission de chaleur (convection naturelle, convection forcée, rayonnement) et son « régime de température ». Celui-ci détermine les températures d'entrée ( $T_{e,b}$ ) et de sortie ( $T_{s,b}$ ) de l'émetteur pour une température extérieure égale à la température de base (la température la plus froide que la réglementation impose de prendre en compte, repérée par l'indice « b »). Ainsi, on peut obtenir la même émission de puissance avec de petits émetteurs (donc de petites surfaces) à haute température ou avec de grands émetteurs à basse température. Pour des raisons économiques évidentes, on cherchait à l'époque à minimiser le coût des émetteurs, ce qui conduisait à réduire le plus possible leur taille (donc leur surface d'échange) et à adopter des régimes de température relativement élevés. Traditionnellement, les radiateurs (qui étaient le mode d'émission de chaleur le plus répandu) fonctionnaient avec un régime entrée/sortie, pour une température extérieure de base, de 90°/70°C. Des niveaux de température soit dit en passant extrêmement dangereux pour les jeunes enfants.

- **La « loi d'eau »**

Les besoins de chauffage étant fonction de la rigueur climatique, la température d'entrée d'eau dans les émetteurs doit évoluer en fonction de la température extérieure, faute de quoi le logement serait en permanence en surchauffe. C'est le rôle du régulateur d'accorder à tout instant la valeur de la température de départ d'eau et la température extérieure. La règle qui corrèle ces deux températures s'appelle la loi d'eau. Mais dans les installations les plus rustiques (les anciennes installations individuelles), la chaudière envoie des trains de chaleur inconfortables à des températures d'eau plus élevées que celle de la loi d'eau.

Dans les bâtiments très anciens, il est souvent difficile de connaître la loi d'eau, et donc le régime de température des émetteurs pris en considération au moment de la conception. C'est un problème majeur lorsqu'on veut changer de générateur de chaleur. Mais il est une seconde difficulté liée à l'influence du réchauffement climatique depuis une quarantaine d'années : les températures hivernales sont désormais beaucoup plus élevées (le nombre de degrés.jours a baissé de 20% depuis 1975), et par voie de conséquences la loi d'eau et le régime de température peuvent être sensiblement modifiés (à la baisse).

- **Les différences entre la théorie et la réalité des installations de chauffage**

Les pratiques observées de tout temps montrent une tendance des concepteurs d'installations de chauffage à adopter à chaque étape de leur calcul des coefficients de sécurité qui augmentent le niveau de besoins, la puissance installée et les capacités de puissance émise, par crainte que les occupants des bâtiments qu'ils conçoivent puissent manquer de chaleur.



Concrètement, ceci se traduit par un surdimensionnement des émetteurs et très souvent par un débit des circulateurs beaucoup plus élevé que la valeur nominale. Ces deux éléments ont eux aussi une influence sur les valeurs réelles des températures d'eau en entrée et en sortie des émetteurs, donc sur le niveau des puissances réellement émises. L'étude s'interroge par la suite sur l'influence et l'impact de ces surdimensionnements.

Ces observations complexifient encore les opérations de changement de générateur de chaleur.

## 4.2 Conditions de l'équilibre thermique d'un local chauffé

Trois relations traduisent les différents échanges énergétiques lorsqu'un local est chauffé :

### 1 – Déperditions du local vers l'extérieur

(incluant pertes par les parois et par renouvellement d'air) :

$$P = D * (T_i - T_{ext}) \quad (1)$$

où :

- P : puissance [W]
- D : déperditions [W/°C] Déterminées par les plans et la nature des matériaux
- T<sub>i</sub> : température intérieure [°C]
- T<sub>ext</sub> : température extérieure [°C]

### 2 – Puissance cédée à l'émetteur par le réseau de chauffage qui le traverse :

$$P = \rho * C_p * Q * (T_e - T_s) \quad (2)$$

où :

- P : puissance [W]
- $\rho$  : masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>]
- C<sub>p</sub> : chaleur spécifique massique de l'eau [J/kg°K]
- Q : débit volumique d'eau dans l'émetteur [m<sup>3</sup>/s]
- T<sub>e</sub> : température d'entrée de l'eau dans l'émetteur [°C]
- T<sub>s</sub> : température de sortie de l'eau de l'émetteur [°C]

### 3 – Puissance thermique émise par l'émetteur de chaleur :

$$P = A * \Delta T^n \quad (3) \quad \text{avec} \quad \Delta T = (T_e - T_s) / \ln((T_e - T_i) / (T_s - T_i))$$

où :

- P : puissance [W]
- $\Delta T$  : écart de température logarithmique moyen entre l'émetteur et le local [°C]
- A : caractéristique de l'émetteur égale à son coefficient d'échange de chaleur avec l'air ambiant multiplié par la surface de l'émetteur [W/°C]
- n : caractéristique de l'émetteur traduisant le caractère radiatif ou convectif de l'échange de chaleur. Pour les planchers chauffants n vaut 1. Il vaut environ 1,3 pour les radiateurs (qui sont mi-radiatifs/mi-convectifs), et 1,6 pour les convecteurs (la valeur exacte de « n » pour chaque émetteur est fournie par les fabricants).

Le dimensionnement d'une installation consiste, à partir du choix par le concepteur des valeurs de T<sub>e b</sub> et de T<sub>s b</sub>, à déterminer les valeurs de Q, A, et n, pour une valeur donnée de D (déperditions), de la température intérieure et de la température extérieure de base. Lorsqu'on intervient sur une installation pour la rénover, il est nécessaire (et fondamental) de connaître la valeur qui a été donnée à ces cinq paramètres, ce qui est souvent difficile.

Car à l'équilibre, les trois expressions de la puissance ont la même valeur, et ceci doit être vrai quelle que soit la température extérieure. C'est donc à partir de ces relations qu'on peut en déduire la « loi d'eau » réelle en place, c'est à dire la valeur des températures d'entrée et de sortie de l'émetteur pour n'importe quelle valeur de la température extérieure (voir en Annexe 1 son mode calcul). Voici à titre d'exemple la loi d'eau pour une installation avec  $T_{\text{ext } b} = -7^{\circ}\text{C}$ ,  $T_i = 20^{\circ}\text{C}$ , dotée de radiateurs dont le régime de température est 90/70°C :

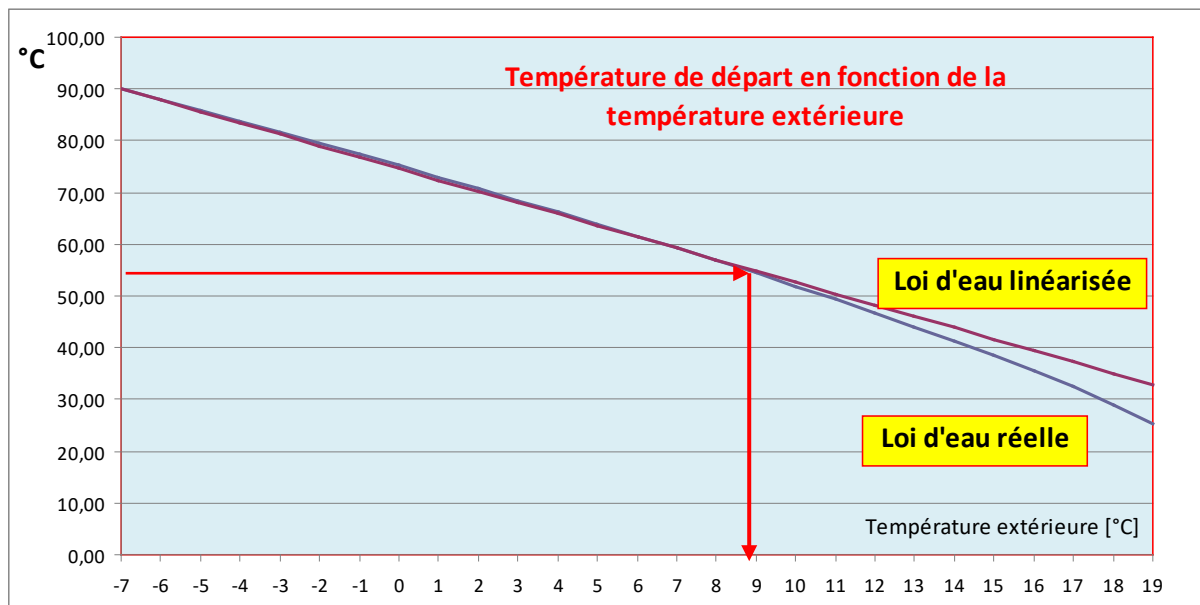


Figure 4 : Exemple de loi d'eau pour une température de départ de 90°C à Tbase de -7°C

Hormis pour les planchers chauffants, la loi d'eau n'est pas une fonction linéaire. Mais la complexité de son expression rend difficile la régulation, si bien que, comme le montre le graphique précédent, on représente en général cette loi par une fonction linéaire qui ne « surdimensionne » les températures à l'entrée des émetteurs que pour les températures extérieures supérieures à 7°C, ce qui conduit à de légères surchauffes dans les logements pour les valeurs les plus élevées de la température extérieure.

Il est aussi intéressant d'observer sur ce graphique, qu'une température d'eau de 55°C ne peut satisfaire les besoins d'une telle installation que lorsque la température extérieure est supérieure à 9°C.

## 5 – Cas particuliers des logements chauffés par convecteurs électriques

Les logements chauffés par convecteurs électriques sortent en principe du champ de cette qui est focalisée sur la substitution d'une PAC à chaudière, mais il est néanmoins intéressant de considérer ici rapidement les problèmes techniques spécifiques qu'ils posent.

Dans les logements chauffés par convecteurs électriques, il n'y a pas de réseau de distribution de chaleur, qu'il soit hydraulique ou aéraulique. Recourir à une PAC centralisée supposerait donc en général de créer un réseau en étoile distribuant un fluide frigorigène dans les pièces équipées de ventilo-convecteurs (détente directe), avec toutes les difficultés d'intégration des conduits (calorifugés), et de récupération des condensats sous chaque split. Cette hypothèse n'est réaliste qu'en maison individuelle ou en très petit collectif (si chaque logement peut avoir sa propre PAC), mais elle paraît difficilement envisageable en collectif où même l'idée d'équiper le bâtiment d'un réseau bitube alimentant un ventilo-convecteur par pièce paraît exclue pour des raisons économiques.

Mais dans les cas où elle est réalisable, cette solution reste relativement coûteuse, d'autant plus qu'elle ne bénéficie plus d'aide de l'Etat<sup>6</sup>. Enfin, si les logements sont vraiment trop déperditifs, l'impossibilité pour la PAC de produire de l'air à plus de 50°C oblige à augmenter dangereusement les débits d'air des ventilo-convecteurs ce qui augmente fortement la consommation électrique des ventilateurs (dont la puissance croît avec le cube du débit) et peut engendrer des niveaux sonores difficilement supportables par les occupants. Pour un logement chauffé à 19°C, de hauteur sous plafond 2,5 m, avec une température de soufflage de 50°C, voici la puissance thermique spécifique de chauffage émise en fonction du taux de brassage d'air sur le ventilo-convecteur :

Taux de brassage (vol/h)	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Puissance de chauffage [W/m <sup>2</sup> ]	13	26	53	79	105	132	158	184

Figure 5 : Puissance thermique spécifique d'un ventilo-convecteur soufflant de l'air à 50°C en fonction de son débit (exprimé en nombre de volume du local par heure)

Pour situer les idées, on retiendra que la puissance des déperditions d'un logement pas isolé peut valoir 150 à 200 W/m<sup>2</sup>, alors que dans un logement très bien isolé elle se situera entre 10 et 30 W/m<sup>2</sup>.

Le cas des logements chauffés par convecteurs électriques est donc un peu problématique. Certes, ils utilisent une énergie relativement décarbonée, sauf aux heures de pointe, mais ils consomment beaucoup trop de cette énergie. A la lumière de ce qui précède, il semble que deux solutions soient donc envisageables :

- Surisoler ce type de bâtiments pour avoir des besoins en électricité ne dépassant pas 15 ou 20 kWh/m<sup>2</sup>/an de chauffage. On pourrait alors laisser en place les convecteurs électriques. Cette solution serait adaptée aux logements collectifs,
- Isoler les bâtiments pour avoir des besoins ne dépassant pas 50 ou 60 kWh/m<sup>2</sup>/an et mettre en place une PAC air/air multi split si le logement ne dépasse pas 5 ou 6 pièces. Cette solution serait plutôt destinée à la maison individuelle ou au très petit collectif.

<sup>6</sup> Seuls les CEE (Certificats d'Economie d'Energie) et le Prêt à Taux Zéro permettent encore le financement d'une PAC air/air

## 6 — Remplacement des chaudières existantes par des pompes à chaleur

---

L'idée de remplacer rapidement les chaudières au fioul ou au gaz des logements les plus consommateurs par des pompes à chaleur dans le but de réduire les émissions de GES est très répandue actuellement. Mais les risques d'un échec de cette stratégie sont nombreux si la mesure n'est pas mise en œuvre avec la pertinence qui s'impose.

Afin d'évaluer le plus précisément possible l'impact des choix faits, la présente étude s'appuie sur une modélisation simplifiée permettant une évaluation rapide des impacts sur les émissions de GES, la consommation et la pointe électriques.

### 6.1 Modélisation simplifiée du parc et périmètre adopté

Les données nécessaires pour réaliser une modélisation précise d'un sous ensemble du parc de logements des classes F et G sont très lacunaires. Le paragraphe précédent a montré qu'il fallait disposer d'informations relativement précises si on voulait être certain des résultats. Toutefois, il est nécessaire d'évaluer l'impact des différents scénarios possibles en faisant des hypothèses sur l'état actuel du parc, que ce soit en matière de déperditions, de loi d'eau, de nature des émetteurs, etc. Ces éléments devront toujours rester à l'esprit lorsqu'on considérera la valeur intrinsèque des résultats obtenus.

- Le parc concerné a été décrit au §1. On connaît le nombre de logements par classe énergétique et par énergie, ainsi que leurs surfaces. Rappelons que l'étude est focalisée sur l'analyse de 50% des logements de classes F et G, prioritaires, chauffés au fioul et au gaz.
- Les hypothèses sur le climat : il était trop compliqué dans le cadre de cette étude de faire des simulations sur l'ensemble des zones climatiques présentes en France, ne serait-ce que par ce qu'on ne connaît pas la répartition des logements par classe énergétique, par énergie et par région climatique. L'ensemble des simulations a donc été conduit avec les données météo de la station de Trappes dans les Yvelines. Les consommations et les puissances de pointe obtenues ont ensuite été multipliées par le facteur 0,885 correspondant, selon des simulations multiples, au rapport de la rigueur climatique moyenne française à la rigueur climatique de la station de Trappes.
- Le détail de la modélisation est présenté dans l'annexe 2.
- Le périmètre choisi pour la modélisation (50 % des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul) regroupe au total 1,43 millions de logements. Dans la période 2023-2028 cela conduit à traiter annuellement 287 000 logements. Ces valeurs correspondent à la moitié de l'effort exigé par la SNBC et la PPE. Il s'agit donc d'un effort relativement mesuré et réalisable.

### 6.2 Peut-on uniquement remplacer une chaudière par une PAC ?

#### 6.2.1 L'incompatibilité des niveaux de température

Les chaudières constituent le cœur des installations de chauffage central. Jusqu'à présent, les crises qu'a connues le secteur de l'énergie se sont essentiellement résumées à un changement d'énergie (qui pouvait se traduire par un changement de chaudière). La caractéristique commune de toutes les chaudières, sans exception, est de pouvoir produire sans aucune difficulté de la chaleur à une température atteignant 100°C, donc de chauffer suffisamment l'eau de l'installation de chauffage. Car en aval de la chaudière se trouve le réseau de distribution et surtout les émetteurs, en général des radiateurs. Et ceux-ci ont été dimensionnés lors de la conception du bâtiment pour fonctionner avec des niveaux de température élevés voisins de 90°C. Quand on change d'énergie ou de chaudière ce « détail » n'a donc aucune importance.

Mais avec la pompe à chaleur, qui ne fonctionne pas comme une chaudière, la simple substitution d'une PAC à une chaudière ne peut se faire sans un minimum de précaution. La pertinence de cette substitution va essentiellement dépendre du régime de température des émetteurs et non du type d'émetteurs.

L'analyse qui suit concerne tous les types de chaudières quelle que soit la source d'énergie utilisée et quel que soit le caloporteur (air ou eau).

Le § 4 a montré que toutes les installations de chauffage fonctionnent avec une loi d'eau imposant une température d'entrée d'eau dans les émetteurs fonction de la température extérieure. Et dans la plupart des installations anciennes à rénover, cette loi d'eau exige des niveaux de température pouvant atteindre 90°C.

La figure 6 représente les lois d'eau pour différents régimes de température : 90°/70°, 80°/63°, 70°/56°, 60°/50°.

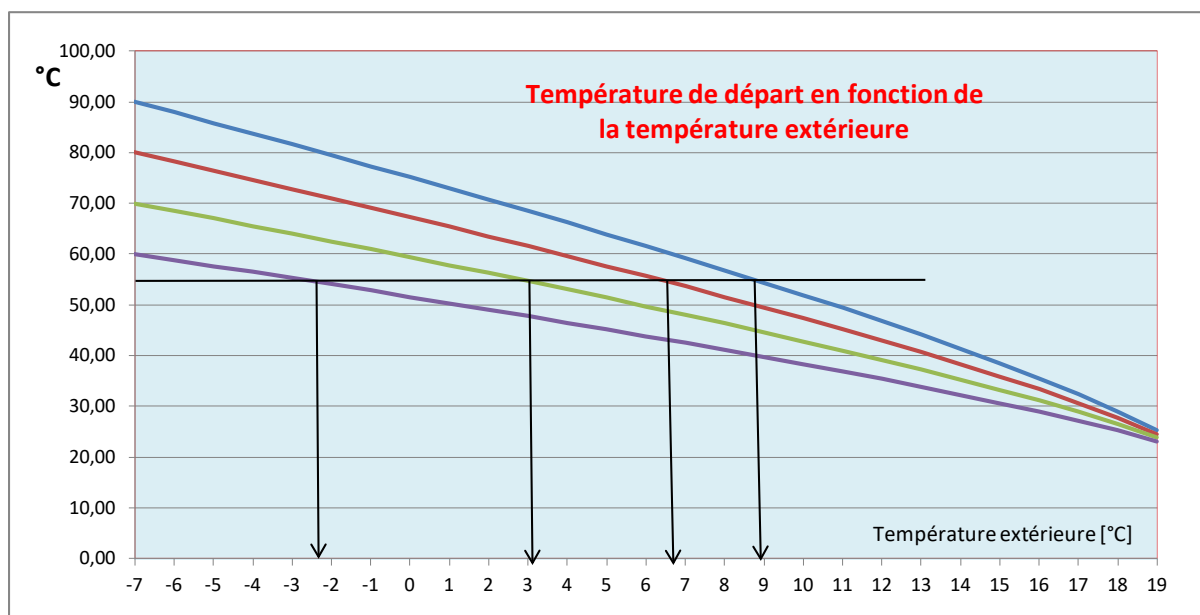


Figure 6 : Loi d'eau en fonction de la température extérieure pour une température de base de -7°C et 4 régimes de température sur les émetteurs : 90°/70°, 80°/63°, 70°/56°, 60°/50°.

On observe clairement que les PAC ordinaires, les plus courantes et les moins chères, fonctionnant à basse température, sont absolument incompatibles avec des émetteurs dont le régime de température est supérieur ou égal à 55, voire 60°C maximum.

Pourtant, depuis de nombreuses années des PAC ont été posées sans respecter ces conditions. La température du logement ne peut alors dépasser 14°C par grand froid. **Il s'agit d'une situation de sinistre conduisant directement à un litige juridique**, et dont la massification risque de remettre en cause la crédibilité de la filière.

Avant d'installer une PAC en remplacement d'une chaudière, quels que soient le niveau de besoin du logement et sa classe énergétique, il faut à tout prix vérifier le niveau de température exigé par les émetteurs en place. Dans l'immense majorité des cas ce niveau sera incompatible avec le fonctionnement d'une PAC. Omettre cette réalité c'est discréditer durablement la technologie des PAC qui constitue pourtant l'un des meilleurs atouts dont on dispose face à la crise climatique, et c'est encombrer les tribunaux de sinistres dont on aurait pu faire l'économie et qu'on observe déjà trop fréquemment (pudiquement baptisés de « sous-dimensionnements »).

Pour être exhaustif, il faut toutefois s'interroger sur le rôle que peut jouer le surdimensionnement des installations dans la modification des niveaux de température nécessaires.

## 6.2.2 Influence du surdimensionnement initial des installations de chauffage

Comme évoqué au § 4-1, il arrive très fréquemment que lors de la conception et de la réalisation initiales des installations de chauffage, concepteurs et installateurs aient pris quelques marges de sécurité, le plus souvent en surdimensionnant les émetteurs ou le circulateur. Dans un cas comme dans l'autre ces dispositions modifient les régimes de température fonctionnels, en abaissant leur niveau pour les radiateurs et en réduisant l'écart entre température d'entrée et de sortie pour le circulateur. Est-ce que ces pratiques relativement généralisées ont une influence favorable sur l'installation de pompes en chaleur en remplacement de chaudière, et si oui, de quelle nature est cette influence ?

### Influence du surdimensionnement des émetteurs

Le tableau de la figure 7 montre l'influence de la taille des émetteurs sur le régime de température d'un bâtiment qui n'a pas été rénové et dont le régime de température des émetteurs (radiateurs) est 90/70°C, pour une température extérieure de base de -7°C :

k rad	0,9	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
Te avant réno	94,9	90	85,9	82,4	74,5	66,1	60,8
Ts avant réno	74,9	70	65,9	62,4	54,5	46,1	40,8

Figure 7 : influence du surdimensionnement des émetteurs sur leur régime nominal de température

$k_{rad}$  est le rapport de la surface réelle à la surface nominale des émetteurs. Rappelons aussi que dans ce cas, afin que tous les équilibres de puissance soient respectés, et puisque le débit d'eau ne varie pas, l'écart de température aux bornes de l'émetteur ne change pas (il vaut toujours 20°C dans l'exemple étudié).

On observe dans ce tableau que :

- Le sous dimensionnement des émetteurs ( $k_{rad} < 1$ ) ne peut conduire qu'à un sinistre car pour compenser l'insuffisance de surface il faudrait très vite atteindre des températures d'eau dépassant 100°C (pour une valeur  $k_{rad}$  proche de 0,8).
- *A contrario*, un surdimensionnement trop important conduit à des températures de retour inférieures à 55°C. Ce niveau de température est incompatible avec les chaudières traditionnelles (sans condensation) car il conduirait à des condensations acides dans le corps de chauffe et à des corrosions. Mais dans la pratique il y a très peu d'installations dont les émetteurs sont surdimensionnés de plus de 50% (valeur conduisant à des retours inférieurs à 55°C).
- Même si le surdimensionnement atteignait 2, voire 2,5, sans modification du débit, on n'aurait de toute façon pas une température suffisamment basse à l'entrée des émetteurs pour pouvoir faire fonctionner une pompe à chaleur.

Conclusion : le niveau maximum des surdimensionnements d'émetteurs observés en pratique (< + 50%) ne permet pas un abaissement suffisant des températures pour autoriser l'installation d'une pompe à chaleur sans qu'il y ait de sinistre.

### Influence du surdimensionnement du circulateur

Un surdimensionnement du circulateur n'a qu'un seul impact : il réduit la chute de température de l'eau au passage d'un émetteur. Et comme il ne modifie pas la température d'entrée dans l'émetteur, il augmente donc la température moyenne de l'émetteur, donc la puissance émise. Pour revenir à la puissance nominale, il faut donc que l'installateur règle à la baisse la température de départ.

Le tableau de la figure 8 donne l'évolution des températures d'entrée et de sortie des émetteurs (qui étaient à l'origine 90/70°C) lorsque le taux de surdébit ( $k_{deb}$ ) varie :

k deb	0,8	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
Te avant réno	92,8	90	89,0	88,2	86,4	84,6	83,5
Ts avant réno	67,8	70	70,8	71,5	73,0	74,6	75,5

Figure 8 : influence du surdimensionnement du circulateur sur le régime de température des émetteurs

On observe que :

- L'écart des températures d'entrée et de sortie diminue au fur et à mesure que le surdébit augmente, ce qui est normal.
- Même avec des surdébits considérables de + 150 %, le niveau de température à l'entrée des radiateurs reste très élevé et incompatible avec l'installation d'une pompe à chaleur.

**Conclusion** : quel que soit le niveau de surdébit des circulateurs, il est totalement impossible d'amener une température nominale de départ de 90°C à un niveau compatible avec l'installation d'une pompe à chaleur. Tout au plus un très fort surdébit permettrait-il une baisse inférieure à 10°C de cette température de départ.

### Influences combinées d'un surdimensionnement du circulateur et des émetteurs

Le tableau de la figure 9 fournit les régimes de température de départ et de retour consécutifs à l'effet combiné du surdimensionnement des émetteurs et des débits en circulation (toujours pour une installation dimensionnée à l'origine au régime 90/70°C).

k rad	0,9	1	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5
k deb	0,8	1	1,2	1,5	2	1,2	1,5	2
Te avant réno	97,7	90	80,6	78,7	76,9	72,6	70,7	68,9
Ts avant réno	72,7	70	63,9	65,4	66,9	55,9	57,4	58,9

Figure 9 : influences combinées du surdimensionnement du circulateur et des émetteurs sur le régime de température de ces derniers

Il apparaît que :

- Même dans le cas extrême (probablement très rare) où les émetteurs d'une installation sont surdimensionnés de + 50% et où le débit réel est le double du débit nominal, la température de départ est de 69°C, donc à un niveau totalement incompatible avec l'installation d'une pompe à chaleur.
- Le cas le plus fréquemment rencontré correspond à un surdimensionnement des émetteurs de 20 % ( $k_{rad} = 1,2$ ) et du débit de 50% ( $k_{deb} = 1,5$ ). La température de départ est alors proche de 79°C, bien au-dessus des 55°C nécessaires à l'installation d'une PAC.

### 6.2.3 Conclusion

Sur une installation existante (hors toute rénovation) dont la température nominale d'entrée dans les émetteurs est de 90°C, quel que soit le niveau de surdébit des circulateurs et de surdimensionnement des émetteurs, l'effet combiné de ceux-ci ne permettra jamais de réduire suffisamment le niveau de la température de départ vers les émetteurs pour permettre l'installation d'une pompe à chaleur (hors PAC haute température) en remplacement pur et simple d'une chaudière. Si la seule action entreprise est de mettre en place une PAC, il sera donc toujours nécessaire **de recourir à un second système de chauffage en complément de la PAC.**

## 6.3 Logements équipés d'émetteurs de chaleur à basse température (<50°C)

Comme leur nom l'indique ces émetteurs de chaleur sont dimensionnés pour « travailler » à une température relativement basse, ce qui suppose évidemment une surface d'échange plus importante. L'émetteur le plus répandu dans cette catégorie est le plancher chauffant, mais on peut également trouver des radiateurs. On pourrait aussi rencontrer des systèmes de chauffage par air chaud (ventilo-convecteurs).

Toutefois, dans les bâtiments existants, *a priori* pas ou mal isolés, il est pratiquement impossible de disposer d'émetteurs à basse température car leur surface d'échange devrait être beaucoup trop importante. Dans le cas des planchers chauffants, la surface totale du logement ne serait pas suffisante pour compenser les déperditions. Quant aux radiateurs, leur taille serait excessive au regard de celle des murs. Enfin, pour chauffer avec de l'air chaud un logement pas isolé il faudrait souffler plus de 7 vol/h avec de l'air à 50°C. Il y a donc très peu de chances que l'on rencontre l'un de ces types d'émetteurs dans les bâtiments anciens, même si on ne peut pas catégoriquement écarter cette hypothèse. À titre d'illustration, il faut se souvenir de l'expérience désastreuse des planchers chauffants dans les bâtiments des années 60 qui, pour arriver à compenser les déperditions, étaient parcourus par de l'eau à 70°C. La conséquence avait été un rejet total de ce mode de chauffage qui avait provoqué de nombreuses pathologies veineuses aux occupants. Réhabiliter cette technologie dans les années 80 a été compliqué et long...

Si toutefois ce type de situation existait, il serait très favorable à l'utilisation de PAC puisque le niveau de la température d'émission serait compatible avec la température maximale en sortie de condenseur. **A l'échelle du logement, cette solution permettrait une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'un facteur 8,7 mais ne permettrait une réduction des consommations d'énergie primaire que de 37%, accompagnée d'une augmentation de la consommation d'électricité de 43 kWh/m<sup>2</sup>/an (soit 1,7 fois la consommation électrodomestique actuelle), et d'une augmentation de la puissance électrique de pointe de 26 W/m<sup>2</sup>,** puisqu'on serait toujours en présence d'un bâtiment mal isolé. Pour l'usager la facture annuelle des kWh consommés serait divisée par près de 2. Si elle existait, cette solution n'apporterait donc qu'une partie de la solution. Il n'est guère possible d'évaluer l'impact global sur le parc de logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul car on ne sait pas, dans ce panel, combien de logements disposent d'émetteurs fonctionnant à basse température. Il reste probable que, s'ils existent, ces logements sont extrêmement marginaux.

## 6.4 Logements équipés d'émetteurs de chaleur à haute température (>60°C)

C'est le cas rencontré dans la quasi-totalité des logements. Comme on l'a vu au § 6-2, il est impossible de remplacer une chaudière par une PAC si la température d'entrée d'eau dans les émetteurs est supérieure à 55°C.

Dès lors, quelles solutions et quelle stratégie faut-il mettre en œuvre pour apporter néanmoins une réponse à l'utilisation d'une pompe à chaleur dans ces cas-là, et avec quels résultats ? Rappelons que cette question ne dépend ni des besoins thermiques ni de la classe énergétique du logement, mais seulement du régime de température de ses émetteurs. Même un logement de classe B ou C pourrait être concerné par ce problème...



## 6.4.1 Augmentation de la surface des émetteurs

Afin d'abaisser le niveau de température dans les émetteurs, on peut imaginer une solution en apparence simple : augmenter la taille des émetteurs (par ajout d'émetteurs).

La relation (3) du § 4-2 permet d'écrire qu'à puissance émise constante, la relation liant les surfaces d'émetteurs et les régimes de température est :

$$P = A_0 * \Delta T_0^n = A_1 * \Delta T_1^n$$

d'où

$$A_1 / A_0 = \Delta T_0^n / \Delta T_1^n$$

Numériquement :

- régime initial de température : 90/70°C

- régime final : 55/45°C ou 45/35°C

n = 1,3216 (il s'agit de radiateurs)

Si on veut atteindre le régime de 55/45°C, il faut multiplier la surface d'émission par 2,50. Et si on vise le régime 45/35°C, beaucoup plus favorable à la PAC, il faut multiplier la surface d'émission par 4,34.

Si on suppose que, par suite du réchauffement climatique, la température de base d'une région n'est plus -7°C mais -2,4°C, le régime de température nécessaire au système en place serait 80/63,5°C. Il faudrait alors multiplier la surface d'émission par 2,06 si on voulait atteindre un régime 55/45°C, et par 3,57 pour un régime 45/35°C....

Ces valeurs montrent que, même en tenant compte de la diminution de la rigueur hivernale due au réchauffement climatique, la multiplication nécessaire des surfaces d'émission, impossible en cas de plancher chauffant, poserait des problèmes en général insolubles dans les logements ordinaires, tant les émetteurs (c'est à dire dans le cas général les radiateurs) prendraient de place.

L'augmentation des surfaces d'émission ne semble donc pas la solution, même si on ne peut pas l'écarter pour quelques cas particuliers.

## 6.4.2 Adjonction d'un second mode de chauffage en complément de la PAC

### 6.4.2.1 Convecteurs électriques en complément de la PAC

La PAC est capable d'assurer seule le chauffage pour les températures extérieures supérieures à la température de bivalence (voir la figure 6 : en théorie 8,75°C, mais environ 6,5°C si on tient compte des effets déjà visibles du réchauffement climatique sur la rigueur des hivers). **Pour les températures extérieures inférieures, il est obligatoire de disposer d'une seconde installation de production de chaleur.**

Pour minimiser les coûts et les émissions de GES il s'agira souvent de convecteurs électriques (puisque l'on veut se passer de gaz). Les PAC fonctionneront en permanence et les convecteurs compléteront la demande lorsqu'elle sera insuffisante. Ce dispositif suppose que la PAC fonctionne à son maximum dès que la température extérieure est inférieure à la température de bivalence et quel que soit le niveau de la température intérieure. Ce sont les convecteurs, et eux seuls, qui assureront la régulation de la température de consigne de 19°C. Mais le dispositif devra leur interdire de fonctionner lorsque la température extérieure sera supérieure à la température de bivalence.

Si 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul étaient traités de la sorte, il s'ensuivrait une augmentation de la pointe hivernale (+4,8 GWe, soit 3 réacteurs EPR, dont 3,4 GWe pour les convecteurs d'appoint) qui supposerait 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. Quant à la consommation d'électricité, elle augmenterait de 9,8 TWh (production annuelle d'un EPR). Les émissions de GES baisseraient de 82 % passant de 7,0 à 1,23 Mt CO2.

Solutions - France entière	Type de PAC	Puissance électrique [GWe] pour -5°C			Consommation annuelle [TWh]			Emissions CO2 M tonnes/an
		PAC	Appoint	Total	PAC	Appoint	Total	
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

**Figure 10 : Absence de rénovation – Substitution d’une PAC dans 50% des logements de classes F et G équipés de chaudières gaz ou fioul – Complément par convecteurs électriques**

*Puissance appelée pour une température extérieure de -5°C. Consommation annuelle d’électricité  
Consommation actuelle de l’échantillon : 15,4 TWh (gaz) et 10,9 TWh (fioul)  
Emissions actuelles de l’échantillon : 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (gaz) et 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (fioul)*

## Influence du surdimensionnement des émetteurs

Le surdimensionnement des émetteurs conduit, pour maintenir constant le niveau de puissance émise, à un abaissement de leur température d’entrée, ce qui est favorable si on a recours à une PAC. Ce qui suit permet de quantifier cette amélioration lorsque le complément à la PAC est assuré par des convecteurs électriques.

	T plafonnée à 55°C	Complément : convecteurs électriques					
		k rad	0,9	1	1,1	1,2	1,5
	k deb = 1						
Compresseur	P max (-5°C) GWe	1,28	1,41	1,54	1,67	1,93	
	Energie (TWh)	7,36	7,63	7,81	7,91	7,82	
Appoint	P max (-5°C) Gwe	3,68	3,42	3,15	2,89	2,35	
	Energie (TWh)	2,90	2,19	1,61	1,14	0,50	
Total	P max (-5°C) GWe	4,97	4,83	4,69	4,55	4,28	
	Energie (TWh)	10,26	9,82	9,42	9,06	8,32	
	COP annuel	2,05	2,10	2,14	2,19	2,33	
	Temp. de bivalence	9,7	8,8	7,8	6,9	4,4	

**Figure 11 : PAC air/eau avec complément par convecteurs électriques  
Influence du surdimensionnement des émetteurs**

On observe, comme prévu, une petite amélioration des performances :

- Réduction de 5,7 % du niveau de puissance appelée si le surdimensionnement des émetteurs est de 20 %, et de 11,4% s’il est de 50%. On constate sans surprise qu’un surdimensionnement abaisse la température de bivalence, ce qui permet d’augmenter la contribution de la PAC (sa puissance appelée et sa consommation augmentent) et de réduire la part de l’appoint par convecteurs en puissance et en consommation.
- Réduction de 7,8 % du niveau de consommation d’électricité si le surdimensionnement des émetteurs est de 20 %, et de 15,3% s’il est de 50%. Même explication que précédemment.

## Influence du surdimensionnement du circulateur

Le surdimensionnement du circulateur de l’installation existante sur laquelle a été mise en place la PAC, si ce circulateur n’a pas été remplacé, a un effet moins important que le surdimensionnement des émetteurs. Le tableau de la figure 12 fournit l’évaluation de ces améliorations :

		T plafonnée à 55°C			Complément : convecteurs électriques			
k deb		0,8	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
k rad = 1								
Compresseur	P max (-5°C) GWe	1,28	1,41	1,41	1,41	1,41	1,54	1,54
	Energie (TWh)	7,27	7,63	7,60	7,58	7,53	7,81	7,77
Appoint	P max (-5°C) Gwe	3,68	3,42	3,42	3,42	3,42	3,15	3,15
	Energie (TWh)	2,90	2,19	2,19	2,19	2,19	1,61	1,61
Total	P max (-5°C) GWe	4,97	4,83	4,83	4,83	4,83	4,69	4,69
	Energie (TWh)	10,17	9,82	9,79	9,77	9,72	9,42	9,38
COP annuel		2,07	2,10	2,10	2,11	2,12	2,14	2,15
Temp. de bivalence [°C]		9,2	8,8	8,6	8,4	8,1	7,8	7,5

Figure 12 : PAC air/eau avec complément par convecteurs électriques — Influence du surdimensionnement du circulateur

Comme prévu l'impact d'un surdébit est totalement insignifiant dans le cas précis : que le surdébit soit de 20% ou de 50%, la puissance appelée ne change pas (car la température de bivalence ne change pratiquement pas), et la consommation baisse de 0,5% pour un surdébit de 20% et de 1,0% pour un surdébit de 50%. Il n'y a donc aucune influence du surdébit dans le cas d'une PAC associée à un complément par convecteurs électriques.

#### 6.4.2.2 PAC en relève de chaudière existante ou PAC hybride

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** (système « PERCHE » des années 80) : la PAC fonctionne seule tant que la température extérieure est supérieure à la température de bivalence, et pour les températures inférieures, la PAC est à l'arrêt et c'est la chaudière qui fonctionne. Ce dispositif est coûteux (coût d'une PAC + double coût d'abonnement gaz et électricité, + double coût d'entretien), d'un réglage délicat et suppose une disponibilité de place faisant souvent défaut. A noter que, en dehors d'une opération globale de rénovation, les aides financières actuelles ne sont pas attribuées si la chaudière n'est pas supprimée. Cette solution reste difficilement envisageable, sauf à ce que le dispositif d'aides change.

Mais si la chaudière existante est hors d'usage, ou trop âgée, il est aussi possible de mettre en place **une PAC hybride** (voir § 2-2-4-3), c'est à dire une PAC et une chaudière placées sous le même capot. Le fonctionnement est identique au cas de la PAC en relève de chaudière.

Dans cette configuration, la mise en œuvre de PAC en relève de chaudière ou de PAC hybrides dans 50% des logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz conduit à une consommation des PAC de 3,9 TWh/an d'électricité doublée d'une consommation d'énergie fossile des chaudières de 14,7 TWh/an pour les PAC en relève de chaudière,

mais de 12,1 TWh/an de gaz pour les PAC hybrides gaz (car le rendement de la chaudière à condensation est meilleur). La réduction de consommation d'énergie finale n'est donc que de 7,7 TWh (29%) pour la PAC en relève et de 10,3 TWh (39%) pour la PAC hybride. Exprimé en énergie primaire le gain n'est plus que de 2,6 TWh (10%) pour les PAC en relève et de 5,2 TWh (20%) pour les PAC hybrides. Le bilan énergétique de cette solution n'a donc qu'assez peu d'intérêt au regard des objectifs de neutralité carbone en 2050.

Les émissions ne sont réduites que de 37 % (gain de 2,6 M t CO<sub>2</sub>) dans le cas des PAC en relève de chaudière existante, mais de 54% (gain de 3,8 M tCO<sub>2</sub>) dans le cas des PAC hybrides gaz. La réduction de GES n'est donc pas suffisante.

Seul avantage de cette solution : il n'y a pas de pointe électrique supplémentaire puisque ce sont les chaudières qui fonctionnent seules par grand froid, ce qui est également un peu favorable aux émissions de GES puisque qu'aux moments des pointes l'électricité est plus chargée en GES que la combustion du gaz. 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 relativement élevés.

Solutions - France entière	Type de PAC	Puissance électrique [GWe] pour -5°C			Consommation annuelle [TWh]			Emissions CO2
		PAC	Appoint	Total	PAC	Appoint fossile	Total	M tonnes/an
2 - Pac ordinaires sans rénovation préalable	Air/eau	0,0	0,0	0,0	3,9	14,7 (Perche)	3,90	4,40
avec complément par chaudière						12,1 (hybride gaz)		3,22

**Figure 13 : Absence de rénovation — Ajout d'une PAC en relève des chaudières dans 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz ou au fioul — Ou mise en place d'une PAC hybride — Régulation TOR**

*Puissance appelée pour une température extérieure de -5°C. Consommation annuelle d'électricité*

*Consommation actuelle : 15,4 TWh (gaz) et 10,9 TWh (fioul)*

*Emissions actuelles : 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (gaz) et 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (fioul)*

## Influence du surdimensionnement des émetteurs

L'avantage majeur d'une PAC en relève de chaudière ou d'une PAC hybride est de ne jamais fonctionner aux moments des grands froids puisque ce sont les chaudières qui fonctionnent à ces moments-là (pour les températures extérieures inférieures à la température de bivalence). Le seul paramètre que peuvent influencer les surdimensionnements de toute nature sont les consommations d'électricité et de combustible fossile.

		T plafonnée à 55°C			Solution : Perche ou PAC hybride			
krad		0,9	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
Compresseur	Energie électrique (TWh)	3,05	3,86	4,50	5,03	5,86	7,00	6,94
Appoint	Energie fossile PERCHE (TWh)	17,09	14,65	12,53	10,61	6,88	1,48	0,11
	Energie fossile PAC hybride (TWh)	14,07	12,07	10,32	8,74	5,67	1,22	0,09
	COP annuel	1,97	2,05	2,13	2,19	2,37	2,56	2,73
	Temp. de bivalence [°C]	9,7	8,8	7,8	6,9	4,4	0,7	-2,4

**Figure 14 : PAC air/eau en relève de chaudière (PERCHE) ou PAC hybride — Régulation TOR - Influence du surdimensionnement des émetteurs sur 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz ou au fioul**

Le tableau de la figure 14 montre que lorsque les émetteurs sont surdimensionnés, la température de bivalence diminue, ce qui est légitime. Il s'ensuit un fonctionnement plus conséquent de la PAC et une réduction de la consommation de combustible fossile.

Un taux de surdimensionnement des émetteurs (courant) de 20% augmente de 30% la consommation de la PAC et réduit de 28 % la consommation d'énergie fossile quelle que soit la solution en place (Perche ou PAC hybride). Dans tous les cas, la consommation de la PAC hybride est inférieure de 18% à celle de la chaudière en place dans la solution PERCHE.

Si le surdimensionnement des émetteurs atteignait 50%, la consommation des PAC augmenterait de 52 % et la consommation d'énergie fossile diminuerait de 53%.

Le surdimensionnement des émetteurs existants est donc assez favorable aux solutions où la PAC est associée à une chaudière pour les périodes les plus froides. Mais cette amélioration de la contribution des PAC reste insuffisante au regard des objectifs à atteindre.

## Influence du surdimensionnement du circulateur

Lors de l'installation d'une PAC hybride le circulateur de l'installation existante sera changé, si bien que le surdimensionnement du circulateur ne concerne que la solution où la PAC est en relève de chaudière et pas la PAC hybride.

L'influence d'un surdébit est à nouveau très faible car elle modifie marginalement la valeur de la température de bivalence et ne modifie donc pas de manière significative la part de la charge assurée par les deux énergies.

		T plafonnée à 55°C			Solution : Perche			
kdeb		0,9	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
Compresseur	Energie électrique (TWh)	3,89	3,86	3,83	3,80	3,75	4,50	4,46
Appoint	Energie fossile PERCHE	14,65	14,65	14,65	14,65	14,65	12,53	12,53
	COP annuel	2,04	2,05	2,07	2,08	2,11	2,13	2,14
	Temp. de bivalence [°C]	9,0	8,8	8,6	8,4	8,1	7,8	7,5

Figure 15 : PAC air/eau en relève de chaudière (PERCHE) – Régulation TOR - Influence du surdimensionnement des circulateurs sur 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz ou au fioul

Dans le cas d'espèce, un surdébit de 20 % conduit à des variations insignifiantes des consommations d'électricité et d'énergie fossiles. Il faut atteindre des surdébits d'un facteur supérieur ou égal à 2 pour observer des variations de charge d'environ 15 %.

### 6.4.3 Utilisation des pompes à chaleur haute température

Les **pompes à chaleur « haute température »** sont capables d'atteindre 80°C (voir § 2-2-4-2). Elles 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 cher et leur performance est mécaniquement dégradée par les niveaux de température atteints. Elles pourraient donc dans certains cas, plutôt rares, être utilisées en remplacement de chaudières sans autre forme d'intervention. La profession signale toutefois que ce marché reste confidentiel et qu'il est en chute libre.

Par rapport à la solution utilisant des convecteurs en appoint (sur 50 % des logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz), les PAC haute température réduiraient la consommation électrique et les émissions de 10% (-1,0 TWh et -0,13 M t CO<sub>2</sub>), 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 dans la mesure où il s'agit de consommations et surtout de puissances de pointe supplémentaires venant s'ajouter au niveau national actuel qui pose déjà quelques difficultés. Globalement, par rapport à la situation présente de l'échantillon étudié (50% des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul), la consommation d'énergie finale passerait de 26,3 TWh d'hydrocarbures à 8,8 TWh d'électricité, soit une réduction de 66%, mais la consommation d'énergie primaire ne baisserait que de seulement 23%. Quant aux émissions de GES elles seraient réduites de 84 %, ce qui serait une très bonne performance si elle n'était accompagnée de l'impact majeur sur la consommation et la pointe électriques.

Cette solution évite donc le sinistre technique (insuffisance de chauffage) mais elle est coûteuse, d'une maintenance technique délicate, et ses performances énergétiques 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 quand il n'existe pas d'autres solutions.

Solutions - France entière	Type de PAC	Puissance électrique [GWe] pour -5°C			Consommation annuelle [TWh]			Emissions CO <sub>2</sub> M tonnes/an
		PAC	Appoint	Total	PAC	Appoint	Total	
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

Figure 16 : Absence de rénovation – Remplacement par une PAC haute température des chaudières de 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz ou au fioul – Régulation TOR

Puissance appelée pour une température extérieure de -5°C. Consommation annuelle d'électricité  
 Consommation actuelle : 15,4 TWh (gaz) et 10,9 TWh (fioul)  
 Emissions actuelles : 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (gaz) et 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (fioul)

## Influence du surdimensionnement des émetteurs

Le tableau de la figure 17 analyse l'influence du surdimensionnement des émetteurs sur la consommation et la puissance appelée par les PAC haute température.

		T plafonnée à 80°C			PAC haute température				
		k rad	0,9	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
Compresseur	P max (-5°C) GWe	3,38	3,72	4,05	3,98	3,70	3,40	3,20	
	Energie (TWh)	9,18	8,80	8,46	8,16	7,48	6,74	6,26	
Appoint	P max (-5°C) Gwe	1,02	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Energie (TWh)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	P max (-5°C) GWe	4,40	4,21	4,05	3,98	3,70	3,40	3,20	
	Energie (TWh)	9,20	8,80	8,46	8,16	7,48	6,74	6,26	
		COP annuel	1,85	1,93	2,01	2,08	2,27	2,52	2,71
		Temp. de bivalence	-0,4	-2,2	-4,0	-5,7	-10,4	-17,2	-22,9

Figure 17 : PAC air/eau haute température – Régulation TOR - Influence du surdimensionnement des émetteurs sur 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz ou au fioul

S'agissant d'une machine conduisant à une température de bivalence déjà très basse (-2,2°C), on ne pouvait s'attendre à un gain important avec le surdimensionnement des émetteurs. Lorsque le taux de surdimensionnement des émetteurs est de 20% la puissance électrique décroît de 5% (alors que d'ordinaire elle croît : ceci est dû au fait qu'il s'agit toujours de la puissance appelée par -5°C et que la température de bivalence est désormais inférieure à -5°C) et la consommation diminue de 7%. Si ce surdimensionnement atteint 50%, la baisse de la puissance est de 12% et celle de la consommation de 15%.

## Influence du surdimensionnement du circulateur

Le tableau de la figure 18 montre que le surdimensionnement des débits n'apporte pratiquement aucune modification à la puissance appelée et à la consommation lorsque ce surdimensionnement est de 20%. Mais même un surdébit de 50% n'apporterait aucune diminution de la puissance et seulement une baisse inférieure à 3% de la consommation. Et comme en réalité la consommation électrique d'un circulateur croît avec le cube du débit, il est probable que ce surdébit conduirait en réalité à une augmentation de la consommation d'électricité.

		T plafonnée à 80°C			Pompe à chaleur haute température				
		k deb	0,8	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
		k rad = 1							
Compresseur	P max (-5°C) GWe	3,55	3,72	3,72	3,72	3,89	4,05	4,02	
	Energie (TWh)	8,98	8,80	8,73	8,68	8,55	8,43	8,36	
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,76	0,49	0,49	0,49	0,22	0,00	0,00	
	Energie (TWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	P max (-5°C) GWe	4,30	4,21	4,21	4,21	4,11	4,05	4,02	
	Energie (TWh)	8,98	8,80	8,73	8,68	8,55	8,43	8,36	
		COP annuel	1,89	1,93	1,95	1,96	1,99	2,01	2,03
		Temp. de bivalence [°C]	-1,2	-2,2	-2,6	-3,0	-3,7	-4,6	-5,1

Figure 18 : PAC air/eau haute température – Régulation TOR - Influence du surdimensionnement des circulateurs sur 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz ou au fioul

En conclusion, les PAC à haute température sont très peu sensibles aux surdimensionnements des installations de chauffage.

## 6.5 Conclusion sur la substitution d'une PAC à une chaudière sans rénovation

Se contenter uniquement de remplacer une chaudière par une PAC ne peut fonctionner que si l'émission de chaleur du logement est déjà assurée par un plancher chauffant ou des radiateurs basse température (c'est à dire moins de 50°C), ou si la PAC est à haute température. Dans tous les autres cas la PAC ne pourra pas chauffer suffisamment le bâtiment, ce qui pourrait conduire à la conclusion erronée que la PAC a été sous-dimensionnée. Mais même la plus puissante PAC du monde ne ferait pas non plus l'affaire **car le problème n'est pas le niveau de puissance mais le niveau de température**.

Il sera donc toujours nécessaire d'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 se conformer à la trajectoire de neutralité climatique fixée par la France. Pour les solutions « tout électrique » (PAC haute température ou PAC+convecteurs), la réduction des émissions est très significative mais les niveaux atteints par la puissance de pointe et la consommation électriques restent incompatibles avec les capacités de l'offre dans les prochaines années.

La raison à cela vient de 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 importantes.

Dans peu de temps il faudra tout recommencer d'ici 2050 pour que le logement soit rénové au niveau BBC, puisque c'est inscrit dans la loi, 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**. C'est aussi une solution de court terme qui ne s'inscrit pas dans la perspective d'une neutralité carbone en 2050.

Enfin, il est important de noter qu'aucun surdimensionnement, que ce soit des émetteurs ou du débit d'eau, fussent-ils cumulés, ne diminuera suffisamment la température d'entrée d'eau dans les émetteurs pour permettre l'installation d'une PAC standard sans le complément d'un second moyen de chauffage.

## 7 – Comment utiliser efficacement une PAC en substitution de chaudières fioul ou gaz ?

### 7.1 Rénover pour rendre compatible la température des émetteurs avec les PAC

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 relativement simple et il s'inscrit de façon urgente dans la transition énergétique : **il suffit de réduire les besoins du bâtiment en le rénovant, 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 4,3 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 (et par environ 25 la consommation en énergie finale). 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 alors 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.

Afin de préciser ce que l'on peut attendre des différentes solutions, l'évaluation des performances a été réalisée pour des PAC air/eau et eau/eau d'une part, et pour des régulations tout ou rien (TOR) ou progressive par variation de vitesse du compresseur (Inverter). Dans tous les cas on a adopté un régime de température après rénovation de 45/35°C car c'est celui qui tire le meilleur parti des PAC (ce qu'on obtient en rénovation par une réduction d'un facteur 4,3 des déperditions (parois+ventilation) initiales). On a aussi supposé que, pour la température extérieure de base, la puissance des PAC était égale à 87% de la puissance des besoins de base (valeur adoptée car elle minimise la puissance appelée), mais par la suite on a étudié l'impact des variations de ce taux sur la puissance et la consommation d'un parc de logements.

Les résultats présentés se fondent, comme précédemment, sur l'hypothèse d'une rénovation de 50% des logements de classes F et G chauffés au fioul et au gaz.

### 7.2 Bilan avec des pompes à chaleur régulées par tout ou rien

Le tableau de la figure 19 fournit les niveaux de puissance et de consommation d'électricité après rénovation et mise en place de PAC régulées **en tout ou rien**. L'analyse porte sur les PAC air/eau et eau/eau.

Solutions - France entière	Type de PAC	Puissance électrique [GWe] pour -5°C			Consommation annuelle [TWh]			Emissions CO2 M tonnes/an
		PAC	Appoint	Total	PAC	Appoint	Total	
4 - Pac ordinaires sur bâtiments rénovés BBC	Air/eau	0,510	0,000	0,510	0,667	0,000	0,667	0,083
avec appoint par effet Joule intégré - TOR	Eau/eau	0,334	0,044	0,378	0,543	0,000	0,543	0,068

**Figure 19 : Rénovation préalable niveau BBC – Remplacement par une PAC fonctionnant au régime 45/35°C, régulée en tout ou rien, des chaudières de 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul**

*Puissance appelée pour une température extérieure de -5°C. Consommation annuelle d'électricité  
Consommation actuelle : 15,4 TWh (gaz) et 10,9 TWh (fioul)  
Emissions actuelles : 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (gaz) et 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (fioul)*



Les résultats sont sans appel. On observe en effet que pour les PAC air/eau :

- La puissance maximale n'est plus que de 0,51 GWe (soit 32% de la puissance d'un seul EPR pour chauffer 50 % des logements de classes F et G aujourd'hui chauffés au gaz et au fioul).
- La consommation d'électricité s'élève à 0,67 TWh, soit 5,2 % de la production annuelle d'un seul EPR.
- La consommation d'énergie primaire est divisée par 17, et celle d'énergie finale par 39, ce qui signifie que lorsque le facteur énergie primaire/énergie finale de l'électricité sera proche de 1 (vers 2050) on aura une réduction d'énergie finale également proche de 40.
- Les émissions de GES ne sont plus que de 0,083 MtCO<sub>2</sub>, soit une division par 85 par rapport à la situation actuelle.
- La consommation de chauffage des logements est de 5,8 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité, soit 13,3 kWh/m<sup>2</sup>/an en énergie primaire, ce qui signifie, compte tenu de la valeur de 3,22 du COP (voir figure 20) que les besoins de chauffage du logement sont de 19 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Dans ces conditions, 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.

Les observations que l'on peut faire sur les PAC eau/eau montrent que :

- La puissance maximale n'est plus que de 0,38 GWe, soit 26 % de moins qu'avec les PAC air/eau, soit 24 % de la puissance d'un seul EPR.
- La consommation d'électricité s'élève à 0,54 TWh, soit 19 % de moins qu'avec les PAC air/eau, soit encore 4,2 % de la production annuelle d'un seul EPR.

La PAC eau/eau sera beaucoup plus intéressante que la PAC air/eau dans les régions froides où elle devra être privilégiée. Mais dans tous les cas de figure elle améliore sensiblement les performances des PAC air/eau. Elle nécessite la plupart du temps des forages dont le coût est de l'ordre de 50 à 60 € HT/ml. Elle présente l'avantage d'être beaucoup moins bruyante que le groupe extérieur des PAC air/eau.

Malgré ces performances exceptionnelles on peut se demander quel serait l'impact d'un surdimensionnement des installations de chauffage sur ces performances. Seul subsiste le surdimensionnement des émetteurs car lors des travaux le circulateur aura été obligatoirement changé puisque les puissances à véhiculer ont très fortement diminué. Rappelons aussi que le régime de température de la nouvelle installation est en principe de 45/35°C. L'analyse qui suit ne porte que sur les PAC air/eau, mais les tendances observées seront les mêmes pour les PAC eau/eau.

La figure 20 montre l'évolution des puissances et des consommations électriques en fonction du taux de surdimensionnement des émetteurs ( $k_{rad}$ ). On peut également suivre l'évolution du COP annuel :

	k rad	0,9	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
	Te avec PAC	46,6	45	43,7	42,5	40,0	37,3	35,6
	Ts avec PAC	36,6	35	33,7	32,5	30,0	27,3	25,6
	Régulation :	<b>TOR</b>						
Compresseur	P max (-5°C) GWe	0,532	0,510	0,494	0,481	0,453	0,428	0,413
	Energie (TWh)	0,689	0,667	0,650	0,636	0,607	0,579	0,563
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Energie (TWh)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	P max (-5°C) GWe	0,532	0,510	0,494	0,481	0,453	0,428	0,413
	Energie (TWh)	0,689	0,667	0,650	0,636	0,607	0,579	0,563
	COP annuel	3,11	3,22	3,30	3,37	3,53	3,70	3,81

Figure 20 : PAC air/eau au régime 45/35°C régulées par tout ou rien  
Influence du surdimensionnement des émetteurs

On observe une influence très favorable d'un surdimensionnement initial des émetteurs de chaleur. En effet, plus le surdimensionnement est important, plus :

- les températures d'entrée et de sortie réelles des émetteurs diminuent, ce qui est toujours très favorable,
- la puissance maximum appelée diminue. Si le taux de surdimensionnement est de 20 %, la puissance appelée baisse de 5,7%, et s'il est de 50% la baisse est de 11,2%,
- la consommation annuelle d'électricité baisse. Si le taux de surdimensionnement est de 20 %, l'énergie consommée baisse de 4,6%, et s'il est de 50% la baisse est de 9,0%,
- le COP annuel est élevé. Si le taux de surdimensionnement est de 20 %, le COP augmente de 4,7%, et s'il est de 50% la hausse est de 9,6%.

### 7.3 Bilan avec des PAC régulées par la technologie Inverter

Le tableau de la figure 21 fournit les niveaux de puissance et de consommation d'électricité après rénovation et mise en place de PAC régulées **par variation de vitesse du compresseur (technologie Inverter)**. Ce mode de régulation permet à tout instant, et en fonction des besoins, d'ajuster avec précision la température en sortie de condenseur, ce qui est source d'économie d'énergie, tout en allongeant la durée de vie des équipements appelés à moins souvent démarrer. L'analyse porte sur les PAC air/eau et eau/eau.

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
5 - Pac ordinaires sur bâtiments rénovés BBC avec appoint par effet Joule intégré - <b>INVERTER</b>	Air/eau	0,511	0,000	0,511	0,557	0,000	0,557	0,070
	Eau/eau	0,343	0,029	0,372	0,481	0,000	0,481	0,060

**Figure 21 : Rénovation préalable niveau BBC — Remplacement par une PAC fonctionnant au régime 45/35°C, régulation INVERTER, des chaudières de 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul**

*Puissance appelée pour une température extérieure de -5°C. Consommation annuelle d'électricité  
Consommation actuelle : 15,4 TWh (gaz) et 10,9 TWh (fioul)  
Emissions actuelles : 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (gaz) et 3,5 Mt CO<sub>2</sub> (fioul)*

Les résultats sont sensiblement meilleurs que pour le système de régulation tout ou rien. On observe en effet que pour les PAC air/eau :

- La puissance maximale est inchangée (0,51 GWe) par rapport au système de régulation TOR, ce qui est légitime.
- La consommation d'électricité n'est plus que de 0,58 TWh, soit une réduction de 16,5% par rapport au système TOR.
- La consommation d'énergie primaire est divisée par 20,5, et celle d'énergie finale par 47.
- Les émissions de GES ne sont plus que de 0,070 MtCO<sub>2</sub>, soit une division par 100 par rapport à la situation actuelle, et une réduction de 15,7 % par rapport à une régulation TOR.
- La consommation de chauffage des logements est de 4,9 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité (ces valeurs ne doivent pas surprendre : on présentera au § 8 un exemple de réalisation en logement social dans laquelle la consommation annuelle de chauffage mesurée sur un an est de 4,2 kWh/m<sup>2</sup>/an d'électricité).

Le COP annuel est de 3,85.

Les observations que l'on peut faire sur les PAC eau/eau, selon qu'elles sont régulées en TOR ou par système Inverter, montrent qu'avec une régulation Inverter :

- La puissance maximale appelée est inférieure de 1,6 % à 0,37 GWe.
- La consommation annuelle d'électricité est inférieure de 11,4 % à 0,48 TWh.
- Les émissions de GES diminuent également de 11,8% à 0,060 MtCO<sub>2</sub>.

Malgré ces performances exceptionnelles on peut se demander quel serait l'impact d'un surdimensionnement des installations de chauffage. Seul subsiste le surdimensionnement des émetteurs puisque lors des travaux le circulateur aura été obligatoirement changé puisque les puissances à véhiculer ont très fortement diminué. Rappelons aussi que le régime de température de la nouvelle installation est en principe de 45/35°C.

La figure 22 montre l'évolution des puissances et des consommations électriques en fonction du taux de surdimensionnement des émetteurs ( $k_{rad}$ ). On peut également suivre l'évolution du COP annuel :

	k rad	0,9	1	1,1	1,2	1,5	2	2,5
	Te avec PAC	46,6	45	43,7	42,5	40,0	37,3	35,6
	Ts avec PAC	36,6	35	33,7	32,5	30,0	27,3	25,6
PAC = réno	Régulation :	<b>INVERTER</b>						
Compresseur	P max (-5°C) GWe	0,532	0,511	0,495	0,482	0,454	0,429	0,414
	Energie (TWh)	0,570	0,557	0,546	0,537	0,517	0,499	0,488
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Energie (TWh)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	P max (-5°C) GWe	0,532	0,511	0,495	0,482	0,454	0,429	0,414
	Energie (TWh)	0,570	0,557	0,546	0,537	0,517	0,499	0,488
	COP annuel	3,76	3,85	3,93	4,00	4,14	4,30	4,40

Figure 22 : PAC régulées système INVERTER – Influence du surdimensionnement des émetteurs

On observe une influence très favorable d'un surdimensionnement initial des émetteurs de chaleur. En effet, plus le surdimensionnement est important :

- Plus les températures d'entrée et de sortie réelles des émetteurs diminuent, ce qui est toujours très favorable.
- Plus la puissance maximum appelée diminue. Si le taux de surdimensionnement est de 20 %, la puissance appelée baisse de 5,7%, et s'il est de 50% la baisse est de 11,2%.
- Plus la consommation annuelle d'électricité baisse. Si le taux de surdimensionnement est de 20 %, l'énergie consommée baisse de 3,6%, et s'il est de 50% la baisse est de 7,2%.
- Plus le COP annuel est élevé. Si le taux de surdimensionnement est de 20 %, le COP augmente de 3,7%, et s'il est de 50% la hausse est de 7,6%.

## 7.4 Optimisation du taux de sous dimensionnement des PAC

Il est de « bonne pratique » de dimensionner la puissance d'une PAC air/eau à la température de base pour qu'elle vaille 70% de la puissance des besoins de base (ce taux est baptisé « taux de charge à la température de base »). C'est la raison pour laquelle la plupart des PAC disposent de résistances électriques en sortie de condenseur. Leur rôle est d'apporter le complément de chaleur nécessaire pour porter la température de l'installation de chauffage à une valeur de 55°C, ou 60°C maximum, température qui peut être éventuellement rendue nécessaire pour satisfaire les besoins par température extérieure de base. Dans la pratique, de nombreuses PAC déclenchent automatiquement ces résistances lorsque la température extérieure est de -2°C.

Lorsqu'on interroge la profession sur le choix de ce taux de 70 %, la réponse est invariablement qu'il s'agit d'un optimum économique. Mais un optimum pour le particulier, ou pour le système électrique ? Compte tenu de la relativement faible sensibilité du prix des PAC à leur puissance, l'intérêt pour le particulier ne semble pas évident.

Nous nous intéresserons dans ce qui suit à l'impact de ce taux sur la puissance appelée et sur les consommations annuelles d'électricité, s'agissant à nouveau d'une observation sur la rénovation de 50% des logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul.

La figure 23 montre l'évolution de la puissance appelée et de la consommation d'énergie en fonction du taux de charge à la température de base des PAC air/eau dans le cas où elles sont régulées en tout ou rien.

Régulation :		<b>TOR</b>		PAC : Air/Eau				
Taux de charge à Tbase (%)		40	50	60	70	80	90	100
Compresseur	P max (-5°C) GWe	0,210	0,269	0,331	0,396	0,465	0,515	0,529
	Energie (TWh)	0,529	0,573	0,603	0,627	0,650	0,674	0,700
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,656	0,513	0,371	0,230	0,088	0,000	0,000
	Energie (TWh)	0,112	0,033	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000
Total	P max (-5°C) GWe	0,866	0,782	0,702	0,626	0,553	0,515	0,529
	Energie (TWh)	0,641	0,606	0,609	0,627	0,650	0,674	0,700
COP annuel		3,84	3,68	3,55	3,42	3,30	3,18	3,06

Figure 23 : Evolution de la puissance maximale appelée et de la consommation d'énergie en fonction du taux de charge des PAC air/eau à la température de base – Régulation TOR

On distingue deux optimums qui ne correspondent ni l'un ni l'autre au taux de 70% :

- Le taux de 50 % est celui qui conduit à la consommation d'énergie minimale (0,606 TWh).
- Le taux de 87 % (non visible sur ce tableau, mais proche de 90%) est celui qui correspond à la puissance appelée minimum (0,510 GWe).
- La consommation d'énergie est 10 % plus élevée pour le taux de 87% que pour celui de 50%. En revanche la puissance appelée au taux de 87% est inférieure de 34% à celle appelée au taux de 50 %.

On voit le rôle considérable que peut jouer le taux de charge à la température de base, et on peut se demander si, pour des raisons de stratégie énergétique, il ne serait pas nécessaire de fixer par arrêté (ou toute autre mesure plus adaptée) la valeur jugée la plus pertinente de ce taux pour le réseau. Dans toutes les évaluations qui précèdent, les bilans ont été établis avec un taux de 87% parce qu'il minimisait la puissance appelée qui semble l'élément le plus critique pour le réseau électrique français.

Il est également intéressant de voir si le mode de régulation des PAC modifie ce résultat. Le tableau de figure 24 présente les mêmes paramètres pour une PAC air/eau dotée d'une régulation progressive par Inverter :

Régulation :		<b>INVERTER</b>		PAC : Air/Eau				
Taux de charge à Tbase (%)		40	50	60	70	80	90	100
Compresseur	P max (-5°C) GWe	0,239	0,299	0,359	0,418	0,478	0,511	0,511
	Energie (TWh)	0,523	0,547	0,555	0,556	0,557	0,557	0,557
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,652	0,509	0,366	0,222	0,079	0,000	0,000
	Energie (TWh)	0,102	0,028	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000
Total	P max (-5°C) GWe	0,891	0,808	0,724	0,641	0,557	0,511	0,511
	Energie (TWh)	0,625	0,575	0,560	0,557	0,557	0,557	0,557
COP annuel		3,905	3,870	3,856	3,852	3,852	3,852	3,852

Figure 24 : Evolution de la puissance maximale appelée et de la consommation d'énergie en fonction du taux de charge des PAC air/eau à la température de base – Régulation Inverter

On observe qu'avec une régulation progressive des PAC (Inverter), que ce soit pour la puissance appelée ou pour la consommation d'énergie, l'optimum se situe toujours pour une valeur de 100 % du taux de charge. Mais on notera aussi que l'influence de celui-ci sur la consommation d'énergie (et sur la valeur du COP) n'est pas vraiment significative pour les valeurs de 50 à 100 % du taux, ce qui n'est pas le cas de la puissance appelée, qui y est très sensible puisqu'avec un taux de 70% elle est 25 % plus élevée que pour l'optimum de 100%, et qu'avec un taux de 50% elle excède la valeur optimum de la puissance de près de 60 %.

On serait donc tenté d'affirmer qu'avec la régulation Inverter il serait toujours plus intéressant de dimensionner une PAC air/eau avec un taux de charge à la température de base de 100%.

On dimensionne souvent les PAC eau/eau avec un taux de charge à la température de base de 100% car la température de la source froide est souvent très stable et ne dépend pas de la température extérieure. Mais on peut néanmoins se poser la même question que précédemment : existe-t-il un taux de charge optimum pour la température de base ?

Le tableau de la figure 25 présente les mêmes paramètres que précédemment pour une PAC eau/eau dotée d'une régulation TOR :

Régulation :		TOR			PAC : Eau/Eau			
Taux de charge à Tbase (%)		40	50	60	70	80	90	100
Compresseur	P max (-5°C) GWe	0,133	0,171	0,212	0,255	0,300	0,349	0,362
	Energie (TWh)	0,413	0,461	0,492	0,514	0,531	0,549	0,567
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,684	0,548	0,412	0,276	0,140	0,003	0,000
	Energie (TWh)	0,257	0,104	0,030	0,005	0,000	0,000	0,000
Total	P max (-5°C) GWe	0,817	0,719	0,624	0,531	0,440	0,352	0,362
	Energie (TWh)	0,670	0,564	0,522	0,518	0,532	0,549	0,567
COP annuel		4,573	4,430	4,294	4,163	4,034	3,907	3,779

Figure 25 : Evolution de la puissance maximale appelée et de la consommation d'énergie en fonction du taux de charge des PAC eau/eau à la température de base – Régulation TOR

On observe, comme pour les PAC air/eau, deux optimums :

- L'optimum énergétique est obtenu pour un taux de 67% (hors de ce tableau) et conduit à une consommation d'énergie de 0,516 TWh.
- L'optimum en puissance est obtenu avec un taux de 91% et conduit à une puissance de 0,351 GWe.
- La consommation d'énergie est 7 % plus élevée pour le taux de 91% que pour celui de 67%. En revanche la puissance appelée au taux de 91% est inférieure de 37% à celle appelée au taux de 67 %.

Le tableau de la figure 26 représente les mêmes paramètres mais pour des PAC eau/eau régulées de façon continue par Inverter :

Régulation :		INVERTER			PAC : Eau/Eau			
Taux de charge à Tbase (%)		40	50	60	70	80	90	100
Compresseur	P max (-5°C) GWe	0,158	0,197	0,236	0,276	0,315	0,351	0,351
	Energie (TWh)	0,428	0,461	0,476	0,481	0,481	0,481	0,481
Appoint	P max (-5°C) Gwe	0,675	0,538	0,400	0,263	0,125	0,000	0,000
	Energie (TWh)	0,217	0,081	0,020	0,003	0,000	0,000	0,000
Total	P max (-5°C) GWe	0,833	0,735	0,637	0,539	0,441	0,351	0,351
	Energie (TWh)	0,645	0,542	0,496	0,483	0,481	0,481	0,481
COP annuel		4,504	4,476	4,460	4,454	4,453	4,453	4,453

Figure 26 : Evolution de la puissance maximale appelée et de la consommation d'énergie en fonction du taux de charge des PAC eau/eau à la température de base – Régulation Inverter

Comme pour la PAC air/eau, la régulation de type Inverter conduit à un taux de charge optimum de 90 à 100%, que ce soit pour la puissance appelée ou pour la consommation d'électricité. A vrai dire, il n'y a pas de différence sensible sur la consommation d'électricité pour des taux de charge allant de 70 à 100%. En revanche la puissance appelée est très sensible à ce taux lorsqu'il est inférieur à 90%.

### L'ensemble de ces observations plaident pour :

- Privilégier le recours à régulation Inverter des PAC air/eau car leurs performances sont meilleures et, à l'inverse des machines régulées par TOR, elles présentent la même valeur du taux optimum de charge en énergie et en puissance, et ce taux est de 100 %. Elles permettent donc d'utiliser encore mieux le potentiel des PAC air/eau.
- Toujours préférer, lorsque les conditions le permettent, le recours aux PAC eau/eau dont les performances sont toujours meilleures.
- Fixer des règles de dimensionnement précisant les valeurs du taux de charge à la température de base des PAC en fonction de la technologie de régulation retenue et des contraintes du réseau électrique plus marqué par le niveau de puissance appelée que par le volume d'énergie consommé.

## 7.5 Conclusion sur l'association d'une PAC et d'une rénovation performante

L'incitation à installer des PAC en substitution de chaudières ne pourra fonctionner correctement, contribuer significativement à la réduction des émissions de GES et minimiser les besoins en électricité (puissance et volume) qu'à condition d'être 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 croissance trop forte de la pointe électrique en hiver et à un recours massif aux centrales au gaz. En revanche, respecter cette contrainte permettrait 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 techniques 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. Il faut aussi signaler que les performances des PAC 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).

Aujourd'hui le développement des PAC n'est pas suffisamment encadré et est pénalisé par une dérive inquiétante des coûts pratiqués et par une vision de très court terme qui ne permettent pas au pays de bénéficier de l'intérêt extrême qu'elles présentent pour apporter une réponse aux problèmes majeurs qui se posent à lui. Il est nécessaire que les règles d'installation et d'utilisation des PAC soient définies au niveau national, et ce dans l'intérêt de tous et de la profession elle-même dont l'image de marque, assez affaiblie actuellement, ne pourra en sortir que grandie.

## 8 — Ce qu’enseignent les campagnes de mesure

---

A priori, les pompes à chaleur peuvent, si les conditions locales le permettent, être installées dans tous les types de bâtiments, que ce soit les maisons individuelles, les logements collectifs ou les bâtiments tertiaires, et que ce soit en construction neuve ou en rénovation. Les conditions nécessaires à la faisabilité de cette mise en œuvre sont notamment :

- d’abord l’existence et la possibilité de disposer et d’exploiter une « source froide » à proximité du bâtiment. Ce peut-être l’air extérieur (mais attention au bruit des ventilateurs pour le voisinage), l’eau d’un lac, d’une rivière ou la nappe phréatique, ou la chaleur du sous-sol proche au moyen de sondes « sèches » dans lesquelles circulent de l’eau qui s’échauffe dans le sous-sol. On pourrait aussi imaginer que la source froide soit un rejet thermique à basse température issu d’un process industriel, voire d’un réseau urbain d’eau « tiède ».
- La présence dans le bâtiment d’émetteurs de chaleur à basse température (maximum 45°C), que ce soit par construction (plancher chauffant en construction neuve) ou par transformation (émetteurs conçus pour fonctionner à haute température à l’origine, mais fonctionnant désormais à basse température suite à des travaux de rénovation ayant fortement abaissé le niveau des déperditions).
- Existence ou possibilité d’installer (cas de la rénovation) un réseau de distribution d’eau chaude ou de fluide frigorigène (pour les systèmes à détente directe) à l’intérieur du bâtiment.
- Présence d’un local pour implanter la machine dans le cas d’une PAC eau/eau

Disposer de cet ensemble de conditions favorables est évidemment plus aisé en construction neuve qu’en rénovation car le concepteur dispose alors de tous les degrés de liberté pour optimiser le fonctionnement des PAC....

Les retours d’expérience par campagnes de mesure d’un an sur ce type d’équipement ne couvrent pas encore toutes les situations possibles.

Les pompes à chaleur peuvent être installées dans tous les bâtiments, que ce soient les maisons individuelles, les logements collectifs ou les bâtiments tertiaires. C’est évidemment plus aisé en construction neuve qu’en rénovation car le concepteur dispose alors de tous les degrés de liberté pour optimiser le fonctionnement des PAC....

A une exception près, à savoir la rénovation du siège de la Fédération Française du Bâtiment (FFB) Drôme/Ardèche à Valence, ce qui suit ne concerne que des pompes à chaleur installées dans des bâtiments neufs, faute d’autres retours et suivis d’opérations de rénovation. Mais les enseignements sont déjà nombreux.

## 8.1 Logements sociaux à Ancône (Drôme)

Il s'agit de logements sociaux livrés en 2010 près de Montélimar équipés 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°. L'opération a fait l'objet d'une campagne de mesure d'une année. Le bâtiment comprend 4 logements de type passif équipés d'une VMC double flux collective. La température moyenne des logements durant l'hiver a été de 21,2°C. La puissance thermique de la PAC est de 33 W/m<sup>2</sup><sub>Shab</sub>. Le test d'étanchéité à l'air a fourni une valeur de n<sub>50</sub>=0,84 vol/h. **La consommation d'électricité pour le chauffage a été de 4,2 kWh/m<sup>2</sup>/an et de 3,2 pour la production d'eau chaude sanitaire. Sur l'année, le COP moyen de la machine seule pour le chauffage a été de 6,6 :**

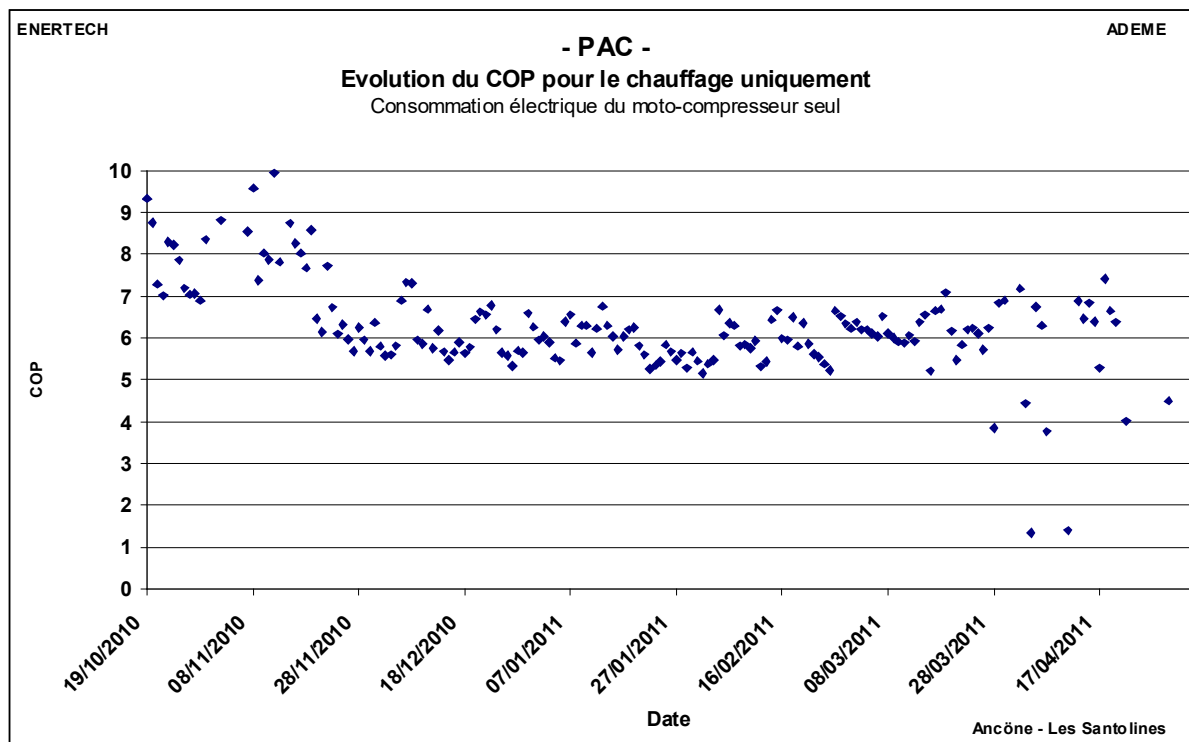


Figure 27 : Ancône - Evolution du COP chauffage de la PAC seule durant la saison de chauffage

Si on tient compte de la production d'eau chaude sanitaire dans le COP annuel moyen (machine seule), il ne vaut que 5,1. Ceci est dû à la température plus élevée que celle du chauffage exigée par la production ECS.

Si on intègre tous les auxiliaires, le COP annuel moyen pour le chauffage et l'ECS s'élève à 3,8.

Enfin, la puissance appelée en sortie de PAC est inférieure à la moitié de la puissance installée pendant 90% du temps, inférieure à un quart de la puissance installée pendant 85% du temps et inférieure à 1 kW (soit 8% de la puissance installée) pendant 50% du temps.

### Les enseignements de cette opération

1. La principale leçon de cette opération est que les COP machine annuels peuvent être très élevés dès lors que l'écart des températures des sources chaude et froide est faible.
2. La consommation d'électricité pour le chauffage, grâce à la pompe à chaleur, peut être inférieure à 5 kWh/m<sup>2</sup>/an, de même pour la production d'eau chaude sanitaire.



## 8.2 Presqu'île Grenoble (Isère) – Logements collectifs

Il s'agit du suivi sur une année de 4 immeubles livrés en 2018 dans le cadre de l'aménagement du nouveau quartier Presqu'île de Grenoble. Il faut signaler que tout ce quartier, c'est-à-dire 300 000 m<sup>2</sup>, utilise ou utilisera des pompes à chaleur. La campagne de mesure n'a porté que sur 4 des premiers bâtiments livrés.

Deux de ces bâtiments appartiennent à des bailleurs sociaux et les deux autres à de la promotion privée. Ils sont de type R+9 à R+11. Le nombre de logements total est de 158, allant de 35 à 43 selon les immeubles. La surface habitable totale est de 9 951 m<sup>2</sup> (de 2 096 à 2 714 m<sup>2</sup>).

Il y a une PAC double service par immeuble (chauffage+ECS) alimentant des planchers chauffants à très basse température. La source froide est la nappe phréatique grenobloise. Mais il était impératif que chaque immeuble ne rejette pas dans la nappe elle-même l'eau très froide sortant des PAC, ce qui aurait posé un problème important de ressource pour les immeubles placés en aval dans l'écoulement de la nappe (qui circule du Drac vers l'Isère). Comme cette nappe trop abondante risque de perturber le fonctionnement du synchrotron, elle doit être pompée en permanence, ce qui a autorisé la mise en place d'une exhaure rendant possible la collecte et le renvoi vers l'Isère de l'eau passée dans les PAC.

En moyenne la température dans les logements a été de 21,7°C. En termes de performance énergétique, le cahier des charges précisait que l'énergie utile pour le chauffage ne devait pas dépasser 25 kWh/m<sup>2</sup><sub>Shab</sub>/an. La réalité, notamment à cause du non-respect de la consigne de température ambiante à 19°C, s'est révélée plus importante : de 32 à 56 kWh/m<sup>2</sup><sub>Shab</sub>/an d'après les mesures. Seul un immeuble dispose d'une VMC double flux, les 3 autres étant équipés de ventilations hygroréglables.

Le COP moyen annuel des PAC seules pour le chauffage vaut 5,5.

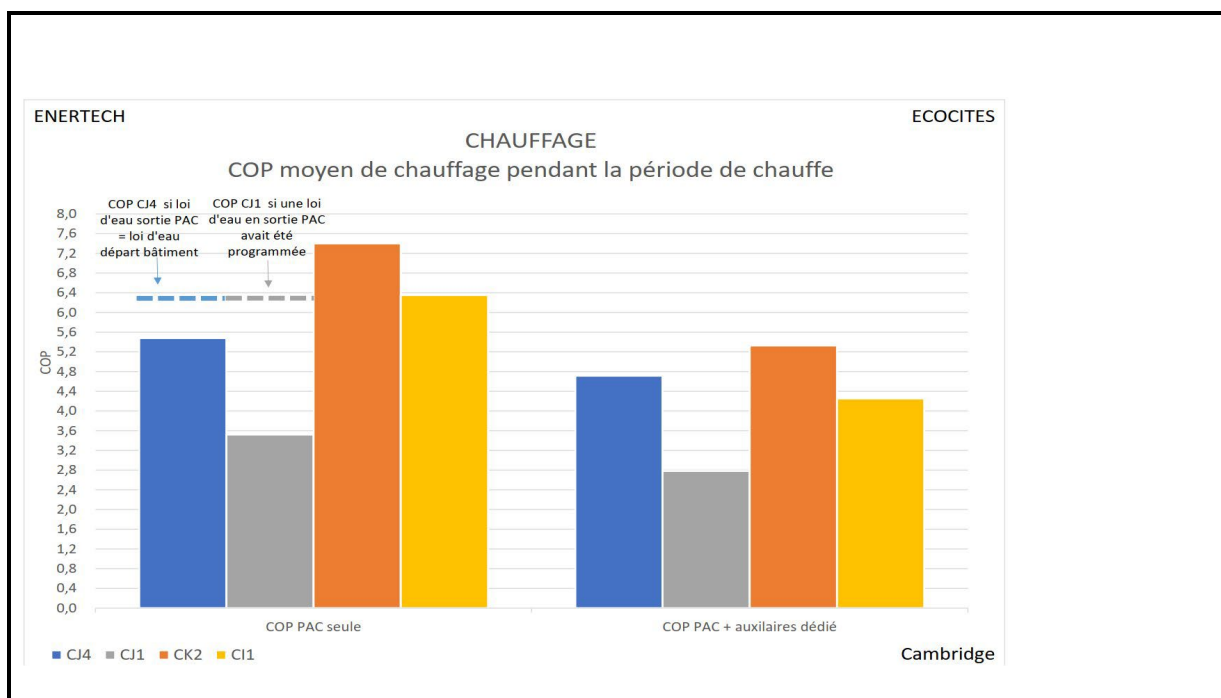


Figure 28 : Grenoble Presqu'île - COP machine annuel moyen (chauffage seul) des différents bâtiments

Sa valeur varie de 3,5 à 7,4 pour les différentes machines. Si on intègre légitimement les auxiliaires, le COP ne vaut plus en moyenne que 4,1 sa valeur variant d'un bâtiment à l'autre de 2,8 à 5,3. Ceci permet de constater que, dans les mêmes conditions, les réponses constructives des équipes de maîtrise d'œuvre (dont c'était pour la plupart la première opération avec PAC) peuvent conduire à des niveaux de performance très contrastés, également influencés, il est vrai, par le comportement des occupants, notamment dans le choix de la température de consigne.

Les mesures ont aussi permis d'établir une corrélation expérimentale entre la température en sortie PAC (donc à peu près la température de la source chaude) et le COP des 4 bâtiments, sachant que la température de la source froide, la nappe phréatique, est très stable durant l'hiver.

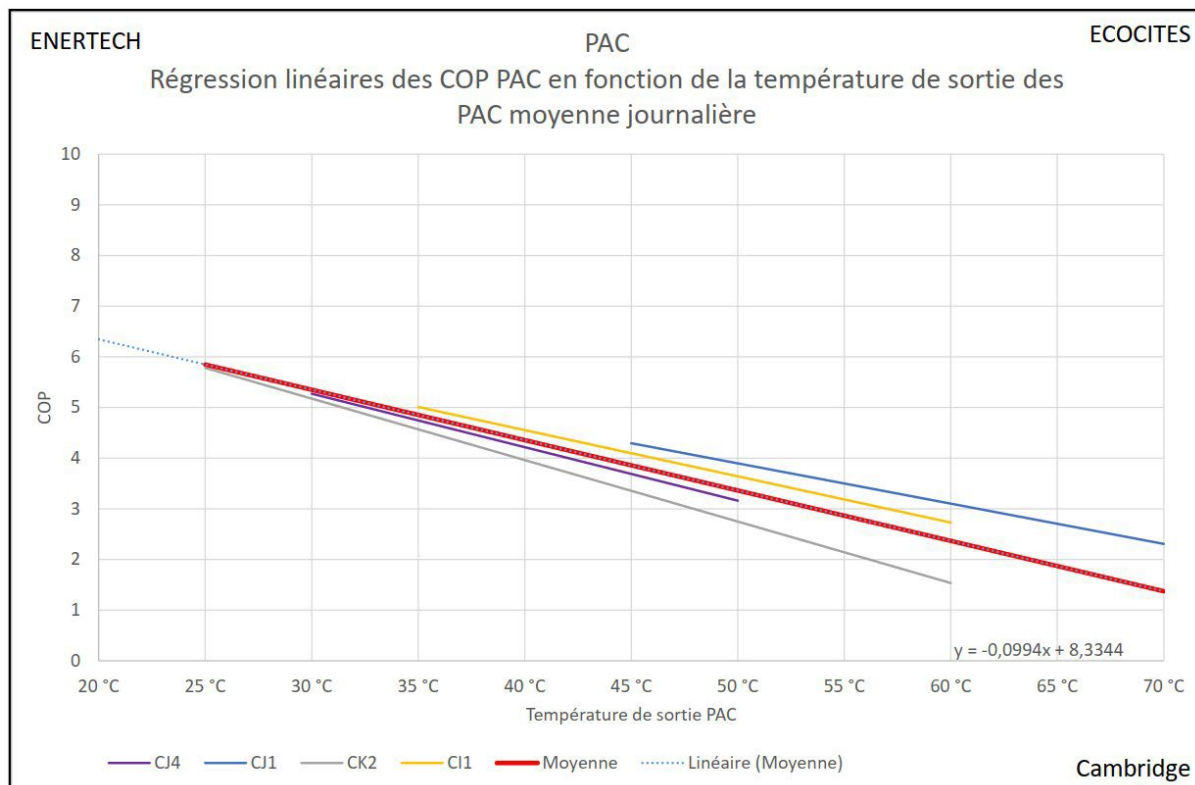


Figure 29 : COP en fonction de la température de sortie condenseur pour les différents bâtiments

La moyenne est représentée par la droite rouge. Pour une température de sortie du condenseur (donc une température d'entrée dans les émetteurs) de 45°C le COP vaut 4. Pour une température de 55°C, il ne vaut plus que 3. Et pour une température de 35°C il vaut 5. Ceci confirme par la mesure le lien puissant existant entre l'écart de température des sources chaude et froide (mais ici la température de la source froide ne varie pas), donc essentiellement le niveau de température des émetteurs, et la valeur du COP. Choisir la plus basse valeur possible de la température de fonctionnement par température extérieure de base apparaît comme la garantie de bénéficier d'une valeur élevée du COP sur l'année. Mais bien sûr, ceci implique de bien programmer la loi d'eau en sortie de la PAC, ce qui n'est malheureusement souvent pas fait, et s'avère très pénalisant.

### Les enseignements de cette opération

1. Cette opération confirme la sensibilité des COP à l'écart des températures des sources chaude et froide. Mais elle montre l'impact très sensible de la température des émetteurs sur la valeur du COP et l'intérêt qu'il y a à travailler à 45°C plutôt qu'à 55°C.
2. Elle a aussi pointé les limites des compétences actuelles de la plupart des maîtres d'œuvre ce qui conduit à des écarts de performance importants alors que toutes les conditions « locales » sont absolument identiques.
3. Ces opérations ont été réalisées sur des « tours » d'habitation et porteront au final sur un quartier de 300 000 m<sup>2</sup>. On n'est plus sur des opérations ponctuelles.

## 8.3 Bourg lès Valence (Drôme) : 60 logements sociaux

Il s'agit de 3 bâtiments de type R+4 d'un même ensemble immobilier du bailleur social DAH situé à Bourg lès Valence dans la Drôme. Il comprend 60 logements qui ont été livrés en 2015.

La surface habitable totale est de 4 258 m<sup>2</sup>. Le chauffage et la production d'ECS sont assurés par une PAC eau/eau dont la source froide est la nappe phréatique qui est peu profonde. L'émission de chaleur est assurée par des planchers chauffants.

Le bâtiment est bien conçu et bien réalisé, même s'il reste des mises au point et quelques améliorations à faire. La valeur de Ubat vaut 0,49 W/m<sup>2</sup>K et le test d'étanchéité à l'air est excellent avec un n<sub>50</sub> = 0,66 vol/h. La ventilation est de type double flux avec récupération de chaleur et le taux de renouvellement d'air est de 0,34 vol/h ce qui est un peu faible.

La température intérieure moyenne dans les logements est de 22,4°C. La puissance thermique de la PAC est de 24 W/m<sup>2</sup>Shab. Cette valeur aurait encore pu être plus basse mais on observe, comme la plupart du temps, des surdimensionnements généralement inutiles.

L'énergie utile (mesurée par les compteurs de chaleur sur le départ des réseaux de chauffage) est de 33,4 kWh/m<sup>2</sup>Shab/an. La consommation d'électricité de la seule PAC est de 6,9 kWh/m<sup>2</sup>Shab/an, et celle de la PAC et de ses auxiliaires de 8,0 kWh/m<sup>2</sup>Shab/an.

Le COP annuel moyen de la PAC seule pour le chauffage est de 4,8. Si on inclut la consommation des auxiliaires (pompe sur nappe notamment), ce COP est alors de 4,2.

Cette PAC produit aussi l'ECS. Les mêmes mesures sur la production ECS montrent que le COP de la production d'ECS est de 2,9 (il est dégradé par rapport au chauffage car la température nécessaire pour l'ECS est beaucoup plus élevée que celle du chauffage).

### Les enseignements de cette opération

1. Cette opération confirme que l'utilisation des PAC en logement collectif, et en secteur social, est maîtrisée en construction neuve.
2. La température de production d'ECS est un paramètre important de la performance et du bon fonctionnement de la PAC. Car plus la température de l'ECS est élevée plus la PAC doit faire appel à des résistances additionnelles qui grèvent son COP et son bilan.

## 8.4 Rénovation du siège de la FFB Drôme-Ardèche à Valence (Drôme)

Bien qu'il ne s'agisse pas de logements, cette opération est intéressante car c'est une rénovation visant à transformer un bâtiment existant en bâtiment à énergie positive (sur l'ensemble des usages sans exception) et pour laquelle une PAC sur nappe assez profonde a été mise en œuvre. Elle a été livrée en 2011 et concerne un bâtiment de bureau de 1741 m<sup>2</sup><sub>Shon</sub> (et de 1 152 m<sup>2</sup><sub>Sutile</sub>) pour lequel on a multiplié les technologies (types d'isolation, etc.) à des fins pédagogiques (en direction des professionnels du bâtiment). Le niveau d'isolation a conduit à un niveau d'énergie utile mesurée (celle livrée en sortie des générateurs de chaleur (ici les PAC)) de 54,3 kWh/m<sup>2</sup>/an. A noter que la température intérieure moyenne durant l'hiver a été de 21,7°C et qu'une élévation de 1°C de température conduit à une augmentation de consommation de 20% sur ce bâtiment.

Les chaudières gaz ont été remplacées par deux PAC fonctionnant en cascade en fonction des besoins. La source froide est la nappe phréatique, ce qui n'était pas une très bonne idée car celle-ci est à 40 m de profondeur. Il a donc fallu une pompe de relèvement qui a consommé beaucoup d'électricité pour remonter l'eau (énergie qu'on ne peut récupérer lors de la restitution de l'eau à la nappe). Il aurait mieux valu des sondes sèches géothermiques....

Les PAC disposent chacune d'une pompe « primaire » les reliant à l'échangeur en tête du forage.

Les différentes consommations d'électricité sont :

- Pompes à chaleur : 12,04 kWh/m<sup>2</sup><sub>Sutile</sub>
- Pompes primaires : 0,85 kWh/m<sup>2</sup><sub>Sutile</sub>
- Pompe du forage : 5,62 kWh/m<sup>2</sup><sub>Sutile</sub>

On voit le poids de la consommation de la pompe de forage qui aurait pu être évitée par une autre conception.

**Le COP moyen des PAC seules sur l'année est de 4,65.** Si on inclut, comme il se doit, les pompes primaires, le COP moyen annuel est de 4,33. Ceci n'inclut pas la consommation de la pompe de forage qui n'aurait pas dû exister avec une meilleure conception.

Le graphique suivant montre l'évolution du COP et de la température en sortie de condenseur au cours de l'année :

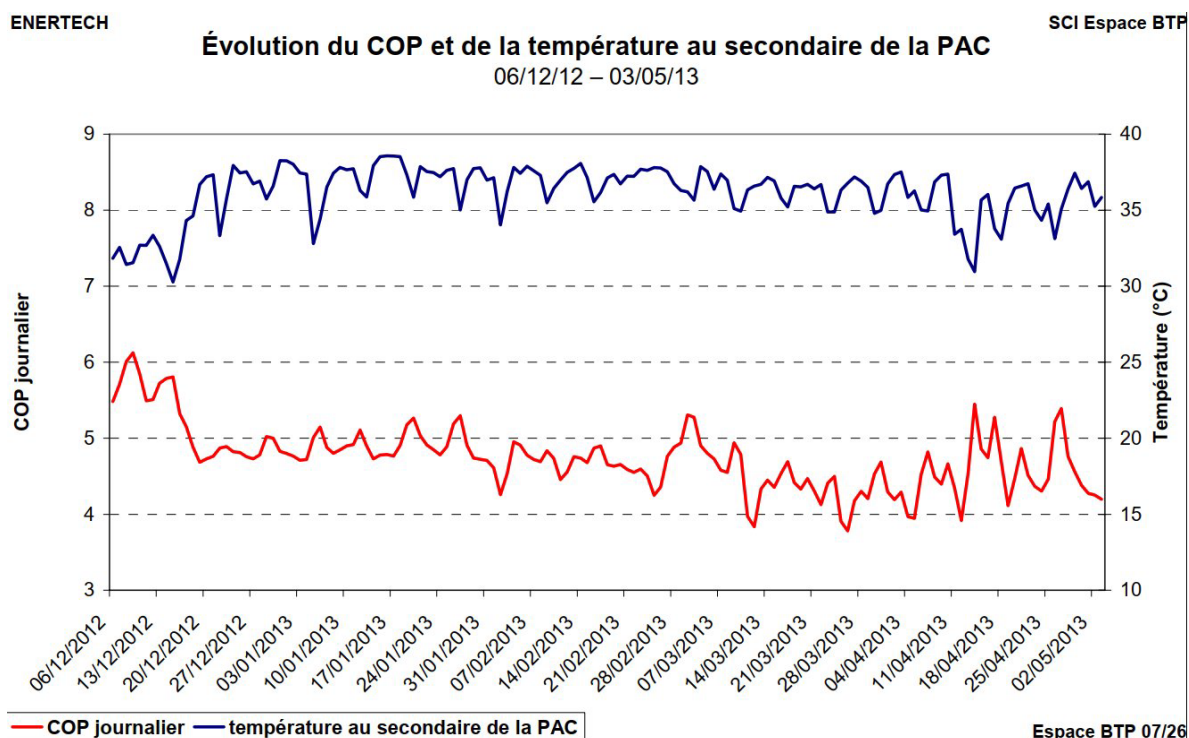


Figure 30 : Valence – FFB – Valeur du COP en fonction de la température de sortie condenseur

Il est intéressant d'observer les conséquences, le 17/12/2012, de la hausse de 5°C de la consigne de la température de stockage du ballon associé aux PAC. Il s'agissait d'un réglage de mise au point visant à réduire la fréquence de démarrage de la PAC.

Mais la conséquence la plus visible de cette hausse a été la chute immédiate du COP qui est passé d'environ 6 à 5.... Ceci illustre bien la sensibilité du COP à l'écart des températures des sources chaude et froide.

### **Les enseignements de cette opération**

1. La PAC peut être très utilement mise en œuvre dans une rénovation. Dans le cas présent, elle a permis de contribuer à transformer ce bâtiment ordinaire en bâtiment à énergie positive (tous usages confondus, vérification faite par campagne de mesure).
2. Cette opération est toutefois marquée par une erreur stratégique majeure : il ne faut jamais aller rechercher une nappe phréatique à plus de 10 m de profondeur car la consommation de la pompe chargée de remonter l'eau est beaucoup trop importante et dégrade la performance globale de la PAC. Dans le cas d'espère il aurait été préférable d'utiliser des sondes sèches, c'est-à-dire des forages dans lesquels sont placés des tubes parcourus par de l'eau. Dans ce cas, la consommation des circulateurs qui fonctionnent sur des boucles fermées, est très faible et le bilan de la PAC excellent.

## 9 – Conclusion générale

---

Cette étude a mis en évidence des aspects souvent ignorés de l'utilisation des pompes à chaleur, mais qu'il est important d'avoir à l'esprit à l'heure des grands choix stratégiques. Le rôle joué par les pompes à chaleur (PAC) dans la politique de rénovation sera très différent selon que son développement est correctement encadré ou non. L'absence de règles et d'obligations suffisamment claires et respectées sur les conditions d'installation des PAC est susceptible de conduire à des désordres graves manquant de surcroît les cibles de performance visées. A l'inverse, la compréhension de leurs contraintes de fonctionnement et de leur bonne utilisation, permet un fonctionnement optimal des PAC qui constituent alors, et sans appel, une des solutions majeures de décarbonation du bâtiment.

On retiendra en effet que :

- Il est impossible d'uniquement remplacer une chaudière par une PAC dans un bâtiment ancien (datant d'avant 1975), car le niveau de température nécessaire dans les émetteurs (radiateurs) de ce dernier est la plupart du temps beaucoup trop élevé au regard des températures que peut fournir une PAC (55°C). On retiendra qu'une PAC n'est pas une chaudière car plus il fait froid, plus la puissance qu'elle peut délivrer diminue (à l'inverse d'une chaudière).
- A défaut de rénover préalablement les bâtiments, la mise en œuvre d'une PAC suppose de disposer ou de mettre en place une installation de chauffage complémentaire. Cela peut-être :
  - Des convecteurs électriques qui compensent les insuffisances de la PAC quelle que soit la température extérieure. Ils ont l'avantage d'être bon marché et l'inconvénient de conduire à des niveaux de puissance appelée et de consommations électriques très élevés, difficilement maîtrisables techniquement et économiquement.
  - La PAC peut fonctionner en « relève » de la chaudière existante (PERCHE) : elle fonctionne quand il ne fait pas très froid, et la chaudière prend le relais le reste du temps. Solution chère et consommatrice d'énergie fossile. Seul intérêt : il n'y a aucun appel de puissance électrique quand il fait froid. Ce dispositif ne bénéficie plus d'aides de l'Etat. Globalement cette solution réduit au mieux de 37% les émissions de GES, ce qui signifie qu'il subsiste une importante consommation de fossile.
  - Une PAC hybride. Il s'agit d'une PAC et d'une chaudière placées sous le même capot. C'est une formule similaire à la précédente, mais un peu plus performante grâce au rendement plus élevé de la chaudière neuve. Elle réduit de 50 % les émissions de GES. On peut envisager cette solution dans l'urgence, mais il faut qu'elle soit accompagnée d'une stratégie de réduction des besoins à moyen terme.
  - Une PAC à haute température. C'est une PAC un peu haut de gamme, mais dont le marché décroît vite, capable d'atteindre des températures de 80°C, donc compatible avec les installations existantes. Mais le gain en émission de GES, en consommation et en puissance électriques n'est pas suffisant au regard des objectifs de neutralité carbone en 2050. Enfin, le coût est assez dissuasif (50 à 100% plus cher).
- Ces solutions, malgré l'existence assez fréquente d'un surdimensionnement initial de l'installation de chauffage en place (lorsqu'il y en a une), réduisent insuffisamment les émissions de GES, mais surtout elles génèrent de nouvelles consommations d'électricité et des puissances appelées très problématiques par leur importance. Elles ne constituent donc pas une bonne réponse pour la rénovation des bâtiments, en plus d'être très coûteuses.
- En revanche, si on rénove préalablement les bâtiments pour faire en sorte que la température de départ vers les émetteurs en place (que l'on conservera lors de la rénovation) ne soit plus 90°C mais 45°C (ce qui impose une division par 4 des besoins), les PAC fonctionnent alors dans des conditions exceptionnellement favorables conduisant à des émissions de GES, des consommations et des appels de puissance extrêmement faibles. A titre d'exemple, pour les logements de classes F et G chauffés par hydrocarbure, on observe après rénovation et mise en place d'une PAC, une division par 100 des émissions de GES et par 15 des consommations d'énergie primaire).

La comparaison des consommations d'électricité, d'énergie fossile et des émissions de gaz à effet de serre des différentes solutions envisagées est très intéressante :

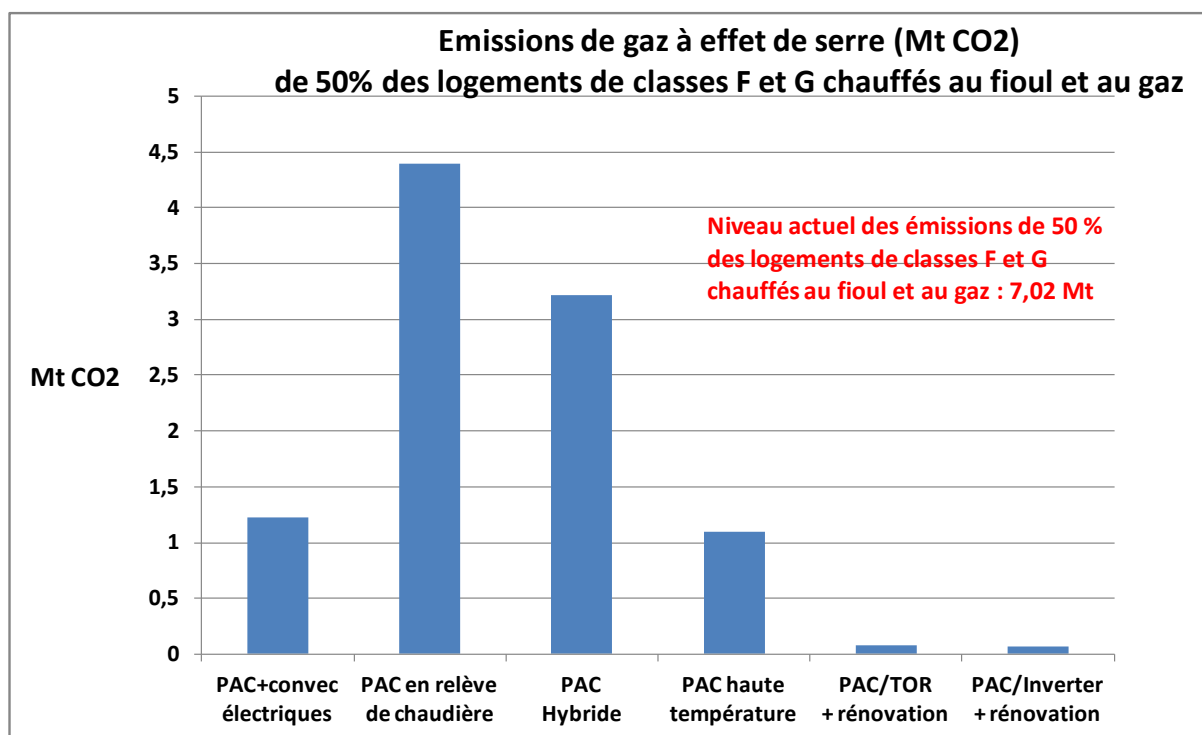


Figure 31 : Emissions de GES des différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur (parc à rénover)

Cible de l'évaluation : 50% des logements de classes F et G équipés de chaudières gaz et fioul

On observe que :

- Les solutions réduisant le moins les émissions de GES sont celles qui conservent une chaudière en appoint.
- La solution bon marché consistant à utiliser des convecteurs électriques conduit à une réduction significative des émissions (car même par températures très basses la PAC fonctionne, les convecteurs assurant le complément, ce qui n'est pas le cas avec les chaudières), mais la consommation d'électricité et le niveau de la puissance de pointe atteints (voir graphique suivant) sont les plus importants parmi toutes les solutions analysées et posent de sérieux problèmes.

Le graphique de la figure 32 compare les consommations d'énergie primaire, d'énergie fossile et d'électricité des différentes solutions :

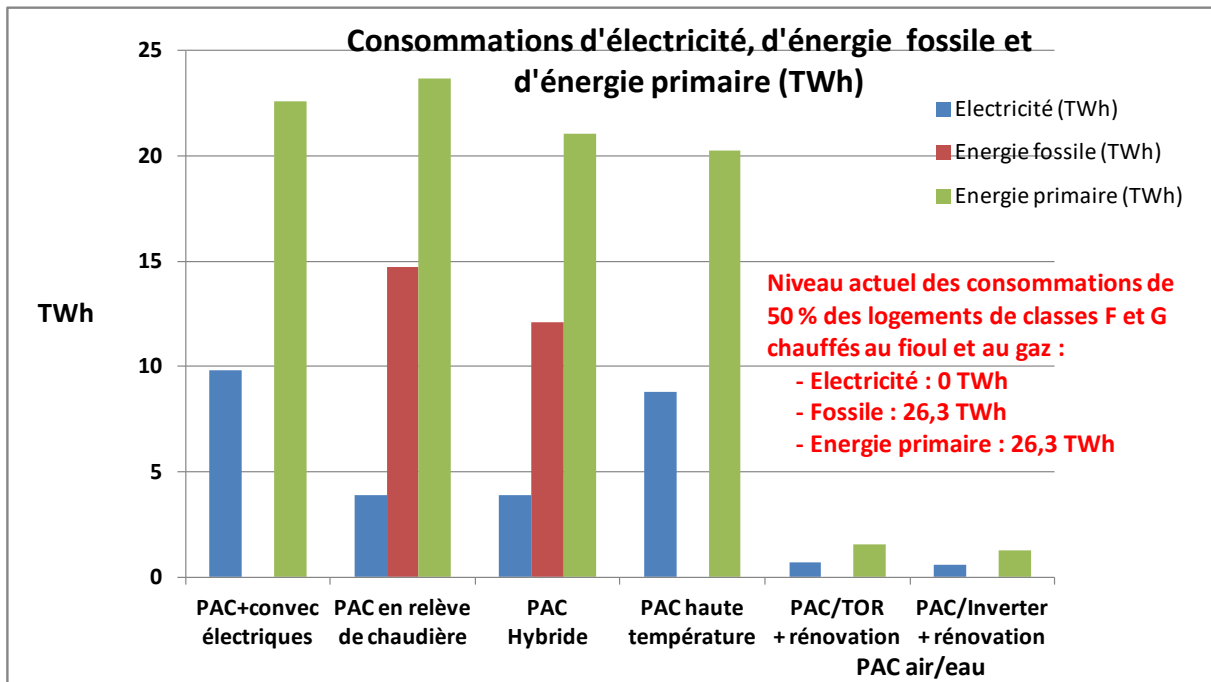


Figure 32 : consommation d'énergie primaire, d'énergie fossile et d'électricité des différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur (parc à rénover)

Cible de l'évaluation : 50% des logements de classes F et G équipés de chaudières gaz et fioul

La mise en œuvre de PAC associées à une rénovation performante conduit à des bilans exceptionnels que ce soit en consommation, en puissance ou en émissions. Ces performances sont encore meilleures avec les régulations de technologie Inverter plutôt que celles de type TOR.

Le graphique de la figure 33 présente la puissance électrique appelée par les différentes solutions lorsque la température extérieure est de -5°C.

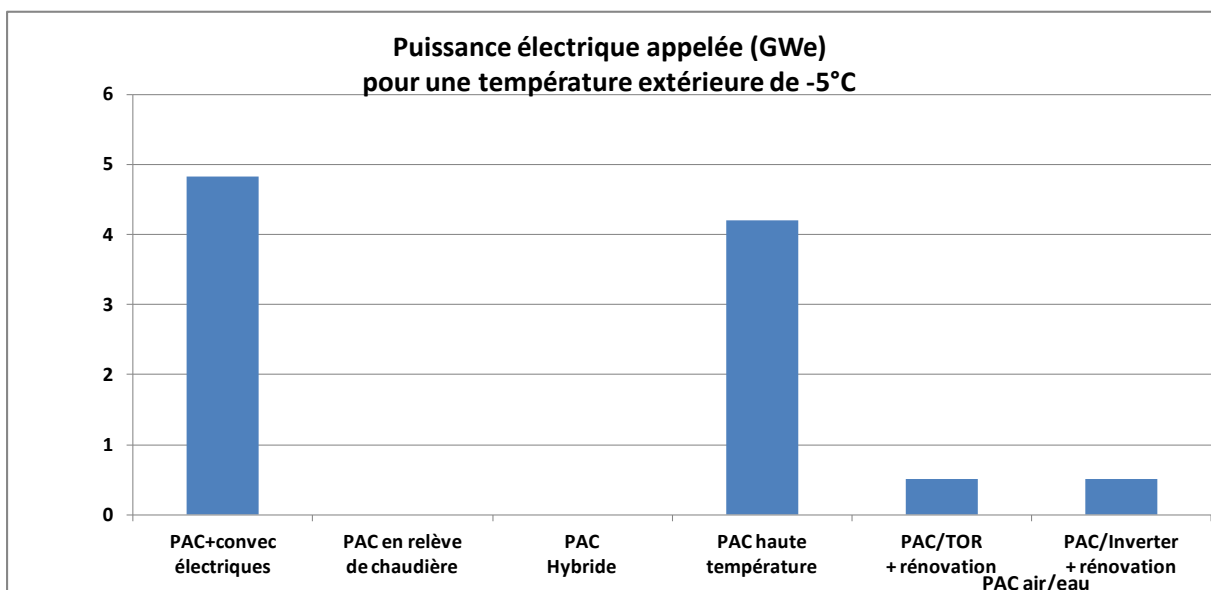


Fig. 33 : Puissance électrique appelée par les différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur (parc à rénover)

Cible de l'évaluation : 50% des logements de classes F et G équipés de chaudières gaz et fioul



On voit tout l'intérêt de faire précéder l'installation d'une PAC d'une rénovation complète et performante : les émissions d'origine sont divisées par 100, et la consommation par 15, la puissance électrique nécessaire est minimale.

Ce qui précède montre donc le grand intérêt de l'association d'une pompe à chaleur avec une rénovation préalable du bâti ambitieuse. En effet, seule cette rénovation, en abaissant de façon importante le niveau de température dans les émetteurs (en général des radiateurs), offre aux pompes à chaleur les conditions de fonctionnement leur permettant à la fois de se substituer à une chaudière existante sans le recours à une autre source de chaleur et d'atteindre des performances exceptionnelles avec des COP de 4, voire plus. Ce faisant on cumule la réduction d'un facteur 4 des besoins (rénovation) avec un second facteur proche de 1,5 dû à la suppression du rendement de génération d'une chaudière et un troisième facteur d'environ 4 sur la consommation d'énergie (dû à la pompe à chaleur), ce qui conduit à un facteur global de réduction considérable des consommations et des émissions de GES : ainsi la consommation d'électricité pour le chauffage n'est plus que de 5 kWh/m<sup>2</sup>/an et les émissions de l'ordre de 0,7 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an.

Ces niveaux de consommation et d'émission de GES sont tellement faibles qu'ils méritent vraiment réflexion :

- Le coût total pour les atteindre n'est pas très différent de celui d'une rénovation complète et performante classique avec substitution d'une chaudière neuve à la chaudière existante, puisque la pompe à chaleur remplace le changement obligatoire de chaudière et qu'elle réutilise elle aussi l'installation de chauffage existante. Donc la stratégie proposée dans ce qui précède permettrait, à coût sensiblement égal, de réduire drastiquement les consommations d'énergie finale mais surtout primaire, et de supprimer presque intégralement les émissions de GES. Cette solution réduirait aussi les coûts en supprimant l'abonnement gaz, ne nécessitant plus qu'un abonnement électrique. Par comparaison avec une chaudière gaz installée dans un logement rénové ne consommant plus que 47 kWh/m<sup>2</sup>/an (moyenne observée dans la campagne de mesure Perfinmind des ADEME), les émissions seraient de 0,7 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an pour la PAC et de 11,4 pour la chaudière.
- Si tous les logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul étaient rénovés de la sorte avec installation de PAC, la puissance appelée pour une température extérieure de -5°C induite par ces travaux ne serait que de 1,0 GWe, soit 60% de la puissance d'un seul réacteur EPR, ou la puissance des deux premiers parcs éoliens off-shore de St Nazaire et St Briec. Ceci correspond à une puissance de 4,5 W/m<sup>2</sup>. Développée à grande échelle, cette stratégie permettrait de dimensionner de façon optimale et moins coûteuse le parc de production d'électricité, notamment au moment de la pointe.
- Rénover le plus de logements possibles de cette façon permettrait d'atteindre beaucoup plus vite les objectifs de réduction d'émission de gaz à effet de serre, et accessoirement de consommation d'énergie, ce qui permettrait à la France de rattraper le retard qu'elle a accumulé depuis plusieurs années en matière de rénovation. Il faut aussi retenir le caractère définitif de l'économie induite par la rénovation complète et performante dont les effets subsisteront quel que soit le mode de chauffage qui pourrait être mis en place par la suite.

D'un point de vue opérationnel on retiendra que :

- La PAC eau/eau est beaucoup plus intéressante que la PAC air/eau. Quel que soit le mode de régulation, la puissance de pointe est réduite de 25%. Les consommations d'électricité et les émissions de GES sont également réduites de 18% lorsque les PAC sont régulées en Tout Ou Rien (TOR), et de 14% lorsqu'elles le sont avec la technologie Inverter.
- Le moyen souvent le plus simple et le plus performant d'alimenter l'évaporateur d'une PAC eau/eau consiste à effectuer un forage vertical (diamètre 110 mm) équipé de sondes (c'est de la géothermie). La longueur de ce forage est, si le bâtiment est rénové au niveau indiqué précédemment, d'environ 0,25 m/m<sup>2</sup>Shab. La longueur maximum est de 140 m. Pour les bâtiments collectifs plusieurs forages sont nécessaires (avec un maillage carré d'environ 8m de côté). Le coût d'un forage tout équipé est de l'ordre de 50 à 60 € HT/ml, mais de nouvelles technologies pourraient faire singulièrement baisser ce prix, surtout s'il y avait une massification des travaux.
- Dans les régions à climats froids, peu favorables aux PAC air/eau, la PAC eau/eau devra être privilégiée. Mais de toute façon, quel que soit le climat, elle améliore sensiblement les performances des PAC air/eau. La machine est en général placée à l'intérieur des locaux (en l'occurrence à la place de la chaudière existante) et présente en conséquence l'avantage d'être beaucoup moins bruyante pour le voisinage que le groupe extérieur des PAC air/eau.

- Le taux de charge à température de base des PAC (qui est le rapport, à la température extérieure de base, de la puissance d'une PAC à la puissance totale des besoins) est un élément important du dimensionnement des PAC. Il est souvent pris égal à 70%. Mais il joue un rôle essentiel car il peut orienter les performances des PAC vers la minimisation soit des consommations, soit de la puissance appelée. Si on considère la minimisation de celle-ci comme un élément prioritaire dans le contexte français, on retiendra que le taux de charge à température de base est optimal lorsqu'il vaut 87% pour les PAC régulées en TOR et de 100% pour les PAC régulées par technologie Inverter.
- Il faudra à l'avenir privilégier les PAC régulées par technologie Inverter et éviter la régulation tout ou rien, car le gain de performance est très sensible (+ 15 à 20%) et l'optimum du taux de charge (100%) correspond à un minimum à la fois de la puissance appelée et de la consommation d'électricité, quel que soit le type de PAC (air/eau ou eau/eau). Il faudrait envisager que les règles de calcul professionnelles incluent la valeur de ce taux de charge (en fonction de la nature de la régulation) vu son intérêt au regard du réseau électrique.
- Enfin, quelle que soit la solution adoptée, le surdimensionnement des émetteurs en place améliore un peu les performances globales (en réduisant au maximum de 12% la puissance et de 15 % la consommation si le surdimensionnement est de 50%), mais l'existence d'un surdébit ne change pratiquement rien.

# Annexe 1 : Détermination de la loi d'eau

En repartant des relations de puissance décrites au §4.2, on peut :

**Rapprocher les relations (1) et (3) et écrire que, pour toute valeur de  $T_{ext}$  :**

$$\Delta T^n = \frac{D}{A} (T_i - T_{ext}) \quad (5) \quad \text{on pose « c »} = \frac{D}{A} (T_i - T_{ext})$$

relation dans laquelle tous les termes du second membre sont connus.

En effet, pour la température extérieure de base (repérée par l'indice « b »), on connaît alors  $T_{e,b}$  et  $T_{s,b}$ ,  $\Delta T$  est connu ( $=\Delta T_b$ ), d'où on déduit que :

$$\frac{D}{A} = \Delta T_b^n / (T_i - T_{ext,b})$$

**Rapprocher les relations (1) et (2) permet d'écrire que, pour toute valeur de  $T_{ext}$  :**

$$(T_e - T_s) = D / (\rho * C_p * Q) * (T_i - T_{ext}) \quad (6)$$

on pose « d » =  $D / (\rho * C_p * Q) * (T_i - T_{ext})$  et « a » =  $D / (\rho * C_p * Q)$  d'où  $d = a * (T_i - T_{ext})$

Tous les termes du second membre sont connus. En effet, pour la température extérieure de base (indice « b » pour les conditions de base),  $T_{e,b}$  et  $T_{s,b}$  sont connus, d'où on déduit que :

$$D / (\rho * C_p * Q) = (T_{e,b} - T_{s,b}) / (T_i - T_{ext,b}) = a$$

La loi d'eau doit donc traduire la relation devant exister entre  $T_e$  et  $T_{ext}$  pour que les relations (5) et (6) soient satisfaites simultanément pour n'importe quelle valeur de  $T_{ext}$ .

On montre que, avec les définitions précédentes, l'équation de la loi d'eau s'écrit :

$T_e = T_i + d / (1 - \text{EXP}(- d / c^{(1/n)}))$	$\text{et } T_s = T_e - d$
---	----------------------------

Cas particulier où  $n=1$  (cas des planchers chauffants)

Dans ce cas,  $T_s$  (et  $T_e$ ) sont des fonctions linéaires de  $T_{ext}$ . La loi d'eau se représente par une droite.

Pour toutes les autres valeurs de « n » la loi d'eau n'est pas linéaire (voir graphique au §4.2). Mais ce caractère non linéaire n'apparaît vraiment que pour les valeurs de  $T_{ext}$  supérieures ou égales à 7°C, si bien que, pour simplifier le fonctionnement des régulateurs, on représente néanmoins cette loi par une fonction linéaire surdimensionnant les températures du réseau de chauffage pour les températures extérieures supérieures à 10°C, occasionnant en général de petites surchauffes dans les bâtiments à ce moment-là.

# Annexe 2 : Description sommaire du modèle de calcul

## 1 – Périmètre de l'étude

Le modèle se borne à étudier les logements de classes F et G chauffés au gaz et au fioul.

Le nombre de logements par classe énergétique et par énergie est issu d'une étude précédente<sup>7</sup> réalisée dans l'été 2021. Cette étude s'appuie sur l'enquête Phébus que nous avons mise à jour en tenant compte des constructions neuves effectuées entre 2013 et aujourd'hui. La présente note technique a réduit de 25 % le nombre de logements précédemment trouvés dans les classes F et G pour tenir compte du phénomène de rénovation consistant, malheureusement, uniquement à sortir les logements des classes F et G pour les placer en classe E.

Le nombre de logements par classe énergétique et par énergie a été présenté au §1 :

Classes	Elec	Gaz	Fioul	Bois	Autres	Total	S <sub>hab</sub> moyen [m <sup>2</sup> ]
F	1 169 847	829 471	547 456	716 538	50 774	3 314 086	80,45
G	1 374 701	757 841	733 305	769 790	25 954	3 661 590	79,00
Total F et G	2 544 548	1 587 312	1 280 761	1 486 328	76 728	6 975 677	
Ensemble du parc (A à G)	9 113 027	10 731 733	2 510 142	5 256 798	1 372 300	28 984 000	

Sources : O. Sidler – A partir de la campagne Phébus mise à jour – Surface : SDES/CGDD

Figure A2-1 : Nombre de logements par classe et par type d'énergie

Les surfaces habitables totales correspondantes sont les suivantes :

Classes	Gaz	Fioul
F	66,73	44,04
G	59,87	57,93
Total classes F et G :	126,60	101,97

En millions de m<sup>2</sup>

Figure A2-2 : surface habitable totale des logements par classe et par type d'énergie

<sup>7</sup> [https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/2021/06/210901\\_OS\\_Insuffisances\\_strategie\\_renovation\\_-\\_ANNEXES.pdf](https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/2021/06/210901_OS_Insuffisances_strategie_renovation_-_ANNEXES.pdf)

L'estimation des consommations de chauffage seul pour chaque énergie et pour chaque classe énergétique est la suivante :

Classes	Gaz	Fioul
F	15,29	7,66
G	15,51	14,09

En TWh<sub>eff</sub>/an

Figure A2-3 : consommation de chauffage seul des logements par classe et par type d'énergie<sup>8</sup>

## 2 – Modélisation des charges thermiques du parc

On manque de données relativement précises sur la structure et les caractéristiques thermiques des logements du parc, notamment des classes F et G. La modélisation du comportement thermique de ce parc reste donc assez aléatoire. Pour simplifier à l'extrême, nous avons supposé que ce parc se comportait comme un seul très gros bâtiment, ce qui suppose que les caractéristiques de tous les logements qui le composent se résument à leur valeur moyenne. Les paramètres initiaux de la modélisation ont été calés sur les consommations globales, pour chaque énergie, de ces différents sous-ensembles du parc. Ce faisant, on modélise en réalité le comportement d'un logement ordinaire et on généralise les résultats trouvés à l'ensemble de la surface de l'échantillon de logements étudiés. Cette technique permet de simplifier l'approche en supposant homogène les caractéristiques de toutes les installations du parc. Ainsi supposera-t-on que le régime de tous les émetteurs est le même, quitte à faire varier les valeurs de ce régime si on veut en voir son influence. Cette approche simplificatrice permet d'évaluer et d'encadrer les impacts énergétiques des stratégies adoptées.

En revanche, les performances des pompes à chaleur ont été modélisées de façon précise pour chaque valeur de la température extérieure, ce qui a permis de connaître la puissance électrique nécessaire, et le passage en consommation d'énergie a été effectué à partir de la fréquence des différentes températures extérieures pour la station de Trappes dans les Yvelines. Il n'était en effet guère possible de faire une modélisation sur l'ensemble des zones climatiques de la France, notamment faute d'un inventaire précis du nombre de logements par classe énergétique, par énergie et par région climatique.

### 2.1 Les conditions de l'équilibre thermique d'un parc de logements

Comme indiqué précédemment au § 4.2, trois relations traduisent les différents échanges énergétiques lorsqu'un local est chauffé. Ces relations vont s'appliquer au parc étudié en tant que « gros bâtiment » :

**1 – Déperditions du local vers l'extérieur** (incluant pertes par les parois et par renouvellement d'air) :

$$P = D * (T_i - T_{ext}) \quad (1)$$

où :

- P : puissance [W]
- D : déperditions [W/°C]
- T<sub>i</sub> : température intérieure [°C]
- T<sub>ext</sub> : température extérieure [°C]

<sup>8</sup> Ibid

## 2 – Puissance cédée à l'émetteur par le réseau de chauffage qui le traverse :

$$P = \rho * C_p * Q * (T_e - T_s) \quad (2)$$

où :

- P : puissance [W]
- $\rho$  : masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_p$  : chaleur spécifique de l'eau [J/kg°C]
- Q : débit d'eau dans l'émetteur [m<sup>3</sup>/s]
- $T_e$  : température d'entrée de l'eau dans l'émetteur [°C]
- $T_s$  : température de sortie de l'eau de l'émetteur [°C]

## 3 – Puissance thermique émise par l'émetteur de chaleur :

$$P = A * \Delta T^n \quad (3) \quad \text{avec } \Delta T = (T_e - T_s) / \ln((T_e - T_i)/(T_s - T_i))$$

où :

- P : puissance [W]
- $\Delta T$  : écart de température logarithmique moyen entre l'émetteur et le local [°C]
- A : caractéristique de l'émetteur égale au coefficient d'échange de chaleur à la surface de l'émetteur multiplié par la surface de celui-ci [W/°C]
- n : caractéristique de l'émetteur traduisant le caractère radiatif ou convectif de l'échange de chaleur. Pour les planchers chauffants n vaut 1. Il vaut environ 1,3 pour les radiateurs, et 1,6 pour les convecteurs (la valeur exacte de « n » pour chaque émetteur est fournie par les fabricants).

On peut aussi écrire que :

$$P/A = (D / A) * (T_i - T_{ext}) = (\rho * C_p * Q / A) * (T_e - T_s) = \Delta T^n$$

Si on se place dans les conditions de base de température extérieure (repérée par l'indice « b »), donc avec un régime de température connu pour un type choisi d'émetteurs (comme 90/70°C pour des radiateurs) et une température de consigne de la température intérieure, le terme  $\Delta T_b^n$  est parfaitement déterminé ce qui permet de déduire les caractéristiques spécifiques du parc :

$$(D / A) = \Delta T_b^n / (T_i - T_{ext\ b}) \quad (4)$$

$$(\rho * C_p * Q / A) = \Delta T_b^n / (T_e - T_s) \quad (5)$$

Mais A (qui caractérise les émetteurs), n'est pas connu. Pour le déterminer on part de l'expression de la puissance de chauffage nécessaire à l'échantillon de parc étudié :

$$P = D * (T_i - T_{ext})$$

$$\text{Mais } D = G_{moy} * h_{sp} * \Sigma S_{hab}$$

où :

- $G_{moy}$  : coefficient moyen de déperditions volumiques de l'échantillon de parc étudié [W/m<sup>3</sup>/°C]
- $h_{sp}$  : hauteur moyenne sous plafond de l'échantillon de parc étudié [m]
- $\Sigma S_{hab}$  : somme de l'ensemble des surfaces habitables de l'échantillon de parc étudié [m<sup>2</sup>]

ce qui permet finalement d'écrire pour la température de base :

$$P = G_{moy} * h_{sp} * \Sigma S_{hab} * (T_i - T_{ext\ b}) = A * \Delta T_b^n$$

D'où

$$A = [G_{moy} * h_{sp} * (T_i - T_{ext\ b}) / \Delta T_b^n] * \Sigma S_{hab} = k * \Sigma S_{hab}$$

Où

$$k = G_{\text{moy}} * h_{\text{sp}} * (T_i - T_{\text{ext b}}) / \Delta T_{\text{b}}^n \quad (6)$$

Tout est connu dans l'expression de « k » sauf  $G_{\text{moy}}$ . Si on peut déterminer « k » on peut connaître « A » pour un parc dont on connaît la surface habitable (c'est une façon simple de considérer finalement que lorsqu'on connaît la surface et les déperditions d'un parc, on peut estimer sans trop se tromper la valeur de l'échange de chaleur global des émetteurs de l'ensemble des logements, en supposant que ceux-ci ont tous le même régime de température, ce qui est une approximation très réaliste dans le parc existant).

Le calcul de  $G_{\text{moy}}$  se fait en partant de la consommation spécifique effective du parc concerné :

$$e_{\text{ch}} = E_{\text{ch}} / \Sigma S_{\text{hab}} = (G_{\text{moy}} * h_{\text{sp}} * N_{j_{T_i}} * 0,024 - A_g / \Sigma S_{\text{hab}}) * i / \eta$$

où :

- $e_{\text{ch}}$  : consommation annuelle spécifique de chauffage [kWh/m<sup>2</sup>]
- $E_{\text{ch}}$  : consommation annuelle de chauffage [kWh]
- $N_{j_{T_i}}$  : degrés.jours de base  $T_i$
- $A_g$  : apports gratuits annuels [kWh]
- $i$  : coefficient d'intermittence
- $\eta$  : rendement global de l'installation de chauffage

On connaît la consommation et la surface de chaque sous ensemble du parc (voir figure A2-1 à A2-3), donc la valeur de  $e_{\text{ch}}$  et on peut donc calculer  $G_{\text{moy}}$  :

$$G_{\text{moy}} = (e_{\text{ch}} * \eta / i + a_g) / (h_{\text{sp}} * N_{j_{T_i}} * 0,024)$$

Avec  $a_g = A_g / \Sigma S_{\text{hab}}$  [kWh/m<sup>2</sup>/an]

qui représente les apports gratuits surfaciques récupérés

Ayant déterminé  $G_{\text{moy}}$  on peut calculer k (qui est une constante) par la relation (6) et donc A.

Ceci permet désormais de pouvoir calculer, pour chaque valeur de la température extérieure, la puissance des besoins du parc par la relation (3).

Tout ce qui précède est évidemment valable aussi bien pour les bâtiments non rénovés que pour les bâtiments après rénovation.

Remarque : il est intéressant de noter que A, et donc « k », resteront constants si le parc est rénové, à condition que les émetteurs soient laissés en place (ce qu'il faut toujours essayer de faire dans une rénovation). En effet A est une caractéristique intrinsèque de l'ensemble des émetteurs en place. Si ces émetteurs ne sont pas changés, « A » aura toujours la même valeur, et donc « k » également. Si « k » est constant cela implique que si une rénovation a lieu, le rapport  $G_{\text{moy}} / \Delta T_{\text{b}}^n$  a la même valeur avant et après rénovation (si la consigne  $T_i$  sur la température intérieure n'est pas modifiée). C'est une conséquence directe, et intéressante, du maintien en place des émetteurs de chaleur au cours d'une rénovation.

## 2.2 Contribution des pompes à chaleur au chauffage des locaux non rénovés

### 2.2.1 Calcul de la température de bivalence

Lorsque les caractéristiques de la loi d'eau ne sont plus compatibles avec la température que peut fournir le condenseur de la PAC, il faut déterminer la température extérieure dite de « bivalence ». Il s'agit de la température en deçà de laquelle la température en sortie de condenseur sera insuffisante. Mais deux cas sont possibles :

- soit la PAC est associée à des émetteurs basse température compatibles avec la température que son condenseur peut délivrer. Dans ce cas, et pour des raisons économiques pas toujours convaincantes, la PAC n'assure que 70 à 90 % de la puissance maximale de base et la température en sortie de condenseur n'est alors que de 45°C par exemple. La température de bivalence est déterminée à partir des caractéristiques de puissance de la PAC (en fonction de  $T_{ext}$ ) et de la puissance des besoins, à l'intersection des deux courbes. Lorsque la température extérieure est inférieure à la température de bivalence, des résistances électriques intégrées à la PAC, placées en sortie du condenseur, portent la température d'eau jusqu'à 55°C si besoin.
- soit le régime de température des émetteurs est beaucoup plus élevé et incompatible avec celui de la PAC. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer d'une seconde source de chauffage qui devra obligatoirement être dissociée de la PAC. On peut imaginer des convecteurs électriques (car c'est un appoint peu cher à l'achat...), ou une chaudière déjà en place. Dans ce cas, au point de bivalence, la PAC doit dans la plupart des cas s'arrêter de fonctionner et la chaudière doit prendre le relais.

Dans ce cas le calcul de la température de bivalence s'effectue de manière simple de la façon suivante :

- 1 – La température maximum fournie par le condenseur est connue :  $T_{cmax}$  (par exemple 55°C)
- 2 – L'équation de la loi d'eau a été établie dans l'annexe 1 :

$$T_e = T_i + d / (1 - \text{EXP}(- d / c^{(1/n)})) \quad \text{et} \quad T_s = T_e - d$$

dans laquelle :

$$d = a * (T_i - T_{ext}) \quad \text{avec} \quad a = (T_{e,b} - T_{s,b}) / (T_i - T_{ext,b})$$
$$c = D/A * (T_i - T_{ext}) = \Delta T^n$$

et  $n$  = caractéristique constructeur de l'émetteur.

Il faut trouver la valeur de  $T_{ext}$  (notée  $T_{bival}$ ) telle que  $T_e = T_{cmax}$ . Le calcul se fait de manière itérative.

### 2.2.2 Puissance produite par la PAC lorsque $T_{ext} > T_{bival}$

Tant que la température extérieure est supérieure à la température de bivalence la PAC est seule en fonctionnement. La puissance thermique qu'elle délivre est donc connue et vaut :

$$P = D * (T_i - T_{ext})$$

La puissance électrique absorbée suppose en préalable le calcul du COP établi à partir des températures des sources chaude et froide et d'une fonction de régression dépendant de la température extérieure et permettant de passer du COP théorique au COP réel intégrant la consommation des auxiliaires. L'expression des COP réels s'écrit :

- PAC air/eau

$$\text{COP} = (-0,0006 * (T_{ext}+5)^2 + 0,001 * (T_{ext}+5) + 0,3792) * (273 + T_c) / (T_c - T_{ext})$$

où  $T_c$  est la température en sortie de condenseur.

- PAC eau/eau

$$\text{COP} = (-0,0002 * (T_{ext}+5)^2 - 0,0035 * (T_{ext}+5) + 0,3685) * (273 + T_c) / (T_c - T_{ext})$$



La puissance électrique absorbée au compresseur vaut simplement :

$$P_{el} = P / COP$$

### 2.2.3 Puissance produite par l'appoint et la PAC lorsque $T_{ext} < T_{bival}$

Lorsque la température extérieure est inférieure à la température de bivalence, il est nécessaire de disposer d'une seconde source de chauffage en parallèle de la PAC.

On peut imaginer des convecteurs électriques, mais la régulation de température avec la PAC maintenue en fonctionnement sera assez délicate. Dans ce cas la puissance que devra délivrer cet appoint sera égale à la différence entre la puissance des besoins du bâtiment et celle délivrée par la PAC (qui a été supposée constante, quelle que soit la température extérieure, ce qui n'est pas tout à fait exact pour une PAC air/eau).

Dans le cas d'une chaudière associée à une PAC prenant la relève, elle assure à elle seule la fourniture des besoins de chaleur.

## 2.3 Contribution des pompes à chaleur au chauffage des locaux rénovés

La mise en place d'une pompe à chaleur en substitution d'une chaudière dans un bâtiment ancien et très déperditif est impossible si le régime de température est toujours celui qui était en place au moment de la construction du bâtiment (il s'agit généralement d'un régime 90/70°C). Il est alors nécessaire de commencer préalablement à rénover le bâtiment de manière telle que le régime de température de départ n'excède pas 45° par température de base.

C'est sur ces hypothèses que la présente note a été élaborée.

### 2.3.1 Quel niveau de déperditions pour le bâtiment rénové ?

On a vu précédemment que si lors d'une rénovation on laissait en place tous les émetteurs (ce qui est très favorable), « k » est constant, ce qui permet d'écrire à partir de la relation (6) que :

$$G_{moy R} = G_{moy 0} * (T_{i0} - T_{ext b}) / \Delta T_{0 b}^n * \Delta T_{R b}^n / (T_{iR} - T_{ext b})$$

où les indices 0 et R signifient respectivement avant et après rénovation.

Si la température de consigne intérieure n'est pas modifiée à l'occasion de cette rénovation, la relation se simplifie et s'écrit :

$$G_{moy R} = G_{moy 0} / \Delta T_{0 b}^n * \Delta T_{R b}^n$$

Pour faire ce calcul il suffit de fixer le nouveau régime de température souhaité pour le fonctionnement de la pompe à chaleur (par exemple 45/35°C).

Avec la définition de ce nouveau régime de température entrée/sortie et la nouvelle valeur de  $G_{moyR}$  l'ensemble du calcul peut être repris de la même manière que précédemment.

### 2.3.2 Procédure de calcul pour chaque valeur de la température extérieure

Toutes les grandeurs sont rapportées à A, comme indiqué au §2-1. Le calcul des valeurs réelles s'effectuera à la fin pour chaque énergie et chaque solution à partir de k et de la somme des surfaces concernées. L'ensemble des calculs qui suit est conduit pour chaque valeur de la température extérieure pour les pompes à chaleur air/eau et eau/eau, associées dans chaque cas soit à une régulation TOR, soit à une régulation de type Inverter.

Les étapes du calcul sont les suivantes :

### 1 – Calcul des besoins thermiques sans apports gratuits.

$$P/A = (D / A) * (T_i - T_{ext}) \text{ avec } D/A \text{ défini par la relation (4) : } (D / A) = \Delta T_{b}^n / (T_i - T_{ext,b})$$

### 2 – Calcul des besoins déduction faite des apports gratuits :

$$P_r/A = P/A - A_g/A \quad \text{avec } A_g = a_g * \Sigma S_{hab} \quad \text{et } A = k * \Sigma S_{hab}$$

$$\text{D'où } P_r/A = P/A - a_g / k$$

où  $a_g$  = apports gratuits surfaciques récupérés [kWh/m<sup>2</sup>/an]

### 3 – Calcul de la température de départ et de retour d'eau à partir des équations de la loi d'eau – Voir détail dans Annexe 1

### 4 – Température de sortie du condenseur

Ce calcul dépend du type de régulation de la pompe à chaleur :

#### ○ 4.1 Cas d'une PAC régulée en TOR

la régulation encore la plus fréquente est la **régulation par tout ou rien (TOR)**. Le compresseur fonctionne à puissance constante et délivre donc des trains de chaleur conduisant à ce que la température en sortie de condenseur soit supérieure aux besoins réels. Il s'ensuit une dégradation du rendement, mais aussi une usure prématurée du compresseur à cause des nombreux démarrages.

Le calcul se fait d'abord, à des fins d'initialisation, pour la température extérieure de base :

$$T_{c,b} = T_{s,b} + (T_{e,b} - T_{s,b}) * t$$

où

-  $T_c$  : température de sortie condenseur

-  $t$  : taux de couverture des besoins de la PAC (en puissance) pour la température extérieure de base

Puis pour les températures supérieures à  $T_{ext,b}$  :

$$T_{c,Text} = T_{s,Text} + (T_{c,Text-1} - T_{s,Text-1}) * COP_{Text} / COP_{Text-1}$$

La notation  $T_{c,Text}$  désigne la température de sortie du condenseur pour la température extérieure  $Text$ , et la notation  $T_{c,Text-1}$  désigne ce même paramètre pour une température extérieure inférieure de 1°C à  $T_{ext}$ .

#### ○ 4.2 Cas d'une PAC régulée par Inverter

La **régulation par système Inverter** est une régulation progressive par variation de la vitesse du compresseur qui permet une adaptation parfaite de la puissance produite aux besoins réels. Dans ce cas, la température de sortie compresseur est exactement égale à la température de départ exigée par la loi d'eau pour chaque valeur de la température extérieure.

Dans ce cas on a simplement :

$$T_{c,Text} = T_{d,Text}$$

où  $T_{e,Text}$  est la température d'entrée d'eau dans les émetteurs pour la température extérieure  $T_{ext}$ .

## 5 – Calcul du COP

La formulation du COP s'effectue en fonction de la température extérieure et de la température de sortie du condenseur. La formule qui suit a été établie à partir des caractéristiques de PAC fournies par les fabricants. Les courbes de COP ont fait l'objet de régressions fournissant une équation :

$$\text{COP} = 6,01 - 0,076 * T_c + (0,1793 - 0,00268 * T_c) * T_{\text{ext}} + (0,00135 - 2,6 * 10^{-5} * T_c) * T_{\text{ext}}^2$$

On remarque que le COP s'exprime en fonction de  $T_c$  qui s'exprime lui-même en fonction du COP. Un calcul par itérations successives est donc nécessaire.

## 6 – Calcul de la puissance électrique absorbée par le compresseur pour une valeur de $T_{\text{ext}}$

$$P_{\text{comp}} / A = k_{\text{comp}} * (0,4 + 0,064 * T_c)$$

où  $k_{\text{comp}}$  est un paramètre déterminé en observant que pour la température de base, on doit vérifier que :

$$P_{\text{comp}} / A = (P_r / A) * t / \text{COP}_{\text{Text b}} = k_{\text{comp}} * (0,4 + 0,064 * T_{c,b})$$

d'où on déduit que

$$k_{\text{comp}} = (P_r / A) * t / \text{COP}_{\text{Text b}} / (0,4 + 0,064 * T_{c,b})$$

## 7 – Calcul de la puissance thermique délivrée par le condenseur pour une valeur de $T_{\text{ext}}$ :

$$P_{\text{cond}} / A = P_{\text{comp}} / A * \text{COP}$$

## 8 – Taux de charge de la PAC

$$t_{\text{ch}} = (P_r / A) / (P_{\text{cond}} / A)$$

## 9 – Puissance complémentaire d'appoint interne à la PAC

Il s'agit de la puissance des résistances électriques internes à la PAC et qui permettent d'atteindre, pour les températures extérieures inférieures à la température de bivalence, la température nécessaire (par exemple 45°C) en sortie de condenseur :

$$P_{\text{app}} / A = (P_r / A) - (P_{\text{cond}} / A)$$

## 10 – Passage aux valeurs réelles de puissance

Il est ensuite nécessaire de passer des valeurs de puissances référées au paramètre « A » aux valeurs réelles des parcs étudiés caractérisés par leur surface habitable (et « k » - voir relation (6)) :

$$P_{\text{parc j}} = (P_j / A) * k * \Sigma S_{\text{hab}}$$

$\Sigma S_{\text{hab}}$  ne concernant que la partie du parc étudié (par exemple 10% du parc de logements chauffés au gaz).

Pour chaque valeur de la température extérieure, pour chaque type de pompe à chaleur et pour chaque mode de régulation on calcul donc, sur l'ensemble du parc de logements étudiés :

la puissance thermique produite par les condenseurs :

$$P_{thc} = P_{cond} / A * t_{ch} * k * \Sigma S_{hab} \quad [W]$$

la puissance de l'appoint électrique

$$P_{app} = P_{app} / A * k * \Sigma S_{hab} \quad [W]$$

la puissance électrique absorbée par les compresseurs :

$$P_{comp} = P_{comp} / A * t_{ch} * k * \Sigma S_{hab} \quad [W]$$

Le passage des puissances aux énergies s'effectue à partir des données météo de la station de Trappes (Yvelines) et du nombre d'heures pendant lequel chaque valeur de la température extérieure est atteinte durant la saison de chauffe. On tient également compte du coefficient d'intermittence du chauffage pendant cette saison (pris ici égal à 0,9) :

$$E_j = P_j * i * N_{Text}$$

où :

- $E_j$  = Energie correspondant à la puissance  $P_j$
- $i$  : coefficient d'intermittence
- $N_{Text}$  = nombre annuel d'heures pendant lesquelles la température extérieure vaut  $T_{ext}$

Le passage aux valeurs nationales s'effectue en multipliant les valeurs obtenues à Trappes par le coefficient 0,885 qui traduit le rapport de la rigueur climatique moyenne métropolitaine à la rigueur climatique de la station de Trappes.