

Optimisation des performances saisonnières

5.1 Introduction

Disposant d'un modèle de calcul « PAC + Bâtiment », le chapitre 5 classifie à présent les voies d'optimisation des performances saisonnières des pompes à chaleur réversible, basé sur la méthode de calcul des performances saisonnières exposée dans les chapitres 3 et 4.

Les voies d'optimisation sont classées sous deux grands axes :

- Optimum du point de vue local : optimisation par rapport à une courbe de besoin donnée, on s'intéresse particulièrement à la régulation de la puissance, et à la logique de la conception du compresseur « optimisé pour le mode chaud » ou « optimisé pour le mode froid » et à quelques autres variantes définies au cours de ce chapitre.

- Optimum du point de vue de l'industriel : cela passe par l'intégration de composants innovants à fort enjeu concurrentiel dans le but de bien positionner les produits vis-à-vis de l'étiquetage européen des systèmes de climatisation: SEER et SCOP normalisé.

Les solutions améliorées seront évaluées par rapport à une PAC de référence existante sur le marché des systèmes thermiques.

Ensuite, les améliorations exposées seront complétées par une étude technico-économique, comportant une approximation de la décomposition des coûts des principaux composants d'une PAC, afin d'avoir une estimation du temps de retour sur investissement de la machine optimisée en fonction du lieu géographique de son installation.

5.2 Optimum de point de vue local

L'optimisation du point de vue local est présentée ici **de manière à faire ressortir les spécificités propres aux différents bâtiments dans les différents climats**. C'est une approche assez théorique puisqu'il n'est pas envisageable de multiplier les variantes constructives. Cette optimisation consiste à améliorer les performances de la PAC par rapport à une courbe de besoin donnée. Pour ce faire, on propose plusieurs méthodes d'amélioration :

- amélioration composant par composant ;
- régulation de la puissance du système ;
- dimensionnement du compresseur en fonction d'une priorité de fonctionnement en mode chaud ou en mode froid.

5.2.1 Courbe de charge

Les besoins de chauffage et de rafraîchissement d'un bâtiment dépendent du type du bâtiment résidentiel ou tertiaire (bureau, hôtel, restaurant, bâtiment de santé, ...), de son âge ancien ou neuf, et de sa zone géographique (cf. chap. 4).

Pour répondre au mieux aux besoins thermiques qui varient au cours de l'année en assurant l'efficacité énergétique, le système thermique peut être conçu de manière à privilégier les fonctionnements les plus fréquents.

5.2.2 Machine de référence

Les performances d'une machine de référence considérée sont évaluées dans ce paragraphe. La machine choisie appartient à la nouvelle gamme ILD2, modèle 300 CIAT,

PAC air / eau réversible (Figure 5-1). Cette gamme représente déjà une évolution par rapport aux systèmes existants. La PAC fonctionne au R410A et est constituée de deux compresseurs scroll ZP180 (deux étages de puissance, 50 et 100 %) en parallèle de taille identique, un échangeur à plaques (64 plaques), une batterie tubes ailetés en U à ailettes ondulées gaufrées et de deux détendeurs thermostatiques fonctionnant respectivement en mode été et hiver.



Figure 5-1 : Machine de référence CIAT ILD2

Cette PAC de référence a une puissance frigorifique nominale de 75 kW en mode refroidissement ($T_{\text{eau}} = +12\text{ °C} / +7\text{ °C}$ et température entrée d'air condenseur $+35\text{ °C}$) et une puissance calorifique nominale de 81 kW ($T_{\text{sortie eau chaude}} = +45\text{ °C}$ et air extérieur $+7\text{ °C}$ pour une humidité relative $HR = 86\%$). Cependant, comme expliqué au chapitre précédent les besoins et les puissances du bâtiment de référence varient en fonction des zones climatiques et du type de bâtiment. Comme précédemment, on adapte les différentes configurations de bâtiments à la puissance de la PAC considérée en divisant les besoins horaires par un facteur de dimensionnement dont on rappelle sa formule :

$$\text{facteur} = \frac{P_{\max(\text{froid})}}{P_{\text{PAC}} \left(T \left(P_{\max(\text{froid})} \right) \right)}$$

Les facteurs de dimensionnement des différentes zones géographiques et type de bâtiment issus des besoins et puissances maximales représentés dans le chapitre précédent dans les tableaux 4.6 et 4.7, sont déduits :

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Bâtiment ancien	1,270	1,389	1,227	1,015
Bâtiment neuf	0,825	0,837	0,800	0,653

Tableau 5-1 : Facteur de dimensionnement en fonction de la zone géographique et du type bâtiment

On constate que la PAC de référence choisie est sous dimensionnée pour les bâtiments anciens ($\text{facteur} > 1$) et surdimensionnée ($\text{facteur} < 1$) pour les bâtiments neufs.

Les performances saisonnières obtenues en couplant cette machine de référence au bâtiment de bureaux de surface de 1000 m² (cf. § 4.3.2) corrigées par le facteur de dimensionnement, sont rassemblées pour les différentes zones géographiques dans le Tableau 5-2 dans le cas d'un bâtiment ancien et dans le Tableau 5-3 pour un bâtiment neuf :

Machine de référence 2 X ZP180 Bâtiment ancien		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	SEER	4,69	4,86	4,90	5,21
	SCOP	2,90	2,31	2,44	2,48
	COP annuel	3,68	2,70	3,00	2,92

Tableau 5-2 : Performances annuelles de la machine de référence couplée à un bâtiment ancien

:

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence 2 X ZP180 Bâtiment neuf	SEER	4,80	4,80	4,82	5,15
	SCOP	2,88	2,32	2,48	2,50
	COP annuel	3,99	2,74	3,15	2,93

Tableau 5-3 : Performances annuelles de la machine de référence couplée à un bâtiment neuf

Les consommations annuelles électriques sont aussi calculées pour les différentes zones géographiques dans le Tableau 5-4 dans le cas du bâtiment ancien, ainsi que dans le cas du bâtiment neuf dans le Tableau 5-5.

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence 2 X ZP180 Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	17,5	8,9	10,4	7,5
	Consommations électriques chaud	11,8	34,0	23,1	26,5
	Consommations résistances carter	2,3	2,3	2,3	1,9
	Total	31,7	45,2	35,7	35,9

Tableau 5-4 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence en consommation (bâtiment ancien)

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence 2 X ZP180 Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	13,6	5,5	8,0	4,5
	Consommations électriques chaud	2,1	13,8	11,2	10,9
	Consommations résistances carter	2,2	2,0	1,9	1,8
	Total	18,0	21,3	21,1	17,3

Tableau 5-5 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence en consommation (bâtiment neuf)

N.B : La consommation des résistances de carter comprend la consommation de la résistance de chaque compresseur quand la machine est à l'arrêt et la consommation d'une seule résistance quand la machine fonctionne avec un seul compresseur. La puissance d'une résistance de carter est de l'ordre de 180 W sur cette gamme de compresseur.

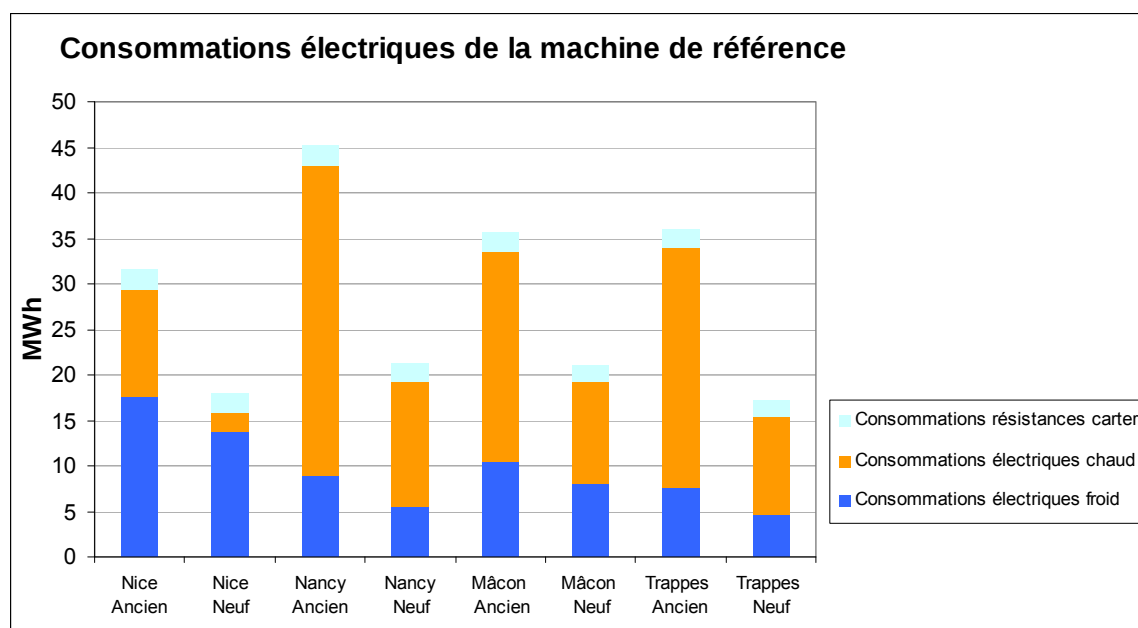


Figure 5-2 : Consommations électriques annuelles de la machine de référence

La distribution des consommations électriques annuelles de la machine de référence est donnée (Figure 5-2) pour les différentes zones géographiques et types de bâtiments. A part Nice, les climats français étudiés consomment plus pour le chauffage que le refroidissement.

5.2.3 Etagement de puissance

Une première solution d'adaptation à la demande thermique du bâtiment consiste en un fractionnement de la puissance entre deux ou trois petits compresseurs. Le taux de partition de puissance peut être par exemple 33 % - 66 % pour 2 compresseurs ce qui donne 3 étages possibles.

Cette partition de puissance permet un gain de performance à charge partielle : en effet à puissance réduite, les échangeurs se trouvent « surdimensionnés » par rapport au débit de fluide frigorigène qui est relativement plus faible qu'à pleine puissance.

On résume les options possibles pour le choix des compresseurs d'un groupement tandem ou trio à partir de compresseurs existants sans les modifier pour les modes chaud et froid :

- Tandem : 50 % - 50 %, 33 % - 66 %, et 40 % - 60 %
- Trio : 33 % - 33 % - 33 %

Le groupement trio n'est pas conseillé par les fabricants de compresseurs pour des installations de faible puissance.

Une configuration d'un système de même puissance nominale que celle de la machine de référence d'environ 80 kW (en chaud) est présentée ci-après. D'après le catalogue de sélection du compresseur [Copeland], les puissances de 3 compresseurs ZP120, ZP180, et ZP235 sont données pour les conditions nominales de température d'évaporation de 5 °C et de température de condensation de 35 °C en mode froid, et de température d'évaporation de 5 °C et de température de condensation de 50 °C en mode chaud :

COMPRESSEURS (*) COPELAND	En froid $T_{\text{évap}} = 5\text{ °C}$ $T_{\text{cond}} = 35\text{ °C}$		En chaud $T_{\text{évap}} = 5\text{ °C}$ $T_{\text{cond}} = 50\text{ °C}$	
	P_{frigo} (kW)	P_{comp} (kW)	P_{calo} (kW)	P_{comp} (kW)
ZP120	32,0	5,8	34,0	8,2
ZP180	47,0	8,8	50,5	12,1
ZP235	62,5	11,9	65,5	15,9

Tableau 5-6 : Puissances nominales des compresseurs ZP120 ZP180 et ZP235 [Copeland]
(*) les valeurs sont fournies pour un sous refroidissement de 0 K et surchauffe de 10 K, à 50 Hz, et pour le fluide 410A

La combinaison des compresseurs peut aboutir aux groupements suivants :

- (i) Partition de puissance de 50 % - 50 % : 2 compresseurs ZP180 (machine de référence)
- (ii) Partition de puissance de 33 % - 66 % : 1 compresseur ZP120 et 1 compresseur ZP235
- (iii) Partition de puissance de 33 % - 33 % - 33 % : 3 compresseurs ZP120

Les partitions (ii) et (iii) se traduisent par 3 étages de puissance de 33%, 66% et 100%. La configuration (ii) est préférée.

Les résultats de simulations des performances saisonnières de la machine de référence équipée des 2 compresseurs ZP120 et ZP235 (33% - 66%) à la place du tandem 2xZP180

couplée au bâtiment de bureau décrit au § 4.3.2, sont rapportées ci-après, pour le bâtiment de référence ancien (Tableau 5-7) et neuf (Tableau 5-8) dans les différentes zones géographiques, et cela pour un niveau de température en chauffage de 40 °C – 45 °C, et un niveau de température en refroidissement de 7 °C – 12 °C ; les autres éléments de la PAC de référence sont inchangés.

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence ZP120 + ZP235 Bâtiment ancien	SEER	4,45	4,45	4,51	4,73
	SCOP	3,97	2,98	3,22	3,26
	COP annuel	3,91	3,13	3,40	3,41

Tableau 5-7 : Performances annuelles de la machine de référence équipée des compresseurs ZP120 et ZP235 couplée à un bâtiment ancien

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence ZP120 + ZP235 Bâtiment neuf	SEER	4,57	4,46	4,55	4,73
	SCOP	3,90	3,00	3,29	3,33
	COP annuel	3,91	3,09	3,48	3,34

Tableau 5-8 : Performances annuelles de la machine de référence équipée des compresseurs ZP120 et ZP235 couplée à un bâtiment neuf

Les performances annuelles simulées pour le bâtiment neuf sont meilleures que celles simulées pour le bâtiment ancien quelle que soit la zone géographique,

Les résultats détaillés des consommations électriques de cette option d'étagement de puissance sont aussi présentés pour les différentes zones géographiques dans le Tableau 5-9 dans le cas du bâtiment ancien :

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence ZP120+ZP235 Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	18,5	9,7	11,3	8,3
	Consommations électriques chaud	8,6	26,3	17,5	20,2
	Consommations résistances carter	2,7	2,9	2,8	2,3
	Total	29,8	39,0	31,6	30,8

Tableau 5-9 : Résultats de simulations saisonnières en consommations de la machine de référence équipée des compresseurs ZP120et ZP235 (bâtiment ancien)

Et dans le cas d'un bâtiment neuf dans le Tableau 5-10 suivant :

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence ZP120+ZP235 Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	14,3	5,9	8,5	5,0
	Consommations électriques chaud	1,6	10,7	8,4	8,2
	Consommations résistances carter	2,4	2,3	2,1	2
	Total	18,3	18,9	19,1	15,2

Tableau 5-10 : Résultats de simulations saisonnières en consommations de la machine de référence équipée des compresseurs ZP120et ZP235 (bâtiment neuf)

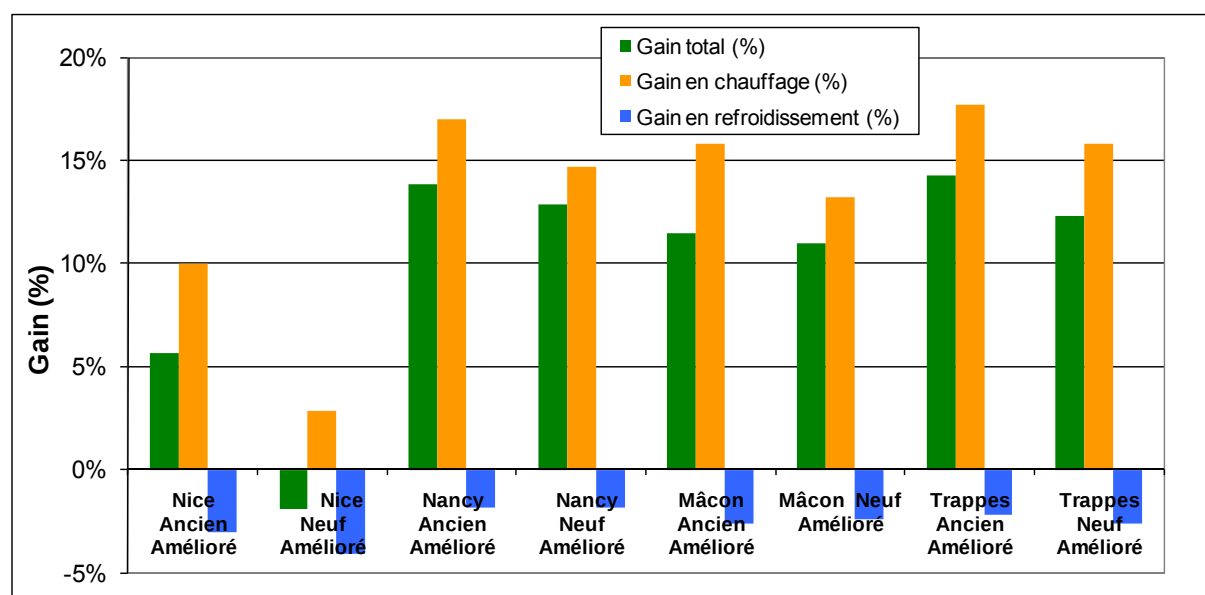


Figure 5-3 : Comparaisons des consommations électriques annuelles de l'option d'amélioration (compresseurs ZP120et ZP235) par rapport à la machine de référence

Une réduction des consommations électriques est observée par rapport au cas de référence qui peut atteindre 14 % dans les bâtiments anciens et 12 % dans les bâtiments neufs à Trappes.

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de Référence	Total consommations (Ancien)	31,7	45,2	35,7	35,9
	Total consommations (neuf)	18,0	21,3	21,1	17,3
Machine de Référence ZP120+ZP235	Total consommations (Ancien)	29,8	39,0	31,6	30,8
	Total consommations (neuf)	18,3	18,9	19,1	15,2
	Gain (Ancien) (%)	6 %	14 %	11 %	14 %
	Gain (Neuf) (%)	-2 %	13 %	11 %	12 %

Tableau 5-11 : Gain en consommations électriques de l'option d'amélioration par rapport à la référence

La faible perte à Nice (bâtiment neuf) est liée à l'interpolation entre étages de puissance.

5.2.4 Conception du compresseur orientée mode chaud ou mode froid

Une pompe à chaleur réversible équipée de 2 compresseurs offre l'opportunité d'une optimisation d'un premier compresseur pour le mode de chauffage et de l'autre pour le mode rafraîchissement. Cette optimisation affecte directement le rendement global. Le taux de compression varie en fonction des températures moyennes de la source et du puit :

- en saison de chauffage, la température extérieure est faible, et donc la pression d'évaporation, la température de condensation directement liée à la température du circuit d'eau est élevée induisant un taux de compression élevé,
- en saison de refroidissement le taux de compression est plus faible.

Par conséquent, en mode chauffage, le maximum du rendement global du compresseur sélectionné doit se situer pour un taux de compression élevé. Le compresseur retenu pour le mode de refroidissement, doit présenter son maximum de rendement global pour un taux de compression faible.

Le graphique suivant décrit bien ces optimums en fonction du taux de compression :

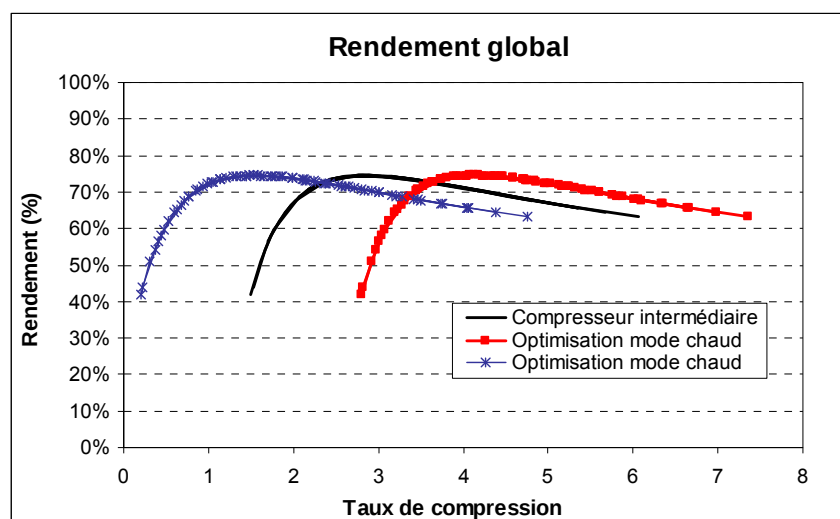


Figure 5-4: Rendement global attendu d'un compresseur optimisé pour le fonctionnement en mode chauffage (à droite) et pour le fonctionnement en mode froid (à gauche)

Ce graphique a été élaboré avec Danfoss en envisageant les solutions techniques suivantes : « anti-backflow », et « anti-overshoot ». Le « backflow » signifie le retour du fluide frigorigène de la haute pression à la basse pression, ce phénomène a lieu pour des taux de compression élevés. L'« overshoot » est le phénomène inverse qui se manifeste à des bas taux de compression. Les courbes réelles utilisées ne sont pas de simples translations, elles sont plus complexes et ne sont pas présentées car confidentielles.

Le choix d'un compresseur optimisé pour un taux de compression défini peut engendrer des problèmes liés à un fonctionnement hors du domaine d'optimisation.

L'effet de cette méthode de conception de compresseur sur les performances d'une pompe à chaleur est évalué par rapport au cas de la machine de référence couplée au bâtiment de bureau décrit au § 4.3.2, par simulation en remplaçant les modèles des deux compresseurs ZP180 standards par les modèles du compresseur CP_ch orienté mode chaud et compresseur du CP_fr orienté mode froid, sans modifier les autres composants de la PAC. La taille de chacun des compresseurs conçus est considérée égale au tandem 2xZP180 pour assurer la totalité de la puissance en mode chaud et mode froid.

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence CP_ch + CP_fr Bâtiment ancien	SEER	5,00	5,18	5,23	5,55
	SCOP	2,96	2,51	2,62	2,66
	COP annuel	3,85	2,93	3,23	3,13

Tableau 5-12 : Performances annuelles de la machine de référence équipée des compresseurs CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid couplée à un bâtiment ancien

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence CP_ch + CP_fr Bâtiment neuf	SEER	5,12	5,12	5,14	5,49
	SCOP	2,91	2,53	2,66	2,68
	COP annuel	4,20	2,96	3,36	3,13

Tableau 5-13 : Performances annuelles de la machine de référence équipée des compresseurs CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid couplée à un bâtiment neuf

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence CP_ch + CP_fr Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	16,4	8,4	9,8	7,1
	Consommations électriques chaud	11,6	31,2	21,4	24,7
	Consommations résistances carter	2,2	2,1	2,1	1,8
	Total	30,2	41,6	33,3	33,5

Tableau 5-14 : Résultats de simulations saisonnières en consommations de la machine de référence équipée des compresseurs CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid (bâtiment ancien)

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence CP_ch + CP_fr Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	12,8	5,1	7,5	4,3
	Consommations électriques chaud	2,1	12,7	10,4	10,1
	Consommations résistances carter	2,1	1,9	1,8	1,7
	Total	17,1	19,7	19,7	16,2

Tableau 5-15 : Résultats de simulations saisonnières en consommation de la machine de référence équipée des compresseurs CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid (bâtiment neuf)

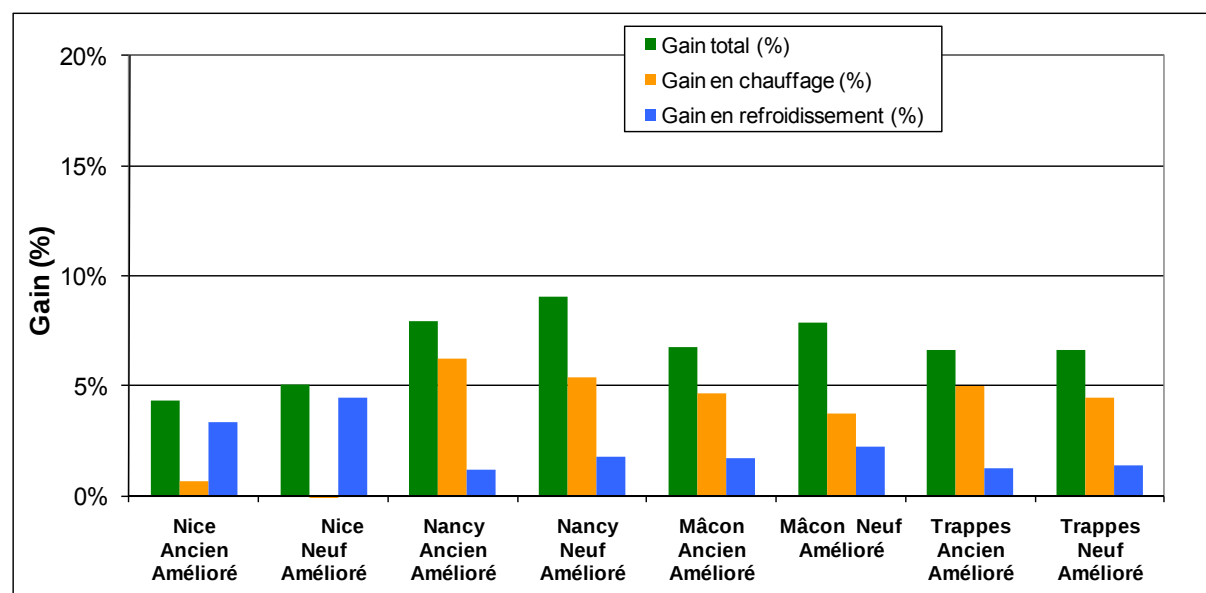


Figure 5-5 : Comparaisons des consommations électriques annuelles de l'option d'amélioration (compresseurs CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid) par rapport à la machine de référence

La réduction des consommations électriques atteinte par cette conception de compresseur est de l'ordre de 5 % à 9 % par rapport à la machine de référence pour les bâtiments anciens et neufs.

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de Référence	Total consommations (Ancien)	31,7	45,2	35,7	35,9
	Total consommations (neuf)	18,0	21,3	21,1	17,3
Machine de Référence CP_ch + CP_fr	Total consommations (Ancien)	30,2	41,6	33,3	33,5
	Total consommations (neuf)	17,1	19,7	19,7	16,2
	Gain (Ancien) (%)	4 %	8 %	7 %	7 %
	Gain (Neuf) (%)	5 %	9 %	8 %	7 %

Tableau 5-16 : Gains en consommations électriques de l'option d'amélioration par rapport à la référence

L'amélioration du rendement du compresseur en fonction du système dans lequel il va être inséré et notamment son optimisation en mode chaud ou en mode froid est l'objet de recherches par les fabricants de compresseurs.

5.2.5 Echangeurs surdimensionnés

Pour des raisons de compacité et de coût, les échangeurs de chaleur d'une PAC sont dimensionnés juste à la taille nécessaire pour un fonctionnement nominal de la machine. Un surdimensionnement des échangeurs améliore les échanges thermiques, contribuant à des performances accrues.

Pour évaluer cette option, on reprend la machine de référence couplée au bâtiment de bureau (§ 4.3.2) avec les mêmes types d'échangeurs mais surdimensionnés de 30 % sans changer les autres composants de la PAC. Par conséquent, l'échangeur à plaques passe de 64 plaques à 82 plaques, et le nombre de circuits de l'échangeur tubes ailetés est augmenté de 24 à 31 circuits.

Les simulations des performances saisonnières ont abouti aux résultats suivants :

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeurs surdimensionnés Bâtiment ancien	SEER	5,21	5,34	5,51	5,75
	SCOP	3,41	2,68	2,89	2,90
	COP annuel	4,14	3,07	3,47	3,35

Tableau 5-17 : Performances annuelles de la machine de référence équipée d'échangeurs surdimensionnés de 30 % couplée à un bâtiment ancien

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeurs surdimensionnés Bâtiment neuf	SEER	5,36	5,38	5,43	5,75
	SCOP	3,38	2,72	2,94	2,96
	COP annuel	4,41	3,13	3,60	3,36

Tableau 5-18 : Performances annuelles de la machine de référence équipée d'échangeurs surdimensionnés de 30 % couplée à un bâtiment neuf

A nouveau, les performances saisonnières de la PAC dans le bâtiment neuf sont meilleures que celles de la PAC couplée au bâtiment ancien. Les performances globales sont les plus élevées à Nice, et les plus faibles à Nancy.

Les consommations annuelles électriques sont aussi calculées pour les différentes zones géographiques dans le cas du bâtiment ancien et du bâtiment neuf :

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeurs surdimensionnés Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	15,8	8,1	9,3	6,8
	Consommations électriques chaud	10,1	29,3	19,5	22,7
	Consommations résistances carter	2,3	2,3	2,2	1,9
	Total	28,2	39,7	30,9	31,4

Tableau 5-19 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée d'échangeurs surdimensionnés de 30 % en consommation (bâtiment ancien)

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeurs surdimensionnés Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	12,2	4,9	7,1	4,1
	Consommations électriques chaud	1,8	11,8	9,4	9,2
	Consommations résistances carter	2,2	2,0	1,8	1,8
	Total	16,3	18,6	18,4	15,1

Tableau 5-20 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée d'échangeurs surdimensionnés de 30 % en consommation (bâtiment neuf)

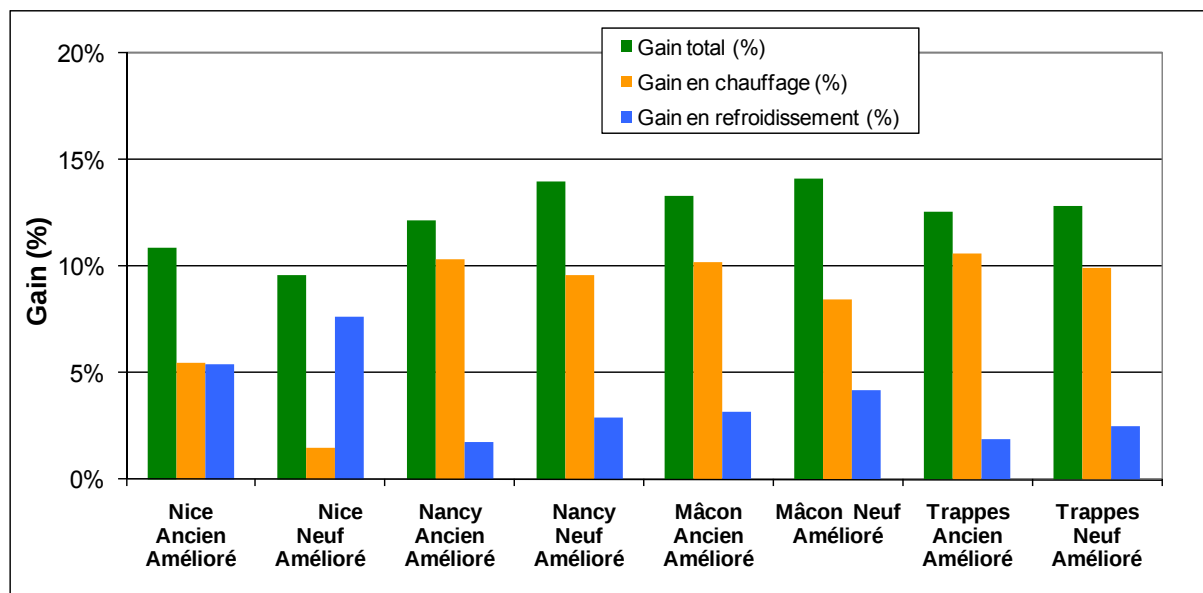


Figure 5-6 : Comparaisons des consommations électriques annuelles de l'option d'amélioration (échangeurs surdimensionnés de 30 %) par rapport à la machine de référence

Le surdimensionnement de 30 % des échangeurs par rapport à la machine de référence permet de diminuer la consommation électrique de 10 à 14 % en fonction de la zone climatique, pour les bâtiments anciens et neufs.

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de Référence	Total consommations (Ancien)	31,7	45,2	35,7	35,9
	Total consommations (neuf)	18,0	21,3	21,1	17,3
Machine de Référence Echangeurs surdimensionnés	Total consommations (Ancien)	28,2	39,7	30,9	31,4
	Total consommations (neuf)	16,3	18,6	18,4	15,1
	Gain (Ancien) (%)	11 %	12 %	13 %	13 %
	Gain (Neuf) (%)	10 %	14 %	14 %	13 %

Tableau 5-21 : Gains en consommations électriques de l'option d'amélioration par rapport à la référence

5.2.6 Ventilateur à vitesse variable

Avec un ventilateur à vitesse variable, la puissance absorbée est directement liée au débit d'air aspiré, et le ventilateur alimente l'échangeur à air avec un débit d'air adapté à la vitesse de rotation du compresseur.

Une comparaison entre les puissances absorbées relatives et les débits relatifs du ventilateur à deux vitesses fixes de la PAC de référence et ventilateur à vitesse variable est présentée dans le Tableau 5-22 :

PAC Prototype		PAC de référence	
Q_v	$P_{\text{absorbée}}$	Q_v	$P_{\text{absorbée}}$
100%	100%	100%	100%
93%	74%	100%	100%
75%	37%	48%	49%
46%	7%	48%	49%

Tableau 5-22 : Comparaison ventilateur à vitesse variable de la PAC Prototype et ventilateur à vitesse fixe de la PAC de référence

Le ventilateur à vitesse variable de la PAC prototype offre une plage de fonctionnement plus grande, et fournit 46 % du débit d'air nominal à 7 % de la puissance nominale.

Les simulations des performances saisonnières de la machine de référence équipée du ventilateur à vitesse variable décrit à la place du ventilateur à vitesse fixe, sans changer les autres composants, ont abouti aux résultats suivants :

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Ventilateur à vitesse variable Bâtiment ancien	SEER	4,96	5,14	5,19	5,50
	SCOP	3,09	2,46	2,60	2,64
	COP annuel	3,89	2,86	3,18	3,10

Tableau 5-23 : Performances annuelles de la machine de référence équipée d'un ventilateur à vitesse variable couplée à un bâtiment ancien

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Ventilateur à vitesse variable Bâtiment neuf	SEER	5,07	5,08	5,09	5,43
	SCOP	3,07	2,47	2,64	2,66
	COP annuel	4,19	2,90	3,32	3,10

Tableau 5-24 : Performances annuelles de la machine de référence équipée d'un ventilateur à vitesse variable à un bâtiment neuf

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Ventilateur à vitesse variable Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	16,6	8,4	9,9	7,1
	Consommations électriques chaud	11,1	31,9	21,7	24,9
	Consommations résistances carter	2,3	2,3	2,2	1,9
	Total	30,0	42,6	33,7	33,9

Tableau 5-25 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée d'un ventilateur à vitesse variable en consommation (bâtiment ancien)

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Ventilateur à vitesse variable Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	12,9	5,2	7,6	4,3
	Consommations électriques chaud	2,0	12,9	10,5	10,2
	Consommations résistances carter	2,2	2,0	1,9	1,8
	Total	17,1	20,1	20,0	16,3

Tableau 5-26 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée d'un ventilateur à vitesse variable en consommation (bâtiment neuf)

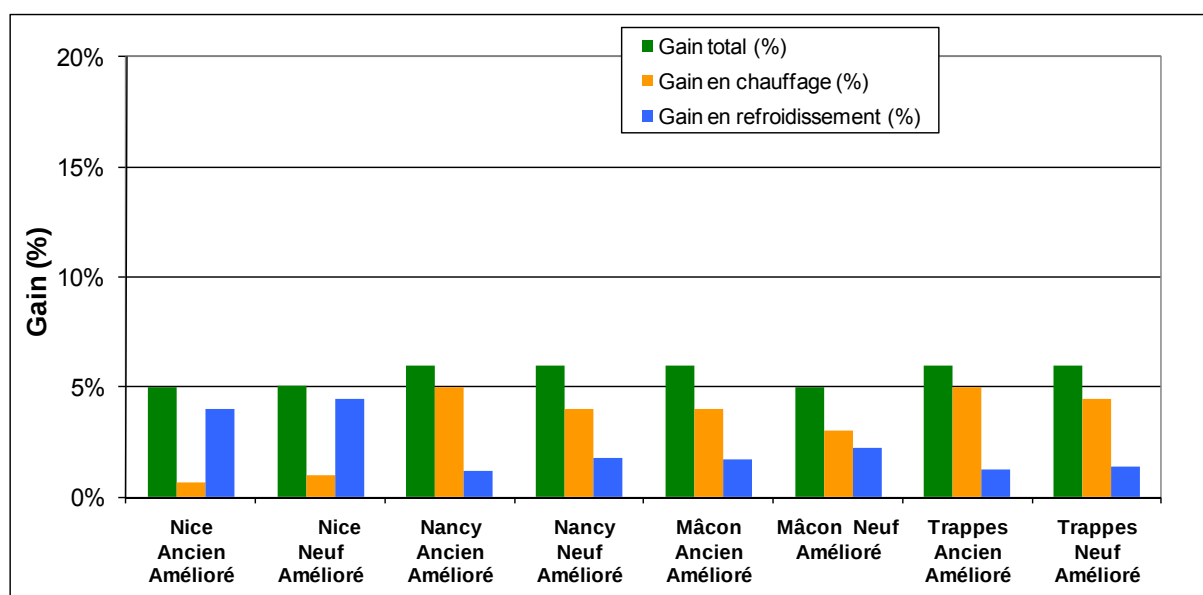


Figure 5-7 : Comparaisons des consommations électriques annuelles de l'option d'amélioration (ventilateur à vitesse variable) par rapport à la machine de référence

Un gain de l'ordre de 5 à 6 % est atteint par la PAC de référence équipée par un ventilateur à vitesse variable.

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de Référence	Total consommations (Ancien)	31,7	45,2	35,7	35,9
	Total consommations (neuf)	18,0	21,3	21,1	17,3
Machine de Référence Ventilateur à vitesse variable	Total consommations (Ancien)	30,0	42,6	33,7	33,9
	Total consommations (neuf)	17,1	20,1	20,0	16,3
	Gain (Ancien) (%)	5%	6%	6%	6%
	Gain (Neuf) (%)	5%	6%	5%	6%

Tableau 5-27 : C Gains en consommations électriques de l'option d'amélioration par rapport à la référence

5.3 Optimum du point de vue de l'industriel

5.3.1 Intégration de composants innovants à fort enjeu concurrentiel

Cette voie d'amélioration des performances de PAC par intégration de composants innovants vise les objectifs suivants :

- proposer des composants nouveaux à haute performance,
- se limiter à une gamme indépendante des types de bâtiments et des climats,
- bien positionner les produits de l'industriel vis-à-vis de l'étiquetage européen des systèmes de climatisation: SEER et SCOP normalisé.

Dans le cadre de cette étude, la compression à vitesse variable, et l'échangeur à air mini-canaux seront étudiés.

5.3.1.1 Compresseur à vitesse variable

Le compresseur à vitesse variable présente un important intérêt pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de PAC. Cette technologie de compression est de plus

en plus répandue, en effet elle offre une adaptation continue aux besoins thermiques instantanés [Clodic 1998] [Zoughaib 2006] :

- un faible appel de puissance électrique au démarrage,
- un faible niveau de bruit,
- un effet sur les vibrations, [Cuevas 2009].

Des progrès au niveau de la lubrification et de l'efficacité de l'onduleur sont en cours pour renforcer les avantages de cette technologie de compresseur à vitesse variable.

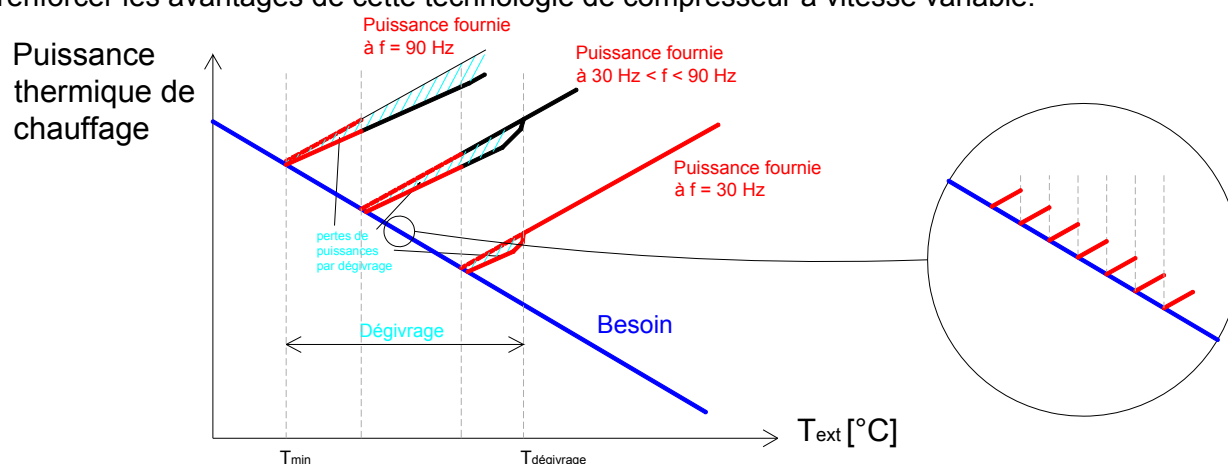


Figure 5-8 : Fonctionnement d'une PAC à compresseur à vitesse variable

Les limites de fréquence de fonctionnement sont le résultat d'un choix technique / commercial / marketing des constructeurs. Par exemple, les constructeurs définissent la fréquence 30 Hz comme limite inférieure de la vitesse de rotation du compresseur pour éviter des problèmes de retour d'huile, l'augmentation de sa viscosité, ainsi que les transferts de fluide frigorigène entre haute et basse pression. La limite supérieure de fréquence est généralement fixée à 90 Hz pour limiter les vibrations.

La fréquence de fonctionnement est réglée en fonction de la température de départ d'eau du circuit qui dépend de la température extérieure. En mode chauffage, plus la température extérieure est faible plus la température de départ d'eau doit être élevée, de même, en mode refroidissement, plus la température extérieure est élevée plus la température de départ d'eau doit être faible, et plus le compresseur fonctionne à haute fréquence.

Il est conseillé de faire fonctionner à de hautes fréquences en mode chaud. L'effet est en revanche négatif en mode froid.

Les résultats de simulations des performances saisonnières de la PAC de référence équipée d'un compresseur à vitesse variable à la place du tandem 2xZP180 sans modifier le reste des composants de la PAC, pour le bâtiment de bureau de référence (§ 4.3.2) ancien et neuf sont indiqués au Tableau 4-15 et Tableau 4-16 .

Le modèle du compresseur à vitesse variable employé est celui présenté au § 2.3 en ajustant la cylindrée pour l'adapter à la puissance de la machine de référence (facteur ~1.5).

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Compresseur à vitesse variable Bâtiment ancien	SEER	3,99	4,20	4,17	4,52
	SCOP	2,90	2,29	2,43	2,48
	COP annuel	3,47	2,69	2,97	2,92

Tableau 5-28 : Résultats de simulations saisonnières pour la machine de référence équipée de compresseur à vitesse variable couplée au bâtiment ancien

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Compresseur à vitesse variable Bâtiment neuf	SEER	4,10	4,09	4,12	4,41
	SCOP	2,94	2,30	2,47	2,49
	COP annuel	3,63	2,70	3,06	2,90

Tableau 5-29 : Résultats de simulations saisonnières pour la machine de référence équipée de compresseur à vitesse variable couplée au bâtiment neuf

Les performances saisonnières simulées avec ce compresseur à vitesse variable sont moins bonnes que celles de la machine de référence composée du tandem 2xZP180.

Par conséquent, les consommations électriques calculées correspondantes sont plus élevées que celles de la PAC de référence comme le montre les tableaux suivants pour le bâtiment ancien (Tableau 5-30) et le bâtiment neuf (Tableau 5-31) :

	en MWh	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Compresseur à vitesse variable Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	20,6	10,3	12,3	8,7
	Consommations électriques chaud	11,8	34,3	23,2	26,6
	Consommations résistances carter	1,1	0,7	0,8	0,7
	Total	33,5	45,3	36,2	35,9

Tableau 5-30 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée de compresseur à vitesse variable en consommation (bâtiment ancien)

	en MWh	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Compresseur à vitesse variable Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	16,0	6,4	9,4	5,3
	Consommations électriques chaud	2,1	13,9	11,2	10,9
	Consommations résistances carter	1,6	1,2	1,1	1,2
	Total	19,8	21,6	21,7	17,5

Tableau 5-31 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée de compresseur à vitesse variable en consommation (bâtiment neuf)

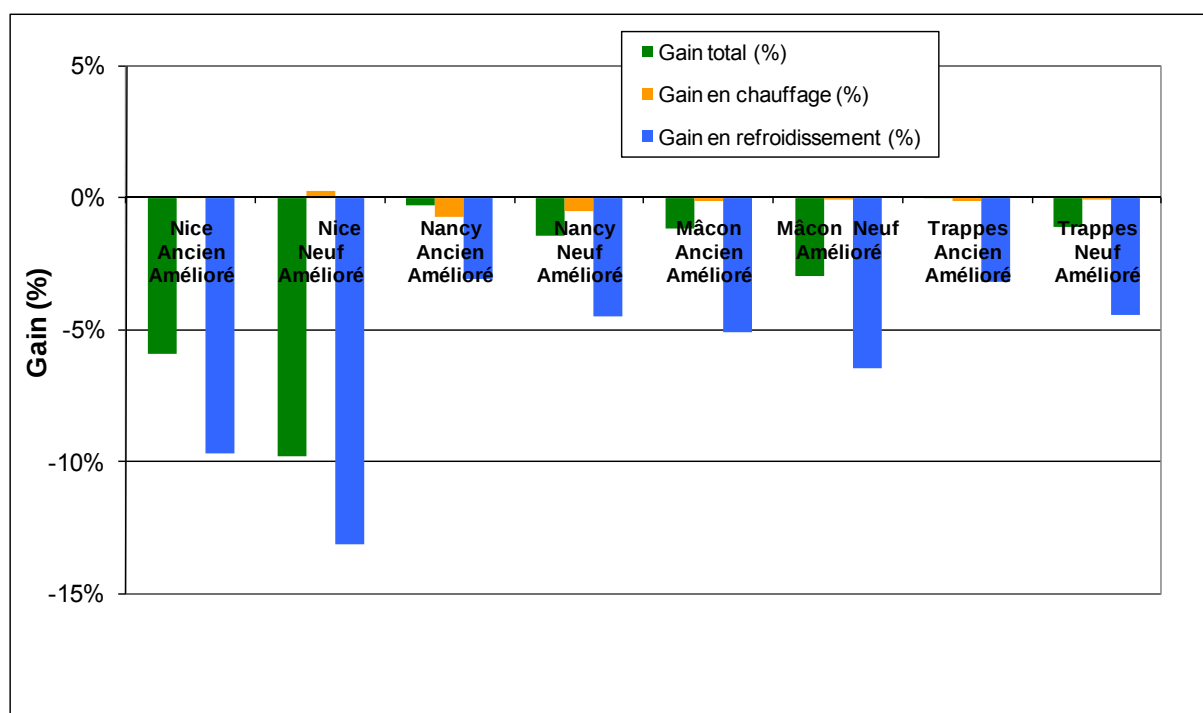


Figure 5-9 : Comparaisons des consommations électriques annuelles de l'option d'amélioration (compresseur à vitesse variable) par rapport à la machine de référence

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de Référence	Total consommations (Ancien)	31,7	45,2	35,7	35,9
	Total consommations (neuf)	18,0	21,3	21,1	17,3
Machine de Référence Compresseur à vitesse variable	Total consommations (Ancien)	33,5	45,3	36,2	35,9
	Total consommations (neuf)	19,8	21,6	21,7	17,5
	Gain (Ancien) (%)	-6 %	0 %	-1 %	0 %
	Gain (Neuf) (%)	-10 %	-1 %	-3 %	-1 %

Tableau 5-32 : Gains en consommations électriques de l'option d'amélioration par rapport à la référence

L'objectif de réduire les consommations électriques de la PAC de référence et d'améliorer ses performances saisonnières n'est donc pas atteint.

L'interprétation de ce constat peut être liée au type du compresseur qui n'est pas adapté au fonctionnement en mode froid. De plus, la consommation de l'électronique de puissance (onduleur) s'ajoute à la puissance absorbée du compresseur à vitesse variable.

La généralisation de cette conclusion n'est pas conseillée à ce stade comme c'est un compresseur hypothétique conçu dans le cadre de cette étude pour l'évaluation de la vitesse variable sur une PAC pas nécessairement adaptée au débit variable de fluide frigorigène (échangeurs sous dimensionnés, ventilateur vitesse fixe,...).

5.3.1.2 Compresseur digital scroll

Le compresseur digital scroll a été envisagé durant cette thèse. Grâce à sa technologie de régulation de puissance, il offre une facilité de mise en oeuvre, une large gamme de modulation (10 – 100 %) et une absence de problèmes de retour d'huile [Copeland].

Une étude comparative effectuée par [Ilic 2001] sur un compresseur à vitesse variable, un compresseur digital scroll et un compresseur standard de tailles comparables, montre que le cyclage rapide du compresseur digital scroll à des fréquences élevées (0,01 – 0.1 Hz) par rapport au cyclage compresseur standard (0,001 Hz) ne dégrade les performances de la PAC que de 2,5 % à 7,5 % pour des cycles de 10 s à 80 s respectivement. Quant au compresseur à cyclage conventionnel, ses performances sont réduites de 11,5 %.

Principe et consommation électrique

Le rendement d'un moteur électrique est généralement optimisé pour un fonctionnement entre 75 % et 100 % de sa puissance nominale. Le cyclage du compresseur digital scroll affecte directement la consommation d'énergie. En effet, le compresseur fonctionne à deux régimes : à pleine charge ou à charge nulle, toujours à vitesse constante. Étant donné que le moteur est toujours en rotation, le passage de la pleine charge à la charge nulle ne nécessite pas de courant au démarrage intensif. La consommation électrique à charge nulle est environ 10 % de la pleine charge. La consommation d'énergie du compresseur :

$$P_{\text{absorbée}}(\tau) = \tau \times P_{\tau} + (1 - \tau) \times 0,1 \times P_{\tau=100\%}$$

Exemple: Pour un cycle fixe de 20 secondes le compresseur fonctionne à 70 % de la puissance nominale. La moyenne de consommation d'énergie est calculée :

$$P_{\text{absorbée}}(70\%) = 0,7 \times P_{\tau} + 0,3 \times 0,1 \times P_{\tau=100\%}$$

La durée maximale du cycle recommandée par le constructeur Copeland est de 30 secondes. Un temps de cycle optimal est affecté à chaque charge réduite selon la configuration du système. Il est recommandé de raccourcir les temps de cycle avec l'augmentation de la charge et vice versa. Le minimum de temps de cycle est limité à 10 secondes.

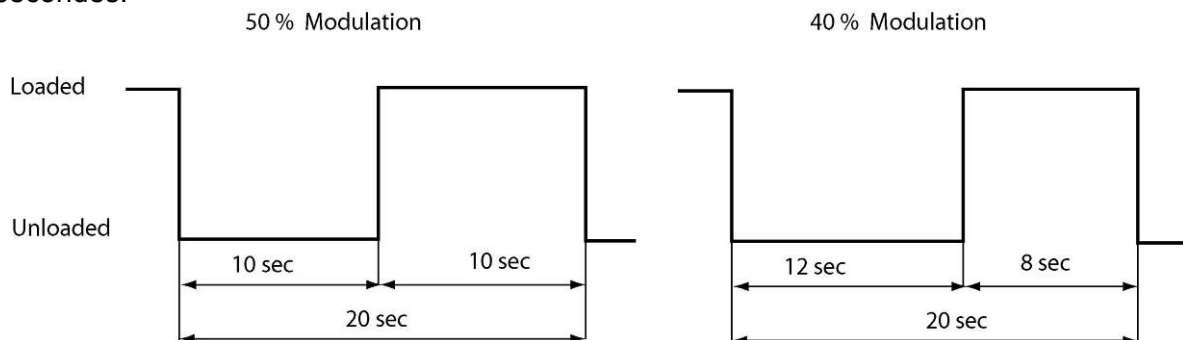


Figure 5-10 : Modulation de charge partielle à 50 % (à gauche) et 40 % (à droite) pour un temps de cycle de 20 secondes

Comme le montre la Figure 5-10, le temps de cycle est partagé en fonctionnement à pleine charge et charge nulle en fonction de la charge partielle demandée.

Les performances d'un compresseur digital scroll (ZRD 72 KCE) [Copeland] pour un cycle à temps fixé sont décrites en fonction du taux de charge dans la Figure 5-11 suivante :

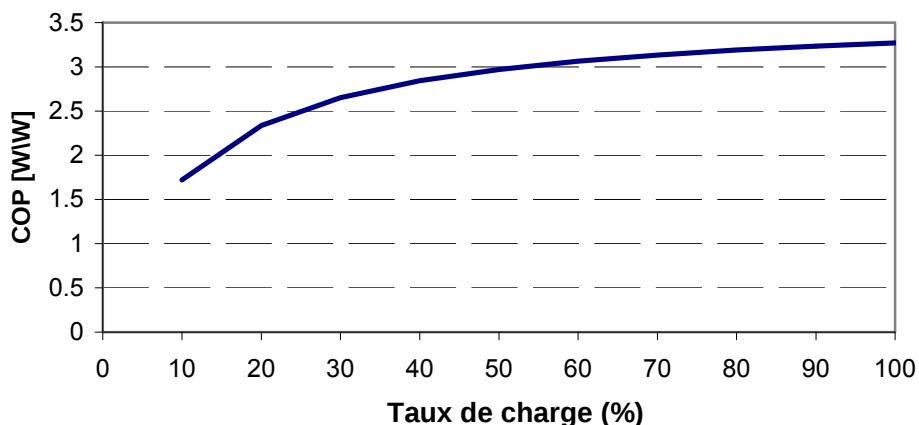


Figure 5-11 : Performance d'un compresseur digital scroll en fonction du taux de charge

Les performances à charge partielle peuvent être déduites de la performance à charge totale EER à 100%.

En résumé, le compresseur à vitesse variable reste pour l'instant le moyen préféré pour la régulation continue de la puissance thermique des PAC c'est pourquoi la variante digital scroll n'a pas été testée.

A noter que le développement du concept digital combiné à un moteur à 2 vitesses améliorant ses performances à charge partielle par rapport à un digital seul, ainsi qu'avec la nouvelle gamme de compresseurs digital scroll dotés de la technologie d'injection de vapeur EVI (Enhanced Vapor Injection). La performance et la fiabilité de ces derniers compresseurs sont optimisées : augmentation de l'efficacité allant jusqu'à 7 % et de la puissance de chauffage jusqu'à 20 %.

5.3.1.3 Echangeur mini-canaux

L'intérêt d'un échangeur mini-canaux expliqué lors du choix des composants du prototype (chapitre 3), porte essentiellement sur la charge réduite en fluide, la compacité et le poids, l'utilisation des fluides à haute pression comme le CO₂, et enfin les performances thermiques.

▪ *Comparaison échangeur mini-canaux et échangeur tubes ailetés*

Deux échangeurs sont comparés, le premier est l'échangeur type tubes et ailettes de la machine de référence, dont la géométrie s'inspire des batteries à ailettes standards en U. Le deuxième est un échangeur à mini-canaux dont la géométrie est adaptée pour occuper à peu près le même volume du premier échangeur sur la carrosserie de la machine de référence. Les données géométriques des deux échangeurs étudiés sont les suivantes :

	Echangeur tubes ailetés	Echangeur à mini-canaux
Diamètre hydraulique	8 mm	1 mm
Nombre de rangs	3	2
Nombre de circuits	24	87
Nombre de canaux/tube	-	25
Pas transversal	15 mm	13 mm
Pas longitudinal	18 mm	35 mm
Pas ailettes w	1,8 mm	1,8 mm

Tableau 5-33 : Géométries des échangeurs étudiés

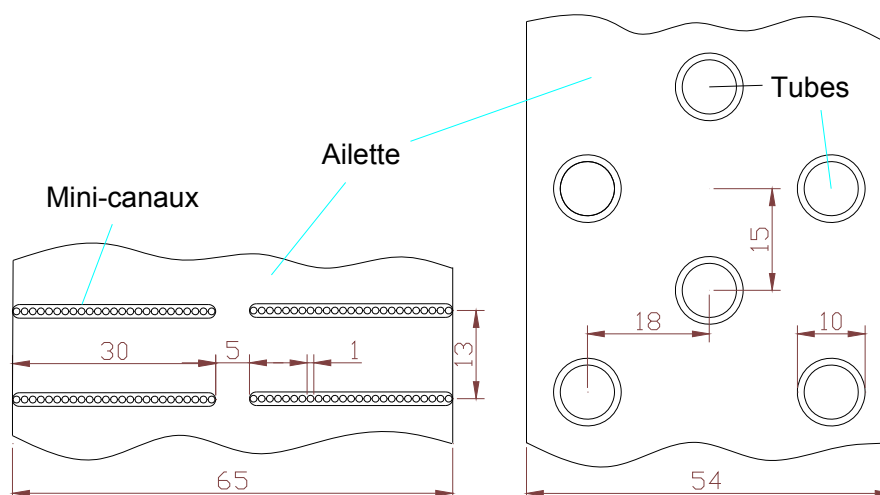


Figure 5-12 : Schéma des échangeurs étudiés

La surface d'échange apparente (frontale) des deux échangeurs à air est environ 3,104 m², et le volume occupé est de l'ordre de 0,240 m³. La surface d'échange extérieure en contact direct avec l'air de la batterie mini-canaux est environ 200 m² quant à la batterie tubes ailetés la surface elle n'est que 100 m².

La surface d'échange intérieure (côté fluide frigorigène) de la batterie mini-canaux est environ 40 m² quant à la batterie tubes ailetés la surface elle n'est que de 10 m².

La compacité de l'échangeur est définie par le rapport de la surface d'échange extérieure sur le volume occupé par l'échangeur. Un échangeur est classé « compact » lorsque sa compacité est supérieure à 700 m²/m³.

On déduit la compacité de l'échangeur mini-canaux qui est égale à 833 m²/m³ alors que celle de l'échangeur tubes ailetés est égale à 417 m²/m³ clairement plus faible.

▪ *Résultats des simulations saisonnières de l'échangeur mini-canaux*

Des simulations sont menées pour évaluer cette option toujours à partir de la machine de référence ; l'échangeur tubes ailetés étant remplacé par l'échangeur mini-canaux. Les tableaux ci-dessous récapitulent les résultats des simulations annuelles :

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeur mini-canaux Bâtiment ancien	SEER	5,32	5,53	5,57	5,87
	SCOP	3,36	2,63	2,81	2,83
	COP annuel	4,17	3,05	3,42	3,30

Tableau 5-34 : Performances annuelles de la machine de référence équipée d'échangeur à air mini-canaux couplée à un bâtiment ancien

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeur mini-canaux Bâtiment neuf	SEER	5,44	5,48	5,43	5,84
	SCOP	3,34	2,65	2,86	2,88
	COP annuel	4,46	3,10	3,55	3,32

Tableau 5-35 : Performances annuelles de la machine de référence équipée d'échangeur à air mini-canaux couplée à un bâtiment neuf

Les consommations annuelles électriques sont aussi calculées pour les différentes zones géographiques dans le cas du bâtiment ancien et du bâtiment neuf :

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeur mini-canaux Bâtiment ancien	Consommations électriques froid	15,5	7,8	9,2	6,7
	Consommations électriques chaud	10,2	29,8	20,0	23,2
	Consommations résistances carter	2,2	2,2	2,2	1,9
	Total	27,9	39,9	31,4	31,8

Tableau 5-36 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée d'échangeur à air mini-canaux en consommation (bâtiment ancien)

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Echangeur mini-canaux Bâtiment neuf	Consommations électriques froid	12,1	4,8	7,1	4,0
	Consommations électriques chaud	1,9	12,1	9,7	9,4
	Consommations résistances carter	2,2	2,2	2,2	1,9
	Total	16,1	18,8	18,7	15,3

Tableau 5-37 : Résultats de simulations saisonnières de la PAC de référence équipée d'échangeur à air mini-canaux en consommation (bâtiment neuf)

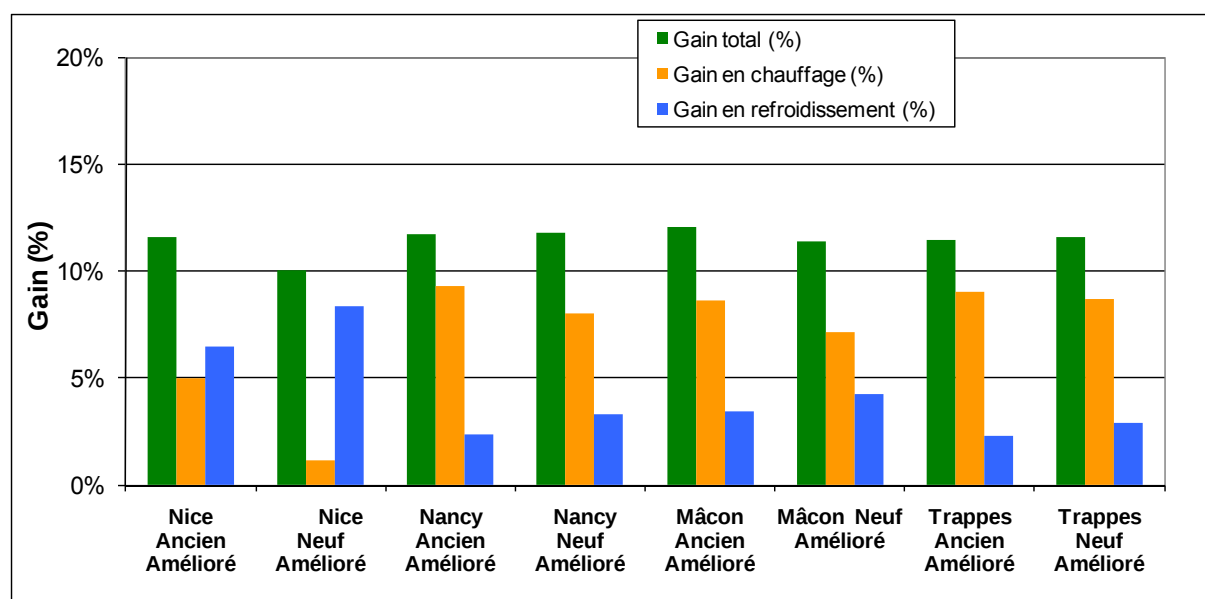


Figure 5-13 : Comparaisons des consommations électriques annuelles de l'option d'amélioration (échangeur mini-canaux) par rapport à la machine de référence

La réduction des consommations électriques atteinte par l'utilisation d'un échangeur à air mini-canaux à la place d'un échangeur à air tubes ailetés, est entre 10 et 12 % en fonction de la zone climatique, par rapport à la machine de référence pour les bâtiments anciens et neufs.

en MWh		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de Référence	Total consommations (Ancien)	31,7	45,2	35,7	35,9
	Total consommations (neuf)	18,0	21,3	21,1	17,3
Machine de Référence Echangeur mini-canaux	Total consommations (Ancien)	27,9	39,9	31,4	31,8
	Total consommations (neuf)	16,1	18,8	18,7	15,3
	Gain (Ancien) (%)	12 %	12 %	12 %	11 %
	Gain (Neuf) (%)	10 %	12 %	11 %	12 %

Tableau 5-38 : Gains en consommations électriques de l'option d'amélioration par rapport à la référence

5.3.2 Résistance de carter innovante

L'impact en consommation des résistances de carter servant au maintien en température des compresseurs de pompe à chaleur peut être relativement important. Pour remédier à cela, trois solutions techniques de réchauffage sont proposées [Kinab 2009] :

- emploi d'une nouvelle résistance innovante de puissance réduite (facteur 3) de l'ordre de 0,2 % de la puissance nominale des compresseurs,
- contrôle de marche de la résistance en fonction de la température extérieure (mise en marche de la résistance à partir de $T_{\text{extérieur}} < 15^{\circ}\text{C}$),
- combinaison des 2 techniques.

Ces solutions sont comparées à la PAC de référence composée de 2 compresseurs ZP180 équipés d'une résistance de carter standard (0,6 % de la puissance nominale des compresseurs).

Le gain apporté par l'emploi d'une nouvelle technique de réchauffage des carters des compresseurs (Figure 5-14) sera exprimé en pourcentage de gain en consommation par rapport à la solution traditionnelle.

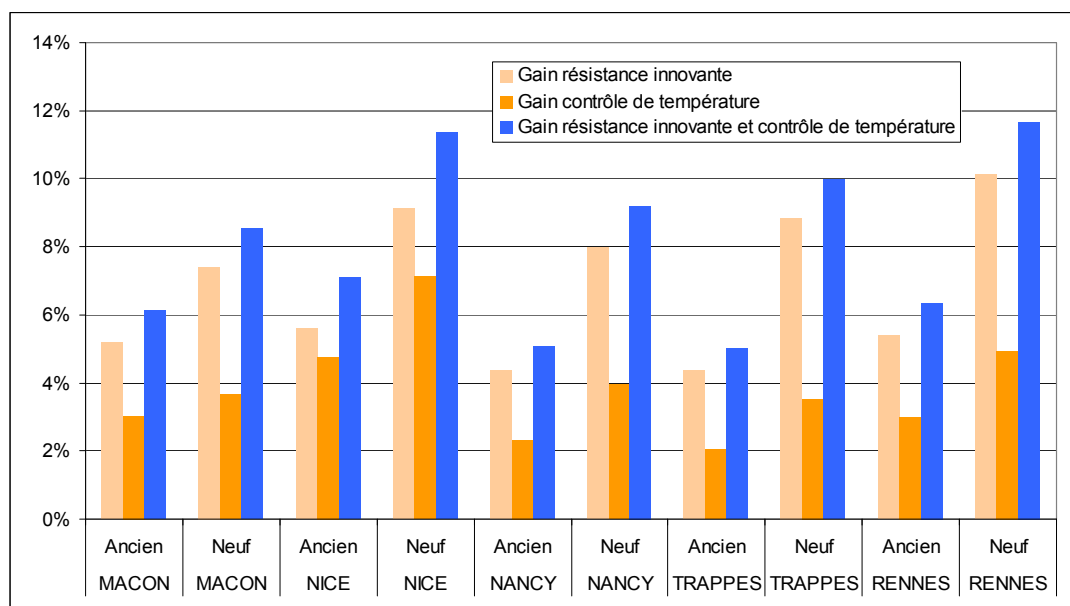


Figure 5-14 : Gain en consommation des nouvelles techniques de réchauffage des carters

Le gain de consommation varie de 2 % à 11 % en fonction du type de bâtiment et de la zone géographique. Ce gain est plus important dans les bâtiments neufs que dans les bâtiments anciens car les heures d'arrêt de la PAC sont plus nombreuses induisant un fonctionnement prolongé des résistances de carter. Le gain maximal, de l'ordre de 11 %, est atteint pour un bâtiment neuf à Nice dont la saison de chauffage est la plus courte.

5.4 Etude technico-économique

L'étude technico-économique dans ce paragraphe est présentée en trois parties :

- Comparaison de la PAC de référence et la PAC prototype,
- Comparaison de la PAC de référence et les options d'amélioration,
- Présentation d'une PAC regroupant les meilleures options.

5.4.1 Comparaison énergétique de la PAC de référence et de la PAC prototype

Les besoins de refroidissement et de chauffage du bâtiment de bureau choisi (cf. § 4.3.2) sont supposés couverts par la PAC de référence ou par un groupe de PAC prototype compte tenu des facteurs de dimensionnement adoptés.

Les tableaux ci-après comparent les consommations électriques annuelles des 2 PACs en fonction de la zone climatique et du type de bâtiment (bâtiment ancien Tableau 5-39 et bâtiment neuf Tableau 5-40) :

Bâtiment ancien		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	Besoins froid (MWh)	82,2	43,3	51,1	39,2
PAC Référence	C _{élec} froid (MWh)	17,5	8,9	10,4	7,5
PAC Prototype	C _{élec} froid (MWh)	18,0	9,0	10,6	7,8
	ΔC _{élec} froid (MWh)	-0,5	-0,1	-0,2	-0,3
	Besoin chaud (MWh)	34,3	78,5	56,3	65,8
PAC Référence	C _{élec} chaud (MWh)	11,8	34,0	23,1	26,5
PAC Prototype	C _{élec} chaud (MWh)	12,1	31,4	21,6	24,7
	ΔC _{élec} chaud (MWh)	-0,3	2,6	1,5	1,8
Consommations auxiliaires (Résistance carter) (MWh)					
PAC Référence	C _{élec} (MWh)	2,3	2,3	2,2	1,9
PAC Prototype	C _{élec} (MWh)	0,3	0,2	0,2	0,2
	ΔC _{élec} (MWh)	2,0	2,1	2,0	1,7
	Comparaison				
PAC Référence	Total (MWh)	31,7	45,2	35,7	35,9
PAC Prototype	Total (MWh)	30,4	40,6	32,4	32,7
	Gain (MWh)	1,3	4,6	3,3	3,2
	Gain (%)	4 %	10 %	9 %	9 %

Tableau 5-39 : Comparaison des consommations des PAC référence et prototype (bâtiment ancien)

Bâtiment neuf		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	Besoins froid (MWh)	65,5	26,3	38,7	23,4
PAC Référence	C _{élec} froid (MWh)	13,6	5,5	8,0	4,5
PAC Prototype	C _{élec} froid (MWh)	14,1	5,6	8,2	4,7
	ΔC _{élec} froid (MWh)	-0,5	-0,1	-0,2	-0,2
	Besoin chaud (MWh)	6,2	32,0	27,7	27,2
PAC Référence	C _{élec} chaud (MWh)	2,1	13,8	11,2	10,9
PAC Prototype	C _{élec} chaud (MWh)	2,2	12,6	10,6	10,2
	ΔC _{élec} chaud (MWh)	-0,1	1,2	0,6	0,7
Consommations auxiliaires (Résistance carter) (MWh)					
PAC Référence	C _{élec} (MWh)	2,2	2,0	1,9	1,8
PAC Prototype	C _{élec} (MWh)	0,3	0,2	0,2	0,2
	ΔC _{élec} (MWh)	1,9	1,8	1,7	1,6
	Comparaison				
PAC Référence	Total (MWh)	18,0	21,3	21,1	17,3
PAC Prototype	Total (MWh)	16,6	18,4	19,0	15,1
	Ecart (MWh)	1,4	2,9	2,1	2,2
	Ecart (%)	8 %	14 %	10 %	13 %

Tableau 5-40: Comparaison des consommations des PAC référence et prototype (bâtiment neuf)

On remarque que, à part à Nice, l'économie de consommation est plus importante en valeur absolue dans le cas des bâtiments anciens en MWh, du fait que les consommations des bâtiments anciens sont plus élevées que dans les bâtiments neufs. Au contraire, en écart relatif cette économie de consommation a une influence plus marquée sur les bâtiments neufs de 8 à 14 % contre 4 à 10 % pour le cas des bâtiments anciens. C'est à Nancy, que la PAC prototype apporte le gain le plus important.

5.4.2 Gain économique d'exploitation de la PAC de référence par rapport à la PAC prototype

L'économie en énergie peut être traduite en économie d'exploitation sur la base d'un prix moyen de l'électricité de 80 € HT/MWh [Eurostat 2008].

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Ecart de consommation (bâtiment ancien) (MWh)	1,3	4,6	3,3	3,2
Economie d'exploitation (bâtiment ancien) (€ HT)	101	367	268	258
Ecart de consommation (bâtiment neuf) (MWh)	1,4	2,9	2,1	2,2
Economie d'exploitation (bâtiment neuf) (€ HT)	111	230	167	173

Tableau 5-41 : Economie de d'exploitation du prototype

Ces économies d'exploitation sont évaluées ensuite par rapport aux coûts de la PAC de référence et de la PAC prototype dans le § 5.4.5.1.

5.4.3 Comparaison énergétique de la PAC de référence et la PAC de référence améliorée

La synthèse des gains de consommations électriques des options d'amélioration étudiées appliquées à la PAC de référence par rapport à ses consommations de base, est rassemblée dans ce paragraphe pour le cas d'un bâtiment ancien et d'un bâtiment neuf dans les différentes zones climatiques françaises.

On adopte la notation suivante pour les tableaux qui suivent :

- PAC1 : PAC de référence équipée des compresseurs ZP120 et ZP235
- PAC2 : PAC de référence équipée des compresseurs CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid
- PAC3 : PAC de référence équipée d'échangeurs surdimensionnés de 30 %
- PAC4 : PAC de référence équipée d'un ventilateur à vitesse variable
- PAC5 : PAC de référence équipée d'un échangeur mini-canaux

Bâtiment ancien		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	Besoins froid (MWh)	82,2	43,3	51,1	39,2
PAC Référence	C _{élec} froid (MWh)	17,5	8,9	10,4	7,5
PAC1	C _{élec} froid (MWh)	18,5	9,7	11,3	8,3
PAC2	C _{élec} froid (MWh)	16,4	8,4	9,8	7,1
PAC3	C _{élec} froid (MWh)	15,8	8,1	9,3	6,8
PAC4	C _{élec} froid (MWh)	16,6	8,4	9,9	7,1
PAC5	C _{élec} froid (MWh)	15,5	7,8	9,2	6,7
	Besoin chaud (MWh)	34,3	78,5	56,3	65,8
PAC Référence	C _{élec} chaud (MWh)	11,8	34,0	23,1	26,5
PAC1	C _{élec} chaud (MWh)	8,6	26,3	17,5	20,2
PAC2	C _{élec} chaud (MWh)	11,6	31,2	21,4	24,7
PAC3	C _{élec} chaud (MWh)	10,1	29,3	19,5	22,7
PAC4	C _{élec} chaud (MWh)	11,1	31,9	21,7	24,9
PAC5	C _{élec} chaud (MWh)	10,2	29,8	20,0	23,2
Consommations auxiliaires (Résistance carter) (MWh)					
PAC Référence	C _{élec} (MWh)	2,3	2,3	2,2	1,9
PAC1	C _{élec} (MWh)	2,7	2,9	2,8	2,3
PAC2	C _{élec} (MWh)	2,2	2,1	2,1	1,8
PAC3	C _{élec} (MWh)	2,3	2,3	2,2	1,9

PAC4	C _{élec} (MWh)	2,3	2,3	2,2	1,9
PAC5	C _{élec} (MWh)	2,3	2,3	2,2	1,9
Comparaison					
PAC Référence	Total (MWh)	31,7	45,2	35,7	35,9
PAC1	Total (MWh)	29,8	39,0	31,6	30,8
PAC2	Total (MWh)	30,2	41,6	33,3	33,5
PAC3	Total (MWh)	28,2	39,7	30,9	31,4
PAC4	Total (MWh)	30,0	42,6	33,7	33,9
PAC5	Total (MWh)	27,9	39,9	31,4	31,8
PAC1	Gain (%)	6 %	16 %	11 %	14 %
PAC2	Gain (%)	5 %	9 %	7 %	7 %
PAC3	Gain (%)	11 %	12 %	13 %	13 %
PAC4	Gain (%)	5 %	6 %	6 %	6 %
PAC5	Gain (%)	12 %	12 %	12 %	11 %

Tableau 5-42 : Comparaison des consommations de la PAC référence et la PAC de référence amélioré (bâtiment ancien)

Bâtiment neuf		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	Besoins froid (MWh)	82,2	43,3	51,1	39,2
PAC Référence	C _{élec} froid (MWh)	13,6	5,5	8,0	4,5
PAC1	C _{élec} froid (MWh)	14,3	5,9	8,5	5,0
PAC2	C _{élec} froid (MWh)	12,8	5,1	7,5	4,3
PAC3	C _{élec} froid (MWh)	12,2	4,9	7,1	4,1
PAC4	C _{élec} froid (MWh)	12,9	5,2	7,6	4,3
PAC5	C _{élec} froid (MWh)	12,1	4,8	7,1	4,0
	Besoin chaud (MWh)	34,3	78,5	56,3	65,8
PAC Référence	C _{élec} chaud (MWh)	2,1	13,8	11,2	10,9
PAC1	C _{élec} chaud (MWh)	1,6	10,7	8,4	8,2
PAC2	C _{élec} chaud (MWh)	2,1	12,7	10,4	10,1
PAC3	C _{élec} chaud (MWh)	1,8	11,8	9,4	9,2
PAC4	C _{élec} chaud (MWh)	2,0	12,9	10,5	10,2
PAC5	C _{élec} chaud (MWh)	1,9	12,1	9,7	9,4
Consommations auxiliaires (Résistance carter) (MWh)					
PAC Référence	C _{élec} (MWh)	2,2	2,0	1,9	1,8
PAC1	C _{élec} (MWh)	2,4	2,3	2,2	2,0
PAC2	C _{élec} (MWh)	2,2	1,9	1,8	1,8
PAC3	C _{élec} (MWh)	2,2	2,0	1,9	1,8
PAC4	C _{élec} (MWh)	2,2	2,0	1,9	1,8
PAC5	C _{élec} (MWh)	2,2	2,0	1,9	1,8
Comparaison					
PAC Référence	Total (MWh)	18,0	21,3	21,1	17,3
PAC1	Total (MWh)	18,3	18,9	19,1	15,2
PAC2	Total (MWh)	17,1	19,7	19,7	16,2
PAC3	Total (MWh)	16,3	18,6	18,4	15,1
PAC4	Total (MWh)	17,1	20,1	20,0	16,3
PAC5	Total (MWh)	16,1	18,8	18,7	15,3
PAC1	Ecart (%)	-2 %	11 %	9 %	12 %
PAC2	Ecart (%)	5 %	8 %	6 %	6 %
PAC3	Ecart (%)	10 %	12 %	13 %	13 %
PAC4	Ecart (%)	5 %	6 %	5 %	6 %
PAC5	Ecart (%)	11 %	12 %	11 %	12 %

Tableau 5-43 : Comparaison des consommations de la PAC référence et la PAC de référence amélioré (bâtiment neuf)

Les gains énergétiques apportés par les différentes configurations d'amélioration sont évalués en fonction du type du bâtiment. En effet, la réduction de consommations d'électricité pour le cas du bâtiment ancien varie de 5 % à 16 %, et de -2 % à 13 % pour le cas de bâtiment neuf.

Pour les options concernant l'amélioration du compresseur « PAC1 » (ZP120 et ZP235) et « PAC2 » (CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid), « PAC1 » est meilleure avec des réductions de 6 à 16 % en fonction du type de bâtiment et de la zone climatique, même si dans le cas du bâtiment neuf à Nice « PAC2 » est plus avantageuse surtout avec le gain du rendement du compresseur orienté froid qui aura un effet positif par rapport au climat chaud de Nice.

L'option « PAC4 » (ventilateur à vitesse variable) apporte un gain de l'ordre de 5 à 6 % dans les différents types de bâtiment et climat.

Les gains apportés par les options concernant l'amélioration des échangeurs thermiques « PAC3 » (échangeurs surdimensionnés de 30 %) et « PAC5 » (échangeur mini-canaux) sont comparables de l'ordre de 10 à 13 % en fonction du type de bâtiment et de la zone climatique.

Du point de vue de la zone climatique, les améliorations augmentent avec les climats nécessitant le plus de besoins thermiques, en particulier Nancy caractérisé par une demande de chauffage élevée.

5.4.4 Gain économique d'exploitation de la PAC de référence améliorée par rapport à la PAC de référence

L'économie en énergie est à nouveau traduite en économie d'exploitation sur la base d'un prix moyen de l'électricité de 80 € HT/MWh pour les différentes configurations d'amélioration de la PAC de référence appliquées pour le cas d'un bâtiment ancien et bâtiment neuf dans les différentes zones climatiques françaises dans le tableau suivant :

	Nice		Nancy		Mâcon		Trappes	
	Ecart (MWh)	Economie (€ HT)	Ecart (MWh)	Economie (€ HT)	Ecart (MWh)	Economie (€ HT)	Ecart (MWh)	Economie (€ HT)
PAC1 (ancien)	1,9	151	6,2	500	4,1	328	5,1	409
PAC2 (ancien)	1,5	118	3,6	288	2,4	194	2,4	190
PAC3 (ancien)	3,5	284	5,5	440	4,8	381	4,5	361
PAC4 (ancien)	1,7	136	2,6	208	2	160	2	160
PAC5 (ancien)	3,8	302	5,3	424	4,3	344	4,1	329
PAC1 (neuf)	-0,3	-28	2,4	192	2,0	159	2,1	167
PAC2 (neuf)	0,9	72	1,6	128	1,3	107	1,1	88
PAC3 (neuf)	1,7	137	2,6	212	2,7	212	2,2	174
PAC4 (neuf)	0,9	71	1,2	94	1,1	87	1,0	77
PAC5 (neuf)	1,9	152	2,4	196	2,4	193	2,0	160

Tableau 5-44 : Economie d'exploitation de la PAC de référence équipées des différentes configurations d'amélioration

Les écarts de consommations d'électricité apportés par les différentes configurations d'amélioration sont plus importantes dans le cas du bâtiment ancien que dans le cas du bâtiment neuf, ce qui se traduit directement par une économie d'exploitation plus importante qui contribuera à un temps de retour sur investissement de l'option considérée plus rapide.

5.4.5 Rentabilité économique des améliorations

5.4.5.1 Décomposition des coûts des principaux composants de la PAC prototype

Une décomposition des coûts des principaux composants de la PAC est proposée dans le tableau suivant. Ces valeurs « indicatives » ont été validées par des constructeurs de systèmes thermiques. On présente les coûts de fabrication de chaque composant ainsi que les coûts d'assemblage ou coûts de main d'œuvre.

Composant	% coût fabrication	% coût assemblage	Total
1 Compresseur + variateur de fréquence	17%	4%	20%
2 Variateur de fréquence du ventilateur	5%	1%	6%
3 Echangeur à plaques	10%	4%	14%
4 Détendeur électronique	4%	1%	5%
5 Batterie à air	11%	4%	15%
6 Tube	4%	4%	7%
7 Charge de fluide	2%	1%	3%
8 Bouteille réserve de liquide + résistance carter	1%	1%	2%
9 Ventilateur	4%	2%	6%
10 Châssis	6%	2%	7%
11 Divers	6%	2%	7%
12 Régulation	2%	1%	3%
13 Electrique	4%	2%	6%
Somme	73%	27%	100%

Tableau 5-45 : Table de décomposition des coûts des principaux composants de la PAC

Le compresseur et son variateur de fréquence constituent 20 % du coût global de la machine, c'est l'élément le plus cher du système, suivi par la batterie à air qui représente 15 % du coût global.

5.4.5.2 Temps de retour sur investissement du prototype

Le coût de la pompe à chaleur standard de référence (§5.2.2) de puissance nominale 81 kW en chaud, est de 17 400 € HT. Une machine de la même gamme de puissance nominale 50 kW (puissance du prototype) que la PAC de référence, serait de 15 500 € HT selon le fabricant de la PAC.

Pour ce qui concerne la PAC prototype, il est à noter que la pompe de circulation à vitesse variable utilisée coûte 4 fois plus cher qu'une pompe standard. Quant à la batterie mini-canaux, il a été fait l'hypothèse qu'elle aurait « en série » le même coût qu'une batterie standard à tubes ailetés. Il y a néanmoins un surcoût du fait du maintien de la taille de l'échangeur pour des compresseurs de plus faible puissance. Globalement, le surcoût est estimé à 2000 €HT par le fabricant de la PAC.

On peut déterminer le temps de retour du prototype comparé à la machine de référence sur la base d'un prix de prototype, dans le cas du bâtiment ancien de besoin thermique maximal de 50 kW :

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Economie d'exploitation (€ HT)	101	367	268	258
Surcoût (€ HT)	2 000	2 000	2 000	2 000
Temps de retour brut (bâtiment ancien)	19,7 ans	5,4 ans	7,5 ans	7,8 ans

Tableau 5-46 : Temps de retour sur la base d'un prix de prototype (bâtiment ancien)

dans le cas du bâtiment neuf de besoin thermique maximal de 50 kW :

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Economie d'exploitation (€ HT)	111	230	167	173
Surcoût (€ HT)	2 000	2 000	2 000	2 000
Temps de retour brut (bâtiment neuf)	17,9 ans	8,7 ans	12,0 ans	11,6 ans

Tableau 5-47 : Temps de retour sur la base du prix de prototype (bâtiment neuf)

Le temps de retour le meilleur se situe à Nancy avec environ 5 ans (gains en consommation plus élevés dans ce climat). Il faut rappeler qu'il s'agit d'un prix de prototype, normalement plus élevé que celui des systèmes produits en série sur une chaîne de production.

5.4.5.3 Temps de retour sur investissement de la PAC de référence améliorée

Les économies d'exploitation dues aux améliorations de la machine de référence apportée par les différentes configurations « PAC1 », « PAC2 », « PAC3 », « PAC4 » et « PAC5 » sont conditionnées aux surcoûts par rapport à la machine de référence.

Dans notre estimation, la configuration « PAC1 » (compresseurs ZP120 et ZP235) ne présente pas de surcoût par rapport à la machine de référence (2 compresseurs ZP180). Les configurations « PAC2 » (CP_ch orienté mode chaud et CP_fr orienté mode froid) et « PAC5 » (échangeur mini-canaux), ne présentent ni surcoût de fabrication ni surcoût d'assemblage mais par contre elles nécessitent encore des investissements de recherche et développement.

Le surcoût de la configuration « PAC4 » (ventilateur à vitesse variable) peut être déduit en sachant la part du ventilateur (4 %) donnée au Tableau 5-45, à partir du surcoût total (2 000 €) de la PAC prototype équipé d'un ventilateur à vitesse variable par rapport à la PAC de référence, soit 80 €.

Quant à la configuration « PAC3 » (échangeurs surdimensionnés de 30 %), elle aura un surcoût de fabrication estimé globalement à 30 % par rapport à la part des échangeurs (21 %) donnée au Tableau 5-45 du prix de la PAC de référence, soit environ 1 100 €.

Les temps de retour sur investissement de la configuration « PAC3 » sont détaillés en fonction du type de bâtiment et de la zone climatique dans les Tableau 5-48 et Tableau 5-49 suivants :

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Economie d'exploitation (€ HT)	284	440	381	361
Surcoût (€ HT)	1 100	1 100	1 100	1 100
Temps de retour brut (bâtiment ancien)	3,9 ans	2,5 ans	2,9 ans	3,0 ans

Tableau 5-48 : Temps de retour de la configuration « PAC3 » (bâtiment ancien)

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Economie d'exploitation (€ HT)	137	212	212	174
Surcoût (€ HT)	1 100	1 100	1 100	1 100
Temps de retour brut (bâtiment neuf)	8.0	5.2	5.2	6.3

Tableau 5-49 : Temps de retour de la configuration « PAC3 » (bâtiment neuf)

5.5 Perspective : une nouvelle PAC regroupant les meilleures options d'amélioration

Au cours de ce chapitre, des options d'amélioration ont été présentées et le prototype conçu durant cette thèse ne regroupe pas toutes ces options avantageuses.

Les options les plus intéressantes détectées en simulation, qui peuvent constituer une nouvelle PAC optimisée du point de vue performances saisonnières par rapport à la machine de référence (§5.2.2) sont :

- Optimisation étagement de puissance avec un tandem ZP120 & ZP235
- Echangeur mini-canaux ou échangeur surdimensionné
- Adaptation du débit d'air par ventilateur à vitesse variable
- Résistance de carter innovante (0,2% de la puissance nominale)

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Meilleures options Bâtiment ancien	SEER	5,01	5,17	5,21	5,46
	SCOP	4,25	3,19	3,49	3,46
	COP annuel	4,60	3,60	4,01	3,90

Tableau 5-50 : Performances annuelles de la machine de référence groupant les meilleures options (bâtiment ancien)

		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Machine de référence Meilleures options Bâtiment neuf	SEER	5,12	5,13	5,14	5,41
	SCOP	4,30	3,24	3,55	3,57
	COP annuel	4,79	3,71	4,15	4,02

Tableau 5-51 : Performances annuelles de la machine de référence groupant les meilleures options (bâtiment neuf)

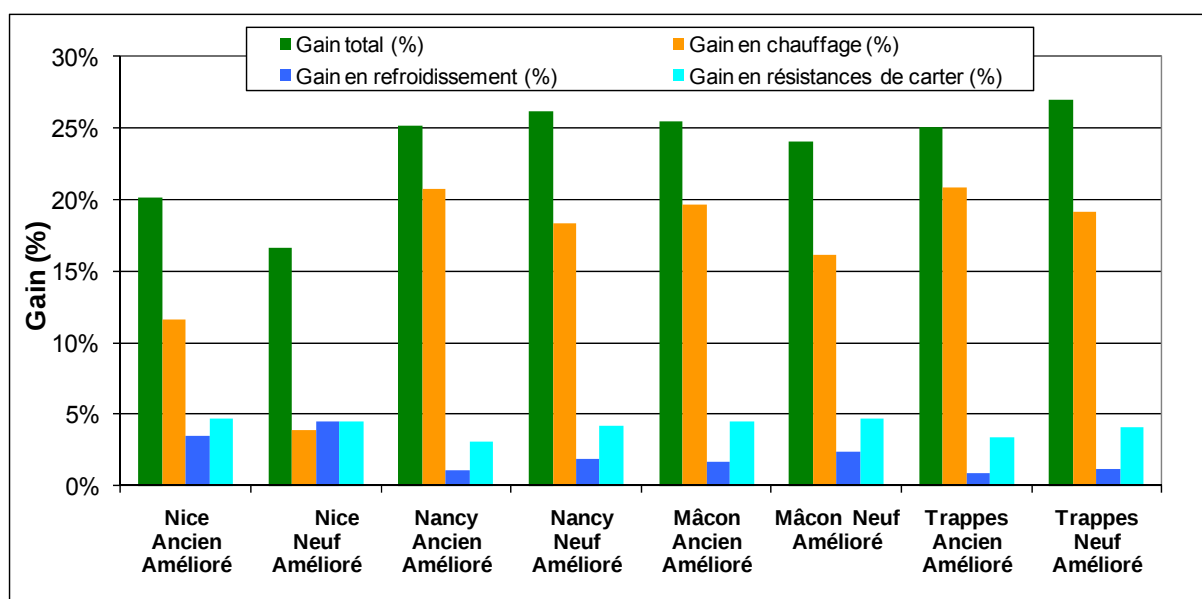


Figure 5-15 : Comparisons des consommations électriques annuelles des meilleures options par rapport à la machine de référence

Bâtiment ancien		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	Besoins froid (MWh)	82,2	43,3	51,1	39,2
PAC Référence	C _{élec} froid (MWh)	17,5	8,9	10,4	7,5
Meilleures Options	C _{élec} froid (MWh)	16,4	8,4	9,8	7,2
	ΔC _{élec} froid (MWh)	1,1	0,5	0,6	0,4
	Besoin chaud (MWh)	34,3	78,5	56,3	65,8
PAC Référence	C _{élec} chaud (MWh)	11,8	34,0	23,1	26,5
Meilleures Options	C _{élec} chaud (MWh)	8,1	24,6	16,1	19,0
	ΔC _{élec} chaud (MWh)	3,7	9,4	7,0	7,5
Consommations auxiliaires (Résistance carter) (MWh)					
PAC Référence	C _{élec} (MWh)	2,3	2,3	2,2	1,9
Meilleures Options	C _{élec} (MWh)	0,8	0,9	0,6	0,7
	ΔC _{élec} (MWh)	1,5	1,4	1,6	1,2
	Comparaison				
PAC Référence	Total (MWh)	31,7	45,2	35,7	35,9
Meilleures Options	Total (MWh)	25,3	33,8	26,6	26,9
	Gain (MWh)	6,3	11,4	9,2	9,0
	Gain (%)	20%	25%	26%	25%

Tableau 5-52 : Comparaison des consommations entre PAC de référence et un modèle groupant les meilleures options (bâtiment ancien)

Bâtiment neuf		Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
	Besoins froid (MWh)	82,2	43,3	51,1	39,2
PAC Référence	C _{élec} froid (MWh)	13,6	5,5	8,0	4,5
Meilleures Options	C _{élec} froid (MWh)	12,8	5,1	7,5	4,3
	ΔC _{élec} froid (MWh)	0,8	0,3	0,5	0,2
	Besoin chaud (MWh)	34,3	78,5	56,3	65,8
PAC Référence	C _{élec} chaud (MWh)	2,1	13,8	11,2	10,9
Meilleures Options	C _{élec} chaud (MWh)	1,4	9,9	7,8	7,6
	ΔC _{élec} chaud (MWh)	0,7	3,9	3,4	3,3
Consommations auxiliaires (Résistance carter) (MWh)					

PAC Référence	C _{élec} (MWh)	2,1	13,8	11,2	10,9
Meilleures Options	C _{élec} (MWh)	1,5	1,4	1,2	1,2
	$\Delta C_{\text{élec}}$ (MWh)	0,7	3,9	3,4	3,3
	Comparaison				
PAC Référence	Total (MWh)	18,0	21,3	21,1	17,3
Meilleures Options	Total (MWh)	15,0	15,7	16,0	12,6
	Ecart (MWh)	3,0	5,6	5,1	4,7
	Ecart (%)	17 %	26 %	24 %	27 %

Tableau 5-53: Comparaison des consommations entre PAC de référence et un modèle groupant les meilleures options (bâtiment neuf)

Une réduction de consommation significative est observée dans toutes les zones géographiques dans le cas de bâtiment ancien et dans le cas de bâtiment neuf,

L'économie en énergie est traduite en économie d'exploitation sur la base d'un prix moyen de l'électricité de 80 € HT/MWh pour le cas d'un bâtiment ancien et bâtiment neuf dans les différentes zones climatiques françaises dans le tableau suivant :

	Nice	Nancy	Mâcon	Trappes
Ecart de consommation (bâtiment ancien) (MWh)	6,3	11,4	9,2	9,0
Economie d'exploitation (bâtiment ancien) (€ HT)	504	912	736	720
Ecart de consommation (bâtiment neuf) (MWh)	3,0	5,6	5,1	4,7
Economie d'exploitation (bâtiment neuf) (€ HT)	240	448	408	376

Enfin, la machine de référence regroupant les meilleures options d'amélioration induit des économies d'exploitation importantes permettant un temps de retour sur investissement des surcoûts assez réduit.

