

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

RÉCUPÉRATION DE CHALEUR POUR LE SYSTÈME DE VENTILATION D'UN ARÉNA

Analyse thermique, environnementale et financière

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Olivier PICHE

Jury : Nicolas GALANIS (Directeur)
Hachimi FELLOUAH (Rapporteur)
Mohamed OUZZANE (Examineur)

Sherbrooke (Québec) Canada

Janvier 2012

IV-2/90



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-83694-1

Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-83694-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

À mes parents et amis, pour leur appui infailible.

RÉSUMÉ

Le présent projet a porté sur la simulation de récupération de chaleur pour le traitement thermique de l'air de ventilation d'un aréna. La chaleur récupérée provenait des rejets thermiques des condenseurs du système de réfrigération de la patinoire. Deux configurations ont été testées : la récupération directe et la récupération à l'aide d'un échangeur de chaleur. La récupération directe apportait des économies de 24 % de demande en chauffage au cours de l'année. Un échangeur de chaleur dimensionné pour répondre aux pointes de débit de ventilation occasionné par les opérations de surfacage permettait une diminution de 61 % de la demande en chauffage. En utilisant un échangeur de chaleur dimensionné pour les périodes de fonctionnement normal seulement, la demande diminuait de 52 %, malgré un échangeur trois fois plus petit. Cet échangeur ayant le meilleur rapport économies/dimension, il a été utilisé pour évaluer l'impact environnemental et économique de la récupération de chaleur. L'analyse environnementale révèle que les impacts sur les changements climatiques et l'extraction de ressources sont grandement réduits, et que l'impact sur la santé humaine et les écosystèmes est légèrement diminué. De plus, il est évident que la phase d'utilisation est la principale source d'impact, et que celui-ci est fortement affecté par la source d'énergie utilisée pour le chauffage et la production d'électricité. Finalement, l'analyse économique prédit un taux de rendement de 19 % à 27 % pour l'investissement initial, selon les coûts d'énergie.

Mots-clés : récupération de chaleur, aréna, patinoire, bâtiment, analyse environnementale, analyse financière

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé à mener à bien ce projet de maîtrise. En particulier, M. Nicolas Galanis, mon directeur de recherche, qui a toujours su m'aider à bien orienter mes travaux, M. Lotfi Seghouani, qui m'a apporté du support sur TRNSYS et sur son code Fortran et M. Bruno Gagnon, qui m'a permis d'approfondir mes connaissances en analyse d'impact environnemental et sur OpenLCA.

Merci également aux membres du jury pour le temps consacré à la lecture et la correction de ce document.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	v
REMERCIEMENTS.....	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES SYMBOLES.....	xi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
2.1 Simulation énergétique d'un aréna	3
2.2 Analyse d'impacts environnementaux.....	5
2.3 Analyse financière.....	7
CHAPITRE 3 SCHÉMATISATION ET SIMULATION ÉNERGÉTIQUE DES SYSTÈMES	9
3.1 Système de base	9
3.2 Récupération directe.....	10
3.3 Échangeur de chaleur	11
3.4 Approche de modélisation.....	12
3.5 Modélisation du serpentin refroidisseur	12
3.6 Modélisation du serpentin de chauffage	13
3.7 Modélisation de l'échangeur de chaleur	13
CHAPITRE 4 IMPLÉMENTATION DANS TRNSYS	15
4.1 Système de base	15
4.2 Système avec récupération directe	16
4.3 Système avec échangeur de chaleur.....	17
4.4 Traitement des données.....	18
CHAPITRE 5 RÉSULTATS DE LA SIMULATION	19
5.1 Cas de base.....	19
5.2 Récupération directe.....	22
5.3 Échangeur de chaleur	24

5.4	Analyse des résultats.....	28
CHAPITRE 6 ANALYSE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL		31
6.1	Objectifs.....	31
6.2	Champ d'étude.....	31
6.2.1	Unité fonctionnelle	32
6.2.2	Frontières du système	32
6.2.3	Hypothèses, allocations et limites	32
6.3	Inventaire	34
6.4	Évaluation d'impacts.....	36
6.5	Interprétation.....	42
6.5.1	Révision d'inventaire	42
6.5.2	Analyse de contribution et de sensibilité.....	43
6.5.3	Révision des données de départ.....	45
6.5.4	Contrôle de complétude, d'incertitude et de cohérence	45
6.5.5	Comparaison aux études existantes	47
6.6	Limites et recommandations.....	49
CHAPITRE 7 ANALYSE FINANCIÈRE		51
7.1	Rendement équivalent.....	51
7.2	Coût du kilowattheure économisé.....	53
7.3	Analyse des résultats.....	54
CHAPITRE 8 CONCLUSION		55
ANNEXE A - Documentation pour l'échangeur		57

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 - Schéma du système de ventilation de base	9
Figure 3.2 - Fonctionnement du système de chauffage-climatisation	10
Figure 3.3 - Schéma du système avec récupération directe	11
Figure 3.4 - Schéma du système avec échangeur	11
Figure 5.1 - Schéma TRNSYS du système de base	15
Figure 5.2 - Schéma TRNSYS du système avec récupération directe.....	16
Figure 5.3 - Schéma TRNSYS du système avec échangeur	17
Figure 6.1 - Profil de demande pour le 10 janvier, cas de base	20
Figure 6.2 - Profil de demande pour le 10 avril, cas de base	20
Figure 6.3 - Profil de demande pour le 10 juillet, cas de base	21
Figure 6.4 - Demande mensuelle en énergie, cas de base.....	22
Figure 6.5 - Profil de demande pour le 10 janvier, récupération directe	23
Figure 6.6 - Demande mensuelle en énergie, récupération directe.....	23
Figure 6.7 - Profil de demande pour le 10 janvier, échangeur pleine grandeur.....	24
Figure 6.8 - Profil de demande pour le 10 avril, échangeur pleine grandeur	26
Figure 6.9 - Demande mensuelle en énergie, échangeur plein format.....	26
Figure 6.10 - Profil de demande pour le 10 janvier, échangeur à débit limité	26
Figure 6.11 - Profil de demande pour le 10 juillet, échangeur à débit limité	27
Figure 6.12 - Demande mensuelle en énergie, échangeur à débit limité	28
Figure 7.1 - Impact des 3 scénarios sans échangeur, chauffage électrique.....	38
Figure 7.2 - Comparaison de l'électricité et du gaz.....	39
Figure 7.3 - Comparaison pour le Québec, avec et sans échangeur	40
Figure 7.4 - Comparaison pour l'Ontario, avec et sans échangeur	40
Figure 7.5 - Comparaison pour le NPCC, avec et sans échangeur	41
Figure 7.6 - Résultats de l'analyse de sensibilité	44
Figure 7.7 - Comparaison des impacts dus à la ventilation et des impacts évités par l'économie de chauffage.....	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 7.1 - Production d'électricité pour les trois régions	34
Tableau 7.2 - Dimensions utilisées pour l'échangeur	34
Tableau 7.3 - Dimensions pour les conduits (par m linéaire).....	35
Tableau 7.4 - Paramètres de fonctionnement du système de ventilation.....	36
Tableau 7.5 - Résultats des dix scénarios	37
Tableau 7.6 - Impacts unitaires de principaux procédés	42
Tableau 7.7 - Impacts sur le climat pour les principaux composants.....	43
Tableau 8.1 - Tarifs pour l'énergie au Québec et en Ontario.....	52
Tableau 8.2 - Résultats de l'analyse financière.....	52
Tableau 8.3 - Coût du kWh économisé	53

LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Signification
<i>1a, 3b, 3b*...</i>	Position sur la figure 3.1
<i>A</i>	Annuité (\$)
<i>C_p</i>	Chaleur massique (kJ/kg.K)
<i>dP</i>	Chute de pression (Pa)
<i>h</i>	Enthalpie (kJ/kg)
<i>i</i>	Taux d'intérêt (décimal)
<i>ṁ</i>	Débit (kg/s)
<i>n</i>	Nombre d'années
<i>P</i>	Valeur actuelle (\$)
<i>Q</i>	Volume d'air (m ³)
<i>Q̇</i>	Puissance thermique (W)
<i>T</i>	Température (K)
<i>W</i>	Travail (J)

Indices	Signification
<i>c</i>	Écoulement chaud
<i>ch</i>	Chauffage
<i>e</i>	Écoulement entrant
<i>f</i>	Écoulement froid
<i>hum</i>	Humidification
<i>ref</i>	Refroidissement
<i>s</i>	Écoulement sortant

Caractères grecs	Signification
ϵ_s	Efficacité de transfert latent

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'un des grands enjeux du 21^e siècle sera de diminuer l'impact de l'ensemble des activités humaines sur notre milieu. Nos importants besoins en énergie nous poussent à extraire de plus en plus de ressources naturelles et à altérer l'environnement. Il est donc nécessaire de chercher à limiter ces besoins grâce à l'optimisation de notre demande en énergie et à la diminution du gaspillage. Le domaine du bâtiment est une niche importante d'améliorations. Les bâtiments ont besoin d'être tempérés pour la majeure partie de l'année, que ce soit en chauffage ou en climatisation et l'air qui s'y trouve doit être renouvelé régulièrement. Cela entraîne des besoins importants en énergie thermique et électrique. De plus, étant donné la longue durée de vie de la plupart des bâtiments, les systèmes de ventilation installés à leur fabrication peuvent devenir inappropriés et désuets avec le temps. Il est donc important de s'intéresser aux performances de ces systèmes et de trouver des pistes d'améliorations.

Parmi les bâtiments, les patinoires intérieures occupent une place particulière. Elles comprennent une grande enceinte sans cloisons accueillant des spectateurs. Les gradins doivent être chauffés pour assurer le confort des occupants, alors que la patinoire doit être réfrigérée. Les besoins en énergie qui en résultent sont gigantesques. Une étude menée par le CANMET [Lavoie et coll., 2000] a révélé les importantes économies réalisables dans les arénas au Québec. Afin de mieux comprendre le comportement thermodynamique de ces bâtiments, un modèle numérique a été développé à l'Université de Sherbrooke [Seghouani *et coll.*, 2011]. Ces travaux ont exploré certains paramètres de fonctionnement qui permettent de diminuer les besoins en énergie. Par contre, aucune mesure de récupération de chaleur n'a été simulée, alors que les rejets thermiques du bâtiment sont substantiels. Le présent projet a donc porté sur l'étude de l'amélioration de l'efficacité énergétique du système de ventilation par la récupération de la chaleur rejetée par les condenseurs du système de réfrigération de la patinoire.

Le but du projet est de prévoir les gains énergétiques réalisables par cette récupération de chaleur et d'évaluer si ces gains énergétiques se traduisent en gains environnementaux et financiers. Cela pourra aider la prise de décision dans l'avenir quant à l'implantation de telles mesures dans des bâtiments neufs ou existants en donnant des estimations chiffrées des impacts attendus du système de récupération de chaleur.

Afin de bien évaluer les économies réalisables, une simulation énergétique a été menée à partir du modèle développé à l'Université de Sherbrooke [Seghouani *et coll.*, 2011]. Ensuite, une analyse d'impact environnemental a été réalisée pour évaluer la diminution de l'empreinte écologique du bâtiment apportée par la modification. Finalement, une étude financière s'est intéressée à la rentabilité prévue du projet. Cette approche se démarque des travaux précédents en par plusieurs aspects. Tout d'abord, les analyses environnementales et financières n'avaient pas été appliquées aux travaux précédents à l'université de Sherbrooke. De plus, la recherche documentaire sur les 20 dernières années n'a révélé aucun article scientifique traitant de la récupération de chaleur dans les patinoires fermées.

Dans ce rapport, le second chapitre porte sur l'étude bibliographique réalisée pour la définition du projet. Ensuite, un chapitre est consacré à la description du système de ventilation. Le chapitre quatre définit les formules ayant été utilisées pour modéliser les divers échanges énergétiques ayant lieu au sein du système de ventilation. Le cinquième chapitre contient des explications sur la mise en place du modèle dans TRNSYS pour la simulation des besoins énergétiques annuels. Le chapitre six regroupe les résultats de cette simulation. Le septième chapitre expose l'analyse environnementale réalisée et les conclusions qui en découlent. Le chapitre suivant touche à l'analyse financière. Finalement, le neuvième chapitre contient les conclusions qui découlent de l'ensemble du projet.

CHAPITRE 2

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette section regroupe l'ensemble des recherches documentaires nécessaires à la réalisation des principales sections du projet, soit la simulation de la demande énergétique, l'analyse d'impacts environnementaux et l'analyse financière.

2.1 Simulation énergétique d'un aréna

Le présent projet s'inscrit dans une démarche beaucoup plus vaste ayant impliqué plusieurs autres études. Tout d'abord, un rapport du CANMET [Lavoie *et coll.*, 2000] a indiqué que les arénas du Québec (Canada) représentaient une niche importante d'amélioration d'efficacité énergétique de la province. Le rapport stipule que les économies annuelles réalisables en modifiant les arénas actuels sont de 270 GWh et 63 kilotonnes de CO₂-équivalent pour la province de Québec (Canada). Le rapport souligne aussi que les modifications proposées sont rentables sur le plan financier.

Afin de mieux comprendre la demande énergétique des arénas, un projet a été mandaté par l'ASHRAE, en collaboration avec le CANMET et l'Université de Sherbrooke. Le but du projet était de développer un modèle plus précis que celui contenu dans le guide de l'ASHRAE [2006]. Plusieurs méthodes ont été explorées pour arriver à modéliser efficacement les échanges énergétiques. En se basant sur l'aréna Camilien Houde, à Montréal (Québec, Canada), un modèle par éléments finis a été développé par Bellache *et coll.* [2006]. Le modèle simulait des échanges en 2D sur plusieurs tranches de l'aréna. Ce modèle a ensuite été validé par des mesures réalisées dans l'aréna réel [Ouzzane *et coll.*, 2006]. L'inconvénient majeur de ce modèle était le très long temps de calcul nécessaire. La vitesse maximale de résolution du code sur un ordinateur moyen était en temps réel, soit 24 heures de calculs pour simuler 24 heures de fonctionnement. Cela constituait un frein majeur à la prédiction des besoins énergétiques annuels du bâtiment dans diverses conditions.

Afin de contourner les limites du code par éléments finis, un modèle zonal, utilisant 64 divisions, a été développé par Daoud *et coll.* [2008]. Il était possible de simuler les échanges de chaleur ayant lieu au-dessus de la glace avec une précision semblable au modèle de Bellache *et coll.*[2006], mais avec beaucoup moins de temps de calcul. Une année entière pouvait être simulée en 72 heures, ce qui permettait de meilleures études paramétriques. Les effets de l'émissivité du plafond et de la température de consigne des gradins ont ainsi pu être évalués.

Le modèle de Daoud *et coll* [2008]. n'incluait pas de simulation des échanges thermiques avec le sol et le système de réfrigération. Ces éléments étaient pris en compte par l'application de conditions aux limites. Le modèle a été complété par Seghouani *et coll.* [2011] en incluant la simulation des échanges avec le sol et du fonctionnement du système de réfrigération. Le système de réfrigération réel comporte cinq compresseurs et deux condenseurs refroidis par l'air extérieur. Pour des fins de modélisation, les deux condenseurs ont été modélisés par cinq condenseurs partiels couplés aux compresseurs. Il a été montré que l'utilisation de seulement quatre compresseurs était suffisante pour conserver la qualité de la glace. Cela diminuait grandement la pointe de puissance demandée durant les surfaçages. Le modèle permet également de connaître le débit et la température de l'air rejeté par les condenseurs.

Les travaux cités ici ont donc permis de modéliser le fonctionnement de l'aréna dans son ensemble. Divers paramètres de fonctionnement ont été étudiés et modifiés pour réaliser des économies d'énergie. Aucune mesure de récupération de l'énergie rejetée n'a été simulée. Toutefois, une étude réalisée par Arias et Lundqvist [2006] a montré que, pour un supermarché, la récupération de la chaleur rejetée par le système de réfrigération pouvait répondre à la quasi-totalité des besoins en chauffage. Étant donné la grande similitude entre un aréna et un supermarché (grandes surfaces ouvertes, besoins simultanés en chauffage et réfrigération) il est raisonnable de considérer que cette stratégie pourrait être bénéfique pour un aréna. Le présent projet a donc été orienté vers l'utilisation des rejets de chaleur des condenseurs pour le chauffage de l'air de ventilation du bâtiment.

2.2 Analyse d'impacts environnementaux

Les études réalisées précédemment à l'Université de Sherbrooke ne se sont pas intéressées à comparer les économies d'énergies réalisées et leur impact environnemental aux résultats de Lavoie *et coll.* [2000]. Pourtant, cette comparaison permettrait d'évaluer le niveau de performance des modifications proposées.

Il existe plusieurs façons d'évaluer l'impact environnemental d'une activité quelconque. La méthode la plus exhaustive est communément appelée Analyse de Cycle de Vie. Cette approche considère les émissions de substances et les extractions de ressources attribuables à l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou service. Elle est basée sur les normes ISO 14040 [ISO, 2006a] et ISO 14044 [ISO, 2006b]. Ces normes décrivent le cadre méthodologique à respecter pour réaliser une étude de ce type. La méthodologie est décrite, appuyée d'exemples, dans plusieurs ouvrages, comme celui de Jolliet *et coll.* [2005]. La démarche est divisée en quatre grandes étapes : la définition du but et des limites du système étudié, la réalisation de l'inventaire des émissions et extractions, le calcul des impacts environnementaux résultants, et l'interprétation des résultats. La dernière étape comprend également toutes les analyses d'incertitude et de complétude de l'étude qui permettent de valider la fiabilité des résultats.

La réalisation d'inventaires et le calcul d'impact sont deux étapes très ardues à réaliser à partir de zéro. Il existe donc plusieurs bases de données compilées par des spécialistes qui permettent de connaître les inventaires résultants d'activités économiques variées. Ces bases de données peuvent être soit agrégées ou désagrégées. Une base de données agrégée contient l'ensemble des procédés et fournit les émissions totales résultantes sans donner d'indications sur les sous-procédés responsables. Les bases de données désagrégées forment des arbres de procédés interreliés. L'inventaire d'un procédé donné se fait par l'addition des contributions de tous les procédés sous-jacents à l'activité visée. Il est donc possible de connaître le sous-procédé responsable de la majeure partie des émissions. Le principal avantage d'une base de données agrégée est la rapidité de calcul de l'inventaire, puisque toute l'information est déjà compilée. Les bases de données désagrégées sont plus longues à traiter, mais permettent une analyse plus profonde des sources d'impact. La base de données européenne Ecoinvent est la

base de données désagrégée la plus complète à ce jour [Jolliet *et coll.*, 2005]. Il en existe également une version agrégée pour faciliter le calcul lorsque l'arborescence complète n'est pas nécessaire. Elle contient également plusieurs procédés américains, qui pourront être utilisés pour l'étude de l'aréna.

L'une des particularités de l'inventaire est la modélisation du recyclage. Deux modèles existent : recyclage en boucle fermée et recyclage en boucle ouverte. Le recyclage en boucle fermée est applicable lorsque le procédé étudié réutilise directement ses propres rejets pour s'approvisionner en matière première. Un bon exemple de ce type de recyclage est la refonte des masselottes dans une fonderie. Le recyclage en boucle ouverte est utilisé lorsque les rejets sont utilisés dans un autre procédé, pour produire un bien différent. Par exemple, l'utilisation de bouteilles de plastique recyclées pour produire des vêtements. [Jolliet *et coll.* 2005]

L'analyse d'impact est elle aussi réalisée à partir de modèles développés par des équipes scientifiques. Ces modèles font appel aux connaissances les plus à jour dans le domaine de l'hydrologie et de la météorologie, pour déterminer les voies d'impact de toutes les substances répertoriées après leur émission dans l'air, l'eau ou le sol. Suite à ces prévisions de propagation, les modèles arrivent à en prévoir les effets observables sur l'environnement, appelés impacts environnementaux. Les impacts sont généralement regroupés en impacts intermédiaires et en impacts finaux. Les catégories d'impact intermédiaires regroupent les émissions totales en émissions équivalentes d'une substance de référence (par exemple, le CO₂ est la référence pour l'effet de serre). Les impacts finaux sont regroupés en indices d'impact normalisés, généralement en les rapportant aux émissions moyennes par habitant. Les méthodes les plus répandues sont IMPACT 2002+, ReCiPe et TRACI [Jolliet *et coll.*, 2005]. IMPACT 2002+ est une méthode suisse, qui a été étendue à l'Europe au fil des ans [Jolliet, 2005 et Jolliet, 2003]. Elle compte 14 catégories intermédiaires et 4 catégories finales exprimées en points. C'est l'une des méthodes les plus utilisées. La méthode ReCiPe comprend 18 catégories intermédiaires et trois catégories d'impacts finales. Certaines catégories intermédiaires n'ont pas d'équivalent en impact final [Goedkoop *et coll.*, 2009]. Une troisième méthode répandue est TRACI, développée aux États-Unis. Cette méthode compte 12 catégories intermédiaires, mais ne fait pas de normalisation en impacts finaux [Bare, 2002].

Pour sa complétude et l'uniformité de ses indicateurs d'impact, la méthode IMPACT 2002+ sera privilégiée.

Afin de faciliter l'utilisation des bases de données, il existe plusieurs logiciels d'analyse de cycle de vie. L'un d'entre eux a été développé dans les dernières années comme logiciel *open source* et gratuit. Il s'agit d'OpenLCA [OpenLCA, 2011]. Ce logiciel est supporté par plusieurs compagnies réputées dans le domaine. D'autres logiciels commerciaux existent, comme SimaPRO [Pré Consultants, 2011] ou GaBi [PE International, 2011], mais les coûts de licence sont importants. Pour des raisons d'accessibilité, OpenLCA a été choisi.

Il existe beaucoup de documentation portant sur l'analyse de cycle de vie appliquée à des bâtiments. Par exemple Scheuer *et coll.* [2003] ont démontré que la majeure partie (près de 95 %) des émissions engendrées par un bâtiment est due à sa consommation d'énergie. Étant donné la nature d'un aréna (très grand volume ouvert, chauffage/réfrigération simultanés), cette conclusion sera certainement valide. Il sera donc important de bien évaluer sa consommation d'énergie. Les quantités de matériaux nécessaires à sa fabrication pourront être plus approximatives, vu leur faible contribution.

Il a également été démontré que la récupération de chaleur pour la ventilation de bâtiments est une solution avantageuse. Nyman et Simonson [2004] ont réalisé une étude énergétique qui montre que l'énergie totale attribuable à la fabrication d'un échangeur de chaleur est de 40 à 80 fois inférieure à l'énergie totale économisée sur son cycle de vie. Cette étude montre également qu'un échangeur sous-dimensionné est moins avantageux, car il demande une puissance de ventilation supérieure pour une récupération d'énergie moindre. Ces résultats supportent l'utilisation d'un échangeur de chaleur pour la récupération de chaleur dans la présente étude.

2.3 Analyse financière

Le rapport de Lavoie *et coll.* [2005] comprend une analyse sommaire des économies financières prévues pour les arénas incorporant l'ensemble des mesures d'efficacité énergétique proposées. Il montre que les économies financières totales sur 20 ans représentent

près de trois fois l'investissement initial. Après avoir calculé les économies d'énergie réalisées, il sera possible de réaliser une telle analyse pour le cas étudié. Afin de donner une idée de l'efficacité de l'investissement, il serait également possible de calculer le taux de rendement équivalent, pour le comparer au rendement de placements ou d'autres projets. Le livre de Park *et coll.* [2002] contient toutes les formules nécessaires à de telles évaluations financières, fréquentes dans le domaine de l'ingénierie. Il serait également intéressant de calculer le prix équivalent par kilowattheure économisé. Les mesures d'économie d'énergie peuvent aisément être évaluées avec cet indice. S'il en coûte plus cher pour économiser un kilowattheure que ce qu'il en coûte pour l'utiliser, les gestionnaires vont rarement être intéressés par la mesure proposée.

CHAPITRE 3

SCHÉMATISATION ET SIMULATION

ÉNERGÉTIQUE DES SYSTÈMES

Cette section comprend les schémas de fonctionnement des trois configurations étudiées pour le système de ventilation de l'aréna qui sont : le système de base, le système avec récupération directe de l'air des condenseurs et le système avec échangeur de chaleur.

3.1 Système de base

Le système de ventilation de base de l'aréna, tel que modélisé par Daoud *et coll.*[2008] est illustré à la figure 3.1. L'air extérieur passe d'abord par le serpentin de refroidissement, où il est déshumidifié ou refroidi au besoin. Il passe ensuite dans le serpentin de chauffage, qui amène l'air à la température minimale requise et qui l'humidifie si nécessaire.

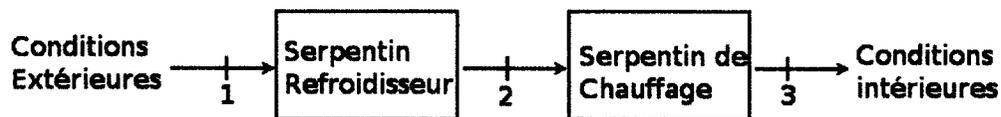


Figure 3.1 - Schéma du système de ventilation de base

Le système de ventilation garde la température de l'air intérieur entre 15°C et 23°C et son humidité absolue entre 0.0021 g_{eau}/g_{air} et 0.0035 g_{eau}/g_{air}. Ces larges plages d'opération ont pour but d'alléger la charge sur le système de ventilation tout en préservant la qualité de la glace. Le fonctionnement général du système est montré à la figure 3.2.

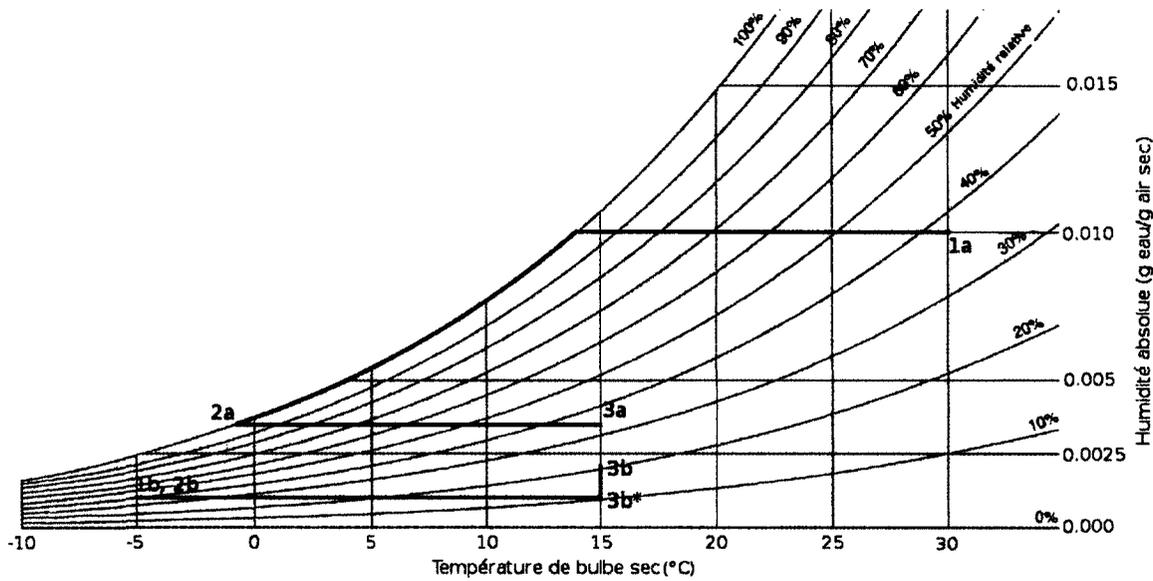


Figure 3.2 - Fonctionnement du système de chauffage-climatisation

Le chemin a est typique pour une journée d'été. L'air chaud et humide est admis au point 1a (correspondant au point 1 sur la figure 3.1). Puisque la température de saturation pour l'humidité visée ($0.0035 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{g}_{\text{air}}$) est plus basse que la température voulue, l'air est refroidi jusqu'à environ -1 °C en 2a. Il est ensuite réchauffé jusqu'à la température de consigne minimale (15 °C) pour arriver aux conditions voulues au point 3a. Le cas b représente une journée d'hiver typique. Puisque l'air est très froid et sec, le serpentin de refroidissement n'est pas en fonction. L'air entre donc dans le serpentin de chauffage aux conditions extérieures. Il y est réchauffé à 15 °C et humidifié jusqu'à $0.0035 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{g}_{\text{air}}$.

3.2 Récupération directe

La première mesure de récupération de chaleur consiste à utiliser directement l'air réchauffé par les condenseurs durant les périodes froides. Le système est représenté par la figure 3.3. L'air en 2 est de 6 à 12 °C plus chaud que l'air ambiant. En utilisant cet air durant les journées froides, la quantité de chaleur nécessaire pour l'amener à la température de consigne diminue. Le système peut utiliser 100% d'air extérieur (si la température en 1 excède 15 °C), 100% d'air des condenseurs (si la température en 3 est sous 15 °C , ou un mélange 50-50 des deux (lorsque la température en 3 est au-dessus de 15 °C , mais que l'air en 1 est sous 15 °C). Il n'est

donc pas possible de récupérer la chaleur durant les journées plus chaude. De plus, l'humidité de l'air n'est pas tenue en compte, bien qu'elle puisse affecter la demande en énergie du système.

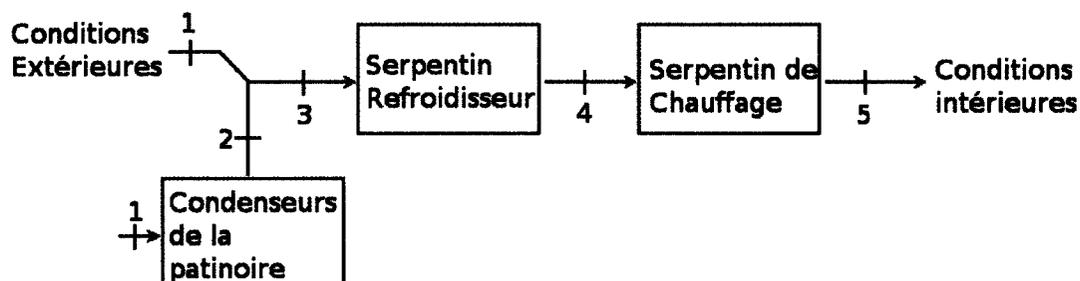


Figure 3.3 - Schéma du système avec récupération directe

3.3 Échangeur de chaleur

La deuxième configuration de récupération de chaleur est montrée à la figure 3.4. L'ajout d'un échangeur permet d'augmenter la température de l'air entre les points 2 et 3. Il peut donc préchauffer l'air hivernal avant son admission dans le serpentin de chauffage et réaliser une partie du chauffage de l'air déshumidifié l'été.

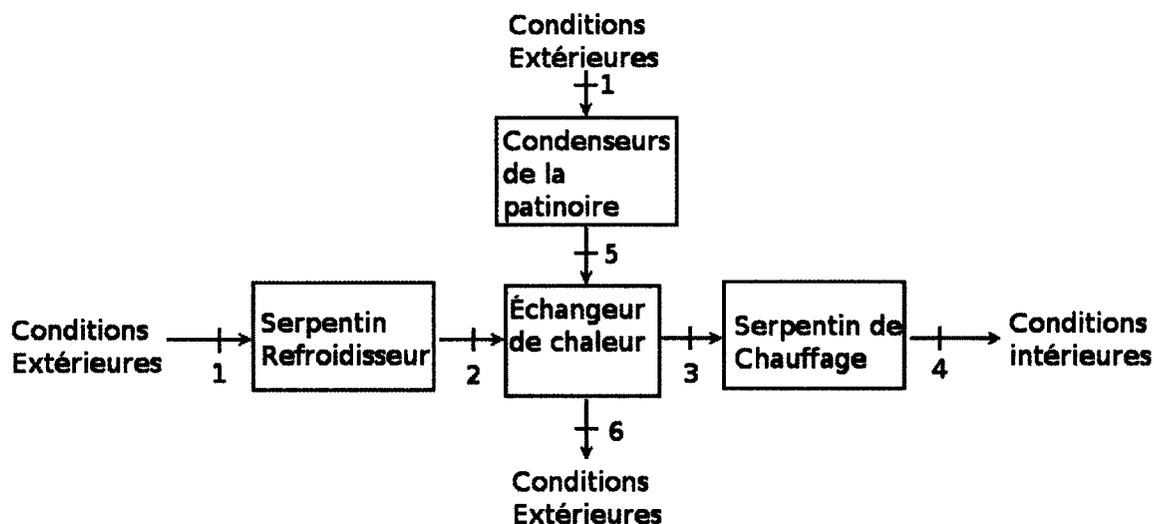


Figure 3.4 - Schéma du système avec échangeur

Le système de ventilation utilise un débit d'air de 4274 l/s en fonctionnement normal. Durant les opérations de surfacage, de la machinerie propulsée au gaz propane circule sur la patinoire

durant 12 minutes. Afin d'évacuer les gaz d'échappement, le débit d'air augmente à 14658 l/s. Les surfaçages sont plus ou moins fréquents selon l'achalandage du bâtiment. L'horaire standard comprend huit opérations de surfaçage durant la semaine et douze la fin de semaine. Ces paramètres correspondent à ceux décrits par Daoud [2008].

3.4 Approche de modélisation

La première étape du projet consistait en une analyse des échanges énergétiques ayant lieu dans le système de ventilation. Cette simulation a été menée à l'aide du logiciel TRNSYS, en utilisant des modèles existants. La simulation dans TRNSYS est basée sur des pas de temps de 0.1h (6 minutes). La puissance fournie par chaque composant est calculée et multipliée par la durée du pas de temps pour obtenir des valeurs d'énergie. Les équations contenues dans le présent chapitre se trouvent dans la documentation du logiciel TRNSYS. Elles concordent avec les équations contenues dans McQuiston *et coll.* [2005].

3.5 Modélisation du serpent refroidisseur

Le fonctionnement du serpent refroidisseur est modélisé de façon itérative par le module TRNSYS. Tout d'abord, les conditions d'entrée sont analysées. Elles correspondent soit aux conditions extérieures, soit aux conditions de sortie des condenseurs selon la configuration étudiée. Les conditions extérieures proviennent des valeurs standards de *Canadian Weather for Energy Calculations* [Numerical Logics, 1999] pour la station Jean Bréboeuf, à Montréal (Québec, Canada) (45.5°N, 73.62°O). Les conditions de sortie des condenseurs sont fournies par un fichier de résultats tiré de la simulation menée par Seghouani *et coll.* [2011]. L'utilisation de ce fichier accélère beaucoup la modélisation, puisqu'il ne demande pas de réaliser la simulation complète de l'aréna pour obtenir les résultats. Il est donc possible de simuler le fonctionnement sur une année entière en quelques minutes. Le module détermine ensuite si l'air est au-dessus de la température et de l'humidité relative de consigne. Une sous-routine permet d'obtenir les propriétés psychrométriques de l'air à diverses températures et humidités. La température de l'air est abaissée de façon itérative jusqu'à ce qu'elle respecte la plus restrictive des deux consignes. Les propriétés de l'air de sortie peuvent ensuite être

déterminées à l'aide de la sous-routine psychrométrique. L'énergie de refroidissement nécessaire est ensuite calculée à partir de l'équation (3.1).

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{air} (h_{1a} - h_{2a}) \quad (3.1)$$

La valeur de l'enthalpie h est fournie par la sous-routine psychrométrique.

3.6 Modélisation du serpentín de chauffage

Pour le serpentín de chauffage, les conditions d'entrée correspondent aux conditions de sortie du serpentín de refroidissement ou de l'échangeur, selon la configuration étudiée (voir figure 3.1, 3.3 et 3.4). L'air est d'abord chauffé, puis humidifié si besoin. Les puissances de chauffage et d'humidification sont données par les équations (3.2) et (3.3) respectivement.

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{air} (h_{1b} - h_{3b*}) \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_{hum} = \dot{m}_{air} (h_{3b*} - h_{3b}) \quad (3.3)$$

Il est pertinent de noter que l'humidification ajoute une faible quantité de chaleur à l'air. Cette énergie est généralement négligeable, et a été ignorée pour simplifier les calculs de puissance dans TRNSYS.

3.7 Modélisation de l'échangeur de chaleur

La modélisation du fonctionnement de l'échangeur thermique utilise la méthode de la capacité limite. Cette méthode simplifie les calculs et donne des résultats fiables. Le transfert de chaleur ayant lieu à l'intérieur de l'échangeur est donné par l'équation (3.4). Seule la fraction sensible est considérée, car il n'y a pas d'échange d'humidité entre les deux écoulements. Cet échange serait d'ailleurs indésirable, puisque l'air chaud céderait de l'humidité excédentaire à déshumidifié sortant du serpentín refroidisseur.

$$\dot{Q}_{éch} = \varepsilon_s (\dot{m} \cdot C_p)_{\min} (T_{c,e} - T_{f,e}) \quad (3.4)$$

Les conditions de sortie des deux écoulements dans l'échangeur sont données par les équations (3.5) et (3.6).

$$h_{c,s} = h_{c,e} - \frac{\dot{Q}_{éch}}{\dot{m}_c} \quad (3.5)$$

$$h_{f,s} = h_{f,e} + \frac{\dot{Q}_{éch}}{\dot{m}_f} \quad (3.6)$$

CHAPITRE 4

IMPLÉMENTATION DANS TRNSYS

Chacune des trois configurations a été montée dans TRNSYS pour réaliser la simulation. Les sections suivantes décrivent les modules TRNSYS utilisés et les liens qui les unissent.

4.1 Système de base

Ce système constitue le modèle tel qu'utilisé par Daoud [2005] et Seghouani [2009] pour leurs travaux. Il a été validé en le comparant aux résultats obtenus précédemment. Il servira de base de comparaison pour les deux autres systèmes. La figure 4.1 montre le système tel que schématisé dans TRNSYS.

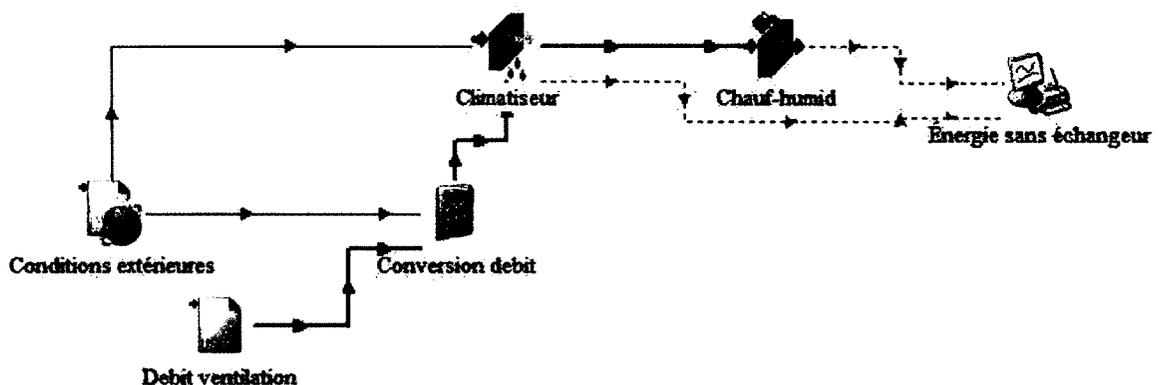


Figure 4.1 - Schéma TRNSYS du système de base

La lecture des conditions extérieures est faite par un module spécialisé (Type15) qui tire les informations d'un fichier météorologique standardisé. Le fichier utilisé correspond aux conditions mentionnées précédemment (Station Jean Bréboeuf, Montréal, 45.5°N, 73.62°O) [Numerical Logics, 1999]. Le débit de ventilation est obtenu grâce à un module de lecture de fichiers textes (Type9) qui extrait les paramètres de fonctionnement définis par les travaux précédents. Une formule de conversion de débit transforme les litres par seconde en kilogrammes par heure. Le module de climatisation est géré par un Type752, dont le fonctionnement est conforme à la description de la section 3.5. Le fichier de débit détermine la

quantité d'air frais à traiter à chaque pas de temps, et le fichier météorologique permet de connaître sa température et son humidité relative. Le module de climatisation fournit les conditions de sortie de l'air au module de chauffage (Type754), dont le fonctionnement a été décrit à la section 3.6. La puissance extraite de l'air par le climatiseur est envoyée à un module d'affichage et d'enregistrement de données (Type65) qui stocke les résultats dans un fichier texte. Le module de chauffage et d'humidification traite l'air pour l'amener aux conditions finales. Les puissances de chauffage et d'humidification sont stockées dans le fichier résultat. Ce modèle fonctionne sur des pas de temps de 0.1h et simule une année entière. Le fichier résultat contient donc 87600 lignes et 3 colonnes, qui permettent de calculer l'énergie annuelle ou mensuelle consommée par le système.

4.2 Système avec récupération directe

Le système avec récupération directe incorpore tous les éléments du système de base, avec quelques ajouts pour simuler la demande due à l'utilisation de l'air des condenseurs et au mélange 50-50. La figure 4.2 montre le réseau utilisé.

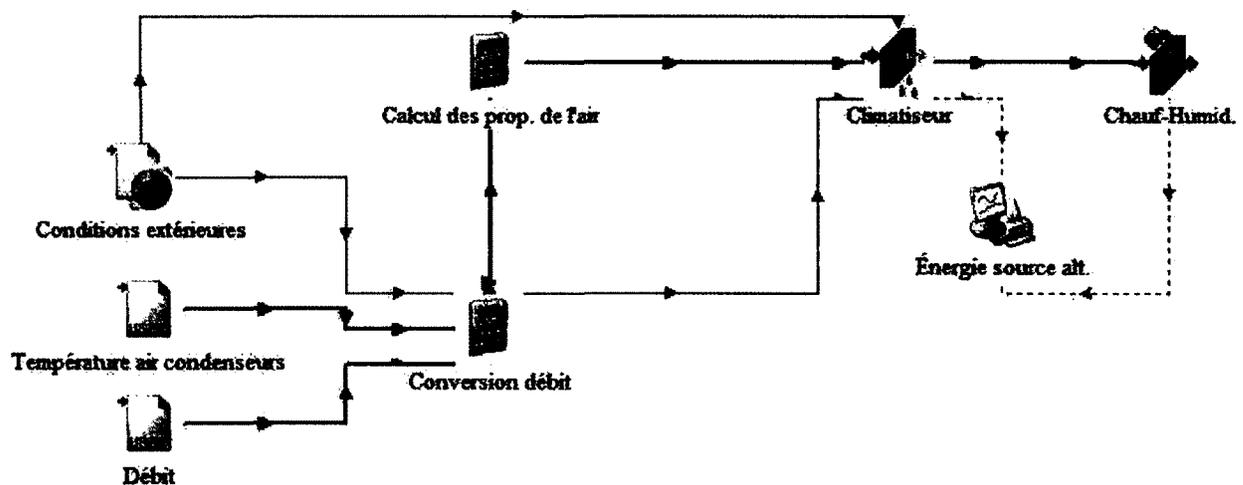


Figure 4.2 - Schéma TRNSYS du système avec récupération directe

On peut voir l'ajout d'un deuxième Type9 pour lire un fichier contenant la température de l'air sortant des condenseurs pour tout pas de temps. Cette valeur est ensuite utilisée pour déterminer les propriétés de l'air à l'entrée du climatiseur. La première configuration utilisée

modifiait la source selon la température extérieure: l'air extérieur était utilisé si la température des condenseurs était plus haute que 23 °C, l'air des condenseurs était utilisé si sa température était plus faible que 15°C et un mélange 50-50 était utilisé si l'air des condenseurs était entre 15 °C et 23 °C. Toutefois, il a été constaté que ce schéma de contrôle causait une augmentation de la demande pour certains jours, à cause de l'humidité de l'air. Il n'était donc pas possible d'obtenir les performances optimales du système par une règle de contrôle simple. Afin de voir quel était le plein potentiel de cette configuration, la démarche a été modifiée. Le modèle a été utilisé pour simuler la demande d'une année entière utilisant seulement l'air des condenseurs, puis seulement l'air mélangé 50-50. Ces deux fichiers résultats, ainsi que celui du système de base, ont été traités par Matlab pour obtenir le profil de demande optimal, utilisant pour chaque pas de temps une puissance inférieure ou égale au système de base. Le profil obtenu représentait les économies d'énergie optimales réalisables avec la récupération directe. Le système de contrôle nécessaire pour atteindre ce profil pourrait être déterminé si cette configuration se révélait être la plus efficace.

4.3 Système avec échangeur de chaleur

Le système utilisant l'échangeur est la troisième configuration à avoir été modélisée dans TRNSYS. Son schéma se trouve sur la figure 4.3.

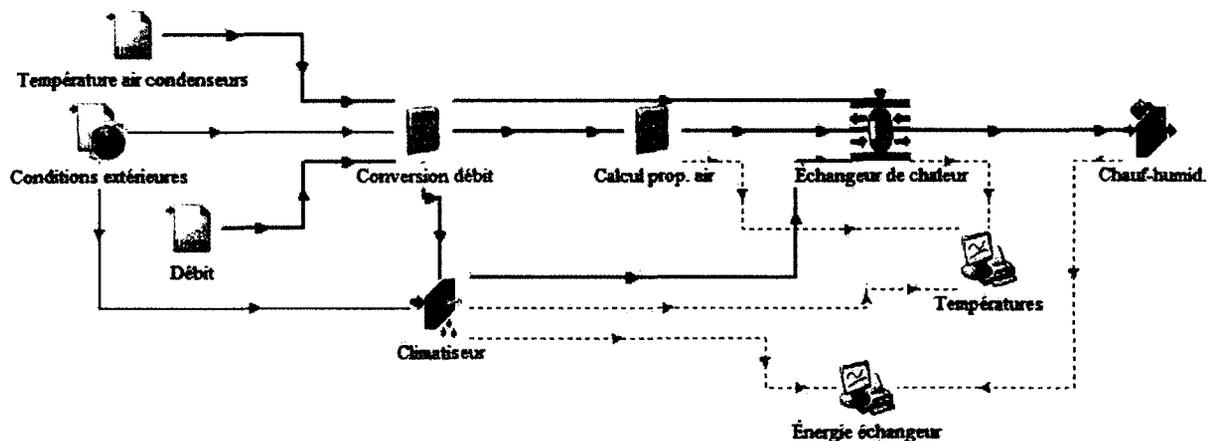


Figure 4.3 - Schéma TRNSYS du système avec échangeur

Dans cette configuration un échangeur modélisé tel que vu à la section 3.7 est ajouté entre le climatiseur et le chauffage. Cet échangeur est alimenté en air chaud aux conditions de sortie

des condenseurs et en air froid provenant du climatiseur. L'affichage des températures ajouté servait d'outil de diagnostic, pour s'assurer que l'échangeur permettait toujours des gains d'énergie. Les deux tailles d'échangeur ont été simulées à l'aide de ce schéma. Afin de tenir compte de la réduction de débit lors de la simulation pour le petit échangeur, le débit d'air chaud a été limité à 4274 l/s.

4.4 Traitement des données

Les fichiers résultats de TRNSYS donnent des valeurs de puissance en kJ/h pour chaque pas de temps. Afin d'obtenir des données en unités plus usuelles, les fichiers ont été traités par Matlab. Les puissances en kilowatts et les transferts d'énergie en kilowattheures ont pu être déterminés. Les données obtenues ont été transférées dans des fichiers au format Excel pour la production de graphiques.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DE LA SIMULATION

Les différentes configurations ont été simulées et leurs performances sont regroupées dans la présente section. Le cas de base sera exposé en premier, suivi de la récupération directe puis du système à échangeur.

5.1 Cas de base

Le système de ventilation tel que défini par Daoud [2008] a été simulé, afin de vérifier les paramètres du modèle et de fournir un point de référence pour les différentes mesures de récupération de chaleur.

Les profils journaliers de la demande d'énergie pour trois journées ont été dressés, afin de voir les différences saisonnières du profil de demande. Le 10 janvier, le 10 avril et le 10 juillet ont été choisis. Le profil printanier étant très semblable au profil automnal, il n'était pas nécessaire de montrer une journée pour chacune de ces deux saisons. La figure 5.1 montre les résultats pour le 10 janvier.

On peut voir que la puissance de chauffage passe de 160 kW environ à près de 515 kW durant les opérations de surfacage. On remarque également que la puissance d'humidification est très faible en comparaison avec la puissance de chauffage.

Le 10 avril demande presque autant de chauffage que de climatisation (voir figure 5.2). De 7 h à 19 h, la puissance demandée en climatisation dépasse les besoins en chauffage. La puissance de refroidissement tourne autour de 100 kW, avec des pics à 445 kW, alors que le chauffage varie de 85 kW à 285 kW. Les températures extérieures durant le mois d'Avril étant modérées, les besoins en climatisation peuvent être attribués à l'humidité ambiante.

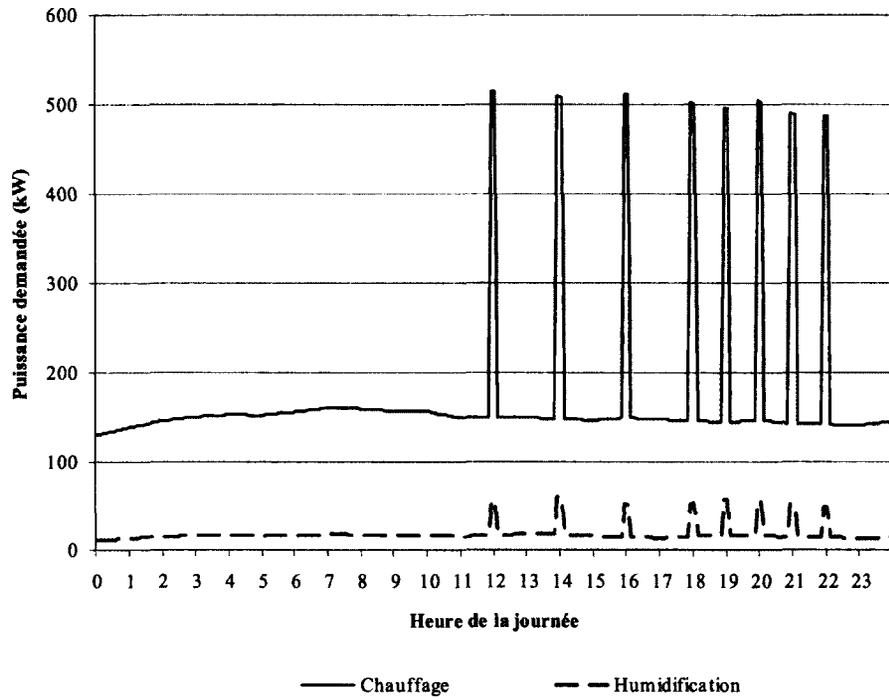


Figure 5.1 - Profil de demande pour le 10 janvier, cas de base

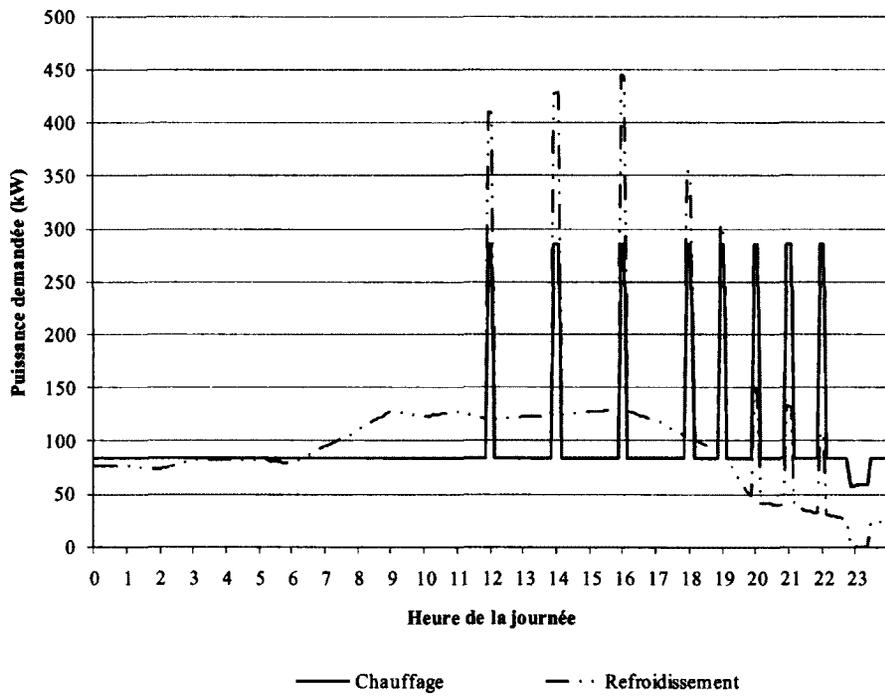


Figure 5.2 - Profil de demande pour le 10 avril, cas de base

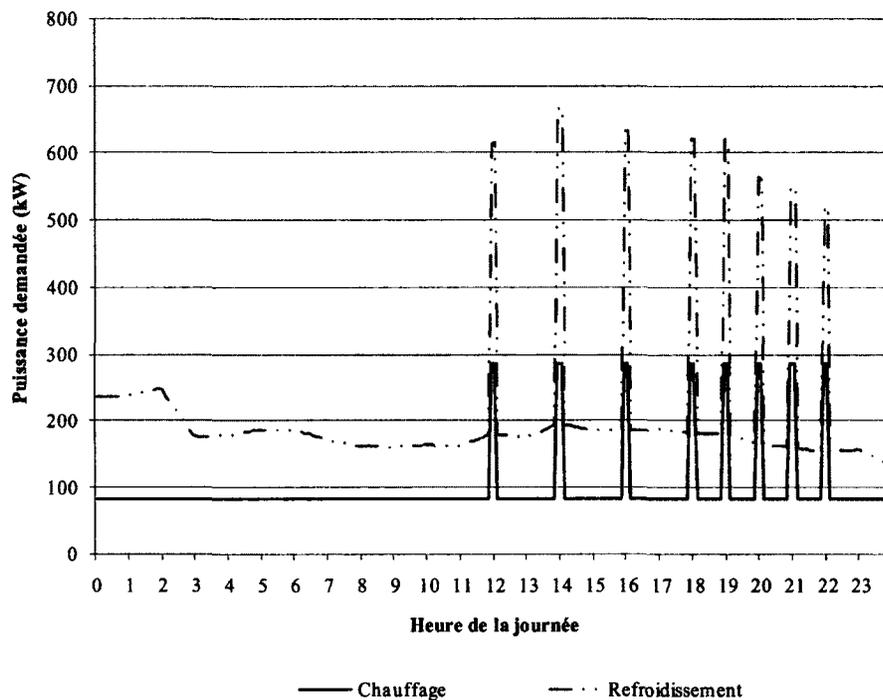


Figure 5.3 - Profil de demande pour le 10 juillet, cas de base

La journée du 10 juillet est dominée par les besoins en climatisation. Toutefois, les besoins en chauffage restent non négligeables, tel que montré par la figure 5.3. Ces derniers sont causés uniquement par le besoin d'amener l'air déshumidifié à la température minimale acceptable.

Les besoins de climatisation varient de 180 kW à 670 kW, alors que le chauffage demande de 85 kW à 285 kW. La puissance de chauffage est donc près de la moitié de la puissance demandée pour la journée d'hiver.

L'énergie totale nécessaire en chauffage, climatisation et humidification pour chaque mois est montrée à la figure 5.4.

On peut voir que la demande en chauffage est élevée tout au long de l'année, avec une valeur maximale en janvier. Le mois ayant les plus faibles besoins en chauffage est le mois d'avril. Les mois les plus chauds demandent beaucoup de climatisation, en particulier pour

déshumidifier l'air, ce qui nécessite un chauffage important de l'air asséché. La climatisation est nécessaire de mars à novembre, avec un maximum en juillet. L'humidification est très peu utilisée, seulement de décembre à mars, et avec des amplitudes beaucoup moindre que les deux autres systèmes. Les besoins annuels totalisent 1000 MWh en chauffage, 845 MWh en climatisation, et 31 MWh en humidification.

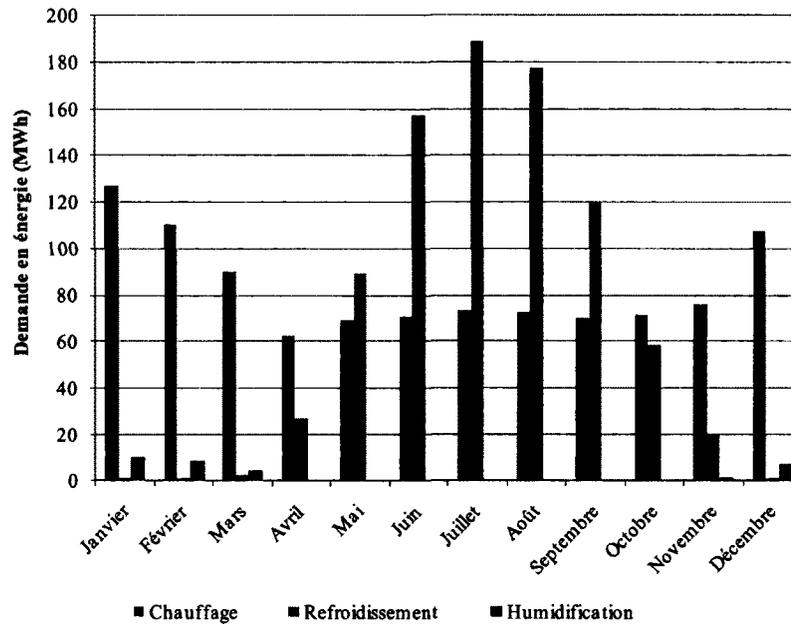


Figure 5.4 - Demande mensuelle en énergie, cas de base

5.2 Récupération directe

Ce système a été modélisé en calculant l'énergie totale demandée pour chaque pas de temps en utilisant l'air externe, l'air des condenseurs et le mélange 50-50. Le cas le plus favorable pour chaque pas de temps a ensuite été utilisé pour construire le profil de demande optimal pour cette configuration. Ces résultats sont donc ceux qui seraient obtenus avec un système de contrôle parfait. On peut voir que l'utilisation directe de l'air des condenseurs a un effet marqué sur la demande en énergie durant l'hiver. La figure 5.5 illustre le nouveau profil hivernal.

La puissance demandée chute à 105 kW en temps normal, et à 325 kW durant les pointes. Pour cette journée, c'est près de 35 % moins de puissance demandée. Les puissances

demandées pour le 10 avril et le 10 juillet n'étaient pas affectées significativement. Les économies annuelles totales représentent 242 MWh. La figure 5.6 montre leur profil mensuel (les valeurs du cas de base sont affichées en pointillés).

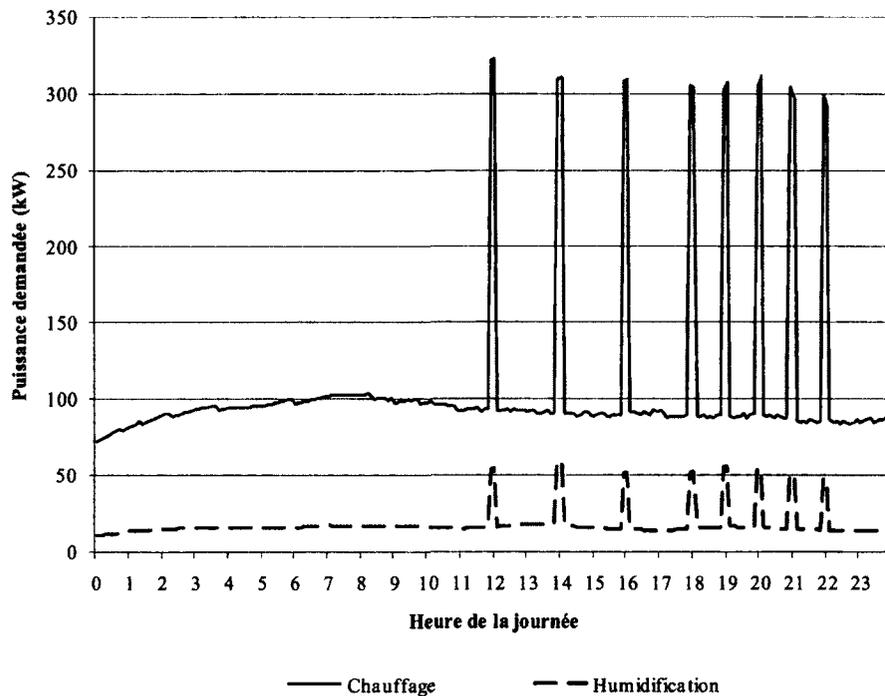


Figure 5.5 - Profil de demande pour le 10 janvier, récupération directe

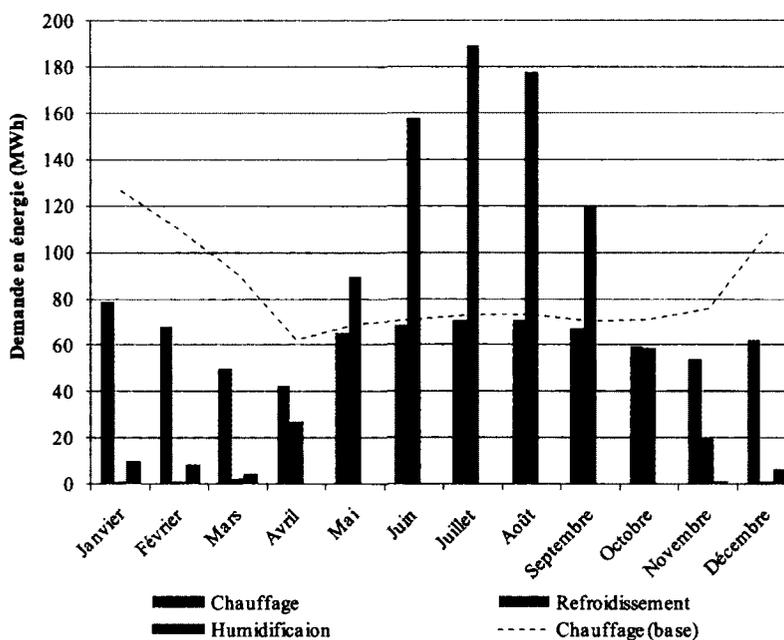


Figure 5.6 - Demande mensuelle en énergie, récupération directe

La demande de novembre à avril baisse de près de 30 % et celle du mois d'octobre diminue de près de 15 %. Par contre, les mois de mai à septembre voient peu d'amélioration. L'humidification et la climatisation ne sont pas affectées par la modification.

5.3 Échangeur de chaleur

Deux dimensions d'échangeur ont été analysées pour cette section. Tout d'abord, l'échangeur a été dimensionné pour accommoder le débit maximal possible, soit 14658 l/s. Ensuite, un échangeur de plus faible taille, suffisant pour le débit hors pointe (4274 l/s), a été simulé afin de voir l'effet réel des pics sur la demande et d'évaluer si le format supérieur est nécessaire. L'échangeur pleine grandeur apporte une amélioration marquée à la demande d'énergie par rapport au cas de base, tel que montré à la figure 5.7.

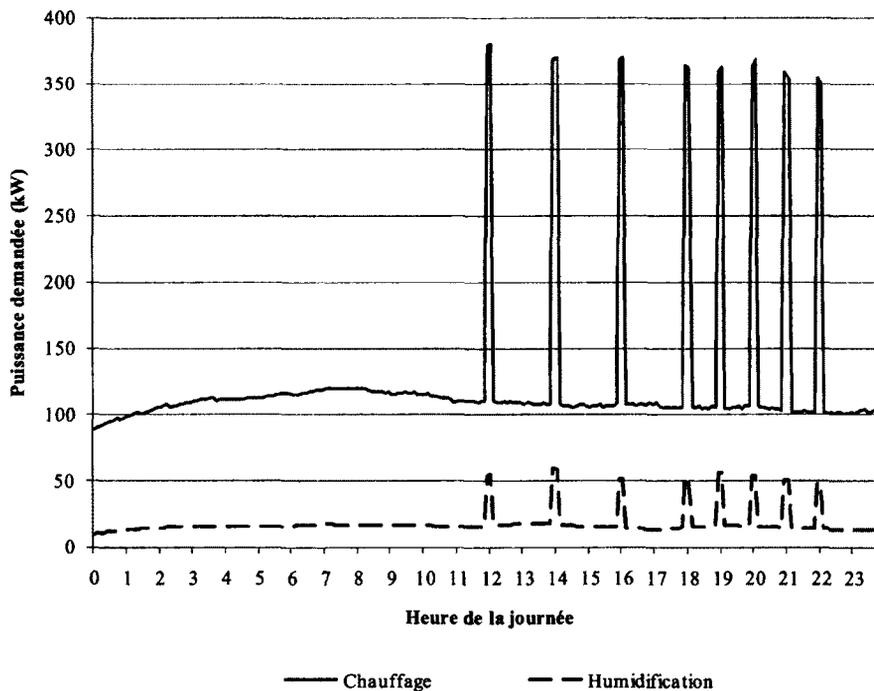


Figure 5.7 - Profil de demande pour le 10 janvier, échangeur pleine grandeur

La puissance de chauffage hivernale passe à 120 kW, alors que les pics sont limités à 380 kW. Ces valeurs sont légèrement au-dessus de celles obtenues par la récupération directe. Par contre, durant le printemps, l'échangeur apporte des gains significatifs. On peut observer, sur

la figure 5.8, que le 10 avril la demande normale en chauffage passe à seulement 20 kW environ, alors que les pointes ne dépassent pas 100 kW. Pour le 10 juillet, les besoins en chauffage sont nuls toute la journée. Encore une fois, la climatisation et l'humidification ne sont pas affectées.

Les besoins mensuels du système sont affichés sur le graphique de la figure 5.9.

Les économies annuelles s'élèvent à 607 MWh, soit environ 2.5 fois les gains réalisés avec le système à récupération directe, grâce aux importantes économies réalisées durant le printemps et l'été. Les mois de juin et juillet voient d'ailleurs leurs besoins en chauffage complètement éliminés.

Le deuxième système étant dimensionné pour accommoder le débit de fonctionnement normal, on peut s'attendre à des performances identiques à l'échangeur de grande taille hors pointe. Toutefois, la demande maximale durant les pointes de demande sera vraisemblablement plus élevée. La figure 5.10 est représentative de ce comportement.

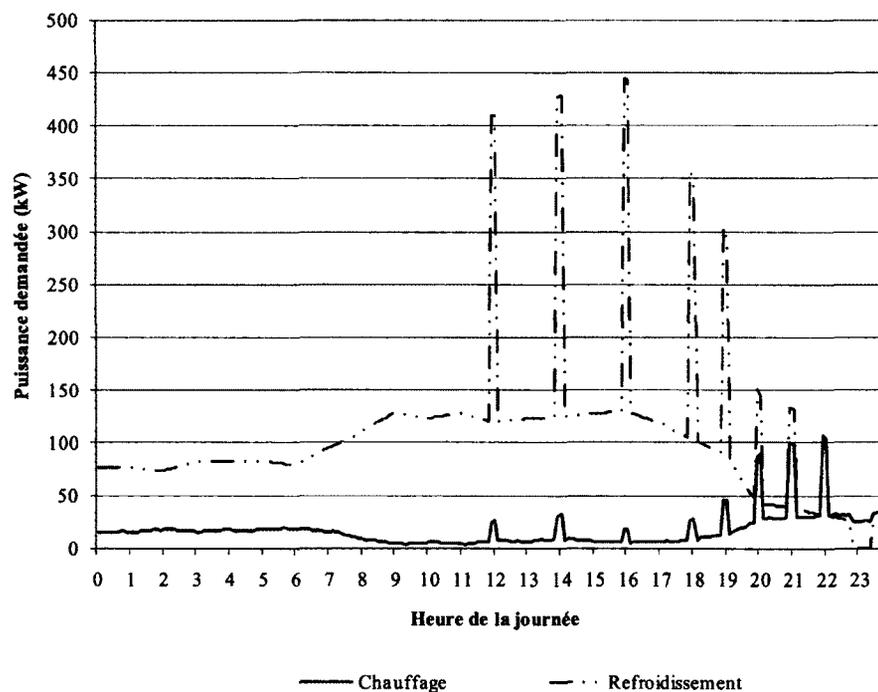


Figure 5.8 - Profil de demande pour le 10 avril, échangeur pleine grandeur

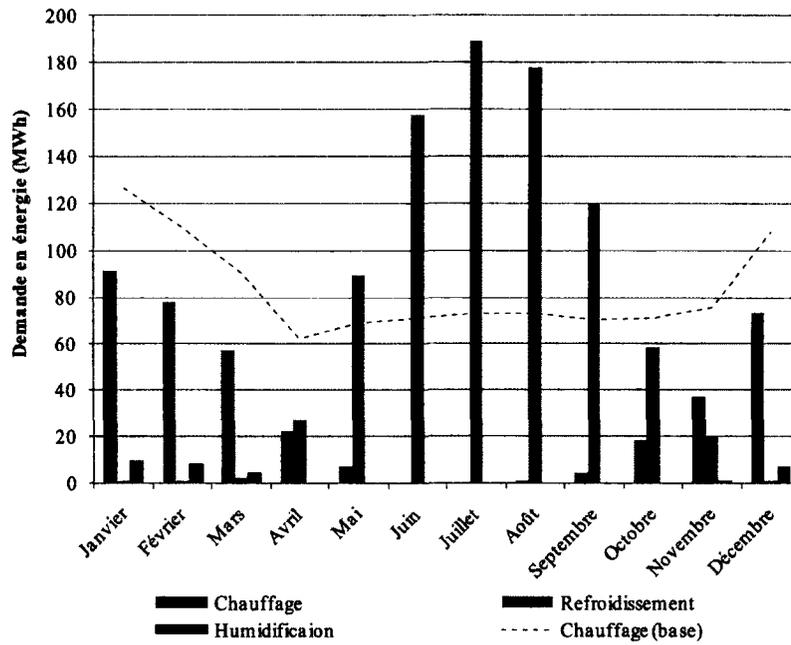


Figure 5.9 - Demande mensuelle en énergie, échangeur plein format

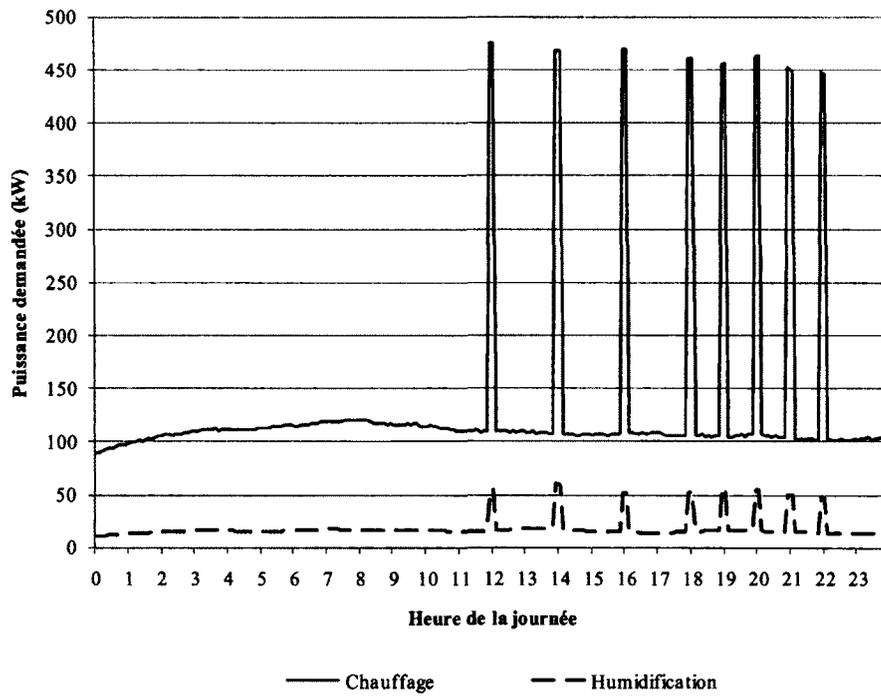


Figure 5.10 - Profil de demande pour le 10 janvier, échangeur à débit limité

On peut voir que la demande en chauffage régulière est d'environ 120 kW. Par contre, les pics maximaux observés sont de 475 kW, contre 380 kW pour l'échangeur plus grand. Ils restent toutefois inférieurs aux 515 kW du système de base. Pour le 10 avril et le 10 juillet, les profils sont également semblables à l'échangeur pleine grandeur, sauf durant les surfaçages, où on observe des pics de demande en chauffage. Ce phénomène est visible sur la figure 5.11.

Malgré cela, les économies mensuelles réalisées (figure 5.12) sont très près des résultats de l'échangeur pleine grandeur (figure 5.9).

L'énergie économisée totalise 518 MWh, ce qui est près des 607 MWh obtenus à la figure 5.9 malgré un débit admis plus de trois fois inférieur. Cela signifie un échangeur moins coûteux à fabriquer et à installer, pour des économies d'énergie de même échelle.

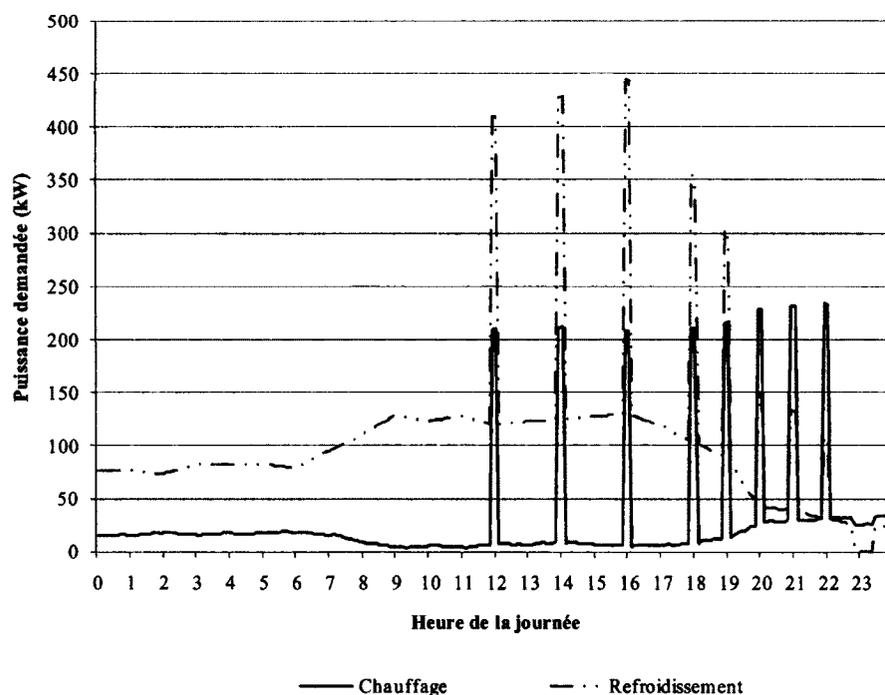


Figure 5.11 - Profil de demande pour le 10 juillet, échangeur à débit limité

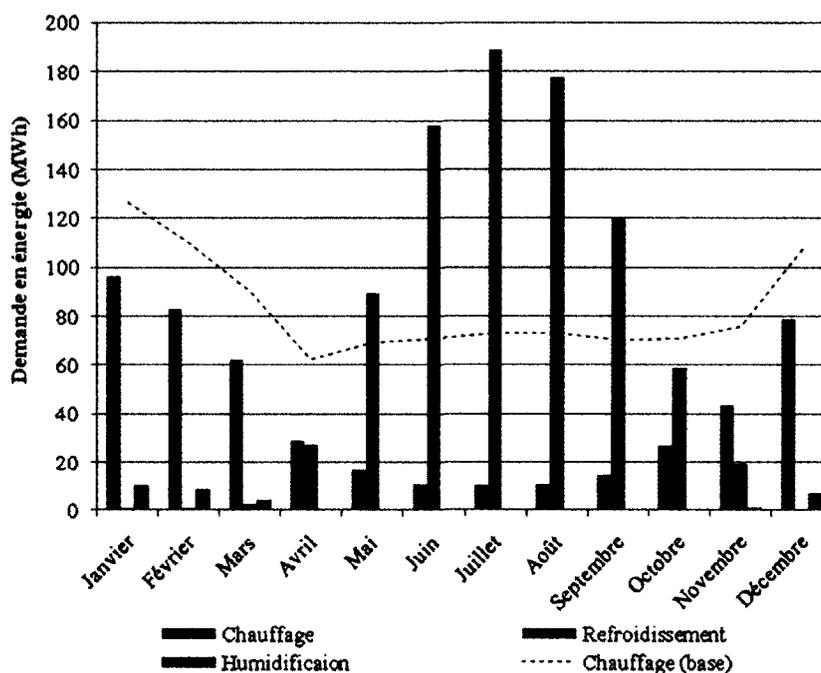


Figure 5.12 - Demande mensuelle en énergie, échangeur à débit limité

5.4 Analyse des résultats

Les résultats obtenus pour les trois configurations étudiées permettent de faire un choix sur la configuration à favoriser pour les analyses environnementales et financières.

Tout d'abord, la configuration avec récupération directe montre des gains intéressants, mais plus faibles que ceux obtenus avec les échangeurs. De plus, malgré les coûts initiaux probablement plus faibles qu'avec un échangeur de chaleur, la complexité du système résiderait dans le contrôle à mettre en place pour optimiser la demande en énergie. En effet, durant les simulations, il a été impossible d'atteindre les économies optimales à l'aide d'un contrôle simple basé sur la température ou l'humidité ambiante. Le système de vannes à implémenter engendrerait également des coûts d'entretien supplémentaires en comparaison avec un échangeur, qui ne comporte pas de pièces mobiles. Cette configuration ne sera donc pas considérée dans les prochaines sections.

Les deux échangeurs ont des performances prévues assez semblables. L'échangeur pleine grandeur a les performances absolues les plus élevées, avec des économies de 607 MWh

annuellement. Toutefois, l'échangeur à débit réduit atteint 85 % de cette valeur malgré une taille trois fois inférieure. Il est donc évident que l'échangeur pleine grandeur est surdimensionné la majorité du temps. Les coûts d'investissement seraient donc plus élevés, pour des gains additionnels plutôt faibles. De plus, l'efficacité de l'échangeur a été considérée comme constante pour les simulations. Toutefois, l'efficacité réelle d'un échangeur dépend de la vitesse d'écoulement à l'intérieur. Si l'écoulement ralentit, la résistance thermique augmente. L'échangeur pleine grandeur aurait donc probablement des performances inférieures durant les périodes de fonctionnement normal, ce qui diminuerait encore l'écart de performances entre les deux formats. Finalement, la puissance de ventilation nécessaire serait supérieure pour un échangeur plus gros. Cette puissance n'a pas été évaluée pour le calcul des gains en chauffage, mais sera prise en compte dans l'analyse environnementale et financière. Elle viendrait probablement diminuer encore l'avantage du grand échangeur.

L'échangeur de chaleur limité à 4274 l/s apparaît donc comme la meilleure configuration de récupération. Les performances attendues sur les plans environnemental et financier sont les plus prometteuses.

CHAPITRE 6

ANALYSE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Lors de l'évaluation de mesures d'économie d'énergie, il est important de réaliser une étude approfondie des conséquences réelles de la modification apportée. Certaines solutions peuvent sembler intéressantes, mais causer simplement un déplacement d'impacts vers un autre lieu ou un autre type de polluant. C'est dans le but de réaliser cette vérification qu'une analyse environnementale de cycle de vie a été menée sur le système avec l'échangeur à débit réduit.

L'analyse se fait en quatre étapes principales : la définition du but de l'étude et des limites du système, la réalisation de l'inventaire, le calcul d'impacts et l'interprétation des résultats. La méthodologie évalue les effets environnementaux positifs (dus à la diminution de la demande énergétique) et négatifs (dus à l'extraction des matériaux, à leur manipulation lors de la fabrication de l'échangeur de chaleur, etc.) en comparant le système avec échangeur à débit réduit au système de base.

6.1 Objectifs

L'objectif de l'étude est de compléter la simulation énergétique par une évaluation des impacts environnementaux du système avec échangeur à débit réduit afin de mieux comprendre les conséquences. Les résultats pourront être comparés aux réductions de CO₂ projetées par Lavoie *et coll.* [2000]. Ils donneront également des indications sur les autres domaines d'impact environnemental.

6.2 Champ d'étude

Il est important de bien cerner les limites de l'étude afin de tirer des conclusions utiles. Les sous-sections suivantes définiront les divers paramètres à considérer.

6.2.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle de la présente étude est le traitement d'air de ventilation, selon les paramètres décrits au **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, durant 30 ans.

6.2.2 Frontières du système

Afin de limiter le nombre de variables à étudier, les éléments redondants dans les deux cas considérés ont été exclus du système. Pour le système de base, seule l'énergie nécessaire au chauffage est considérée, car les serpentins de chauffage et de refroidissement sont identiques dans les deux scénarios. Quant au système avec échangeur, la fabrication de l'échangeur de chaleur, la fabrication des conduits amenant l'air des condenseurs vers l'échangeur, la puissance de ventilation nécessaire pour compenser la chute de pression à l'intérieur de l'échangeur et l'énergie nécessaire au chauffage seront étudiées. Pour l'échangeur et les conduits, les phases du cycle de vie qui sont considérées sont l'extraction de matière première, la transformation, l'utilisation, la fin de vie et le transport associé à chacune de ces phases.

6.2.3 Hypothèses, allocations et limites

Les hypothèses suivantes ont été posées pour simplifier la réalisation de l'étude. Leur validité sera vérifiée à l'étape d'interprétation des résultats.

- Les phases d'installation et de désinstallation ont un impact faible devant les phases de fabrication et d'utilisation, et peuvent être négligées
- Les systèmes de ventilation en place peuvent fournir la puissance supplémentaire requise par l'ajout de l'échangeur sans modification majeure
- Les opérations de découpe causent 10 % de perte de matière
- Les distances de transport pour l'échangeur supposent la production d'aluminium à Bécancour (Qc), l'usinage à Candiac (Qc) et l'utilisation à Montréal (Qc) (soit 175 km pour l'aluminium brut et 30 km pour le produit fini)
- Les distances de transport pour les conduits supposent la production d'acier à Contrecoeur (Qc), la fabrication à Laval (Qc) et l'utilisation à Montréal (Qc) (75 km acier brut, 30 km produit fini)
- Le taux de recyclage pour les matériaux a été considéré égal à la moyenne du secteur de la construction (75%) comme première approximation [Recyc-Québec, 2008]

Selon ces hypothèses, seule l'utilisation d'énergie pour la ventilation sera ajoutée au bilan du système avec échangeur. Il n'est donc pas nécessaire de décider de règles d'allocation d'impact pour la fabrication du système de ventilation.

Le recyclage est considéré en boucle ouverte. Les matériaux récupérés évitent la production de matières premières brutes (aluminium pour l'échangeur, acier doux pour les conduits). Puisque la fabrication des composants utilise les matériaux remplacés, le bilan fourni par le logiciel d'analyse montrera l'utilisation de seulement 25% de la masse d'aluminium primaire, ce qui ressemble à un recyclage en boucle fermée. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les matériaux ne sont pas réellement repris directement par la même fonderie pour refaire le même produit.

Les données utilisées proviennent de la base de données Ecoinvent [Ecoinvent, 2010]. Il s'agit d'une ressource européenne, mais qui contient tout de même plusieurs procédés nord-américains. De plus, le niveau de développement économique des deux régions est semblable et les différences de procédés dans l'industrie ne sont pas trop importantes. La production d'électricité a été basée sur les bilans du Québec, de l'Ontario et de l'est de l'Amérique du Nord. Les procédés exacts pour la production de l'échangeur et des conduits ne sont pas connus. Des opérations d'usinage et de mise en forme génériques ont été utilisées. L'importance de ces remplacements sur les résultats finaux sera vérifiée pour s'assurer que leur imprécision n'est pas une cause d'erreur importante.

Plusieurs des méthodes d'analyse d'impact disponibles sont européennes, comme IMPACT 2002+ et ReCiPe. La méthode TRACI a été développée aux États-Unis [Jolliet *et coll.*, 2005]. Il n'existe pas encore de méthode canadienne prise en charge par OpenLCA. Toutefois, les analyses de cycle de vie menées au Canada ont souvent utilisé des méthodes européennes ou étatsuniennes et ont obtenu des résultats acceptables. Il en sera donc de même pour le présent projet.

6.3 Inventaire

Une fois le système défini et les objectifs identifiés, il est temps de réaliser l'inventaire. Les données relatives à la production d'électricité se trouvent dans le tableau 6.1. Les données pour le Québec proviennent de Ressources naturelles et Faune Québec [2011], les données pour l'Ontario proviennent d'Environnement Canada [2010] et les données pour l'est de l'Amérique du Nord ont été compilées par Bruno Gagnon à partir des rapports du Northeast Power Coordinating Council (NPCC) [Gagnon, S.D.].

Tableau 6.1 - Production d'électricité pour les trois régions

	Québec	Ontario	NPCC
Charbon	0%	14.8%	11.5%
Cogénération	0.6%	0%	1.9%
Éolien	1.4%	0.9%	0.8%
Gaz naturel	1.3%	6.3%	16.4%
Hydroélectricité	91.9%	24%	42.1%
Mazout	3.4%	0.1%	2.7%
Nucléaire	1.4%	53.9%	24.6%

L'échangeur de chaleur est fait entièrement d'aluminium et les joints sont tous soudés. Ces informations proviennent d'un devis de fabricant des États-Unis (voir annexe A). Les méthodes de fabrication sont supposées identiques au Québec. Les dimensions complètes se trouvent dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2 - Dimensions utilisées pour l'échangeur

Dimensions externes	1.37 m x 1.22 m x 2.49 m
Masse	897.7 kg
Nombre de plaques	144
Dimensions plaques	1.22 m x 2.49 m
Longueur totale de joints soudés	726.85 m
Masse perdue dans l'usinage	89.8 kg
Transport total	199.7 t.km
Masse totale recyclée	740.63 kg
Chute de pression	577 Pa

Quant aux conduits, ils sont faits d'acier galvanisé. Leurs dimensions ont été déterminées pour obtenir une chute de pression standard près de 1 Pa/m. Les dimensions résultantes donnent une chute de pression de 0.7 Pa/m [McQuiston *et coll.*, 2005]. L'épaisseur a été déterminée en fonction des dimensions de conduits à l'aide d'un guide de dimensionnement [Thomson, 2006]. Les résultats sont regroupés dans le tableau 6.3. Les valeurs sont pour un mètre linéaire de conduits.

Tableau 6.3 - Dimensions pour les conduits (par m linéaire)

Dimensions externes	0.9 m x 0.6 m
Masse	20.64 kg
Masse perdue dans l'usinage	2.3 kg
Transport total	2.3 t.km
Masse totale recyclée	17.18 kg
Chute de pression	0.7 Pa

Les chutes de pression dans l'échangeur et les conduits le reliant aux condenseurs occasionnent une demande supplémentaire d'énergie de ventilation. Cette demande supplémentaire peut être calculée par l'équation (6.1) [McQuiston *et coll.*]:

$$W = Q(dP) \quad (6.1)$$

Le débit d'air passant par l'échangeur correspond au débit en fonctionnement normal (4274 l/s). Le débit excédentaire durant les opérations de surfaçage contourne l'échangeur. L'efficacité de la ventilation a été supposée à 75 % en fonction des courbes typiques de divers types d'équipement décrits dans McQuiston *et coll.* [2005]. La longueur des conduits a été évaluée à la moitié de la longueur de l'aréna, ce qui correspond au pire cas où la ventilation se trouve au centre du toit et les condenseurs sur le côté du bâtiment. Les valeurs résultantes d'énergie demandée se trouvent dans le tableau 6.4.

Tableau 6.4 - Paramètres de fonctionnement du système de ventilation

Volume d'air traité par an	134784864 m ³
Chute de pression, échangeur	577.2 Pa
Énergie de ventilation, échangeur	28.82 MWh/an
Chute de pression, conduits	0.7 Pa/m
Énergie de ventilation, conduits	0.03 MWh/an/m
Longueur de conduits	30 m
Chauffage, sans échangeur	1000 MWh/an
Chauffage, avec échangeur	482 MWh/an

Deux sources d'énergie ont été considérées pour le chauffage : l'électricité et le gaz naturel. L'électricité est souvent utilisée au Québec, vu son faible coût et la simplicité des équipements. Ailleurs en Amérique du Nord, le gaz naturel est une option plus viable. Afin de comparer les diverses possibilités, dix cas au total ont été étudiés (cinq sources, avec et sans échangeur) :

- Québec, chauffage électrique
- Ontario, chauffage électrique
- Ontario, chauffage au gaz naturel
- NPCC, chauffage électrique
- NPCC, chauffage au gaz naturel

Des inventaires ont été réalisés pour chacun des cas, en utilisant le mélange énergétique qui leur est propre, et les quantités de matière et d'énergie définies plus haut. Le résultat d'inventaire pour l'échangeur seul prendrait près de 40 pages à énumérer. L'évaluation des impacts réalisée à partir de ces inventaires se trouve à la section suivante.

6.4 Évaluation d'impacts

La méthode IMPACT 2002+ a été employée pour le calcul d'impact. Les résultats sont donnés en points. Les points proviennent d'une normalisation des impacts de chaque catégorie et représentent les émissions moyennes par habitant pour chaque substance en Europe. Ils permettent donc d'avoir une indication de l'impact relatif d'une activité dans la catégorie

donnée. Cela ramène chaque valeur d'impact sur une même échelle et clarifie l'affichage des résultats. Puisque la méthode est basée sur des données européennes, cela peut engendrer des variations des valeurs absolues d'impacts par rapport à leur valeur observable au Canada. Par contre, il n'existe pas encore de méthode pondérée semblable pour l'Amérique du Nord. De plus, puisque le but de l'étude est de comparer des scénarios, la valeur absolue des résultats est moins importante que les variations relatives entre les cas. Finalement, puisque le niveau de développement est semblable en Europe et en Amérique du Nord, les méthodes de calcul d'impact ne sont pas trop dénaturées par le changement de lieu.

Les résultats des dix scénarios se trouvent dans le tableau 6.5. Les titres des colonnes indiquent d'abord la région, puis la présence ou l'absence d'échangeur et finalement la source d'énergie utilisée pour le chauffage. Les rangées contiennent les résultats d'impact pour les quatre catégories finales. Les changements climatiques représentent l'intensité des émissions de gaz à effet de serre. La qualité des écosystèmes représente l'impact sur la biodiversité causé entre autres par l'acidification ou l'eutrophisation des plans d'eau et des habitats. La santé humaine représente la dégradation de l'espérance de vie moyenne, due à la qualité de l'air et aux toxines cancérigènes et non cancérigènes. L'extraction de ressources représente la raréfaction des ressources non renouvelables (minéraux, combustibles fossiles...). Les figures suivant le tableau viendront mettre en valeur certaines comparaisons importantes entre les divers scénarios.

Tableau 6.5 - Résultats des dix scénarios

	Qc Sans Élec.	Qc Avec Élec.	Ont Sans Élec.	Ont Sans Gaz	Ont Avec Élec.	Ont Avec Gaz	NPCC Sans Élec.	NPCC Sans Gaz	NPCC Avec Élec.	NPCC Avec Gaz
Changements climatiques	105.02	57.38	663.90	708.34	359.47	262.84	909.26	708.34	509.84	413.00
Qualité des écosystèmes	151.28	82.10	367.00	12.84	198.70	25.85	308.35	12.84	173.01	30.58
Santé humaine	186.50	101.57	740.00	93.82	400.75	73.66	1012.53	93.82	567.82	125.00
Extraction de Ressources	221.41	120.26	2375.04	891.11	1284.36	420.59	1724.87	891.11	966.58	564.71

Les méthodes de production d'électricité de chaque région influencent grandement les résultats, la figure 6.1 illustre clairement les différences observables.

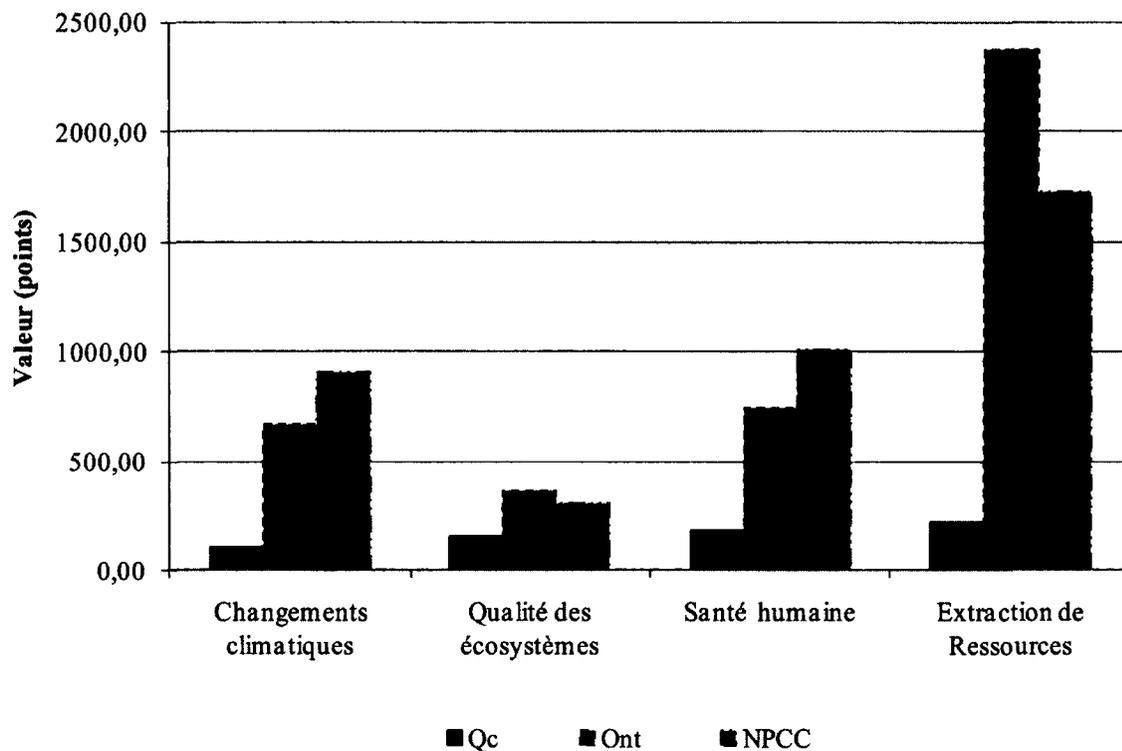


Figure 6.1 - Impact des 3 scénarios sans échangeur, chauffage électrique

On peut voir que le mélange énergétique du Québec, composé presque exclusivement d'hydroélectricité, est nettement avantageux. Les deux autres régions ont des impacts semblables entre elles. Les différences observées peuvent être attribuables à la production d'énergie nucléaire, beaucoup plus présente en Ontario et qui demande plus d'extraction de matière pour l'obtention des composés radioactifs utilisés. Puisque l'électricité n'est vraisemblablement pas la source principale de chauffage pour les régions hors Québec, les scénarios utilisant le gaz naturel sont montrés à la figure 6.2. Les résultats du chauffage au gaz pour l'Ontario et le NPCC sont identiques, puisque l'électricité n'entre pas en jeu sans l'ajout d'échangeur.

L'usage direct du gaz a un avantage net pour ces deux régions. L'utilisation d'électricité produite par des centrales thermiques pour le chauffage direct n'est pas rentable, puisque la transformation de chaleur en électricité n'est pas efficace (~40 %), en comparaison avec le rendement d'une chaudière au gaz (~95 %).

Les figures suivantes montrent les gains résultant de l'ajout d'un échangeur de chaleur pour les diverses régions. La figure 6.3 illustre les deux configurations étudiées pour le Québec. Les réductions d'impact totalisent 46 %, ce qui est substantiel. Puisque la seule source d'énergie est l'électricité, on peut voir que l'économie d'impact correspond directement à la variation de consommation électrique, soit 52 % d'économie d'électricité pour le chauffage, et une augmentation de l'énergie de ventilation équivalente à 6 % des besoins initiaux en chauffage. La figure 6.4 contient les résultats obtenus pour la simulation dans le cas de l'Ontario.

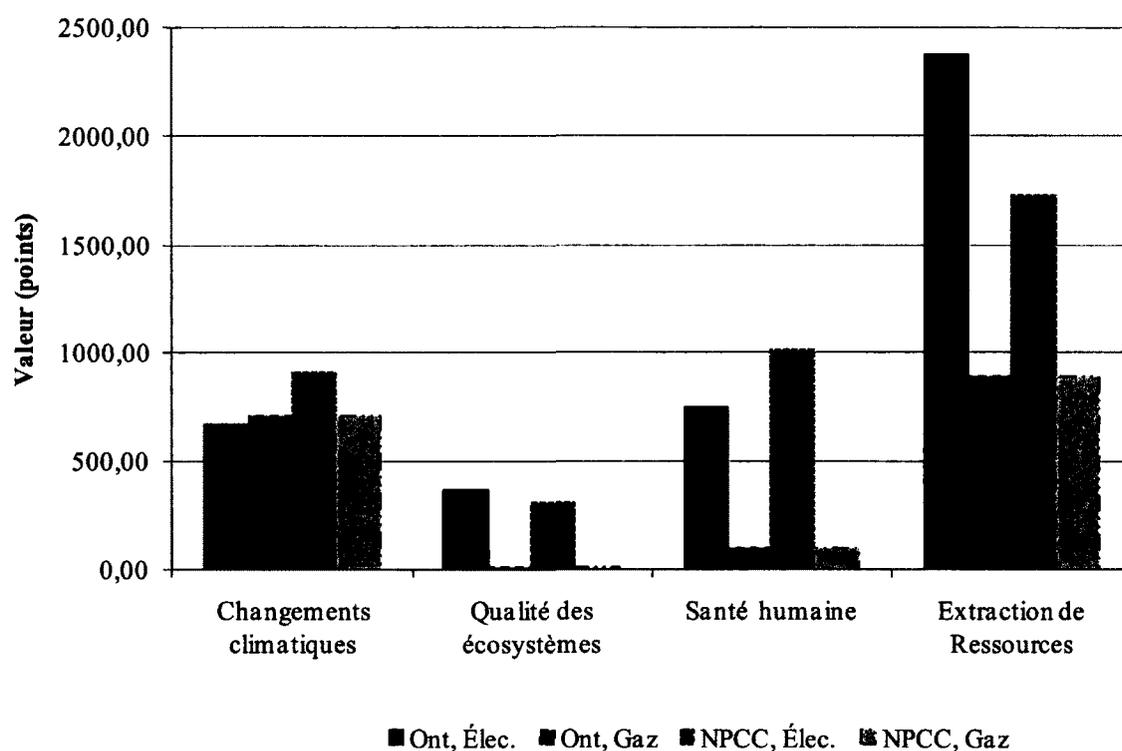


Figure 6.2 - Comparaison de l'électricité et du gaz

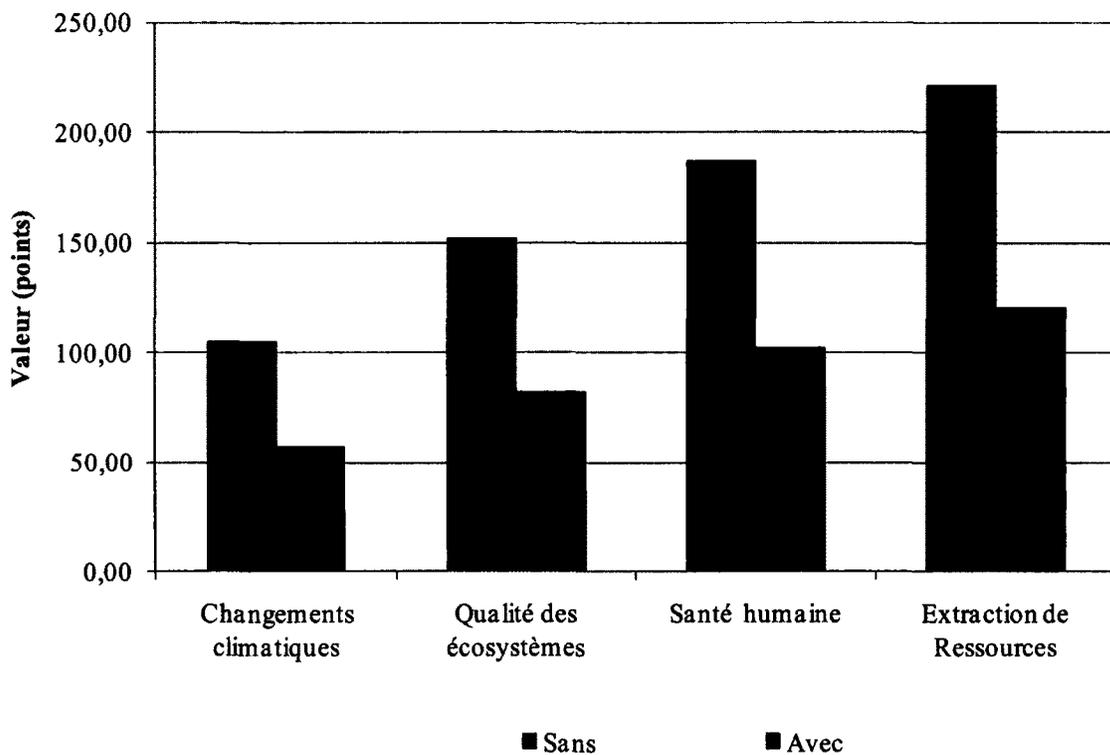


Figure 6.3 - Comparaison pour le Québec, avec et sans échangeur

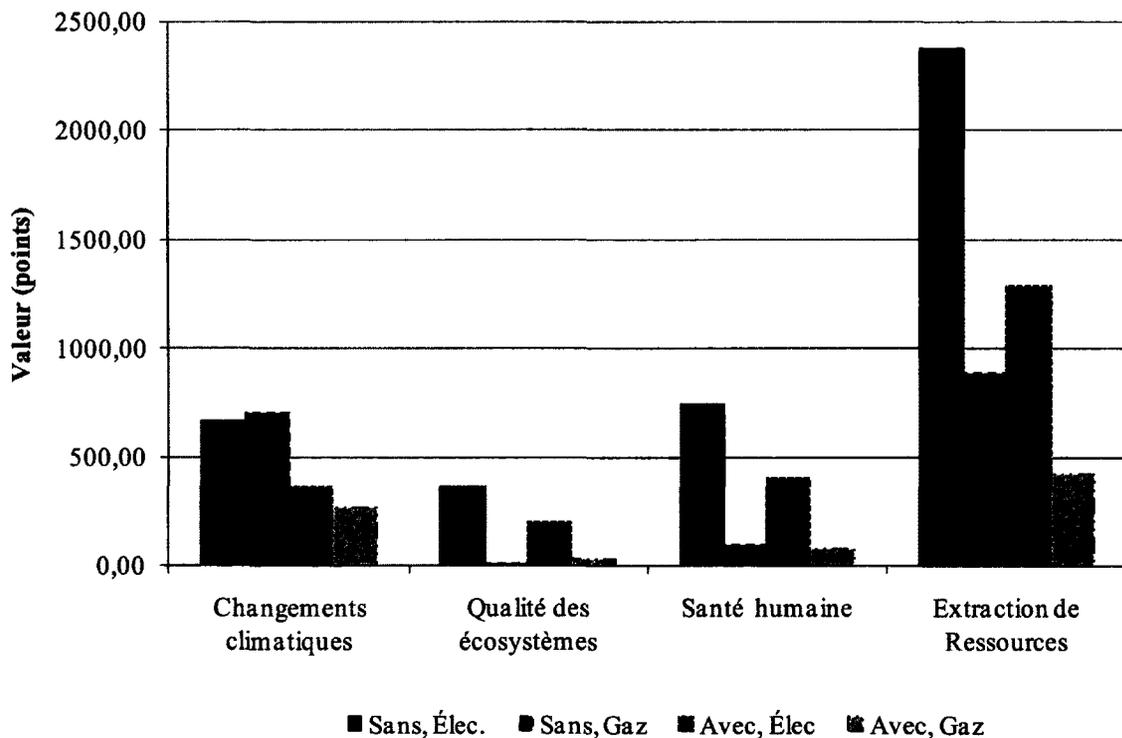


Figure 6.4 - Comparaison pour l'Ontario, avec et sans échangeur

L'ajout de l'échangeur est bénéfique pour le scénario impliquant l'électricité (46 % de réduction pour les quatre catégories). Pour le gaz naturel, la catégorie de qualité des écosystèmes voit une faible augmentation (+100 %, soit 13 points). Par contre, les impacts pour les changements climatiques et l'extraction de ressources sont grandement réduits (63 % et 53 % respectivement) et ceux sur la santé humaine voient une faible amélioration (27 %, soit 20 points). Les résultats sont semblables pour le NPCC, comme le montre la figure 6.5.

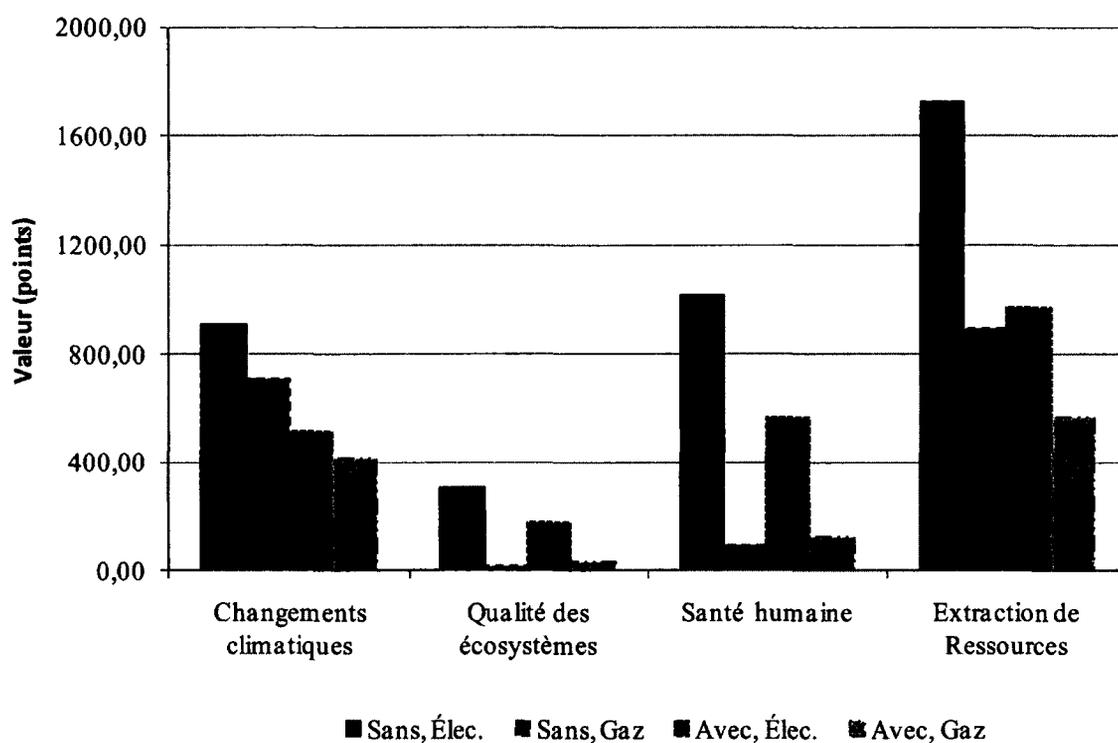


Figure 6.5 - Comparaison pour le NPCC, avec et sans échangeur

L'augmentation d'impact pour la qualité des écosystèmes est légèrement supérieure à l'Ontario (138 %, soit 17 points). La santé humaine voit aussi une augmentation de son score (33 %, soit 30 points). Les gains réalisés dans les deux autres catégories sont plus faibles que pour l'Ontario (42 % et 37 %).

Dans l'ensemble, l'ajout de l'échangeur semble bénéfique pour les deux sources d'énergie, dans les trois régions.

6.5 Interprétation

Il est important, avant de tirer des conclusions des résultats obtenus, de s'assurer de leur robustesse et de leur précision.

6.5.1 Révision d'inventaire

Afin de s'assurer qu'aucune erreur ne s'est glissée durant l'entrée des données, un inventaire rapide a été fait à la main à partir des principaux procédés. Seule la catégorie des changements climatiques a été utilisée pour la vérification. Cette catégorie est représentative des diverses valeurs, puisqu'elle varie fortement d'un scénario à l'autre. Elle donnera des bonnes indications si une aberration s'est glissée durant l'entrée de données. Les principaux procédés impliqués et leur impact unitaire se trouvent dans le tableau 6.6. Ces données proviennent de la base de données Ecoinvent, et l'analyse d'impact est faite par IMPACT 2002+ pour obtenir le score unitaire en points.

Tableau 6.6 - Impacts unitaires de principaux procédés

	Changements climatiques
1.0 kg aluminium, primary, at plant	0.00127
1.0 kg sheet rolling, aluminium	0.00006
1.0 m welding, arc, aluminium	0.00002
1.0 t*km transport, lorry >16t, fleet average	0.00001
1.0 kg steel, low-alloyed, at plant	0.00017
1.0 kg sheet rolling, steel	0.00003
1.0 m2 zinc coating, pieces	0.00060
1.0 MWh electricity, hard coal, at power plant	0.11656
1.0 MWh electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy	0.00262
1.0 MWh electricity, at wind power plant	0.00108
1.0 MWh electricity, natural gas, at power plant	0.06247
1.0 MWh electricity, hydropower, at power plant	0.00044
1.0 MWh electricity, oil, at power plant	0.08752
1.0 MWh electricity, nuclear, at power plant	0.00123

L'impact des divers composants du système est obtenu en multipliant les impacts unitaires par les quantités énumérées dans l'inventaire. Par exemple, pour l'impact lié à l'échangeur de

chaleur, sans la découpe et la fraction non recyclée (dans l'ordre : matière première + soudure + transport – recyclage = total):

$$987.5kg \times (0.00127 + 0.00006) + 726.85m \times 0.00002 + 199.7t.km \times 0.00001 - 740.63kg \times 0.00127 = 0.3894 \quad (6.2)$$

En appliquant cette démarche aux principaux composants, on obtient les résultats du tableau 6.7. Les résultats du calcul à la main sont comparés à ceux tirés du calcul réalisé par OpenLCA.

Tableau 6.7 - Impacts sur le climat pour les principaux composants

	À la main	OpenLCA
Échangeur (1)	0.3894	0.4840
Conduits (30 m)	0.1062	0.1302
Élect. Qc (1 MWh)	0.0042	0.0035
Élect. Ont (1 MWh)	0.0221	0.0221
Élect. NPCC (1 MWh)	0.0266	0.0303

Les différences observées sont de l'ordre de 20% environ. Compte tenu de simplifications réalisées pour alléger les calculs à la main (exclusion des opérations de mise en forme et de mise au rebut), aucune différence ne semble aberrante. Les résultats fournis par OpenLCA peuvent donc être considérés comme valides.

6.5.2 Analyse de contribution et de sensibilité

Les valeurs recueillies au tableau 6.7 pour les conduits et l'échangeur, comparées aux scores sur le réchauffement climatique des figures 5.1 à 5.5, montrent que la contribution des installations est faible. En effet, leur score est de l'ordre du demi-point, alors que les résultats totaux tournent autour de la centaine de points (voir figures 5.1 à 5.5). La consommation d'énergie est donc la principale source d'impacts sur le cycle de vie. Afin de bien voir la contribution relative des divers procédés, ils ont été divisés en trois catégories : l'énergie de chauffage de l'air, la matière utilisée pour fabriquer l'échangeur et les conduits (incluant les opérations d'usinage) et l'énergie de ventilation supplémentaire engendrée par l'ajout de conduits et d'un échangeur. L'analyse d'impact a été refaite en multipliant tour à tour ces trois valeurs par cinq pour voir leur impact relatif sur le résultat total. Le scénario utilisé est le cas

de l'Ontario, avec échangeur, chauffé au gaz naturel. Les valeurs obtenues se trouvent sur la figure 6.6.

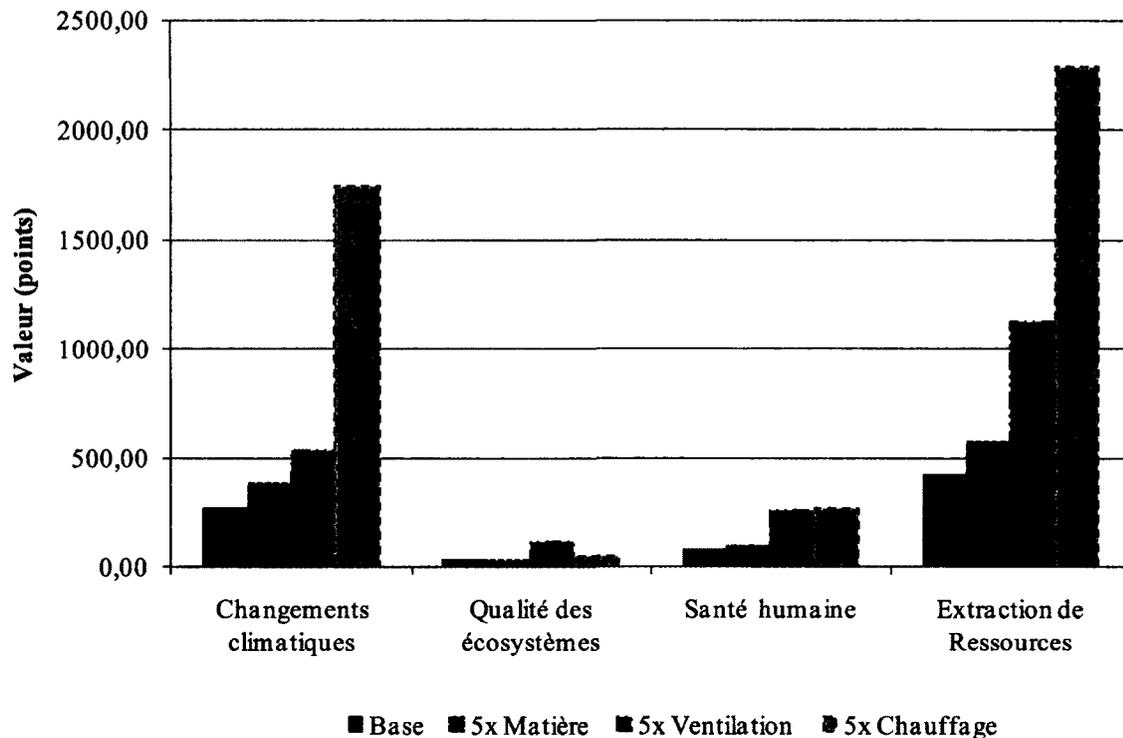


Figure 6.6 - Résultats de l'analyse de sensibilité

On peut voir qu'en multipliant la quantité de matériel nécessaire par cinq, l'impact est faiblement affecté. L'impact sur les changements climatiques est de 140 % de la valeur initiale, celui sur qualité des écosystèmes passe à 110 %, sur la santé humaine il augmente à 120 % et l'extraction de ressources à 130 %. Considérant la variation du paramètre de 500 %, ces variations sont minimes. L'augmentation de l'énergie de ventilation par un facteur cinq a des impacts plus significatifs. Les catégories d'impact voient leurs scores augmenter à 220 %, 450 %, 380 % et 290 %, respectivement. La consommation d'électricité a donc un impact important sur les résultats. Chaque pour cent d'augmentation de cette valeur augmente l'impact de 0.5 à 0.9 %. Finalement, lorsque le chauffage est quintuplé, les impacts finaux représentent 630 %, 180 %, 320 % et 500 % des valeurs respectives dans les quatre catégories. Il est donc évident que la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage ou la ventilation, affecte

fortement le score final. Il faut donc que l'incertitude qui y est associée soit mieux contrôlée que celle sur les étapes de transformation de matière.

6.5.3 Révision des données de départ

Les études de contribution et de sensibilité permettent d'évaluer la justesse des limites du système ainsi que des hypothèses posées au début de l'étude. Tout d'abord, les frontières considérées ont permis de tenir compte des principales sources d'impacts, soit l'énergie requise pour le chauffage et la ventilation. Il n'est donc pas nécessaire de modifier les limites du système telles que définies.

Les hypothèses posées au début de l'étude concernent presque uniquement les opérations de fabrication de l'échangeur ou des conduits. L'analyse de sensibilité montre que ces composants n'affectent pas grandement le résultat final. Ces hypothèses simplificatrices ne viennent donc pas affecter l'incertitude sur les résultats de l'étude. Il n'est donc pas nécessaire de trouver des données plus précises. L'hypothèse faite sur la puissance disponible du système de ventilation est également justifiée, puisque l'analyse de contribution montre que les matériaux ont un faible poids dans les résultats. Si l'ajout de l'échangeur demandait une augmentation de la taille des équipements existants, la variation des résultats finaux ne changerait pas les conclusions. Finalement, l'efficacité posée à 75% des ventilateurs peut affecter la quantité d'énergie consommée par le système de ventilation. Toutefois, la fourchette d'efficacité d'un ventilateur donné est entre 65% et 85% environ, selon les paramètres de fonctionnement [McQuiston *et coll.*, 2005]. Une variation d'efficacité de 10% pourrait engendrer une variation de certains scores de 5 à 10 % seulement, ce qui ne modifierait pas les conclusions de la comparaison. Les limites du système et les hypothèses de départ n'ont donc pas besoin d'être révisées.

6.5.4 Contrôle de complétude, d'incertitude et de cohérence

Le but du contrôle de complétude est de s'assurer que les scénarios comparés sont connus en proportion à peu près égale. En effet, puisque certains procédés ont été exclus de l'étude, leur contribution totale représente une certaine fraction de l'inventaire qui n'a pas été réalisée. Si les exclusions totales des deux procédés totalisent une fraction semblable, la comparaison reste valide, puisque la comparaison de 100 % des impacts de deux procédés amène des conclusions semblables à la comparaison de 90 % des impacts.

Le cas de base, comprenant seulement le procédé de chauffage, est connu avec une grande complétude. Le seul procédé inclus est le chauffage par énergie électrique ou au gaz naturel, et les inventaires reliés proviennent de données bien documentées dans la base de données Ecoinvent. Le modèle de base est donc inclus à près de 100 %.

Le cas avec échangeur comporte certaines exclusions. La principale exclusion est l'installation/désinstallation de l'équipement. Cette étape a un impact de l'ordre de grandeur de la fabrication de l'échangeur. Par contre, les transformations sont beaucoup moindres, et les opérations de transport sont également limitées. On peut estimer leur impact, de façon pessimiste, à 50% de l'impact de l'échangeur. Ce dernier représente 0.5 point d'impact pour le réchauffement climatique, tel que vu à la section 6.5.2. L'installation/désinstallation représenterait donc 0.25 point, alors que la moyenne pour les cinq scénarios avec échangeur est de 326.1 points. L'installation/désinstallation correspondrait donc à 0.07 % de l'impact total. Le scénario avec échangeur a donc une complétude de plus de 99.9 %. Les deux scénarios sont de complétude semblable, et les différences d'exclusions entre les deux cas n'influenceront pas les conclusions.

Les incertitudes exactes sur les différentes valeurs d'inventaire ne sont pas faciles à évaluer pour plusieurs composants. Les valeurs de besoins en énergie, de masse, et d'énergie de ventilation ont des incertitudes faibles, puisqu'elles proviennent directement de simulations validées expérimentalement ou de valeurs fournies par des fabricants. Par contre, puisque plusieurs données proviennent de données européennes ou étatsuniennes, les différences de lieu et de technologie amènent des sources d'incertitudes sur les valeurs obtenues. De plus, les remplacements de procédés, en particulier pour la fabrication, ainsi que les estimations de distances de transports, engendrent des imprécisions pour les résultats finaux. Toutefois, puisque l'étude est de nature comparative, les variations relatives entre les divers scénarios importent plus que les valeurs absolues obtenues. Puisque les modèles de centrales électriques et de fournaise au gaz sont les mêmes pour les cas étudiés, les incertitudes liées aux différences de technologies s'appliquent également à tous les scénarios. Les comparaisons restent donc valables. Quant aux imprécisions liées à la fabrication et au transport, il a été

établi dans les sections précédentes que leur poids dans le bilan total était négligeable. L'incertitude associée n'est donc pas significative pour les résultats finaux.

Le but de l'étude est de comparer l'impact environnemental d'un aréna avec échangeur à celui d'un aréna typique, sans stratégie de récupération. Les analyses de complétude et d'incertitude montrent que les résultats obtenus par l'inventaire et le calcul d'impact sont de qualité suffisante pour atteindre le but de l'étude. Les choix faits dans la réalisation de l'étude sont donc cohérents avec le but fixé. Il est donc possible de tirer des conclusions à partir des données recueillies.

6.5.5 Comparaison aux études existantes

Les résultats publiés par Lavoie *et coll.* [2000] soutiennent que pour les 435 arénas du Québec (Canada) il existerait un potentiel total d'économies d'émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 28 kT Éq.-CO₂ par an. Cela représente 64 T Éq.-CO₂ par aréna. Afin de comparer les résultats de la présente analyse avec ceux publiés par Lavoie *et coll.*, le calcul d'impact a été refait sur OpenLCA en utilisant la méthode TRACI, qui donne la valeur d'impact pour le réchauffement climatique en kg Éq.-CO₂. Sur 30 ans, le total d'économies s'élève à 470.461 T Éq.-CO₂, ou environ 15 T Éq.-CO₂ par an, ce qui représente 23.8% du potentiel d'économies totales projetées par le rapport de Lavoie *et coll.* Le chauffage représente 23% de la consommation totale [Lavoie *et coll.*, 2000] et les économies d'impact calculées dans le présent projet reflètent cette proportion également. Les résultats sont donc en accord avec la prévision.

Un autre rapport par Nyman et Simonson [2004] portait sur des unités de récupération de chaleur pour un édifice à bureaux. La chaleur récupérée provenait de l'air évacué par le système de ventilation. Cette étude montre tout d'abord que l'impact de la fabrication de l'unité de récupération de chaleur est négligeable devant celui de l'utilisation. Elle indique aussi que l'impact dû à l'énergie de ventilation est environ sept fois moindre que l'économie d'impact amené par l'échangeur de chaleur. Ces conclusions sont semblables à celles de la présente analyse. En effet, les résultats de l'analyse faite ici montrent clairement le faible impact de la fabrication sur le cycle de vie. Quant à la comparaison de l'impact de la ventilation

supplémentaire et de l'économie de chauffage, les résultats peuvent être vus à la figure 6.7. Pour le Québec, l'impact évité par la récupération d'énergie est près de 12 fois celui de la ventilation. Ce résultat est plus avantageux que celui obtenu par Nyman *et coll.* Cela s'explique, entre autres, par le fait que leur système fonctionnait 10 heures par jour, alors que l'aréna est ventilé 24 heures par jour. Les auteurs avaient d'ailleurs suggéré que de meilleurs résultats pouvaient être obtenus par l'augmentation de la période de fonctionnement. Pour les scénarios chauffés au gaz naturel, les résultats varient grandement. En prenant le cas de l'Ontario, on peut voir que l'impact évité est 12 fois celui de la ventilation. Par contre, la qualité des écosystèmes est affectée négativement par la ventilation supplémentaire. L'impact sur la santé humaine reste relativement neutre, avec une réduction d'impact nette de 50 % environ. Quand aux ressources, l'impact évité est de quatre fois celui dû à la ventilation. Ces variations observées sont dues aux méthodes de production d'électricité et à la source de chauffage, car l'étude citée plus haut est originaire de Finlande. Le mélange énergétique y est différent, et la chaleur était fournie par un réseau public de chauffage (*district heating*). Les deux analyses permettent toutefois d'affirmer que l'ajout d'un échangeur a un effet net positif sur l'impact environnemental du système de ventilation.

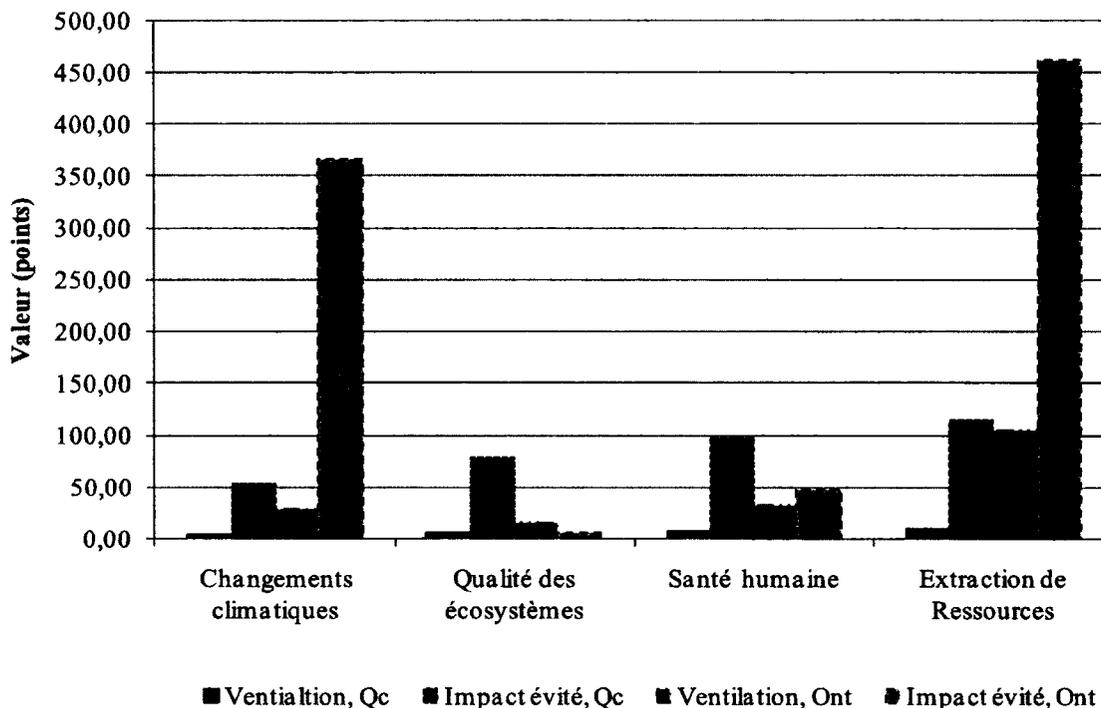


Figure 6.7 - Comparaison des impacts dus à la ventilation et des impacts évités par l'économie de chauffage

6.6 Limites et recommandations

Les divers contrôles de robustesse indiquent une bonne fiabilité des résultats pour l'atteinte des buts de l'étude. De plus, les comparaisons avec des études existantes sont venues appuyer les résultats obtenus. Il aurait été possible d'étudier d'autres sources de chauffage, comme la géothermie. Cela dépasse le cadre de l'étude, qui est d'évaluer l'effet de l'ajout d'un échangeur sur l'impact environnemental d'un aréna typique. Il serait possible de mener une étude sur les sources de chauffage alternatives et leur empreinte écologique respective.

Les résultats de l'étude montrent que l'ajout d'un échangeur a un impact positif pour l'ensemble des scénarios étudiés. Ils montrent également que le chauffage direct électrique n'est efficace que si l'on considère le mélange énergétique québécois, qui ne comporte presque aucune source thermique d'électricité. Pour d'autres modes de production, comme pour l'Ontario et le NPCC, il est évident que le gaz naturel doit être utilisé pour le chauffage. Dans ces deux derniers cas, l'ajout d'un échangeur est recommandé même si les impacts augmentent légèrement pour les catégories de santé humaine et de qualité des écosystèmes. Les gains réalisés sur le réchauffement climatique et l'extraction de ressources sont de beaucoup supérieurs et justifient l'ajout de l'échangeur.

CHAPITRE 7

ANALYSE FINANCIÈRE

Après avoir exploré les aspects énergétiques et environnementaux de l'ajout d'un échangeur, il est pertinent de s'intéresser à la viabilité financière de l'installation. Deux méthodes seront utilisées : le rendement équivalent et le coût du kilowattheure économisé.

7.1 Rendement équivalent

Le calcul de rendement équivalent permet de trouver le retour sur l'investissement en pourcentage annuel. Le calcul se base sur une formule qui peut être trouvée dans des livres portant sur l'analyse financière [Park *et coll.*, 2002]. L'équation (7.1) montre la formule pour trouver la valeur actualisée P d'une série d'annuités égales à A .

$$\frac{P}{A} = \frac{[(1+i)^n - 1]}{[i(1+i)^n]} \quad (7.1)$$

Pour trouver le rendement équivalent, il est possible de réaliser une recherche itérative sur i dans un tableur pour que P soit égal à l'investissement initial.

Un prix obtenu chez un fabricant permet d'évaluer le coût de l'échangeur à environ 25 000 \$ CAN. En estimant que les conduits et l'installation peuvent représenter un investissement supplémentaire de 25 000 \$ CAN, l'investissement initial total est d'environ 50 000 \$ CAN. Pour évaluer la valeur des annuités, il faut trouver le coût de l'énergie de chauffage et de l'énergie de ventilation pour les différentes régions. Le Québec et l'Ontario ont été retenus. Le prix de l'électricité au Québec est facile à obtenir chez Hydro-Québec [Hydro-Québec, 2011]. Le tarif considéré est le tarif M (moyenne puissance) qui est utilisé par plusieurs tours à bureaux et hôpitaux. Le tarif pour l'électricité en Ontario a été évalué à l'aide du site Energyshop [Energyshop, 2011]. Les prix pour le gaz naturel varient constamment. À l'aide de données chez Gaz-Métropolitain [Gaz Métropolitain, 2011] et Energyshop [2011], le prix a pu être évalué. Le but de l'analyse étant simplement une évaluation de la faisabilité, la marge

d'erreur sur les résultats est large, et les tarifs exacts ne sont pas nécessaires. Les résultats se trouvent dans le tableau 7.1. Pour les coûts au Québec, seul le coût du kilowattheure au-delà de 210 000 kWh a été utilisé. Le prix de la puissance a été exclu, puisque les autres systèmes représentent environ 75 % de la demande en énergie de l'aréna.

Tableau 7.1 - Tarifs pour l'énergie au Québec et en Ontario

Source	Tarif
Électricité, Qc	0.03\$/kWh
Électricité, Ont	0.10\$/kWh
Gaz naturel, Qc et Ont	0.25\$/m ³ (environ 0.025\$/kWh)

En réalisant le calcul pour l'aréna avec et sans échangeur et en tenant compte de l'électricité consommée par la ventilation, on arrive aux résultats du tableau 7.2. Le chauffage est fourni par l'électricité au Québec et par le gaz naturel en Ontario. L'investissement sera évalué par le calcul du rendement équivalent, qui correspond au rendement nécessaire pour qu'un placement de 50 000\$ engendre des gains aussi importants que la modification proposée.

Tableau 7.2 - Résultats de l'analyse financière

	Qc, Élect	Ont, Gaz
Coûts courants		
Coûts d'énergie par année:	30 000 \$	25 700 \$
Coûts projetés après travaux		
Coûts d'énergie projetés par année:	16 375 \$	18 775 \$
Coûts de modification		
Achat de matériel :	10 000 \$	
Équipement :	25 000 \$	
Main-d'œuvre :	15 000 \$	
Coût total :	50 000 \$	
Économies totales sur 30 ans:	408 740 \$	207 920\$
Rendement équivalent (% annuel) :	27.23%	13.56%

On peut voir que les économies projetées sont importantes. De plus, les coûts d'énergie utilisés sont optimistes. Si l'énergie coûte plus cher, les économies seront encore plus intéressantes.

Dans le contexte économique actuel, un taux de rendement de 13.6 à 27.23 % indique un excellent investissement des 50 000 \$ nécessaires. Ce résultat dépasse les prévisions avancées par Lavoie [2000] qui supposaient des économies totales de trois fois supérieures à l'investissement initial. Les économies projetées ici sont de quatre à huit fois l'investissement de départ.

7.2 Coût du kilowattheure économisé

Cette autre méthode pour évaluer les coûts est beaucoup plus simple. Elle permet d'évaluer le coût de l'énergie en se basant sur l'investissement nécessaire. Pour obtenir le coût du kilowattheure économisé, il suffit de faire la somme de l'investissement initial et des coûts d'exploitation supplémentaires engendrés et de diviser ce total par l'économie totale en énergie. Le coût obtenu permet d'évaluer la rentabilité du projet de façon plus intuitive que le taux de rendement, puisqu'il suffit de vérifier si le coût obtenu est plus faible que le coût actuel de l'énergie pour savoir si le projet est rentable.

L'investissement initial et le coût d'exploitation dû à la ventilation supplémentaire sont considérés dans les dépenses totales. L'économie de chauffage est utilisée pour évaluer le prix du kilowattheure économisé. Les résultats, recueillis dans le tableau 7.3, pourront être comparés au prix de l'électricité pour le Québec et du gaz naturel pour l'Ontario (tableau 7.1).

Tableau 7.3 - Coût du kWh économisé

	Qc	Ont
Coût initial	50 000 \$	
Coût d'exploitation sur 30 ans	57 456 \$	191 520 \$
kWh économisés sur 30 ans	15 540 000	
Coût du kWh économisé	0.007 \$	0.016 \$

Les valeurs trouvées au tableau 7.3 sont beaucoup plus faibles que le coût évalué au tableau 7.1, ce qui vient confirmer la rentabilité de l'investissement. Il est donc beaucoup plus avantageux de mettre en place la modification proposée que de conserver le système initial.

7.3 Analyse des résultats

Les deux méthodes d'analyse de rentabilité permettent de se prononcer sur la viabilité financière de la configuration étudiée. Tout d'abord, le taux de rendement attendu est de 27 % au Québec, et de 13 % en Ontario. Cela représente un retour sur investissement extrêmement intéressant. Ensuite, l'évaluation du coût montre une réduction par rapport au coût de l'énergie de 77 % au Québec, et de 36 % en Ontario. Il est donc évident que l'ajout d'un échangeur de chaleur engendre des économies importantes sur les coûts d'exploitation du système de ventilation. La viabilité financière du projet ne serait donc pas un frein à sa mise en place, puisque l'investissement initial est largement compensé par les gains financiers réalisés grâce à l'économie d'énergie, tant au Québec qu'en Ontario.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

Le présent projet s'est intéressé à la récupération de la chaleur des condenseurs d'un aréna pour le chauffage de l'air de ventilation. Ce projet s'inscrivait dans la démarche entreprise à l'Université de Sherbrooke pour développer un modèle numérique performant simulant le fonctionnement d'un aréna. Le but du projet était d'explorer deux stratégies de récupération d'énergie et de vérifier leur impact environnemental et financier. Les simulations ont révélé que la récupération directe pouvait diminuer de 24 % les besoins en chauffage. Un échangeur acceptant un débit jusqu'à 14658 l/s amenait 61 % d'économies, alors qu'un échangeur limité à 4274 l/s réduisait de 52 % les besoins en chauffage. Pour son rapport taille/économies avantageux, ce dernier fut utilisé pour les analyses suivantes. L'analyse de cycle de vie a montré que l'ajout de cet échangeur aurait des impacts positifs sur l'environnement, que ce soit en considérant le mélange électrique du Québec, de l'Ontario ou de l'est de l'Amérique du Nord. Le chauffage au gaz avait un impact positif s'il remplaçait l'électricité ailleurs qu'au Québec. En ajoutant un échangeur, le chauffage au gaz était encore plus bénéfique. L'analyse financière a révélé que l'installation d'un échangeur produirait un retour sur investissement intéressant, correspondant à un rendement de 27 % au Québec et 13.5 % en Ontario. Le coût de chaque kilowattheure économisé était de 36 à 77 % plus faible que le coût actuel de l'énergie. Les études réalisées ont donc montré que l'ajout d'un échangeur de chaleur au système de ventilation serait bénéfique sur le plan énergétique, environnemental et financier.

Le projet réalisé vient contribuer aux connaissances dans le domaine pour plusieurs raisons. Tout d'abord, le modèle d'aréna n'avait jamais été utilisé pour explorer des stratégies de récupération de chaleur. Ensuite, les études précédentes n'ont pas réalisé d'analyses d'impact environnemental complètes et peu de travaux s'étaient intéressés à la rentabilité des modifications proposées. De plus, il n'y avait pas eu d'articles publiés dans des journaux scientifiques portant sur la récupération de chaleur dans les arénas depuis les 20 dernières années.

La présente étude a permis de pousser un peu plus loin les applications du modèle développé à l'Université de Sherbrooke. Toutefois, la simulation du fonctionnement de la ventilation a été faite en utilisant seulement les données de sortie du modèle complet de l'aréna. Il serait intéressant d'intégrer l'échangeur de chaleur au modèle complet, pour voir son interaction avec d'autres stratégies d'économies et paramètres de fonctionnement. Il serait également possible de modifier le système de réfrigération pour utiliser des condenseurs refroidis à l'eau, qui est un caloporteur plus polyvalent que l'air. Il serait donc possible de chauffer aussi l'eau du bâtiment. Il aurait également été possible de s'intéresser aux économies réalisées en remplaçant l'équipement de surfaçage fonctionnant au gaz par un modèle électrique, qui ne nécessiterait pas d'augmentation du débit d'air de ventilation durant les opérations de surfaçage. Les opportunités d'économies d'énergie sont nombreuses et leur impact positif sur l'environnement peut souvent être accompagné de gains financiers, ce qui les rend encore plus intéressantes à explorer.

ANNEXE A - Documentation pour l'échangeur



Performance Estimate: 09-01161_1

5040 Enterprise Blvd, Toledo, OH 43612-6940 Phone 419/725-8728 Fax 419/725-8705

www.exothermics.com
ISO 9001 Registered

To: Student

Date: 7/22/2009

Sherbrooke, Quebec, Canada

Attn: Mr. Olivier Piche

From: Tom Econom

Plate Spacing.....	0.375 Inch
Gas Inlet Flow, NCM/hr CM/hr Kgm/hr.....	14519/13994/18771*
Gas Inlet Condition, DB/HR.....	-10.0/0.0000
Air Inlet Flow, NCM/hr CM/hr Kgm/hr.....	14519/13462/18771*
Air Inlet Condition, DB/HR.....	-20.0/0.0000
Site Altitude, meters.....	0.0
Gas/Air Specific Heats, KJ/Kgm - K.....	1.0053/1.0053

Model: 4845AL98AW-IU

Application: Heat Recovery for Ice arena

Heat Exchanger Performance:

Sinusoidal Plate Heat Exchanger Performance Metric Units (Ver: 2.10)

Heat Transfer Core.....	48-45-96
I - Pass Duct Size.....	45.00 x 48.00 Inches
U - Pass Duct Size.....	45.00 x 19.50 Inches
Gas & Air Flow Arrangement.....	Counter Flow
Heat Exchanger Effectiveness, %.....	69.8
Std. Gas/Air Core Velocity, meters/sec.....	6.5/6.7
Gas Outlet Flow, NCM/hr CM/hr Kgm/hr.....	14519/13623/18771
Gas Outlet Condition, DB/HR.....	-17.0/0.0000
Air Outlet Flow, NCM/hr CM/hr Kgm/hr.....	14519/13833/18771
Air Outlet Condition, DB/HR.....	-13.0/0.0000
Gas Pressure Drop, mm w.c.....	66.5
Air Pressure Drop, mm w.c.....	58.9
Heat Recovered, KW.....	36.6

Comment: First Sizing,



EXOTHERMICS
TOLEDO, OHIO
WORLD CLASS HEAT EXCHANGERS

AL-HT/AW 8 FT. ALUMINUM HEAT EXCHANGER

NOTICE: Information contained herein constitutes proprietary confidential information of Exothermics, Inc. and is to be accepted only subject to that understanding. It is to be kept confidential and not to be copied, used or otherwise conveyed to others without Exothermics, Inc. written authorization.

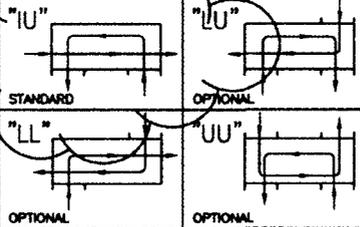
SALES DRAWING NO.
S-96-03

REV.
1

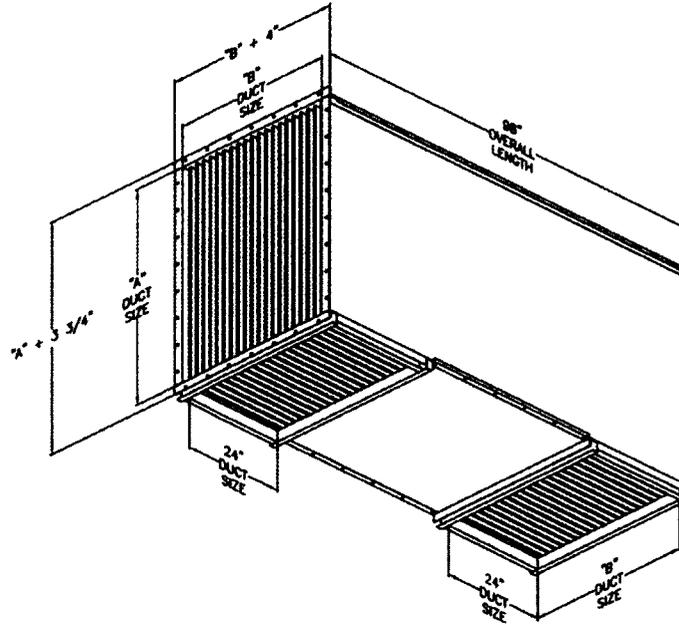
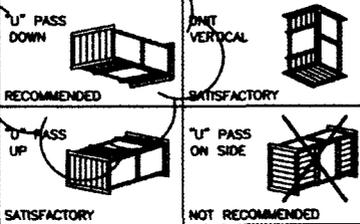
MODEL		APPROX. WEIGHT
"A"	"B"	
48 in.	54 in.	1975 lbs.

DRAWING NOT TO SCALE
SALES ILLUSTRATION ONLY
CONSULT FACTORY FOR
FURTHER INFORMATION

OPTIONAL AIR FLOW PATTERNS



INSTALLATION ORIENTATIONS



The AL Heat Exchanger is an all aluminum construction; heat transfer medium is a .040 aluminum sheet enclosed in an aluminum casing with removable covers. The HT line has mechanical end seals, while the AW line has all-welded construction. In the interest of continuous product improvement, all details are subject to change.

Available temperature ratings are up to 450°. Available pressure ratings are up to 10" W.C. Maximum Differential Pressure.



Quotation Nr: 0907-054-0

EXOTHERMICS

8940 Enterprise Blvd, Toledo, OH 43612-3848 Phone 419/729-9726 Fax 419/729-9706

www.exothermics.com

ISO 9001 Registered

To: Student	Date: Date: 7/22/2009
Sherbrooke, Quebec, Canada	Prices: Prices Firm: 30
Fax:	
Attn: Mr. Olivier Piche	
From: Tom Econom	
	Please issue order to Exothermic

Item 1) Performance Estimate 09-01161-1 for Exothermics Model 4845AL98AW-IU Industrial Plate Type Heat Exchanger

Application: Heat Recovery for Ice arena

Location: Sherbrooke, Quebec, Canada

Proposed: Quantity: 1 (One) Exothermics Model 4845AL98AW-IU Industrial Plate Type Heat Exchanger

Exothermics Industrial Aluminum Plate Type Heat Exchanger features an all welded and all aluminum construction. The unit design includes removable access covers allowing access to the heat transfer membrane. The heat transfer core utilizing aluminum plates with 0.040" (1mm) material thickness in conjunction with the Exothermics proprietary Sinusoidal plate design with 3/8" spacing between plates.

Comment: First Sizing,

Amount USD: Net Price Ex-works Toledo, Ohio \$26,560.00

Exceptions:

Exothermics does not warranty against corrosion, erosion, or fouling

Maximum conditions for Aluminum Exchangers:

Operating temperature: 450 F (233 C)

DP between hot and cold stream: 6"wc (152mm wc).

Total Equipment Price USD: \$ 26,560.00

Net Price Ex-works Toledo, Ohio, (does not include transportation)

Estimated Shipment: 6-8 Weeks from ARO and approval

Payment Terms: Yet to be determined

Cc: Eclipse- Montreal

Attachments:

Industrial Aluminum Exchanger.pdf

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Arias, J. et Lundqvist, P. (2006). Heat recovery and floating condensing in supermarkets. *Energy and Buildings*, volume 38, numéro 2, p. 73-81.
- ASHRAE Handbook – Refrigeration* (2006).
- Bare, J. C. (2002). Traci. *Journal of Industrial Ecology*, volume 6, numéro 3-4, p. 49-78.
- Bellache, O., Galanis, N., Ouzzane, M., Sunyé, R. et Giguère, D. (2006). Two-Dimensional Transient Model of Airflow and Heat Transfer in Ice Rinks. *ASHRAE Transactions*, volume 112, numéro 2, p. 706-716.
- Daoud, A. (2008). *Analyse des transferts de chaleur et de masse transitoires dans un aréna à l'aide de la méthode zonale*. Doctorat en sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 154 p.
- Daoud, A., Galanis, N. et Bellache, O. (2008). Calculation of refrigeration loads by convection, radiation and condensation in ice rinks using a transient 3D zonal model. *Applied Thermal Engineering*, volume 28, numéro 14-15, p. 1782-90.
- Environnement Canada (2010). *Rapport d'inventaire national 1990-2008 - sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*, 130 p.
- Ecoinvent Centre (2010). Ecoinvent data v2.2. Dans Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Ecoinvent reports no.1-25. www.ecoinvent.org (page consultée le 27/05/2011).
- Gagnon, B (2011). *Communications personnelles* Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J. et van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008- A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*, 1-126 p.
- ISO (2006). *ISO 14040 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principe et cadre*, 23 p.
- ISO (2006). *ISO 14044 - Management environnemental - Analyse de Cycle de vie - Exigences et lignes directrices*, 49 p.
- Jolliet, O., Saadé, M. et Crettaz, P. (2005). *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 242 p.
- Jolliet, O., Margini, M., Charlse, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. et Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International journal of LCA*, volume 8, numéro 6, p. 324-330.

- Lavoie R., M., Sunyé, R. et Giguère, D. (2000). *Potentiel d'économie d'énergie en réfrigération dans les arénaux du Québec* 1-62 p.
- McQuiston, C. F., Parker, D. J. et Spitler, D. J. (2005). *Heating, Ventilating and Air Conditioning*, 6th édition. John Wiley & sons inc., 610 p.
- Numerical Logics (1999). *Canadian Weather for Energy Calculations, Users Manual and CD-ROM*. Environment Canada, Downsview, Ontario, Can.,
- Nyman, M. et Simonson, C. J. (2004). Life-cycle assessment (LCA) of air-handling units with and without air-to-air energy exchangers. Dans *ASHRAE Transactions, January 25, 2004 - January 25*, volume 110 PART 1. Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc, Anaheim, CA, United states, p. 399-409.
- OpenLCA (2011). The openLCA project. Dans <http://www.openlca.org/index.html> (page consultée le 26/07 2011).
- Ouzzane, M., Zmeureanu, R., Scott, J., Sunyé, R., Giguère, D. et Bellache, O. (2006). Cooling Load and Environmental Measurements in a Canadian Indoor Ice Rink. *ASHRAE Transactions*, volume 112, numéro 2, p. 538-545.
- Park S., C., Pelot, R., Porteous C., K. et Zuo J., M. (2002). *Analyse économique en ingénierie*. Éditions du renouveau pédagogique, Saint-Laurent, 972 p.
- PE International (2011). Gabi software : Product sustainability. Dans <http://www.gabi-software.com/> (page consultée le 26/07 2011).
- PRé Consultants (2011). About SimaPro. Dans <http://www.pre-sustainability.com/content/simapro-lca-software/> (page consultée le 26/07 2011).
- Ressources naturelles et faune Québec (2011). Puissance des centrales électriques. Dans <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-centrales.jsp> (page consultée le 27/05 2011).
- Scheuer, C., Keoleian, G. A. et Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, volume 35, numéro 10, p. 1049-64.
- Seghouani, L., Daoud, A. et Galanis, N. (2011). Yearly simulation of the interaction between an ice rink and its refrigeration system: A case study. *International Journal of Refrigeration*, volume 34, numéro 1, p. 383-389.
- Thompson, J. A. (2006). *National Plumbing & HVAC Estimator*. Craftsman Book Company, 417 p.