Performances des pompes à chaleur air-air pour le climat du Québec

Brice Le Lostec[1], Hervé Frank Nouanegue[1], Éric Dumont[1]
[1] Laboratoire des Technologies de l'Énergie, Hydro-Québec, Shawinigan, Québec

Résumé

Afin d'évaluer les économies d'énergie liées à l'utilisation de nouvelles technologies de pompes à chaleur air-air pour le marché résidentiel québécois, une étude incluant un volet expérimental et un volet simulation a été effectuée. L'étude expérimentale a permis d'évaluer les performances de trois pompes à chaleur (classique avec booster, biétagée et vitesse variable), et ce, dans des conditions de fonctionnement contrôlées. Ces données expérimentales ont été intégrées dans un modèle de maison, développé avec TRNSYS, dans le but d'évaluer les économies d'énergie. Une analyse financière sommaire, dans un contexte québécois, des cas modélisés est également présentée. Les résultats expérimentaux indiquent que les performances mesurées sur les pompes à chaleur sont légèrement inférieures à celles annoncées par les constructeurs. Ceci pourrait être causé par une installation et des paramètres d'opération (débit d'air) non optimaux. Le sous-dimensionnement du débit d'air de ventilation de l'unité intérieure a un impact important sur les performances des pompes à chaleur contrairement à son surdimensionnement qui affecte peu les performances. Pour les cas simulés, les économies d'énergies sur le chauffage sont importantes, mais l'analyse financière fait ressortir des temps de retour importants, causés par les coûts d'investissement élevés.

1 Introduction

Le contexte climatique nordique fait en sorte que les pompes à chaleur (PAC) conventionnelles sont peu performantes durant une partie de la saison de chauffage. En effet, lorsque la température extérieure est trop basse, le coefficient de performance et la puissance de chauffage sont faibles. Les distributeurs de PAC commencent donc à mettre sur le marché des technologies conçues pour les climats froids (LTHP). Karlsson et al. (2006) ont mené une étude expérimentale afin d'évaluer les performances des PAC disponibles sur le marché et de les comparer aux performances des PAC évaluées en 1991 et en 2001. Il ressort de cette étude que les performances des PAC s'améliorent et que leur coût d'acquisition diminue.

L'objectif de cette étude vise à caractériser les performances de ces nouvelles technologies dans un contexte québécois.

Une étude expérimentale a donc été effectuée sur trois technologies (classique avec booster, bi-étagée et à vitesse variable) dans le but de mesurer leurs performances instantanées et journalières. Des tests ont donc été menés afin de quantifier l'impact du débit de ventilation sur les performances d'une PAC à vitesse variable. En effet, la littérature (Fairey et al. (2004)) rapportent que les performances des PAC sont moins grandes en situation réelle par rapport aux performances en laboratoire. Une des raisons expliquant cette sous performance serait le débit de ventilation moindre que le débit prévu.

Finalement, les données expérimentales obtenues ont été intégrées dans un modèle de maison pour quantifier les économies d'énergie pour la saison de chauffage. Une analyse financière sommaire est présentée afin d'évaluer la rentabilité de tels projets.

2 Description du banc d'essai

L'unité extérieure de la PAC est située dans un environnement contrôlé (figure 1) qui simule les conditions climatiques extérieures souhaitées. De ce fait, la température de l'environnement est contrôlée avec un système de réfrigération et de chauffage électrique. Le système de refroidissement fonctionne à pleine capacité en permanence. Ainsi, le chauffage électrique est contrôlé pour obtenir la température de consigne désirée dans l'enceinte. Ce contrôle de température est effectué à partir de la moyenne de six thermocouples placés sur les trois façades des PAC testées. Des ventilateurs sont utilisés afin d'assurer un mélange de l'air de l'environnement contrôlé. Il faut noter que les PAC contribuent au refroidissement et au mélange de l'air de l'enceinte. L'humidité de l'environnement est, quant à elle, contrôlée par une bouilloire électrique.

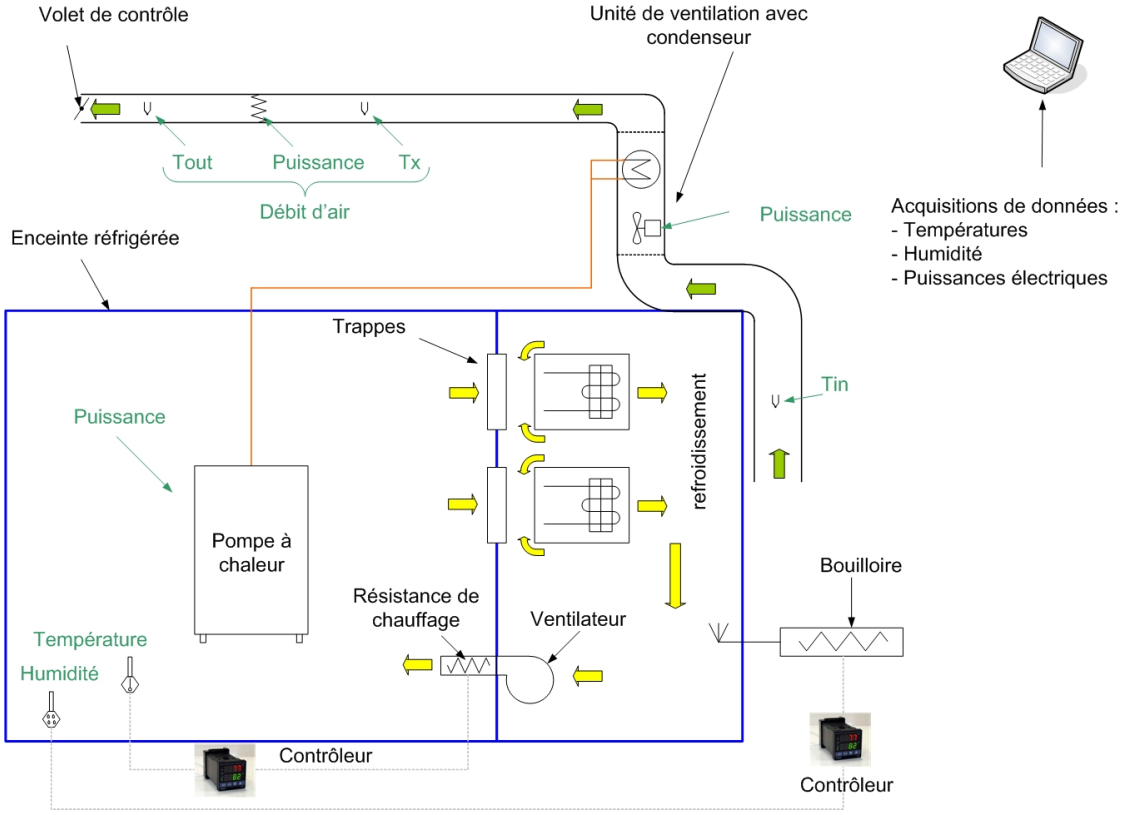

Figure 1 : Illustration du banc d'essai

Les puissances instantanées et l'énergie consommée par l'unité extérieure et l'unité intérieure sont mesurées à l'aide de capteur de wattheures.

Le débit d'air dans l'unité intérieure est évalué à l'aide d'une résistance de chauffage de 5 kW en mesurant l'élévation de température entre l'amont et l'aval de la résistance avec des grilles de thermocouple. Étant donné que la répartition des températures et le débit d'air ne sont pas uniformes dans la section de la conduite de ventilation, une calibration à l'aide d'un balomètre a été effectuée. L'écart entre la méthode de mesure utilisée et le débit mesuré au balomètre est de ±2.5 % pour des débits allant de 750 cfm à 1050 cfm pour la PAC #3.

Description des PAC testées

Les caractéristiques techniques des trois PAC sont présentées dans le tableau 1.

La PAC #1 est une technologie standard. Elle possède deux niveaux de puissance (compresseur + précompresseur), et de ce fait, peut être considérée comme un équipement de haute gamme qui peut opérer à des températures allant jusqu'à -25 °C.

La PAC #2 bi-étagée a été développée spécifiquement pour les climats froids. Elle est composée d'un compresseur à 2 pistons et d'un précompresseur (« booster »). Le compresseur opère selon les besoins, soit avec 1 piston (déplacement minimal) ou avec 2 pistons (déplacement maximal). Le précompresseur est un compresseur placé en série avec le compresseur principal. Il est activé pour des températures inférieures à -8 °C afin d'augmentant la puissance de chauffage. Un échangeur de chaleur interne est utilisé afin d'injecter du réfrigérant entre les deux étages de compression tout en augmentant le sous-refroidissement en sortie du condenseur.

La PAC #3 est une technologie à vitesse variable (compresseur) avec injection de réfrigérant. Lorsque la température extérieure est basse, la vitesse du compresseur augmente afin de maintenir la pression de condensation et la puissance de chauffage à des niveaux adéquats. Généralement, l'augmentation de vitesse provoque la surchauffe du compresseur. L'injection de réfrigérant dans le compresseur permet de pallier ce problème.

Tableau 1 : Description des PAC (informations constructeurs)

	PAC #1	PAC #2	PAC #3
Technologie	Classique	Bi-étagée	Vitesse variable
Capacité à 8.3°C (BTU/hr)	33 000	36 627	38000
Capacité à -8.3°C (BTU/hr)	20 800	43 927	38000
COP à 8.3 °C	3.7	3.5	3.54
HSPF (IV)	8.5	9.6	9.0
HSPF (V)	7.4	8.5	7.8
Surface serpentin (pi²)	20.58	14.33	-
Prix ($)	5 815	13 965	8355

3 Description du modèle numérique

Un modèle numérique des PAC alimentant une maison est construit dans un environnement TRNSYS. Deux types de maison sont modélisés : une maison des années 1960 avec une consommation de chauffage de 19200 kWh/an et une autre du style des années 1990 avec une consommation de 12200kWh/an. Les données climatiques de la ville de Montréal sont utilisées.

Modèle des PAC

Avec les résultats des mesures de performances des trois PAC obtenus, un modèle numérique sous la forme d'un TYPE de TRNSYS a été développé. Ce modèle calcule la puissance fournie au bâtiment et la puissance consommée par le compresseur et les ventilateurs en fonction de la température de retour de la zone chauffée et de la température extérieure. Cette puissance est traduite en une température de soufflage par rapport au débit d'air imposé et transférée au modèle de la maison. Un modèle d'appoint électrique est incorporé pour évaluer la part des PAC dans la consommation totale.

Le modèle de la PAC est basé sur une interpolation des données expérimentales. Ceci permet de calculer la puissance totale consommée et la puissance fournie par la PAC tout en tenant compte du dégivrage. Par conséquent, ce modèle inclut également la consommation du ventilateur, qui fonctionne en mode ON/OFF), ainsi que l'énergie thermique fournie par celui-ci. Le modèle de PAC comporte aussi l'appoint électrique qui a été conçu pour imiter le fonctionnement réel du système. En dessous du point d'équilibre, le premier étage de l'appoint et la PAC sont mis en marche simultanément. Si la demande de chauffage est toujours présente après 12 min, le second étage est déclenché. Pour obtenir cette configuration, le pas de simulation est de 0.1 heure (6 min). Ce pas de temps est faible par rapport au temps d'inertie de la température du bâtiment.

Il faut noter que la performance à charge partielle de la PAC #3 (vitesse variable) n'a pas encore été testée. Le model de cette PAC, tout comme celui des PAC #1 et #2, est basée sur les performances à pleine charge avec un contrôle ON-OFF. L'effet de la charge partielle sur ce type de PAC pourrait donc faire l'objet d'un travail futur. Une variation de COP d'environ 10 %, lié au fonctionnement en charge partielle, ne modifierait pas les conclusions tirées de l'analyse économique.

Modèle du bâtiment

Le bâtiment est construit en utilisant l'environnement TRNBuild qui permet avec GoogleSkechUp de modéliser un bâtiment géométrique. La maison contient 6 zones. 5 zones sont reparties sur le rez-de-chaussée et la dernière pièce est un sous-sol. La figure 2 représente la configuration des pièces avec une indication sur la face nord et les dimensions de la maison. L'isolation des murs, des planchers et du plafond est établie en fonction des valeurs données par Leduc et al. (2011) pour deux bâtiments construit l'un dans les années 1960 et l'autre dans les années 1990. Pour la connexion avec la PAC, des valeurs d'entrée de température de soufflage et de débit d'air sont introduites dans le salon, la cuisine, les chambres et le sous-sol. Le corridor reçoit le débit sortant des pièces conditionnées par la PAC et sa température est utilisée comme température de retour vers la PAC. La douche est conditionnée par un élément chauffant idéal. Le débit de soufflage de la PAC est reparti dans les pièces avec le rapport suivant qui tient compte de la demande en chauffage : 23% – cuisine, 50% – chambres, 17% – salon, 10% – sous-sol.

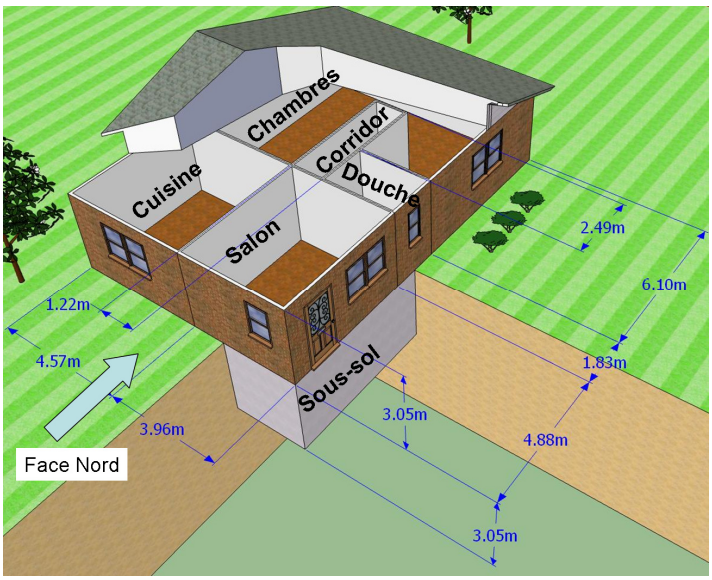

Figure 2 : Configuration de la maison modélisée

4 Résultats expérimentaux

Les données mesurées sont traitées pour calculer la puissance thermique, la consommation électrique des ventilateurs et compresseurs et le COP global des PAC. Les résultats présentés sur les figures sont des moyennes sur des périodes de fonctionnement de 24h. Dans un premier temps, les performances des trois types de PAC sont comparées. Ensuite, l'effet du débit d'air et du dégivrage est évalué.

Performances des PAC à pleine charge à 1000 cfm

Les PAC sont mises en fonctionnement pendant 24 heures sans arrêt avec une température extérieure constante. Le débit d'air durant les tests est configuré à 1000 cfm. Le débit d'air mesuré est de 1080 cfm pour la PAC #1, 1160 cfm pour la PAC #2 et 1060 cfm pour la PAC #3. Le temps de dégivrage est inclus dans le traitement. Sur la figure 3, la puissance thermique de chauffage à pleine charge, pour les trois technologies, est présentée. Celle-ci inclut la puissance de chauffage induite par le ventilateur. On observe que la PAC #1 à une puissance thermique qui diminue monotonement proportionnellement à la température extérieure. Elle reste en fonctionnement à une température de -25 °C. Toutefois, si un appoint électrique classique (ON/OFF) est utilisé, il est évident que, à basse température, la PAC fonctionnerait par intermittence car le régime de fonctionnement serait dicté par l'appoint. La puissance thermique des PAC à vitesse variable (PAC #3) et à 2 étages (PAC #2) ont une évolution semblable. En effet, on observe qu'elles possèdent deux niveaux de puissance. Ceci présente l'avantage d'avoir une puissance de chauffage importante à basse température, ce qui permet d'obtenir un point d'équilibre (besoin de chauffage - puissance PAC) plus bas que les PAC conventionnelles. Ces équipements peuvent donc répondre plus facilement à la demande de chauffage pour le climat nordique en évitant un recours important à l'appoint électrique, et ce, malgré les températures hivernales relativement basses.

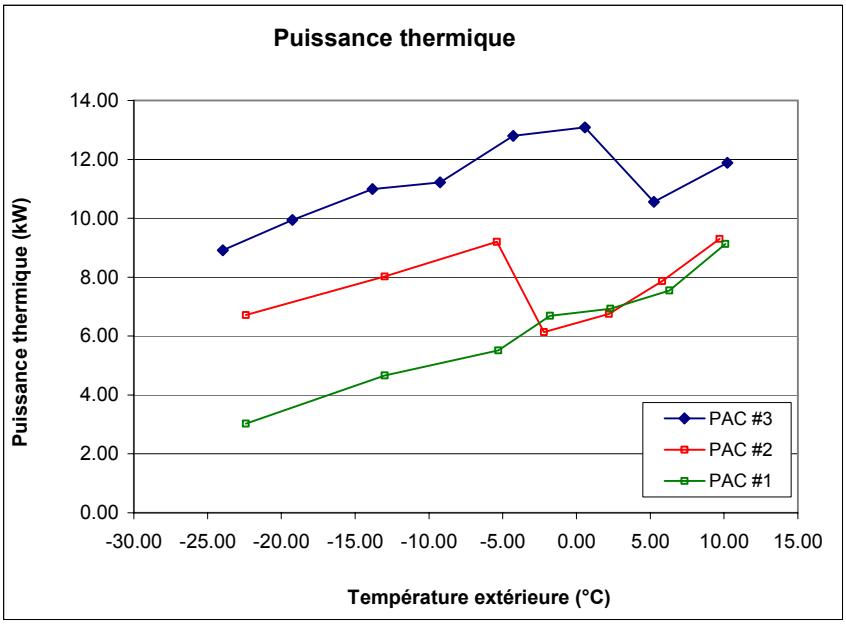

Figure 3 : Comparaison des puissances thermiques de chaque technologie (incluant le dégivrage) – résultats expérimentaux

La figure 4 présente l'évolution, avec la température extérieure, du coefficient de performance (COP), incluant la consommation des auxiliaires et le dégivrage. Pour les trois technologies,

les COP sont du même ordre et ont tendance à décroitre lorsque la température extérieure diminue. La technologie à vitesse variable (PAC #3) a un COP légèrement inférieur aux deux autres technologies pour des températures inférieures à 0°C. La chute du COP à 0°C (PAC #3) est probablement causée par l'injection de fluide frigorigène dans le compresseur nécessaire au maintien de la pression de refoulement. Néanmoins, à très basse température, la performance de la PAC #1 se dégrade sensiblement et son efficacité devient semblable à celle de la PAC #3.

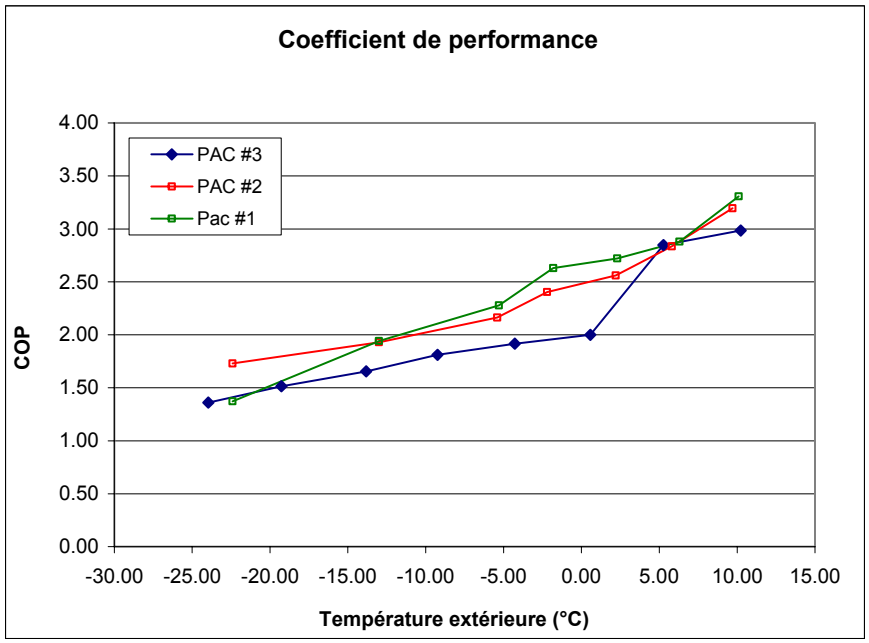

Figure 4 : Comparaison des coefficients de performance de chaque technologie (incluant le dégivrage) – résultats expérimentaux

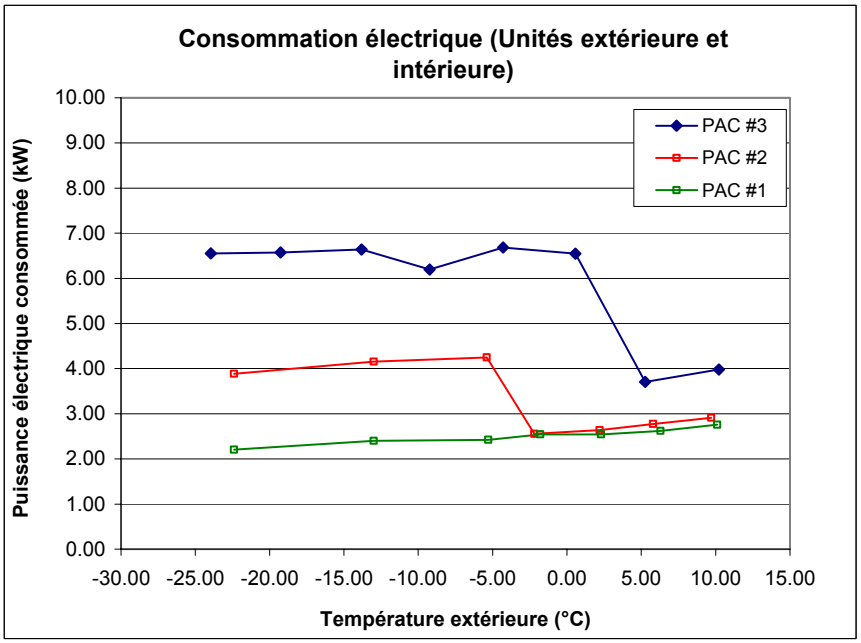

Figure 5 : Comparaison des consommations électriques de chaque technologie (incluant le dégivrage) – résultats expérimentaux

La figure 5 présente l'évolution des consommations électriques pour les trois technologies, incluant la consommation de l'unité de ventilation. La puissance de ventilation mesurée est constante et indépendante des paramètres de fonctionnement testé. Elle est de 220 W pour les PAC #1 et #2 et de 230 W pour la PAC #3. De manière générale, celle-ci diminue légèrement avec la température extérieure. Pour la PAC bi-étagée (PAC #2) et celle à vitesse variable (PAC #3), il y a deux niveaux de puissances perceptibles à pleine charge. Pour la PAC bi-étagée, la consommation électrique augmente au alentour de -5 °C, car le pré-compresseur est activé. Dans le cas de PAC à vitesse variable il s'agit de la vitesse de rotation du compresseur qui augmente au alentour de 0°C.

Effet du débit d'air sur les performances de la PAC

Des tests ont été effectués dans le but d'identifier l'impact du débit d'air de ventilation sur les performances de la PAC #3. Les trois débits testés sont 800, 1000 et 1200 CFM. Il s'agit des débits sélectionnés sur l'unité de ventilation, donc les débits réels mesurés (820 CFM, 1060 CFM, 1220 CFM) sont légèrement différents selon les pertes de charge du réseau de distribution d'air. On observe que les performances mesurées à 1000 et 1200 CFM sont identiques. Ceci indique qu'un surdimensionnement du débit n'entraine pas une amélioration des performances de l'équipement. Toutefois, à 800 CFM, la puissance thermique a diminué d'environ 10 % à 20 % (figure 6) et le COP à chuter de 2 % à 15 % (figure 7) selon les conditions climatiques imposées. Ceci indique clairement qu'un débit d'air de ventilation sous-dimensionné provoque une diminution importante des performances de la PAC. À noter que la puissance de ventilation est de 140 W à 800 cfm, 230 W à 1000 cfm et 360 W à 1200 cfm.

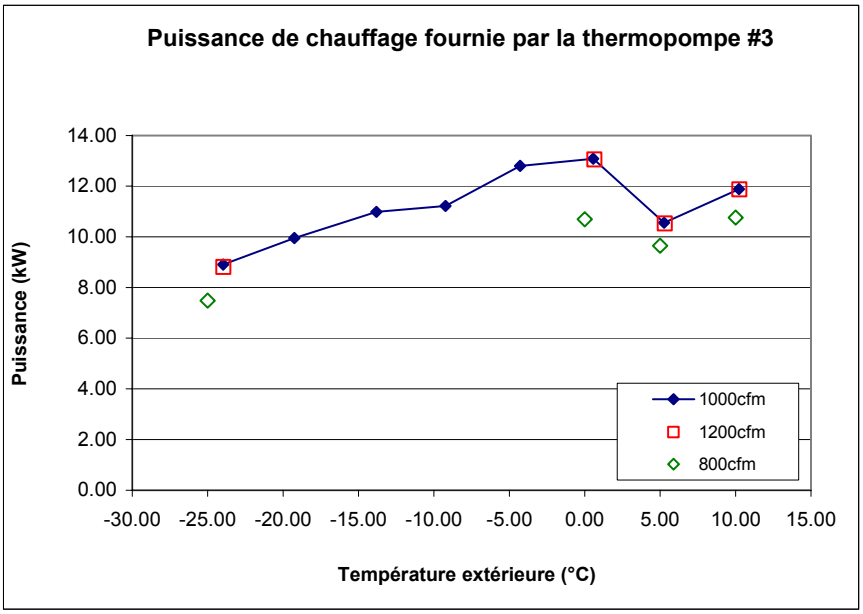

Figure 6 : Effet du débit d'air de ventilation sur la puissance de chauffage (incluant le dégivrage) – résultats expérimentaux

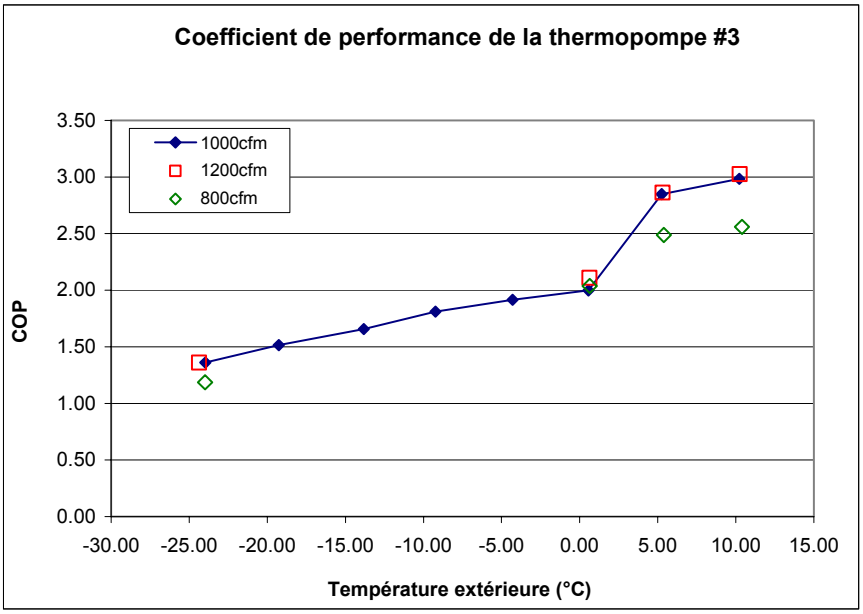

Figure 7 : Effet du débit d'air de ventilation sur le coefficient de performances (incluant le dégivrage) – résultats expérimentaux

Effet du dégivrage sur les performances de la PAC

La stratégie de dégivrage est abordée de différentes manières par les manufacturiers. La plus simple consiste à imposer une fréquence de dégivrage. Cette stratégie est appliquée pour les PAC #2 et PAC #3. La fréquence de dégivrage est constante dans le cas de la PAC #3 et variable en fonction de la température extérieure pour la PAC #2. Cette stratégie présente l'avantage d'éviter d'avoir une diminution des performances avant de dégivrer. Toutefois, elle implique une augmentation potentielle du nombre de dégivrage, et peut entrainer une diminution des performances journalières en comparaison avec d'autres contrôles du dégivrage. L'autre stratégie, appliquée à la PAC #1, consiste à détecter l'apparition du givre avant de lancer le dégivrage. L'avantage de ce type de dégivrage est qu'il est optimisable pour réduire la consommation d'énergie, néanmoins, il est compliqué à implémenter.

Une des difficultés dans l'étude du dégivrage est causée par le délai d'acquisition. En effet, l'acquisition s'effectue environ toutes les 35 secondes, donc l'incertitude engendrée est de l'ordre de 1min10s, soit environ 10 % de la durée d'un dégivrage. De plus, dans le cas de la PAC à vitesse variable (PAC #3), le temps de mise en régime du compresseur pour atteindre le régime permanent peut prendre quelques minutes. Ceci augmente donc la durée estimée du dégivrage. Il est évident que la mise en régime du compresseur après le dégivrage pourrait être considérée comme du chauffage, et donc être enlevée de la durée du dégivrage. Le choix de l'inclure dans la durée du dégivrage repose sur le fait qu'il s'agit d'un phénomène directement lié au dégivrage, et qu'il est, tout comme le temps d'inversion du cycle, une étape dans la procédure de dégivrage.

La fréquence, la durée moyenne et la durée totale des dégivrages semblent plus grandes pour la PAC #3 que pour les deux autres technologies (Figure 8 et Figure 9). Or, il s'agit de la technologie ayant la plus faible diminution des performances journalières. Une des hypothèses pour expliquer ceci repose sur le fait que la vitesse de compresseur (PAC#3) est moins élevée en dégivrage qu'en chauffage. De ce fait, la durée importante des dégivrages est compensée par une faible consommation du compresseur et un faible soutirage d'énergie dans le bâtiment.

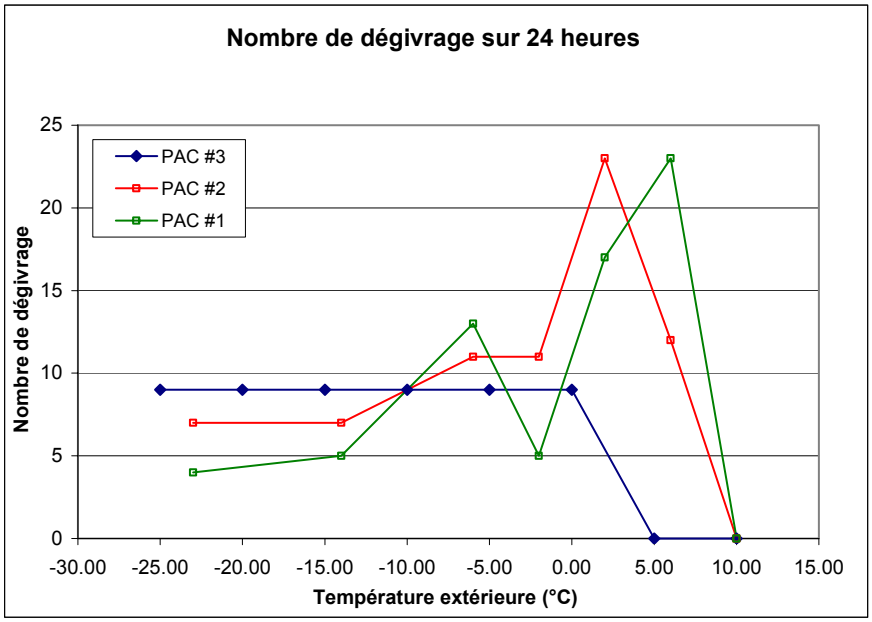

Figure 8 : Nombre de dégivrage sur 24 h de fonctionnement – résultats expérimentaux

Pour la PAC#3, la fréquence du déclenchement du dégivrage est constante même si ceci n'est pas requis. En effet, aucune diminution de la puissance de chauffage et du COP n'est perceptible entre deux dégivrages, ce qui laisse supposer que la fréquence de dégivrage soit surestimée pour les conditions testées. Une perte d'efficacité est donc causée par cette opération. Toutefois, leur importance est relativement faible (5.4 % sur la puissance de chauffage et 2.5 % sur le COP)). L'amélioration de la stratégie de dégivrage pour cette technologie ne devrait pas provoquer une amélioration importante de sa performance journalière.

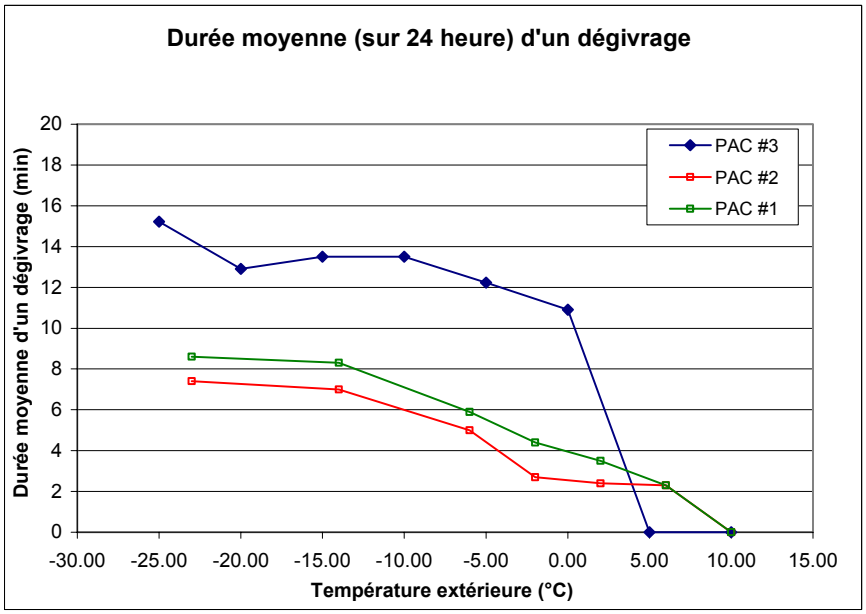

Figure 9 : Durée moyenne d'un dégivrage sur 24 h de fonctionnement – résultats expérimentaux – résultats expérimentaux

L'analyse des performances instantanées a été effectuée en utilisant les performances moyennes sur une plage de fonctionnement de 30 minutes. Cette plage de fonctionnement a été sélectionnée de manière à y exclure les phénomènes pouvant affecter les performances des PAC (dégivrage, arrêt et démarrage du compresseur…). Ces résultats ont été comparés aux performances obtenues lors d'un fonctionnement en continu sur une période de 24 h (incluant les dégivrages) dans le but d'obtenir l'effet des dégivrages sur les performances des PAC. En dessous de 0°C, la puissance thermique journalière de la PAC #3 (figure 10) diminue d'en moyenne de 5.4 % par rapport à la valeur instantanée. Le COP journalier diminue quant à lui d'en moyenne 2.5 % pour des températures inférieures à 0°C (figure 11).

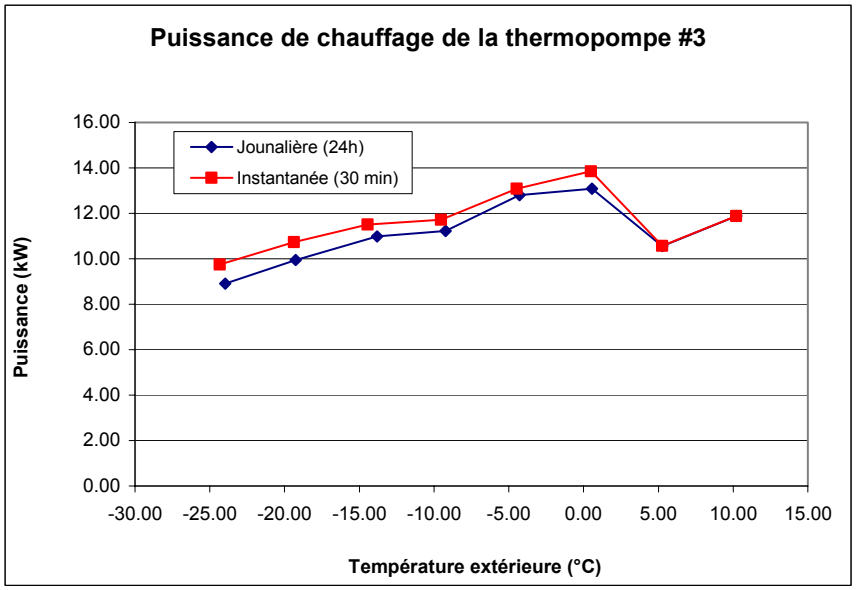

Figure 10 : Puissance de chauffage instantanée et journalière – résultats expérimentaux

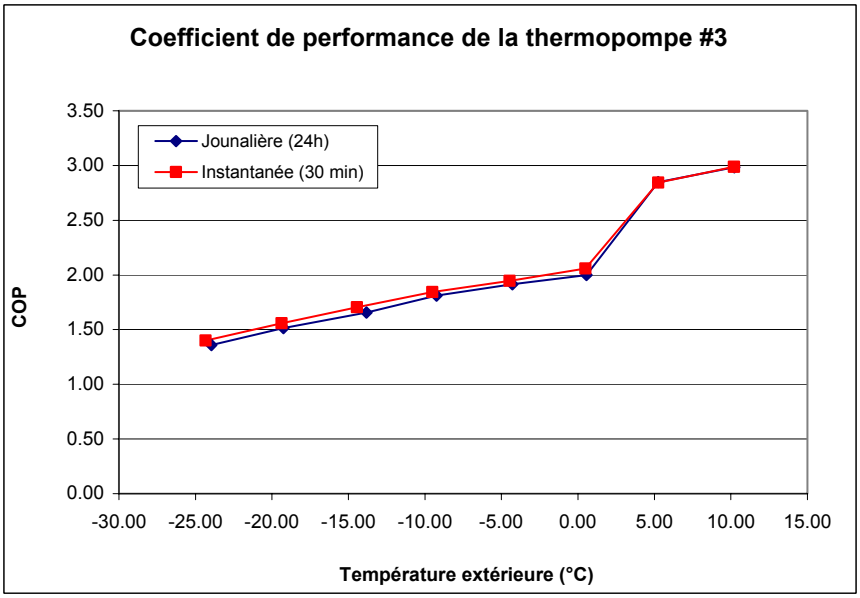

Figure 11 : COP instantané et journalier – résultats expérimentaux

5 Résultats des simulations

Des simulations ont été effectuées dans le but d'évaluer les économies d'énergie obtenues par l'utilisation des trois technologies testées. Afin d'évaluer l'effet de la charge de chauffage sur les économies d'énergie, les résultats sont présentés pour des bâtiments ayant des besoins de chauffage de 12200 kWh/an et de 19200 kWh/an.

La Figure 12 présente les puissances de chauffage (incluant l'effet du dégivrage) des 3 PAC ainsi que la charge thermique du bâtiment « 1990 ». Il apparaît que les PAC #2 et #3 ont un point d'équilibre avec le bâtiment qui est de l'ordre de -30°C alors que celui de la PAC #1 est d'environ -15°C.

Néanmoins, il y a peu d'heures de chauffage en dessous de -15°C, ce qui permettrait à la PAC #1 de fonctionner la majorité du temps. Les simulations sont comparées à un chauffage central résistif.

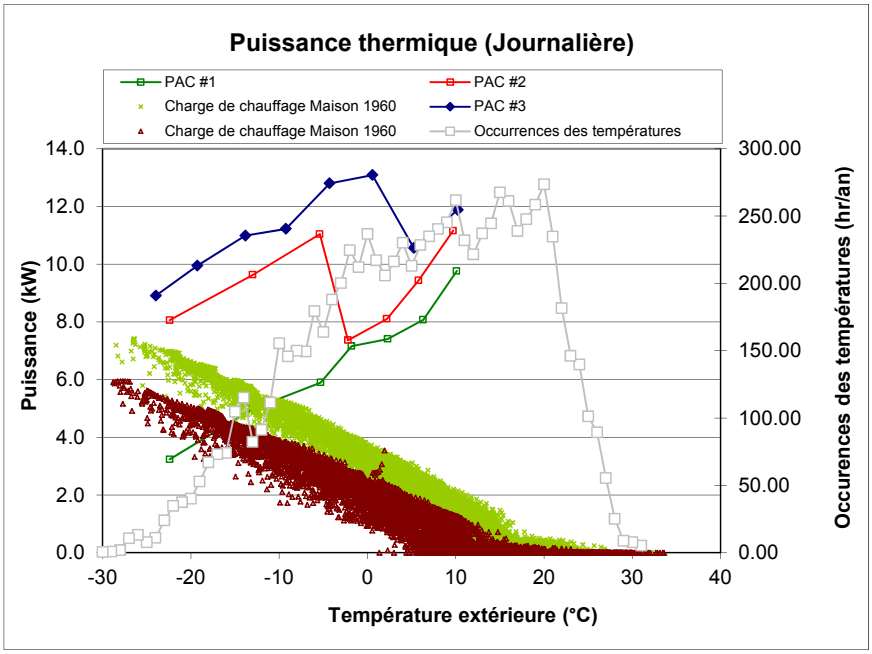

Figure 12 : Puissances thermiques simulées (1000 cfm)

Les résultats des simulations sont récapitulés dans les tableaux 2 et 3. Les économies d'énergie, pour la maison « 1990 », sont comprises entre 48 % et 55 % pour les trois technologies (tableau 2). La PAC #1 couvre 82 % des besoins de chauffage et les PAC #2 et PAC #3 comblent 99 % de la demande de chauffage. Cette différence s'explique par la puissance de chauffage élevée pour les PAC #2 et PAC #3 lorsque la température extérieure est basse.

Des résultats similaires sont obtenus pour la maison « 1960 ». La consommation d'électricité par rapport à un chauffage résistif est respectivement de 42, 55 et 49 % pour les PAC #1, PAC #2, et PAC #3. La PAC #1 fournit 70 % de la demande en chauffage et les PAC #2 et #3 comblent 98 % des besoins. Du fait de la plus grande couverture des besoins de la PAC #3 par rapport à la PAC #1, et malgré son COP moins grand (Figure 11), la PAC #3 permet d'obtenir des économies d'énergie de 10612 kWh/an contre 8107 kWh/an pour la PAC #1.

Tableau 2 : Économies d'énergie (maison « 1990 »)

	Chauffage résistif (référence)	PAC #1	PAC #2	PAC #3
Besoin de chauffage (kWh/an)	12162	12248	12247	12184
Consommation (kWh/an)	12162	6418	5555	6277
Chauffage résistif (kWh/an)	12162	2191	80	59
Énergie fournie par la PAC (%)	0.0%	82.1%	99.3%	99.5%
Économie (kWh/an)	0	5830	6692	5908
Économie (%)	0%	48%	55%	48%
$COP_{chauffage}$ (moyen)	1	1.91	2.20	1.94
HSPF	-	6.51	7.52	6.63

Tableau 3 : Économies d'énergie (maison « 1960 »)

	Chauffage résistif (référence)	PAC #1	PAC #2	PAC #3
Besoin de chauffage (kWh/an)	19167	19285	19391	19214
Consommation (kWh/an)	19167	11178	8779	9768
Chauffage résistif (kWh/an)	19167	5728	417	347
Énergie fournie par la PAC (%)	0.0%	70.3%	97.9%	98.2%
Économie (kWh/an)	0	8107	10612	9446
Économie (%)	0%	42%	55%	49%
$COP_{chauffage}$ (moyen)	1	1.73	2.21	1.97
HSPF		5.89	7.54	6.71

6 Analyse financière

Les résultats d'économie établis précédemment peuvent être utilisés afin d'effectuer une analyse économique sommaire. L'analyse présentée est basée sur le prix d'achat, le prix de l'électricité et les économies potentielles dans le contexte québécois (Tableau 4). Elle exclut le coût d'entretien. L'analyse est effectuée pour deux cas. Le premier (cas 1) base l'analyse sur le fait que les PAC sont achetées spécifiquement pour économiser de l'énergie durant la période de chauffage. Dans ce cas, la totalité du coût d'acquisition de l'équipement doit être prise en considération. Le coût du système de référence (fournaise électrique) n'est pas retranché au prix d'achat de la PAC dans l'analyse économique. Ceci suppose donc que la PAC est installée dans une résidence ayant déjà un système de chauffage central (bâtiment existant). Pour un bâtiment neuf, il faudrait soustraire ce coût de référence au prix d'achat de la PAC. Le second cas (cas 2) fait l'hypothèse qu'un besoin de climatisation a menée à acheter une PAC. De ce fait, l'analyse est basée sur une comparaison entre le coût d'acquisition d'une climatisation centrale (estimé à 4000 $) et celui d'une PAC. Seul le surcout d'acquisition est donc considéré pour le cas 2.

Tableau 4 : Paramètre de l'analyse économique

	PAC #1	PAC #2	PAC #3
Prix d'achat ($)	5815	13965	8355
Économies (kWh/an)	5830	6692	5908
	8107	10612	9446
Prix électricité ($/kWh), 2009	0.0746	0.0746	0.0746
Durée de vie (ans)	20	20	20
Taux d'inflation	2 %	2 %	2 %
Taux d'actualisation	6.46 %	6.46 %	6.46 %
Climatiseur conventionnel ($)	4000	4000	4000

Les résultats font ressortir que pour les résidences ayant environ 12000 kWh/an de chauffage, et suivant un scénario optimiste, c'est-à-dire qu'il n'y a aucun entretien, aucune diminution des performances et que la PAC fonctionne sans « cut-off », il n'est pas possible d'avoir une rentabilité sur ce type d'équipement avec leur coût actuel. En effet, les temps de retour actualisés sont généralement proche, voir supérieurs à la durée de vie des équipements. De ce fait, la VAN, qui correspond à la somme des flux monétaires annuels actualisés, est négative pour les PAC #1 et #2 alors qu'elle est quasiment nulle pour la PAC #1. Dans le cas 2, c'est-à-dire lorsque seul le surcoût de la PAC par rapport à une climatisation conventionnelle est considéré, l'analyse économique fait ressortir des temps de retour actualisés de 3.5 ans pour la PAC #1, 11.4 ans pour la PAC #3 et supérieur à 20 ans pour la PAC #2. De ce fait, une PAC conventionnelle (PAC #1) est rentabilisée plus rapidement que les nouvelles technologies qui apparaissent sur le marché. Ceci s'explique par le coût élevé de ces nouveaux équipements, et par la faible différence d'économie d'énergie qu'ils engendrent.

Tableau 5 : Résultats de l'analyse économique (maison « 1990 »), cas 1 ; cas 2

	PAC #1	PAC #2	PAC #3
Temps de retour brut (ans)	11.3 ; 3.5	>20 ; >20	16.6 ; 8.7
Temps de retour actualisé (ans)	16.4 ; 4.1	>20 ; >20	>20 ; 11.4
VAN 20 ans ($)	806 ; 4806	-8234 ; -4234	-1880 ; 2120

Les résultats pour les résidences ayant environ 19000 kWh/an de chauffage (Tableau 6), et suivant un scénario optimiste, la PAC conventionnelle a un temps de retour plus intéressant que les nouvelles technologies. Les PAC #2 et #3 sont difficilement rentabilisables dans les conditions actuelles (investissement, coût de l'électricité).

Tableau 6 : Résultats de l'analyse économique (maison « 1960 »), cas 1 ; cas 2

	PAC #1	PAC #2	PAC #3
Temps de retour brut (ans)	6.5; 2.0	19.9 ; 14.2	10.7 ; 5.6
Temps de retour actualisé (ans)	8.0 ; 2.2	>20 ; >20	15.0 ; 6.7
VAN 20 ans ($)	5716; 9716	-4909 ; 909	1722 ; 5722

7 Conclusions

Une étude expérimentale a été menée sur des PAC destinées au climat nordique dans le but de mesurer leurs performances. Les données expérimentales obtenues ont été incorporées dans un modèle de maison afin d'évaluer le potentiel d'économie d'énergie dans le résidentiel québécois. Une analyse économique est présentée dans le but d'évaluer la rentabilité des technologies testées.

Les résultats expérimentaux font ressortir que des technologies disponibles sur le marché peuvent fonctionner à des températures de -30 °C tout en ayant une capacité de chauffage importante. L'utilisation de ces technologies dans le résidentiel québécois entraîne des économies d'énergie pouvant atteindre 55 % de la consommation en chauffage, par rapport à un système central électrique à air pulsé. Néanmoins, les coûts d'investissement de ces technologies ne permettent pas de les justifier du point de vue économique par rapport aux PAC conventionnelles qui sont, elles-mêmes, difficilement rentabilisables. La rentabilité des nouvelles technologies de PAC peut être atteinte lorsque que seul le surcoût par rapport à une climatisation centrale est pris en compte dans l'analyse économique.

8 References

Karlsson, F., Lidbom, P., Axell, M.m Lindberg, U., 2006, *Air to air heat pumps evaluated for Nordic circumstances*, IEA Heat pump newsletter, vol. 24, n. 4/2006

Fairey, F., Parker, D., Wilcox, B., Lombardi, M., 2004, *Climate Impacts on heating seasonal performance factor (HSPF) and Seasonal energy efficiency ratio (SEER) for air source heat pump*, Florida Solar Energy Center, FSEC-PF-413-04

Leduc M.-A., Daoud A., 2010, *Gestion de la demande pour le renforcement de la fiabilité du réseau,* LTE-RT-2010-0096, Hydro Quebec