

Potentiel énergétique d'une source froide
alimentant une pompe à chaleur

1. Introduction

L'évaluation de l'intérêt du couplage d'une pompe à chaleur (PAC) air-air avec des sources d'air tempérées intégrées au bâtiment consiste à comparer les performances et les consommations d'une PAC installée de façon conventionnelle à celle d'une PAC couplée à des sources dont la température est supérieure à la source conventionnelle : l'air extérieur. Comment évaluer l'intérêt d'utiliser un air plus doux que l'air extérieur comme source froide d'une PAC ?

Dans un premier temps il semble intéressant de comprendre le comportement d'une PAC dans son environnement. À l'aide du modèle de PAC de Jin et Spitler, sélectionné au chapitre 2, intégré au modèle thermique dynamique d'enveloppe du bâtiment *Pléiades + Comfie*, le comportement d'une PAC installée de façon conventionnelle est analysé. Les conditions de fonctionnement d'une PAC installée sur site diffèrent grandement de celles imposées lors de tests standardisés de la norme NF EN 14511. Les résultats issus de ces tests permettent une comparaison des produits entre eux dans les conditions de fonctionnement données, mais ne reflètent aucunement le comportement du système une fois en place dans son environnement. Le modèle global enveloppe/système dont on dispose désormais permet d'évaluer le comportement d'une PAC intégrée au bâtiment, et évaluer l'impact de différents paramètres sur les performances et consommations saisonnières d'une PAC : régions climatiques, caractéristiques constructives de l'enveloppe du bâtiment, scénarios d'utilisation, dimensionnement et type de régulation.

Dans un second temps, avant d'imaginer des solutions permettant d'augmenter la température de la source froide d'une PAC air-air, essayons de quantifier l'impact d'un écart constant de température par rapport à la source froide conventionnelle (la température extérieure) sur les performances de la PAC. Il s'agit alors d'évaluer les gains maximums d'une source froide « idéale » sur les performances d'une PAC air-air et d'identifier un potentiel maximal de référence, qui permettra de comparer les différentes sources d'air tempérées entre elles.

Enfin, une analyse des paramètres caractéristiques d'une source froide (débit, température moyenne, etc.) permet de proposer une définition du « potentiel énergétique » d'une source

2. Comportement d'une PAC installée de façon conventionnelle

On l'a vu au chapitre 2, le comportement d'une PAC dépend de trois principaux paramètres :

- des conditions extérieures ;
- des besoins de chauffage des locaux (caractéristique constructive de l'enveloppe, apports internes, apports solaires) ;
- du type de PAC (dimensionnement, technologie de régulation de fonctionnement (marche-arrêt, inverter ou non) et de dégivrage de l'échangeur extérieur).

Prenons l'exemple d'une PAC air-air de 8 kW de puissance calorifique nominale installée dans une maison de 135 m², située en région parisienne au climat de Trappes. Les simulations couvrent la période hivernale du 15 octobre au 20 mai soit un total de 5208 heures. Sur cette période de simulation la PAC est en marche 70% du temps, soit 3669 heures. Le reste du temps elle se trouve en veille.

La performance saisonnière d'une PAC avec comme source froide l'air extérieur est extrêmement dépendante des conditions climatiques. Plus la température de la source froide s'abaisse et s'éloigne de la température de la source chaude, moins la PAC est performante.

Afin de mieux se représenter les plages de fonctionnement sur lesquelles une PAC installée en région parisienne fonctionne, il est possible d'observer dans un premier temps l'occurrence des températures de l'ambiance extérieure.

On définit la fréquence d'occurrence d'une température comme le pourcentage de temps d'une période où la température extérieure est égale à une température donnée.

$$OC_{T_a} = \frac{\sum_{i=0}^N h(T_i)}{\sum_{i=0}^N f(t_i)} \quad \text{où} \quad \begin{cases} h(T_i) = 1 \text{ si } T_i = T_a \\ h(T_i) = 0 \text{ si } T_i \neq T_a \end{cases} \quad (103)$$

La fonction f définit la période de référence sur laquelle est fait le calcul de la fréquence d'occurrence où N est le nombre d'heure de la période. Pour une année $N=8760$ heures. Si la période de simulation est définie comme la période de référence, la fonction f est définie par les conditions (103). Si la période de référence est le temps de fonctionnement de la PAC, la fonction f est défini par les conditions (104).

$$\left\{ f(t_i)=1 \forall t_i \right. \quad (104)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t_i)=1 \text{ si la PAC est allumée} \\ f(t_i)=0 \text{ si la PAC est éteinte} \end{array} \right. \quad (105)$$

La figure 89 présente les fréquences d'occurrence de l'ensemble des températures de l'air extérieur ramenées à la période de simulation (5208 heures) ou à la période de fonctionnement de la PAC (3669 heures). Le choix de la période de référence modifie l'allure de la courbe des fréquences d'occurrence et la décale vers les températures les plus faibles. Les températures les plus hautes de la période de simulation correspondent aux moments où les besoins de chauffage sont les plus bas et où la PAC n'est pas forcément en marche, les conditions extérieures, l'ensoleillement et les apports internes étant suffisants pour assurer le confort thermique de la zone chauffée.

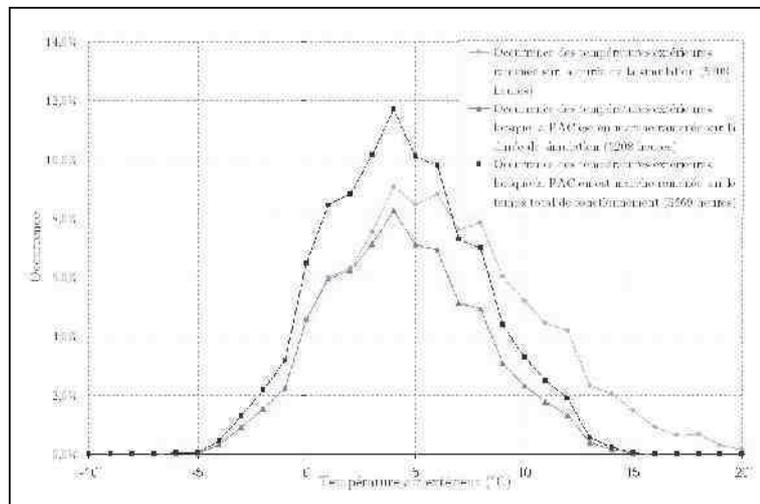


Figure 89: Occurrence des températures de l'air extérieur ramenée à différente période de référence.

L'influence des températures extérieures sur les performances de la PAC n'ayant de sens que lorsque la PAC est en fonctionnement et que les besoins de chauffage sont différents de zéro, la courbe d'occurrence noire illustre le mieux la fréquence d'occurrence des températures de l'air extérieur. Le sens de la récupération de chaleur dans des sources d'air tempérées est de décaler le plus possible cette courbe d'occurrence vers les températures plus douces.

Il est alors possible, comme illustré à la figure 90, de découper les occurrences par plages de températures correspondant à des comportements types d'une PAC. Cette figure, valable au climat de Trappes, montre que seulement 17% du temps de fonctionnement de la PAC, la température extérieure est supérieure à 7°C : plage de températures où l'apparition de givre au niveau de l'échangeur extérieur est peu probable.

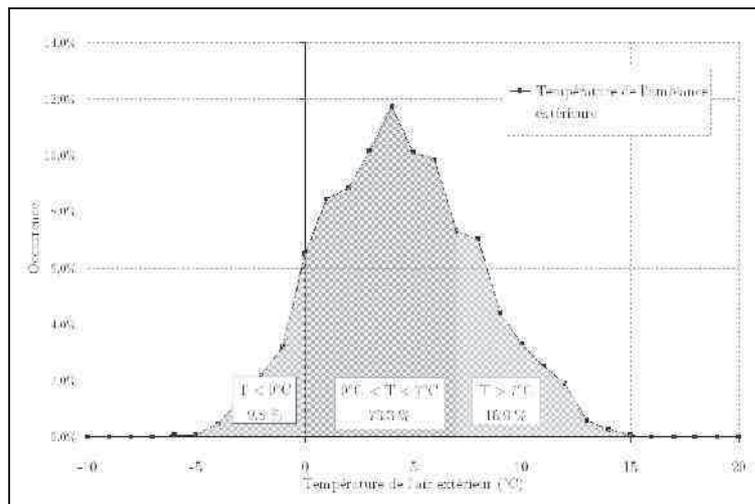


Figure 90: Découpage des occurrences sur des plages de températures type pour le climat de Trappes.

Les travaux d'Argaud T. [ARGA2001] sur l'amélioration des cycles de givrage/dégivrage précisent que « les PAC sur air extérieur ont l'inconvénient d'être soumises au phénomène de givrage dès que la température extérieure est inférieure à 7°C ». Il semble intéressant d'observer qu'au climat de Trappes, 73% du temps du fonctionnement de la PAC se situe à des températures comprises entre 0°C et 7°C et 83% du temps à des températures strictement inférieures à 7°C. La PAC est alors soumise à de très probables cycles de dégivrage de l'échangeur extérieur, interrompant sa production de chaleur, et nécessitant un apport d'énergie pour faire fondre le givre. Le contrôle et la régulation de ces cycles a plus ou moins d'impacts sur la dégradation de ses performances.

Maintenant que l'on connaît le pourcentage du temps de fonctionnement pour lequel la PAC fonctionne sur ces différentes plages de températures il est intéressant d'observer quelles sont les performances moyennes de la PAC pour chacune de ces températures extérieures. La figure 91 présente la moyenne des puissances délivrées et consommées à pleine charge par la PAC pour chacune des températures extérieures.

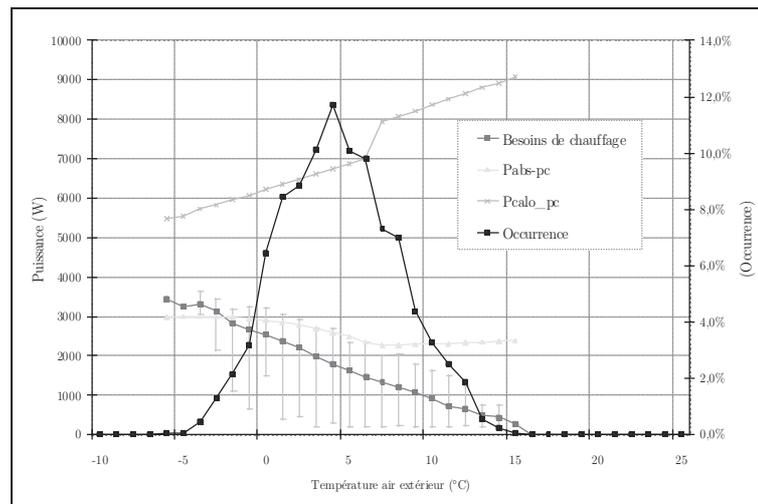


Figure 91: Moyenne de la puissance calorifique à pleine charge (P_{calo_pc}), de la puissance absorbée à pleine charge (P_{abs_pc}) et des besoins de chauffage pour chaque température extérieure.

Les PAC de petites puissances se voient pour la plupart équipées de la technologie *inverter*, permettant l'adaptation de la puissance calorifique délivrée aux besoins de chauffage des locaux. Lorsque la puissance calorifique à pleine charge est supérieure aux besoins de chauffage, la PAC adapte sa puissance. La figure 91 présente la puissance calorifique à pleine charge, la moyenne ainsi que les minima et maxima des besoins de chauffage à satisfaire. Dans cet exemple, la PAC fonctionne uniquement à charge partielle : les besoins de chauffage ne dépassant jamais la puissance calorifique à pleine charge délivrée par la PAC.

Le modèle de PAC implémenté dans Pléiades + Comfie permet d'évaluer la puissance absorbée par la PAC une fois la régulation de puissance faite pour atteindre les besoins de chauffage. La figure 92 présente la puissance absorbée par la PAC (compresseur + auxiliaires) dans son fonctionnement à charge partielle. Le modèle suppose une régulation parfaite de la puissance calorifique délivrée par la PAC, qui correspond au calcul horaire des besoins de chauffage.

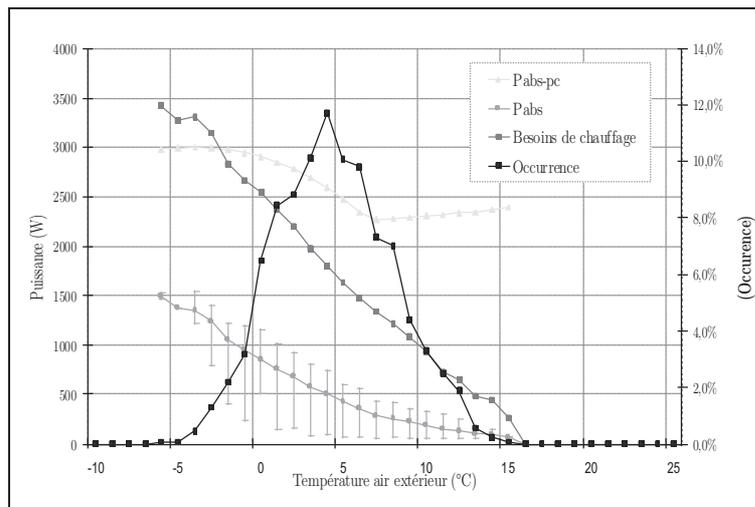


Figure 92: Moyenne de la puissance absorbée par la PAC de 8 kW au climat de Trappes

L'évolution de la consommation d'énergie de la PAC décroît avec les besoins de chauffage : plus les besoins sont faibles moins la PAC consomme. La consommation de la PAC décroît avec les besoins, mais comment évolue le coefficient de performance (COP) ?

La figure 93 présente la moyenne des COP en fonction de la température extérieure ainsi que les minima et maxima associés. Le COP s'améliore avec l'augmentation de la température extérieure. Au-delà de 7°C, plage de températures de non-givrage de l'échangeur extérieur, la PAC ne nécessite plus de cycle de dégivrage, qui induit des COP bien supérieurs.

Dans cet exemple le COP nominal⁴⁹ annoncé par le constructeur est de 3,46. Connaissant la fréquence d'occurrence des températures de l'air extérieur, on estime ainsi que la PAC fonctionne avec un COP inférieur au COP nominal plus de la moitié de son temps de fonctionnement, environ 53%. Le couplage de la source froide avec des sources d'air tempérées en vue d'augmenter le temps de fonctionnement où la PAC dispose d'un COP supérieur au COP nominal va dans le sens des économies d'énergie. On constate également que pour cet exemple la PAC fonctionne avec un COP supérieur à 4 environ 27 % de son temps de fonctionnement.

49 7°C source froide / 20°C source chaude

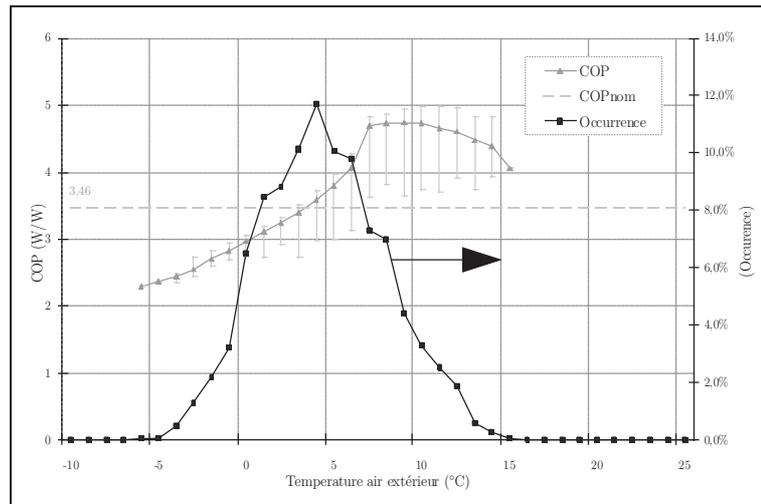


Figure 93: Moyenne des COP en fonction de la température extérieure

À partir des figures 92 et 93, on constate qu'une possibilité d'amélioration des performances de la PAC serait de faire correspondre la fréquence d'occurrence des températures avec les plages de températures où les performances de la PAC sont les meilleures, c'est-à-dire à des températures supérieures au seuil de givrage de l'échangeur extérieur ($\sim 7^\circ\text{C}$).

3. Source d'air tempérée idéale

Avant d'imaginer des concepts et couplage permettant une augmentation des températures de la source froide d'une PAC air-air et une amélioration de l'occurrence des températures dans le but d'améliorer sa performance, les paragraphes qui suivent apportent quelques éléments de réponses aux questions suivantes :

- Toutes choses égales par ailleurs, quel impact une augmentation d'un degré Celsius de la température de la source froide d'une PAC a-t-elle sur ses performances saisonnières ? Qu'en est-il d'une augmentation de deux, trois, quatre... dix degrés Celsius ?
- Peut-on quantifier l'intérêt énergétique de l'augmentation de quelques degrés Celsius de la source froide d'une PAC ?
- L'augmentation de n degrés Celsius à une température de -5°C a-t-elle le même impact que l'augmentation de n degrés Celsius à une température de $+5^\circ\text{C}$?
- Existe-t-il une plage de température préférentielle vers laquelle il faudrait faire tendre la température de source froide d'une PAC sur l'air pour aboutir à un fonctionnement optimal ?

3.1. Définition

Ce paragraphe propose une définition de la notion de *source froide idéale* d'une PAC.

Au premier abord, plusieurs définitions sembleraient correspondre à cette notion. La *source froide idéale* pourrait se définir comme:

- (a) une source dont l'écart de température ΔT avec la source conventionnelle (dans notre cas l'air extérieur) est constant tout au long de la période fonctionnement de la PAC (figure 95);
- (b) une source capable d'adapter sa température à la température d'air à l'entrée de l'évaporateur nécessaire à la PAC pour délivrer une puissance calorifique à pleine charge égale aux besoins de chauffage (figure 94).

La définition (a) sera utilisée par la suite pour évaluer l'impact de l'augmentation de la température de la source froide sur les performances et la consommation.

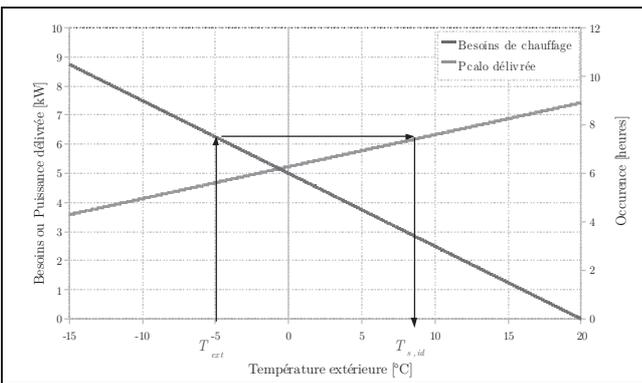


Figure 94: Température de source idéale $T_{s,id}$ pour une température extérieure T_{ext} de 5°C

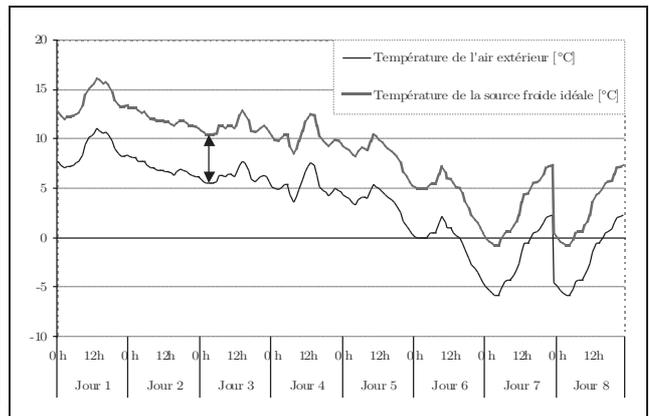


Figure 95: Source froide idéale avec un écart constant avec la source froide conventionnelle

3.2. Potentiel d'une source froide

On définit pour la suite du rapport le potentiel d'une source comme l'économie d'énergie réalisable par rapport à une installation conventionnelle, utilisant l'air extérieur comme source froide.

$$Pot_{source} = P_{abs,com} - P_{abs,source} - P_{aux,sup} \quad (106)$$

Pot_{source} Potentiel de la source froide [W]

$P_{abs,com}$ Puissance absorbée par l'installation conventionnelle [W]

$P_{abs,source}$ Puissance absorbée par l'installation une source d'air tempérée [W]

$P_{aux, sup}$

Puissance absorbée par d'éventuels ventilateurs supplémentaires

[W]

3.3. Impact énergétique d'une hausse de la température de la source froide d'une PAC air-air

Avant d'imaginer des solutions permettant d'augmenter la température de la source froide d'une PAC air-air, essayons de quantifier l'impact de la hausse de sa température sur les performances de la PAC.

La différence de température entre la source froide et la source chaude d'une PAC est certes l'une des principaux facteurs influençant ses performances, mais son dimensionnement, son intégration dans le bâtiment, et son système de contrôle et de régulation le sont également.

Les constructeurs annoncent les performances de leur machine selon des essais définis par la norme NF EN 14511. Cette norme fixe la température des sources pour lesquelles les tests doivent être effectués, ce qui permet d'évaluer les performances à pleine charge (à plein régime). Ils annoncent alors les performances « nominales » de leur machine. Ces chiffres sont certes utiles pour la comparaison de machines équivalentes entre elles, mais n'est pas un critère suffisant, pour pouvoir estimer les consommations ou les performances réelles que pourra avoir une PAC une fois installée dans son environnement. En effet, les conditions nominales seront rencontrées à peine 5% du temps de fonctionnement de la machine. Si l'on reprend l'exemple précédemment cité (PAC 8KW chaud dans une maison de 135 m² au climat de Trappes), les conditions ne sont même jamais rencontrées.

A l'aide du modèle de PAC implémenté dans le modèle thermique du bâtiment Comfie-Pléiades nous avons cherché à quantifier l'influence d'un degré supplémentaire à la source froide sur les consommations et les performances de la PAC.

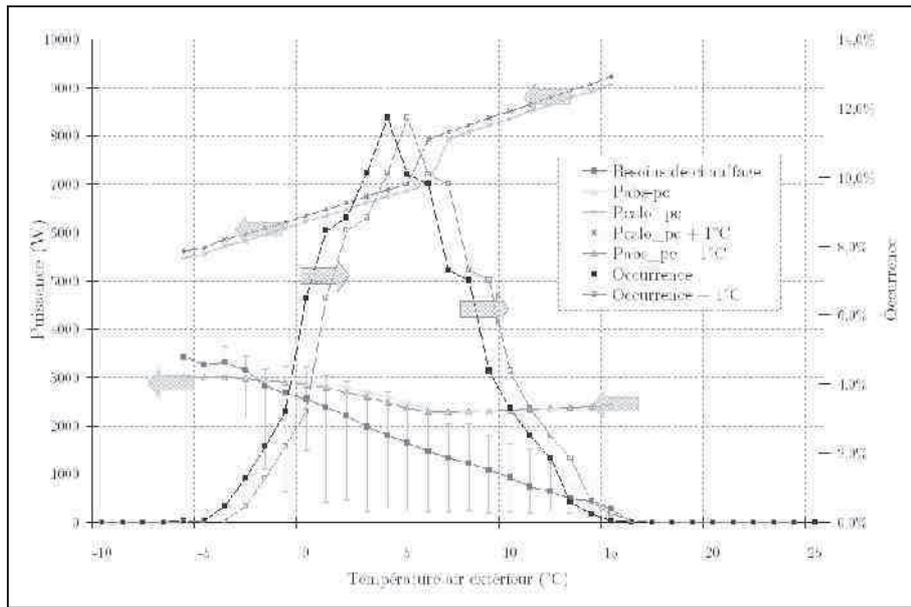


Figure 96: Augmentation de 1°C la source froide

La figure 96 présente la tendance d'évolution de la puissance calorifique à pleine charge, la puissance absorbée ainsi que l'occurrence des températures. L'augmentation de la température de la source froide étant complètement indépendante des besoins de chauffage de la maison, la courbe des besoins de chauffage reste inchangée.

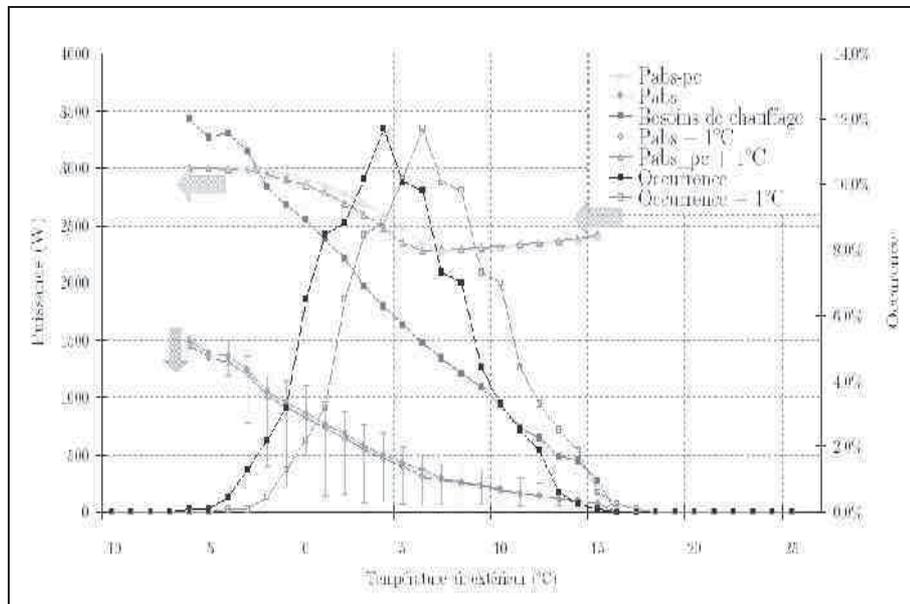


Figure 97: Impact sur la consommation électrique de la PAC

La Figure 97 illustre la tendance de la moyenne des puissances absorbées pour chacune des températures extérieures. Globalement, avec une température de source froide supérieure de 1°C, la PAC consomme moins. Quel gain sur la consommation observe-t-on lors de l'élévation de 1°C de la source froide ?

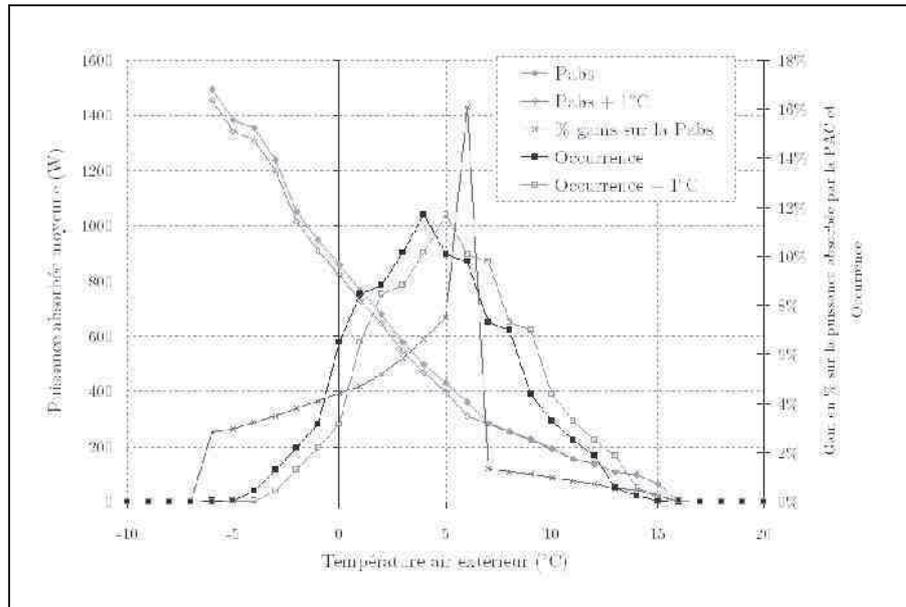


Figure 98: Gains sur la puissance absorbée par la PAC dus à l'élévation de 1°C de la source froide

Il n'y a pas de réponse unique. Le gain sur la consommation dépend de la température extérieure. Ainsi le gain observé à -6°C est de l'ordre de 3% et le gain observé à $+6^{\circ}\text{C}$ est de 14%. La figure 98 illustre ces propos. Ce gain s'explique par un changement de plage de fonctionnement. En effet, une température extérieure de $+6^{\circ}\text{C}$, en fonctionnement normal correspond à la plage de fonctionnement où le givre commence à apparaître. Le fait d'augmenter la température de la source froide d' 1°C , fait passer la PAC d'un régime de fonctionnement avec givrage à un régime de fonctionnement hors-givrage avec des performances bien meilleures.

L'augmentation de 1°C de la température de la source froide permet d'économiser de l'énergie, puisque la PAC fonctionne à des températures plus clémentes. Il en va de même sur l'évolution du coefficient de performance (COP). La figure 99 présente les gains sur le COP en fonction de la température extérieure. Là encore, l'élévation de la température de la source froide permet une augmentation hétérogène du COP. On constate une augmentation de 3% à -6°C alors qu'il est de 16% à $+6^{\circ}\text{C}$. Une fois de plus, ce gain s'explique par le changement de plage de fonctionnement. À 6°C la PAC passe d'un fonctionnement avec givrage à un fonctionnement hors-givrage.

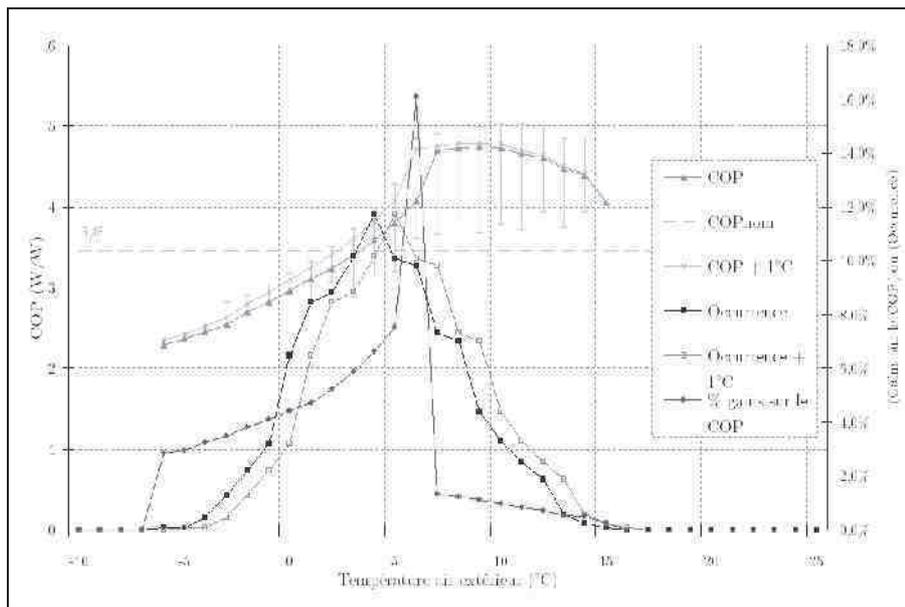


Figure 99: Gains sur le COP dus à l'élévation de 1°C de la source froide

Les gains sur le COP sont plus importants sur la plage de fonctionnement avec givrage.

Globalement, sur la période de simulation (15 octobre au 20 mai), on observe les gains moyens du tableau 19

	Besoins (kWh)	Ecart relatif (%)	Pcalo (kWh)	Ecart relatif (%)	C_PAC (kWh)	Ecart relatif (%)	C_APT (kWh)	Ecart relatif (%)	C_AUX (kWh)	Ecart relatif (%)	COP_PAC	Ecart relatif (%)	COP_PAC + APT	Ecart relatif (%)	COP_PAC + APT + AUX	Ecart relatif (%)
Base	6447	-	6447	-	1865	-	0	-	0	-	3,46	-	3,46	-	3,46	-
Base +1°C	6447	0	6447	0,0%	1769	-5,1%	0	0,0%	0	0,0%	3,64	5,2%	3,64	5,2%	3,64	5,2%

Tableau 19: Performance saisonnière et comparaison par rapport au fonctionnement de base

La hausse de 1°C de la température de la source froide implique une baisse de la consommation de l'ordre de 5% et une hausse du coefficient de performance de 5%.

Qu'en est-il pour une hausse de 5 et 10°C de la température de la source froide ? Les courbes qui suivent sont équivalentes aux courbes précédemment présentées. Elles illustrent l'impact sur la consommation et les performances de la PAC d'une hausse de 5°C et 10°C.

Les figures 100 à 103 correspondent à l'élévation de 5°C la température de la source froide de la PAC.

Les figures 104 à 107 correspondent à l'élévation de 10°C.

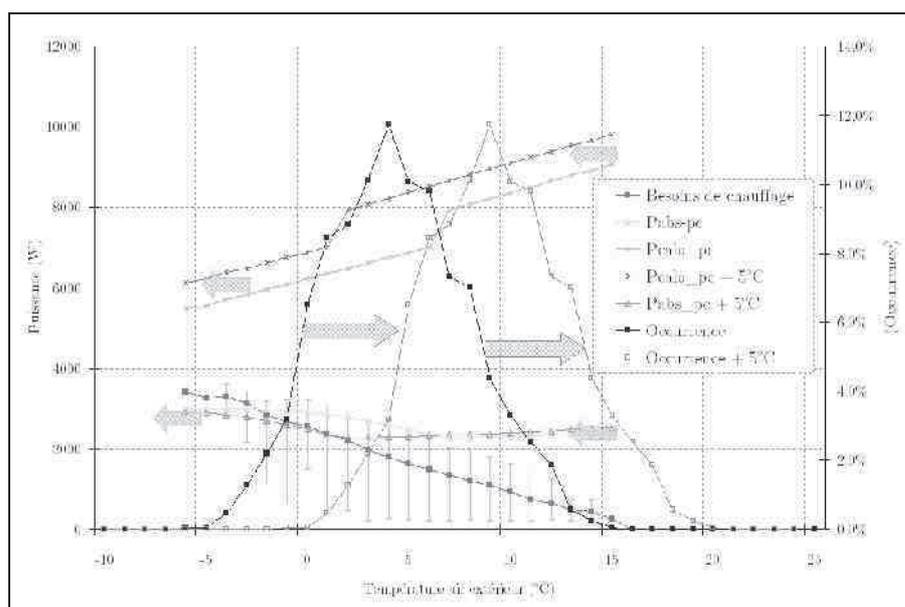


Figure 100: Hausse de 5°C de la source froide. Impact sur les performances à pleine charge

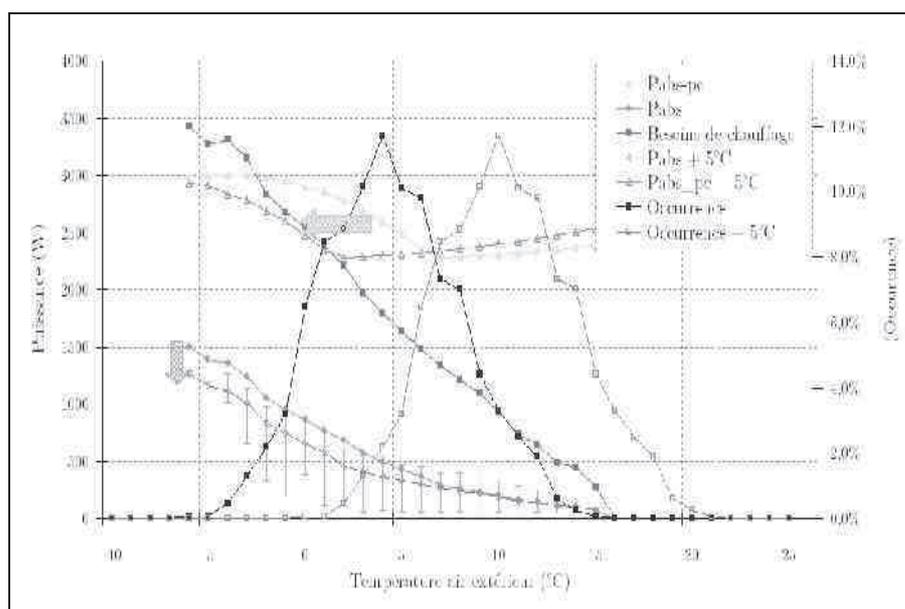


Figure 101: Hausse de 5°C de la source froide. Impact sur la consommation électrique.

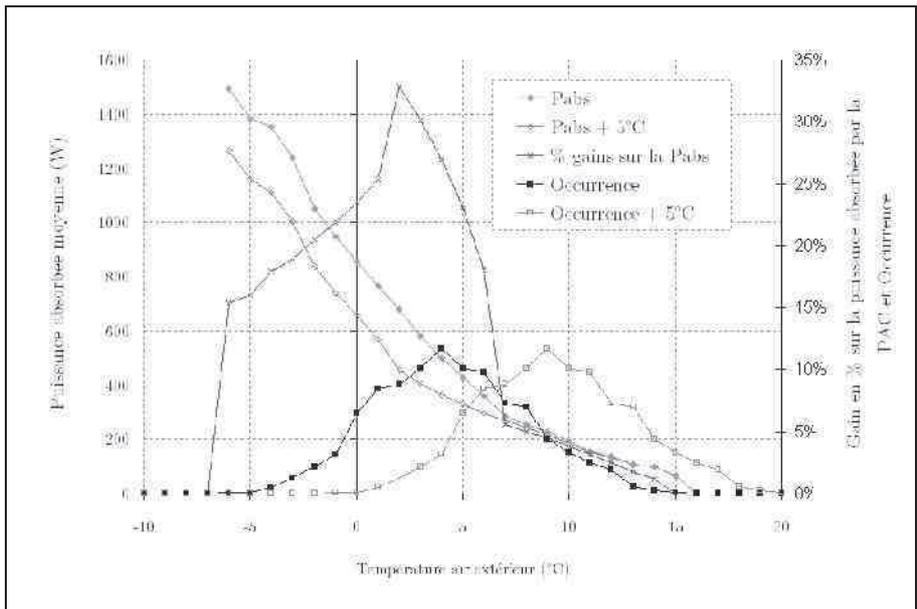


Figure 102: Gains sur les consommations de la PAC. Hausse de 5°C de la source froide.

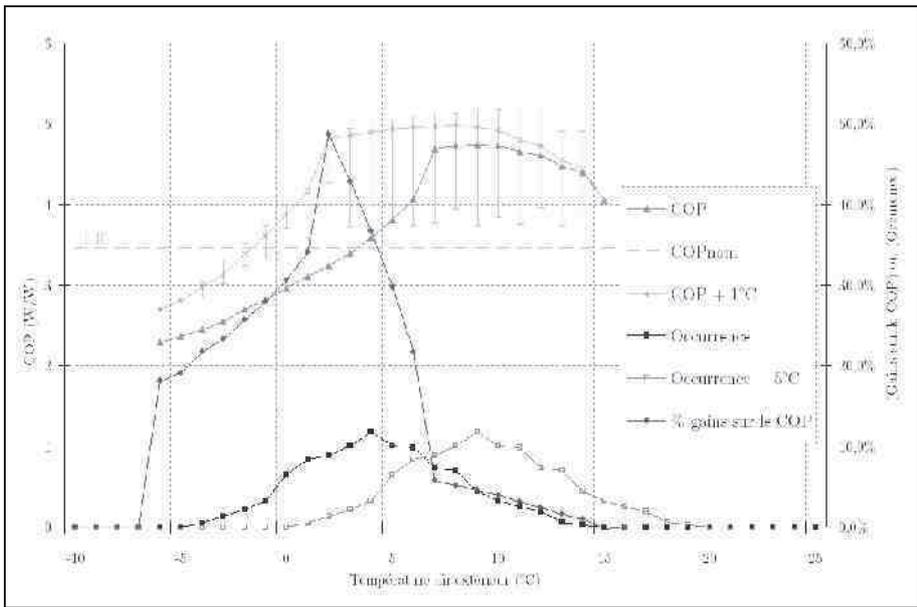


Figure 103: Gains sur le COP. Hausse de 5°C de la source froide.

Les courbes qui suivent montrent l'influence d'une hausse de la température de la source froide de 10°C.

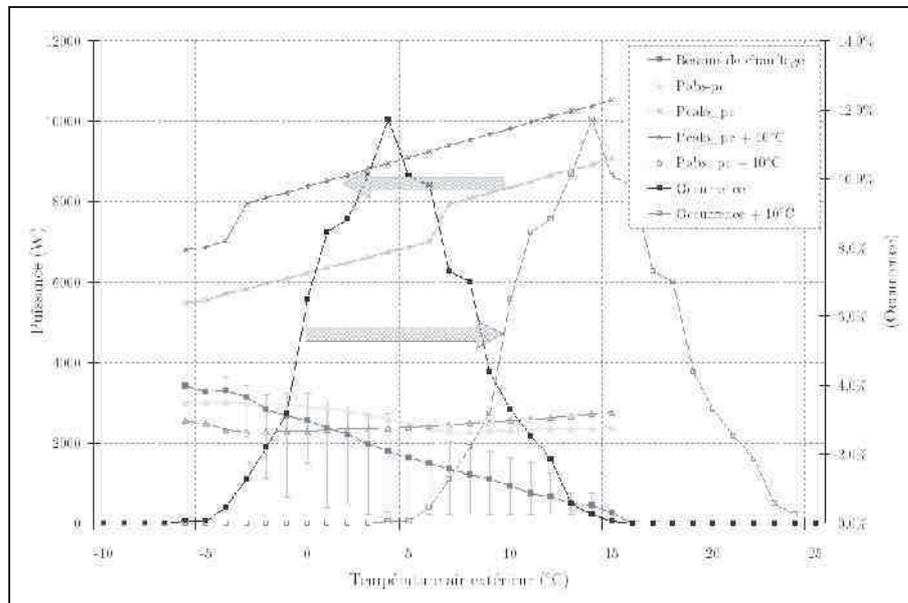


Figure 104: Hausse de 10°C de la température de la source froide. Impact sur les performances à pleine charge

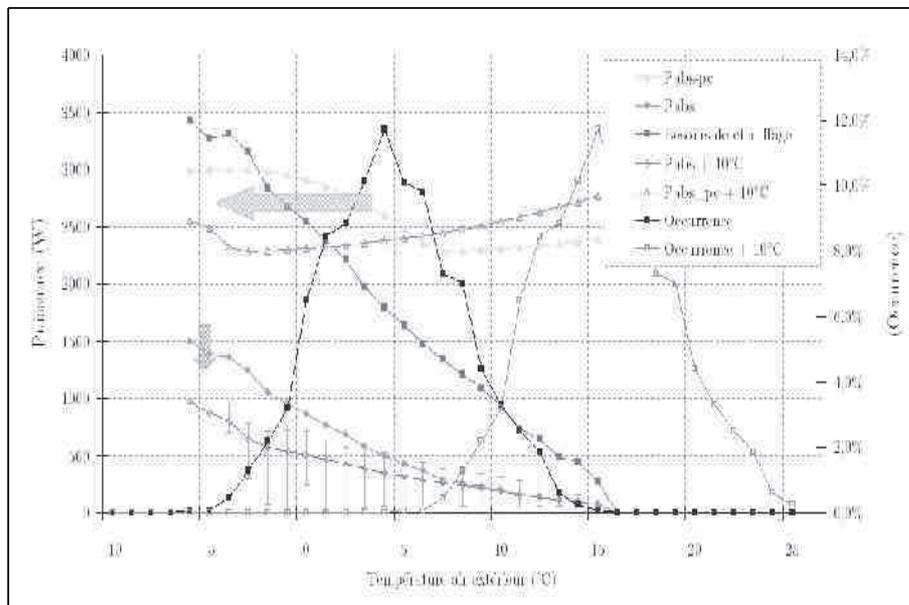


Figure 105: Hausse de 10°C de la température de la source froide. Impact sur la puissance absorbée

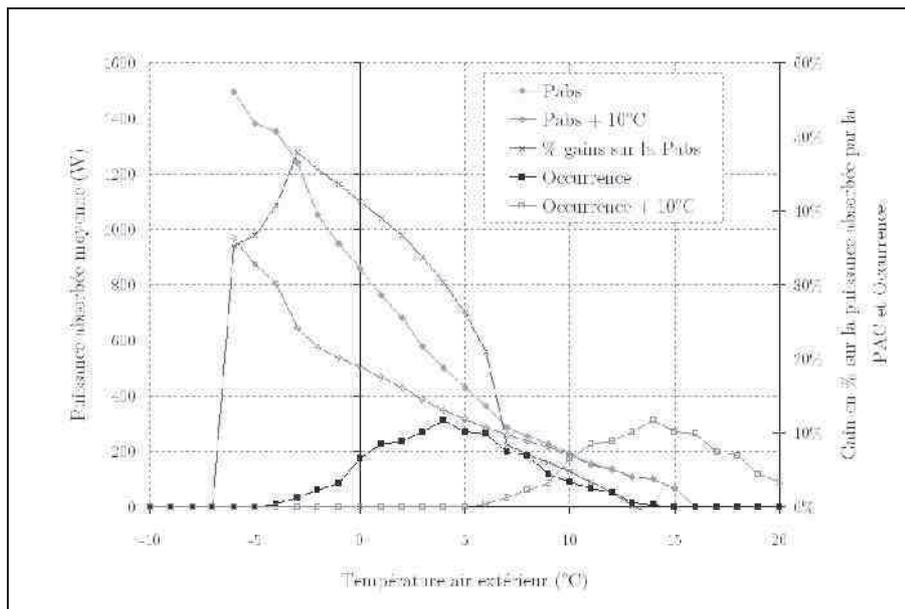


Figure 106: Gains sur la puissance absorbée par la PAC

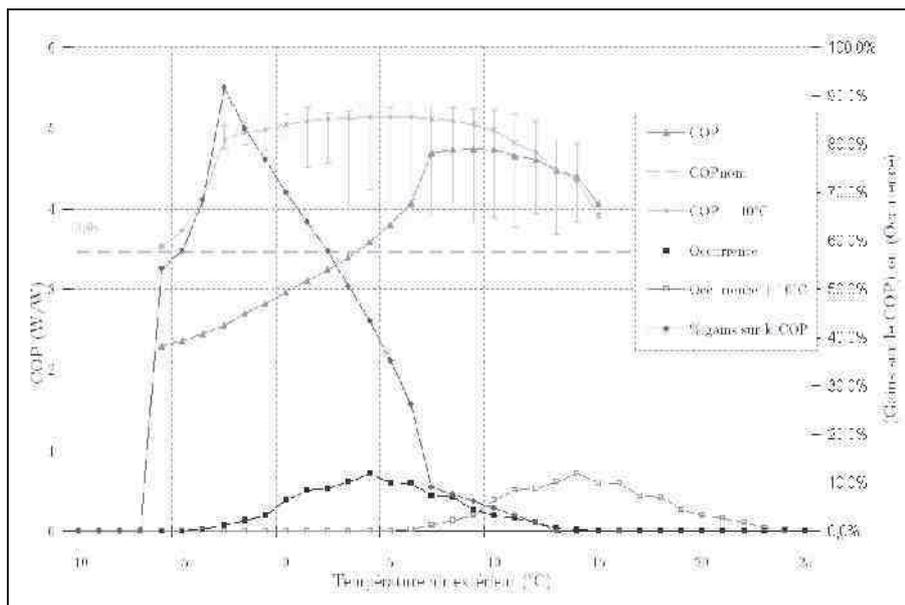


Figure 107: Hausse de 10°C de la température de la source. Impact sur le COP.

Le tableau 20 fait le point sur les gains possibles par rapport à la l'écart de température entre l'ambiance extérieure et la température de la source froide.

	Besoins (kWh)	Ecart relatif (%)	Pcalo (kWh)	Ecart relatif (%)	C_PAC (kWh)	Ecart relatif (%)	C_APT (kWh)	Ecart relatif (%)	C_AUX (kWh)	Ecart relatif (%)	COP_PAC	Ecart relatif (%)	COP_PAC +AP	Ecart relatif (%)	COP_PAC+ APT+AUX	Ecart relatif (%)
Base	6447	-	6447	-	1865	-	0	-	0	-	3,46	-	3,46	-	3,46	-
Base +1°C	6447	0	6447	0,0%	1769	-5,1%	0	0,0%	0	0,0%	3,64	5,2%	3,64	5,2%	3,64	5,2%
Base +2°C	6447	0	6447	0,0%	1676	-10,1%	0	0,0%	0	0,0%	3,85	11,3%	3,85	11,3%	3,85	11,3%
Base +3°C	6447	0	6447	0,0%	1587	-14,9%	0	0,0%	0	0,0%	4,06	17,3%	4,06	17,3%	4,06	17,3%
Base +4°C	6447	0	6447	0,0%	1508	-19,1%	0	0,0%	0	0,0%	4,27	23,4%	4,27	23,4%	4,27	23,4%
Base +5°C	6447	0	6447	0,0%	1440	-22,8%	0	0,0%	0	0,0%	4,48	29,5%	4,48	29,5%	4,48	29,5%
Base +6°C	6447	0	6447	0,0%	1382	-25,9%	0	0,0%	0	0,0%	4,67	35,0%	4,67	35,0%	4,67	35,0%
Base +7°C	6447	0	6447	0,0%	1338	-28,3%	0	0,0%	0	0,0%	4,82	39,3%	4,82	39,3%	4,82	39,3%
Base +8°C	6447	0	6447	0,0%	1308	-29,9%	0	0,0%	0	0,0%	4,93	42,5%	4,93	42,5%	4,93	42,5%
Base +9°C	6447	0	6447	0,0%	1286	-31,0%	0	0,0%	0	0,0%	5,01	44,8%	5,01	44,8%	5,01	44,8%
Base +10°C	6447	0	6447	0,0%	1269	-32,0%	0	0,0%	0	0,0%	5,08	46,8%	5,08	46,8%	5,08	46,8%

Tableau 20: Hausse de la température de la source froide. Quels gains ?

Ainsi si on imagine une hausse permanente de 10°C de la température de la source froide, avec le débit nécessaire au niveau de l'échangeur de l'unité extérieure, le gain de la consommation électrique de la PAC est de l'ordre de 32% et l'amélioration du COP de 47%.

Mais trouver une source d'air tempérée ayant un écart constant avec l'ambiance extérieure n'est pas une chose facile, surtout dans l'environnement d'un bâtiment. Certes, certains composants d'une maison agissent comme des zones tampons ou bien des capteurs solaires passifs, stockant une partie du rayonnement incident (une véranda, un vide sanitaire, des combles, un puits canadien, un capteur à air).

La disponibilité de ces sources est loin d'être constante toute l'année. Il faut de plus prendre en compte, les débits nécessaires au niveau de l'unité extérieure pour assurer le bon fonctionnement de la PAC.

Or les zones dont on souhaite se servir, ne permettent qu'un débit de renouvellement d'air limité. Les volumes de ces zones restant assez faibles dans le cadre d'une maison individuelle, augmenter le débit de renouvellement d'air afin de satisfaire le débit nécessaire au niveau de l'unité extérieure peut engendrer des effets négatifs. En effet, la hausse de débit de renouvellement d'air dans ces zones, engendre une baisse de leur température. Ces espaces étant en contact avec l'espace chauffé, si leur température chute, les besoins de chauffage de la zone à chauffer augmentent.

Mais avant d'aller plus loin, la suite du rapport propose une analyse équivalente à la précédente pour une PAC plus petite de 4 kW au lieu de 8 kW toujours au climat de Trappes.

3.4. Dimensionnement de la PAC

Considérons le même bâtiment que précédemment équipé d'une PAC air-air moins puissante. Sa puissance calorifique nominale est de 4 kW chaud. La figure 108 compare la performance de la PAC de 4 kW avec celle de 8 kW. Les flèches pleines indiquent la tendance d'évolution de la puissance calorifique à pleine charge et la puissance absorbée à pleine charge.

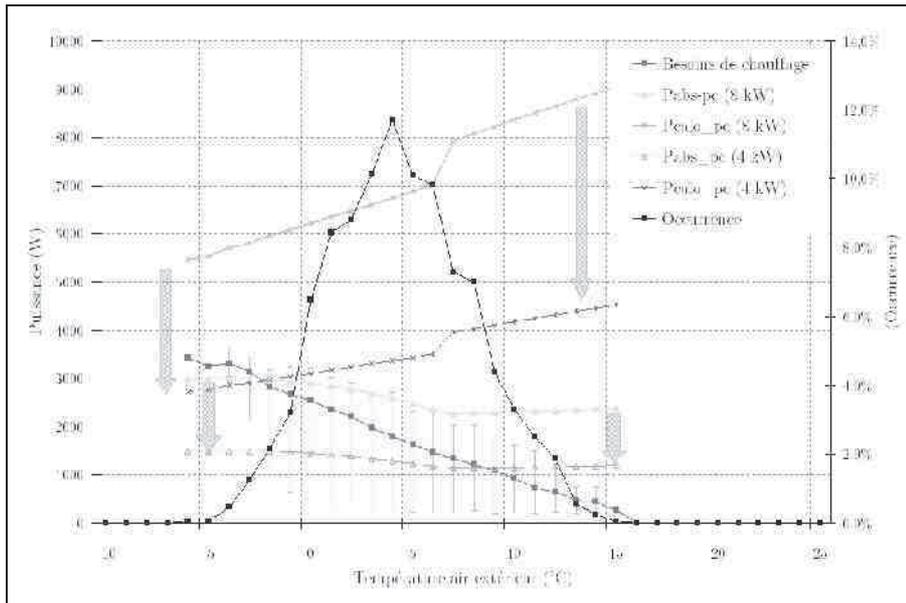


Figure 108: Comparaison des performances à pleine charge de la PAC 4 kW et 8kW

Contrairement à la figure 96 qui présente les performances moyennes de la PAC de 8 kW, on constate que cette fois-ci la puissance calorifique à pleine charge délivrée par la PAC n'est pas toujours supérieure aux besoins de chauffage du logement. Ainsi lorsque les besoins de chauffage sont supérieurs à la puissance calorifique à pleine charge, la PAC agit de deux façon :

- Soit le rapport entre les besoins et la puissance calorifique à pleine charge est inférieur à 120%, dans ce cas la technologie inverter permet de pousser la puissance de la PAC au delà de sa puissance nominale, avec des performances moindres ;
- Soit le rapport est supérieur à 120% et dans ce cas la PAC continue de fonctionner et déclenche les étages d'appoint électrique nécessaires pour satisfaire les besoins de chauffage. Les PAC sont généralement équipées de deux étages d'appoint prévus pour fonctionner les jours de grands froids.

Bien que la PAC ne fonctionne pas tout le temps en charge partielle comme c'était le

cas pour la PAC de 8 kW, ce type de fonctionnement reste tout de même prépondérant. On chiffre à 86%, le temps de fonctionnement à charge partielle. Le reste correspond à un fonctionnement à pleine charge (besoins de chauffage = puissance calorifique à pleine charge) ou en « surcharge » jusqu'à 120%, et au delà « pleine charge + appoint ».

Ainsi la figure 109 présente la moyenne des puissances absorbées pour chaque température. On constate qu'à des températures extérieures supérieures à 5°C, malgré la moindre puissance absorbée à pleine charge de la part de la PAC de 4 kW, la moyenne de la puissance absorbée est sensiblement la même. La figure 110 présente un zoom pour une plage de température plus restreinte. On constate alors que la puissance absorbée de la PAC de 4 kW est inférieure à celle de 8 kW.

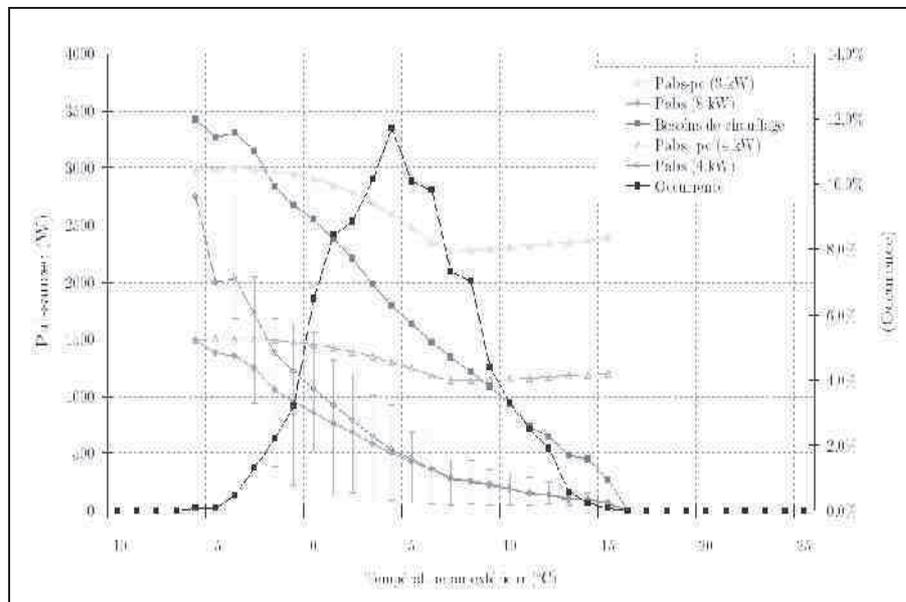


Figure 109: Moyenne de la puissance absorbée (PAC + Appoint)

Cependant on constate qu'en dessous de 5°C, un écart se creuse entre la moyenne des puissances absorbées par la PAC de 4 kW et celle de 8 kW. Ceci s'explique pour cette plage de température par des taux des charges partielles (rapport entre besoins de chauffage et la puissance calorifique à pleine charge) plus élevés dans le cas de la PAC de 4 kW. De plus en dessous de -5°C l'écart se creuse de façon encore plus nette, s'expliquant par la mise en route du premier étage d'appoint électrique intégré à la PAC dans le cas de la PAC de 4 kW. On chiffre à environ 50% du temps de fonctionnement où la PAC de 4 kW consomme plus d'électricité que la PAC de 8 kW.

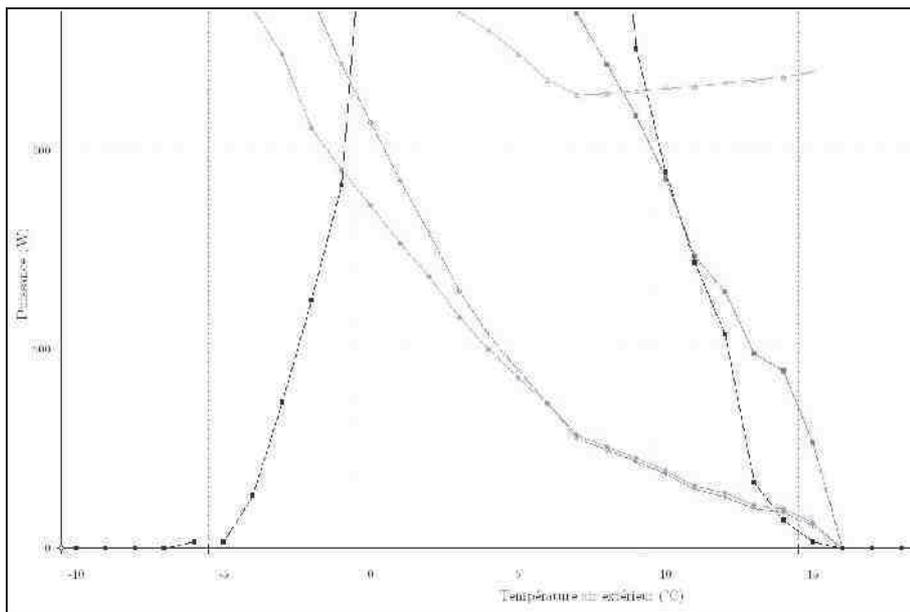


Figure 110: Zoom de l'évolution des puissances absorbées de la Figure 19

Comme relevé précédemment et constaté sur la figure 110, pour des températures supérieures à 7°C la puissance absorbée moyenne de la PAC de 4 kW est inférieure à celle de 8 kW. La justification réside dans l'évolution du taux de charge partielle et du coefficient de dégradation à charge partielle PLF. Certes, pour la plage des températures supérieures à 7°C, les taux de charge partielle moyens sont sensiblement les mêmes, bien que ceux de la PAC de 4 kW soient supérieurs, le coefficient de dégradation de charge partielle devient supérieur à celui de la PAC de 8 kW sur cette plage de température (cf. figure 111)

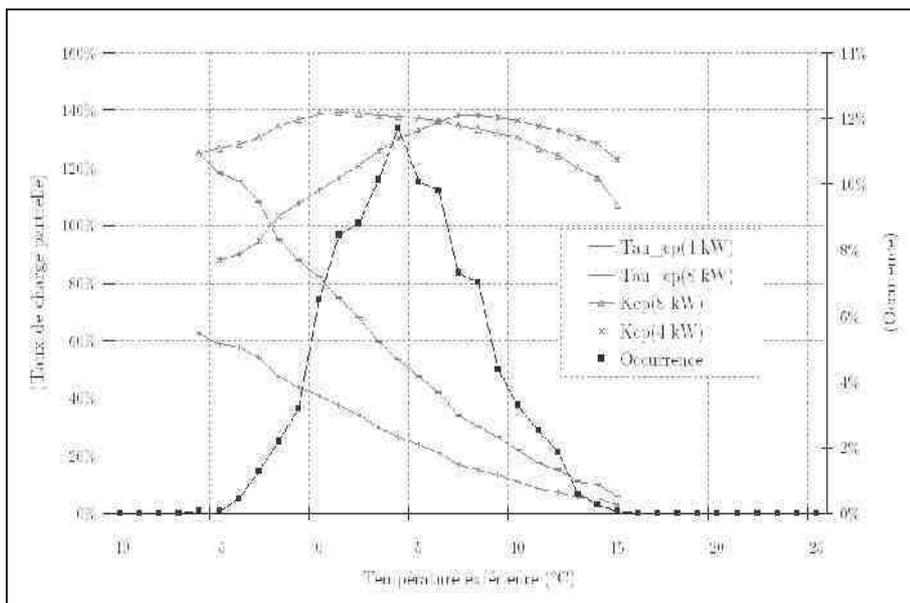


Figure 111: Évolution du taux de charge partielle moyen

Globalement, si l'on compare les performances saisonnières des deux PAC (4 kW et 8 kW), on constate que la PAC de 4 kW est moins performante et consomme plus que la PAC de 8 kW (Cf. tableau 21). Deux principales raisons à cela :

- La PAC de 4 kW utilise le type de fonctionnement « surcharge » lorsque la température extérieure descend en dessous de 1°C. Ce type de fonctionnement pousse le compresseur à fonctionner à un régime supérieur à son régime nominal et donc à performance réduite.
- Les taux de charge partielle moyens de la PAC de 4 kW sont globalement supérieurs à ceux de la PAC de 8 kW, entraînant des performances moindres.

La figure 112 présentant les COP moyens en fonction des températures extérieures, confirme les constats précédents. Ainsi la PAC (4kW) dispose de meilleures performances pour des températures au-delà de 7°C et des performances moindres pour des températures en deçà de 7°C.

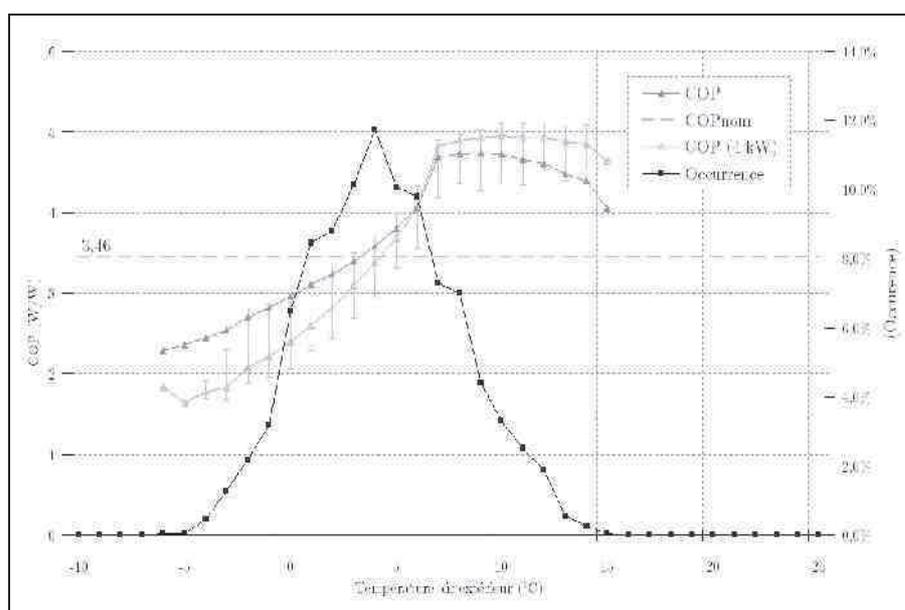


Figure 112: COP moyen pour chacune des températures

Une remarque concernant la meilleure performance moyenne à -6°C pour la PAC (4 kW). Cette hausse est finalement due au fait que le COP de la PAC seule n'intègre pas la puissance supplémentaire des appoints quand cela est le cas (cf. figure 112). Ainsi jusqu'à une température de -5°C, la PAC sera capable de fournir une puissance calorifique en fonctionnement « surcharge », avec des performances moindres qu'à pleine charge, sans la nécessité d'appoint. Mais en deçà, la PAC ne sera plus capable d'assurer toute seule le chauffage, il faudra alors déclencher un étage électrique. Dans ce cas, la PAC fonctionnant à pleine charge et non en « surcharge », elle fonctionne avec des performances supérieures ce qui se retrouve sur la figure 112 qui n'intègre pas

la puissance des appoints électriques.

L'illustration de ces performances moyennes, où les valeurs minimales et maximales apparaissent entre crochets verticaux, explique le comportement et les résultats des performances saisonnières du tableau 21. Les performances globales sont moindres pour la PAC (4 kW) puisque si on fait le lien avec l'occurrence des températures, on chiffre à environ 70% du temps de fonctionnement de la PAC où l'on se situera sur la plage de température ($T_{ext} < 7^{\circ}\text{C}$), c'est-à-dire où la PAC fonctionne avec des performances inférieures.

	Besoins (kWh)	Pcalo (kWh)	C_PAC (kWh)	C_APT (kWh)	C_AUX (kWh)	COP_PAC	COP_PAC +APT	COP_PAC+A PT+AUX
PAC 8 kW	6447	6447	1865	0	0	3,46	3,46	3,46
PAC 4 kW	6447	6442	2123	8	0	3,03	3,02	3,02

Tableau 21: Performances saisonnières

Le tableau 21 amène aux constats suivant : la PAC de 4 kW ne fournit pas la totalité de la puissance calorifique nécessaire pour satisfaire les besoins de la maison. Pour pallier à cela un étage d'appoint de résistances électriques ou deux doivent être mis en route afin de satisfaire la demande en chauffage. Ce sont des étages d'appoint, non modulable en puissance. C'est pourquoi la somme de la puissance calorifique et de la puissance de l'appoint peuvent dépasser les besoins totaux à satisfaire. De plus, les performances saisonnières de la PAC sont moindres notamment pour les raisons données précédemment.

Au regard de ces résultats il semble intéressant d'effectuer le même travail que pour la PAC de 8 kW, et d'étudier l'impact de l'augmentation de la température de la source froide sur ces performances.

Les constats d'une élévation de 1°C la température de la source froide, sont les mêmes que pour la PAC de 8 kW : diminution de la puissance absorbée et augmentation du coefficient de performance. La figure 113 présente les performances à pleine charge de la PAC suite à l'élévation de 1°C de la source froide.

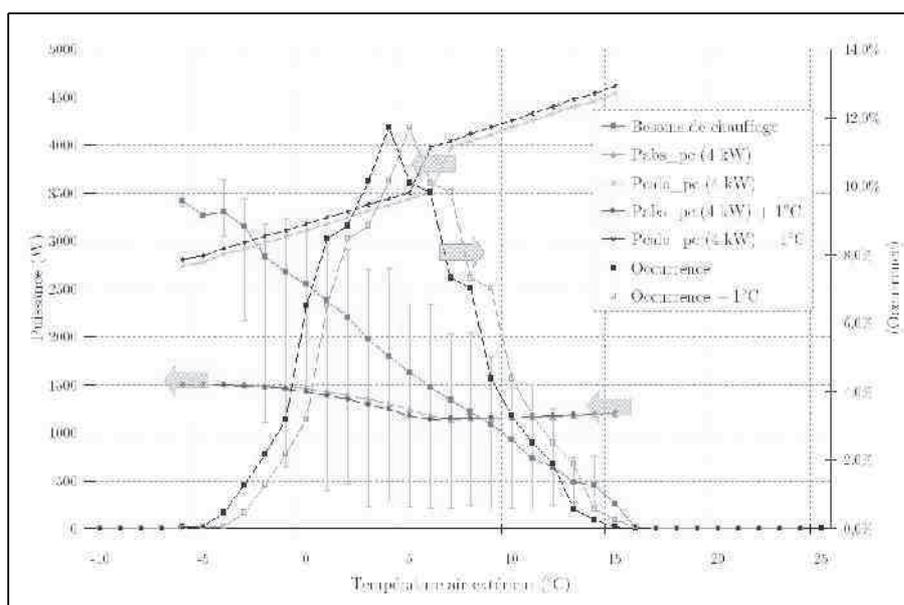


Figure 113: Performance à pleine charge pour une température de source froide + 1°C

On remarque la même influence de l'élévation de la température de la source froide sur les performances à pleine charge de la figure 96.

En ce qui concerne la puissance absorbée moyenne de la PAC, l'élévation de la température de la source froide permet à cette dernière de fonctionner dans des conditions plus clémentes et donc de diminuer ses consommations comme illustré à la figure 114.

Le chiffrage des gains par rapport au fonctionnement classique de la PAC (4kW) est représenté sur la figure 115 par la courbe rouge (croix). Ainsi à -6°C , on ne constate aucune baisse de la puissance absorbée alors qu'à $+6^{\circ}\text{C}$ la hausse de 1°C de la source froide entraîne une diminution de 16% de la puissance absorbée moyenne. Là encore, on constate l'hétérogénéité des gains sur la puissance absorbée en fonction de la température de la source froide. Ce gain étant fonction de la plage de température, du type de fonctionnement et du comportement du bâtiment.

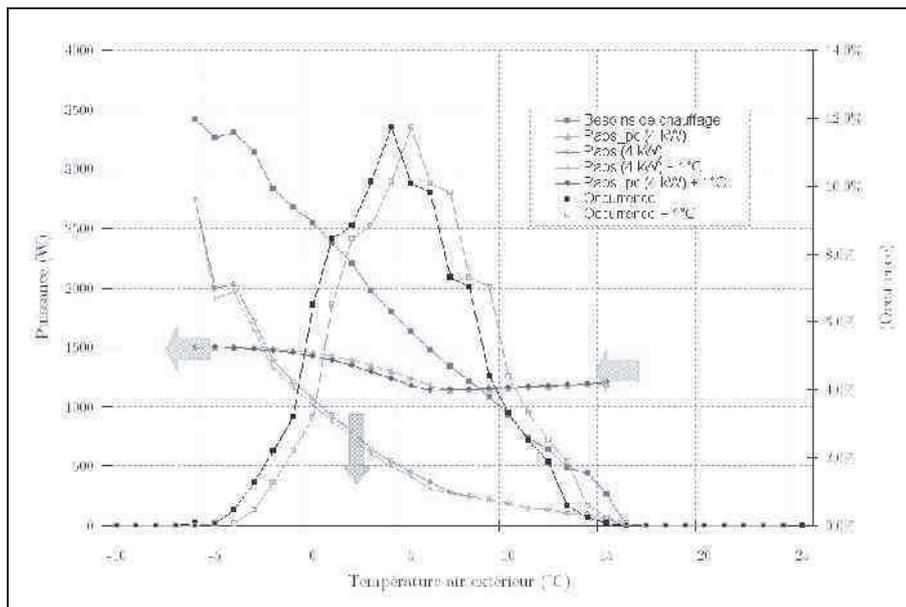


Figure 114: Évolution de la puissance absorbée moyenne avec une hausse de 1°C de source froide

On peut alors comparer la différence des gains sur la puissance absorbée dans le cas d'une PAC (8kW) et d'une PAC (4kW). La figure 116 illustre ces gains.

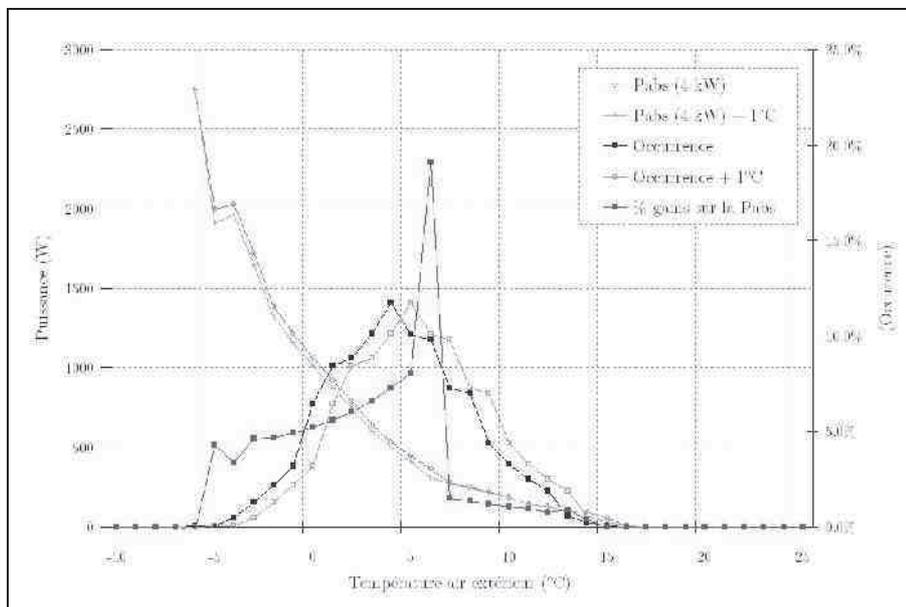


Figure 115: Gains sur la puissance absorbée moyenne

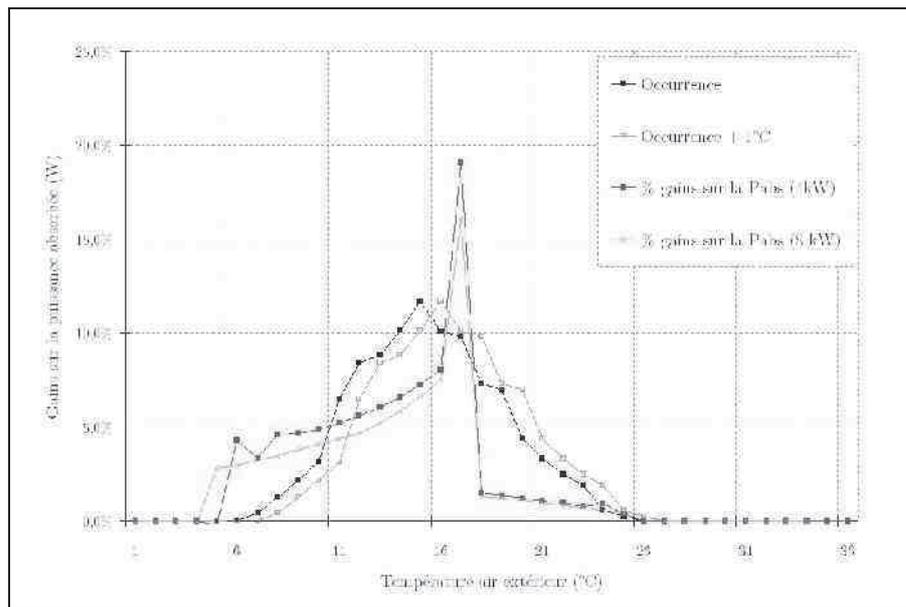


Figure 116: Comparaison des gains engendrés par la hausse de 1°C de la température de la source froide entre une PAC de 4kW et 8 kW

On constate que les gains dus à la hausse de 1°C sont supérieurs pour la PAC de 4 kW sur la plage des températures où le givrage de l'échangeur se produit (Text < 7°C). Pour ce qui est des températures supérieures à 7°C les gains sont assez proches pour l'une et l'autre des PAC, et sont de l'ordre de 2 à 3 %.

Les gains obtenus à -5°C prennent en compte le fait qu'à cette température la source froide est supérieure de 1°C et que la PAC ne nécessite plus la mise en route de l'étage d'appoint électrique.

	Besoins (kWh)	Ecart relatif (%)	Pcalo (kWh)	Ecart relatif (%)	C_PAC (kWh)	Ecart relatif (%)	C_APT (kWh)	Ecart relatif (%)	C_AUX (kWh)	Ecart relatif (%)	COP_PAC	Ecart relatif (%)	COP_PAC +APT	Ecart relatif (%)	COP_PAC+A PT+AUX	Ecart relatif (%)
Base	6447	-	6442	-	2123	-	8	-	0	-	3,03	-	3,02	-	3,02	-
Base +1°C	6447	0	6443	0,0%	1999	-5,8%	8	0,0%	0	0,0%	3,22	6,3%	3,21	6,3%	3,21	6,3%
Base +2°C	6447	0	6444	0,0%	1880	-11,4%	5	-37,5%	0	0,0%	3,43	13,2%	3,42	13,2%	3,42	13,2%
Base +3°C	6447	0	6447	0,1%	1766	-16,8%	0	-100,0%	0	0,0%	3,65	20,5%	3,65	20,9%	3,65	20,9%
Base +4°C	6447	0	6447	0,1%	1661	-21,8%	0	-100,0%	0	0,0%	3,88	28,1%	3,88	28,5%	3,88	28,5%
Base +5°C	6447	0	6447	0,1%	1567	-26,2%	0	-100,0%	0	0,0%	4,11	35,6%	4,11	36,1%	4,11	36,1%
Base +6°C	6447	0	6447	0,1%	1485	-30,1%	0	-100,0%	0	0,0%	4,34	43,2%	4,34	43,7%	4,34	43,7%
Base +7°C	6447	0	6447	0,1%	1420	-33,1%	0	-100,0%	0	0,0%	4,54	49,8%	4,54	50,3%	4,54	50,3%
Base +8°C	6447	0	6447	0,1%	1376	-35,2%	0	-100,0%	0	0,0%	4,69	54,8%	4,69	55,3%	4,69	55,3%
Base +9°C	6447	0	6447	0,1%	1342	-36,8%	0	-100,0%	0	0,0%	4,81	58,7%	4,81	59,3%	4,81	59,3%
Base +10°C	6447	0	6447	0,1%	1315	-38,1%	0	-100,0%	0	0,0%	4,9	61,7%	4,9	62,3%	4,9	62,3%

Tableau 22: Hausse de la température de la source froide. Quels gains pour une PAC de 4kW ?

Si l'on compare le tableau 20 et le tableau 22, on constate que la hausse de la

température de la source froide impacte le comportement de la PAC (4kW) de façon plus positive que la PAC (8kW).

Ainsi pour une augmentation de 10°C de la température de la source froide (dernière ligne) permet de gagner 38% sur la consommation de la PAC (4 kW) et seulement 32% pour la PAC (8 kW). Le coefficient de performance (compresseur + ventilateurs) augmente de 62% pour le PAC (4 kW) et de 46% pour la PAC (8 kW).

La Figure 117 illustre la diminution de la consommation et les gains sur le coefficient de performance de l'augmentation de température de la source froide.

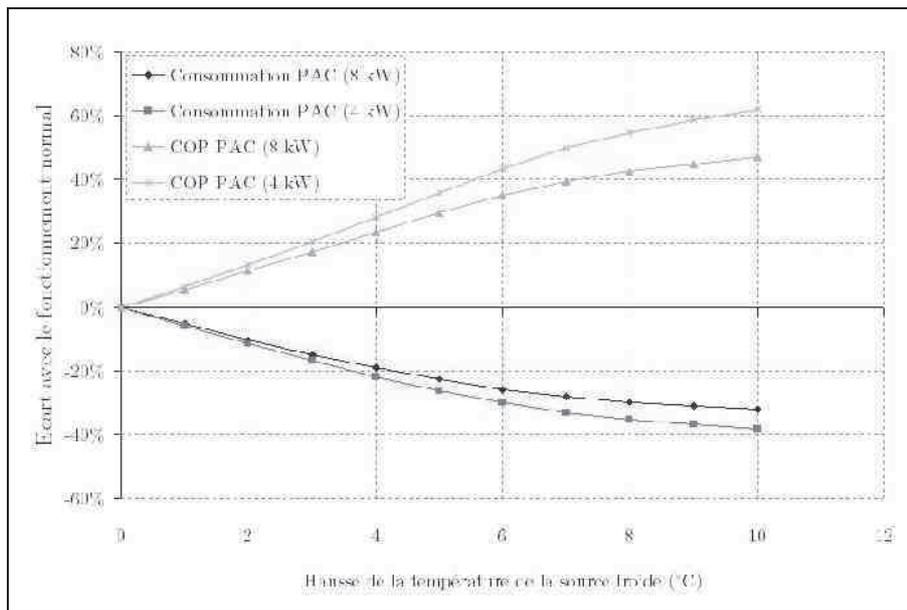


Figure 117: Écart sur la consommation et le coefficient de performance de la PAC en fonction de la hausse de la température de source froide

Ces résultats donnent un ordre de grandeur des gains sur les consommations et les performances d'une PAC air-air.

4. Conclusions

Ces résultats représentent la limite haute des gains qui peuvent être atteints en terme d'économie d'énergie par le couplage de la source froide d'une PAC avec une source d'air tempérée « idéale ».

On ne peut pas prédire en toute généralité l'impact de l'élévation de la température de la source froide sur les consommations et les performances de la PAC, puisque celles-ci dépendent du dimensionnement de la PAC, de la plage de température extérieure de fonctionnement, du comportement thermique du bâtiment (qui influe sur le taux de charge de la PAC).

On a pu observer que l'augmentation de la température de la source froide n'a pas le

même effet selon la température extérieure. Autrement dit, l'impact de l'augmentation de la température n'est pas le même à -5°C ou à 10°C .

Globalement l'augmentation constante d' 1°C de la température de la source froide permet de diminuer de 5 à 6 % la consommation saisonnière de la PAC. Le gain sur le coefficient de performance est du même ordre de grandeur.

L'augmentation de la température de la source froide de la PAC est ainsi un réel enjeu en terme d'économie d'énergie. Pour une température extérieure donnée, la PAC est capable de fournir plus de puissance calorifique au local tout en consommant moins.

Mais quels moyens mettre en œuvre pour exploiter ce potentiel d'économie d'énergie ? Certes, une PAC air-air est classiquement installée à l'extérieur. Mais n'y a-t-il pas des sources au sein même du bâtiment qui puissent servir de source froide à une PAC ?

On pense à un vide sanitaire, des combles, une véranda, la sortie d'une ventilation double flux, un puits canadien ou un capteur à air. Le modèle développé ici permet d'évaluer les potentiel d'économies d'énergie pour ces différentes configurations, comme on le verra au chapitre suivant.

5. Perspectives

Ce chapitre fixe dans un premier temps les limites hautes des gains qu'il est possible d'obtenir en appliquant une augmentation constante de la température de la source froide. Ainsi selon le dimensionnement de la PAC, une réduction de 40% de la consommation de la PAC peut être attendue, ainsi qu'une augmentation de 60% du COP global du système.

Les sources d'air tempérées dont on dispose ne peuvent être aussi performantes. Essayer d'établir un indicateur afin de juger de la qualité d'une zone à devenir une source froide intéressante pour une PAC semble difficile. Plusieurs indicateurs sont proposés (température moyenne, occurrence de température, occurrence des écarts de température). Mais ces indicateurs disposent de quelques lacunes, notamment en ce qui concerne l'intégration de la disponibilité du débit ou la température à laquelle se produit l'écart de température. En effet, les gains sur les consommations engendrés par l'augmentation de la température de la source froide sont différents selon la température à laquelle cette hausse a lieu.