

CAROLINE D. FRENETTE

**ANALYSE MULTICRITÈRE DES COMPOSITIONS
DE MUR À OSSATURE LÉGÈRE EN BOIS**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en sciences du bois
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DU BOIS ET DE LA FORÊT
FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2009

Résumé

Le concepteur d'une composition de mur à ossature légère doit considérer simultanément plusieurs critères de performance, en plus des exigences définies par la réglementation. Ce projet de recherche développe un cadre d'analyse multicritère permettant l'évaluation de compositions améliorées de mur extérieur préfabriqué à ossature légère en bois. Un exemple d'application compare cinq compositions de mur selon six contextes décisionnels situés à Québec.

Le cadre d'analyse identifie des contraintes de conception et des critères de performance. Les contraintes de conception proposées pour assurer l'acceptabilité de compositions de murs dans le contexte d'utilisation étudié sont: la résistance structurale, la performance au feu, la résistance thermique, la perméance à l'air et les mesures obligatoires de gestion de l'humidité. Les critères de performance, définis ensuite pour évaluer les avantages d'un mur, sont la gestion de l'humidité, l'atténuation des bruits aériens, les coûts de construction, d'entretien et d'énergie liée au chauffage, et les impacts environnementaux. Des méthodes d'évaluation et des échelles de mesures sont étudiées pour chaque critère de performance.

Pour l'évaluation des impacts environnementaux, un indice de performance environnementale est défini en comparant des indicateurs actuels. Suivant une approche d'analyse du cycle de vie, l'inventaire fourni par le logiciel ATHENA™ est agrégé selon trois modèles d'analyse d'impact: IMPACT 2002+, Eco-indicator 99 et TRACI. Les impacts relatifs des différents composants du mur et de l'énergie d'opération sont comparés. En conclusion, l'indicateur de changement climatique est accepté comme un indice approprié de performance environnementale dans le contexte de l'étude.

Le cadre d'analyse permet l'agrégation des évaluations obtenues selon chaque critère de performance, en intégrant les préférences d'un décideur. Quatre procédures d'agrégation multicritères (somme pondérée, MACBETH, ELECTRE II et PROMETHEE) sont utilisées pour ranger les alternatives selon de l'information quantitative et qualitative. L'étude montre que la sélection de la procédure d'agrégation la plus appropriée dépend de la nature des échelles de mesure utilisées. De plus, la comparaison de rangements résultants de différentes approches permet un choix plus éclairé. L'ensemble du projet confirme la pertinence d'appliquer une approche d'aide à la décision multicritère pour considérer simultanément différents aspects de la performance d'un mur à ossature légère en bois.

Abstract

The designer of a light-frame wood wall assembly should consider simultaneously several performance criteria in addition to the minimum requirements set by building codes. This research project develops a multicriteria analysis framework to support the evaluation of improved factory-built wood-frame exterior walls. A case study compares five wall assemblies according to six different decision contexts in Quebec City, Canada.

The analysis framework identifies constraints and performance criteria. The constraints proposed to ensure the acceptability of the alternative wall assemblies in a given context are: Structural resistance, fire performance, thermal resistance, air permeance and mandatory moisture management measures. The performance criteria, identified to judge the advantage of a wall assembly over another, are: moisture management performance, attenuation of sound transmission, construction cost, maintenance cost, heating energy cost, and environmental impact. Evaluation methods and measuring scales are studied for each performance criteria.

To evaluate environmental impact, a performance index is defined by comparing different damage indicators. Following a life cycle assessment approach, inventories provided by ATHENA™ are aggregated according to three impact assessment methods: IMPACT 2002+, Eco-indicator 99 and TRACI. The relative impact of assembly components and of the operation energy source is compared. In conclusion, the climate change indicator is accepted as an appropriate environmental performance index in the studied context.

The analysis framework allows for the aggregation of the evaluations obtained for each criterion, considering the preference of a decision-maker. Four multicriteria decision analysis techniques (weighted sum, MACBETH, ELECTRE II, and PROMETHEE) are used to rank the alternatives based on quantitative and qualitative information. This study shows how selecting the appropriate aggregation method depends on the nature of the measuring scales considered. Moreover, comparing the ranking obtained with different approaches enhances confidence in the final choice. The overall research project confirms the usefulness of multicriteria decision analysis (MCDA) techniques to consider simultaneously different aspects of light-frame wood wall assembly performance.

Avant-Propos

Ce document est présenté sous la forme d'une thèse de publications, incluant trois articles en anglais présentés aux chapitres 3, 4, et 5 :

Chapitre 3:

Frenette, C. D., Derome, D., Beauregard, R. and A. Salenikovich. 2008. « Identification of multiple criteria for the evaluation of light-frame wood wall assemblies ». *Journal of Building Performance Simulation* 1(4): 221-236.

Chapitre 4:

Frenette, C. D., Bulle, C., Beauregard, R., Salenikovich A. and D. Derome. 2009. « Definition of an environmental index for light-frame wood wall assemblies using Life-Cycle Assessment results ». Article soumis pour publication à la revue *Building and Environment*.

Chapitre 5:

Frenette, C. D., Beauregard, R., Abi-Zeid, I., Derome, D., and A. Salenikovich. 2008. « Multicriteria decision analysis applied to the design of light-frame wood wall assemblies ». Article accepté pour publication à la revue *Journal of Building Performance Simulation*.

Ces articles ont été rédigés par l'auteure de cette thèse, Caroline D. Frenette, laquelle a fait le développement du contenu et la rédaction, étant responsable de la revue de littérature, de l'application de la méthodologie, de l'obtention et de l'analyse des résultats. Les directeur et codirecteurs de la thèse, Robert Beauregard, Alexander Salenikovich et Dominique Derome, ont été impliqués dans la planification du travail de recherche et dans la révision des articles. De plus, l'article présenté au chapitre 4 a requis l'expertise et la collaboration de Cécile Bulle, agente de recherche au centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), au Département de génie chimique de l'École Polytechnique de Montréal, alors que l'article présenté au chapitre 5 a requis l'expertise et la collaboration d'Irène Abi-Zeid, professeure au Département d'opérations et systèmes de décision de l'Université Laval.

Les résultats de ce travail ont également été présentés aux conférences suivantes :

- Colloque facultaire, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec 12-13 novembre 2008.

- Congrès annuel 2008 de la Société canadienne de génie civil (SCGC), Québec 10-13 juin 2008.
- Rencontre des membres de la Société québécoise des manufacturiers d'habitation, Québec 18 mars 2008.
- 10th World Conference on Timber Engineering, Miyasaki, Japan, 2-8 juin 2008.
- Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X, Clearwater Beach, FL, 2-7 décembre 2007.
- Journée du CRB, Centre de recherche sur le bois, Université Laval 16 novembre 2007.
- 2e rencontres scientifiques Bordeaux/Laval, Bordeaux, France, 1-3 juillet 2009.

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que j'aimerais souligner la contribution de tous ceux qui m'ont aidée et encouragée dans la réalisation de ce projet. En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Robert Beauregard, pour sa disponibilité, son dynamisme et son respect. Il a su m'offrir le soutien nécessaire tout en respectant mes choix et mes aspirations. Par ses conseils, il m'a aidée à donner le meilleur de moi-même. J'aimerais aussi remercier mes codirecteurs : Alexander Salenikovich pour ses conseils judicieux, sa rigueur et sa passion et Dominique Derome, pour sa disponibilité et son support dans mon exploration d'un nouveau champ d'expertise. J'aimerais souligner la contribution et les conseils d'Irène Abi-Zeid. Je remercie aussi Cécile Bulle, pour sa disponibilité et ses commentaires constructifs.

J'adresse mes remerciements sincères aux entreprises qui ont accepté de me rencontrer dans la première phase de l'étude et qui m'ont fourni des données indispensables à la définition du projet. Les conseils judicieux du comité de thèse, formé de Robert Beauregard, Dominique Derome, Alexander Salenikovich, Marie-Claude Dubois, Lin Hu et Michel Beaudoin, m'ont ensuite aidé à mieux orienter les objectifs du projet. Je les en remercie. Je voudrais aussi exprimer ma gratitude aux membres du comité d'évaluation de la thèse, Robert Beauregard, Alexander Salenikovich, Dominique Derome, Marie-Claude Dubois, Michel Beaudoin et Peggi Clouston, pour avoir accepté de réviser ce travail et d'y apporter leurs précieux commentaires.

Ce projet de doctorat n'aurait pas pu être réalisé sans le soutien financier de la Chaire industrielle CIBISA et du CRSNG. Je voudrais aussi reconnaître l'aide financière de la Fédération canadienne des femmes diplômées des universités, du Conseil canadien du bois, du Conseil de l'industrie forestière du Québec, et de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval.

Je voudrais remercier toute l'équipe du CRB, et plus particulièrement Benoit St-Pierre, Guylaine Bélanger et Colette Bourcier, pour leur disponibilité et leur amitié. Et finalement, un merci très spécial à mes amis, à ma famille et à mon conjoint, Martin, pour leur support, leur encouragement, et leur présence à mes côtés.

à Raphaël, Marianne et Annabelle

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>Avant-Propos</i>	<i>iii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>v</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>x</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xi</i>
<i>Liste des acronymes</i>	<i>xii</i>
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 -REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Performance des murs à ossature légère en bois	5
1.1.1 Résistance structurale.....	6
1.1.2 Performance au feu	9
1.1.3 Contrôle de l'humidité et durabilité.....	10
1.1.4 Isolation thermique et efficacité énergétique	15
1.1.5 Performance acoustique	17
1.1.6 Impacts environnementaux	19
1.1.7 Autres facteurs	23
1.1.8 Influence des composants sur la performance des murs	23
1.2 Analyse globale des systèmes constructifs	32
CHAPITRE 2 - CADRE CONCEPTUEL DE L'ÉTUDE	39
2.1 Objectifs	39
2.2 Matériel et méthodes	40
2.2.1 Analyse de la situation décisionnelle	40
2.2.2 Développement d'un exemple d'application et évaluation des contraintes de conception.....	42
2.2.3 Évaluation des critères de performance	44
2.2.4 Agrégation des évaluations pour obtenir un rangement global	49
CHAPITRE 3 - IDENTIFICATION OF MULTIPLE CRITERIA FOR THE EVALUATION OF LIGHT-FRAME WOOD WALL ASSEMBLIES 52	
Résumé.....	52
Abstract.....	52
3.1 Introduction	53
3.2 Objectives and methodology	54
3.3 Definition of performance attributes	55

3.4	Description of the wall assemblies of the case study.....	58
3.5	Conformity to constraints attributes	59
3.5.1	Stud resistance to combined loading.....	60
3.5.2	In-plane shear resistance of the wall	61
3.5.3	Fire performance	61
3.5.4	Thermal resistance	62
3.5.5	Air barrier.....	62
3.5.6	Mandatory moisture management measures	62
3.6	Evaluation of performance criteria.....	63
3.6.1	Moisture management performance.....	64
3.6.2	Attenuation of sound transmission.....	68
3.6.3	Construction costs.....	69
3.6.4	Maintenance costs.....	71
3.6.5	Heating, ventilation and air-conditioning (HVAC)-related energy costs.....	71
3.6.6	Environmental impact.....	74
3.6.7	Overall evaluation.....	76
3.7	Discussion	78
3.8	Conclusion.....	79
CHAPITRE 4 - DEFINITION OF AN ENVIRONMENTAL INDEX FOR LIGHT-FRAME WOOD WALL ASSEMBLIES USING LIFE-CYCLE ASSESSMENT RESULTS.....		81
	Résumé.....	81
	Abstract.....	81
4.1	Introduction	82
4.2	Literature review	83
4.3	Methodology.....	85
4.4	Life cycle Assessment	85
4.4.1	Goal and scope definition	86
4.4.2	Life cycle inventory analysis	88
4.4.3	Life cycle impact assessment.....	92
4.4.4	Life cycle interpretation phase.....	100
4.5	Integration in MCDA evaluation	101
4.6	Discussion.....	102
4.7	Conclusion.....	105
CHAPITRE 5 - MULTICRITERIA DECISION ANALYSIS APPLIED TO THE DESIGN OF LIGHT-FRAME WOOD WALL ASSEMBLIES.....		108
	Résumé.....	108
	Abstract.....	108
5.1	Introduction	109
5.2	Objectives and methodology.....	110
5.3	Performance criteria	113
	Criterion 1 - Moisture management performance	116

Criterion 2 - Attenuation of sound transmission	117
Criterion 3 - Construction costs	119
Criterion 4 - Maintenance costs	119
Criterion 5 - Heating, ventilation and air-conditioning (HVAC)-related energy costs	120
Criterion 6 - Environmental impact	120
5.4 Decision contexts and weighting functions.....	121
5.5 Aggregation.....	123
5.5.1 The weighted sum	124
5.5.2 MACBETH	128
5.5.3 ELECTRE II	131
5.5.4 PROMETHEE.....	134
5.5.5 Comparison of the results of the various aggregation methods.....	136
5.6 Discussion	138
5.7 Conclusion.....	140
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	142
Limites de l'étude:.....	150
Recherches futures:	152
BIBLIOGRAPHIE	155
<i>Annexe 1 Collecte de données.....</i>	<i>171</i>
<i>Annexe 2 Définition de l'exemple d'application.....</i>	<i>177</i>
<i>Annexe 3 Propriétés hygrothermiques et résultats des simulations avec WUFI 4.1</i>	<i>199</i>
<i>Annexe 4 Calculs des coûts de construction et d'entretien.....</i>	<i>214</i>
<i>Annexe 5 Calculs des pertes énergétiques et des coûts de chauffage.....</i>	<i>217</i>
<i>Annexe 6 Calculs des indicateurs de dommage environnementaux (LCIA)</i>	<i>228</i>
<i>Annexe 7 Calculs selon les méthodes d'agrégation multicritères (MCDA)</i>	<i>245</i>

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 - Influence des composants sur les critères de performance	31
--	----

Chapitre 3

Table 3.1 - Constraints and criteria attributes for wall assembly assessment.....	58
Table 3.2 - Wall assemblies for the case study.....	59
Table 3.3 - Constraints evaluation for the case study.....	60
Table 3.4 - Maximum relative humidity for the 5 assemblies when temperature is between 5° and 40°C.....	66
Table 3.5 - Scale for the criterion of moisture management performance	68
Table 3.6 - Evaluation of the case study according to the performance criteria.....	76

Chapitre 4

Table 4.1 - Wall assemblies for the case study.....	87
Table 4.2 - Simulation of the case study in ATHENA software.....	91
Table 4.3 - Bill of materials included in the ATHENA simulation for the case study	92

Chapitre 5

Table 5.1 - Constraints and criteria for wall assembly assessment	113
Table 5.2 - Wall assemblies for the case study.....	114
Table 5.3 - Constraints evaluation for the case study.....	115
Table 5.4 - Evaluation of the performance criteria from the case study.....	115
Table 5.5 - Scale for the moisture management performance criterion.....	116
Table 5.6 - Relative importance of the performance criteria according to contexts.....	122
Table 5.7 - Relative weights of the performance criteria evaluated using the M-MACBETH software.....	123
Table 5.8 - Example of weighted sum calculations for context 1.....	125
Table 5.9 - Ranking of the alternative assemblies using four different aggregation methods in six different contexts.....	127
Table 5.10 - References used for the MACBETH analysis.....	128
Table 5.11 - Nonlinear scales obtained with the M-MACBETH software	130
Table 5.12 - Concordance and discordance thresholds for the ELECTRE II analysis.....	132

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 - Composition d'un mur à ossature légère en bois	24
---	----

Chapitre 3

Figure 3.1 - Top-down development of main objectives	57
Figure 3.2 - Temperature and vapour pressure profiles in assembly 1 for design temperature	63
Figure 3.3 - 24-hr-average relative humidity for the 5 assemblies under rain penetration conditions	67
Figure 3.4 - Details of the construction cost evaluation for the 5 assemblies of the case study ...	71
Figure 3.5 - Embodied GWP divided in groups of materials.....	76
Figure 3.6 - GWP for two operating energy sources: a) electricity and b) natural gas.....	76

Chapitre 4

Figure 4.1 - Overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, linking LCI results via the midpoint categories to damage (or endpoint) categories.....	93
Figure 4.2 - Comparison of the case study wall assemblies according to midpoint indicators for three LCIA methodologies.	94
Figure 4.3 - Comparison of the case study wall assemblies according to midpoint indicators regarding their contribution to the endpoint indicators.....	96
Figure 4.4 - Comparison of the case study wall assemblies according to endpoint indicators for two LCIA methodologies: IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99.	98
Figure 4.5 - Comparison of the case study wall assemblies considering the operation energy according to endpoint indicators for IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99.....	99

Chapitre 5

Figure 5.1 - Proposed MCDA framework methodology.	112
Figure 5.2 - Proposed function to evaluate the perception of loudness reduction	118
Figure 5.3 - Sensitivity analysis of the weighted sum ranking on the weight of criterion 2 in context 1	126
Figure 5.4 - Example of qualitative judgements to establish a preference scale for criterion 1 with the M-MACBETH software.....	129
Figure 5.5 - Sensitivity analysis of the MACBETH ranking on the weight of criterion 1 in context 1 (with M-MACBETH software).....	130
Figure 5.6 - Sensitivity analysis of the ELECTRE II ranking on the weight of criterion 1 in context 1	133
Figure 5.7 - Sensitivity analysis of the PROMETHEE II ranking on the weight of criterion 1 in context 1 (derived from results obtained with Decision Lab software).....	135
Figure 5.8 - Ranking of the alternative assemblies using four different aggregation methods in six different contexts.....	137

Liste des acronymes

- ACH – Changements d'air l'heure (*air changes per hour*)
- AEE – Agence de l'efficacité énergétique du Québec
- ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*
- CNBC – Code national du bâtiment du Canada (*National Building Code of Canada*)
- CNRC – Conseil national de recherche du Canada (*National Research Council Canada*)
- DALY – Années équivalentes de vie perdue (*Disability Adjusted Life Years*)
- DDSI – donnée en degré-jour (*degree-day data*),
- GWP – Potentiel de réchauffement climatique (*Global warming potential*).
- HVAC – Chauffage, ventilation et climatisation (*Heating, ventilation and air-conditioning*)
- ITS – Indice de transmission sonore (*sound transmission class*)
- kgeqCO₂ – Émission équivalente en kilogrammes de dioxyde de carbone (*Equivalent kilograms of carbon dioxide*)
- LCA – Analyse du cycle de vie (*Life-cycle assessment*)
- LCIA – Méthodes d'analyse d'impact environnemental (*Life-cycle impact assessment*)
- LCI – Inventaire de cycle de vie (*Life-cycle inventory*)
- MCDA – Aide à la décision multicritères (*Multicriteria decision analysis*)
- NBCC – Code national du bâtiment du Canada (*National Building Code of Canada*)
- NRCC – Conseil national de recherche du Canada (*National Research Council Canada*)
- OITC – indice de transmission extérieur-intérieur (*Outdoor-Indoor Transmission Class index*)
- OSB – Panneau de lamelles orientées (*Oriented strand board*)
- PAMC – Procédure d'agrégation multicritères (*Multicriteria aggregation method*)
- PDF.m².yr – Fraction d'espèce disparue sur un mètre carré et pour une année (*Potentially Disappeared Fraction over a square meter during one year*)
- RH – Humidité relative (*relative humidity*)
- RSI-value – Résistance thermique (*Thermal resistance*)
- STC – Indice de transmission sonore (*sound transmission class*)
- TL – Perte de transmission de son en decibel (*Sound transmission loss in decibel*)
- VOC – Composés organiques volatiles (*volatile organic compounds*)
- WRM – Pare-intempérie (*water-resisting membrane*)

Introduction

Dans le contexte québécois actuel, il paraît essentiel de réinventer l'industrie du bois afin de permettre à l'économie liée aux ressources forestières de survivre aux diminutions de la matière première. En effet, la volonté actuelle de développement durable demande l'intégration d'un aménagement écosystémique et un rééquilibrage des coupes afin d'assurer le maintien des forêts à long terme (Coulombe *et al.* 2004). Pour permettre cet équilibre, notre industrie a tout avantage à tirer le maximum de la matière ligneuse disponible. Ainsi, un développement de l'industrie de seconde transformation qui permet d'utiliser cette matière pour produire, et éventuellement exporter, des produits à valeur ajoutée, semble une avenue prometteuse.

Dans le domaine de la construction, le bois et ses dérivés ont une place importante à jouer. En Amérique du Nord, l'utilisation du bois pour la construction résidentielle est une expertise déjà bien établie (CWC 2002). Largement utilisée pour les bâtiments de faible hauteur, la construction à ossature légère en bois offre généralement un bon rendement, en plus d'être économique et facile à construire. Il paraît donc désirable de mettre en place une industrie d'exportation basée sur cette expertise. Une optimisation des procédés de fabrication est cependant nécessaire afin de permettre une expansion de cette expertise locale vers une solide industrie d'exportation. Dans cette optique, une première étape consiste à développer une industrie de préfabrication compétente utilisant le marché local pour développer ses compétences et optimiser ses procédés. Ce processus de développement, déjà bien entamé dans l'industrie québécoise de préfabrication de constructions résidentielles à ossature légère en bois, doit reposer sur de solides bases scientifiques. La compréhension du produit et des fonctions qu'il doit remplir, ainsi que son adaptabilité dans différents contextes sont essentielles.

Parmi les différents composants d'un bâtiment, les murs extérieurs constituent un élément complexe qu'il est utile d'étudier minutieusement. Les murs extérieurs à ossature légère en bois forment autant la structure que l'enveloppe du bâtiment et doivent donc répondre à plusieurs exigences simultanément. Ainsi, il peut être problématique de chercher à modifier la composition d'un mur dans un but spécifique sans évaluer globalement l'impact de ce changement.

Plusieurs situations peuvent mener à vouloir modifier la composition d'un mur extérieur à ossature légère en bois. L'exportation dans de nouveaux marchés présentant des contextes climatiques, culturels et socio-économiques différents demande des adaptations à de nouvelles exigences de rendement. Même dans une région donnée, les exigences relatives à la construction résidentielle varient dans le temps et selon les segments de marché. Les considérations environnementales, les exigences minimales d'isolation thermique ou la qualité de l'isolation acoustique ont évolué avec les années. De plus, l'intégration de nouveaux matériaux de construction ou de nouveaux produits visant à améliorer le rendement ou à réduire les coûts peut justifier la modification d'un système connu.

Pour s'assurer du succès de telles modifications, il est essentiel d'évaluer le mur extérieur en tant que système devant performer selon un ensemble de critères appropriés, incluant, par exemple, l'intégrité structurale, la protection contre l'environnement extérieur, la capacité à supporter des variations de teneur en humidité, l'isolation acoustique et, plus récemment, la diminution de la trace environnementale. Cet ensemble de critères et leurs modes d'évaluation sont cependant souvent mal définis et peuvent différer d'un contexte à l'autre. Au-delà des exigences minimales selon certains critères exigées par les codes du bâtiment pour qu'une construction soit jugée acceptable, plusieurs autres critères ne sont pas réglementés. De plus, certains critères de performance sont mieux connus alors que d'autres peuvent être moins bien établis, surtout dans un contexte d'exportation. Ainsi, les charges structurales devant être supportées dans différentes zones géographiques sont relativement bien connues, alors que les critères de performance liés aux habitudes des occupants et aux exigences des consommateurs sont souvent moins bien définis. Finalement, certains critères de performance, comme la résistance thermique, représentent une plus-value s'ils sont augmentés au-delà du seuil minimal réglementaire. Pour d'autres critères, tels la capacité structurale, une amélioration de la performance au-delà du seuil requis n'apporte pas de bénéfice supplémentaire.

Les techniques actuelles de construction à ossature légère en bois se sont développées au fil des ans et sont adaptées à des contextes climatiques et socio-économiques spécifiques. Le système du mur extérieur en bois évolue constamment par la venue sur le marché de nouveaux produits pour la construction. Chacune des caractéristiques de ce système sont

complexe à modéliser et ont souvent été étudiées indépendamment des autres aspects de performance de l'enveloppe. Traditionnellement, l'étude scientifique du comportement de système constructif, tel que les murs extérieurs, se fait par champ d'expertise. Par exemple, certains groupes de recherche étudient la performance structurale de différents types de murs alors que d'autres chercheurs sont plutôt intéressés par le comportement hygrothermique ou acoustique. Dans l'ensemble, certains critères de performance ont largement été étudiés et se basent sur des connaissances scientifiques acquises depuis des décennies, alors que d'autres, comme l'évaluation de la trace environnementale, sont des champs d'expertise relativement récents et en développement.

La tendance mondiale actuelle tend à privilégier un développement durable basé sur une réduction de la trace environnementale. Cette démarche exige de solides évaluations scientifiques des impacts réels sur l'environnement des différents matériaux et procédés utilisés. Les études existant à ce jour démontrent l'avantage du matériau bois dans ce domaine : il s'agit d'une ressource renouvelable utilisant des procédés de transformation qui exigent peu d'énergie et qui rejettent relativement peu de polluants dans l'environnement. Promouvoir et optimiser l'utilisation du bois répond donc à cette préoccupation actuelle. Comme chaque produit fini a un cycle de vie propre, il est important de définir scientifiquement son impact sur l'environnement; cette étape permettra d'augmenter la valeur des produits proposés.

L'étude globale du système des murs extérieurs à ossature légère en bois demande une perspective d'ensemble permettant de créer des liens entre l'information développée par différentes spécialités afin d'assurer une évaluation adaptée à la nature multicritère de leur comportement. Même s'il est important de comprendre chaque phénomène en profondeur, toutes les caractéristiques pertinentes doivent être étudiées simultanément si l'on veut en arriver à une optimisation globale du système. Le choix du revêtement intermédiaire est un bon exemple illustrant ces interactions. Un panneau de lamelles orientées (OSB) peut être choisi pour assurer la stabilité structurale du système de contreventement. Par sa faible perméance à la vapeur d'eau, ce panneau influencera cependant aussi le comportement hygrothermique du mur en réduisant sa capacité de séchage en cas de mouillage accidentel (Teasdale-St-Hilaire et Derome 2005).

Le chapitre 1 propose une revue des différents critères de performance liés au mur extérieur, des compositions standards de murs extérieurs à ossature légère en bois et de la littérature sur l'intégration de plusieurs facteurs dans la conception de bâtiment. Le chapitre 2 introduit le cadre conceptuel de la présente étude en identifiant les objectifs poursuivis ainsi que le matériel et les méthodes utilisés. Les chapitres 3, 4 et 5, écrits en anglais, présentent le cœur de l'étude, soit le développement d'un cadre d'analyse multicritère supportant le choix de compositions de mur extérieur à ossature légère en bois, appuyé par un exemple d'application comparant cinq compositions de mur pour un bâtiment résidentiel situé à Québec, Canada. Spécifiquement, le chapitre 3 présente une méthodologie permettant d'identifier et de quantifier un ensemble de critères de performance pour le contexte étudié. Le chapitre 4 propose une analyse du cycle de vie pour définir un indice de performance environnementale. Le chapitre 5 finalise le développement du cadre d'analyse en comparant quatre procédures d'agrégation multicritères pour intégrer le contexte et les préférences du décideur dans la recherche d'un rangement de différentes alternatives. Finalement, une conclusion générale résume les résultats obtenus, spécifie les limites de l'étude et propose des pistes de travaux futurs.

Chapitre 1 - Revue de littérature

1.1 Performance des murs à ossature légère en bois

Dans la construction résidentielle à ossature en bois, une même composition de mur extérieur doit remplir plusieurs critères de performance. Les éléments de performance retenus dans le cadre de cette étude sont divisés en deux catégories. D'une part, les contraintes de conception demandent un niveau de performance minimal requis par le cadre réglementaire, par exemple le Code national du bâtiment du Canada (CNBC) (CNRC 2005). Cette catégorie inclut la résistance structurale, la résistance au feu, et les exigences minimales en matière d'isolation thermique, d'étanchéité à l'air et de gestion de l'humidité. D'autre part, certains critères de performance dépendent plutôt de l'exigence de l'utilisateur. Ainsi, l'isolation thermique, l'isolation acoustique, et la qualité environnementale sont des critères influencés par la composition du mur et dont un niveau de performance accru peut représenter une plus-value. Ainsi, pour certains critères, comme l'isolation thermique, il existe un seuil réglementaire et une augmentation de la performance au-delà du niveau minimal représente aussi un avantage.

Certains aspects de la performance sont pris en charge par des éléments précis du mur ne causant pas ou peu d'interaction avec d'autres aspects. La plupart des composants d'un mur ont cependant des caractéristiques qui causent une interaction plus ou moins grande entre les différents aspects de sa performance. Ainsi, l'augmentation de la résistance thermique peut modifier le régime hygrique à travers la paroi et augmenter les risques de condensation. Inversement, la présence d'eau peut affecter certains isolants et en laisser d'autres intacts. Les éléments de structure sont un autre exemple, car ils peuvent créer des ponts thermiques et ainsi réduire la valeur globale de résistance thermique, ou créer une barrière à faible perméance et ainsi affecter les transferts hygrothermiques. L'importance de ces interactions varie grandement en fonction des conditions d'utilisation et des exigences demandées pour chacun des critères de performance.

Dans les sections suivantes, chaque critère de performance est présenté en termes de facteurs d'influence, état de l'art de son analyse et réglementation en vigueur afin d'identifier les modes d'évaluation retenus dans le cadre de cette étude.

1.1.1 Résistance structurale

La résistance structurale est un critère de performance dont un minimum requis doit être atteint pour assurer la sécurité des occupants et éviter les déformations excessives. Le niveau de résistance aux charges accidentelles, tels les séismes et vents extrêmes, est établi en fonction d'études de fiabilité. La notion de déformation excessive dépend du confort et de la souplesse des matériaux de finition. Les murs extérieurs des bâtiments sont soumis à trois principaux types de chargement, soit les charges verticales, les pressions du vent perpendiculaires ainsi que les charges latérales de contreventement causées par le vent ou les séismes. Les charges dues au transport et à la manutention d'éléments de mur préfabriqués doivent être aussi considérées dans la conception, mais ne sont pas incluses dans le cadre de cette étude.

1.1.1.1 Résistance aux charges verticales et à la pression du vent perpendiculaire

Les charges verticales, principalement dues à la gravité, et les pressions du vent perpendiculaires à la façade sont reprises par l'ossature. La capacité de l'ossature en bois à résister à ces charges est influencée par plusieurs facteurs, dont les propriétés du matériau bois utilisé pour l'ossature, le soutien latéral du panneau structural et les techniques d'assemblage. Les propriétés du matériau bois, soit sa résistance aux charges combinées et son module d'élasticité, dépendent du matériau utilisé (essence, classe, traitement), du taux d'humidité et de la durée des charges. La capacité du panneau structural à assurer la stabilité latérale des montants et la redistribution des charges entre les différents montants de résistance variable dépend de sa rigidité, de sa résistance à la flexion, de sa résistance au cisaillement et de sa connexion à l'ossature. L'efficacité des assemblages est contrôlée par le type de connecteurs choisi (clous, agrafes ou vis), l'utilisation de colle, la pénétration, les espacements et la résistance des éléments assemblés (CWC 2005).

La détermination de la résistance et du module élastique des éléments en bois a évolué au cours des années allant d'essais sur de petits échantillons de bois clair¹ vers l'étude de sections de bois scié couramment utilisées, divisées selon les groupes d'espèce et les classes de résistance reconnaissant la présence de défauts (CWC 2005, Madsen 1992). Les classes de résistance sont traditionnellement déterminées visuellement. De nos jours, l'avancée de

¹ Un échantillon de bois clair est un échantillon de bois sélectionné ne présentant pas de défauts observables.

la technologie permet cependant de classer mécaniquement les éléments en bois par des essais non-destructifs qui mesurent le module d'élasticité, permettant ainsi de réduire la variabilité au sein d'une même classe. L'impact du taux d'humidité et des traitements du bois, ainsi que l'influence de la durée de chargement sur les propriétés du bois et sur la résistance des assemblages, ont été déterminés expérimentalement (CWC 2005). La résistance d'un assemblage utilisant des connecteurs ductiles est modélisée en considérant la performance de chaque connecteur en lien avec la résistance du bois connecté selon une méthode initialement proposée par Johansen en 1949 et ultérieurement améliorée par Larsen et Whale (CWC 2005). Ce modèle néglige les modes de rupture fragile par fendage ou cisaillement du bois, alors que ceux-ci sont déterminants dans certaines conditions (CWC 2005). Des recherches en cours ont développé une méthode de calcul permettant d'incorporer ces modes de rupture fragile (Quenneville et Mohammad 2000). D'autres recherches étudient la résistance des assemblages entre des modules préfabriqués de murs à ossature en bois (Munoz *et al.* 2006).

La norme CSA-086 exige un calcul aux états limites de résistance et de tenue en service (CAN/CSA-O86-01 2005). Pour le calcul de résistance: les montants de l'ossature doivent résister aux contraintes de compression et de flexion causées par la combinaison des charges pondérées; les lisses de l'ossature doivent résister aux contraintes de compression perpendiculaire aux fibres du bois; les montants et les lisses doivent être adéquatement fixés ensemble, aux fondations et aux autres éléments de la structure. Pour les calculs de tenue en service: la déformation latérale des montants, causée par la pression du vent, doit être limitée au 180° de la hauteur ($h/180$) (CNRC 2005); la déformation verticale des lisses de l'ossature doit être limitée lorsque soumise aux contraintes de compression perpendiculaire aux fibres et au retrait et au gonflement dus aux variations d'humidité.

1.1.1.2 Résistance en Contreventement

Pour les murs à ossature en bois, la résistance en contreventement est le critère de résistance structurale le plus critique. D'une part, elle assure l'intégrité structurale du bâtiment et, d'autre part, elle est difficile à prédire car elle dépend de l'assemblage de plusieurs éléments. En effet, la stabilité latérale des bâtiments à ossature légère en bois est assurée par la collaboration de murs de refend verticaux (murs porteurs) et de diaphragmes

horizontaux (planchers et toiture) qui permet de transmettre les charges latérales de la toiture aux fondations. Un mur de refend est principalement composé d'un panneau structural assemblé à une ossature en bois. Les panneaux structuraux les plus communs sont des produits en bois comme le contreplaqué ou l'OSB, mais d'autres produits comme les panneaux de gypse sont aussi reconnus dans le CNBC (CNRC 2005).

La résistance en contreventement d'un mur de refend dépend de la résistance en cisaillement du panneau structural, ainsi que de l'assemblage entre le panneau et l'ossature. La résistance en cisaillement du panneau est influencée par ses caractéristiques propres (type, épaisseur, classe), le taux d'humidité et la durée de chargement. La capacité de l'assemblage résulte des connecteurs choisis, de leur longueur de pénétration dans l'ossature, de leur espacement, de la résistance de l'ossature et du panneau au poinçonnement et au déchirement. La ductilité de l'assemblage panneau-ossature est aussi un critère de conception important qui influence la résistance aux charges sismiques du mur (Karacabeyli *et al.* 1999). Les entretoises entre les montants permettent d'assurer la continuité des joints, et la présence d'ancrage de retenue prévient le soulèvement du coin inférieur du mur (CWC 2005). L'utilisation de panneaux de chaque côté augmente la résistance, alors qu'un faible rapport géométrique du mur (largeur sur hauteur) ou la présence d'ouvertures la réduisent (CWC 2005, Mi *et al.* 2004).

Le comportement structural d'un mur à ossature en bois standard est relativement bien connu. Les modes de rupture observés lors d'essais sont principalement liés au perçage du panneau par les têtes de clous et à l'arrachement des clous. Le fendage d'un montant ou de la lisse basse, ainsi que l'arrachement de l'assemblage entre le montant extérieur et la lisse basse, ont aussi été observés. La résistance ultime d'un panneau de mur sous un chargement donné a été modélisée par des modèles par éléments finis et par des équations à forme déterminée (Salenikovich 2000). Les courbes de déformation ont aussi été modélisées à l'aide de modèles par éléments finis, ainsi que par des équations à forme déterminée, en considérant quatre composantes: la flexion dans les montants, le cisaillement dans le panneau, la déformation des clous, et la rotation du corps rigide (Ni et Karacabeyli 2002 et 2004). Les courbes de déformation d'un mur sont importantes afin d'apprécier sa ductilité,

de calculer le centre de torsion d'un système ou de considérer les rigidités relatives d'un système mixte.

Une différence a cependant été observée entre la résistance latérale réelle d'un bâtiment à ossature légère en bois et le résultat de calculs basés sur la performance d'un mur standard. Des études ont donc cherché à comprendre l'influence d'éléments additionnels, telles les finitions extérieures et intérieures, les charges verticales provenant des étages supérieurs, et la présence d'ouvertures ou de murs perpendiculaires (Doudak et Smith 2009, Durham *et al.* 2001, Johnston *et al.* 2006, Kim et Rosowsky 2005, Taylor *et al.* 2003, Munoz *et al.* 2006, van de Lindt et Liu 2007), alors que d'autres projets cherchent à inclure l'effet de système dans l'analyse structurale du bâtiment (Ellingwood *et al.* 2008, Fischer et Kasal 2009, He *et al.* 2001, Li et Ellingwood 2007, Popovski et Karacabeyli 2004).

Au Canada, la norme CAN/CSA-O86-01 fournit des valeurs de résistance en contreventement pour différentes configurations de murs de cisaillement en kN par mètre linéaire de mur, variant selon le type de panneau et le nombre de connecteurs. De plus, des facteurs de modification sont prévus pour tenir compte de l'essence de bois utilisée pour l'ossature, de la durée des charges, du taux d'humidité d'utilisation, de l'absence de fourrure et/ou d'ancrage de retenue (CWC 2005). Toutefois, pour les petits bâtiments subissant des charges latérales limitées, une méthode simplifiée prescrite dans le guide d'ingénierie pour les constructions à ossature bois peut être utilisée (CWC 2004).

1.1.2 Performance au feu

Le bois est un matériau combustible qui, lorsqu'utilisé en fortes sections, forme une couche carbonisée à sa surface lors de sa combustion, lui permettant de conserver une capacité structurale interne (CWC 2000). Plusieurs projets de recherches étudient le comportement d'éléments structuraux en bois en cas d'incendie. Certaines études tentent de caractériser le taux de combustion des éléments structuraux en bois afin de permettre d'estimer leur capacité portante en cas d'incendie (Cachim et Franssen 2009, Firmanti *et al.* 2006, Hietaniemi 2007, Yang *et al.* 2009). Un calcul de perte de section est prescrit dans l'Eurocode 5 (Konig 2005), mais n'est pas encore inclus dans le code canadien (CWC, 2005). D'autres projets se concentrent sur le développement et l'évaluation de techniques

pour ignifuger les éléments en bois (Ayrilmis *et al.* 2006, Hussein et Denzli 2005, Marney et Russell 2008, Pereyra et Giudice 2009, Schulz et Krug 2005).

Pour les murs à ossature légère en bois, par contre, les sections sont trop petites pour être protégées par une couche carbonisée et la résistance au feu doit être étudiée globalement car les revêtements protègent le bois de l'ossature (Benichou et Sultan 2005, Craft *et al.* 2008, Kodur et Sultan 2000, Manzello *et al.* 2007). La présence d'une finition intérieure en panneau de gypse qui protège le mur et l'ossature des flammes et de l'augmentation de la chaleur est un élément important. D'autres facteurs comme le type d'ossature, la présence d'isolation et, bien sûr, le comportement au feu de chaque matériau, incluant l'inflammabilité et l'émanation de gaz toxiques, peuvent avoir leur importance. Des essais expérimentaux, effectués par l'Institut de recherche en construction du CNRC, ont permis de déterminer les facteurs d'influence de différents composants sur la résistance au feu de murs à ossature légère protégés par un panneau de gypse (Sultan et Lougheed 2002).

Le CNBC exige une durée de résistance au feu d'un bâtiment nécessaire à l'évacuation des occupants (CWC 2000). Pour les bâtiments résidentiels multi-étagés, la résistance au feu minimale pour les murs extérieurs est de 45 minutes, ce qui peut être obtenu par l'utilisation d'un panneau de gypse de type X de 13 mm. Il n'y a cependant pas d'exigence de résistance au feu pour un bâtiment résidentiel unifamilial (CNRC 2005).

1.1.3 Contrôle de l'humidité et durabilité

Le contrôle de l'humidité permet d'éviter l'accumulation d'humidité dans l'assemblage pouvant mener à la biodégradation du bois et ainsi affecter la durabilité du mur. Le contrôle de l'humidité dépend principalement de la composition du mur, du climat local, ainsi que des conditions d'humidité, de température et de pression intérieures, qui sont conditionnées par les systèmes de ventilation, de chauffage et de climatisation et par les habitudes des utilisateurs. La variation des conditions d'utilisation implique qu'un mur idéal dans un environnement donné pourrait offrir une moins bonne performance dans un autre contexte. Le respect des principes de base doit donc être vérifié spécifiquement pour chaque environnement d'utilisation.

Le terme hygrothermique, souvent utilisé, comporte deux aspects, soit l'humidité et la chaleur. Les deux sont liés car la température de l'air contrôle la quantité de vapeur d'eau maximale que celui-ci peut contenir. Des variations de température influencent le taux d'humidité relative et peuvent mener à des risques de condensation. Ces variations de teneur en humidité peuvent affecter la durabilité de l'enveloppe des bâtiments. Différentes composantes du mur jouent un rôle dans la performance hygrothermique. Une distinction doit être faite entre les notions de pare-air, pare-vapeur et pare-intempérie. Le pare-air est une barrière continue et étanche à l'air qui permet, entre autres, de réduire les exfiltrations d'air chaud et humide à travers le mur et, ainsi, de limiter les risques de condensation et les pertes énergétiques. Le pare-vapeur, quant à lui, réduit le transport par diffusion de la vapeur d'eau à travers le mur. La continuité du pare-vapeur n'est pas aussi importante, car la diffusion de la vapeur est fonction de la superficie entre deux environnements aux pressions de vapeur différentes. Finalement, le pare-intempérie empêche la pénétration de l'eau de pluie dans le mur de fond, tout en restant habituellement assez perméable au transfert de l'humidité (ASHRAE 2005).

Le contrôle de l'humidité dans les parois est étudié par plusieurs programmes de recherche actuels. Une bonne conception de l'enveloppe vise la réduction des principales entrées d'humidité par l'étanchéité à l'air, la gestion de l'eau de pluie et l'analyse des propriétés hygrothermiques de chaque couche, incluant la capacité de séchage du système en cas d'infiltration. Pour l'ensemble des critères, la résistance des matériaux au moment de la pose ainsi que leur durabilité dans le temps doivent être considérées afin de garantir qu'ils assureront leur fonction tout au long de la vie du bâtiment. De plus, les ouvertures faites dans le mur provoquent des discontinuités du système qui peuvent permettre une entrée d'humidité imprévue. Les détails de conception spécifiques aux jonctions ou aux discontinuités, tels l'ajout de boîtes électriques, ne seront cependant pas abordés dans le cadre de cette étude qui se concentre sur la composition du mur opaque et sans jonction.

1.1.3.1 Étanchéité à l'air

Le transport de l'humidité par des fuites d'air dans la paroi est une des principales causes d'accumulation d'eau dans la composition de l'enveloppe (Derome 2005). La fonction pare-air peut être assurée par le matériau utilisé comme pare-vapeur ou pare-intempérie, ou par

un autre matériau. L'étanchéité à l'air demande un système continu sur toute l'enveloppe, ce qui est difficile à garantir car cette continuité dépend habituellement de plusieurs corps de métier. Des études récentes cherchent à répertorier l'étanchéité à l'air de bâtiments existants (Antretter *et al.* 2007, Chan *et al.* 2005) et à utiliser la thermographie pour connaître plus précisément les points d'infiltration (Bérubé-Dufour *et al.* 2005).

Le CNBC demande que les matériaux composant le pare-air aient un taux de perméabilité à l'air d'au plus $0,02 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)\text{@}75 \text{ Pa}$, et suggère un taux maximal de perméabilité de $0.10 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)\text{@}75 \text{ Pa}$ pour le système d'étanchéité de l'enveloppe extérieure (CNRC 2005). Le test standard d'étanchéité à l'air d'un bâtiment est l'essai d'infiltrométrie selon la norme ASTM E779 (2003). La certification Novoclimat demande un maximum de 2,5 changements d'air l'heure (ACH) à 75 Pa, alors que R2000 exige 1,5 ACH à 75 Pa (AEE 2003, CANMET 2005).

1.1.3.2 Gestion de l'eau de pluie

La gestion de l'eau de pluie est un aspect clé du contrôle de l'humidité. Pour qu'il y ait pénétration d'eau dans le mur, trois conditions doivent être présentes : il doit y avoir de l'eau sur la paroi, une ouverture dans la paroi et une force poussant l'eau dans l'ouverture. Cette force peut être gravitaire, cinétique, capillaire ou créée par une tension de surface ou par une pression différentielle de l'air. La pression d'air différentielle, causée par l'effet de cheminée, un système de ventilation mécanique ou le vent, semble être la force contribuant majoritairement à la pénétration de l'eau de pluie. Sans être complètement éliminée, la présence d'eau de pluie peut être réduite par les balcons et les avant-toits. Des études ont été réalisées sur les patrons de mouillage et la distribution de l'eau de pluie lors d'averse (Doshi 2005, Blocken *et al.* 2005).

Traditionnellement, le mur massif de maçonnerie permettait de résister à la pénétration de l'eau de pluie en absorbant, en emmagasinant et en évacuant ultérieurement l'eau. Les systèmes de construction légère n'offrant cependant plus la capacité d'absorption nécessaire, deux alternatives sont possibles : le mur scellé et le mur à écran pare-pluie. Le mur scellé cherche à éliminer toutes les ouvertures dans la paroi afin d'empêcher l'eau d'entrer, ce qui demande une mise en œuvre méticuleuse ainsi que des inspections et des entretiens réguliers. Le mur à écran pare-pluie procure un écran extérieur additionnel,

comme la finition extérieure, qui empêche l'eau d'entrer en contact avec le mur et élimine ainsi la force qui pousserait l'eau dans une éventuelle ouverture. Pour être efficace, ce système doit aussi comprendre une cavité drainée et ventilée, un écran pare-pluie ainsi qu'un système pare-air efficace et résistant (CNRC 2005, A-9.27.2) Plusieurs recherches se sont concentrées sur les murs écrans pour applications principalement commerciales comme le mur écran à pression égalisée (PER) (Karagiozis *et al.* 2005). Pour assurer une bonne protection contre les précipitations, le chapitre 9 du Code du bâtiment portant sur les constructions à ossature légère demande un mur à écran pare-pluie pour les habitations (CNRC 2005, A-9.27.2).

1.1.3.3 Comportement hygrothermique

Un mur est formé de plusieurs couches qui peuvent être solides ou flexibles, épaisses ou minces, uniformes ou composites, ou même composées d'air. Chaque couche possède ses propres propriétés isolantes, d'étanchéité à l'air, de perméabilité à l'eau liquide et à la vapeur d'eau, et donc ses propres caractéristiques pour agir comme pare-vapeur, pare-air ou isolant, le cas échéant. Dans la conception d'un système, il est essentiel de considérer les propriétés de chaque couche ainsi que les anomalies qui peuvent être présentes à l'assemblage de ces couches. Le climat et les conditions d'utilisation sont des données primordiales dans une analyse intégrée du comportement hygrothermique d'un système.

En combinant les caractéristiques des composants d'un mur et les conditions d'utilisation, il est possible d'estimer la distribution de la température et de l'humidité relative, ainsi que la teneur en humidité des matériaux à travers la paroi. Cette analyse peut permettre de prédire la détérioration des matériaux et la croissance de moisissure qui sont associés à des teneurs en humidité élevées et des températures dans la fourchette 5 à 40°C (Teasdale-St-Hilaire et Derome 2005, Viitanen 1996, ASHRAE 2006). Des analyses simplifiées des courbes de température et d'humidité aux conditions de design permettent de s'assurer que le point de rosée n'est pas atteint dans l'épaisseur de la paroi en régime permanent, et peuvent ainsi indiquer qu'il n'y aura pas de condensation dans la paroi (TenWolde 2001, ASHRAE 2005). Il faut cependant se rappeler que les conditions de température et d'humidité changent constamment autant à l'intérieur qu'à l'extérieur, influençant le comportement du système (Mukhopadhyaya *et al.* 2003). Plusieurs outils ont été développés pour obtenir une analyse

dynamique des transferts hygrothermiques à travers une paroi formée de plusieurs couches. Un projet européen d'uniformisation des méthodes de calcul en transfert d'humidité, d'air et de masse (HAMSTAD WP2) a permis de créer une plateforme permettant de comparer des outils de simulation unidimensionnels (Hagentoft *et al.* 2004). WUFI 4.1 est un outil de simulation hygrothermique professionnel performant développé en Allemagne, et intégrant des bases de données nord-américaines (Karagiozis *et al.* 2001, WUFI 2007). HygIRC, développé par l'Institut de recherche en construction du NRCC, est aussi un outil simulation hygrothermique ayant une interface utilisateur conviviale, mais n'intégrant pas encore la possibilité de simuler une entrée d'eau de pluie dans la paroi ou d'inclure un lame d'air ventilée (Cornick 2006, Mukhopadhyaya *et al.* 2003).

Les transferts hygrothermiques dans les parois sont le sujet de plusieurs recherches car plusieurs cas de dommages ont résulté d'une compréhension insuffisante de ces phénomènes (Derome et Fazio 2000, Oduor 1999, Olutimayin *et al.* 2005). Un nouveau standard BSR/ASHRAE Standard 160P propose des critères de risques liés à la présence d'humidité pour la conception d'assemblages (ASHRAE 2006).

Même si beaucoup d'efforts sont consacrés afin de limiter les entrées d'eau dans l'enveloppe, il semble primordial de prévoir une certaine capacité de séchage afin de s'assurer qu'une erreur d'étanchéité ne soit fatale. La capacité de séchage dépend de plusieurs facteurs, dont les propriétés des matériaux utilisés, la présence d'une cavité entre le pare-intempérie et la finition extérieure, l'aération et la possibilité de drainage de cette cavité, ainsi que les propriétés des matériaux mouillés. Des études récentes permettent d'identifier les paramètres influençant la capacité de séchage d'une composition de mur (Teasdale-St-Hilaire et Derome 2005, Thivierge 2008).

Les exigences du CNBC concernant la gestion de l'humidité des murs extérieurs à ossature bois comporte trois aspects: une isolation thermique minimale, une étanchéité à l'air suffisante et d'autres mesures obligatoires en climat froid comme un pare-pluie efficace et l'utilisation d'un pare-vapeur (CNRC 2005). L'analyse du comportement hygrothermique d'une paroi peut permettre de vérifier, lors de la conception, la capacité de l'assemblage à assurer une bonne gestion de l'humidité.

1.1.4 Isolation thermique et efficacité énergétique

Dans la plupart des zones climatiques, une bonne isolation thermique permet de réduire considérablement les coûts d'exploitation et de maintenir une température de confort à l'intérieur du bâtiment. La capacité isolante d'une enveloppe permettant de réduire les pertes énergétiques est un critère de performance dont l'augmentation amène une plus-value. Pour assurer une bonne isolation thermique, les trois formes d'écoulement de la chaleur doivent être considérées, soit la conduction, le rayonnement et la convection (ASHRAE 2005).

La conduction de la chaleur à travers la paroi dépend de la capacité isolante des matériaux utilisés dans la composition du mur. Elle est minimisée par l'utilisation de matériaux ayant une conductivité thermique faible ou par l'augmentation de l'épaisseur du matériau isolant. Des données sur la conductivité thermique de plusieurs matériaux sont facilement disponibles, mais il peut être important de noter que cette propriété varie en fonction de la teneur en humidité pour certains matériaux (ASHRAE 2005). L'étude d'une composition non-uniforme d'un mur, comme la présence d'éléments d'ossature, doit considérer les ponts thermiques qui modifient le transfert de chaleur. Une analyse des courbes de température à travers un mur composé de plusieurs matériaux peut être déterminée graphiquement ou à l'aide d'un logiciel simple en régime permanent. (ASHRAE 2005). Concernant la terminologie, le calcul de la résistance thermique totale se fait par l'addition des résistances thermiques des couches de la composition du mur et il ne considère pas les ponts thermiques, alors que la résistance thermique effective inclut l'influence des ponts thermiques causés par l'ossature (AEE 2003).

Certaines conditions, comme la considération de l'inertie thermique, peuvent nécessiter une étude dynamique de la variation des courbes de température à l'intérieur de la paroi, considérant la variation de la température extérieure. L'inertie thermique est la capacité d'un bâtiment à amortir les variations de température intérieure. Elle dépend, entre autre, de la capacité des matériaux à accumuler la chaleur. Celle-ci se mesure par l'effusivité thermique qui est fonction la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la masse volumique (Roulet 2004). L'inertie thermique aide à conserver plus longtemps la température intérieure en cas d'arrêt du système de chauffage ou de climatisation, ou permet d'absorber une augmentation ponctuelle de chaleur extérieure. Par exemple, lors

d'un après-midi d'été chaud, le surplus de chaleur pourra être accumulé dans les matériaux ayant une grande effusivité thermique pour ensuite être ventilé lorsque la température extérieure redescendra, par exemple pendant la nuit. L'inertie thermique influence donc surtout l'efficacité énergétique dans les climats demandant une climatisation de l'air intérieur et permettant une ventilation nocturne (Roucoult *et al.* 1999). L'analyse du transfert de chaleur au travers des murs extérieurs d'une construction unifamiliale dans un climat froid, comme celui de Québec, peut cependant se faire en régime permanent, considérant la prédominance du chauffage sur la consommation énergétique.

La convection est le transfert de chaleur occasionné par le déplacement des masses d'air ou de fluide. Une bonne étanchéité à l'air est la première étape permettant de réduire les pertes de chaleur par convection. Comme décrit au paragraphe 1.1.3.1, l'étanchéité à l'air est assurée par un pare-air continu autour de l'enveloppe et peut se mesurer par un test d'infiltrométrie du bâtiment. La convection peut aussi permettre un transfert de chaleur dans les espaces creux qui permettraient la circulation de l'air, transportant la chaleur de la paroi chaude vers la paroi froide. Dans les parois isolées, ce phénomène est enrayé en remplissant les espaces vides, comme la cavité entre les montants de l'ossature, d'une matière isolante (AEE 2003).

Les éléments chauds à l'intérieur d'un bâtiment émettent un rayonnement infrarouge. L'amplitude du transport de chaleur par rayonnement dépend des températures respectives du corps émetteur et du corps récepteur, et de l'émissivité de la surface des corps émetteur et récepteur. La principale perte de chaleur par rayonnement à travers une enveloppe de bâtiment se fait à travers les parois vitrées. C'est pourquoi la capacité des fenêtres à laisser entrer le rayonnement provenant du soleil, tout en limitant les pertes par rayonnement durant la nuit, a été, entre autres, longuement étudiée. D'autre part, il est possible d'utiliser un film réfléchissant sur l'ensemble des murs afin de réduire les pertes par rayonnement et ainsi augmenter légèrement la capacité isolante du mur. Pour être efficace, le film réfléchissant à faible émissivité, qui est souvent couplé au pare-vapeur, doit se trouver adjacent à une lame d'air (AEE 2003)

L'efficacité énergétique des bâtiments fait l'objet de plusieurs recherches étudiant l'impact des systèmes de chauffage et de climatisation, de différents systèmes constructifs, de la

géométrie ou de l'orientation des bâtiments (Biblis 2005, Dimoudi *et al.* 2004). Des études récentes ont aussi analysé l'influence de l'inertie thermique des parois sur des systèmes de climatisation passive utilisant la ventilation nocturne (Pfafferott *et al.* 2005, Fraisse *et al.* 2006), ainsi que l'effet de la finition intérieure sur l'humidité relative et la température intérieure (Hameury et Lundström 2004). De plus, l'efficacité énergétique des portes et des fenêtres et l'agencement de l'ensemble des éléments d'un système constructif ont un impact important sur l'efficacité globale de l'enveloppe mais ne seront pas étudiée dans le cadre de ce projet.

Le CNBC exige la présence d'un pare-air ainsi qu'une résistance thermique minimale des murs extérieurs permettant d'éviter la condensation dans les parois (CNRC 2005). De plus, le Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments du Québec requiert des résistances thermiques totales minimales pour chaque composant de l'enveloppe, incluant les murs extérieurs (L.R.Q. 2008). Le Code modèle national de l'énergie pour les habitations recommande des résistances thermiques effectives minimales (CNRC 1997), mais n'est pas adopté comme règlement officiel au Québec. Plus exigeants, les modèles de certification pour les constructions résidentielles Novoclimat et R-2000 demandent une étanchéité à l'air globale du bâtiment, ainsi que des niveaux de résistance thermique plus élevés (AEE 2003, CANMET 2005).

1.1.5 Performance acoustique

La performance acoustique est un critère de performance dont le minimum requis dépend de l'exigence de l'utilisateur, car aucune réglementation n'est en vigueur au Canada concernant les constructions unifamiliales. Dans les pays où la construction massive en béton est d'usage, les exigences sont habituellement plus élevées. De plus, certains environnements locaux, tel le voisinage d'aéroport, d'autoroute ou de voies ferrées, demandent une meilleure performance acoustique de l'enveloppe extérieure du bâtiment en raison du niveau élevé de bruit extérieur.

La performance acoustique à l'intérieur d'un volume dépend principalement de trois propriétés : l'atténuation du son provenant des volumes voisins, la réverbération du son à l'intérieur du volume ainsi que le niveau de bruit de fond dans le volume. La composition

des murs extérieurs d'un bâtiment résidentiel n'affecte cependant que l'atténuation des bruits extérieurs.

La capacité d'une paroi à réduire la transmission acoustique dépend grandement de la nature du bruit considéré. Ainsi, la plage de fréquences et la nature du son, en termes de bruits aériens ou de bruits d'impact, amènent des modes de transmission différents et par conséquent, des méthodes d'atténuation différentes. De plus, le fini de la paroi intérieure du mur peut aider à réduire la réverbération du son.

1.1.5.1 Atténuation des sons aériens

La transmission sonore à travers une paroi dépend de la fréquence du son transmis. La perte de transmission en décibel est habituellement évaluée en fonction d'une fréquence de bande de tiers d'octave de 125 Hz à 4 kHz. À partir des mesures en laboratoire pour des composants de bâtiments (murs, planchers, etc.), divers indices peuvent être calculés afin de définir un classement pour différentes constructions. Généralement, la transmission des sons aériens se mesure par un indice de transmission sonore (ITS) calculé selon la norme ASTM E413 (2004). Plus l'ITS est élevé, plus grande sera l'atténuation sonore (Warnock 2001). En plus de la transmission directe à travers une paroi, il est essentiel de considérer les transmissions indirectes afin de connaître la performance globale d'un système. Une étude sur les solutions pour réduire les transmissions indirectes dans les constructions légères en bois recommande l'utilisation de barres résilientes sous les panneaux de gypse, une dalle de plancher non-continue sous le mur ainsi que l'utilisation de murs séparateurs doubles (Nightingale et Mayr 2004, Nightingale *et al.* 2002, Quirt *et al.* 2003).

L'ITS n'est cependant pas suffisant pour le classement des éléments de façade extérieurs dont les sources de bruit sont principalement liées au domaine des transports. La capacité d'un mur extérieur à réduire la transmission de son aérien, tel que les bruits d'aéronefs ou du trafic routier, est plus spécifiquement mesurée par un indice de transmission extérieur-intérieur (OITC - Outdoor-Indoor Transmission Class index) utilisant un spectre de bruit extérieur incluant des fréquences allant de 80 à 4 000 Hz (ASTM 2003, Bradley 2004). Des indices OITC dérivés des essais sur le terrain et de mesures expérimentales sont disponibles dans la littérature pour différentes configurations standards de mur à ossature légère en bois (Bradley et Birta 2000). De plus, le projet de recherche IBANA a étudié la transmission des

bruits extérieurs pour les bâtiments à proximité des aéroports et développé un logiciel destiné à faciliter l'utilisation des résultats (Bradley *et al.* 2002). Selon ces mesures, une finition extérieure plus lourde, des montants plus espacés ainsi qu'un double panneau de gypse intérieur posé sur des barres résilientes, augmente grandement la performance acoustique d'un mur extérieur. Les conduits de ventilation et les fenêtres sont des éléments qui ont aussi une forte incidence sur l'isolation acoustique d'une enveloppe de bâtiment (Bradley et Birta 2000).

1.1.5.2 Atténuation des bruits d'impact

L'atténuation des bruits d'impact est quantifiée par un indice d'isolement aux bruits d'impacts IIC pour chaque composant et par un indice d'isolement aux bruits d'impacts sur le terrain FIIC pour un système de construction donné (Warnock 2001). Pour les constructions légères en bois, les principaux facteurs d'influence sont la densité et la dureté de la surface du plancher ainsi que le type d'assemblage, la présence et le type de sous-couche, le type et l'orientation des chevrons (Nightingale *et al.* 2002). L'influence d'un mur extérieur sur la transmission des bruits d'impact serait surtout liée à la continuité de la connexion entre ce mur et les planchers ainsi qu'à la dureté de la finition extérieure.

1.1.6 Impacts environnementaux

Évaluer l'impact réel des constructions sur l'environnement demeure un défi. Cette évaluation demande de comptabiliser l'ensemble des impacts de chaque matériau, technique de construction et type d'infrastructure, sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Le développement d'outils pour évaluer l'impact environnemental des bâtiments passe par différentes approches, choix de critères et techniques d'agrégation, comme l'indiquent différentes revues récentes (Ding 2008, Horvat et Fazio 2005, Lemaire 2006, Haapio et Viitaniemi 2006).

Trusty (2003) décrit trois niveaux d'évaluation de l'impact environnemental dans le domaine de la construction. Le niveau 1 permet de connaître l'impact environnemental direct d'un produit ou d'un matériau. Un outil tel que BEES[®] permet ainsi de comparer des produits entre eux (NIST 2007). Le niveau 2 évalue l'impact direct sur l'environnement d'un bâtiment ou d'un système de construction comme le permet le logiciel ATHENA[®] (Athena

2009). Dans une approche plus large, le niveau 3 tente de considérer l'impact global d'un bâtiment sur les plans environnemental, économique et social. Diverses certifications à travers le monde tentent ainsi de définir des critères de performance permettant de caractériser l'aspect écologique d'un bâtiment. Plusieurs d'entre elles visent la certification de constructions commerciales et institutionnelles comme LEED[®], HQE[®] en France, BREEAM[®] en Angleterre et BEPAC au Canada (HQE 2001, CaGBC 2009), alors que d'autres s'intéressent plutôt aux constructions résidentielles tels Novoclimat[®] et R2000[®] au Canada, Minergie[®] en Suisse et EcoHomes[®] en Angleterre (AEE 2003, BREEAM 2005, CANMET 2005, Minergie 2005).

Dans le cadre de cette étude, nous sommes plus particulièrement intéressés par les outils de niveau 2 permettant de quantifier les impacts directs sur l'environnement de bâtiments ou de systèmes de construction. Plusieurs outils, développés selon une approche d'analyse du cycle de vie (LCA - *Life cycle assessment*), sont disponibles dans différents pays, utilisant habituellement des données régionales, comme ATHENA au Canada, LEGEP en Allemagne ou EQUER en France (Athena 2008, Kohler *et al.* 2005, Peuportier 2009). Peuportier et Putzeys (2005) font la comparaison de neuf outils européens pour l'analyse d'une étude de cas dans le cadre du groupe de travail PRESCO.

Pour ce projet de recherche, nous utilisons le logiciel ATHENA[®] *Environmental Impact Estimator* qui utilise une approche LCA, car, comme il sera montré dans les prochaines sections, il semble l'outil le plus approprié pour évaluer l'impact environnemental des compositions de murs extérieurs par un concepteur de murs au Canada (Athena 2009).

1.1.6.1 Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (LCA), documentée par les normes ISO 14040 à 14044, est un procédé permettant de quantifier scientifiquement les impacts environnementaux d'un produit tout au long de sa vie, de l'extraction de la matière première à l'élimination finale en passant par toutes les phases de transformation et d'utilisation (ISO 2006, Jolliet *et al.* 2005). Cette analyse évalue la performance environnementale et se distingue du coût du cycle de vie (LCC) qui focalise plutôt sur l'aspect financier lié à la construction et l'entretien d'un bâtiment (Trusty 2003).

La LCA comprend quatre étapes: la définition des objectifs et du système, l'inventaire des émissions et des extractions, l'analyse de l'impact environnemental et l'interprétation (Jolliet *et al.* 2005). La définition du système nécessite d'identifier les limites du système étudié. Lors de l'utilisation d'un logiciel comme ATHENA, plusieurs limites du système sont définies lors du développement de l'outil et ne peuvent être modifiées par l'utilisateur. L'inventaire des émissions et des extractions utilisent des bases de données d'inventaire de cycle de vie (LCI) créées en analysant le cycle de vie de chaque matériau, source d'énergie ou procédé de transformation (Wilson 2005, Milota *et al.* 2005). Plusieurs bases de données de LCI sont en développement à travers le monde comme l'indique la revue établie par un groupe de travail de *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative* en 2006 (Curran 2006). Parmi celles-ci, Ecoinvent est un projet suisse qui tente de regrouper un ensemble de sources pour créer une base de données LCI centralisée (Althaus *et al.* 2007). La base de données LCI du logiciel ATHENA est moins large, mais, étant développée par l'industrie de la construction en Amérique du Nord, elle est la mieux adaptée à l'analyse de bâtiment au Canada (Athena 2008). L'analyse de l'impact environnemental est un domaine qui fait actuellement l'objet de plusieurs projets de recherches. Cette étape doit permettre de classer les émissions et de définir leurs impacts selon des catégories de dommage. Certaines études se concentrent sur la définition de ces catégories d'impact alors que d'autres cherchent à établir les facteurs de caractérisation permettant de définir l'influence de chaque émission sur ces catégories d'impacts. Plusieurs groupes d'experts travaillent avec *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative* sur des sujets complexes et difficiles tels que les impacts d'écotoxicité, la modélisation de l'impact des émissions de métaux, l'impact sur les ressources en eau douce, l'utilisation des terres, l'acidification, etc. (Hauschild *et al.* 2008, Hertwich *et al.* 2002, Bayart *et al.* 2009, Milà i Canals *et al.* 2007). Ainsi, dans le domaine de la construction, la considération de la distribution de ces impacts dans le temps doit se faire à l'aide d'une méthodologie adaptée, car ces impacts peuvent s'étaler sur plusieurs siècles, allant de la croissance de matériaux renouvelables à la fin de l'utilisation prolongée de certains bâtiments (Perez-Garcia *et al.* 2005). Finalement, l'interprétation des résultats doit se faire en fonction du système étudié et des limites établies. Les modèles d'analyse d'impact utilisés dans ce projet de recherche regroupent les impacts selon quatre indicateurs de dommage: l'impact sur la santé humaine,

la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et l'utilisation des ressources (Jolliet *et al.* 2004).

1.1.6.2 ATHENA™ *Environmental Impact Estimator*

Le modèle ATHENA® est un logiciel qui permet d'obtenir une évaluation LCA pour divers assemblages de matériaux de construction (bois, acier, béton) durant le cycle de vie du bâtiment. Le logiciel couvre l'ensemble des cycles de vie de chaque matériau allant de l'extraction de la ressource naturelle à la fin de la vie utile (*cradle-to-grave*), en considérant l'extraction, la transformation, la construction, l'entretien, le remplacement et l'élimination (Meil *et al.* 2006). L'énergie d'exploitation annuelle du bâtiment peut être ajoutée par l'utilisateur. Le logiciel la transforme en énergie primaire pour fournir une évaluation globale du bâtiment, incluant l'impact des énergies intrinsèque et d'exploitation.

Pour effectuer une analyse LCA, le logiciel nécessite que l'on identifie les différents éléments du bâtiment tels les murs, la toiture, les planchers, les fondations, les portes et les fenêtres. Il est entendu que les techniques de construction et matériaux utilisés doivent être présents dans la liste fournie, d'où l'importance d'une banque de données exhaustive. ATHENA permet de tenir compte des spécificités régionales de plusieurs villes au Canada et aux États-Unis, ou d'utiliser une moyenne américaine. Après analyse, le logiciel fournit une liste spécifiant les matériaux utilisés, les inventaires LCI comptabilisés ainsi qu'une agrégation des résultats à l'aide du modèle TRACI selon huit catégories d'impact intermédiaires: les effets respiratoires organiques et inorganiques, la destruction de la couche d'ozone, les changements climatiques, le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation, la consommation d'énergie primaire et le poids des ressources utilisées.

Selon Trusty (2003), une telle analyse scientifique devrait être intégrée aux systèmes de certification comme LEED® qui visent une évaluation globale de l'impact écologique d'un bâtiment (CaGBC 2004). En effet, les outils LCA permettent de quantifier les transferts venant et allant à la nature et offrent une analyse objective contrairement aux crédits de LEED® qui proviendraient plutôt de l'avis de spécialistes en environnement. Trusty (2003) donne des exemples de préjugés concernant les impacts environnementaux qui ne sont pas toujours basés sur des données scientifiques et dont l'impact réel dépend du contexte, tels

que la valorisation du contenu recyclé, l'achat de biens locaux ou l'influence des produits d'entretien. Les deux difficultés majeures pour ce qui est de l'intégration des LCA dans des systèmes d'évaluation d'impact global sont la disponibilité des banques de données LCI et l'absence de niveaux de référence pour juger les résultats LCA (Trusty et Horst 2002). La disponibilité des banques de données LCI s'améliore toutefois depuis la création de banques de données publiques dans divers pays, dont en Amérique du Nord. L'absence de niveaux de référence pour juger les résultats de l'étude est un problème plus complexe, car ces niveaux doivent être établis pour chaque type de bâtiment et selon plusieurs critères (Norris et Notten 2002). La définition de niveaux de références, ainsi que le développement de modèles d'agrégation des impacts, sont des sujets de recherche actuels, dont les apports permettent d'établir des bases vers l'obtention de consensus dans ce domaine.

1.1.7 Autres facteurs

Plusieurs autres facteurs sont à considérer dans la conception de murs extérieurs préfabriqués pour la construction résidentielle. Parmi ceux-ci, on peut citer les détails de conception pour faciliter la fabrication, le transport et l'assemblage sur le chantier, les considérations esthétiques, l'impact sur la qualité de l'air intérieur, le concept structural, la disponibilité des matériaux, etc. Malgré l'importance pour le concepteur d'intégrer ces éléments, le lecteur notera que ceux-ci dépassent le cadre de la présente étude.

1.1.8 Influence des composants sur la performance des murs

Le système constructif choisi et les composants utilisés sont les principaux facteurs influençant la performance en service des murs extérieurs. Il est évident que l'attention aux détails de construction lors de la mise en œuvre est aussi primordiale pour assurer une construction de qualité, mais ces détails n'auront que très peu d'influence si les matériaux choisis et leur agencement ne sont pas adéquats. Cette section décrit rapidement l'influence de chacun des composants sur la performance ainsi que les matériaux habituellement utilisés. Des compositions standards ont été définies à la suite de visites chez six fabricants de maisons usinées ou de composantes préfabriquées au Québec (Annexe 1), de façon à couvrir la diversité représentative des constructions de murs observées dans cette industrie.

Les composants du mur ont été divisés en cinq couches allant de l'extérieur vers l'intérieur du mur (figure 1.1), soit la finition extérieure, le panneau de revêtement intermédiaire incluant le pare-intempérie, l'ossature, l'isolation et la finition intérieure, incluant le pare-vapeur, auxquels s'ajoutent les portes et fenêtres intégrées dans le mur. Quelques propositions de systèmes constructifs innovants ont aussi été considérées. Finalement, des exemples d'interaction entre les différents aspects de la performance seront présentés.

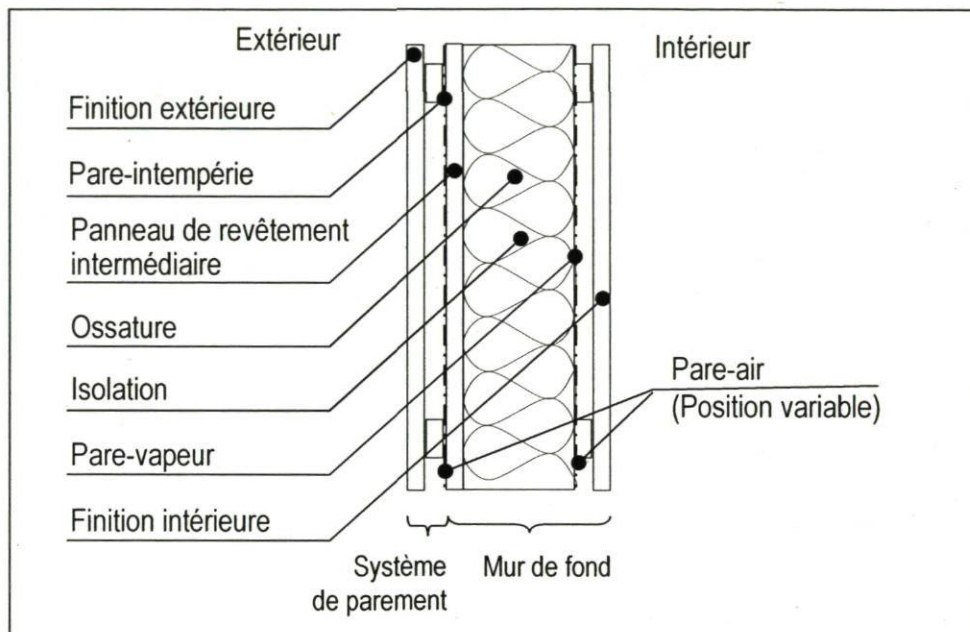


Figure 1.1 - Composition-type d'un mur à ossature légère en bois pour climat froid

1.1.8.1 Finition extérieure

La finition extérieure est la couche extérieure protégeant le bâtiment. Dans le mur à ossature légère, la finition extérieure protège le pare-intempérie contre les impacts et les rayons ultra-violets. Pour ce faire, elle doit être suffisamment robuste pour résister aux charges extérieures telles que coups, averses de pluie, de grêle et pressions du vent. Elle peut être fixée sur une fourrure verticale ou oblique posée sur les montants de l'ossature. Elle n'est pas considérée dans la résistance structurale du mur, quoique de récentes études ont indiqué l'influence d'une finition en stucco sur la résistance sismique (Taylor *et al.* 2003). Dans certains cas, elle peut aussi influencer la résistance au feu par sa capacité à limiter la propagation des flammes. La création d'une lame d'air derrière la finition extérieure crée un bris capillaire empêchant l'eau de pluie d'atteindre directement le pare-

intempérie, ce qui réduit significativement les risques d'infiltration. La finition extérieure doit cependant permettre l'écoulement et l'évaporation de l'eau qui pourrait s'accumuler dans cet espace. De plus, la ventilation de cette lame d'air influence la capacité de séchage du mur. La durabilité et la résistance à l'eau des matériaux influenceront aussi sa performance à long terme. La finition extérieure peut également influencer légèrement l'efficacité énergétique par sa capacité à absorber ou à réfléchir le rayonnement solaire et par la création d'une lame d'air protégée. Une finition extérieure composée d'un matériau plus lourd permet d'augmenter l'atténuation des bruits extérieurs, alors que les impacts environnementaux varient en fonction des matériaux utilisés et de l'entretien demandé. Finalement, le choix d'une finition extérieure affecte la facilité de mise en œuvre ainsi que l'esthétique d'un bâtiment, mais ces aspects ne seront pas discutés dans cette étude.

Selon les visites effectuées en usine, la finition extérieure peut être posée sur les panneaux des murs en usine ou montée sur le chantier. La difficulté de préfabrication est surtout liée au joint de montage et à la finition autour des ouvertures. Les matériaux couramment utilisés sont la brique, le revêtement de vinyle, le fibrociment, le bardage de bois et le parement composite à base de bois.

1.1.8.2 Panneau de revêtement intermédiaire et pare-intempérie

Le panneau de revêtement intermédiaire et le pare-intempérie, ou membrane de revêtement intermédiaire, ferment et protègent le mur de fond. De plus, l'utilisation d'un panneau structural assure la résistance en contreventement du mur. Si le panneau choisi ne peut remplir cette fonction, un autre système de contreventement devra être prévu. Qu'elle soit formée d'un panneau recouvert d'un pare-intempérie ou d'un panneau laminé, cette couche affecte grandement les transferts hygrothermiques dans le mur. D'une part, son étanchéité à l'eau sert à protéger l'intérieur du mur et, d'autre part, une éventuelle faible perméance à la vapeur pourrait réduire considérablement la capacité de séchage du mur (Teasdale-St-Hilaire et Derome 2005). Si cette couche a été choisie comme pare-air, sa propriété d'étanchéité à l'air et sa continuité diminueront les risques de condensation par exfiltration d'air humide et augmenteront l'efficacité énergétique du mur. D'une épaisseur moins importante que l'isolation principale, cette couche peut cependant fournir un apport d'isolation non négligeable et réduire les ponts thermiques causés par l'ossature. Le panneau

de revêtement intermédiaire affecte généralement peu la performance acoustique car sa masse n'est pas assez importante, mais il peut fournir la possibilité de créer un lien flexible entre la finition extérieure et l'ossature. Les impacts environnementaux varient en fonction des matériaux utilisés et de leur durabilité.

Des panneaux en contreplaqué, en OSB, en carton-fibre goudronné ou en polystyrène extrudé sont actuellement utilisés. Les pare-intempéries en matériau filé-lié en polyoléfine ayant une bonne perméance à la vapeur sont maintenant courant, mais le papier de construction (papier kraft goudronné) est toujours une option possible. Le pare-intempérie est posé sur le panneau lors de la fabrication du mur ou peut être déjà laminé sur celui-ci.

1.1.8.3 Isolation

Le rôle premier de l'isolation est d'améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment. En général, l'isolation se pose entre les montants de l'ossature et n'offre pas de résistance structurale. Certains matériaux isolants possèdent cependant une rigidité qui pourrait être utilisée, qu'ils soient placés du côté intérieur, du côté extérieur ou entre l'ossature. Le matériau utilisé peut parfois affecter la performance au feu ou être une source de substances toxiques en cas d'incendie. L'isolation affecte la variation du taux d'humidité relative en ralentissant le transfert de chaleur par conduction à travers la paroi. Simultanément, le taux d'humidité relative influence la teneur en humidité des matériaux d'isolation et peut affecter leur durabilité et leurs propriétés hygrothermiques (Derome 2000, Olutimayin et Simonson 2005). La présence d'isolation entre l'ossature permet aussi d'éviter la résonance dans des cavités vides, améliorant la performance acoustique d'un mur (Bradley et Birta 2000). L'isolation a une grande influence sur les impacts environnementaux car, d'une part elle occupe un important volume de la construction, et d'autre part elle détermine l'efficacité énergétique du bâtiment.

Le matériau d'isolation standard pour les murs à ossature légère en bois en Amérique du Nord est la laine de verre, car son prix est le plus avantageux. La laine de roche et la fibre de cellulose offrent une isolation acoustique supérieure et sont régulièrement utilisées en Europe et de plus en plus au Canada. Le polystyrène expansé, le polystyrène extrudé et la mousse de polyuréthane giclé sur place sont aussi utilisés pour certaines applications. La laine de chanvre, la paille, la laine de mouton et les mélanges terre-paille sont des

matériaux recommandés par les constructeurs écologiques, mais ne sont utilisés que sporadiquement. D'autres produits, tel que le panneau structural isolé, utilisés surtout dans la construction commerciale, pourraient éventuellement être envisagés.

1.1.8.4 Ossature

Structuralement, l'ossature doit supporter les charges verticales dues à la gravité ainsi que les pressions du vent perpendiculaires à son plan, en plus de servir de cadre rigide au panneau de contreventement. En cas de vent extrême, elle doit aussi reprendre les efforts de soulèvement créés par une surpression dans le bâtiment. Pour bien assurer sa fonction, elle doit être assemblée efficacement aux autres éléments du système structural. La résistance au feu et à la chaleur doit aussi être considérée, bien qu'elle soit de moindre importance si la finition intérieure offre la protection requise. L'ossature affecte le comportement hygrothermique du mur en créant un pont thermique par rapport à l'isolation. De plus, la susceptibilité du matériau à la présence d'eau peut affecter la durabilité du mur. Pour améliorer la performance acoustique, différentes dispositions de l'ossature peuvent réduire la transmission par contact direct. Les montants doubles ou placés en quinconce et des assemblages flexibles avec les autres éléments de structure sont recommandés. Cependant, ces configurations compliquent habituellement la mise en œuvre et peuvent réduire la résistance structurale. La trace environnementale des matériaux utilisés n'est pas négligeable considérant le volume représenté.

Dans le passé, l'ossature était souvent construite de sections de bois de 38 mm x 89 mm (2x4). L'accroissement des exigences en matière d'isolation thermique a cependant amené une utilisation standard de section de 38 mm x 140 mm (2x6) et même de 38 mm x 184 mm (2x8). L'ossature est habituellement formée d'une lisse basse fixée au plancher, de deux lisses hautes sur lesquelles repose l'étage supérieur et de montants espacés de 400 mm (16"). Cet espacement, qui doit suivre le format des panneaux pour faciliter la mise en œuvre, peut aussi être de 300 mm (12") ou de 600 mm (24"). De plus, ces dernières années, des montants métalliques, surtout utilisés dans la construction commerciale, ont fait leur apparition sur le marché résidentiel.

1.1.8.5 Finition intérieure et pare-vapeur

La résistance structurale de la finition intérieure n'assure généralement pas d'autre rôle que celui de fermer le mur et de protéger le film pare-vapeur. Cependant, s'il est adéquatement fixé à l'ossature, la résistance en contreventement du panneau utilisé peut parfois être considérée. Concernant la résistance au feu, la finition intérieure assure habituellement la protection nécessaire à la tenue en service de la structure pour la période demandée en cas d'incendie, donc cette propriété est d'une grande importance. La perméance à la vapeur d'eau de la finition intérieure et du pare-vapeur, combinée avec la capacité isolante et la perméance à la vapeur d'eau des autres éléments du mur, joue un rôle essentiel dans le comportement hygrothermique. Les compositions standards utilisées dans les climats froids intègrent l'utilisation du pare-vapeur du côté chaud afin de freiner la diffusion de l'humidité à travers le mur et prévenir l'atteinte du point de rosée lorsque la température diminue en traversant l'épaisseur de la paroi. De plus, si le panneau ou le pare-vapeur assure l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, la continuité doit être assurée. Le coefficient thermique du panneau, ainsi que l'utilisation d'un pare-vapeur réfléchissant, peuvent légèrement augmenter l'isolation thermique du mur. D'autre part, des études portent sur l'influence de la capacité thermique et hydrique de la finition intérieure sur l'ambiance intérieure en matière de confort thermique et d'humidité relative (Hameury et Lundstrom 2004, Hameury 2005). La masse du panneau intérieur, la flexibilité de son assemblage sur l'ossature et la présence d'un panneau absorbant affectent la transmission du son à travers la paroi. De plus, la propriété absorbante de la finition peut limiter la résonance de bruits intérieurs. Les matériaux, l'entretien et la durabilité de la finition intérieure sont à considérer dans les impacts environnementaux.

Plusieurs produits sont disponibles pour faire office de pare-vapeur. Ils se trouvent habituellement sous forme de film posé derrière la finition intérieure. Il peut s'agir d'un film de polyéthylène, de polyéthylène à bulle ou de papier kraft, seuls ou laminés d'un film aluminium. D'autres produits possibles sont un carton-fibre laminé d'un pare-vapeur métallisé ou une peinture à faible perméance appliquée minutieusement sur la finition intérieure.

La finition intérieure, souvent posée sur fourrure ou barres résilientes, peut prendre plusieurs formes. Le panneau de gypse cartoné est le plus courant. Il peut être posé sur le chantier, ou à l'usine avec finition sur le chantier. D'autres produits comme le bardage en bois ou les panneaux avec un fini en bois sont aussi utilisés pour certaines applications. Un nouveau produit composé de gypse et de fibres de cellulose prend rapidement de l'expansion en Europe.

1.1.8.6 Systèmes constructifs

Le système constructif d'un mur peut avoir un impact important sur sa performance en service. Même en ne considérant que la catégorie des murs à ossature légère, plusieurs variations du système peuvent intervenir. Une variation simple pourrait, par exemple, être l'ajout d'une couche isolante à l'extérieur du panneau de revêtement intermédiaire. Alors qu'un changement plus important serait la conception d'un système où toute l'isolation se trouverait du côté extérieur de l'ossature. D'autre part, outre les propriétés et la disposition de chacun de ses composants, la performance d'un mur dépend aussi de son intégration au système constructif global du bâtiment. Cette intégration est essentielle à plusieurs égards. Par exemple, elle permet de garantir un transfert adéquat des charges structurales du faîtage aux fondations et assure la continuité de l'étanchéité à l'air de toute l'enveloppe.

Les exigences grandissantes en efficacité énergétique pourraient aussi mener à l'élaboration d'un système plus élaboré dans la mesure où le bilan économique deviendrait intéressant. Par exemple, l'utilisation de mur épais en panneaux massifs de bois contrecollés, l'incorporation de matériaux à changement de phase ou la création d'une double enveloppe, dont l'espace intermédiaire serait tempéré par une source géothermique, pourraient être envisagées (Enertia® Building Systems 2005). Lors du développement de tels systèmes, il apparaît important de pouvoir vérifier leur comportement selon un ensemble des critères de performance.

1.1.8.7 Exemples d'interaction

Comme démontré précédemment, un mur à ossature légère est composé de plusieurs éléments. Le tableau 1.1 résume l'influence de chacun de ces éléments sur les critères de performance en service identifiés. Comme la plupart des éléments affectent plus d'un critère

de performance, il paraît essentiel de bien identifier ces interactions pour parvenir à un choix judicieux parmi les différents produits possibles.

Prenons comme exemple le choix d'un panneau de revêtement intermédiaire en OSB. Il est généralement utilisé pour assurer la résistance structurale en contreventement du mur, mais il influence aussi les propriétés hygrothermiques. En effet, sa faible perméance à la vapeur risque d'être la cause de condensation à l'intérieur du mur et d'une réduction de la capacité de séchage de celui-ci en cas d'infiltration d'eau (Teasdale-St-Hilaire et Derome 2005). Une analyse, incluant la capacité isolante de l'ensemble des éléments du mur ainsi que la perméance de chaque couche, pourrait permettre de reconnaître cette interaction.

De plus, ce panneau ne pouvant servir de pare-intempérie, il sera recouvert d'un film ayant une forte étanchéité à l'eau. Un film relativement perméable à la vapeur est souvent choisi, mais cette propriété semble avoir peu d'influence considérant la faible perméance du panneau. De surcroît, l'étanchéité à l'air et la continuité de ce film indiqueront s'il est nécessaire de s'assurer des propriétés pare-air et de la continuité de la finition intérieure. D'autre part, l'influence de l'eau et de l'humidité sur la dégradation de l'ensemble des matériaux montrera l'importance d'éviter une trop forte humidité dans la composition du mur. Finalement, les autres propriétés du panneau de revêtement intermédiaire, telles sa capacité isolante, sa masse et la flexibilité de son assemblage à l'ossature, sa trace environnementale, sa facilité de mise en œuvre ainsi que sa résistance au feu, modifieront aussi la performance globale du mur.

Un autre exemple concerne le type de finition extérieure utilisé. Si la masse de cette finition est suffisante pour assurer la performance acoustique voulue, le choix de la finition intérieure pourra se faire indépendamment de cette performance. Si, au contraire, le niveau de performance souhaité n'est pas atteint, une attention particulière devra être portée au choix de la finition intérieure et de son assemblage à l'ossature (Bradley *et al.* 2002).

Tableau 1.1 - Influence des composants sur les critères de performance

	Performance structurale	Performance au feu	Contrôle de l'humidité et durabilité	Isolation thermique et efficacité énergétique	Performance acoustique	Impacts environnementaux
Finition extérieure et lame d'air	<ul style="list-style-type: none"> ajout possible à la capacité structurale 	<ul style="list-style-type: none"> inflammabilité et propagation du feu 	<ul style="list-style-type: none"> capacité de séchage ventilation de la lame d'air 	<ul style="list-style-type: none"> protection de la lame d'air émissivité de surface 	<ul style="list-style-type: none"> masse flexibilité de l'assemblage sur l'ossature 	<ul style="list-style-type: none"> matériaux traitement entretien durabilité
Pare-intempérie et panneau de revêtement intermédiaire	<ul style="list-style-type: none"> résistance en contreventement (CV) soutien latéral des montants d'ossature 	<ul style="list-style-type: none"> résistance au feu 	<ul style="list-style-type: none"> perméabilité à la vapeur capacité de séchage étanchéité à l'eau résistance et durabilité étanchéité à l'air durabilité à l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> capacité isolante étanchéité à l'air capacité thermique 	<ul style="list-style-type: none"> masse flexibilité de l'assemblage sur l'ossature étanchéité à l'air 	<ul style="list-style-type: none"> matériaux traitement entretien durabilité
Ossature	<ul style="list-style-type: none"> résistance en CV résistance aux charges verticales et pressions du vent assemblage aux autres éléments de structure 	<ul style="list-style-type: none"> résistance au feu 	<ul style="list-style-type: none"> pont thermique pouvant mener au point de rosée durabilité à l'eau capacité de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> capacité isolante capacité thermique ratio de surface ossature/isolation. 	<ul style="list-style-type: none"> disposition (double mur, quinconce, etc.) assemblage aux autres éléments de structure 	<ul style="list-style-type: none"> matériaux traitement durabilité
Isolation	<ul style="list-style-type: none"> capacité structurale dans certains cas 	<ul style="list-style-type: none"> résistance au feu émersion de substances toxique en cas d'incendie 	<ul style="list-style-type: none"> perméabilité à la vapeur capacité de séchage étanchéité à l'eau durabilité étanchéité à l'air susceptibilité à l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> capacité isolante étanchéité à l'air capacité thermique diffusivité thermique 	<ul style="list-style-type: none"> capacité d'absorption du son 	<ul style="list-style-type: none"> matériaux traitement durabilité
Pare-vapeur et finition intérieure	<ul style="list-style-type: none"> capacité structurale de la finition intérieure 	<ul style="list-style-type: none"> résistance au feu émersion de substances toxique en cas d'incendie indice de propagation des flammes 	<ul style="list-style-type: none"> perméabilité à la vapeur étanchéité à l'air durabilité durabilité à l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> capacité isolante étanchéité à l'air capacité thermique diffusivité thermique capacité réfléchissante ou de rayonnement présence de lame d'air 	<ul style="list-style-type: none"> masse flexibilité de l'assemblage sur l'ossature capacité absorbante étanchéité à l'air 	<ul style="list-style-type: none"> matériaux entretien durabilité
Système constructif	<ul style="list-style-type: none"> résistance au CV résistance aux charges verticales et pressions du vent assemblage aux autres éléments de structure 	<ul style="list-style-type: none"> résistance au feu 	<ul style="list-style-type: none"> rapport de perméabilité à la vapeur entre les parois intérieure et extérieure capacité de séchage continuité du pare-air 	<ul style="list-style-type: none"> capacité de ventilation nocturne (été) incorporation de matériaux à changement de phase 	<ul style="list-style-type: none"> liaisons flexibles ne permettant pas la transmission acoustique directe et indirecte 	<ul style="list-style-type: none"> matériaux entretien efficacité énergétique

1.2 Analyse globale des systèmes constructifs

Les premiers projets de recherche explorant l'intégration de plusieurs facteurs dans la conception de bâtiment semblent liés à l'importance grandissante de l'efficacité énergétique au début des années 80. Cette préoccupation amène le développement de modèles multicritères d'analyse pour inclure, entre autres, la géométrie du bâtiment, la demande énergétique, l'apport de lumière naturelle, les coûts (Gero *et al.* 1983, D'Cruz et Radford 1987, Marks 1997). Plusieurs autres projets d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments ont suivi comme le décrivent Perez-Lombard *et al.* (2009) dans une récente revue qui soulève un besoin d'uniformiser le vocabulaire et les méthodes d'évaluation.

Dans la dernière décennie, une volonté de développer des outils d'évaluation globale du bâtiment se fait sentir. Que ce soit pour supporter les phases de conception, pour évaluer des bâtiments existants, ou pour jauger les possibilités de rénovation, plusieurs groupes de recherche ont développé des modèles d'évaluation permettant de considérer plusieurs critères de performance simultanément. Kalay (2001) explique que la complexité croissante de la conception d'un bâtiment liée à la diversification des spécialisations professionnelles génère de l'incompréhension dans le processus de conception et peut provoquer l'insatisfaction des utilisateurs face au produit fini.

Diverses solutions sont proposées pour supporter le processus de conception de différents types de bâtiment. Citherlet *et al.* (2001) et Citherlet et Defaux (2007) ont travaillé sur une approche multi-domaines liée à l'ambiance intérieure, la demande énergétique et, plus récemment, les impacts environnementaux, en tentant de considérer le cycle de vie du bâtiment. Soebarto et Williamson (2001) ont utilisé une approche d'aide à la décision multicritère pour évaluer la performance d'un bâtiment en le comparant à un bâtiment de référence selon un ensemble de critères. Nassar (2003) a élaboré un outil informatique pour effectuer une conception globale en sélectionnant la meilleure combinaison parmi différents sous-systèmes du bâtiment selon une approche AHP (*Analytical Hierarchy Process*), pour obtenir le meilleur compromis selon des critères définis par le concepteur. Shea *et al.* (2006) ont travaillé à un outil d'optimisation pour la conception d'enveloppe de bâtiment en utilisant une méthode MACO (*Multicriteria Ant Colony Optimization*). Caldas (2006) a

développé GENE_ARCH, un outil cherchant à optimiser des critères d'efficacité énergétique et de réduction d'impacts environnementaux. Diakaki *et al.* (2008) ont étudié la possibilité d'appliquer des techniques d'optimisation multi-objectifs pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Leurs conclusions montrent qu'il n'existe pas de solution optimale mais plutôt un meilleur compromis lorsque plusieurs facteurs environnementaux, énergétiques, économiques et sociaux sont considérés. D'autres études se sont concentrées sur les critères de conception affectant un sous-système en particulier, comme l'étude de système de plancher à base de bois (Hu *et al.* 2006).

La réalisation que les meilleures solutions sont souvent des compromis entre différents critères a amené plusieurs chercheurs à utiliser des modèles d'analyse multicritères, que ce soit des méthodes de programmation multi-objectifs (MOP), comme MACO, ou des outils d'aide à la décision multicritères (MCDA), comme ELECTRE, MAUT, ou AHP. Les méthodes MOP sont applicables dans les situations où les alternatives possibles sont implicites et dépendantes de contraintes pouvant être exprimées sous forme de fonctions mathématiques, alors que la MCDA s'applique aux problèmes multicritères de décision impliquant des solutions identifiées explicitement et que certains critères d'évaluation ne peuvent être exprimés par une fonction mathématique (Ehrgott et Wiecek 2005).

L'intérêt des méthodes d'analyse multicritères se retrouvent aussi dans des projets visant à comparer des stratégies de rénovation ou de mise à niveau de bâtiments ou de composants, comme par exemple le changement des fenêtres. Voici quelques exemples: le développement des méthodes COPRAS (Banaitiene *et al.* 2008, Kaklauskas *et al.* 2006) et EPIQR (Jaggs et Palmer 2000), ainsi qu'une étude de Rey (2004) utilisant ELECTRE III. L'application d'une méthodologie pour la rénovation d'écoles selon différents facteurs de confort a aussi montré l'impossibilité de maximiser tous les critères simultanément et l'apport possible d'une optimisation multicritère dans la recherche du meilleur compromis. (da Graca *et al.* 2007). Blondeau *et al.* (2002) sont arrivés à des conclusions semblables en utilisant les méthodes multicritère MAUT et ELECTRE pour sélectionner une stratégie de ventilation pour un bâtiment universitaire. De plus, Zavadskas *et al.* (2008) considèrent dans leur étude l'importance d'inclure l'intérêt social comme facteur d'évaluation

additionnel pour juger les scénarios possibles. Finalement, Ginevicius *et al.* (2008) ont utilisé six méthodologies multicritères pour évaluer des stratégies d'amélioration de l'isolation pour des bâtiments en Lituanie et concluent qu'il est important de comparer les résultats obtenus selon différentes méthodes.

Plusieurs modèles ont été développés dans le but d'évaluer ou de comparer la qualité de bâtiments existants. Ces modèles sont habituellement développés pour évaluer des types spécifiques de bâtiment. Souvent utilisés comme outil de certification, ces modèles intègrent un ensemble plus ou moins exhaustif de critères de performance et des méthodes d'agrégation allant de relativement simplistes à plus élaborées. Par exemple, ORME (*Office building Rating Methodology for Europe*) est une méthodologie multicritère développée avec la procédure d'agrégation ELECTRE pour classifier ou ranger des bâtiments selon une liste de critères. Elle a été appliquée à l'évaluation d'immeubles à bureaux existants, à la comparaison de différentes propositions de rénovation de bâtiment, et à l'intégration du confort et de la santé des occupants dans les paramètres d'évaluation (Roulet *et al.* 2002, Roulet *et al.* 2006).

La préoccupation grandissante concernant l'environnement, et la part importante des impacts environnementaux attribuables à l'industrie du bâtiment, ont résulté en une emphase sur de nouveaux critères environnementaux pour l'évaluation des bâtiments. Ainsi plusieurs outils d'évaluation ont été développés pour reconnaître cette nouvelle préoccupation. Tous ces outils sont des approches multicritères car ils considèrent tous un ensemble de critères environnementaux, auquel s'ajoutent parfois d'autres critères (Lemaire 2006). Lors d'une revue des outils européens d'évaluation de l'impact environnemental des bâtiments, Peuportier et Putzeys (2005) concluent à l'importance d'utiliser des données d'inventaire complètes et transparentes, et ils soulèvent la nécessité de mieux documenter l'agrégation et le choix des indicateurs d'impact. Allant encore plus loin, Ding (2008) en arrive à la conclusion que les outils existants sont incomplets et que l'aide qu'ils peuvent apporter au processus de conception est limitée, car ils ne tiennent pas compte de l'ensemble des critères et négligent une étude approfondie du processus d'agrégation ainsi que du poids relatif accordé à chaque critère.

Il est vrai que la science des études environnementales est relativement récente et évolue rapidement depuis la mise en place d'une norme ISO relative à l'analyse du cycle de vie (ISO 2006, Jolliet *et al.* 2005). Les efforts de la communauté scientifique portent sur plusieurs aspects car il est important d'alimenter ces analyses par des bases de données fiables, transparentes et adaptées géographiquement (Althaus *et al.* 2007, Norris et Notten 2002, Puettmann et Wilson 2005), de caractériser chaque émission pour définir son influence sur les différents impacts environnementaux (Bayart 2008), de développer des modèles d'évaluation permettant de mettre en place des indicateurs d'impact pertinents, et de s'assurer que les processus d'agrégation soient adaptés et scientifiquement justifiables (Jolliet *et al.* 2004, Pennington *et al.* 2004, Rabl *et al.* 2007, Rosenbaum *et al.* 2008, Stewart et Jolliet 2004). Il semble donc difficile d'avoir à ce jour des modèles d'évaluation environnementale des bâtiments complets, alors que la science même de l'évaluation des différents impacts de l'activité humaine sur l'environnement est en plein développement.

Trusty (2003) classe l'évaluation de l'impact environnemental dans le domaine de la construction selon trois niveaux. Les deux premiers cherchent à évaluer l'impact direct sur l'environnement, soit d'un produit ou matériau, ou d'un bâtiment ou un système de construction. Ces deux premiers niveaux s'appuient directement sur le développement de l'analyse du cycle de vie et évoluent rapidement avec celle-ci. Plus globalement, le troisième niveau veut promouvoir une vision de développement durable qui, en plus de considérer simultanément plusieurs aspects des impacts environnementaux, tente d'inclure des facteurs sociaux et économiques. Cherchant à définir des indices d'évaluation globaux, ces modèles de certification, comme BREEAM[®] et LEED[®], sont souvent controversés. Ils proposent cependant de premières ébauches importantes jetant des assises pour le développement d'un nouveau domaine d'étude en constante évolution.

Étudiant les constructions résidentielles, Horvat (2005) présente une étude comparative des programmes de certification existants à travers le monde. Des systèmes d'évaluation comme P-mark (Suède), HQAL (Japon), ETAG007 (Europe), Energy Star (États-Unis), R-2000 (Canada) et Novoclimat (Québec) cherchent à assurer la qualité de conception et de fabrication des maisons résidentielles. Kim *et al.* (2005) proposent aussi un modèle

d'évaluation pour les bâtiments collectifs en Corée avec une agrégation utilisant AHP. Relativement prescriptifs, ces programmes définissent des critères devant être remplis et des essais sur le produit fini afin d'assurer la qualité de la fabrication. Ces certifications, en dépassant les exigences minimales des codes du bâtiment, permettent aux constructeurs de faire reconnaître la qualité de leurs constructions selon divers critères (Horvat et Fazio 2005, Anon 2005). Il semble cependant que ces systèmes de certification offrent peu d'alternatives permettant de modifier une composition de mur standard en indiquant l'influence de cette modification sur l'ensemble de sa performance. Ils paraissent conçus pour prescrire une méthode existante et non pour offrir un outil permettant d'explorer d'autres approches. Le logiciel Dämmwerk (Allemagne) permet l'évaluation selon différents critères dans un contexte géographique donné, mais ne permet pas d'agréger ces évaluations selon le contexte socioculturel et climatique (KERN 2005). En Autriche, la banque de données Dataholz fournit des évaluations de compositions de murs typiques selon des aspects comme la résistance thermique, la performance acoustique, ou l'impact environnemental. Il est cependant difficile d'identifier comment ces indices ont été calculés et aucun modèle d'agrégation n'est proposé (ProHolz 2003).

A la suite d'une constatation reconnaissant certains problèmes de performance d'enveloppe à ossature en bois ainsi que les possibilités limitées permettant l'évaluation globale de ce type d'enveloppe, Horvat (2005) élaborait un protocole d'évaluation globale de l'enveloppe des bâtiments à ossature légère, avec une emphase particulière sur la durabilité et la gestion de l'humidité. Le protocole, développé pour la région montréalaise, est très détaillé et permet de vérifier la qualité de construction selon un ensemble de détails constructifs allant de la conception à l'utilisation du bâtiment. Il ne permet cependant pas l'étude ou la considération de systèmes de construction améliorés en tenant compte des contextes de préfabrication et d'utilisation. Suite à ce travail, une étape logique semble être le développement d'outils d'analyse permettant de comparer le rendement global de sous-systèmes, comme les compositions de mur extérieur, afin de supporter la sélection des configurations les mieux adaptées à une situation donnée.

L'analyse de la littérature indique qu'il y a effectivement un besoin d'intégrer plusieurs critères de performance dans une analyse globale des bâtiments que se soit pour supporter un processus intégré de conception, comparer des stratégies de rénovation ou simplement évaluer des bâtiments existants. En effet, la considération de nouvelles attentes comme une efficacité énergétique accrue, un confort acoustique, et une réduction des impacts sur l'environnement, complexifie l'analyse des bâtiments. La recherche de solutions innovantes permet de bâtir une nouvelle expertise dans ce domaine. Ces premières recherches explorent différents critères et semblent confirmer l'intérêt d'utiliser les méthodes d'aide à la décision multicritère pour structurer le processus et agréger les évaluations mesurées pour chacun des critères. Certains projets ont considéré l'ensemble d'un bâtiment en restant assez général, alors que d'autres étudient plus en détail un aspect spécifique du bâtiment comme la ventilation, les planchers ou la rénovation des fenêtres. Quoiqu'un modèle global d'analyse du bâtiment semble un but à atteindre, les modèles développés à ce jour sont souvent controversés parce qu'incomplets. De plus, peu de modèles permettent d'intégrer les préférences du décideur dans la recherche du meilleur compromis. Contrairement à un problème d'optimisation pure, comme la recherche de la forme structurale la plus adaptée pour minimiser l'utilisation de matière première (Greiner *et al.* 2006), la conception d'un bâtiment ou de ses sous-systèmes, tels les murs extérieurs ou les planchers, demandent des compromis qui doivent souvent faire intervenir les préférences de l'utilisateur.

Nous pensons que le développement d'un processus global devrait s'appuyer sur de solides bases impliquant une analyse multicritère approfondie de chacun des sous-systèmes impliqués. Chaque sous-système, par exemple les murs extérieurs, demande une analyse détaillée prenant en compte ses spécificités afin d'inclure les différentes solutions constructives envisageables. Parallèlement, les avancées de la recherche dans chacun des champs d'expertise permettent une meilleure évaluation des comportements selon chacun des critères pour fournir l'information essentielle à une solide analyse multicritère de chacun des sous-systèmes. C'est dans cette optique que nous avons travaillé au développement d'un modèle d'analyse multicritère adapté aux constructions de murs à ossature bois, sous-système qui ne semble pas avoir été étudié en profondeur dans cette perspective.

La recherche d'une évaluation globale d'un système aussi complexe qu'un bâtiment doit pouvoir utiliser des outils lui permettant de bien intégrer chacun des sous-systèmes. Dans les modèles analysés, il est impossible d'identifier les détails de conception qui peuvent avoir une grande importance dans un sous-système précis parce que ceux-ci se perdent dans la masse d'une évaluation trop générale. Ainsi, le présent projet de recherche cible particulièrement un sous-système, celui des murs extérieurs à ossature légère en bois, en identifiant les critères de performance importants et les méthodes d'évaluation appropriées se rapportant à ce sous-système. Cette structure peut ensuite devenir une information pertinente dans l'évaluation du système global de la construction préfabriquée.

Chapitre 2 - Cadre conceptuel de l'étude

2.1 Objectifs

L'objectif général de ce travail de recherche consiste à développer un cadre d'analyse multicritère pour permettre à un concepteur d'évaluer et de comparer différentes compositions de mur à ossature légère en bois en considérant simultanément plusieurs critères de performance dans un contexte climatique, culturel et socio-économique donné.

Les principaux objectifs spécifiques poursuivis par cette étude sont :

- 1 - Structurer la situation décisionnelle permettant d'une part d'assurer la conformité aux contraintes de conception et d'autre part de comparer les compositions de murs entre elles selon les critères de performance adaptés à l'évaluation des murs préfabriqués en ossature légère en bois.
 - a. Identifier et classier les attributs permettant d'évaluer et de comparer la performance en service de compositions de mur à ossature légère en bois.
 - b. Développer un exemple d'application comparant la performance de cinq compositions de mur à ossature en bois utilisées dans un bâtiment résidentiel à Québec en fonction des techniques de construction et des matériaux actuellement disponibles.
 - c. Identifier les modes d'évaluation et seuils minimaux exigés par les codes du bâtiment pour les contraintes de conception identifiées dans le cadre étudié et vérifier l'acceptabilité des compositions suggérées pour l'exemple d'application.
 - d. Sélectionner les outils permettant de quantifier le niveau de rendement d'une composition de mur selon les critères de performance définis et les utiliser pour évaluer les compositions de l'exemple d'application.
- 2 - Approfondir l'évaluation des impacts environnementaux par une analyse du cycle de vie de l'exemple d'application et évaluer la possibilité d'utiliser un critère unique de

performance environnementale en comparant les indicateurs de dommages proposés par trois méthodes d'analyse d'impact dans le contexte étudié.

- 3 - Évaluer l'applicabilité de différentes procédures d'agrégation multicritères pour la comparaison de la performance globale de compositions de murs en tenant compte de l'évaluation des alternatives selon les différents critères identifiés ainsi que du contexte décisionnel, incluant l'environnement physique et les préférences du décideur.

2.2 Matériel et méthodes

Le développement du cadre d'analyse multicritère permettant de considérer simultanément un ensemble de critères de performance pour évaluer et comparer différentes compositions de mur à ossature légère en bois dans un contexte donné s'est fait en plusieurs étapes. Dans un premier temps, une analyse de la situation décisionnelle a permis d'explorer les contextes de fabrication et d'utilisation des murs à ossature bois et d'identifier un ensemble d'attributs permettant d'évaluer la performance globale d'un mur. Deuxièmement, le développement d'un exemple d'application dans un contexte québécois a permis d'identifier et d'évaluer les contraintes de conception exigée par la réglementation dans ce contexte. Troisièmement, pour chaque critère de performance, une méthode d'évaluation et une échelle de mesure ont été choisies pour permettre l'évaluation des différentes alternatives de mur. Lors de cette étape, une attention particulière a été portée à l'évaluation de la trace environnementale qui est un champ d'étude relativement récent. Finalement, quatre procédures d'agrégation multicritère ont été explorées pour permettre un rangement global des alternatives considérées en intégrant les préférences d'un éventuel preneur de décision.

2.2.1 Analyse de la situation décisionnelle

La situation décisionnelle étudiée implique le choix d'une composition de mur à ossature légère en bois considérant simultanément un ensemble de critères de performance et adapté au contexte et aux préférences du décideur. L'analyse de cette situation décisionnelle a commencé par une collecte de données, qui ont ensuite été intégrées dans une modélisation de la situation pour identifier les aspects de la performance à considérer.

2.2.1.1 Collecte de données

La démarche de modélisation de cette situation décisionnelle a débuté par une exploration des murs préfabriqués à ossature légère en bois au Québec. La visite de six usines de préfabrication de maisons ou de composantes a permis d'identifier les compositions standards de mur. De plus, les rencontres avec les fabricants ont permis de discuter de leurs principales préoccupations et de l'évolution de la demande quant à la performance en service de l'enveloppe extérieure des bâtiments résidentiels. L'identification des usines visitées et les sujets de discussion abordés sont présentés à l'annexe 1. Cette collecte de données a été complétée par une revue de la littérature scientifique et de la documentation technique de produits en Amérique du nord et en Europe, ainsi que par la participation à des colloques scientifiques, des cours spécialisés, et des séminaires techniques sur les certifications Novoclimat (AEE 2003) et LEED (CaGBC 2004). Cette première étape avait plusieurs buts: examiner les constructions résidentielles standards en bois; explorer les possibilités de nouveaux matériaux ou systèmes de construction; identifier les enjeux en ce qui concerne la performance en service des murs extérieurs à ossature légère en bois; et déterminer l'influence de chaque composante du mur sur les différents aspects de cette performance.

2.2.1.2 Identification des critères de performance

Les informations recueillies ont ensuite été intégrées à une modélisation de la situation décisionnelle pour organiser les buts visés par l'utilisation d'un mur extérieur et identifier les caractéristiques de performance à considérer. Cette modélisation, présentée à la section 3.3, a été faite à l'aide d'une approche de modélisation multi-objectifs proposée par Keeney (1992). Ce processus de modélisation a permis d'identifier un ensemble d'attributs mesurables liés à la performance d'un mur extérieur et directement influencés par le choix de sa composition. Ces attributs ont ensuite été divisés en deux groupes: les contraintes de conception devant être remplies pour qu'un mur soit jugé acceptable, et les critères de performance permettant de comparer plusieurs murs entre eux.

2.2.2 Développement d'un exemple d'application et évaluation des contraintes de conception

Un exemple d'application a été développé afin de fournir des bases concrètes à cette analyse globale. Comme ce projet de recherche est une première exploration cherchant à supporter le développement d'un outil global de conception, il a été décidé d'étudier une application dans un contexte connu. L'exemple d'application, décrit au chapitre 3 (section 3.4), cherche donc à comparer cinq compositions de murs à ossature légère en bois pour un bâtiment résidentiel situé à Québec. Le choix des compositions est basé sur une volonté de comparer différents murs standards, ainsi que des systèmes intégrant des produits innovants.

Suite à la définition de l'exemple d'application, la première étape consistait à vérifier que les cinq compositions de murs à ossature légère en bois définies comme alternatives possibles respectaient les contraintes de conception. Lors de la modélisation de la situation décisionnelle, six contraintes de conception avaient été identifiées comme étant directement liées à la composition du mur: la résistance des montants aux charges combinées, la résistance en contreventement du mur, la performance au feu, la résistance thermique minimale, la perméance à l'air minimale et les mesures obligatoires de gestion de l'humidité. Les exigences de la réglementation en vigueur concernant ces contraintes de conception pour le contexte étudié ont été vérifiées en consultant le CNBC (CNRC 2005), la norme de calculs des charpentes en bois (CAN/CSA-O86-01 2005), le Guide d'ingénierie pour les constructions à ossature bois (CWC 2004) et le Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments du Québec (L.R.Q. 2008). La section 3.5 présente en détail chacune des contraintes en identifiant les méthodes d'évaluation et les niveaux de rendement utilisés. La géométrie du bâtiment considéré pour l'exemple d'application et les détails de calculs concernant la vérification des contraintes de conception sont présentés à l'annexe 2.

2.2.2.1 Résistance des montants aux charges combinées

Le calcul de la résistance des montants d'ossature aux charges combinées a impliqué la définition des charges permanentes, d'utilisation, de neige, de vent et de séisme pour l'exemple d'application (CNRC 2005, section 4.1). Les contraintes axiales et de flexion

déterminées en fonction des charges pondérées ont ensuite été comparées aux valeurs de résistance des montants en fonction de la dimension, de l'essence et de la classe de bois (CAN/CSA-O86-01 2005, art. 5.5).

2.2.2.2 Résistance en contreventement du mur

La norme CAN/CSA-O86 fournit des valeurs de résistance en contreventement pour différentes configurations de murs de cisaillement, variant selon le type de panneau et le nombre de connecteurs (CAN/CSA-O86-01 2005, art. 9.5). Toutefois, comme l'exemple d'application est un bâtiment relativement petit situé dans une zone où les charges latérales sont limitées, la méthode simplifiée prescrite dans le guide d'ingénierie pour les constructions à ossature bois a pu être utilisée pour déterminer la longueur de mur nécessaire (CWC 2004). Les autres exigences relatives à la résistance en contreventement d'un mur, comme la présence d'ancrage de retenue, n'ont pas pu être vérifiées car elles ne dépendaient pas directement du choix de la composition du mur.

2.2.2.3 Performance au feu

Les valeurs de résistance au feu des compositions de mur à ossature bois étudiées, fournies par le CNBC (CNRC 2005, A-9.10.3.1), ont été comparées aux exigences du Code (CNRC 2005, art. 9.10.8)

2.2.2.4 Résistance thermique minimale

La résistance thermique totale de chaque composition de mur a été comparée aux exigences du Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments du Québec (L.R.Q. 2008, art. 34). La résistance thermique totale du mur a été calculée en additionnant les résistances thermiques de chacune des couches de la composition. La résistance thermique de chaque couche était fournie pour un produit donné ou devait être calculée en multipliant la résistivité thermique du matériau par son épaisseur. Les valeurs de résistance thermique calculées selon les informations fournies par différentes sources ont été comparées pour permettre un choix éclairé des valeurs utilisées dans cette étude (annexe 5). L'effet des ponts thermiques de l'ossature a aussi été intégré pour obtenir la résistance thermique effective du mur. La méthode utilisée considère des flux de chaleur parallèles et utilise le pourcentage de la surface du mur opaque occupée par l'ossature de bois. Cette méthode est

considérée acceptable pour calculer l'effet des ponts thermiques créés par une ossature en bois (ASHRAE 2005, chap.25, AEE 2003). L'étude d'une disposition probable des montants a permis de déterminer le pourcentage de la surface occupée par l'ossature de bois pour chaque mur de l'exemple d'application. Le calcul détaillé des résistances thermiques totales et effectives est présenté à l'annexe 5.

Le CNBC exige une résistance thermique minimale des murs extérieurs permettant d'éviter de la condensation du côté chaud du mur, et de maintenir des températures intérieures convenant à l'usage prévu (CNRC 2005, art. 5.3.1.2). Ces deux exigences ont été considérées comme moins restrictives que celle du Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments du Québec.

2.2.2.5 Perméance à l'air minimale

Il a été vérifié que toutes les compositions de murs envisagées comprenaient un matériau dont la perméance à l'air respectait l'article 5.4 du CNBC (CNRC 2005), qui demande qu'un système d'étanchéité à l'air soit présent autour de l'enveloppe du bâtiment et prescrit l'étanchéité à l'air du matériau pare-air.

2.2.2.6 Mesures obligatoires de gestion de l'humidité

Les autres mesures obligatoires prescrites par le CNBC (CNRC 2005) concernant la gestion de l'humidité pour une construction à ossature légère en bois ont été identifiées et vérifiées. Celles-ci comprennent la teneur en eau maximale du bois de construction (art. 9.3.2.5), la présence d'un pare-pluie (art. 9.27), la présence d'un pare-vapeur du côté chaud de la paroi (art. 9.25.4). De plus, l'article 5.3.1.2 demande de réduire au minimum la condensation à l'intérieur de la paroi. Les courbes d'humidité relative et de température dans la paroi ont été calculées en régime permanent pour chaque mur selon la méthode du point de rosée, afin de s'assurer que l'humidité relative restait en dessous de 100% à la température de conception (ASHRAE 2005, chap.23). L'annexe 2 montre le détail de ces calculs.

2.2.3 Évaluation des critères de performance

Les contraintes de conception ayant été identifiées et vérifiées, les alternatives pouvaient ensuite être évaluées selon des critères de performance additionnels. La modélisation de la

situation décisionnelle avait identifié six critères de performance pouvant permettre la comparaison de compositions de mur à ossature légère en bois: la gestion de l'humidité, l'atténuation de la transmission sonore, le coût de construction, le coût d'entretien, le coût de chauffage et de climatisation, et les impacts environnementaux. L'étude des notions fondamentales de chacun de ces champs d'expertise a permis de sélectionner des outils d'évaluation et de définir des échelles de mesures.

2.2.3.1 Gestion améliorée de l'humidité

L'étude de la gestion améliorée de l'humidité dans le développement du cadre d'analyse multicritère est présentée à la section 3.6.1. Le logiciel de simulation du transport de la chaleur et de la masse WUFI 4.1 a été choisi pour simuler les profils dynamiques de températures et d'humidité relative à l'intérieur de la paroi (WUFI 2007). Ce logiciel permet de considérer des lames d'air ventilées ainsi que des infiltrations d'eau de pluie dans la composition de la paroi. Les propriétés de la majorité des matériaux utilisés dans l'exemple d'application étaient disponibles dans la base de données nord-américaine du logiciel, provenant, entre autres, du rapport ASHREA RP-1018 (Kumaran 2002), et de publications de NIST et de l'ONRL (WUFI 2007). Des approximations ont cependant été nécessaires pour définir les propriétés de certains produits, tels que le parement de vinyle, le parement en bois et le panneau en carton-fibre laminé d'un film d'aluminium. L'ensemble des propriétés utilisées, ainsi que les paramètres de simulation, sont définis à l'annexe 3.

Pour chaque composition de mur, deux simulations, utilisant les données climatiques disponibles pour Québec, ont été faites. La première simulation considérait des conditions normales alors que la deuxième incluait une entrée accidentelle d'eau de pluie dans la cavité entre les montants. Pour chaque cas, trois années de simulation étaient nécessaires pour établir des conditions initiales réalistes et pour permettre d'observer une éventuelle accumulation annuelle d'humidité dans la paroi. Suite aux simulations, les profils d'humidité relative et de température ont été observés pour trois positions dans l'épaisseur de la paroi. La position entre la face intérieure du panneau de revêtement intermédiaire et la cavité isolée a ensuite été retenue pour la suite des analyses car elle présentait les plus hauts taux d'humidité relative.

Pour permettre d'interpréter les profils de température et d'humidité relative obtenus, les niveaux d'humidité de référence utilisés par la norme BSR/ASHRAE Standard 160P ont été retenus (ASHRAE 2006). Ainsi, il a été décidé d'évaluer la gestion de l'humidité dans le mur en utilisant les moyennes maximales d'humidité relative sur des périodes de 24h, 7 jours et 30 jours, lorsque la température de surface se situe entre 5°C et 40°C. Les courbes calculées selon ces moyennes sont présentées à l'annexe 3. Par la suite, une échelle de rendement allant de 0 à 5 a été créée considérant ces valeurs d'une part sous conditions climatiques normales, et d'autre part incluant une infiltration d'eau accidentelle dans la cavité intérieure du mur.

2.2.3.2 Atténuation des bruits aériens

Comme décrit à la section 3.6.2, les indices OITC permettant d'évaluer la capacité des murs extérieurs à atténuer les bruits aériens ont été estimés à partir de valeurs fournies dans la littérature (Bradley et Birta 2000).

2.2.3.3 Coût de construction

Les coûts de constructions ont été évalués à l'aide du répertoire nord-américain des coûts de constructions RSMMeans (2007) et vérifiés à l'aide de données fournies par deux entreprises locales de préfabrication. L'annexe 4 présente la comparaison des coûts des différentes sources et le calcul des coûts de construction incluent les matériaux et la pose, alors que la section 3.6.3 discute les résultats obtenus.

2.2.3.4 Coût d'entretien

Les coûts d'entretien ont été estimés en considérant la durée de vie des matériaux selon les certificats de garantie disponibles pour les produits commerciaux équivalents aux matériaux considérés. Les coûts de remplacement des matériaux proviennent du répertoire nord-américain des coûts de constructions RSMMeans (2007). Comme discuté à la section 3.6.4, aucun coût d'entretien n'a été comptabilisé pour l'analyse considérant une période de 20 ans.

2.2.3.5 Coût de chauffage et de climatisation

En plus de vérifier le respect de la contrainte de conception portant sur la résistance thermique minimale (section 2.2.2.4), le calcul de la résistance thermique de chaque composition a permis d'estimer la portion des coûts de chauffage annuels directement influencée par la composition du mur extérieur. Comme décrit à la section 3.6.5, le calcul de la résistance thermique effective a impliqué le choix des résistances thermiques pour chaque matériau parmi les valeurs obtenues selon différentes sources, l'addition des différentes couches et la considération des ponts thermiques causés par l'ossature en bois. La perte de chaleur annuelle a ensuite été estimée par un calcul en régime permanent utilisant la valeur de degré-jour sous 18°C fournie par Environnement Canada selon les données climatiques de la région étudiée (EC 2008). Le résultat de ce calcul a été validé par une analyse d'un bâtiment complet à l'aide du logiciel HOT-2XP. Les coûts de chauffage pour une période donnée ont ensuite été calculés en considérant un chauffage électrique. Le calcul tient compte d'une actualisation des coûts annuels selon la méthode prescrite par le Code modèle national de l'énergie pour les habitations (CNRC 1997, Annexe F). Considérant le climat froid de Québec, aucun coût de climatisation n'a été considéré dans cet exemple. Les calculs détaillés concernant les coûts de chauffage, décrits à la section 3.6.5, sont présentés à l'annexe 5.

2.2.3.6 Impacts environnementaux

L'étude des impacts environnementaux s'est faite selon une approche d'analyse du cycle de vie, telle que définie par la norme ISO 14040 (2006) et décrite par Joliet *et al.* (2005). Cette étude a utilisé le logiciel ATHENA *environmental impact estimator* et elle a été réalisée en deux étapes.

Dans un premier temps, les impacts environnementaux de différentes compositions ont été comparés uniquement en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Dans cette première phase, décrite à la section 3.6.6, les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction des murs extérieurs et l'énergie d'opération ont été calculées à l'aide du logiciel ATHENA 3.0.3 (2004).

Dans un deuxième temps, une étude plus approfondie, présentée en détail dans le chapitre 4, a permis de comparer différents indicateurs d'impact environnemental pour permettre un choix plus éclairé de l'indice environnemental utilisé dans le cadre d'analyse multicritère. Cette étude approfondie comprenait quatre étapes: la définition du système étudié, la comptabilisation des inventaires de cycle de vie (LCI), l'agrégation selon différents indicateurs d'impact environnemental et l'interprétation des résultats. Suite à l'identification des limites du système étudié, une modélisation dans ATHENA 4.0.51 (2009) a comptabilisé les inventaires de cycle de vie liés aux murs extérieurs et à l'énergie d'opération. Les résultats obtenus ont ensuite été agrégés en indicateurs d'impact de niveau intermédiaire et en indicateurs de dommage selon trois méthodes d'analyse d'impact environnemental (LCIA): TRACI, IMPACT 2002+ et Eco-indicateur 99. Les indicateurs intermédiaires de TRACI ont été calculés à l'aide du logiciel ATHENA 4.0.51. Pour le calcul des indicateurs intermédiaires des deux autres LCIA, les résultats LCI ont été agrégés à l'aide de tableurs en utilisant les facteurs de caractérisation, fournis par chacune des méthodes, pour chaque substance émise. Les indicateurs intermédiaires ont ensuite été agrégés en indicateurs de dommage à l'aide de tableurs selon les facteurs proposés par IMPACT 2002+ et Eco-indicateur 99. L'ensemble des indicateurs, calculés pour les cinq murs de l'exemple d'application, ont été comparés selon les trois méthodes LCIA pour définir un indice environnemental pouvant être utilisé dans l'analyse multi-critère.

Les différents composants utilisés dans chaque mur ont aussi été étudiés séparément pour déterminer leurs influences respectives sur les indicateurs de dommage des différents murs. Pour ce faire, les résultats de l'analyse d'ATHENA dans laquelle l'élément étudié avait été enlevé ont été soustraits aux résultats d'un mur complet pour déterminer la fraction des impacts pouvant être imputé à cet élément. Finalement, une analyse de sensibilité concernant l'énergie d'opération a permis de comparer l'impact de différentes sources d'énergie. Un extrait des résultats de calcul est présenté à l'annexe 6.

Chronologiquement, cette étude approfondie qui justifie le choix de l'indicateur de changement climatique comme indice environnemental pour le cadre d'analyse a été faite après l'étude des procédures d'agrégation présentées à la prochaine section. Les évaluations

environnementales utilisées pour obtenir un rangement global proviennent donc de la première étude. Un récapitulatif des résultats obtenus par les deux études montre que l'impact environnemental du mur 1 était trop faible dans la première étude par rapport aux résultats des autres alternatives. Le rangement des alternatives est cependant le même pour les deux études (annexe 6).

2.2.4 Agrégation des évaluations pour obtenir un rangement global

Les évaluations obtenues selon chacun des critères de performance ont ensuite été regroupées pour vérifier s'il était possible de déterminer la meilleure option parmi les compositions de mur étudiées selon ces résultats (section 3.7). Aucune des alternatives ne présentait un meilleur rendement selon tous les critères. Une exploration des procédures d'agrégation multicritères (PAMC) a donc été entreprise pour permettre le rangement des compositions de mur considérées pour un contexte donné. Le chapitre 5 présente cette analyse multicritère qui compare l'utilisation de quatre PAMC, appartenant à deux grandes familles d'approche: la somme pondérée et MACBETH qui sont des approches de critère unique de synthèse, ainsi qu'ELECTRE II et PROMETHEE qui sont des approches de surclassement de synthèse.

En premier lieu, l'échelle utilisée pour l'évaluation de chacun des critères de performance a dû être revue pour assurer sa compatibilité avec chacune des PAMC utilisées (section 5.3). Les approches de surclassement acceptent des échelles ordinales ou cardinales, alors que les approches de critère unique de synthèse demandent que toutes les échelles soient transformées en échelles cardinales et que des niveaux de références soient définis. De plus, MACBETH permet d'inclure des échelles cardinales non-linéaires mais une fonction de non-linéarité doit être établie.

Par la suite, la définition de l'exemple d'application a été complétée par l'ajout de six contextes de décisions possibles, incluant un contexte physique et les préférences d'un décideur potentiel. La section 5.4 présente ces contextes décisionnels, ainsi que la procédure utilisée pour définir le poids relatif de chacun des critères de performance selon ces contextes, avec l'aide du logiciel M-MACBETH (Bana e Costa *et al.* 2005b).

Les évaluations selon chaque critère de performance, appelées évaluations locales, ont ensuite été agrégées à l'aide de chacune des PAMC pour obtenir un rangement global des murs étudiés pour chaque contexte décisionnel.

2.2.4.1 Somme pondérée

L'agrégation selon une somme pondérée considère que toutes les échelles sont cardinales et linéaires. Des niveaux de références inférieurs et supérieurs ont été utilisés pour calculer un ratio pour chaque performance. Cette procédure simple, présentée à la section 5.5.1, a été faite manuellement à l'aide d'un tableur (annexe 7). Une analyse complémentaire a permis de vérifier la sensibilité du rangement obtenu en modifiant les niveaux de références et le poids des critères.

2.2.4.2 MACBETH

Le logiciel M-MACBETH (Bana e Costa *et al.* 2005b) a été utilisé pour effectuer les rangements et l'analyse de sensibilité selon la méthode MACBETH. Comme décrit à la section 5.5.2, la définition des échelles de chaque critère a été une étape importante de l'utilisation de cette procédure d'agrégation. Premièrement, l'échelle ordinale mesurant le critère de gestion de l'humidité a été transformée en échelle cardinale non-linéaire. Ensuite, une échelle cardinale non-linéaire a été développée pour relier l'indice OITC mesurant l'atténuation des sons aériens en dB à la perception probable d'une diminution du son dans chaque contexte. Une analyse de sensibilité du rangement obtenue en fonction du poids des critères et une étude de robustesse ont aussi été faites à l'aide du logiciel. Un rapport d'analyse pour le contexte 1 est présenté à l'annexe 7.

2.2.4.3 ELECTRE II

La section 5.5.3 présente les équations utilisées et les résultats obtenus par la procédure ELECTRE II. Le rangement a été réalisé à l'aide du logiciel MCDM (Abi-Zeid *et al.* 2005). Contrairement à MACBETH, il n'a pas été nécessaire de définir des échelles cardinales pour obtenir un rangement avec ELECTRE II. L'analyse a cependant demandé de définir des seuils de convergence et de divergence. Les fichiers d'entrée et de sortie de logiciel pour le contexte 1 sont montrés à l'annexe 7. Un tableur a aussi été utilisé pour obtenir un meilleur suivi de cette procédure d'agrégation par surclassement de synthèse. Le tableur a

ensuite permis d'effectuer une analyse de sensibilité en faisant varier les seuils de concordance et de discordance, ainsi que les poids des critères.

2.2.4.4 PROMÉTHÉE

Les rangements selon les procédures PROMÉTHÉE I et PROMÉTHÉE II ont été calculés en utilisant la version démo du logiciel Decision Lab 2000 (Visual decision 2007) (section 5.5.4). L'annexe 7 présente l'interface du logiciel et les résultats obtenus pour le contexte 1. Comme pour ELECTRE II, il n'a pas été nécessaire de définir des échelles cardinales et de niveaux de références. De plus, la comparaison des alternatives selon chaque critère a utilisé la fonction de préférence la plus simple proposée, soit celle qui considère qu'une alternative est totalement préférée à une autre si son évaluation est plus grande selon ce critère. Ainsi aucun seuil d'indifférence ou de préférence n'a été introduit pour cette analyse. L'analyse de sensibilité a aussi été faite à l'aide du logiciel. Un exemple est commenté à l'annexe 7.

Comme précisé à la section 5.5.5, le rangement global fourni par PROMÉTHÉE II est comparé au rangement obtenu par les autres PAMC, alors que le résultat de PROMÉTHÉE I a permis d'identifier des situations d'incomparabilité entre les murs étudiés.

2.2.4.5 Comparaison des PAMC

Finalement, le choix d'une procédure d'agrégation multicritère pour le cadre d'analyse développé comparant des compositions de mur à ossature légère en bois en considérant simultanément un ensemble de critères de performance selon un contexte donné est discuté à la section 5.6.

La suite de la thèse comprend donc les trois étapes principales de la recherche, présentées dans les chapitres 3, 4 et 5. Le dernier chapitre présente ensuite les conclusions et contributions de cette thèse, ainsi que les avenues de recherche pour le futur.

Chapitre 3 - Identification of multiple criteria for the evaluation of light-frame wood wall assemblies

Résumé

Le choix d'une composition de mur à ossature légère en bois dépend de plusieurs critères de performance. Les alternatives possibles doivent respecter les exigences minimales des codes pour le contexte étudié. Des caractéristiques additionnelles peuvent ensuite être considérées pour parvenir à la configuration la plus appropriée pour un projet spécifique. Il n'est cependant pas simple de définir comment plusieurs critères de performance peuvent être évalués simultanément et quelle échelle doit être utilisée pour comparer les compositions. Les outils existants permettent souvent de n'évaluer qu'un critère à la fois. Une méthodologie d'évaluation considérant simultanément différentes caractéristiques de performance serait un atout dans le processus décisionnel. Avec comme objectif final le développement d'un cadre multicritère supportant l'évaluation de compositions améliorées de murs extérieurs à ossature légère en bois préfabriqués, cet article présente une méthodologie pour quantifier un ensemble de critères de performance. L'identification des critères appropriés est suivie du choix des méthodes de quantification. Un exemple d'application comparant cinq compositions de mur illustre la méthodologie.

Abstract

Design of light-frame wood wall assemblies should consider several performance criteria. Possible alternatives must respect minimum code requirements for the studied context. Then, additional performance characteristics may be considered to achieve the most suitable configuration for a specific project. It is however not simple to define how several performance criteria can be evaluated simultaneously and which scale should be used to compare assemblies. Existing tools to evaluate performance criteria consider mostly one parameter at the time. An evaluation methodology taking into account at once different performance characteristics would be beneficial in the decision process. With the final aim of developing a multicriteria framework to support the evaluation of improved factory-built wood-frame exterior walls, this paper presents a methodology for quantitative evaluation of

a set of performance characteristics. The identification of appropriate criteria is followed by the choice of quantification mechanisms. A case study comparing five wall assemblies exemplifies this methodology.

3.1 Introduction

Light-frame wood construction is the preferred choice of structural system for low-rise residential buildings in North America. Various wood-frame envelope assemblies have been developed over time across the continent, generally offering good structural, hygrothermal and acoustical performance, while being economical and simple to build. Although wood-frame envelope assemblies generally perform well, these systems may require modifications and improvements under many circumstances. The movement towards sustainability is making wood-frame construction systems more attractive in other parts of the world like Europe, given its low embodied energy. Requirements relative to building envelope performance vary with climate, as well as cultural and socio-economical context. Concerns regarding energy have led to increased thermal insulation levels over the years. Better acoustical insulation of a construction is nowadays expected. Modifications may also result from the availability of new building materials expected to improve performance or reduce costs. Problems may arise when a construction system is modified with respect to one performance target (e.g. structural) while the impact of this modification on the other performance criteria (e.g. energy) is not evaluated. For example, the sheathing panel is usually selected to ensure the adequate structural stability of the bracing system. However, the sheathing material may influence the hygrothermal behaviour of the wall. Indeed, a lower water vapour permeance can increase the risk of moisture accumulation in the assembly, as well as reducing its drying capacity in case of accidental wetting (Teasdale-St-Hilaire and Derome 2005). What is missing is not the ability to evaluate one performance aspect of a specific assembly, but the ability to assess globally an assembly considering simultaneously all expected performance criteria. The lack of such capability encourages members of the industry to be conservative since changing any design element may have repercussions too complex to evaluate.

Integrated evaluation approaches are suggested as potential means to answer this lack of access to relevant information on the consequences of design modifications on related performance criteria. Multicriteria decision analysis (MCDA) techniques, which have been developed to help organize and synthesize quantitative and qualitative information to bring an integrated perspective in the decision-making process, can be useful tools in this quest. MCDA seeks to integrate several goals in order to reach the best possible solution, considering the relative importance of each goal in the studied context (Belton and Stewart 2002).

In this research, the development of a multicriteria framework to support the design of factory-built wood-frame exterior wall assemblies is divided in two phases. The first part, presented in this paper, focuses on the identification of adequate criteria and the choice of quantification mechanisms. The methodology is exemplified with a case study comparing five wall assemblies. The second part of the research, aiming the aggregation of these performance targets to support the choice of a design assembly in relation to a specific context, will be presented in a following paper.

3.2 Objectives and methodology

Within the scope of developing MCDA-based methodology to evaluate and compare alternative designs considering many, sometimes conflicting, performance criteria simultaneously, this paper concentrates on the definition of adequate criteria to evaluate exterior wall assemblies, and more specifically on the means to assess these performance attributes. A means of assessing each performance characteristic is required to provide the basis (i.e. underlying data) for the future development of an overall comparison of wall assemblies using a multicriteria aggregation method.

The first step of this study consists in identifying the performance attributes relevant to the assemblies under evaluation. Performance attributes are then characterized as being either constraints to identify feasible alternatives or criteria to discriminate among various feasible alternatives. Second, for each performance attribute, the required information and the most appropriate method of evaluation is determined. Third, assessment modes are established, i.e. pass-fail levels are defined in the case of constraints and grading rules are

determined for the criteria. A case study is used to exemplify the second and third steps. The case study also provides the opportunity to look at the impact of specific wall components on the different performance targets.

3.3 Definition of performance attributes

The decision situation (a term used to refer to the spectrum of decisions that have to be made in one specific context) of this project is modelled using the top-down multiple objectives modelling approach developed by Keeney (1992). This approach starts with fundamental objectives and creates a hierarchy of goals and sub-goals to obtain specific measurable attributes on which the different alternatives will be evaluated. In this project, three underlying goals are considered for the design of wall assemblies: to ensure the comfort of the occupants by providing a durable protection, to reduce costs and to limit environmental impacts (Figure 3.1). The first objective, which seeks to ensure the well-being and the comfort of the occupants by providing a durable protection, encompasses: 1) structural integrity 2) durability of the envelope, as well as 3) control of the interior environment. Regarding structural integrity, the three constraints retained for the design of the wall assembly are the stud resistance to combined loading, in-plane shear resistance of the wall panel, and preservation of the structural integrity in case of fire. The durability of the envelope depends on the materials' capacity to resist the in-service conditions without degrading. It involves the robustness of the interior and exterior finishing, as well as the capacity of the assembly to control the transport of heat, air and moisture when subjected to the environmental loading to prevent the exposure of materials to conditions that could lead to their deterioration by mould, rot, corrosion, etc. A major agent leading to deterioration is moisture. The wall assembly influences the interior environment through thermal resistance and capacity, airtightness, surface emissivity, moisture capacity, content of contaminants and mould, and sound attenuation capacity.

The second objective aims at reducing the overall costs of the building. This includes 1) construction costs 2) maintenance costs, and 3) heat, ventilation and air-conditioning (HVAC) or energy costs related directly to the exterior wall assembly and evaluated for an appropriate service life-time. The third objective is to limit the environmental impact, by

minimizing the use of 1) primary energy and 2) natural resources, as well as 3) flows of pollutants to nature. Progressing from these objectives, the top-down approach identifies a series of constraints and criteria directly related to the design and evaluation of exterior light-frame wall assemblies (Frenette *et al.* 2007). Table 3.1 summarizes the constraints and criteria considered in this paper. This list should be considered as an example specifically developed for a given context, yet the approach is general enough to be adapted to other contexts with different climate, codes, or cultural requirements. The important feature of this list is the differentiation between the constraints and the criteria. For the constraints, a minimum required level of performance needs to be defined as a prerequisite in order for any wall assembly to be considered for further ranking. Whereas the performance criteria have no pass/fail level, they need to be quantified in order to help choosing the best alternative for a given context through a multicriteria ranking.

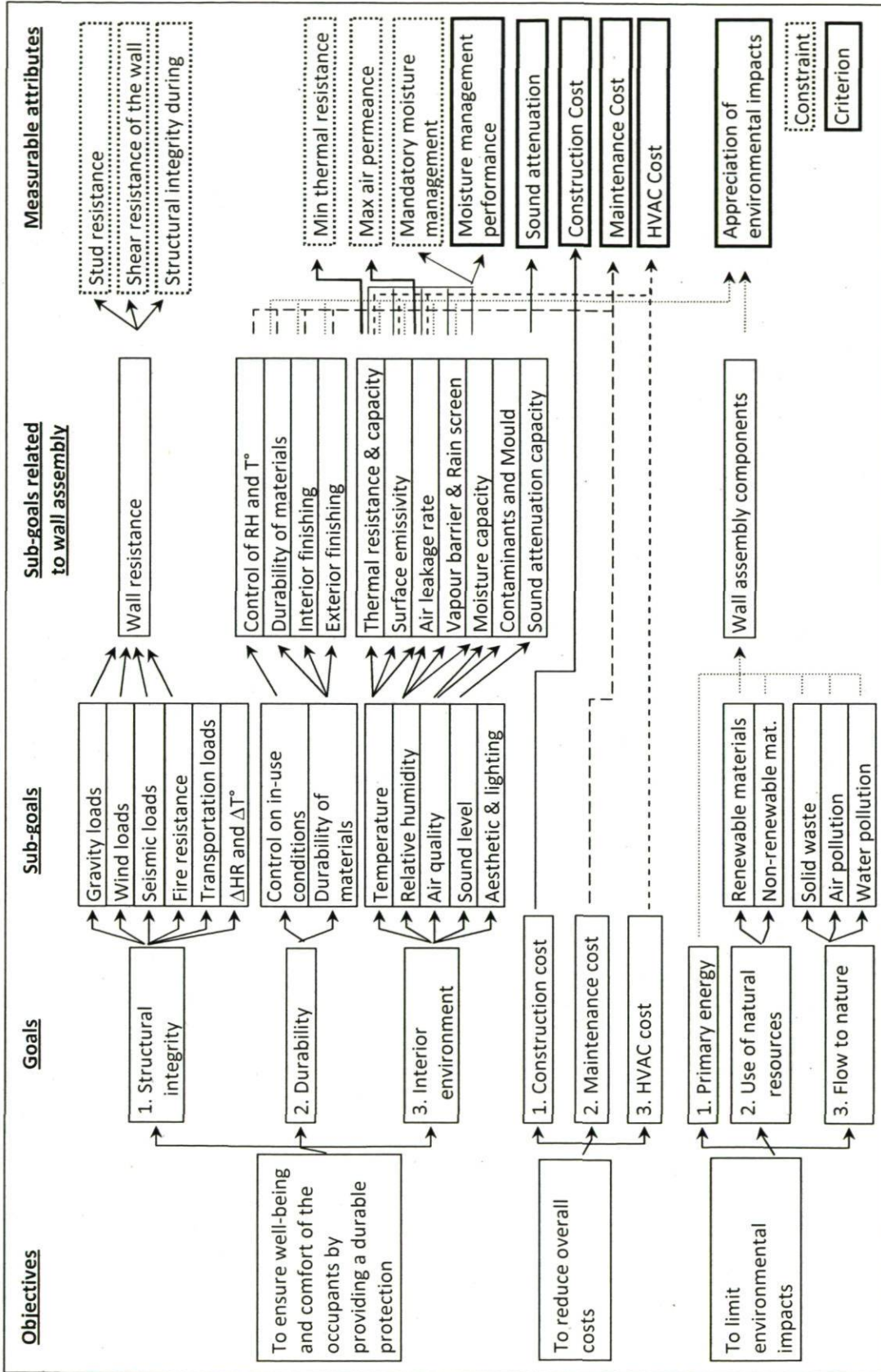


Figure 3.1 - Top-down development of main objectives

Table 3.1 - Constraints and criteria attributes for wall assembly assessment

Constraints		Criteria	
A	Studs resistance to combined loading	1	Moisture management performance
B	In-plane shear resistance of the wall	2	Attenuation of sound transmission
C	Fire performance	3	Construction costs
D	Thermal insulation	4	Maintenance costs
E	Air permeance of air-barrier components	5	HVAC-related energy costs
F	Mandatory moisture management measures	6	Environmental impact - GWP

3.4 Description of the wall assemblies of the case study

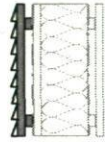
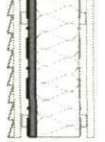
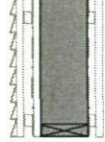
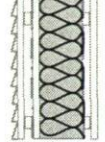
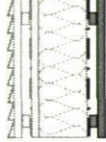
A case study illustrates the determination of constraints and criteria to be used in a multicriteria analysis. The case study also leads to the identification of some of the strengths and limits of the approach. The chosen case study considers the exterior wall assembly of a two-storey residential building in Quebec City. The assessment time period to calculate HVAC energy use and environmental impacts is set to 20 years. Even though this value is lower than the expected lifetime of the building, it is more representative of the horizon considered by decision-makers, such as owners, regarding financial investments for their house (CNRC 1997).

The process of developing an adapted solution to a specific context starts with identifying the range of alternative building materials available to the designer. To do so, meetings with six manufacturers of prefabricated houses, as well as a trade literature review, were conducted to identify various materials currently used and their properties. Moreover, an exploration of newly available materials in the North American or European markets was undertaken.

The composition of the five wall assemblies included in the case study is based on various constructions observed in industry, as well as on alternatives offered by innovative building materials appearing to provide interesting solutions. Table 3.2 reviews the selected alternatives, organized into five components from the outside towards the interior of the wall: external cladding (including furring); sheathing and water resistive membrane; framing; insulation; and interior finishing (including vapour barrier). In addition, a layer acting as the air barrier system is identified. Assembly 1 is a basic wall, with vinyl siding, OSB and fibreglass insulation. Assemblies 2 and 3 are more expensive assemblies with

brick, veneer, and higher insulation levels. Assembly 4 has a higher content in natural fibres with wood siding and cellulose insulation, while assembly 5 uses additional insulation and aluminium-coated fibreboard.

Table 3.2 - Wall assemblies for the case study

	External Cladding	Water-resistive membrane and sheathing	Framing	Insulation	Vapour barrier and interior finishing
Assemblies					
1	vinyl siding + furring	building paper + OSB	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	glass fibre batt (140 mm)	Polyethylene (air-barrier) + furring + gypsum board
2	brick veneer	polyolefin membrane + plywood	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	extruded polystyrene (140 mm)	Polyethylene (air-barrier) + furring + gypsum board
3	brick veneer	polyolefin membrane + 25 mm extruded polystyrene	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	glass fibre batt (140 mm)	Polyethylene (air-barrier) + furring + gypsum board
4	wood siding + furring	building paper + asphalt-coated wood fibreboard	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	blown cellulose (140 mm)	reinforced kraft paper + furring + gypsum-fibre board (air-barrier)
5	wood composite siding + furring	polyolefin membrane + 25 mm extruded polystyrene + OSB	38mm x 140 mm @ 600mm o.c.	blown cellulose (140 mm)	aluminium-coated fibreboard (air-barrier) + furring + gypsum board

3.5 Conformity to constraints attributes

Once various wall assemblies have been identified as potential solutions for a given project, the designer must ensure they meet the minimal performance requirements set by building regulations. This section describes in more details the constraint-defining attributes identified by this study, presenting the prescribed evaluation methods and acceptable thresholds. Table 3.3 summarises the results for the five assemblies of the case study.

Table 3.3 - Constraints evaluation for the case study

Constraint	Measure	Assemblies					Target
		1	2	3	4	5	
Studs resistance to combined loading	$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r}$	0.40	0.40	0.40	0.40	0.61	≤ 1.0 (CSA O86-01 2005)
In-plane shear resistance of the wall	minimum length of braced panel	8m ≥ 1.2m acceptable	8m ≥ 1.2m acceptable	8m ≥ 2.4m acceptable	8m ≥ 2.4m acceptable	8m ≥ 1.2m acceptable	according to Engineering Guide (CWC 2004)
Fire performance	fire rating	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	no requirement for single family housing
Thermal resistance	RSI	4.1 m ² ·K/W	5.8 m ² ·K/W	4.9 m ² ·K/W	4.6 m ² ·K/W	5.4 m ² ·K/W	3.6 m ² ·K/W (L.R.Q. 2008)
Air permeance of air-barrier components	air leakage characteristic	0 L/s·m ²	0 L/s·m ²	0 L/s·m ²	0.02 L/s·m ²	0 L/s·m ²	≤ 0.02 L/s·m ² @75 Pa (CNRC 2005)
Mandatory moisture management measures (cold climate)	MC of wood at construction	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	≤ 19% (CNRC 2005)
	Rain screen	✓	✓	✓	✓	✓	included (CNRC 2005)
	Vapour barrier	3.4 ng/Pa·s·m ²	3.4 ng/Pa·s·m ²	3.4 ng/Pa·s·m ²	55 ng/Pa·s·m ²	2.9 ng/Pa·s·m ²	≤ 60 ng/Pa·s·m ² (CNRC 2005)
	Max RH	71%	60%	61%	77%	68%	≤ 100% (CNRC 2005)

3.5.1 Stud resistance to combined loading

According to the CAN/CSA-O86 standard, the internal stresses resulting from the combination of factored loading in the wood studs must stay below the prescribed wood resistance. Moreover, the horizontal deflection due to wind loads is limited to a 180th of the stud height (CAN/CSA-O86-01 2005). In Canada, the National Building Code (NBCC) (CNRC 2005) prescribes the appropriate loading, while the resistance is provided by the CAN/CSA-O86 standard. Load combinations for ultimate limit states combining dead, snow and wind loadings are the most important for all assemblies in the case study. Nevertheless, as is generally the case for standard housing, stud resistance and deflection to combined loading are not critical. This is even more true since the original 38mm x 89mm studs (2x4) were replaced by 38mm x 140mm studs (2x6) in the 1980's to allow the insulation level to meet the requirements of the Quebec energy regulation introduced then

(L.R.Q. 2008). Studs are therefore structurally over-designed for such application. Higher walls and connections to roof and floor systems may be more critical but are not included in this study since they are not directly related to the choice of wall assembly.

3.5.2 In-plane shear resistance of the wall

The lateral resistance of a building is difficult to predict since it depends on a system composed of several elements, including shearwalls and diaphragms. The structural behaviour of a standard shearwall, made of a structural panel assembled to wood framing, is relatively well known. A difference is observed however between the actual lateral resistance of wood light-frame residential buildings and the results of calculations based on the performance of standard panels, since current design rules do not integrate effectively system effects or the redundancy observed in actual construction. In this context, a conservative calculation method is prescribed in the “Engineering Guide for Wood Frame Construction” (CWC 2004). According to this guide, the case study house for the wind and seismic design loads of Quebec City does not require specific calculations of shearwall. Prescriptive guidelines for lateral loads provided in part C of the guide have to be met. Amongst other requirements, these guidelines demand a minimum length of bracing walls for the two perpendicular directions of the building. This minimum length depends on the type of braced panel used for the walls. Most assemblies of the case study comply with this requirement. For assembly 3, since no wood-based sheathing panel is used, a 12.7 mm thick interior gypsum board or additional let-in bracing is required.

3.5.3 Fire performance

The NBCC requires a fire resistance rating of the structure to allow the evacuation of the occupants in case of fire. For multi-dwelling residential buildings with a maximum of three storeys, the minimum fire-rating for exterior walls is 45 minutes (CNRC 2005). In light-frame wood construction, fire performance is usually controlled by the presence of a Type X interior gypsum panel, protecting the wall and the framing from the flames and the temperature increase. Empirical test results are available in the literature, as well as in the NBCC Appendix, to determine the fire resistance of standard wall assemblies (CNRC 2005, Sultan and Loughheed 2002). Since the case study considers a single family house, no

minimum fire-rating of the wall is required. Yet, if type X gypsum board is used, the studied wall assemblies would in effect provide a fire-rating of 45 minutes.

3.5.4 Thermal resistance

The thermal resistance, also referred to as the RSI-value, considers steady-state conditions for the set of materials in the wall assembly. At the interior and exterior surfaces, convective and radiant exchange are taken into account under the form of surface coefficients. In Canada, the NBCC requires that the assembly has enough thermal resistance to ensure comfortable conditions for the occupants and to avoid surface condensation. Quebec's regulation respecting energy conservation in new buildings prescribes a minimum RSI-value of $3.6 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ for opaque wall assembly above ground in Quebec City (L.R.Q. 2008). Such requirements apply to the clear section of the assemblies, i.e. this is not the effective RSI-value which would include the thermal bridges caused by the stud elements. All assemblies of the case study comply with the minimum requirement of $3.6 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

3.5.5 Air barrier

The airtightness of the building envelope is required for two main reasons: energy efficiency and prevention of moisture accumulation within the assembly. To build an airtight building, an air barrier layer has to be continuous around the entire building envelope. The lack of airtightness is usually caused by discontinuity at the junction of components or when an element has to pass through the envelope. When evaluating a complete building, this property can be measured using a blower-door test, revealing the airtightness level for the entire envelope. At the design stage, the NBCC requires the continuity of an airtight system using an air barrier material with an air leakage characteristic not greater than $0.02 \text{ L}/\text{s}\cdot\text{m}^2@75 \text{ Pa}$ (CNRC 2005). All assemblies included in the case study have at least one material complying with this requirement. Thereafter, the building design must ensure the continuity of this layer within the airtight system.

3.5.6 Mandatory moisture management measures

NBCC prescribes mandatory measures to avoid moisture problems within wall assemblies. In addition to envelope airtightness, these measures include the use of wood with moisture

content below 19% and protection against water ingress. NBCC also requires the inclusion of a low vapour permeance material on the warm side of the insulation in order to limit condensation within wall assemblies under design temperatures (CNRC 2005). The maximum relative humidity within the assembly for design temperature is often calculated through a steady-state calculation of vapour diffusion. The dew-point method consists in calculating the temperature and vapour pressure profiles within the wall assembly for design temperatures and relative humidity (Figure 3.2) and in verifying whether the partial water vapour pressure reaches saturation. All wall assemblies of the case study satisfy this constraint.

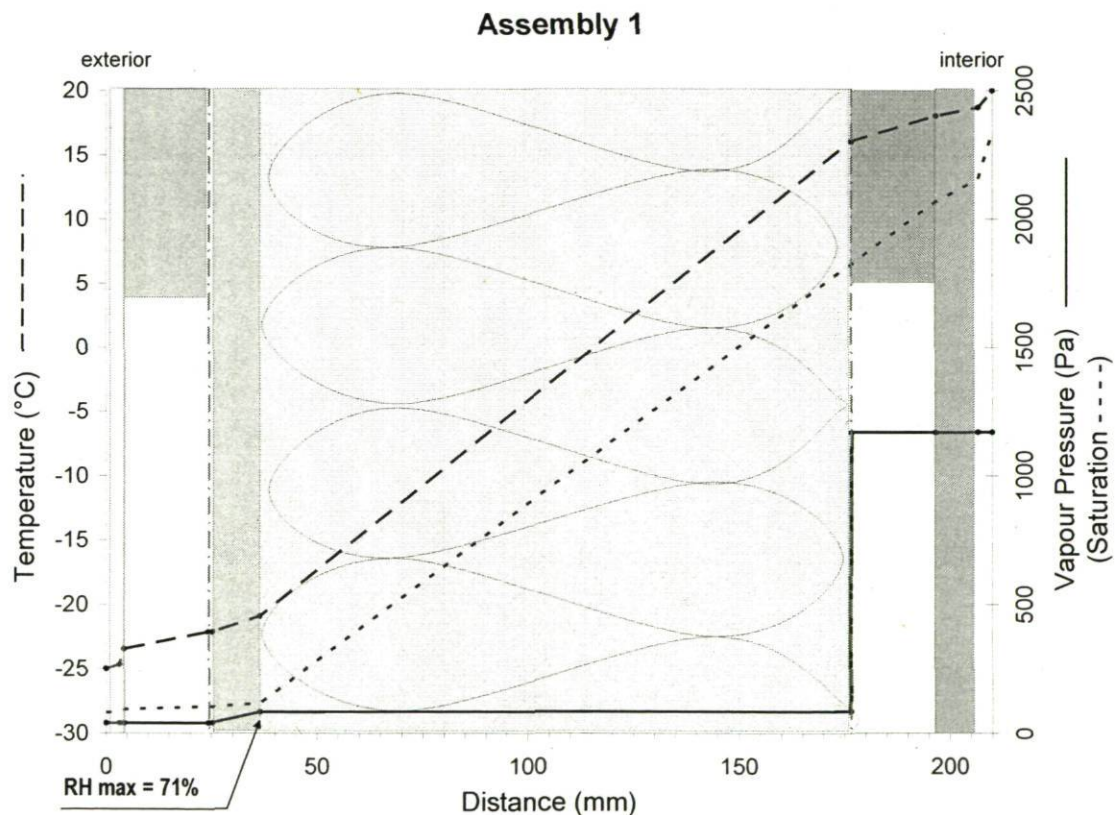


Figure 3.2 - Temperature and vapour pressure profiles in assembly 1 for design temperature

3.6 Evaluation of performance criteria

Since the five assemblies are meeting the constraints (minimum regulation requirements), further comparison of performance can be made using other attributes. Although not

formally required by regulations, the following criteria also have a major influence on the performance of the assembly. Six of these performance criteria, identified in the top-down analysis as being directly related to the composition of wall assembly (Figure 3.1), will be further looked at in this study. This section describes the criteria, proposing evaluation methods, as well as scales to measure their performance levels.

3.6.1 Moisture management performance

The evaluation of the moisture management capacity of the assemblies is done by simulating the dynamic moisture behaviour of a specific wall assembly in a given climate, using computer tools. In this paper, the simulations are done with the 1D heat and moisture transport simulation tool, WUFI 4.1 (Karagiozis *et al.* 2001). Results are analyzed in terms of exposure to conditions that may lead to material deterioration or air contamination, e.g. by mould growth.

For the simulations, material properties are taken from the WUFI North America Database (WUFI 2007), mainly based on ASHRAE RP-1018 report (Kumaran 2002). When available, the database provides thermal conductance, moisture storage and liquid diffusivity as functions of the moisture content, and vapour permeance as functions of relative humidity (RH). The properties of vinyl siding, wood siding and aluminium coated fiberboard are not directly available. The properties of vinyl siding are approximated from polyethylene membrane, except for its heat capacity, taken from ASHRAE (2005). For the wood siding, eastern white cedar properties are taken from the WUFI database. These two sets of values do not affect significantly the results due to the ventilation of the air layer behind the cladding. The aluminium coated fiberboard, used in assembly 5, is represented by two materials in the simulation: wood fiberboard, available in the database, and an aluminium film, which properties are in ASHRAE (2005). In addition, the emissivity of the film is taken into account through the thermal properties of the adjacent air layer. For all assemblies, the air layer between the exterior siding and the water resistive membrane is ventilated with 100 air changes per hour (ACH), which represent an upper limit for ventilated air layer behind exterior siding (Burnett *et al.* 2004).

Analyses include 3 year-simulations. The 1st year is run to achieve realistic initial conditions for the 2nd and 3rd years. The progression between the 2nd and the 3rd years allows verifying steady periodic conditions, while the 3rd year result is used for the analysis. Interior climate conditions, defined using SPC 160P ASHRAE Standard (2006), represent normal interior moisture production for a 3-bedroom house and a heated only environment with an hourly air change rate of 0.2. The exterior climate file is of Quebec City. The wall faces the north-east direction, which provides the maximum wind-driven rain according to the analysis of the climate data. The simulation parameters for rain in WUFI is a ratio linking wind and horizontal rain, used to derive a wind-driven rain load on the wall surface. Absorption of rain by the exterior surface is allowed. Exterior surface conditions are determined to be 0.0588 m²·K/W for the heat resistance, 0.3 for the short-wave radiation absorptivity and 0.9 for the long-wave radiation emissivity. Interior surface heat resistance is set to 0.125 m²·K/W.

For the simulations, a fine mesh grid, hourly time steps and convergence criteria are regulated within WUFI. At the end of each simulation, the number of convergence errors is always less than 20 per year (less than 0.3% of the time steps). The simulations are run under normal conditions, and also with accidental rain infiltration. The latter includes a leak accounting for 1% of the rain entering between the rain barrier and the sheathing, and another 1% of the rain entering the insulation in the stud cavity. This extreme condition is used in this study to differentiate the various wall assemblies. The assembly's behaviour in such critical situation shows its capacity to dry-out, and the potential risk associated with the use of intermediate insulation sheathing with low permeability. SPC 160P ASHRAE Standard (2006) is used to analyse the results. In order to prevent problems associated with mould growth, SPC 160P recommends limiting the 30 day-average RH within the wall assembly under 80%, the 7 day-average under 98%, and the 24h-average under 100%, when surface temperature ranges between 5°C and 40°C.

The position across the assembly that is subjected to the most important moisture content is the interior face of the sheathing. The moisture content at this location, in each wall, is used to calculate the maximum and minimum 24-hr, 7-day and 30-day running average RH

when the average temperature is between 5°C and 40°C during the 3rd year of simulation. Table 3.4 summarizes the results for the five assemblies included in the case study, highlighting the values trespassing thresholds, the number of times each threshold is not respected during the 3rd year, as well as an indication of moisture accumulation from one year to the other.

Table 3.4 - Maximum relative humidity for the 5 assemblies when temperature is between 5° and 40°C

<u>Simulations without rain penetration</u>		T (°C)	24-hour average		7-day average		30-day average		moisture accumulation
			RH	>100%	RH	>98%	RH	>80%	
Assembly 1	Max	24.8	88.7	0	76.2	0	75.8	0	no
	Min	5.0	60.0		61.3		62.5		
Assembly 2	Max	24.0	83.1	0	82.7	0	80.6*	15†	no
	Min	5.0	70.5		70.6		71.6		
Assembly 3	Max	24.4	92.7	0	86.8	0	85.4*	53	no
	Min	5.0	54.1		55.3		57.4		
Assembly 4	Max	24.5	79.2	0	77.7	0	77.0	0	no
	Min	5.0	56.2		57.6		60.1		
Assembly 5	Max	24.0	89.4	0	86.3	0	85.1*	57	no
	Min	5.0	67.7		68.3		69.6		

<u>Simulations with rain penetration</u>		T (°C)	24-hour average		7-day average		30-day average		moisture accumulation
			RH	>100	RH	>98	RH	>80	
Assembly 1	Max	24.5	98.7	0	95.7	0	94.2*	183	no
	Min	5.0	80.1		85.5		86.6		
Assembly 2	Max	23.8	92.9	0	92.6	0	92.4*	182	no
	Min	5.0	75.2		87.8		87.2		
Assembly 3	Max	23.9	100.0*	236	100.0*	226	100.0*	221	yes
	Min	5.0	100.0		100.0		100.0		
Assembly 4	Max	24.3	86.7	0	84.6	0	81.6*	46	no
	Min	5.0	59.2		61.4		67.4		
Assembly 5	Max	23.5	97.0	0	94.4	0	94.1*	220	yes
	Min	5.0	90.5		90.5		90.6		

Note: data retrieved from the 3rd year of the simulation results

* value trespassing the threshold

† Number of times the threshold is not respected during the 3rd year

When simulated without rain penetration, all assemblies respect the 24-hr and 7-day thresholds. The 30-day running average surface RH exceeds however the 80% threshold for assemblies 2, 3 and 5. Under rain penetration conditions, the 24-hr and 7-day thresholds are respected by all assemblies, except assembly 3, which has a constant relative humidity

inside the insulation cavity of 100%. All assemblies exceed 30-day average RH of 80%. Assemblies 1, 2 and 5 stay between 85% and 95% RH when the temperature is over 5°C, while assembly 4 stays mostly under 80% RH except in late spring. Figure 3 shows the 24-hour-average RH for the interior face of the sheathing in the 5 assemblies under rain penetration conditions. No yearly moisture accumulation happens, except for assembly 5, reaching 95% RH during the 2nd year and 97% RH during the 3rd year, and assembly 3, which never dries out when rain infiltrates the insulation cavity.

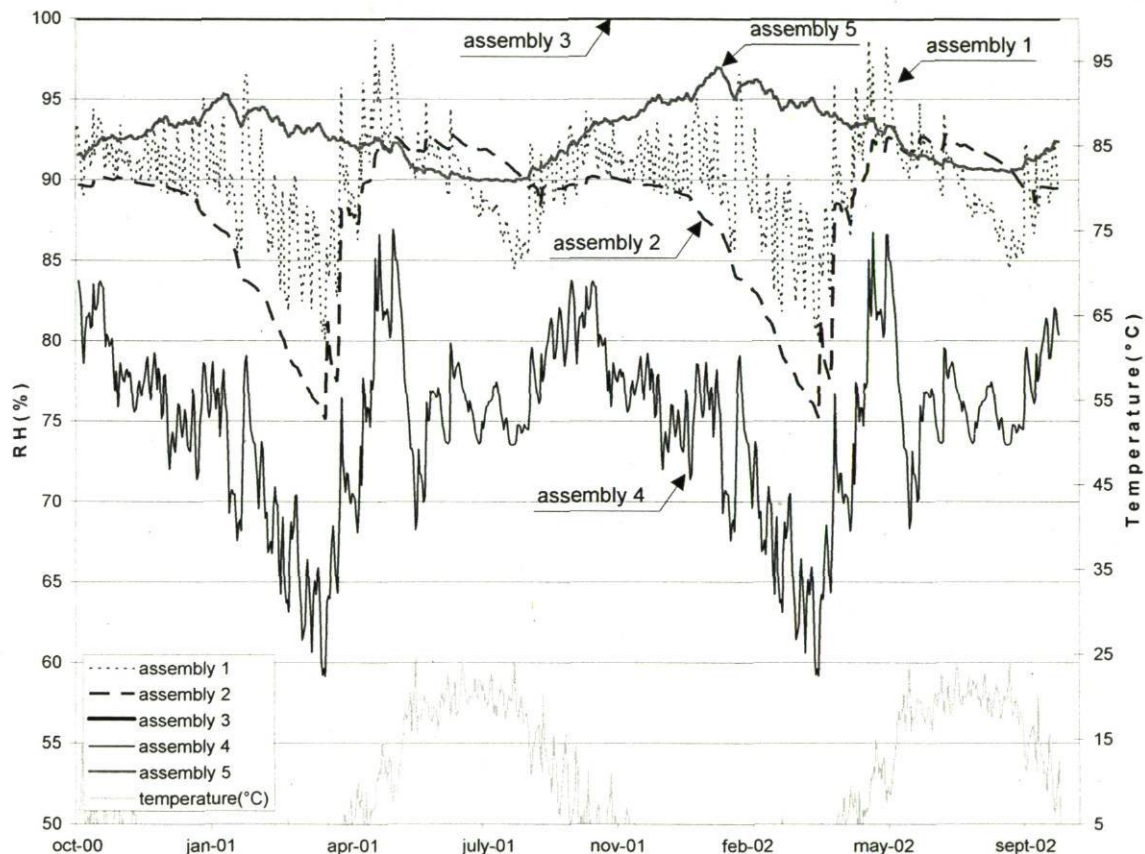


Figure 3.3 - 24-hr-average relative humidity for the 5 assemblies under rain penetration conditions for the 2nd and 3rd years.

The information obtained via the analysis of the simulation results needs to be represented by a single index that could be included in a multicriteria analysis. We propose a scale ranging from 0 to 5 using maximum 24 hours-, 7 days- and 30 days-average RH inside the stud cavity as defined by SPC 160P Standard. The scale includes simulation results without and with rain penetration. As indicated in Table 3.5, "0" corresponds to the minimal

requirement (no condensation), where "5" represents the best moisture management performance.

Table 3.5 - Scale for the criterion of moisture management performance

scale	Maximum relative humidity within the wall assembly
0	24-hr average without rain penetration < 100% RH (basic requirements)
1	7-day average without rain penetration < 98% RH
2	no yearly increase of moisture in case of rain penetration in the insulation cavity (1% rain)
3	30-day average without rain penetration < 80% RH
4	30-day average in case of rain penetration in the insulation cavity (1% rain) < 90% RH
5	30-day average in case of rain penetration in the insulation cavity (1% rain) < 80% RH

3.6.2 Attenuation of sound transmission

The ability of a building envelope to attenuate air-borne sound is usually evaluated using a sound transmission class (STC). However, for exterior walls, the Outdoor-Indoor Transmission Class (OITC) seems a more appropriate index since it is designed to correlate with subjective impressions of the ability of building elements to reduce the overall loudness of ground and air transportation noise (ASTM 2003, Bradley and Birta 2000). The OITC index is derived from experimental measurements using a larger frequency bandwidth going from 80 Hz to 4 kHz.

The sound attenuation index OITC (equation 3.1) is in decibels and thus is a logarithmic expression of the actual sound intensity level attenuation.

$$\Delta L_p = -20 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (3.1)$$

where ΔL_p is the sound level attenuation in dB, I is the sound intensity level compared to I_0 , a reference intensity level, both in W/m².

This study uses OITC values available in the literature from laboratory measurements made on various configurations of light-frame wood walls (Bradley and Birta 2000). Assembly 1 is similar to the tested configuration TLA-99-019a, which has an OITC of 25dB. This result also serves for assembly 4, with an OITC increase of 1dB due to the cellulose insulation,

according to tested wall TLA-99-093a. No configuration with wood siding is available in this reference. According to the results for various cladding such as vinyl, aluminium, EIFS and stucco, it can be deemed that the increase of mass of the wood siding would bring an OITC increase of 1dB, which is not considered here due to its uncertainty. The use of wood fiberboard improves slightly the performance but brings no OITC increase for TLA-99-104a. For assemblies 2 and 3, the OITC with brick cladding is estimated at 40dB, according to configuration TLA-99-098a. The tested assembly includes glass fibre insulation and OSB sheathing, instead of extruded polystyrene insulation and plywood sheathing for assembly 2, or glass fibre insulation and extruded polystyrene outside the framing for assembly 3. Nevertheless, there is no indication on the effects of these changes when used with brick siding, although additional polystyrene insulation is expected to bring an OITC increase of 1dB for vinyl siding. Assembly 5 is compared to a 600mm-stud-spacing configuration with vinyl siding (TLA-99-121a). Its OITC is increased by 1dB for the cellulose insulation, but no change is considered for composite wood siding. In the five assemblies, no resilient furring or double gypsum board are considered. According to literature, these features could increase the OITC index by 5 to 10dB for vinyl siding configurations.

3.6.3 Construction costs

In most projects, construction costs have a major influence in the decision process. It is however a difficult criterion to evaluate since it varies highly with time, region and project size. Overall construction costs should account for design, material, prefabrication process, transportation and on-site assembly. In the scope of this study, only the costs (materials, labour, etc.) directly related to the construction of the wall assembly, are considered for the different alternatives. Cost information came from Building Construction Cost Data (RSMeans 2007) and from two local prefabrication companies.

For external claddings, materials and labour prices vary considerably from one source to the other, and represent a large portion of the final cost of the opaque portion of the wall (36 to 70 %). For vinyl and brick claddings, mean values of the various prices available are computed for each material. For wood and wood composite sidings, regional prices are

considered to be most representative. Regarding wood species, cedar and SPF (Spruce-Pine-Fir) were examined but only painted SPF siding is included in the final analysis. Water resistive membranes represent only 1% of the total cost, and average values are used. Sheathing represents between 5 and 10% of the total price. Once again, average values are chosen since the cost differences between materials are similar for the various sources. Framing costs, which are relatively similar for all the assemblies considered, represent between 10 and 20% of the total cost. Wall framing is priced per linear foot of wall of a given height, with additions for horizontal blocking and opening framings. Main insulation represents 5 to 20% of the total cost. Average values are used for extruded polystyrene and fibre glass insulation. Cellulose insulation cost from RSMMeans includes the rather costly on-site installation. A more realistic pricing of cellulose insulation installed within a prefabrication process would require more investigation. Standard vapour barriers such as polyethylene 6 mil and reinforced kraft paper represent only 1% of the total cost, while the cost of aluminium coated fiberboard, which was estimated by local industries, reaches 8% of the total cost. The price of gypsum board is similar for all assemblies and represents between 8 and 20% of the total cost. Gypsum-fibre board (type Fermacell[®]) was first considered in assembly 4. It was however not included in the final analysis, given its high price due to its recent introduction in the Canadian market (information provided by an import company).

Figure 3.4 summarises the total costs in Canadian dollars included in the multicriteria analysis for the 5 assemblies of the case study.

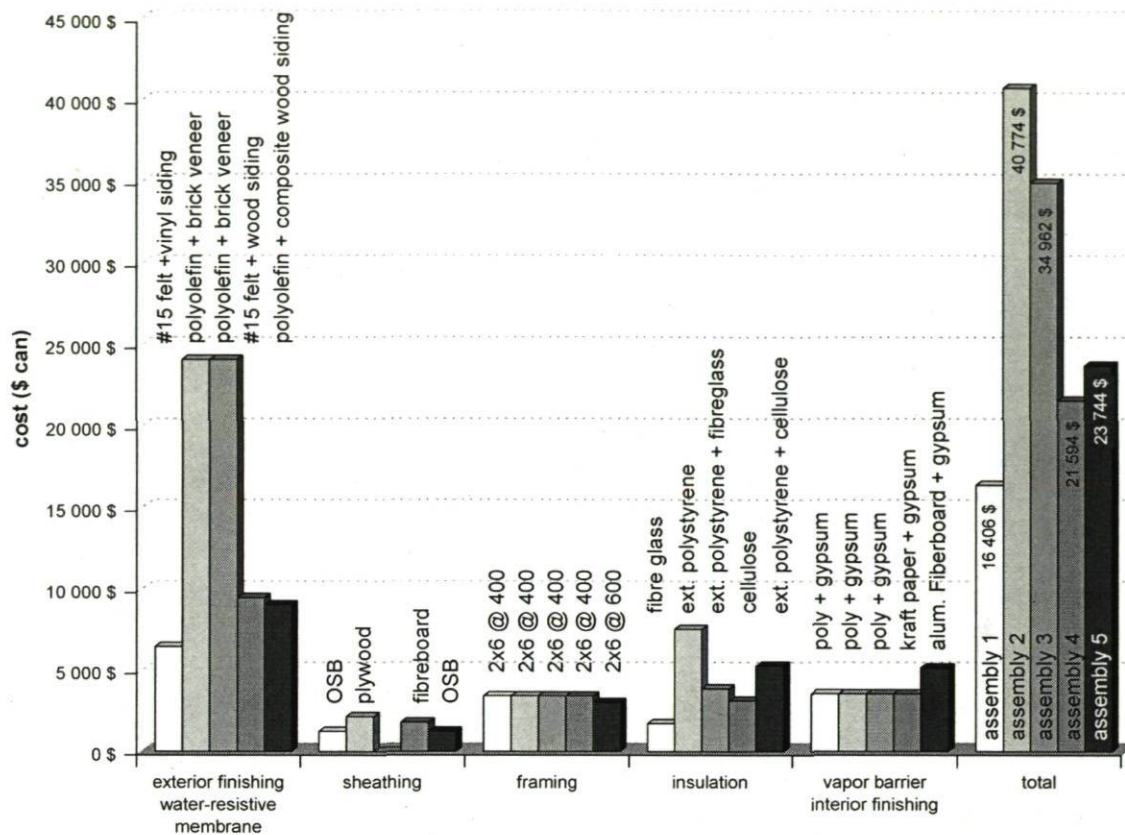


Figure 3.4 - Details of the construction cost evaluation for the 5 assemblies of the case study

3.6.4 Maintenance costs

Maintenance costs are mainly related to the quality and durability of the products used, as well as to the construction quality. When available, the maintenance cost of the wall assembly would be estimated considering regular maintenance, suggested replacement period as well as product warranties. No maintenance costs are included in the case study due to the short evaluation period of 20 years. Indeed, most products offer a durability exceeding this period without maintenance. In an analysis where maintenance would have more influence, this criterion, calculated in Canadian dollars, should be actualized to today's value.

3.6.5 Heating, ventilation and air-conditioning (HVAC)-related energy costs

The choice of wall assembly impacts heating, cooling and ventilation loads through the overall thermal resistance and airtightness of the exterior envelope. This study concentrates

specifically on heating energy loads, which is of major importance for the residential light-frame construction in Quebec climate. Heat transfer through the wall is calculated using the effective RSI-value of the wall, in combination with climate data, through steady-state calculation. This simple calculation method is considered adequate for typical buildings with low thermal mass in this context. A more detailed energy simulation model could be necessary in other situations such as the analysis of multi-unit housing buildings with mechanical cooling, building located in a different climate zone, specially one requiring air conditioning, or to include other major heat loss, such as heat transfer through windows, thermal bridges, etc.

Effective RSI accounts for the heat loss through the thermal bridges due to the framing using the parallel path method. Typical wood framing includes: studs, single bottom plate, double top plates, a set of blocking, double end studs and lintel on top of openings. The design of the two-storey house resulted in 18% and 15% of the surface of the walls occupied by wood framing for the 400-mm and 600-mm stud spacing, respectively. These values differed from the 19% and 11% suggested by Model National Energy Code of Canada for Houses, but seemed more representative of actual construction. Thermal resistance values of the materials were readily obtained from manufacturers, handbooks and other sources (CNRC 1997, Kumaran 2002, AEE 2003, ASHRAE 2005).

The overall airtightness of the envelope, as well as building ventilation, also affects heat loss. Nevertheless, once an air-barrier layer has been included in the wall design, as required in the building code, the air-permeability of this barrier is negligible in comparison with global air leakage of the whole house, which is mainly due to construction details. Airtightness is therefore not included in these HVAC cost calculations since it is considered to be consistent among the studied assemblies, which all have a prescribed air-barrier layer.

The heat loss, Q [W], through a surface, A [m^2], of an exterior wall can be calculated using the thermal transmittance factor, U [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$], of the wall and the temperature difference, ΔT [K], between the surfaces (equation 3.2). Over a time period t [h], the energy, E [kW·h], required to make up for this heat loss is described by equation (3.3):

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (3.2)$$

$$E = 0.001 U \times A \times \Delta T \times t \quad (3.3)$$

However, the temperature difference is not constant. The use of degree-day data, DDSI [K·day], can approximate the energy loss over a year without using a dynamic analysis (equation 3.4).

$$E = 0.001 U \times A \times \text{DDSI} \times (24) \quad (3.4)$$

The degree-day data is the sum of the differences between the mean daily exterior temperature and a reference temperature for each day when the difference is negative. Environment Canada provides normal data calculated over a 30-year period (1971-2000) (EC 2008). For Quebec City, the yearly DDSI considering a reference temperature of 18°C is 5200.

In this study, the HOT 2XP software, HOT2000 calculation engine, is also used to verify the results obtained through this simple calculation. The HOT2000 calculation engine conducts monthly energy balance on a house design to determine potential energy (space heating, water heating, appliances, and lighting) requirements. These simulations are performed using the various wall assemblies as part of a given building with the same operation parameters. Since the only changing variable for each simulation is the heat resistance of the exterior walls, the results of HOT 2XP simulations show the same heat loss difference between the various assemblies as equation 4, which represent the information needed to compare these assemblies in this context.

The cost of replacing this energy loss depends on the efficiency of the heating system, the energy source (electricity, fuel oil, natural gas, propane, etc) and its cost. Considering a period of n years, the present value of energy cost (TC) can be predicted using the annual heating cost for the first year (C), the projected energy cost increase including inflation (e), and the discount rate including inflation (i) (equation 3.5) (CNRC 1997, Appendix F).

$$TC = A \cdot \frac{1 - (1 + a)^{-n}}{a} \quad \text{where} \quad a = \frac{i - e}{1 + e} \quad (3.5)$$

For the case study, it is chosen to consider an electric heating system, with 100% efficiency as suggested by HOT2XP for electric systems. The energy consumption related to the walls equals the energy loss calculated for each assembly. The case study considers a 20-year period, the actual residential cost of electricity in Quebec of 0.08 \$CAN/kWh, an inflation rate of 2 % per year and an interest rate of 6%.

3.6.6 Environmental impact

The environmental impact of constructions is not yet considered in building codes although there is a growing interest in using such impact as a criterion in building evaluation. Several certification programs around the world attempt to define sets of criteria establishing the environmental performance of buildings (Horvat and Fazio 2005, Haapio and Viitaniemi 2006). Generally, the certification programs relating to residential construction aim mostly at reducing operation energy in buildings, and confer a lower importance to the embodied energy directly related to building materials (AEE 2003, BREEAM 2005, Minergie 2005).

Life cycle assessment (LCA), documented through ISO standards 14040 through 14044, identify and quantify the environmental inputs and outputs associated with a product over its entire life cycle (ISO 2006). The ATHENA™ Environmental Impact Estimator software (ATHENA™) performs LCA of buildings to assess direct environmental impacts in terms of environmental indices such as primary energy use, global warming potential, resources use, solid waste, water pollution and air pollution. Using a North-American life cycle inventory database, ATHENA™ aims to take into account the whole life of the building, including harvest, manufacturing and transportation of materials and components, on-site construction and disposal (Trusty *et al.* 1998) In the present research, the objective of the environmental criterion is to limit the environmental impact, by minimizing flows from and to nature directly related to the wall assemblies. Yet, amongst the various environmental indices, this analysis concentrates on global warming potential (GWP). This index includes both embodied and operational energy impacts. GWP uses carbon dioxide as a common reference to measure the global warming effects of several greenhouse gases. The CO₂ equivalence effect of these greenhouse gases is evaluated according to their greenhouse

potential (heat trapping capability) considering the time horizon of their atmospheric reactivity or stability. ATHENA™ uses the 100-year time horizon of the 2001 International Panel on Climate Change as equivalence index (Equation 3.6) (ATHENA 2004):

$$\text{CO}_2 \text{ Equivalent kg} = \text{CO}_2 \text{ kg} + (\text{CH}_4 \text{ kg} \times 23) + (\text{N}_2\text{O kg} \times 296) \quad (3.6)$$

All environmental impacts, including GWP, represent a cost to society that should be included in the overall costs of a project. Nevertheless, the monetary value of GWP is difficult to evaluate, since no carbon tax system is yet implemented throughout North America. It is therefore included in this study as a separate criterion, measured in kilograms of carbon emission.

The GWP of the various wall assemblies is judged by comparing LCA results calculated for the wall components by the ATHENA™ software, including products life-cycle "from cradle to grave" and HVAC energy use. For each assembly, the opaque walls are directly built through the input interface of the software. Some materials, not available through this interface, could be added as extra basic materials: spun-bonded polyolefin membrane, building paper, aluminium foil as well as wood and nails for the furring. Wood fibreboard is replaced by OSB in this environmental analysis since wood fibreboard is not included in the database.

Figure 3.5 shows the embodied GWP impact for the five wall assemblies, by component. Yet, the source of heating energy has a major effect on the overall impact, and therefore influences greatly the ranking of the assemblies in terms of GWP. Figure 3.6 shows this influence by comparing the final ranking of the assemblies for two sources of heating energy, electricity and natural gas. For electricity, the heating energy consumption in kWh evaluated for HVAC cost is used. For natural gas, an equivalent quantity is calculated using a conversion factor of 0.026 m³ of natural gas per 1 GJ. If the heating energy has a relatively low GWP impact, as it is the case for hydroelectricity, the embodied energy has a significant effect on the total life cycle impact. However, if the heating energy has a greater impact, as for natural gas, the GWP impact is greater for the assemblies with a lower insulation level. This difference varies greatly from one geographical situation to the other, depending on the primary energy sources used to produce electricity.

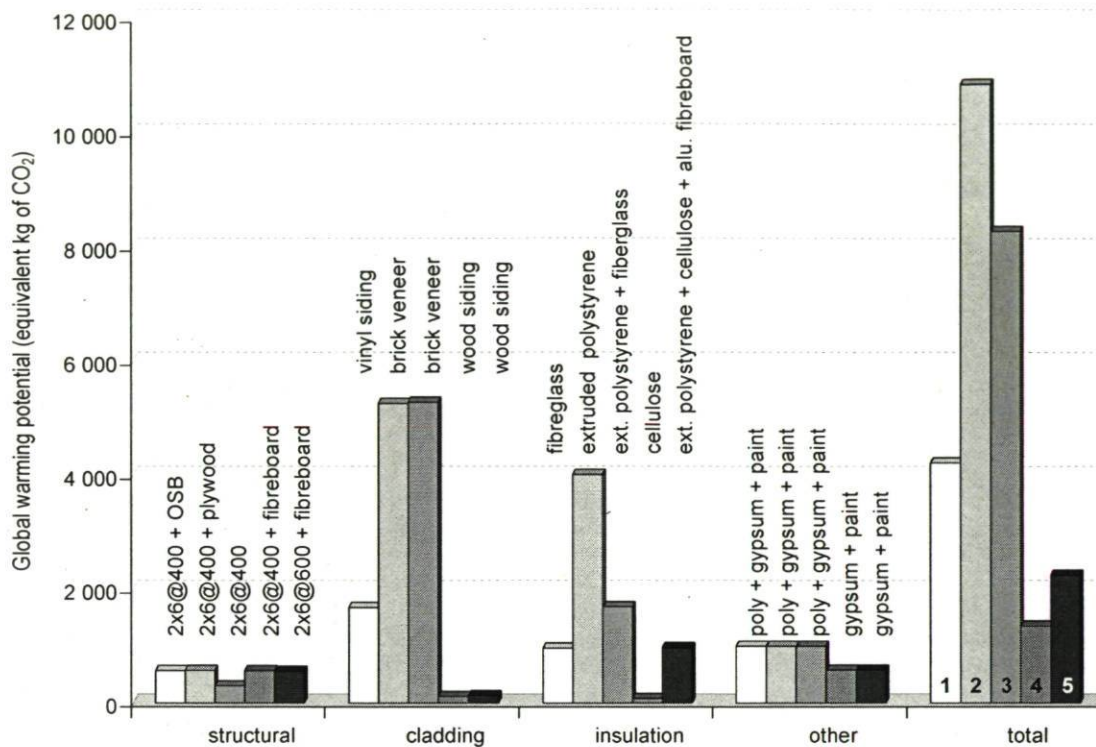


Figure 3.5 - Embodied GWP divided in groups of materials

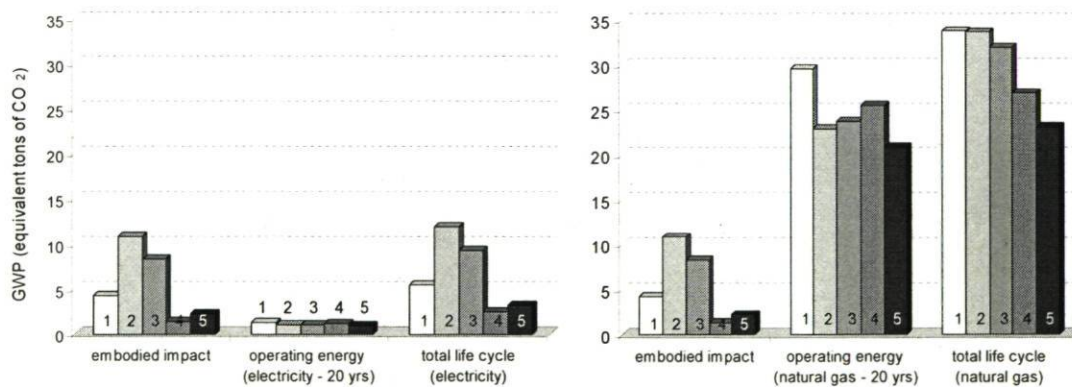


Figure 3.6 - GWP for two operating energy sources: a) electricity and b) natural gas

3.6.7 Overall evaluation

Table 3.6 summarises the evaluation of the five assemblies included in the case study with regards to the six criteria described.

Table 3.6 - Evaluation of the case study according to the performance criteria

Performance Criteria	units	Assemblies				
		1	2	3	4	5
1 Improved moisture management (0 to 5 scale)	-	3	2	1	4	1
2 Attenuation of sound transmission (OITC)	dB	25	40	40	26	32
3 Construction costs	\$ Can	16 406	40 774	34 962	21 594	23 744
4 Maintenance costs	\$ Can	-	-	-	-	-
5 HVAC costs for electricity, over 20 years	\$ Can	7 729	5 959	6 175	6 655	5 405
6 Environmental impact - GWP for electricity, over 20 years	kg of CO ₂	5 495	11 840	9 305	2 453	3 149

Assembly 1 shows the lowest construction cost as well as the worst acoustical and thermal performance, but average moisture management and environmental impacts. Assemblies 2 and 3 have higher construction costs since they use more expensive materials. The improved insulation leads to higher thermal resistance and lower HVAC cost and the brick veneer increases the sound attenuation. However, the environmental impact is more problematic in terms of production and disposal of the insulating materials and brick veneer. Assembly 4 shows a better environmental performance since it uses low embodied energy materials, such as wood and cellulose fibre products. The combination of its components in terms of vapour permeability leads also to a good hygrothermal behaviour. However, it does not achieve the same acoustical and thermal performance as assemblies 2 and 3. Assembly 5 improves on thermal resistance using additional exterior insulation and aluminium coated fibreboard as vapour barrier. The two features reduce the HVAC energy cost and improve to some extent the acoustical behaviour and environmental impact. Assemblies 3 and 5 display poor moisture management performance, mainly due to low-permeance materials located on both sides of the stud cavity, not allowing any drying in case of accidental wetting.

3.7 Discussion

The five wall assemblies included in the case study are considered as possible alternatives since they all respect the constraints defined through building code regulations for the studied context. Yet, a series of additional performance criteria are needed for the designer to choose the best suited configuration to a specific project. Six attributes are identified here as possible performance criteria to judge wall assemblies. The choice of these performance criteria, as well as their evaluation methods, depends on the specific context of the study. To use this approach in different contexts, the decision maker must redefine the constraints and criteria to ensure that all important attributes are appropriately considered for a given situation. The performance level of each assembly regarding the performance criteria could be evaluated using available analytical tools, experimental results or trade literature. This study shows how material properties and product characteristics must be accurately determined in order to obtain realistic evaluations. Moreover, new materials or products are not always included in tested assemblies or available databases. In some cases, material properties can be already present in the analytical tool database, while in other cases, approximations must be included to enable the evaluation process. For example, the integration of an aluminium-coated fiberboard as reflexive insulation, which is common in local wall designs, is difficult to integrate in the evaluation of moisture management, thermal resistance and environmental impacts.

The presented case study illustrates how the various performance evaluations are measured on unrelated scales. Even though all chosen performance criteria are assessed using quantitative evaluations, the results can not be simply added to obtain a single index since they refer to different scales. Some criteria concentrate on the occupant satisfaction using the product, while others aim at measuring the durability or the overall cost of the product. The case study also demonstrates how several acceptable wall assemblies may result in very different performance levels. Each wall assembly component affects several performance criteria simultaneously and in various ways. Even considering a given context, with fixed attributes such as design climate, price and source of energy, as well as building service-life time, the advantage of one design over another is not easy to assess. For

example, assembly 2 is the most expensive amongst these five choices, but it does not offer the best performance regarding all criteria.

These observations highlight the need for a multicriteria decision analysis tool to support the choice of design assemblies in specific contexts. Exploring different aggregation techniques, the authors are presently working towards the development of a multicriteria framework to enable the comparison of light-frame wood wall assemblies. The present paper identifies a set of constraints and performance criteria in regards to a specific context. Yet, the tool in development will be required to have the flexibility to be adapted beyond this case. In addition to the consideration of other contexts, the tool should accept different sets of performance goals, allowing, for example, the inclusion of qualitative criteria, such as aesthetics.

3.8 Conclusion

Working towards the development of a multicriteria framework to support the evaluation of improved factory-built wood-frame exterior walls, this paper presents the first step of the study, which includes a methodology for the quantitative evaluation of the different performance characteristics. The next step of this project aims at the development of the multicriteria decision analysis tool itself and will be presented in a following paper.

The present paper starts with the analysis of the decision situation defining measurable attributes allowing the evaluation of exterior wall assemblies. These performance attributes are then divided, either as constraints to identify feasible wall assemblies, or as criteria to compare these alternatives. The identified constraints are stud resistance to combined loading, in-plane shear resistance of the wall, fire performance, thermal resistance, air permeance of air-barrier components and mandatory moisture management measures. An evaluation mode to ascertain a pass-fail level for each of these constraints is done according to Canadian building codes and regulations. Furthermore, performance criteria are chosen to compare acceptable alternatives. These include moisture management performance, attenuation of sound transmission, construction, maintenance and HVAC-related energy costs, and environmental impact in terms of global warming potential. The assessment of each performance criterion involves the selection of an appropriate method of evaluation,

indications regarding required properties and the definition of a grading scheme summarising the relevant results.

The case study developed in this paper exemplifies these performance evaluations for a location in Quebec City. It also provides the opportunity to look at the impacts of specific wall components on the different performance attribute results. The performance evaluations obtained through this analysis show how changing an assembly component can result in a better performance regarding certain criteria, while simultaneously giving poorer results regarding others.

These contradictory results, in addition to the incompatibility between the measuring scales for the various criteria, highlight the need for an integrated tool to support the designer in this decision process. The next step of this project aims at the development of the multicriteria decision analysis tool itself to allow the comparison of light-frame wood wall assemblies. The development of a methodology based on a multicriteria aggregation has the advantage of considering a number of performance criteria simultaneously. It also brings the possibility of weighting the various criteria with respect to a specific design and building context.

Chapitre 4 - Definition of an environmental index for light-frame wood wall assemblies using Life-Cycle Assessment results

Résumé

Une approche d'analyse du cycle de vie est suivie pour définir un indice de performance pour considérer les impacts environnementaux dans le développement d'une évaluation multicritère comparant des murs extérieurs préfabriqués à ossature légère en bois. L'étude est appliquée à un exemple d'application comparant cinq compositions de murs extérieurs pour un bâtiment résidentiel situé à Québec, Canada. Pour les cinq alternatives, les inventaires de cycle de vie fournis par le logiciels ATHENA™ *Environmental Impact Estimator* sont agrégés selon trois modèles d'analyse d'impact: IMPACT 2002+, Eco-indicator 99 et TRACI. Les impacts relatifs des différents composants du mur et de l'énergie d'opération sur la performance environnementale des murs sont étudiés en comparant les indicateurs intermédiaires (midpoint) et les indicateurs de dommage (endpoint). L'étude mène à la conclusion que l'utilisation de l'indicateur de changement climatique peut être un indice environnemental approprié dans ce contexte spécifique.

Abstract

Following a life cycle assessment (LCA) approach, this study aims at defining an appropriate performance index to consider environmental impact in the development of a multicriteria evaluation comparing factory-built wood-frame exterior walls. The investigation is applied to a case study comparing five wall assemblies for the exterior wall of a residential building in Quebec City (Canada). For the five alternatives, the life-cycle inventory (LCI) provided by the ATHENA™ *Environmental Impact Estimator* software is aggregated using three different life-cycle impact assessment (LCIA) methods: IMPACT 2002+, Eco-indicator 99 and TRACI. The relative impacts of assembly components and of the operation energy source on the environmental performance of the assemblies are investigated by comparing midpoint and endpoint indicators calculated with the three LCIA methods. The study concludes to the acceptability, in this specific context, of using the climate change indicator as an appropriate environmental performance index.

4.1 Introduction

Light-frame wood construction is an integrated envelope system well adapted to low-rise buildings. Traditionally, it is the preferred choice for most residential buildings in North America due to its good structural, hygrothermal and economical performance. Over the last decade, wood, as a natural material with low embodied energy, developed a good reputation in terms of impact on the environment and wood-frame construction systems started raising interest in other parts of the world, such as Europe. Requirements relative to the building envelope performance vary with climate, as well as cultural and socio-economical contexts, and construction systems must therefore be adapted to each specific decision context. For each envelope system, the impact of a modification in the system needs to be evaluated according to several performance criteria simultaneously to avoid unexpected performance problems. An evaluation methodology taking into account simultaneously different performance characteristics is therefore useful for the design process.

A research project was undertaken to examine the overall evaluation of light-frame wood construction and the possible contribution of multicriteria decision analysis (MCDA) techniques as an input for its design (Frenette *et al.* 2008). Looking specifically at the choice of wall assemblies, the developed MCDA-based methodology identifies the relevant performance characteristics and organizes them in constraints and criteria. The constraints ensure the conformity of a wall assembly to building code requirements while the criteria are used to compare the performance of acceptable assemblies. The methodology also identifies pertinent evaluation methods to assert the performance of each alternative wall assemblies according to the chosen criteria. Finally, MCDA aggregation techniques are used to enable a comparison of the alternative designs for a specific context and the preference of the decision-maker (Frenette *et al.* 2009).

Over the last decade, the movement towards sustainability is making the reduction of the environmental footprint an evaluation criterion of growing importance. As for the other criteria included in an overall multicriteria comparison, the consideration of environmental impacts requires the definition of a representative evaluation index to be included in the

MCDA analysis. The objective of this paper is to explore the possibility of using life cycle assessment (LCA) to define an appropriate performance index allowing the integration of an environmental impact evaluation in a MCDA-based methodology comparing factory-built wood-frame exterior wall alternatives.

4.2 Literature review

The building industry is known to be an important environmental burden in terms of green house gas emission (IPCC 2007) and the ecological footprint of constructed facilities retains more and more the attention of building professionals across the world (Känzig and Jolliet 2006). Several environmental assessment tools for buildings have been developed using different approaches, considering various criteria and aggregation techniques. Recent publications present overviews of these tools (Ding 2008, Horvat and Fazio 2005, Lemaire 2006, Haapio and Viitaniemi 2006).

Trusty (2000) divides the environmental assessment tools for buildings into three levels: 1- product comparison and information sources 2- whole building or building assembly decision support tools, and 3- whole building assessment frameworks.

Compared to the tools of the first two categories which integrate mainly scientific sources of information, the third-level tools, i.e. whole building assessment frameworks, such as BREEAM or LEED, lead to more debate as they consider the overall sustainable performance of buildings including social, economical and environmental criteria. A recent review of these tools highlights their specificities and regional application (Ding 2008). Most discussions regarding these tools look at the choice of criteria, the regional application and the development of aggregation approaches. When relating to residential construction, most programs concentrate on reducing the operation energy of buildings (AEE 2003, BREEAM 2005, Minergie 2005), although new developments are broadening the criteria for house evaluation (CaGBC 2009, NAHB 2006).

In the present study, we look at the second-level tools: decision tools to define the direct environmental impact of buildings or building assemblies. These tools often provide quantitative information employed in the whole building assessment frameworks in third-

level tools. Several second-level tools are already available around the world for specific applications, often using regional data, such as ATHENA (Canada), LEGEP (Germany) or EQUER (France) (Athena 2008, Kohler *et al.* 2005, Peuportier 2009). In the framework of the PRESCO network, Peuportier et Putzeys (2005) compared nine of such European tools using case studies in order to assist and guide the development of these tools in the future.

Recent research on the environmental performance of buildings or building components applies a LCA approach in order to quantify scientifically the direct environmental impacts (Bilec 2007, Humbert *et al.* 2007, Borg 2001, Matasci 2006, Werner and Richter 2007). Within LCA, the need of aggregation of the different flows of substances from and to nature into relevant impact indicators led to the development of life-cycle impact assessment (LCIA) methods (Hertwich *et al.* 2002, Jolliet *et al.* 2005). Aggregation in LCIA may require normalisation, grouping and weighting, as reviewed by Finnveden *et al.* (2002). Besides, Sepällä *et al.* (2002) explore the similitude between some LCIA methods and multicriteria decision analysis approaches and consider the possible contribution of decision analysis techniques to promote a more structured and consistent approach in future development in LCIA, specially for the normalisation, grouping and weighting phases.

In addition to research on tools development, several studies utilise available tools to compare direct environmental impacts of constructions systems in different contexts (Peuportier 2001, Kassab *et al.* 2003, Koroneos and Kottas 2007, Meil *et al.* 2006, Nishioka *et al.* 2002, Vieira 2007). Several studies compare systems with similar thermal performance and different structural systems, e.g. concrete, steel or wood. These studies recognize the smallest environmental impact of renewable materials, such as wood (Meil *et al.* 2006, Perez-Garcia *et al.* 2005, Peuportier 2001). Little research has however looked specifically at comparing various envelope assemblies using wood light-frame structure, except Pierquet *et al.* (1998), who compared light-frame wood wall systems in France in terms of embodied energy and thermal performance. In these comparative studies, either CO₂ emissions or total energy consumption have often been used as performance index (Kassab *et al.* 2003, Peuportier 2001, Pierquet *et al.* 1998). To our knowledge, little work

has looked at how to integrate different environmental impact indicators in a multicriteria analysis of building components.

4.3 Methodology

Our methodology aims at using LCA principles to define an environmental impact index that could be included in our developed MCDA framework comparing factory-built wood-frame exterior wall alternatives. A case study, comparing the environmental performance of five alternative wall assemblies for the exterior walls of a residential building in Quebec City, Canada, exemplifies our approach.

As a first step, an exploration of actual assessment tools of the environmental impact of buildings and more specifically of residential building envelopes provides the state of use of LCA in this field. Next, following the LCA steps recommended by ISO 14040 standard (2006), the scope and objectives of the study are defined, specifying the functional unit (a representative unit of the main function of the system) and boundaries of the studied system (Jolliet *et al.* 2005). A life-cycle inventory (LCI) is then calculated for each alternative using the ATHENA™ Environmental Impact Estimator software (2009) (ATHENA) with included North-American databases (US LCI and ATHENA databases). For the aggregation of these LCI results, different life-cycle impact assessment (LCIA) approaches are explored and compared at midpoint (or direct impact) and endpoint (or damage) levels: IMPACT 2002+, Eco-indicator 99 and TRACI (Jolliet *et al.* 2003, Goedkoop and Spriensma 2000, Bare *et al.* 2003). Finally, conclusions relative to a specific example are drawn and the possibility to derive a single index as an environmental evaluation of the alternatives to be used in an overall MCDA-analysis of light-frame wood wall assemblies is discussed.

4.4 Life cycle Assessment

In this study, life cycle assessment (LCA) is used to evaluate the environmental impact of various alternatives in order to enable the integration of an environmental criterion in a multicriteria comparison of exterior light-frame wood wall assemblies.


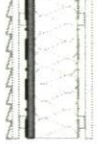


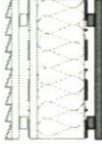
LCA identifies and quantifies the environmental input and output associated with a product in relation to its main function, considering all stages of its life-cycle. LCA can therefore help in the development of a new product by identifying the elements or life-phases responsible for the largest impact on the environment, or the comparison of different products or services (Jolliet *et al.* 2005). Documented in the ISO standards 14040 through 14044, LCA includes four phases: Goal and scope definition, Life-cycle inventory analysis, Life-cycle impact assessment and Life-cycle interpretation (ISO 2006).

4.4.1 Goal and scope definition

The first phase of LCA includes the definition of the goal of a study, and the specification of its scope. The main function of the system to be studied is then analysed to define a representative unit of this function. The definition of this functional unit allows a meaningful comparison of products by ensuring they all fulfill the same function. Furthermore, the system boundaries are defined to determine the range of impacts considered (Jolliet *et al.* 2005).

In this study, the main objective of the LCA is to explore the possibility of using a representative index to compare the environmental impact of light-frame wood wall assemblies. The results are to be integrated in a multicriteria analysis providing information to the building professional during the design process. In this research, the LCA analysis is applied to a case study comparing five different light-frame wood wall assemblies (Table 4.1), described in more details in Frenette *et al.* (2008).

Table 4.1 - Wall assemblies for the case study(adapted from Frenette *et al.* 2008)

	External Cladding	Water-resistive membrane and sheathing	Framing	Insulation	Vapour barrier and interior finishing
Assemblies					
1	vinyl siding + furring	building paper + OSB	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	glass fibre batt (140 mm)	polyethylene sheet + furring + gypsum board
2	brick veneer	spun bonded polyolefin membrane + plywood	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	extruded polystyrene (140 mm)	polyethylene sheet + gypsum board
3	brick veneer	spun bonded polyolefin membrane + 25 mm extruded polystyrene	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	glass fibre batt (140 mm)	polyethylene sheet + gypsum board
4	wood siding + furring	building paper + asphalt-coated wood fibreboard	38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	blown cellulose (140 mm)	kraft paper + gypsum-fibre board
5	wood composite siding + furring	spun bonded polyolefin membrane + 25 mm extruded polystyrene + OSB	38mm x 140 mm @ 600mm o.c.	blown cellulose (140 mm)	aluminium-coated fibreboard + gypsum board

The functional unit includes 200 m² of exterior wall for a 2-storey residential building located in Quebec City, Canada. It considers electrical heating and an expected life-span of the building of 60 years. The main function of this unit is to provide a durable protection allowing the creation of a living space, respecting building code requirements. It includes minimal insulation and air-tightness levels to enable the heating of the space at comfortable temperatures, as well as minimum structural resistance, fire protection and moisture management to ensure the durability of the building. Secondary functions include, amongst others, reduction of heating and maintenance costs, attenuation of exterior noise, protection against over-heating in summer, and improved moisture management. In this study, dissimilarities regarding secondary functions, which need to be considered to insure a fair comparison of the alternatives, are taken into account through the overall multicriteria analysis.

The boundaries of the system include the impacts directly linked to the construction and the maintenance of the opaque section of the wall, as well as the portion of heating due to heat losses by conduction through the wall. For construction and maintenance of the wall, the analysis includes resource extraction, manufacturing process, related transportation, on-site construction, demolition and disposal of solid waste.

Furthermore, additional boundaries are inherent to the LCA software ATHENA chosen for this study. The geographical source of each product is determined according to regional market share analyses, although all offshore products are treated as though they were manufactured in North America. Regarding heating energy, the model considers the extraction, process, transportation and combustion of the fuel used as energy source, but not the impact associated with the fabrication, transport and disposal of the residential furnace or boiler. Regional electrical grid mix is considered when calculating electricity-related energy associated with the manufacturing of basic materials, products and building components, the construction and maintenance of a building, and the annual operation energy (Athena 2008).

4.4.2 Life cycle inventory analysis

Once the objective and scope of the LCA are defined, the next step is to quantify the environmental impact directly linked to the life cycle of a functional unit for each alternative. A life-cycle inventory (LCI) analysis evaluates the quantities of material, substance and energy going in and out of the system, and this is studied over the life cycle of the system (Jolliet *et al.* 2005). Even though it is based on simple principles, this inventory requires extensive work. Fortunately, databases are being developed and continuously improved around the world to help analysts in this strenuous work. A task force from the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative reviewed the databases available in 2006 (Curran 2006). Amongst them, Ecoinvent, a Swiss initiative joining various sources to build a centralised database, is recognised as the most extensive LCI database available. It contains industrial life cycle inventory data on energy supply, resource extraction, material supply, chemicals, metals, agriculture, waste management services, and transport services (Althaus *et al.* 2007). Although aiming at building an internationally recognised database,

most of the data available in the latest version of Ecoinvent is still much more detailed for the western European countries than for other parts of the world. Although a less extensive database, ATHENA LCI provides specialised information on Canadian and North-American building materials and construction processes (Athena 2008).

Several LCA tools are available to calculate the inventory of specific processes using LCI databases. The most general tool is probably SimaPro, which asks the analyst to build his own system by assembling materials and processes, and to choose amongst different databases and LCIA models (PRÉ 2004). Its detailed simulation allows for transparent sensitivity analyses. ATHENA Environmental Impact Estimator software (ATHENA) is a LCA tool developed to calculate the environmental impact of buildings in North-America, using its own LCI database (Athena 2008). In this specialised tool, general processes are already integrated in the analysis and do not need to be introduced by the analyst. For example, the use of a structural beam in ATHENA includes automatically all basic materials and processes needed to produce, install, maintain and dispose of the beam. In this study, the analysis is performed with the ATHENA software due to its integrated LCI database, which is the most adapted to the context studied in this paper.

ATHENA (2009) provides a cradle-to-grave LCI profile accounting for the whole life of the building, including material harvest, manufacturing and transportation of components, on-site construction and disposal. Its LCI results include four main categories of impact: resources extraction (including primary energy), emissions of substances in the air, emissions of substances in water, and solid waste transported to landfill. It does not yet include land use effects related to resource extraction and manufacturing, nor does it evaluate substance emissions to soil or what happens over time in the landfill. Site development issues, such as land disturbance, ecosystem alteration and destruction of vegetation, associated with the construction are not included in the analysis. In this study, site development issues could be considered similar for all alternatives, and do not need to be included in the comparison.

The case study is modelled through the user-friendly ATHENA interface, where a project is defined for each assembly including the opaque section of the exterior walls as well as the

annual operation energy. Most materials are specified as part of the wall envelope. Nevertheless, as described in Table 4.2, some materials, such as spun-bonded polyolefin membrane, building paper, aluminium foil and wood furring are not available through this interface and are added as "extra basic materials". In these cases, ATHENA software calculates only cradle-to-gate LCI since it cannot simulate associated on-site construction activity and disposal, not knowing the specific use of these components. Other materials are not available in the ATHENA database and are replaced with the most similar products available: wood fibreboard is replaced by oriented strand board (OSB), spun-bonded polyolefin membrane by polypropylene, Kraft paper by tape paper, composite-wood siding by wood siding, and gypsum-fibre board by gypsum board. According to the sensitivity analysis, these approximate replacements seem acceptable considering the small relative impact of these elements on the total impact. The operation energy represents only the portion of the annual heating energy due to heat losses by conduction through the wall, estimated using steady-state calculation in a first part of this study (Frenette *et al.* 2008).

ATHENA lists the total amount of building materials included in the analysis for each project (Table 4.3). This list includes additional materials calculated by the software as normal waste and for a regular maintenance, according to region-based regular maintenance cycle for the various materials (Morrison Hershfield Ltd 2002).

Following the analyses, the inventory data is processed and results in several long tables of absolute values describing flows from and to nature. Generally speaking, LCI results should be considered with caution since such results are a compilation of substances flows and not of environmental impacts. In fact, the LCI tables include the first implicit aggregation since the emissions of a same substance are added without considering the specific environment in which these emissions occur. Although commonly used, this method of aggregation is a simplification because the impact of a substance is not an intrinsic property but depends on the environment receiving this substance (Jolliet *et al.* 2005)

Table 4.2 - Simulation of the case study in ATHENA software

	Components	defined as:	in:
Assembly 1	vinyl siding	(same)	envelope
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	building paper	#15 organic felt	extra basic materials
	OSB	(same)	wood stud wall
	wood studs @ 400mm o.c.	(same)	wood stud wall
	glass fibre batt (140 mm)	(same)	envelope
	polyethylene 6 mil	(same)	envelope
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	gypsum board	(same)	envelope
	annual heating energy	7060 kWh of electricity	annual operation energy consumption
Assembly 2	brick veneer	(same)	envelope
	spun-bonded polyolefin membrane	polypropylene	extra basic materials
	plywood	(same)	wood stud wall
	wood studs @ 400mm o.c.	(same)	wood stud wall
	extruded polystyrene (140 mm)	(same)	envelope
	polyethylene 6 mil	(same)	envelope
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	gypsum board	(same)	envelope
	annual heating energy	5443 kWh of electricity	annual operation energy consumption
	Assembly 3	brick veneer	(same)
spun-bonded polyolefin membrane		polypropylene	extra basic materials
extruded polystyrene (25 mm)		(same)	envelope
wood studs @ 400mm o.c.		(same)	wood stud wall
glass fibre batt (140 mm)		(same)	envelope
polyethylene 6 mil		(same)	envelope
wood furring		green small lumber + steel nails	extra basic materials
gypsum board		(same)	envelope
annual heating energy		5640 kWh of electricity	annual operation energy consumption
Assembly 4		wood siding	wood bevel siding (cedar)
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	building paper	#15 organic felt	extra basic materials
	wood fiberboard	OSB	wood stud wall + extra basic materials
	wood studs @ 400mm o.c.	(same)	wood stud wall
	blown cellulose (140 mm)	(same)	envelope
	reinforced kraft paper	paper tape	extra basic materials
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	gypsum-fibre board	gypsum board	envelope
	annual heating energy	6078 kWh of electricity	annual operation energy consumption
Assembly 5	composite-wood siding	wood bevel siding (pine)	envelope
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	spun-bonded polyolefin membrane	polypropylene	extra basic materials
	extruded polystyrene (25 mm)	(same)	envelope
	wood studs @ 400mm o.c.	(same)	wood stud wall
	blown cellulose (140 mm)	(same)	envelope
	aluminium-coated fibreboard	OSB and aluminium	extra basic materials
	wood furring	green small lumber + steel nails	extra basic materials
	gypsum board	(same)	envelope
	annual heating energy	4937 kWh of electricity	annual operation energy consumption

Table 4.3 - Bill of materials included in the ATHENA simulation for the case study

bills of materials	units	assembly	assembly	assembly	assembly	assembly
		1	2	3	4	5
mortar	m ³		5,7	5,7		
nails	metric tons	0,045	0,035	0,047	0,040	0,045
cold rolled sheet	metric tons		0,040	0,040		
small dimension green softwood lumber	m ³	2,9	0,7	0,7	2,9	2,9
small dimension kiln-dry softwood lumber	m ³	4,9	4,9	4,9	4,9	3,9
oriented strand board (9mm basis)	m ²	273			273	479
softwood plywood (9mm basis)	m ²		273			
batt glass fiber insulation (25mm basis)	m ²	1114		1114		
extruded polystyrene (25mm basis)	m ²		1123	204		204
blown cellulose (25mm basis)	m ²				1124	1124
6 mil polyethylene	m ²	208	208	208		
1/2" regular gypsum board	m ²	215	215	215	215	215
joint compound	metric tons	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
paper tape	metric tons	0,003	0,003	0,003	0,108	0,003
water based latex paint	litre	301	301	301	602	602
polypropylene	metric tons		0,018	0,018		0,061
#15 organic felt	m ²	670			670	
aluminium	metric tons	0,024				0,011
vinyl siding	m ²	569				
Ontario standard brick	m ²		206	206		
cedar wood bevel siding	m ²				699	
pine wood bevel siding	m ²					699

4.4.3 Life cycle impact assessment

The third phase of LCA, life cycle impact assessment (LCIA), aims at evaluating the implication of the flows from and to nature described in LCI results. In practice, LCIA must determine the relative significance of each of the inventory item in order to aggregate the LCI results in a small set of indicators (Hertwich *et al.* 2002). This is not an easy task as this aggregation must compare the relative impact of very different substances. According to ISO 14042, it implies two mandatory steps: the classification of LCI results into impact categories and the calculation of an indicator for each category by multiplying each LCI result by a characterisation factor.

In the past, different ways in selecting impact categories led to two main approaches in LCIA (Jolliet *et al.* 2004). The first approach developed the so-called midpoint categories by grouping all the elements resulting into a similar environmental impact, for example, a

midpoint category could regroup all substances influencing the concentration of ozone of the stratosphere. This approach aims at limiting uncertainties by restricting the quantitative aggregation to an early stage in the cause-effect chain. The second approach seeks to model the cause-effect chain up to damage evaluations, which tends to lead to higher uncertainties. This approach developed the endpoint (or damage) categories representing quality changes of the environment, such as impact on human health or impact on ecosystems, leading to more environmentally relevant indicators. Recently, the development of new LCIA methods tried to take the advantages of both approaches by grouping midpoint categories which lead to similar damage and linking them to endpoint categories. Figure 4.1 presents midpoint and endpoint indicators according to IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.* 2003). The characterisation of environmental impacts is still under development and several groups of experts work under the umbrella of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative on controversial issues, such as toxic and ecotoxic impacts, metal impact modeling, water resource, land use, acidification, indoor exposure, etc. (Hauschild *et al.* 2008, Hertwich *et al.* 2002, Bayart *et al.* 2009, Milà i Canals *et al.* 2007).

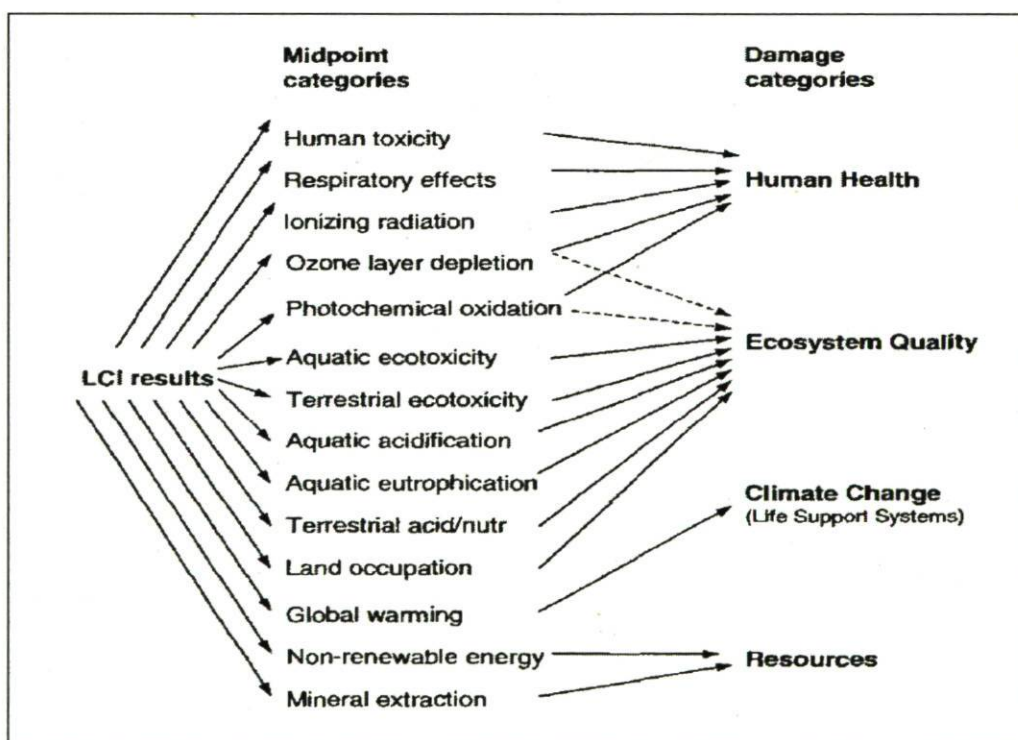


Figure 4.1 - Overall scheme of the IMPACT 2002+ framework, linking LCI results via the midpoint categories to damage (or endpoint) categories (from Jolliet *et al.* 2003)

ATHENA uses the TRACI LCIA model to aggregate the LCI results into seven midpoint indicators (Bare *et al.* 2003). In addition, this study looks at two other LCIA models suggesting midpoint and endpoint indicators: IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99 (Jolliet *et al.* 2003, Goedkoop and Spriensma 2000). For these two LCIA models, the ATHENA LCI results are multiplied by the characterisation factors through spreadsheet calculations to quantify the indicators recommended by these models.

The five assemblies of the case study are compared using the midpoint indicators for the three LCIA methods in Figure 4.2. Since the indicators have different scales, the relative impacts are always compared to the maximum for each indicator.

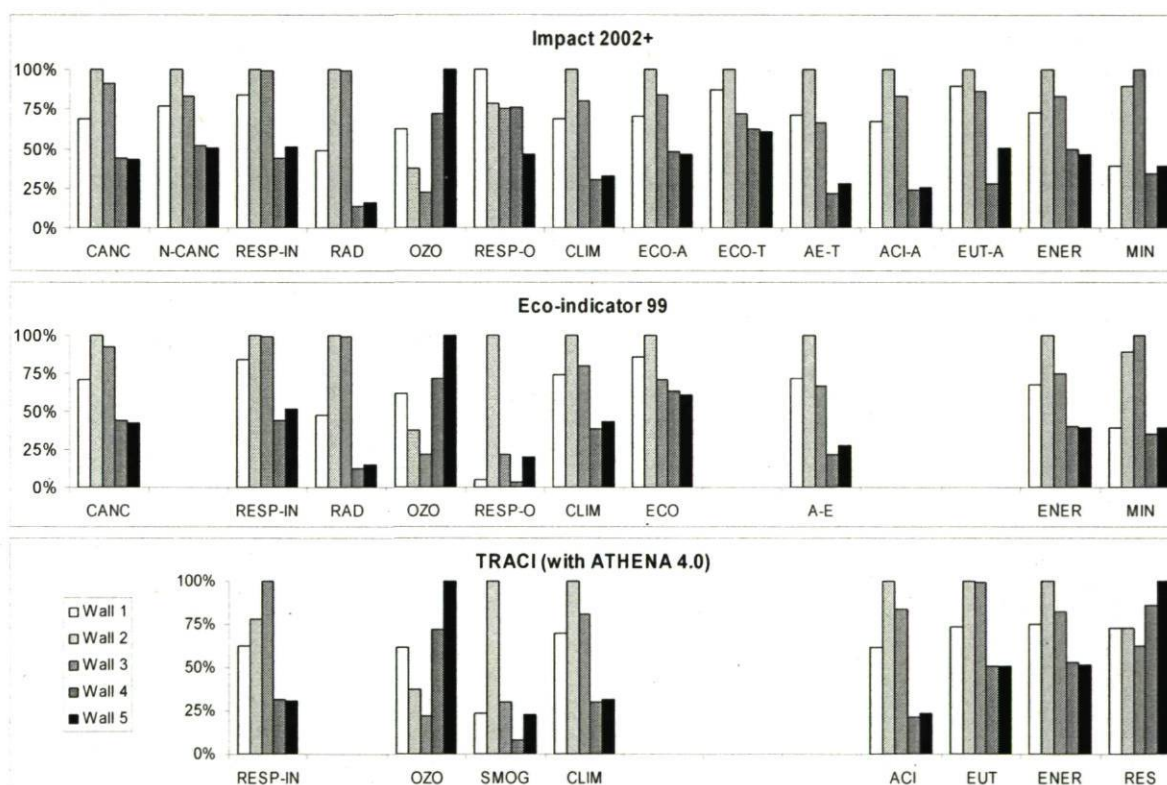


Figure 4.2 - Comparison of the case study wall assemblies according to midpoint indicators for three LCIA methodologies.

IMPACT 2002+: CANC: Carcinogenic effects, N-CANC: Non-carcinogenic effects, RESP-IN: Respiratory (inorganic), RAD: Ionizing radiation, OZO: Ozone layer depletion, RESP-O: Respiratory (organic), CLIM: Climate Change, ECO-A: Aquatic ecotoxicity, ECO-T: Terrestrial ecotoxicity, AE-T: Terrestrial acidification/nitrification, ACI-A: Aquatic acidification, EUT-A: Aquatic eutrophication, ENER: Non-renewable energy, MIN: Mineral extraction. **Eco-indicator 99:** CANC: Carcinogens, RESP-IN: Respiratory inorganic, RAD: Ionizing radiation, OZO: Ozone layer depletion, RESP-O: respiratory organic, CLIM: Climate Change, ECO: ecotoxicity, ENER: Non-renewable energy, MIN: Mineral extraction. **TRACI:** RESP-IN: HH Respiratory effects potential, OZO: Ozone depletion potential, SMOG: Smog potential, CLIM: Climate Change, ACI: Acidification potential, EUT: Eutrophication potential, ENER: Primary energy consumption, RES: Weighted resource use.

As can be seen on Figure 4.2, most indicators agree on the relative impacts of the five alternatives: walls 2 and 3 causing the largest impact, walls 4 and 5 the smallest and wall 1 being usually in between these two extremes. The ozone layer depletion indicator is consistent and distinctly different from other indicators in all three LCIA methods, while few other indicators produce slightly different rankings of the wall assemblies in various methods. For example, respiratory organic in IMPACT 2002+ gives a very different ranking from respiratory organic in Eco-indicator 99 or smog in TRACI (which describes the same midpoint category under a different name). Indeed, these LCIA methods are sometimes based on different assumptions, which lead to different characterisation factors for the same substance. In this case, the difference is based on the characterisation of hydrocarbon and volatile organic compounds (VOC) emissions in the air.

An additional aggregation using endpoint indicators is possible with IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99, but not with TRACI. Figure 4.3 presents the contribution of the midpoint indicators to the corresponding endpoint indicators for each method. For IMPACT 2002+, the endpoint damage indicators include human health damage in DALY (Disability Adjusted Life Years), impact on ecosystem quality measured in PDF.m².yr (Potentially Disappeared Fraction over a square meter during one year), climate change in kgeqCO₂ (equivalent kilograms of carbon dioxide) and resources in MJ (Mega joules of energy). IMPACT 2002+ does not include the contribution of the aquatic acidification and eutrophication in the ecosystem quality endpoint indicator since these characterisation factors are still under development (Jolliet *et al.* 2003). Furthermore, IMPACT 2002+ keeps the midpoint indicator on climate change as a separate endpoint indicator due to the lack of scientific information to quantify its contribution to the impacts on human life and ecosystem quality (Jolliet *et al.* 2003). On the contrary, Eco-indicator 99 integrates climate change in the human health endpoint. According to Figure 4.3, the midpoint indicators which were not in agreement between the two LCIA methods (ozone layer depletion and respiratory organics) have a negligible contribution to the human health endpoint indicator which is dominated by the respiratory inorganic midpoint category.

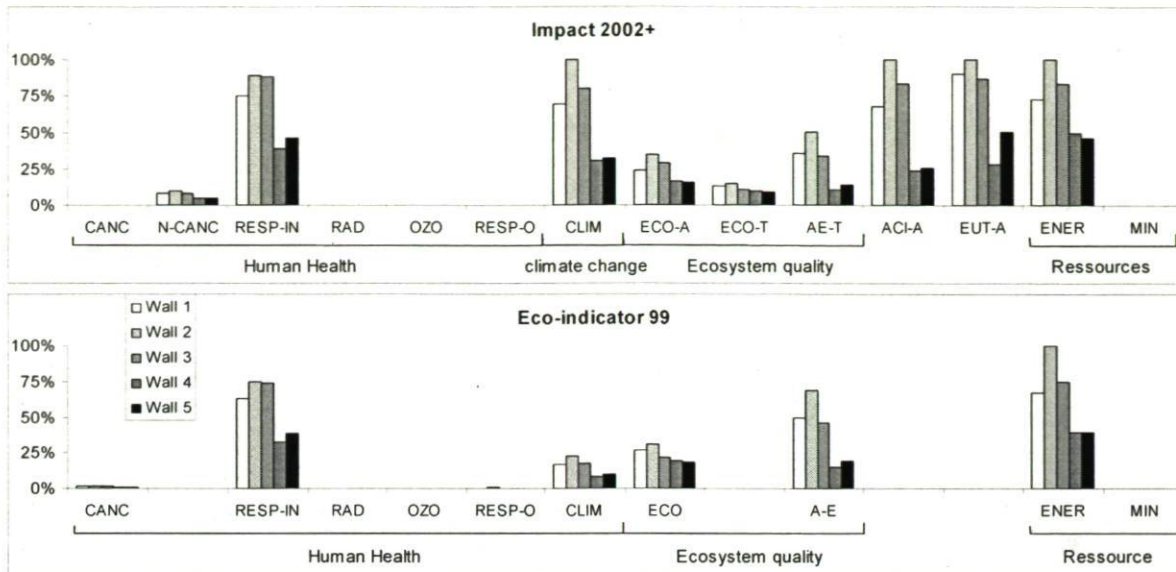


Figure 4.3 - Comparison of the case study wall assemblies according to midpoint indicators regarding their contribution to the endpoint indicators.

IMPACT 2002+: CANC: Carcinogenic effects, N-CANC: Non-carcinogenic effects, RESP-IN: Respiratory (inorganic), RAD: Ionizing radiation, OZO: Ozone layer depletion, RESP-O: Respiratory (organic), CLIM: Climate Change, ECO-A: Aquatic ecotoxicity, ECO-T: Terrestrial ecotoxicity, AE-T: Terrestrial acidification/nitrification, ACI-A: Aquatic acidification, EUT-A: Aquatic eutrophication, ENER: Non-renewable energy, MIN: Mineral extraction. **Eco-indicator 99:** CANC: Carcinogens, RESP-IN: Respiratory inorganic, RAD: Ionizing radiation, OZO: Ozone layer depletion, RESP-O: respiratory organic, CLIM: Climate Change, ECO: Ecotoxicity, ENER: Non-renewable energy, MIN: Mineral extraction.

Figure 4.4 illustrates the final ranking according to the endpoint indicators. For Eco-indicator 99, the climate change midpoint indicator, included in human health, is also presented in this figure to allow the comparison with the damage indicators. The ranking is similar for all endpoint indicators, confirming the limited influence of the midpoint indicators regarding ozone layer depletion and respiratory organic on the total environmental footprint reported by these LCIA.

Figure 4.4 shows the relative contribution of the main components included in these wall assemblies to the overall impact for each endpoint indicator. The comparison shows that some external claddings (brick and vinyl) and insulation materials (glass fibre and extruded polystyrene) have the greatest influence on the final embodied impact of the wall assemblies. Indeed, for all the alternatives of the case study, the structural system uses wood framing, which has a relatively small environmental impact compared to other building materials.

Some differences can be noticed by comparing the two LCIA methods. An important difference concerns the relative impact of external cladding between assembly 1 (vinyl siding) and assemblies 2 and 3 (brick veneer) on the ecosystem quality. By analysing the LCI results, we observe that this difference is due to dissimilar characterisation factors between the two methods regarding the volatile organic compounds (VOCs) emitted by producing vinyl siding. Another difference concerns the relative importance of the framing regarding climate change between the two LCIA methods. This variation is due to emissions in the air of biogenic carbon monoxide, which is considered to be contributing to climate change by Eco-indicator 99, but not by IMPACT 2002+. No further information is provided in the ATHENA LCI results regarding the cause of these emissions.

In addition to embodied impact, exterior walls also influence the overall environmental footprint of a building through the operation energy, here mainly due to heating. In this study, since the presence of a sufficiently airtight air-barrier layer is a constraint defined by building code regulations. Therefore, even though air leakage plays often a major part in the overall building behaviour in terms of use of energy, the impact of this factor is judged as being equal for all wall alternatives, and is therefore not included in this analysis. Only the impact due to dissimilar thermal resistance is evaluated by considering the heat transfer by conduction through each wall. A steady-state calculation, using the effective RSI value of the wall in combination with climate data, is considered sufficient for this type of building evaluation in Quebec climate context. Figure 4.4 compares the environmental impact of the five alternatives when including 60 years of operation energy (due to conductive heat loss) in addition to the embodied impacts. The case study considers an electric heating system, which is generally the case in Quebec (OEE 2005). In this jurisdiction, hydro-electricity is the main contributor to the electric grid mix. As shown in Figure 4.4, the impact of this type of operation energy is relatively small regarding the endpoint indicators. The relativities in the impact of the alternatives do not change and walls 2 and 3 are still evaluated to have the largest impacts.

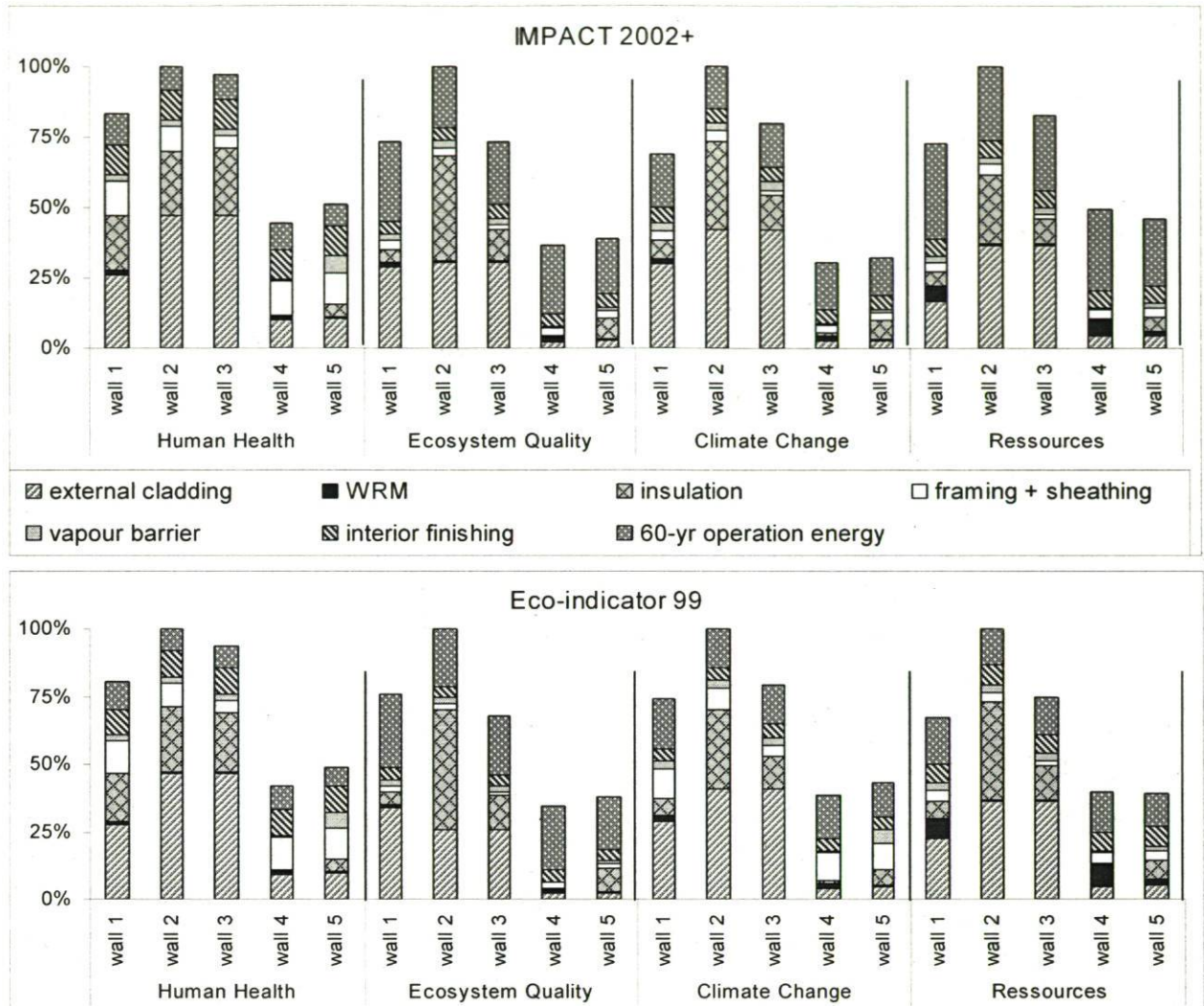


Figure 4.4 - Comparison of the case study wall assemblies according to endpoint indicators for two LCIA methodologies: IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99.

A sensitivity analysis provides a better understanding of these results and defines the relative importance of the chosen assumptions. It seems important to evaluate the impact of the choice of electricity as energy source because 15% of the houses in Quebec are heated with natural gas or heating oil (OEE 2005). As shown in Figure 4.5, the environmental impact of 60 years of operation heating (due to conductive heat loss) becomes significant when using natural gas or heating fuel. With these energy sources, wall 1, which has the smallest thermal resistance of all alternatives, shows the largest impact regarding all endpoint indicators. On the contrary, wall 5, which is the best thermally insulated assembly, has the smallest impact. The only exception to these observations is the small impact of

heating oil on the ecosystem quality indicator for Eco-indicator 99, as opposed to IMPACT 2002+. This difference is due to IMPACT 2002+ taking into account the large emissions of aluminum and barium in water associated to the use of heating oil. These emissions affect greatly the ecosystem quality indicator in IMPACT 2002+, but are not considered in Eco-indicator 99. However, metal impact assessment within LCIA is generally recognised as a weak point since assessment models were originally developed for organic contaminants and are not yet adapted for metals (Aboussouan *et al.* 2004).

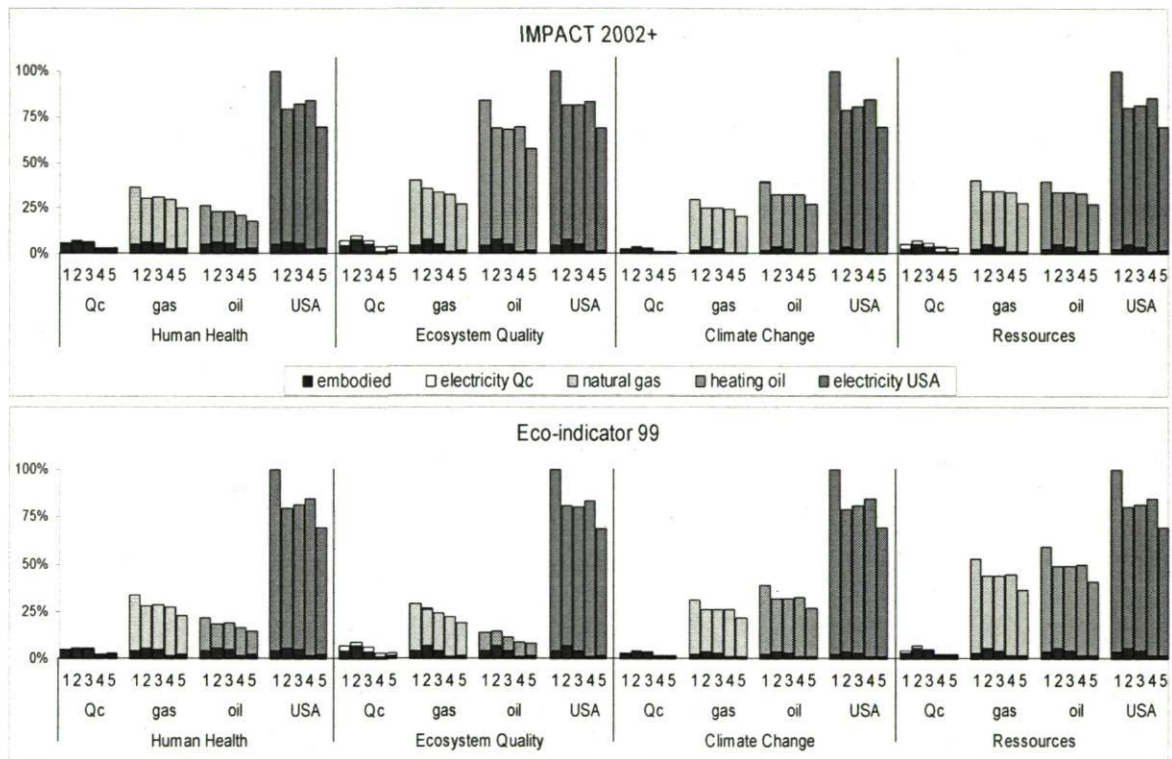


Figure 4.5 - Comparison of the case study wall assemblies considering the operation energy according to endpoint indicators for IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99

(Operation energy: Qc: Quebec electricity grid mix, gas: natural gas, oil: heating oil, USA: USA electricity grid mix).

In addition, the sensitivity analysis on the boundary of our system leads to enlarging the electricity grid mix to North America. Indeed, in terms of electricity, the use of a local grid mix is debatable as country grids are interconnected: the electric energy saved in Quebec can be sold to the United States, reducing the production of electricity based on the American grid mix, while increasing electric consumption in Quebec could lead to augmenting electricity imports from the US. In Athena, no electricity grid mix is available

for North America as a whole. Yet, Figure 4.5 illustrates how the consideration of the American electricity grid mix for the operation energy increases considerably the environmental impacts, and positions, once again, wall 1 as having the greatest impact and wall 5 as having the least environmental impact

4.4.4 Life cycle interpretation phase

The fourth phase of LCA is the interpretation of the results in order to derive recommendations and conclusions. This paper continues with applying the fourth phase to the study example of the 5 exterior light-frame wood wall assemblies described earlier.

According to the LCA results in terms of embodied impacts, walls 2, 3, and to a lesser extent wall 1, cause the largest impact, mainly due to the manufacturing of the exterior claddings and insulation materials. Indeed, the manufacturing phases of brick veneer, vinyl cladding, extruded polystyrene and fibreglass insulation create more impact considering all endpoint indicators than the production of wood-based materials in the present context.

Regarding the total impact including operation energy, the results depend greatly on the energy source. For electrical energy with a large part of hydro-electricity, 60 years of operation energy (due to conductive heat loss) represent less than 30% of the embodied energy. On the contrary, when considering the American electricity grid mix, natural gas or heating oil, 60 years of operation energy (due to conductive heat loss) represent up to 90% of the total impact. For these energy sources, the ranking of the alternatives depends therefore greatly on their thermal performance.

It is also interesting to note the relative impact of the different insulation materials in terms of their embodied impact in relation to the reduction of heating energy. On the one hand, even though some insulation materials have much larger embodied environmental impact than others, these impacts seem relatively small compared to the saving of operation energy they generate. On the other hand, the more energy-efficient the buildings and the cleaner the energy-source, the greater becomes the relative influence of the embodied impact of the components, such as insulation materials, on the overall environmental impact.

4.5 Integration in MCDA evaluation

In this study, the MCDA framework developed to compare wall assemblies requires the definition of one indicator representing the environmental performance of each alternative. This indicator can be measured on an ordinal scale for some MCDA approaches, such as in outranking methods, but needs to be transferred into a cardinal scale for other approaches, such as single-criterion synthesizing methods (Guitouni and Martel 1998).

The mandatory phases of LCIA aggregate the LCI results in three or four damage indicators. These different damage categories cannot be directly compared since they relate to different units. Besides, as discussed by Mettier and Hofstetter (2005), if no additional interpretation aid is available to support the decision-maker, he tends to assign an equal importance to every indicator and, thereby, adopt the least thoughtful way of aggregating.

Normalisation and weighting

The development of a single eco-indicator requires two optional phases of LCIA: normalisation and weighting. Normalisation relates the magnitude of the impact in the different indicators to reference values, while weighting converts indicator results by using numerical factors based on value choices (Finnveden *et al.* 2002). IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99 propose similar methods to normalise each unit of damage to the number of equivalent persons creating this damage during one year. As an example, for the human health indicator measured in DALY (Disability Adjusted Life Years), IMPACT 2002+ proposes a normalisation factor of $7,7 \cdot 10^{-3}$ DALY/pers-yr for Europe, which represents the overall DALYs due to the annual emissions of all related pollutants in Western Europe divided by the European population. This normalisation is disputable although it can help gauge the importance of the result according to the total emissions produced annually in an industrialised society. The aggregation of the damage indicators into a single environmental index is even more controversial, since it implies a subjective weighting of these impacts. Even though Eco-indicator 99 proposes a mixing triangle concept to define the relative weight of its three damage indicators, the ISO standard 14042 and several LCIA, such as IMPACT 2002+, recommend to avoid this aggregation, preferring to provide the information regarding the four damage indicators to the decision-maker (Jolliet *et al.* 2003).

In our study, the damage indicators from both LCIA methods provide very similar ranking for the five alternative wall assemblies. In this specific context, the mixing triangle is not necessary as it would recommend wall assembly 4 as the preferable solution for whatever value choice, on the whole area of the triangle. In such situation, it seems acceptable to use only one damage indicator, such as the climate change indicator calculated by the ATHENA software, to compare these wall assemblies in the MCDA evaluation. This approach is preferred by the authors since it does not imply representation of all environmental damages by a single index, and thus is retained for this paper. Other studies have used green house gas emissions as an environmental indicator, yet this choice does not seem to be documented (Kassab *et al.* 2003, Peuportier 2001, Winistorfer *et al.* 2005).

The relative impact of using only one of the four damage indicators depends on the MCDA aggregation approach (Frenette *et al.* 2009). For outranking approaches, if no indifference or preference thresholds are specified, the overall ranking depends only on an ordinal ranking of the alternatives regarding each criterion, and the climate change indicator could be used as a surrogate for overall environmental impact in this specific example. However, for single criterion synthesizing aggregation approach, the local evaluation of each alternative needs to be addressed on a cardinal scale. The choice of one damage indicator would therefore bring a bias since the score would be somewhat different if another damage indicator would have been chosen. Even so, the similitude of the relative impact regarding all damage indicators in this specific study supports the decision of using only the climate change indicator.

In cases where results would indicate dissimilar ranking according to the different damage indicators, the mixing triangle proposed by Eco-indicator 99 could be used to show the influence of weighting on a final ranking of the alternatives, linking possible results to the value judgement of the decision-maker.

4.6 Discussion

This LCA study compares the environmental impact of five alternative wall assemblies using LCI results provided by the ATHENA software to calculate midpoint and endpoint indicators using three different LCIA methods. For this example, all LCIA endpoint

indicators provide a similar ranking of the alternatives, despite some differences regarding few midpoint indicators. According to these results, some building materials, such as brick, vinyl, glass fibre insulation and extruded polystyrene, constitute most of the wall embodied impact. The manufacturing of these building materials creates much larger environmental impacts than the manufacturing of wood products in the present context. This result is similar to the findings of other studies (Meil *et al.* 2006, Perez-Garcia *et al.* 2005, Werner and Richter 2007). The main drawback of using ATHENA lies in the difficulty of identifying in more details the major parameters influencing these important environmental damages.

The LCA results are here intended to be included in an overall MCDA evaluation to enable the consideration of the difference in performance of the alternatives according to other secondary functions. If the LCA results were to be used alone, the secondary functions would need to be considered appropriately within the system boundaries.

This study investigates the direct impact of the choice of an exterior wall assembly and does not intend to provide a complete study of a building. A complete study would require, among other things, an investigation of the overall energy demand for heating, cooling and ventilation.

Furthermore, the sensitivity analysis on the impact of operation energy emphasises the importance of selecting the appropriate energy source to provide accurate results. It also demonstrates how this type of LCA analysis is sensitive to the energy grid mix and to interconnection of grids internationally. In the future, additional LCI research on the environmental impact of various energy sources considering geographical implications may provide more information, especially regarding the impact of operation energy.

The comparison of three LCIA methods helps choosing an indicator to be included in the overall MCDA evaluation. The similarity between the three LCIA outcomes reinforces the confidence regarding the results obtained, and supports the choice of the authors to use the climate change endpoint indicator in the overall MCDA evaluation in this context. Regarding the impact of biogenic carbon dioxide on climate change, its consideration by

Eco-indicator 99, as opposed to IMPACT 2002+, increases the relative impact of the wood framing from 2% to 6% of the total wall assembly embodied impacts in wall 2. This is relatively insignificant when compared to 50% of impact from the brick veneer and 35% from the extruded polystyrene insulation. This study also shows the sensitivity on the endpoint ecosystem quality indicator regarding the emission of non-ferrous metals, affecting particularly the impact of energy provided by heating oil.

Some limits of this study are linked to the choice of the ATHENA simulation tools, as well as the compatibility between the LCI and LCIA methods used. Hence, this study compares mainly substance emissions in the air and in water, as well as mineral extraction and non-renewable energy. The analysis includes resource extraction, manufacturing process, related transportation, on-site construction and demolition. Regarding disposal, the LCI results provide only the mass of solid waste disposed in landfill. No information is reported on what happens in the landfill after disposal. Besides, several emissions described in the LCI results have not yet been characterised by LCIA models and thus cannot be integrated in the analyses. Finally, the LCI results give no indication to estimate the impact on land use, which is a midpoint indicator influencing the ecosystem quality endpoint in IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99. The question of how to express the loss of quality in regards to resources and land use is still under development since it has been much less studied than the impact assessment of emissions (Milà i Canals *et al.* 2007). Although it is not our intention to comment on how these tools take or do not take into account land use assessment, some comments have to be made about the wood material and its relation with the land use issue. First, it must be said that although deforestation is a major land use issue worldwide, the FAO (2006) reports no significant deforestation issue in Québec, Canada. To the contrary, the fourth IPCC report (IPCC 2007) acknowledges that sustainable forest management and wood usage as a substitute to either fossil fuel or carbon emitting materials is a positive contribution to the climate change issue. Based on these comments, it should be said that no automatic or simplistic linkage should be made between the wood material and land use issues.

The ATHENA software was chosen in this study for many reasons: it uses a LCI database adapted to North-American construction, provides a user-friendly interface, and includes automatically the main processes related to building construction in its simulation. In addition to be regionally adapted, it is relatively well documented in terms of assumptions and limits. It is therefore considered by the authors as the most appropriate tool to be used by designer of wall assemblies in Québec. Nonetheless, ATHENA has several limitations as a tool to evaluate the environmental impact of innovative wall assembly designs. It does not include newly developed building materials, such as aluminum coated fibreboard, and offers no possibility for the user to add additional materials not included in the database or to modify the predetermined processes. Moreover, it provides only midpoint LCIA aggregation according to TRACI. Aggregation to fewer endpoint indicators according to newly developed LCIA models is not included in ATHENA and can only be calculated through extensive work as it was done in this study. A further difficulty concerns the lack of transparency, which makes exhaustive sensitivity and contribution analyses quasi impossible. Indeed, the user does not know which substance emission influences the most each impact indicator, nor in which process the substance emission is produced.

SimaPro is a versatile tool, which offers more possibilities by integrating various LCI databases and LCIA aggregation methods. It also provides the opportunity to examine the various phases of the aggregation and therefore easily identify to the most influent emissions in each study. Nonetheless, it implies a significant learning phase and can therefore not be easily used by building designers. At this stage, the user would need to dissect each phase of building construction, maintenance and demolition, in order to provide an accurate LCA analysis. In the future, the development of models to include regionally adapted processes related to the building life-cycle phases, as well as the availability of appropriate LCI database, could facilitate the use of SimaPro to compare innovative building components, such as prefabricated wall assemblies.

4.7 Conclusion

This study investigates the possibility of integrating an environmental criterion in a multicriteria evaluation of light-frame wood wall assemblies. Life cycle assessment (LCA)

provides a scientific approach to quantify the environmental impacts of products and services using the various flows going from and to nature. The LCA of building components such as exterior walls can be analysed using tools adapted to buildings, such as the ATHENA software, or more generic tools, such as SimaPro. ATHENA is easier to use and provides databases adapted to the North American context, while SimaPro offers more possibilities and choices but requires significant modelling efforts since little processes adapted to buildings are presently available. The ATHENA tool is used in this study to provide the life-cycle inventories, and additional aggregation of impact results are calculated using spreadsheets.

The LCA of a case study was undertaken to compare the environmental impact of five different light-frame wood wall assemblies for a residential building located in Quebec City, Canada. The analysis includes the impacts directly linked to the construction and the maintenance of the opaque section of the wall, as well as the portion of heating energy directly lost through the wall. The ATHENA software provides LCI results including resource extraction, manufacturing process, related transportation, on-site construction, demolition and disposal of solid waste. It also calculates a midpoint aggregation with the TRACI method. Using spreadsheets, the LCI results are also aggregated in midpoint and endpoint indicators following two other LCIA methods: IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99. The midpoint indicators are compared between the three LCIA methods. Since no endpoint indicators are available in ATHENA, the endpoint indicators from IMPACT 2002+ and Eco-indicator 99 allow comparing the environmental damage caused by the five alternative wall assemblies.

The results, which are consistent for all the methods considered, show the relatively small contribution of the wood framing and other wood-based products on the total embodied impact. The impact of operation energy is minor due to the regional electricity grid mix, but becomes more significant when another energy source or the US electricity grid mix is considered. All endpoint indicators are consistent regarding the relative impact between the five alternatives and the few midpoint indicators showing different results have only a small contribution to endpoint evaluation. Through this analysis, the authors conclude in

the acceptability of using the climate change indicator as a representative environmental index in the multicriteria evaluation of the wall assemblies in this specific context.

Chapitre 5 - Multicriteria decision analysis applied to the design of light-frame wood wall assemblies

Résumé

Le concepteur d'une composition de mur à ossature légère en bois doit considérer plusieurs critères de performance simultanément en plus des exigences minimales établies par le Code national du bâtiment. Tenir compte de ces caractéristiques de performance additionnelles peut supporter le choix de la configuration la mieux adaptée à un projet donné dans un contexte donné. Lors d'une publication précédente, nous avons identifié un ensemble de critères et exploré les moyens de les évaluer pour diverses compositions de mur. Dans le présent article, nous intégrons le contexte et les préférences du décideur et cherchons à obtenir un rangement des différentes alternatives en se basant sur de l'information quantitative et qualitative. Cet article présente les résultats d'une étude utilisant quatre différentes procédures d'agrégation multicritères (PAMC): la somme pondérée, MACBETH, ELECTRE II et PROMÉTHÉE. Notre analyse est appliquée à une étude de cas comparant cinq compositions de mur dans six contextes décisionnels différents.

Abstract

The designer of a light-frame wood wall assembly should consider several performance criteria simultaneously in addition to the minimum requirements set by building codes. Taking into account additional performance characteristics can help attain the most suitable configuration for a given project in a given context. In a previous paper, we identified appropriate criteria and explored the means to evaluate them for various wall assemblies. As a follow-up, we integrate the context and the preference of the decision-maker and we seek to obtain a ranking of the various alternatives based on both quantitative and qualitative information. This paper presents the results using four different multicriteria decision analysis (MCDA) techniques: the weighted sum, MACBETH, ELECTRE II and PROMETHEE. Our approach is applied to a case study where five wall assemblies are compared within six different decision contexts.

5.1 Introduction

Light-frame wood construction is an integrated building system commonly used in North America for low-rise residential buildings. This type of construction is becoming more and more popular in other parts of the world, particularly in Europe and Japan, due to its good structural and hygrothermal performance, its potential for energy efficiency, its economical efficiency and the low embodied-energy of wood as a building material. Although wood-frame envelope assemblies perform generally well, these systems may require modifications and improvements in many circumstances, such as adaptations required for export markets, new local demands or new building products. The designed envelope system must meet appropriate performance level satisfying a set of constraints and criteria, including, for example, structural integrity, protection against exterior environment, capacity to sustain indoor relative humidity variation, acoustic insulation, and, an increasingly important criterion, minimization of the environmental footprint. A modification of the composition or of the context of utilisation requires therefore a comprehensive evaluation of the modified assembly performance. What is currently missing is not the ability to evaluate a given aspect of the performance of an assembly, but rather the capability to comprehensively assess an assembly by simultaneously considering all the pertinent performance criteria. The lack of such capability discourages innovation in the industry because changing any design element may have negative repercussions or positive impacts too difficult to evaluate without the help of a structured approach such as multicriteria decision analysis.

Multicriteria decision analysis (MCDA) techniques have been developed as decision support tools to help aggregate quantitative and qualitative information and to take into account the preferences of one or multiple decision-makers. MCDA seeks to take into account several objectives in order to reach the best possible solution, considering the relative importance of each objective in the studied context (Belton and Stewart 2002). In building engineering, recent projects have looked at the benefits of MCDA techniques for building evaluation, for instance, for the assessment of retrofitting possibilities (Kaklauskas *et al.* 2006, Rey 2004, Roulet *et al.* 2006). To our knowledge, MCDA has not yet been systematically used in the field of light-frame envelope design.

In this research project, the development of a multicriteria framework to support the design of factory-built wood-frame exterior wall assemblies is conducted in two phases. The first phase, presented in a previous paper (Frenette *et al.* 2008), focused on the structuring of the decision situation, the definition of adequate criteria and the means to assess the performance of various assemblies on these criteria. This paper presents the second phase dealing with assessing different methods to aggregate the individual performance criterion in order to support the choice of a wall assembly design in a given decision context. The methodology is illustrated by a case study where five wall assemblies are compared in six different contexts, characterised by the physical environment of the building as well as the preference of the decision-maker.

5.2 Objectives and methodology

Within the scope of developing a MCDA-based methodology to evaluate and compare alternative designs considering many, sometimes conflicting, performance criteria simultaneously, this paper concentrates on the application of MCDA-aggregation methods. The main objective is to conduct the analysis of the overall performance of wall assemblies based on the multiple criteria identified in the previous part of this research.

The principal goal of MCDA is to organise and synthesize the information to help decision-makers account for multiple criteria in their decisions. This implies a change of paradigm from the traditional optimisation process where a single objective optimal "correct answer" exists. As a matter of fact, MCDA considers subjectivity as inherent to the decision-making process, and seeks to help decision-makers in managing this subjectivity and to integrate value judgements with objective measurements (Belton and Stewart 2002). Several MCDA methods are available and have been applied to various decision problems. In engineering, design problems are often analysed under the optimisation paradigm, where algorithms optimise parameters and yield an ideal solution (Au 2007, Kaveh and Shahrouzi 2008). Nonetheless, the need to consider human perceptions in the search for integrated solutions to comprehensively evaluate systems or sub-systems has led to the introduction of MCDA approaches in design problems (Mateus *et al.* 2008, Roulet *et al.* 2006, Nassar 2003). Moreover, the growing importance of environmental aspects in today's design process

emphasizes the need for decision analyses integrating both technical objective results and their impacts on human life and perceptions (Jolliet *et al.* 2005, Bojorquez-Tapia *et al.* 2005, Janssen 2001).

MCDA methodologies usually consist of four major steps: structuring the decision problem, articulating and modelling the preferences, aggregating the alternatives evaluations and making recommendations (Guitouni and Martel 1998). Discrete MCDA methods, which consider a set of discrete alternatives, may be divided in two families of aggregation techniques: Single criterion synthesizing methods and outranking methods (Figueira *et al.* 2005a). Single criterion synthesizing methods aggregate local evaluations of an alternative on each criterion into an overall evaluation. These approaches are compensatory and lead to a unique score for each alternative. Consequently they provide a total ordering of the alternatives from best to worst with the possibility of equal alternatives. Outranking methods compare the alternatives pairwise in order to build an overall preference structure while allowing for the possibility of incomparable alternatives. For this study, we chose two representative methods from each family type. The weighted sum and MACBETH are single criterion synthesizing methods, whereas ELECTRE II and PROMETHEE are outranking methods based on social choice theory

Figure 5.1 presents the framework of our methodology. A previous paper (Frenette *et al.* 2008) addressed the structuring of the decision situation, as well as at the identification and evaluation of possible alternatives. The present paper concentrates on articulating the preferences, aggregating the alternatives evaluations and making recommendations. It is organized as follows: In section 5.3, we review the performance criteria retained in Frenette *et al.* (2008) and present their associated scales, as well as the evaluation results of the five wall assemblies included in the case study. In Section 5.4, we consider six different decision contexts and simulate plausible decision-maker's preferences in terms of the relative weights of the criteria. Section 5.5 presents the ranks obtained after the aggregation of the performance evaluations using four different MCDA methods: Weighted sum, MACBETH, ELECTRE II and PROMETHEE. Finally, Section 5.6 discusses the results and makes recommendations regarding the application of these aggregation methods.

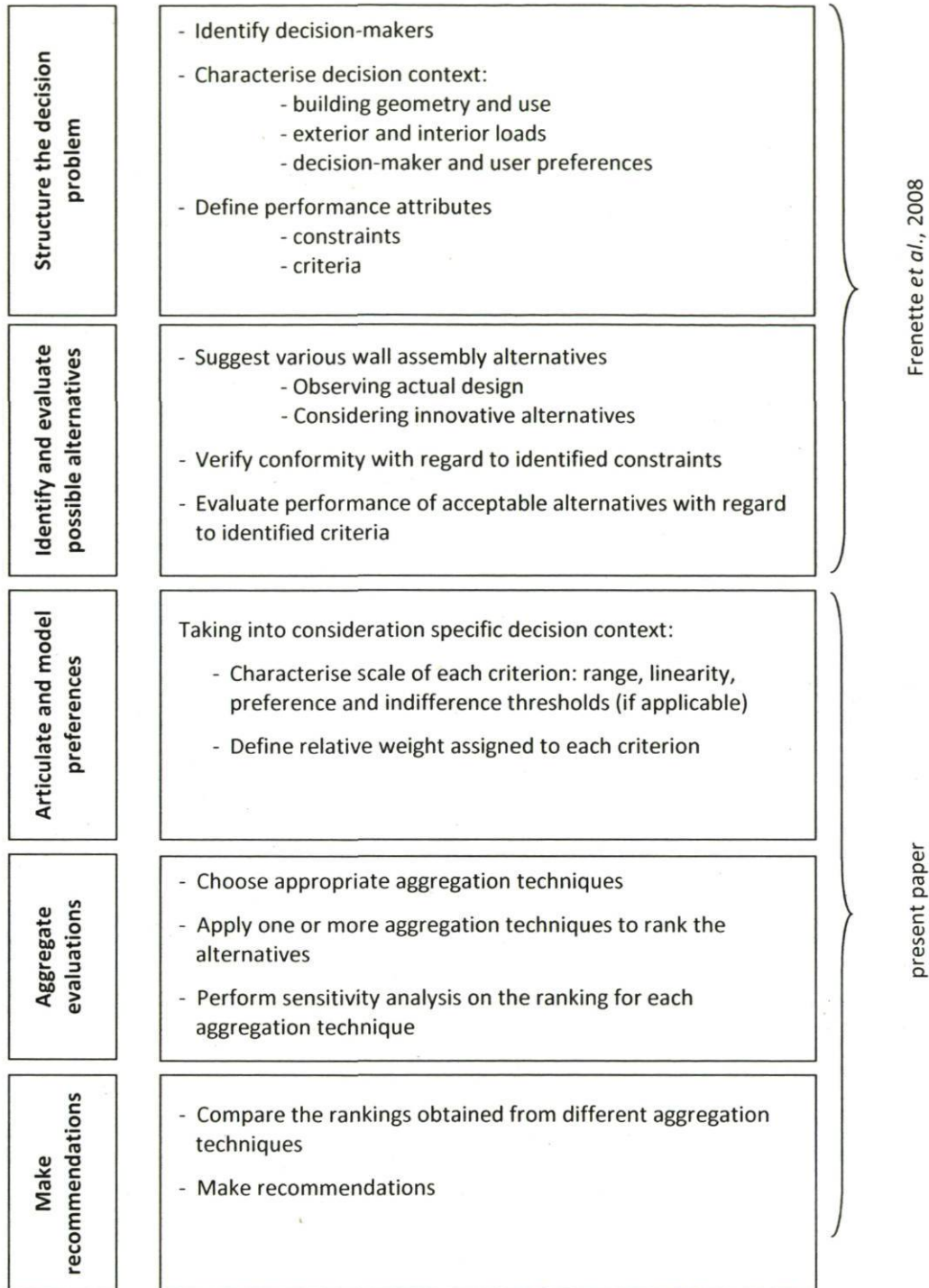


Figure 5.1 - Proposed MCDA framework methodology.

5.3 Performance criteria

In Frenette *et al.* (2008), a top-down approach was used to analyse the decision situation. Measurable attributes related to the design and evaluation of exterior light-frame wall assemblies were also identified either as constraints or as criteria. Constraints ensure the conformity of a wall assembly to building code regulations while criteria are used to compare the performance of acceptable assemblies. As a result of the decision situation analysis, six constraints and six criteria were identified as relevant to the composition of a wall assembly (Table 5.1). Even though this list of constraints and criteria is developed for a specific context, namely a residential construction in Quebec City (Canada), the approach is general enough to be adapted to other situations characterized by different climates, codes, or cultural requirements. Other criteria may eventually be included such as aesthetics, resistance to urban damage, etc.

Table 5.1 - Constraints and criteria for wall assembly assessment

Constraints	
A	Stud resistance to gravity and wind loads
B	In-plane shear resistance of the wall
C	Fire performance
D	Thermal insulation
E	Air permeance of air-barrier components
F	Mandatory moisture management measures
Criteria	
1	Moisture management performance
2	Attenuation of sound transmission
3	Construction costs
4	Maintenance costs
5	HVAC-related energy costs
6	Environmental impact (Global Warming Potential)

The descriptions of these constraints and criteria, as well as proposed evaluation methods, are presented in Frenette *et al.* (2008). The present section defines the specific features of the criteria evaluations needed to enable their integration in a multicriteria aggregation method. To illustrate the methodology, we use the case study developed in Frenette *et al.* (2008), which considers five alternative assemblies of an exterior wall in a two-storey residential building located in Quebec City, Canada. Table 5.2 presents an overview of the five alternative assemblies employing commonly used building materials.

Table 5.2 - Wall assemblies for the case study

CASE STUDY	<ul style="list-style-type: none"> • external cladding • water-resistive membrane and sheathing • framing • insulation (between studs) • vapour barrier and interior finishing
Assembly 1	<ul style="list-style-type: none"> • vinyl siding + furring • building paper + OSB • wood studs 38mm x 140 mm @ 400mm o.c. • glass fibre batt (140 mm) • polyethylene + furring + gypsum board
Assembly 2	<ul style="list-style-type: none"> • brick veneer • polyolefin membrane + plywood • wood studs 38mm x 140 mm @ 400mm o.c. • extruded polystyrene (140 mm) • polyethylene + furring + gypsum board
Assembly 3	<ul style="list-style-type: none"> • brick veneer • polyolefin membrane + extruded polystyrene (25 mm) • wood studs 38mm x 140 mm @ 400mm o.c. • glass fibre batt (140 mm) • polyethylene + furring + gypsum board
Assembly 4	<ul style="list-style-type: none"> • wood siding + furring • building paper + asphalt-coated wood fibreboard • wood studs 38mm x 140 mm @ 400mm o.c. • blown cellulose (140 mm) • reinforced kraft paper + furring + gypsum-fibre board
Assembly 5	<ul style="list-style-type: none"> • wood composite siding + furring • polyolefin membrane + extruded polystyrene (25 mm) + OSB • wood studs 38mm x 140 mm @ 600mm o.c. • blown cellulose (140 mm) • aluminium-coated fibreboard + furring + gypsum board

Table 5.3 demonstrates their acceptability since they all meet the required constraints (Target) according to the National Building Code of Canada (CNRC 2005). Table 5.4 summarises the evaluation of the five assemblies with regard to the six performance criteria, and includes the range of each scale. It can be noted that evaluations vary greatly on any given criterion, and that none of the alternatives dominates all the others by scoring better on all criteria simultaneously

Table 5.3 - Constraints evaluation for the case study

Constraint	Measure	Assembly 1	Assembly 2	Assembly 3	Assembly 4	Assembly 5	Target
Studs resistance to combined loading	$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r}$	0.40	0.40	0.40	0.40	0.61	≤ 1.0
In-plane shear resistance of the wall	minimum length of braced panel	8m ≥ 1.2m acceptable	8m ≥ 1.2m acceptable	8m ≥ 2.4m acceptable	8m ≥ 2.4m acceptable	8m ≥ 1.2m acceptable	according to Engineering Guide
Fire performance	fire rating	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	no requirement for 1-family housing
Thermal resistance	RSI	4.1 m ² ·K/W	5.8 m ² ·K/W	4.9 m ² ·K/W	4.6 m ² ·K/W	5.4 m ² ·K/W	3.6 m ² ·K/W
Air permeance of air-barrier components	air leakage characteristic	0 L/s·m ²	0 L/s·m ²	0 L/s·m ²	0.02 L/s·m ²	0 L/s·m ²	≤ 0.02 L/s·m ² @75 Pa
Mandatory moisture management measures (cold climate)	MC of wood at construction	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	≤ 19%
	Rain screen	✓	✓	✓	✓	✓	included
	Vapour barrier	3.4 ng/Pa·s·m ²	3.4 ng/Pa·s·m ²	3.4 ng/Pa·s·m ²	55 ng/Pa·s·m ²	2.9 ng/Pa·s·m ²	≤ 60 ng/Pa·s·m ²
	Max RH	71%	60%	61%	77%	68%	≤ 100%

Table 5.4 - Evaluation of the performance criteria from the case study

Performance criteria	Units	Range	Assemblies				
			1	2	3	4	5
1 moisture management performance	-	0 - 5	3	2	1	4	1
2 Attenuation of sound transmission (OITC)	dB	24 - 44	25	40	40	26	32
3 Construction costs	\$ Can	15 000 - 50 000	16 406	40 774	34 962	21 594	23 744
4 Maintenance costs	over 20 years	\$ Can	0 - 10 000	-	-	-	-
	over 40 years	\$ Can	0 - 10 000	3500	0	0	3500
5 HVAC costs (for electricity)	over 20 years	\$ Can	0 - 12 000	7 729	5 959	6 175	6 655
	over 40 years	\$ Can	0 - 12 000	11 084	8 546	8 855	9 543
6 Environmental impact GWP (for electricity)	over 20 years	kg of CO ₂	0 - 15 000	5 495	11 840	9 305	2 453
	over 40 years	kg of CO ₂	0 - 15 000	6 769	12 823	10 326	3 552

OITC: Outdoor-Indoor Transmission Class; HVAC: Heat, ventilation and Air-Conditioning; GWP: Global Warming Potential

The following subsections define specific parameters of these criteria evaluations in order to enable their integration in a multicriteria aggregation method. The chosen evaluation mode on each criterion is presented along with its measurement scale, range and parameters. The upper and lower limits of each scale are defined to include the majority of possible evaluations. These limits would need to be adjusted if other building systems, such as cold-form steel construction or concrete walls, were considered.

Criterion 1 - Moisture management performance

It was decided to base the evaluation of the moisture management capacity on results obtained from computer simulations of the dynamic moisture behaviour of a wall assembly in a given climate, using WUFI 4.1 software (Karagiozis *et al.* 2001). The methodology is described in Frenette *et al.* (2008). Hygrothermal properties of the materials were taken from Kumaran (2002). The underlying goal is to prevent mould growth and material deterioration resulting from exposure to high moisture conditions. The simulations provide results of the behaviour under normal climatic conditions, with and without accidental rain infiltration, such as the relative humidity throughout each given wall assembly over a 3-year period. This information needs to be represented by a single index that could be included in a multicriteria analysis. We proposed a scale ranging from 0 to 5 using different assessment time frame and relative humidity (RH) levels. As indicated in Table 5.5, "0" corresponds to the minimum requirement (no condensation at design temperature) and "5" represents the best moisture management performance.

Table 5.5 - Scale for the moisture management performance criterion

Scale	Maximum relative humidity within the wall assembly
0	24-hr average without rain penetration < 100% RH (basic requirement)
1	7-day average without rain penetration < 98% RH
2	no yearly increase of moisture in case of rain penetration in the insulation cavity (1% rain)
3	30-day average without rain penetration < 80% RH ($\pm 1\%$)
4	30-day average in case of rain penetration in the insulation cavity (1% rain) < 90% RH
5	30-day average in case of rain penetration in the insulation cavity (1% rain) < 80% RH

This scale uses maximum 24 hours-, 7 days- and 30 days-average RH within the stud cavity, as defined by the SPC 160P ASHRAE Standard (2006). The proposed scale was

developed for this specific case study and includes evaluation results from simulations with and without rain penetration. In other contexts, further work may lead to the development of different scales to evaluate the moisture management capacity of the assemblies.

The ordinal scale presented in table 5.5 combines evaluation results from different simulations. Since the distance between the different scale levels are not constant, this criterion cannot be adequately represented by a linear cardinal scale. If a transformation into a cardinal scale is necessary for the MCDA method used, this transformation should follow the advice of an expert in moisture transfer and consider various parameters such as the quality of construction and maintenance conditions, affecting the probability of possible leaks, as well as the climate. In the absence of more advanced analyses, this study uses the M-MACBETH decision tool to transform the ordinal scale into a non-linear cardinal scale using a plausible subjective appreciation of a decision-maker.

The weight assigned to this criterion within the overall framework also depends on the probability of potential leaks and on the climate, as well as on the expectations of the decision-maker.

Criterion 2 - Attenuation of sound transmission

The ability of an exterior building envelope to attenuate air-borne sound can be evaluated using an Outdoor-Indoor Transmission Class (OITC). The OITC is derived from experimental measurements and aims at quantifying the ability of building elements to reduce the overall loudness of ground and air transportation noise. The OITC, in decibel [dB], is an A-weighted sound level reduction calculated from a series of sound transmission losses. Each sound transmission loss, TL [dB], is the logarithmic expression of a sound intensity level attenuation measured for a specified frequency band. The OITC is described in ASTM-E1332 as a rank ordering device that considers typical spectra from transportation sources (ASTM 2003).

In acoustics, a scale in dB is generally not linear. It would be logarithmic if we were interested in the sound intensity level. However, regarding loudness perception, the literature states that a reduction of 10dB is generally perceived as half the initial sound

(Crocker and Price 1975); hence, after an attenuation of 20dB, the sound would be perceived as being a quarter of the initial sound. We therefore propose a non-linear function defined by this relation to compare the OITC performance of the different wall assemblies (figure 5.2) according to criterion 2.

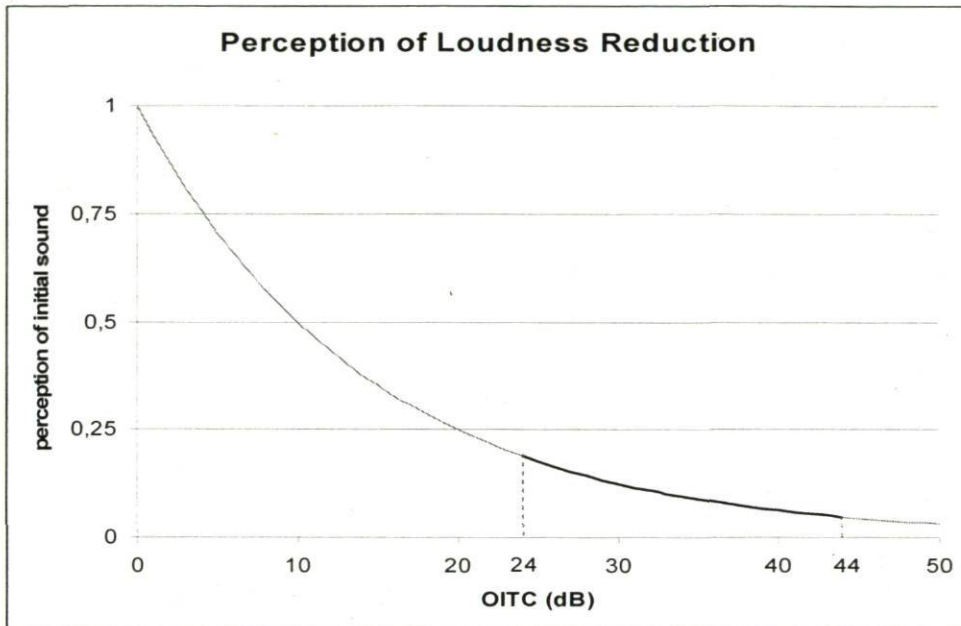


Figure 5.2 - Proposed function to evaluate the perception of loudness reduction

In this study, the range of the scale measuring the attenuation of sound transmission is defined according to OITC results of typical constructions as evaluated by Bradley and Birta (2000). The lower level is set at 24 dB for a basic wall with 38mm x 89mm studs and glass fibre insulation, while the upper limit is set at 44 dB representing a wall of superior performance, including the use of double sheathing, double gypsum boards, staggered wood studs and resilient channels. These limits could however be modified according to the users' perception and outdoor noise level. For example, for low outdoor noise, the upper limit could be lowered to a level where the attenuation reduces the outdoor noise to the same level as indoor normal background sound level, since the difference with a higher OITC would not be perceived. However, if the outdoor noise level is relatively high, the lower limit could be increased to eliminate walls with an OITC deemed too low to be acceptable. In our study, the upper limit is reduced at 40 dB for contexts with low exterior

noise level, while the lower limit is increased up to 29 dB for contexts with high exterior noise level.

The weight assigned by a decision-maker to this criterion is influenced by his perception and the intensity level of outdoor noise and therefore varies from one context to another.

Criterion 3 - Construction costs

In most projects, construction costs have a major influence on the final decision. In this study, the costs of materials, transportation and labour, directly related to the construction of the wall assembly are taken into account for the different alternatives. The costs are provided in Canadian dollars. The relative importance of construction costs of the walls compared to the overall cost of the building, as well as the importance of this specific amount of money for the decision-maker, may influence the linearity in its scale. Indeed, a difference of \$1 on a total cost of \$10 does not represent the same value for a decision-maker as difference of \$1 on a total cost of \$1000. Nonetheless, we choose to represent construction costs on a linear scale ranging from \$15 000 to \$50 000 since the costs of all alternatives are of the same order of magnitude.

Criterion 4 - Maintenance costs

Maintenance costs are mainly related to the quality and durability of the products used, and to the construction quality. Even though this criterion is in Canadian dollars and discounted to present value using a discount rate of 4%, it is most probably perceived by the decision-maker differently from construction costs since it is an expense that will be assumed in the future. It may even not be included at all in the decision if its expected occurrence time exceeds the time considered in the analysis. Indeed, for many home buyers, the mortgage period of 20 or 25 years may be the maximum time period they feel concerned about. Furthermore, if the home buyer is at the beginning of his career, he may expect a much higher salary in the future and therefore prefer a larger cost in the future than a larger initial cost, even if it represents a higher total cost discounted to present value. Besides, the uncertainty associated with the maintenance cost may represent, for some decision-makers, a more important issue than the cost itself.

The case study includes evaluation periods of 20 and 40 years. The first period leads to minimal maintenance costs since many products offer no maintenance warranties exceeding this period. The second value of 40 years represents the situation where the decision-maker would want to include a longer assessment period, and would naturally lead to different results. In our study, maintenance costs are represented on a linear scale ranging from \$0 to \$10 000.

Criterion 5 - Heating, ventilation and air-conditioning (HVAC)-related energy costs

The choice of a wall assembly impacts the heating, cooling and ventilation loads through its overall thermal resistance and airtightness. In this study, we emphasize the heating energy load, which is very important for the residential light-frame construction in the Quebec climate. This heating energy cost is calculated in Canadian dollars and discounted to present value. As for criterion 4, it includes evaluation periods of 20 years and 40 years depending on the context.

The HVAC costs do not vary much between the alternatives because the effective thermal resistance (RSI) and the airtightness of all assemblies are within a close range. The difference between the various alternatives could be larger if the spectrum of insulation level and airtightness were broader or if the thermal capacity of the assemblies had more influence, for example, in a climate where night ventilation for cooling is possible. The period of evaluation also influences the final results.

In the range of values considered, the HVAC cost scale can be considered linear for the majority of situations, although the difference between the various assemblies considered may seem insignificant for some decision-makers. The scale ranges from \$0 up to \$12 000, thereby encompassing the concept of zero energy house as well as poorly insulated walls.

Criterion 6 - Environmental impact

Life cycle assessment (LCA), documented through ISO14040 standards, identifies and quantifies the environmental inputs and outputs associated with a product over its entire life (ISO 2006). The ATHENATM Environmental Impact Estimator software (Athena 2009)

performs the LCA of buildings to assess the direct environmental impacts. Amongst these various environmental indices, our case study concentrates on global warming potential (GWP). This index combines the global warming effect of several greenhouse gases and includes both embodied and operation energy impacts. The primary energy sources used to produce heating energy and materials have a major effect on GWP, which is very geographically sensitive.

All environmental impacts, including GWP, represent a cost to society that should be included in the overall cost of a project. Nonetheless, the monetary value of GWP is difficult to evaluate at this point, since neither carbon tax nor cap and trade systems are implemented yet throughout North America. Regarding specifically operation energy, some dependence could be noted between criterion 5 (HVAC related energy cost) and the operation energy part of criterion 6 (environmental impact) since both rely on the same quantity (HVAC energy). Indeed, if the environmental cost of the heating energy could be assessed, it could be included in the HVAC cost criterion. However, lacking a monetary value directly related to environmental impact, it was decided to keep two distinct criteria because they are perceived by the actual decision maker as two separate performance aspects.. GWP is therefore measured in kilograms of carbon emission calculated for a given period of time, which can be the expected lifetime of the building or an evaluation period defined by the decision-maker. GWP is represented on a linear scale going from 0 to 15 000 kg of CO₂, to range from the ideal target-situation to the maximum usually attained by standard wood-frame construction.

5.4 Decision contexts and weighting functions

The choice of a well-suited wall assembly depends greatly on the specific decision context. Even considering the same climatic zone, the conditions associated with the building location, the personal appreciation of the users and preferences of the decision-maker may considerably influence the weight assigned to each criterion.

We introduce six different contexts in this study. For each context, a plausible weighting scheme is provided to simulate the appreciation of a potential decision-maker. **Context 1** represents a situation where the criteria have equal weights (except for maintenance).

Representing a more realistic situation, **context 2** is located in an urban residential neighbourhood where the traffic noise is moderate. The cost is not an important issue but the work must be well done and the environmental impact lowered. **Context 3** corresponds to a situation where the immediate financial cost must be minimised, future costs have some importance but few concerns for humidity, acoustics or environmental impact. **Context 4** is located close to a highway with heavy traffic noise and has similar financial requirements as context 3. **Context 5**, located close to an airport, has also important acoustic concerns, less concern than contexts 3 and 4 regarding immediate financial cost and no importance is given to humidity or environmental impact. **Context 6** aims at minimising long-term financial and environmental impacts and considers a 40-year period analysis, whereas all other contexts consider a 20-year period. Table 5.6 presents the relative importance of the various criteria for each of these contexts as it could be described by a decision-maker using the following scale: very important, important, moderately important, of little importance, and unimportant.

Table 5.6 - Relative importance of the performance criteria according to contexts

Performance criteria	Contexts					
	1 equal weights	2 urban green	3 low cost	4 highway	5 airport	6 long term
1 Moisture management performance	moderately important	important	of little importance	of little importance	unimportant	important
2 Attenuation of sound transmission (OITC)	moderately important	important	moderately important	very important	very important	moderately important
3 Construction costs	moderately important	moderately important	very important	very important	important	moderately important
4 Maintenance costs	not included	of little importance	important	moderately important	moderately important	important
5 HVAC costs	moderately important	of little importance	important	moderately important	moderately important	important
6 Environmental impact - GWP	moderately important	very important	unimportant	of little importance	unimportant	important

For each of these decision contexts, the preferences of the decision-maker need to be converted into weights to be used in the aggregation. Amongst the various techniques available, this study uses an approach implemented in the M-MACBETH software. This

approach assesses the relative importance between the different criteria by pairwise comparison. As an example, the decision-maker can state that criterion 1 is strongly preferred to criterion 2. At the same time, imprecise preference judgements, such as "from weak to moderate preference", are also acceptable. Relative weights are then computed based on the qualitative preferences expressed by the decision-maker who can verify and adjust their values (Bana e Costa *et al.* 2005b). Table 5.7 summarises the weights obtained with M-MACBETH for each decision context from the relative importance in Table 5.6.

Table 5.7 - Relative weights of the performance criteria evaluated using the M-MACBETH software

Performance criteria	Contexts					
	1 equal weights	2 urban green	3 low cost	4 highway	5 airport	6 long term
1 Moisture management performance	20%	20%	5%	5%	2.5%	20%
2 Attenuation of sound transmission (OITC)	20%	20%	10%	30%	45%	10%
3 Construction costs	20%	15%	45%	30%	20%	10%
4 Maintenance costs	0%	10%	20%	15%	15%	20%
5 HVAC costs	20%	10%	20%	15%	15%	20%
6 Environmental impact - GWP	20%	25%	0%	5%	2.5%	20%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%

5.5 Aggregation

The ranking of the assemblies in each context requires the aggregation of the local evaluations on each criterion in an overall evaluation taking into account the criterion weight as well as other preference information depending on the method used. This is not an easy task, especially when the evaluations are a mix of quantitative and qualitative data. Various methods have been developed to solve this problem (Figueira *et al.* 2005a). In this study, four methods are applied: two single criterion synthesizing methods, the weighted sum and MACBETH, and two outranking methods, ELECTRE II and PROMETHEE.

5.5.1 The weighted sum

The weighted sum is an addition, for each alternative, of the performance result on each criterion multiplied by the relative weight assigned to the specific criterion (Bouyssou *et al.* 2006). As discussed later, this aggregation method is too simple to represent adequately a decision situation with non-linear and ordinal scales. Nonetheless, it is included in the study in order to highlight its weaknesses compared to more elaborated aggregation approaches.

In this case, since all criteria do not refer to the same scale, the alternatives performance on each criterion is normalised by computing a ratio, using upper and lower limits as follows:

$$S_i = \sum_j W_j \cdot \left(\frac{R_{ij} - Min_j}{Max_j - Min_j} \right) \quad (5.1)$$

Where, S_i is the weighted sum calculated for the alternative i , R_{ij} is the performance of the alternative i regarding the criterion j , Min_j and Max_j are the lower and upper limits for the criterion j , and W_j is the relative weight assigned to the criterion j . A higher weighted sum corresponds to a better performance since performance results with reversed scales such as cost are indicated as negative values. Table 5.8 exemplifies the calculations for context 1. For all other contexts, the same lower and upper criterion limits are used except for criterion 2 (acoustic), where the upper limit is reduced to 40 dB for context 2, while the lower limit is increased up to 29 dB for contexts 4 and 5.

Table 5.8 - Example of weighted sum calculations for context 1

	Performance criteria						
	1 moisture	2 acoustic	3 construction	4 maintenance	5 HVAC	6 environment	
Lower limit (<i>Min</i>)	0	24	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000	
Upper limit (<i>Max</i>)	5	44	-15 000	0	0	0	
Performance							
Assembly 1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495	
Assembly 2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840	
Assembly 3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305	
Assembly 4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453	
Assembly 5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149	
Ratio							
Assembly 1	0,60	0,05	0,96	1,00	0,36	0,63	
Assembly 2	0,40	0,80	0,26	1,00	0,50	0,21	
Assembly 3	0,20	0,80	0,43	1,00	0,49	0,38	
Assembly 4	0,80	0,10	0,81	1,00	0,45	0,84	
Assembly 5	0,20	0,40	0,75	1,00	0,55	0,79	
Weighting function							
(Context 1)	20%	20%	20%	0%	20%	20%	
							Results
Assembly 1	0,12	0,01	0,19	0,00	0,07	0,13	52,0%
Assembly 2	0,08	0,16	0,05	0,00	0,10	0,04	43,6%
Assembly 3	0,04	0,16	0,09	0,00	0,10	0,08	45,9%
Assembly 4	0,16	0,02	0,16	0,00	0,09	0,17	59,9%
Assembly 5	0,04	0,08	0,15	0,00	0,11	0,16	53,8%

Table 5.9 presents the ranking of the alternatives according to calculated results. This simple aggregation method assumes linear cardinal scales for all the criteria and is totally compensatory since a very poor result on one criterion can be counter-balanced by good results on the other criteria. The final result depends on the accuracy of the performance evaluations, the weighting function, and the range determined for each criterion. For this linear calculation techniques, a simple sensitivity analysis obtained by varying the input parameters, such as the weight assigned to each criterion, can help the decision-maker to assess the robustness of the result. As an example, Figure 5.3 shows the effect of varying the weight of criterion 2 (acoustic) on the final ranking for context 1 (equal weights). The present weight of 20% must increase to 34% to allow assembly 3 to surpass assembly 4 and take the first place in the ranking.

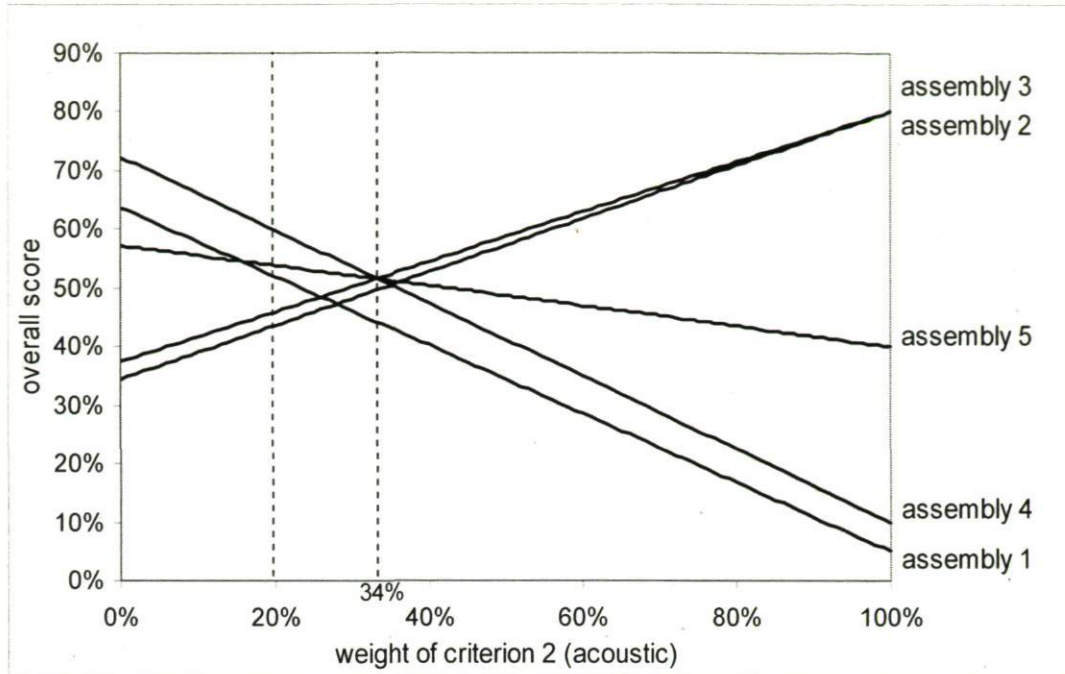


Figure 5.3 - Sensitivity analysis of the weighted sum ranking on the weight of criterion 2 in context 1

Table 5.9 - Ranking of the alternative assemblies using four different aggregation methods in six different contexts

Weighted Sum assembly (score)	1 - equal weights			2 - urban green			3 - low cost		
	MACBETH assembly (score)	ELECTRE assembly	PROMETHEE assembly (F _{net})	MACBETH assembly (score)	ELECTRE assembly	PROMETHEE assembly (F _{net})	MACBETH assembly (score)	ELECTRE assembly	PROMETHEE assembly (F _{net})
4 (60%)	4 (61%)	4	4 (0.30)	4 (66%)	4	4 (0.38)	1 (74%)	1	1 (0.17)
5 (54%)	5 (58%)	5	5 (0.15)	5 (61%)	5	5 (0.08)	5 (72%)	4	5 (0.16)
1 (52%)	1 (53%)	1	1 (-0.10)	1 (57%)	1	1 (-0.05)	4 (71%)	5	4 (0.12)
3 (46%)	3 (49%)	3-2	2 (-0.15)	3 (55%)	3	2 (-0.20)	3 (58%)	3	3 (-0.18)
2 (44%)	2 (47%)		3 (-0.20)	2 (52%)	2	3 (-0.20)	2 (52%)	2	2 (-0.27)

Weighted Sum assembly (score)	4 - highway			5 - airport			6 - long term		
	MACBETH assembly (score)	ELECTRE assembly	PROMETHEE assembly (F _{net})	MACBETH assembly (score)	ELECTRE assembly	PROMETHEE assembly (F _{net})	MACBETH assembly (score)	ELECTRE assembly	PROMETHEE assembly (F _{net})
3 (60%)	3 (63%)	5	5 (0.14)	3 (65%)	3	3 (0.21)	4 (57%)	4	4 (0.20)
5 (57%)	5 (60%)	3	4 (0.03)	2 (62%)	2	2 (0.19)	5 (50%)	2	5 (0.05)
2 (56%)	2 (59%)	2	3 (0.01)	5 (50%)	5	5 (0.14)	3 (48%)	5	2 (0.03)
4 (48%)	4 (43%)	4	2 (-0.05)	4 (33%)	4	4 (-0.15)	1 (48%)	3	3 (-0.08)
1 (47%)	1 (40%)	1	1 (-0.12)	1 (31%)	1	1 (-0.39)	2 (47%)	1	1 (-0.20)

5.5.2 MACBETH

MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) is a MCDA approach that helps the decision-maker to quantify the relative attractiveness of different alternatives using qualitative judgements about differences of value (Bana e Costa *et al.* 2005a). In other words, it transforms the qualitative judgments of the decision-maker into cardinal scales and thus allows the aggregation of local evaluations into a global one by computing a weighted average. The approach, implemented in the M-MACBETH software, creates a cardinal scale for each criterion from qualitative and quantitative judgements. To help the decision-maker define these cardinal scales, the approach requires first to establish two reference levels for each criterion: a "neutral" performance level and a "good" performance level (Table 5.10). Subsequently, the decision-maker must define a qualitative preference for each echelon of the scale with regard to these references levels. This technique allows the definition of cardinal scales based on the subjective appreciation of the decision-maker, who can always adjust these scales manually. The software verifies automatically the consistency of these judgements and offers suggestions to resolve inconsistencies if and when they arise (Bana e Costa *et al.* 2005b).

Table 5.10 - References used for the MACBETH analysis

Reference levels	Performance Criteria					
	1 moisture	2 acoustic	3 construction	4 maintenance	5 HVAC	6 environment
neutral performance	0	24	50 000	12 000	12 000	15 000
good performance	5	44	15 000	0	0	0
Scale	non-linear	non-linear	linear	linear	linear	linear

The first criterion of our study, the moisture management performance, is measured on an ordinal scale from 0 to 5, based on simulation results. The upper and lower limits of the scale are used as references, and we simulate plausible qualitative judgements between the various levels to develop a non-linear cardinal scale: level 1 is strongly preferred to level 0 and level 2 is strongly preferred to level 1; there is only a weak difference between levels 2 and 3, and moderate differences between levels 3 and 4, and levels 4 and 5. Figure 5.4 illustrates these qualitative preferences via a comparative table and the preference scale calculated by the software.

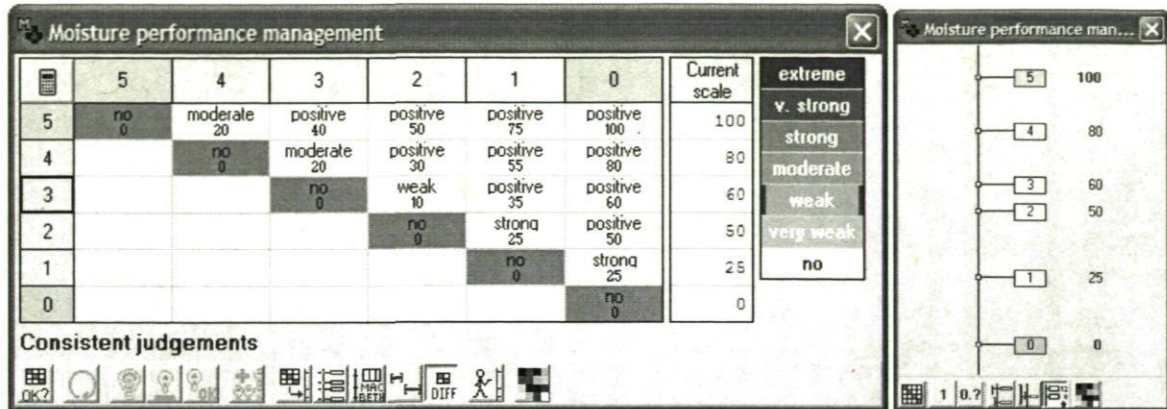


Figure 5.4 - Example of qualitative judgements to establish a preference scale for criterion 1 with the M-MACBETH software.

The second criterion, attenuation of sound transmission, is measured using the OITC index, a quantitative scale. The non-linearity of the scale is derived from the general perception of loudness found in literature for sound attenuation as described in section 5.3. The two reference levels indicating a "neutral" performance level and a "good" performance level are adapted to each context. For general contexts (1, 3 and 6), the range is set from 24 dB to 44 dB to include most typical light-frame wall measurements. However, when the exterior noise is relatively low (context 2), the good performance is set at 40 dB. On the contrary, when the exterior noise is very high (contexts 4 and 5), a performance under 29 dB is considered unsatisfactory.

Using non-linear scales for criteria 1 and 2 (Table 5.11) and considering the linear scales defined previously for the other criteria, the M-MACBETH software calculates a numerical score for each alternative by computing a weighted average of the performance level on the defined scale using the criteria relative weights for each context (Table 5.9).

MACBETH is a compensatory aggregation method, because all the performance evaluations are integrated in a single final score for each alternative. Nevertheless, the M-MACBETH software provides user-friendly tools to verify the impact of the uncertainty of individual performance evaluation on the final ranking (Bana e Costa *et al.* 2005b). It also performs sensitivity analysis, showing the influence of the weights assigned to each criterion on the final ranking. For example, Figure 5.5 shows how the weight assigned to

criterion 1 (moisture management performance) influences the ranking of the alternatives in context 1. If the weight of criterion 1 were under 11.6%, assembly 5 would become the first choice instead of assembly 4. However, the software does not include a sensitivity analysis on the chosen "good" and "neutral" reference levels. According to our study, the robustness of the ranking as a function of the uncertainties of these reference levels should be analysed as it may yield useful information to the decision-maker.

Table 5.11 - Nonlinear scales obtained with the M-MACBETH software

a) criterion 1 - moisture		b) criterion 2 - acoustic			
scale	contexts 1 to 6	OITC scale	Contexts 1-3-6 (normal)	Contexts 2 (low noise level)	Contexts 4-5 (high noise level)
neutral	0	neutral	24	24	29
good	5	good	44	40	44
0	0%	24	0%	0%	-48%
1	25%	28	32%	36%	0%
2	50%	32	57%	64%	36%
3	60%	36	75%	84%	64%
4	80%	40	89%	100%	84%
5	100%	44	100%	100%	100%

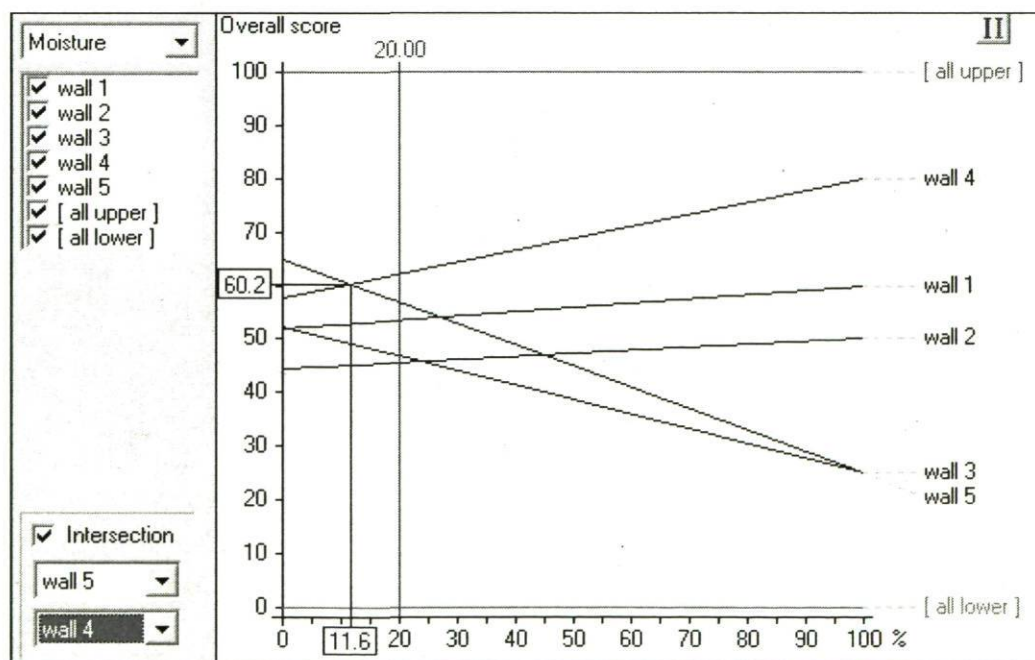


Figure 5.5 - Sensitivity analysis of the MACBETH ranking on the weight of criterion 1 in context 1 (with M-MACBETH software)

5.5.3 ELECTRE II

ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) methods are partially compensatory approaches that define binary outranking relations to construct preferences between alternatives. Given two alternatives A and B , A « outranks » B if A is « at least as good as » B . The construction of an outranking relation is based on two major concepts: concordance and non-discordance. The concordance index measures whether a sufficient majority of the criteria is in favour of the assertion that A « outranks » B , and the non-discordance validates that none of the criteria in the minority opposes this assertion too strongly. The combination of these two concepts introduces the relation of incomparability, used when two actions cannot be compared in a given situation (Figueira *et al.* 2005b).

ELECTRE II was the first of ELECTRE methods specifically designed to deal with ranking problems. The aggregation process, divided into two steps, is relatively straightforward and can therefore be easily followed by the decision-maker. First, an outranking relation is defined between each pair of alternatives. Second, these relations are combined to obtain a partial ranking of the alternatives, using the notions of concordance and non-discordance while allowing for incomparable alternatives. The concordance index, denoted $c(A,B)$, indicates the strength of the assertion " A outranks B ", based on all criteria. It is computed by adding the relative weights of all criteria where A is at least as good as B :

$$c(A, B) = \sum_{j: g_j(A) \geq g_j(B)} w_j \quad (5.2)$$

where $g_j(A)$ is the evaluation of alternative A on criterion j , and w_j is the weight of the criterion j .

The discordance index (d_j) describes the degree to which the criterion j disagrees with the assertion " A outranks B ", and thus allows the definition of a veto value for each criterion (Equation 5.3).

$$d_j(A, B) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_j(A) \geq g_j(B) \\ g_j(B) - g_j(A) & \text{if } g_j(A) < g_j(B) \end{cases} \quad (5.3)$$

Once the concordance and the discordance indices have been computed, tests are applied using thresholds to determine the existence and the strength of outranking relations between the alternatives. Finally, direct and inverse rankings are obtained from these strong and weak preference relationships, and are combined to determine the final partial ranking, which can include equivalence and incomparability.

In this study, ELECTRE II is applied using the MCDM software (Abi-Zeid *et al.* 2005), in combination with spreadsheets to gain a better understanding of the method described in the literature (Maystre *et al.* 1994, Vincke 1989). ELECTRE II uses three global concordance thresholds (c_1 , c_2 and c_3) and two discordance thresholds per criterion (v_{1j} and v_{2j}). In our analysis, concordance and discordance thresholds are set to minimise incomparability (Table 5.12). As a matter of fact, since all considered alternatives meet the required performance constraints, even a very bad performance on any criterion is still within the range of acceptable solutions. This situation consequently limits the need to use vetoes through restrictive discordance thresholds.

Table 5.12 - Concordance and discordance thresholds for the ELECTRE II analysis

Concordance thresholds	$c_1 = 0.8$		$c_2 = 0.7$		$c_3 = 0.55$	
Discordance thresholds	critereon 1 moisture	critereon 2 acoustic	critereon 3 construction	critereon 4 maintenance	critereon 5 HVAC	critereon 6 environment
v_1	1	5	5 000	0	2 000	2 000
v_2	3	20	25 000	5 000	5 000	10 000

Following the ranking process, a sensitivity analysis is carried out to determine how the final ranking is influenced by the concordance and discordance thresholds used, the weights granted to each criterion, or the inaccuracy of the evaluations. In this study, varying the thresholds changes the incomparability between the alternatives but does not modify their rankings. The imprecision of the performance evaluations has a limited impact since the evaluations on any given criterion are quite distant for the different alternatives. In our case, the relative weight accorded to an individual criterion has the biggest impact on the final ranking. As an example, Figure 5.6 shows the changes in the ranking of the alternatives when varying the weight assigned to criterion 1 (moisture management performance) in context 1. For this context, the initial weight of 20% assigned to criterion 1 needs to

increase to 34% to influence the final ranking, bringing, for instance, assembly 1 to the second place instead of assembly 5. The ranking changes abruptly at the specific weight of 34% since, contrary to the other methods, ELECTRE II does not provide information on the distance between two alternatives overall evaluations. ELECTRE, unlike the weighted sum and M-Macbeth, does not compute a single global score for each alternative.

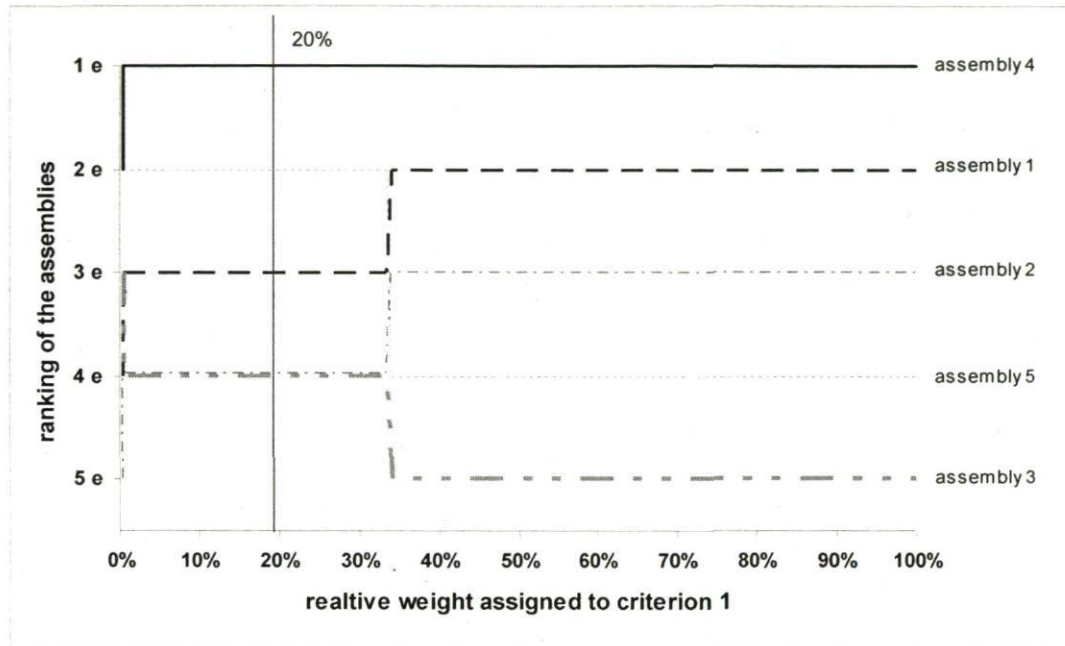


Figure 5.6 - Sensitivity analysis of the ELECTRE II ranking on the weight of criterion 1 in context 1

A drawback of ELECTRE II is its inability to take into account the magnitude of the difference between two evaluations on a given criterion. It only provides ordinal information on the alternatives. For example, if A is preferred to B by criterion 1, it is not possible to indicate whether the performance of A is somewhat better or much better than the performance of B . The only possibility offered by this method is to introduce vetoes to discard unacceptable differences. The ELECTRE III method offers the possibility to evaluate the magnitude of the outranking through the introduction of pseudo-criteria, using indifference and preference thresholds. An analysis was performed with ELECTRE III using a demo version of the ELECTRE III software (Lamsade, 1994), as well as a homemade program based on literature (Maystre et al., 1994, Vincke, 1989). However, for

the studied example, the final ranking for the various contexts was very sensitive to the defined parameters and ELECTRE III showed a higher level of complexity which seems to require the expertise of a specialist in order to provide more robust results.

5.5.4 PROMETHEE

The PROMETHEE methods also belong to the MCDA outranking approaches and analyse the ranking of the alternatives using preference flows: positive, negative and net. The positive flow (F^+) measures the extent to which one alternative is preferred to the other ones, while the negative flow (F^-) measures the extent to which the other alternatives are preferred to the one considered. In PROMETHEE II, the net flow (F_{net}) of an action combines these two values into a single rating, by calculating the difference between F^+ and F^- . A preference function relates the difference in the performance of two alternatives to the preference of an alternative over the other. It may involve indifference and preference thresholds in combination with linear or Gaussian functions (Behzadian *et al.* 2009, Brans and Mareschal 2005).

The PROMETHEE I partial ranking is obtained from the comparison of positive and negative outranking flows individually (Equation 4). When a higher positive flow and a lower negative flow are obtained, the information of both outranking flows is consistent and may be considered to be certain. When both positive and negative flows are equal, the decision-maker may consider the two alternatives to be indifferent. However, when both flows are higher for the same alternative, the information is not consistent and the alternatives are considered incomparable. The PROMETHEE I ranking does not decide which action is best in such cases, and prefers to leave the responsibility to the decision-maker (Brans and Mareschal 2005).

$$\begin{array}{ll}
 \text{A is preferred to B} & \text{if} \quad \left\{ \begin{array}{l} F^+(A) > F^+(B) \text{ and } F^-(A) < F^-(B), \text{ or} \\ F^+(A) = F^+(B) \text{ and } F^-(A) < F^-(B), \text{ or} \\ F^+(A) > F^+(B) \text{ and } F^-(A) = F^-(B); \end{array} \right. \\
 \text{A is indifferent to B} & \text{if} \quad F^+(A) = F^+(B) \text{ and } F^-(A) = F^-(B); \\
 \text{A is incomparable to B} & \text{if} \quad \left\{ \begin{array}{l} F^+(A) > F^+(B) \text{ and } F^-(A) > F^-(B), \text{ or} \\ F^+(A) < F^+(B) \text{ and } F^-(A) < F^-(B) \end{array} \right.
 \end{array} \tag{5.4}$$

PROMETHEE II complete ranking uses the net outranking flow (Equation 5). This result is easier to apply but it could be more disputable since it does not consider incomparability and provides poorer information at the end of the process.

$$\begin{aligned}
 A \text{ is preferred to } B & \quad \text{if} \quad F_{net}(A) > F_{net}(B); \\
 A \text{ is indifferent to } B & \quad \text{if} \quad F_{net}(A) = F_{net}(B);
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

The developers recommend using both PROMETHEE I and PROMETHEE II, since their results complete each other.

The demo version of the Decision Lab software is used in this study to rank the five alternative wall assemblies in the given six contexts (Visual decision 2007). The analysis includes both rankings: PROMETHEE I partial ranking and PROMETHEE II complete ranking without incomparabilities. Yet, only the complete ranking provided by PROMETHEE II is presented in Table 5.9. Decision Lab also includes a dynamic tool to perform a sensitivity analysis on the weight assigned to each criterion. The results obtained for context 1 are used to develop the graph presented in Figure 5.7.

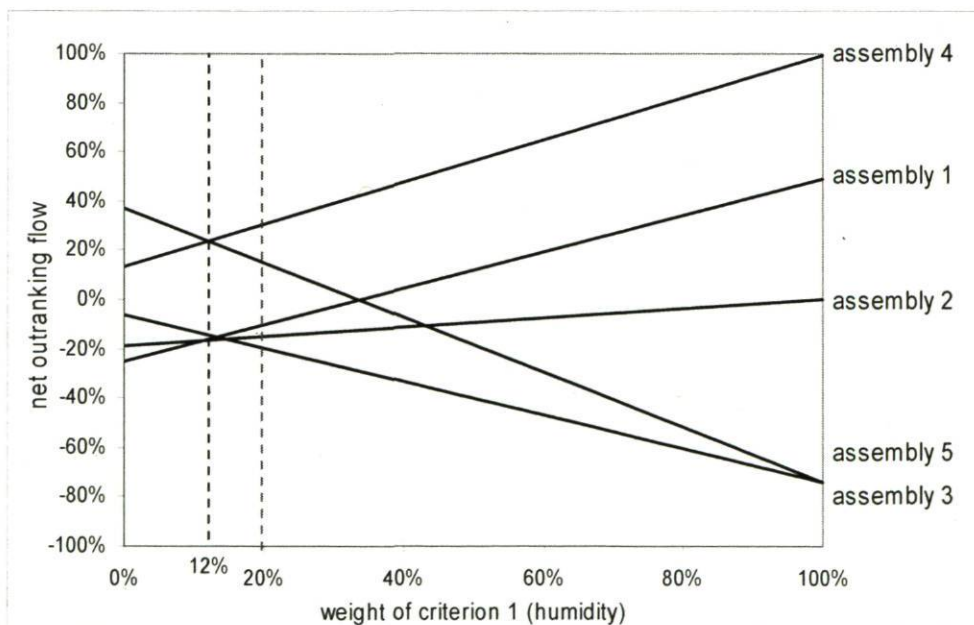


Figure 5.7 - Sensitivity analysis of the PROMETHEE II ranking on the weight of criterion 1 in context 1 (derived from results obtained with Decision Lab software)

5.5.5 Comparison of the results of the various aggregation methods

The rankings of the five alternative wall assemblies by the four methods considered in our case study are summarised in Table 5.9 and Figure 5.8. Table 5.9 details the ranking obtained for the six decision contexts with each method, indicating the scores of the alternatives for the synthesizing criterion methods, and the net flux for PROMETHEE II. Indeed, the weighted sum and MACBETH provides a score for each alternative, allowing the decision maker to know the distance between the alternatives in the final ranking. ELECTRE II gives no additional indication to support the final ranking, whereas PROMETHEE II net flux indicates the proportion of the criteria voting for and against each alternative in a given decision context.

Figure 5.8 presents the results graphically, helping to compare the different methods and contexts. The ranking results, even though not identical, the results are quite consistent. Except for context 4, all four methods assign the first place to the same assembly in the same context.

The four methods show similar results in contexts 1 2 and 5, except for the last two ranks. In context 3, the second and third ranks vary between assemblies 4 and 5. The scores for these two alternatives are very close to each other, which would place them almost at the same level, and explain this ambivalence. In context 4, the various methods do not agree on the ranking. It is interesting to note that assemblies 3 and 4 are defined as incomparable by PROMETHEE I (partial ranking). Indeed, context 4, which is located close to the highway, gives great importance to criterion 2 (acoustic) and criterion 3 (construction cost), while most alternatives show opposite results with large difference regarding these two criteria. Therefore, aggregation methods using outranking without considering the amplitude of the differences (ELECTRE II), single score (MACBETH or weighted sum), or a mixed method (PROMETHEE), provide different rankings in this context. In context 6, where long-term impacts are considered, assemblies 1 2 and 3 produce very similar scores with the weighted sum and MACBETH, and the ranking of these alternatives is very sensitive to the upper limit fixed for criterion 4 (maintenance cost). Moreover, assemblies 2 and 5 are incomparable in this context according to PROMETHEE I (partial ranking). Therefore, the

ranking vary from one method to the other, even though assembly 4 occupies the first rank for all methods.

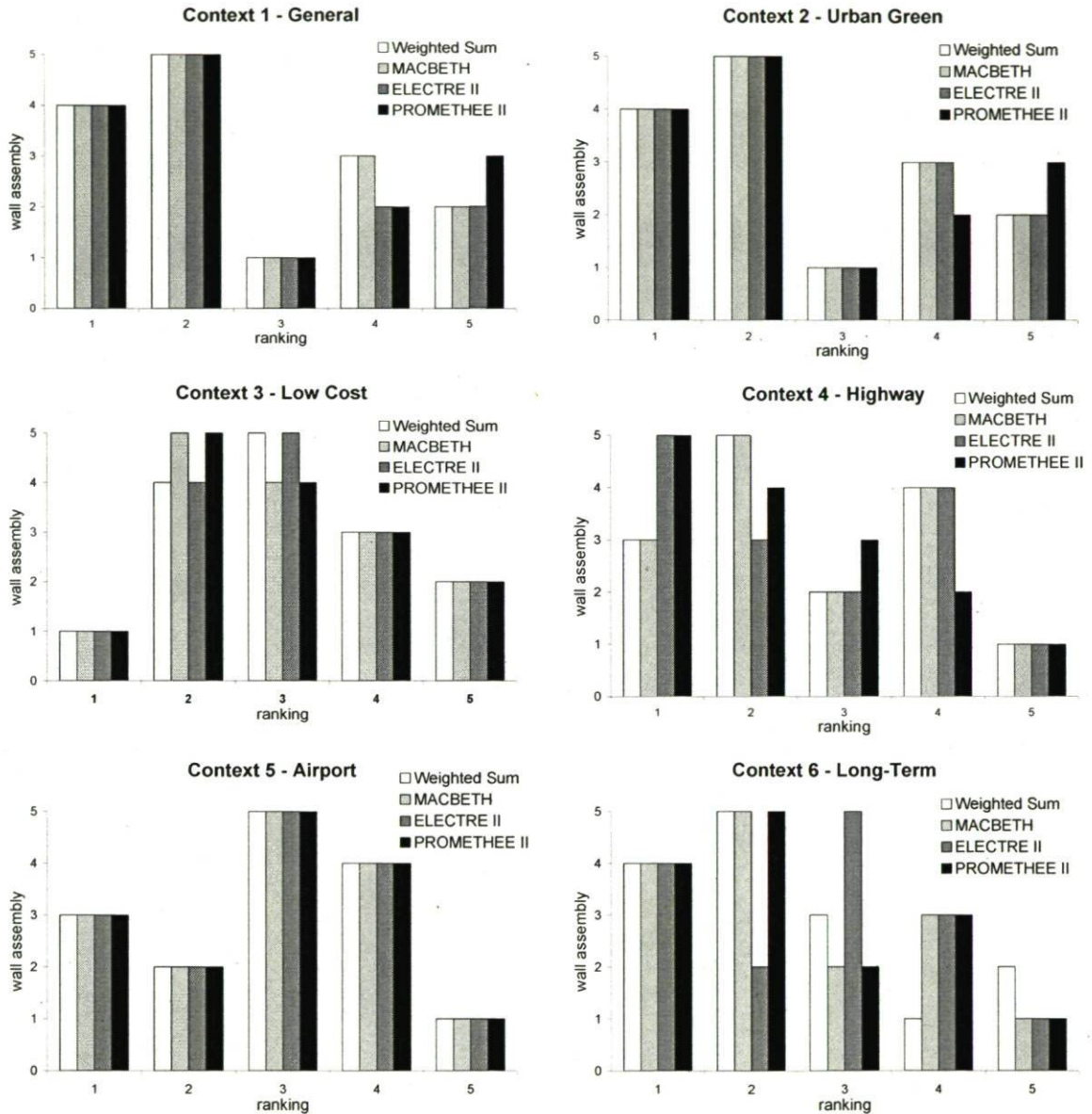


Figure 5.8 - Ranking of the alternative assemblies using four different aggregation methods in six different contexts

5.6 Discussion

Once the performance evaluations have been determined for the identified criteria, several MCDA aggregation methods can be used to take into account the characteristics of the context and the preferences of the decision-maker. Coming from two large families of aggregation approaches, single criterion synthesizing and outranking, these methods offer different advantages and restrictions. The decision-maker must bear in mind that each method has its underlying assumptions and hypotheses, likely to yield different results (Guitouni and Martel 1998). In this study, even though all methods yield similar rankings in most contexts, it is important to examine the assumptions of each method to verify its applicability and raise awareness of the designer upon what method to use in a given situation.

The weighted sum is an elementary method considering only of quantitative criteria and is based on several assumptions: independence, commensurability, invariance and transitivity. In this study, it seems acceptable to state that the criteria evaluations are independent, invariant and transitive. They are however not directly commensurable since they use various scales. This requirement can be met using normalization by computing ratios, therefore assuming linear cardinal scales in combination with known and representative upper and lower limits. In spite of the simplicity of the method, which facilitates the understanding of results, the non-linearity of certain scales and the difficulty to determine with precision upper and lower values limit the confidence in its results. Furthermore, the sensitivity analysis demonstrates a wide variation in the results when the range values of some parameters are modified. Used alone, this technique is too sensitive and cannot provide designers with an adequate level of confidence in their decision.

MACBETH is also a single criterion synthesizing method requiring independent, invariant and transitive criteria evaluations. However, it can handle qualitative and quantitative criteria and allows the user to construct cardinal scales based on his/her preference judgements while verifying the consistency of these judgements. Despite its compensatory nature, the sensitivity and robustness tools provided in the software offer a greater confidence in the ranking obtained since the influence of the various parameters can be

easily established. The importance of including non-linear scales when necessary is shown by comparing the rankings provided by the weighted sum and by MACBETH. Nonetheless, a drawback of MACBETH is the difficulty to evaluate the influence of the reference levels used for the different scales, on the final ranking, since these parameters are not included in the sensitivity analysis.

ELECTRE II and PROMETHEE require only independent and invariant criteria evaluations, and are based on social choice theory. ELECTRE II accepts quantitative and qualitative criteria, and does not require the definition of a non-linearity function or a range for the various scales. It avoids therefore the effects of compensation influencing the ranking provided by single criterion synthesizing methods. In addition, ELECTRE II accepts incomparability if the evaluations are not coherent. It is important to verify the influence of the concordance and discordance thresholds on the final ranking. The confidence in the ELECTRE II ranking is however reduced by the impossibility to take into account the difference amplitude between two alternatives on a criterion. PROMETHEE proposes a solution to this inconvenience by the introduction of functions to describe the decision-maker's preferences for a given difference in evaluations along each criterion. Furthermore, the positive and negative flows indicate partial rankings and highlight possible incomparability while net flow can be used to obtain a full ranking of the alternatives.

Following these observations, the authors would recommend comparing the results of at least two aggregation methods to enhance confidence in the final ranking of the alternatives. MACBETH and PROMETHEE seem particularly well adapted to this type of problem and bring two different perspectives to the decision process. In addition, both programs include user-friendly tools to perform sensitivity analyses. Nonetheless, if the decision-maker is required to decide on only one method, this choice could be based on the information available as well as the objective of the study. MACBETH provides a quantified ranking taking into account the relative weight as well as the difference between the alternatives evaluations on each criterion. It however requires sufficient information to enable the construction of representative cardinal scales. Whereas, PROMETHEE can use

ordinal or cardinal scales to provide a ranking based mainly on the relative weight. Yet, if additional information on the scales is available, the difference between the alternatives evaluations on each criterion can be included in the analysis using representative preference functions.

5.7 Conclusion

Analytical tools and experimental data are available to evaluate light-frame wood wall assemblies according to specific performance aspects. However, the capacity to judge and compare the assemblies based on several performance criteria simultaneously is still missing. The development of a framework to support the choice of a factory-built wood-frame exterior wall assembly based on a MCDA methodology allows the integration of subjective preference with quantitative and qualitative evaluations to adapt a given design to a specific decision context.

In this project, we worked on the development of a MCDA framework in two phases. The first phase concentrated on the structuring of the decision situation including the definition of adequate criteria and the means to assess these performance attributes (Frenette *et al.* 2008). This exercise is essential for establishing rigorous foundations to support the choice of an assembly based on multiple criteria and adapted to specific decision contexts. The second phase of our work took into account the specificity of the decision context and the subjective preferences of the decision-maker in order to aggregate the performance evaluations. This led us to identify the advantages and weaknesses of four MCDA aggregation techniques in the evaluation of a case study comparing five wall assemblies in six different decision contexts.

The framework developed illustrates how MCDA methods can be applied in the design of wall assemblies. It also provides clues on the importance of dividing the performance characteristics into constraints and criteria. Once constraints have been used to identify acceptable alternatives, the level of performance of these alternatives must be evaluated according to the criteria using appropriate tools. Qualitative and quantitative scales are accepted by many MCDA tools, but the features of these scales such as lower and upper limits and the non-linearity may need to be defined as was done in this project.

The implementation of different MCDA aggregation techniques shows their usefulness for organising the information and supporting the decision-making process. It is however important to verify the acceptability of the criteria evaluation results and scales with the aggregation hypotheses inherent to the chosen MCDA technique. The comparison of the ranking results of two or more aggregation techniques can help the decision-maker better understand the specific decision context studied and determine his/her confidence in the final decision. MACBETH and PROMETHEE were found to be particularly useful because they bring two different perspectives to the decision process while providing user-friendly tools to perform sensitivity analyses.

This study may present two sources of limitations. Firstly, it is deliberately limited to wall assemblies at this developmental stage. Many interactions between the walls and real-life building components have not been taken into account, including, for example, acoustic and thermal bridging between floor and wall systems. The second limitation is methodological, as the different tools used are not yet “designers” friendly. Actually, the use of these software necessarily requires a certain scientific background from the users

The results of this project highlight however the potential of an interdisciplinary approach, which allows the integration of methodologies developed in various fields of expertise, such as decision analysis, to bring a new perspective to the design problem in engineering. The importance of linking specialised expertises is essential to accomplish designs that are not only technically optimal but also well adapted to the human demand in specific contexts. Although applied to a limited scope in this specific project, we believe that the developed methodology is general enough to be viable for future studies into whole building systems, and sets a foundation for future developments in simplified multicriteria design tools for building engineering.

Conclusion générale

Le choix d'une configuration de murs extérieurs dépend de plusieurs facteurs. D'une part, tous les murs envisagés doivent répondre aux contraintes de conception exigées par le cadre réglementaire dans un contexte donné. D'autre part, la performance globale d'un mur dépend de plusieurs autres critères dont le niveau d'acceptabilité et l'importance relative sont fonction des exigences du contexte précis. Plusieurs projets de recherche ont étudié des aspects spécifiques du comportement des murs extérieurs à ossature légère en bois. Peu de projets ont cependant tenté d'apporter une vision d'ensemble en créant des liens entre ces différents champs d'expertise pour évaluer globalement le comportement de ce type de construction. Le protocole d'évaluation développé par Horvat (2005) entreprend cette démarche en énumérant un ensemble de détails constructifs permettant d'assurer la qualité globale d'une construction à ossature légère dans la région de Montréal, Québec. D'autres projets considèrent différents critères dans l'évaluation des bâtiments, en intégrant quelques fois la perception de l'utilisateur, sans toutefois se concentrer sur les spécificités de ce type de système constructif que sont les constructions à ossature légère.

Le présent projet de recherche a donc cherché à approfondir l'analyse de la situation décisionnelle liée au choix d'une composition de mur extérieur à ossature légère en bois, et à proposer un outil de décision pouvant tenir compte d'une part des exigences techniques et d'autre part des préférences du preneur de décision dans le contexte d'utilisation. Une approche multicritère d'aide à la décision permettant de structurer une prise de décision en incluant des informations qualitatives et quantitatives et en tenant compte des préférences des décideurs a été suivie. L'ensemble du projet se développe autour d'un exemple d'application comparant cinq compositions de murs à ossature en bois pour un bâtiment résidentiel situé à Québec.

Dans un premier temps, une analyse de la situation décisionnelle a permis d'identifier un ensemble d'attributs permettant d'évaluer la performance d'un mur, tout en étant directement liés au choix de sa composition. Ces attributs ont ensuite été divisés en deux groupes: les contraintes de conception devant être remplies pour qu'un mur soit jugé acceptable, et les critères de performance permettant de comparer plusieurs murs entre eux. L'acceptabilité selon chaque contrainte de conception est définie en fonction du mode

d'évaluation et du seuil minimal prescrit dans la réglementation en vigueur dans le contexte étudié. Les critères de performance allant au-delà du cadre réglementaire, une méthode, permettant de quantifier le rendement de chaque mur dans le contexte étudié, a été identifiée selon chacun des domaines d'expertise. Globalement, ces attributs et leurs modes d'évaluation ont été sélectionnés en fonction du contexte étudié. Dans un autre contexte, cet ensemble pourrait être revisité afin d'en assurer la pertinence et la cohérence des attributs et des modes d'évaluation.

Pour le contexte étudié, cette analyse a identifié six contraintes de conception permettant de juger l'acceptabilité d'une composition de mur: la résistance structurale des montants aux charges combinées, la résistance en contreventement du mur, la performance au feu, la résistance thermique minimale, l'étanchéité à l'air et les mesures obligatoires de gestion de l'humidité. L'évaluation de ces critères et l'identification des seuils minimaux requis ont été établies en fonction du CNBC (CNRC 2005), de la Norme de calculs des charpentes en bois (CAN/CSA-O86-01 2005), du Guide d'ingénierie pour les constructions à ossature bois (CWC 2004) et du Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments du Québec (L.R.Q. 2008) .

Par la suite, les compositions de murs jugées acceptables, considérées alors comme des alternatives possibles, ont été évaluées selon six critères de performance: la gestion de l'humidité, l'atténuation des bruits aériens, le coût de construction, les coûts d'entretien, les coûts de chauffage et de climatisation et les impacts environnementaux. Une revue des méthodes permettant l'évaluation du rendement d'un mur extérieur à ossature légère en bois a été entreprise dans chacun de ces champs d'expertise afin de suggérer un mode de quantification adapté au contexte étudié. Pour la gestion de l'humidité, il a été choisi de ramener les résultats obtenus par un outil de simulation du transport de chaleur et d'humidité, WUFI 4.1, sur une échelle ordinale, construite dans le cadre de cette étude en se référant à des niveaux moyens d'humidité relative dans la cavité du mur proposés par la norme ASHRAE 160P (2006). Le niveau d'atténuation des bruits aériens a été estimé par un indice de transmission du son extérieur-intérieur (OITC) dérivé de mesures expérimentales et disponible dans la littérature pour différentes configurations standards de mur à ossature

légère en bois. Le coût de construction du mur en ce qui concerne les matériaux et la mise en œuvre a été déterminé grâce au répertoire de coût de construction RSMMeans (2007), et corrélé avec de l'information fournie par les fabricants locaux. Les coûts d'entretien ont été estimés en tenant compte de la période de remplacement suggérée et de la garantie des produits. Les coûts d'opération se sont limités au coût de chauffage directement liés à la composition du mur étant donné le contexte climatique étudié. Ces coûts ont été évalués selon un calcul en régime permanent de la perte de chaleur à travers le mur en fonction de sa résistance thermique et des données climatiques. Ces valeurs ont aussi été vérifiées à l'aide du logiciel HOT 2XP. Les impacts sur l'environnement ont été évalués, dans un premier temps, en fonction des émissions de gaz à effet de serre émises par le cycle de vie du mur et la production de l'énergie d'opération selon une simulation du logiciel ATHENA.

Dans l'ensemble, ces analyses ont démontré la sensibilité des résultats à l'exactitude des propriétés utilisées pour chacun des matériaux et produits composants le mur. Ainsi, les caractéristiques hygrothermiques des matériaux influencent les résultats obtenus pour juger de la gestion de l'humidité, alors que la comparaison des coûts de chauffage dépend de l'exactitude de la résistance thermique effective calculée pour chacun des murs. De plus, il a été observé que ces propriétés ne sont pas toujours disponibles pour les nouveaux matériaux, rendant plus laborieuse et incertaine une évaluation précise, selon l'ensemble des critères, de compositions innovantes de mur. Certains de ces produits, comme par exemple le panneau de fibre laminé d'un film d'aluminium, sont couramment utilisés mais leurs propriétés ne sont pas encore disponibles dans les bases de données. Même si l'information peut être ajoutée par l'utilisateur dans certains outils, des données comme les propriétés hygrothermiques complètes incluant la variation en fonction de la teneur en humidité ne sont souvent pas disponibles. Des valeurs approximatives doivent alors être utilisées. Il en est de même pour les inventaires utilisés dans les analyses de cycle de vie qui permettent de caractériser l'impact sur l'environnement de différents matériaux.

Concernant l'évaluation des impacts sur l'environnement, celle-ci est basée sur un bassin de connaissances développé relativement récemment et les résultats obtenus par la première simulation effectuée ne semblaient pas suffisamment documentés. Il est donc apparu

important d'approfondir cette évaluation par une analyse du cycle de vie (LCA) plus globale incluant la comparaison de différents indicateurs d'impact environnemental calculés selon trois modèles d'analyse d'impact environnemental (LCIA). Cette analyse a permis de définir plus rigoureusement l'objectif et les frontières du système étudié, d'intégrer une évaluation plus réaliste de la durée de vie de bâtiments résidentiels en Amérique du Nord, et de mieux juger des forces et des faiblesses de l'outil utilisé, ATHENA. Cet outil a été choisi car sa base de données et ses processus intégrés étaient les plus représentatifs du milieu de la construction en Amérique du nord. L'outil est facile d'utilisation mais les détails de la comptabilisation des impacts ne sont pas accessibles par l'utilisateur. Ce manque de transparence a rendu difficile le développement d'une analyse de sensibilité complète.

La comparaison des différents indicateurs de dommages environnementaux au niveau intermédiaire (midpoint) ont soulevé quelques différences entre les modèles d'analyse d'impact. En effet, ces modèles ne considèrent pas de la même façon certaines émissions, comme les émissions dans l'eau de métaux non-ferreux, les émissions dans l'air de composés organiques volatiles, ou encore l'émission dans l'air de monoxyde de carbone provenant de source biogénique, comme le bois. Ces différences ont eu cependant peu d'effet sur le rangement final des murs étudiés selon les indicateurs de dommage (endpoint). De plus, la similarité des résultats selon l'ensemble des indicateurs de dommages a montré que l'indicateur du changement climatique, évaluant la quantité de gaz à effet de serre émise, pouvait être considéré comme un indice environnemental représentatif dans le cadre établi par cette étude. Cette conclusion a permis de supporter le choix qui avait été fait dans la première partie du projet.

L'analyse des résultats a aussi permis d'identifier les éléments influençant le plus l'impact environnemental du système étudié. Plusieurs études consultées concluaient en l'avantage environnemental d'une structure en bois par rapport à d'autres types de construction en acier ou en béton. Dans cette étude, la comparaison de différentes compositions de mur à ossature bois a permis d'évaluer les impacts relatifs des différents composants de l'enveloppe de ce système constructif. Parmi les matériaux étudiés, la brique, le parement

de vinyle, l'isolation en fibre de verre et le polystyrène extrudé représentaient une portion importante des impacts environnementaux intrinsèques. Les impacts dus à l'énergie d'opération, considérant exclusivement la portion de chaleur produite par chauffage électrique et transmise par convection à travers le mur pour une période de 60 ans, étaient relativement faibles comparés aux impacts intrinsèques. L'analyse de sensibilité a cependant soulevé l'importance du choix des frontières du système étudié sur les résultats obtenus. Ainsi, l'impact lié à la demande énergétique est grandement influencé par l'importante différence d'impact entre les diverses sources d'énergie, par la variation régionale des sources de production d'électricité, ainsi que par l'interconnexion des réseaux de distribution d'électricité.

L'observation de l'ensemble des évaluations obtenues selon les différents critères de performance pour les compositions étudiées a démontré la nécessité du recours à une méthode d'agrégation multicritère pour soutenir un choix éclairé d'une composition de mur dans un contexte donné. D'une part, aucune alternative n'était jugée comme la meilleure solution selon l'ensemble des critères. D'autre part, une simple addition ne permettait pas d'obtenir un résultat global, les évaluations selon les différents critères étant mesurées sur des échelles totalement différentes. En effet, certains critères se concentrent sur la satisfaction de l'occupant, alors que d'autres mesurent la durabilité ou le coût du produit. L'exemple d'application a aussi montré comment plusieurs solutions acceptables en vertu du cadre réglementaire pouvaient résulter en des niveaux de performance très différents selon d'autres critères. De plus, même en considérant un contexte donné avec des paramètres définis comme les données climatiques, le choix d'une source d'énergie et la durée de vie du bâtiment, la supériorité d'un design par rapport à un autre n'est pas facile à évaluer. Dans l'exemple étudié, la deuxième composition de mur est la plus dispendieuse sans toutefois offrir les meilleurs résultats selon tous les critères.

Ce projet de recherche s'est donc penché sur la contribution possible des procédures d'agrégation multicritères (PAMC) dans le choix d'une composition de mur à ossature légère en bois pour un contexte donné. Quatre PAMC, appartenant à deux grandes familles méthodologiques ont été utilisées : La somme pondérée et le modèle MACBETH sont des

approches de critère unique de synthèse, alors qu'ELECTRE II et PROMETHEE utilisent une approche de surclassement de synthèse (Guitouni et Martel 1998).

L'échelle de chaque critère a dû être précisée en fonction des besoins de chacune des approches. L'approche de critère unique de synthèse demande que les critères soient mesurés sur des échelles cardinales ayant des niveaux de référence définis. Une étude de chaque critère a donc été nécessaire pour caractériser le mieux possible l'échelle, sa linéarité et ses niveaux de référence. Pour certains critères, comme la gestion de l'humidité, l'échelle ordinale de mesure a dû être transformée en échelle cardinale. La somme pondérée n'offre aucune nuance et considère toutes les échelles comme cardinales et linéaires. Au contraire, le logiciel M-MACBETH offre un outil interactif pour aider le décideur à transformer les échelles ordinales en échelles cardinales, pouvant être linéaires ou non. Les approches de surclassement de synthèse ELECTRE II et PROMETHEE acceptent les échelles cardinales et ordinales et ne requièrent pas la détermination de niveaux de référence. L'information minimale requise est simplement le sens de préférence de l'échelle. Si des informations additionnelles, comme des niveaux d'indifférence, de préférence et de véto ou une fonction de non-linéarité, sont connues pour certaines échelles, celle-ci pourraient être intégrées à l'analyse selon la méthode utilisée.

Par la suite, pour permettre un choix réaliste en tenant compte des préférences du décideur, six contextes de décision plausibles, définis par un environnement physique et les préférences d'un décideur potentiel, ont été intégrés à l'exemple d'application. Pour chaque contexte de décision, des poids relatifs des critères ont été définis avec l'aide du logiciel M-MACBETH.

La comparaison des résultats de rangement obtenus à l'aide de ces quatre PAMC dans les six contextes considérés, ainsi que les analyses de sensibilité, ont permis de mieux juger de la contribution possible de ces différentes procédures dans cette étude.

Les approches de critère unique de synthèse sont des méthodes compensatoires qui permettent à un mauvais résultat selon un critère d'être annulé par une bonne performance selon un autre critère. Dans ce sens, elles peuvent donc manquer de transparence. Elles ont

cependant l'avantage de considérer la distance relative entre les niveaux de rendement individuels pour ranger les alternatives selon une échelle globale. Parmi les méthodes utilisées, la somme pondérée est cependant une méthode trop simpliste qui ne gère que des informations quantitatives mesurées sur des échelles cardinales. Elle a été considérée dans cette étude car elle représente une méthode intuitive qui pourrait être envisagée par un éventuel décideur en l'absence d'information plus poussée sur les approches d'aide à la décision multicritère. Elle ne serait cependant pas recommandée pour la situation étudiée.

MACBETH est aussi une méthode de critère unique de synthèse, mais elle offre la possibilité de gérer des informations qualitatives et quantitatives en construisant des échelles cardinales qui tiennent compte des préférences du décideur et peuvent être non-linéaires. Le rangement obtenu est donc plus nuancé. De plus, l'outil utilisé, M-MACBETH, permet d'obtenir des analyses de sensibilité et des tests de robustesse détaillés. Cette méthode serait donc recommandée dans une situation où la connaissance des échelles de mesures utilisées pour chacun de critères est suffisamment détaillée.

Pour les méthodes de surclassement ELECTRE II et PROMÉTHÉE, la définition des échelles de mesure peut être moins détaillée car ces méthodes ne requièrent que des évaluations invariantes selon des critères indépendants. Le rangement est basé sur la théorie du choix social, qui permet d'éviter l'effet compensatoire de l'approche à critère unique de synthèse. Ces méthodes utilisent la comparaison par paire des alternatives selon chaque critère. Calculant le "vote" de chaque critère pour établir un rangement global, ces approches peuvent permettre de déduire que deux alternatives sont incomparables si les informations ne sont pas cohérentes. Pour ELECTRE II, le calcul du rangement utilise des seuils de concordance et de discordance dont l'influence doit être étudiée par une analyse de sensibilité. De plus, cette méthode ne tient pas compte de la distance relative entre les niveaux de rendement individuels selon chacun des critères. PROMÉTHÉE offre une solution à cet inconvénient en introduisant des fonctions qui peuvent permettre de quantifier la préférence lors de la comparaison par paire selon chaque critère. Ces fonctions peuvent être très simples ou plus complexes selon l'information disponible pour chaque critère. L'outil utilisé, la version démo du logiciel Decision Lab, a permis de calculer un

rangement partiel qui accepte l'incomparabilité avec PROMÉTHÉE I, ainsi qu'un rangement complet qui élimine la possibilité d'incomparabilité avec PROMÉTHÉE II. La comparaison de ces deux rangements, ainsi que les outils d'analyse de sensibilité disponible ont renforcé la confiance en la robustesse d'un rangement des alternatives avec cette méthode.

L'application de ces quatre PAMC a montré l'importance d'utiliser une approche adaptée au contexte de décision étudié, autant en matière d'information disponible que de résultat recherché. De plus, il semble que la comparaison du rangement des alternatives obtenu à l'aide d'au moins deux PAMC renforce la confiance dans le résultat final. Suite à cette étude, il apparaît avisé de comparer les résultats de MACBETH et de PROMETHEE car ces deux méthodes viennent de deux approches différentes et sont disponibles dans des outils informatiques conviviaux. Si le décideur souhaitait n'utiliser qu'une seule PAMC, le choix dépendrait de l'importance accordée à la définition des échelles de mesures ainsi que du résultat attendu. D'un côté, MACBETH requiert une définition précise d'une échelle cardinale pour chacun des critères, mais offre un outil permettant au décideur de définir ces échelles en fonction de ses préférences. Le rangement final est obtenu selon une échelle globale définissant la distance entre les alternatives reflétant les évaluations locales. De l'autre côté, PROMÉTHÉE permet d'obtenir un rangement même si les échelles sont moins bien définies, qu'elles soient ordinales ou cardinales. Si une meilleure définition des échelles est souhaitée, l'utilisation de fonctions de préférence peut aider à quantifier les comparaisons par paire mais aucun outil particulier n'est disponible pour aider à définir ces fonctions. La comparaison de PROMÉTHÉE I et de PROMÉTHÉE II renforce la confiance du décideur en un rangement final, qui est quantifié par la proportion des critères votant pour chacune des alternatives.

En conclusion, ce projet de recherche a permis de développer un cadre d'analyse permettant l'évaluation de compositions de murs préfabriqués à ossature légère en bois considérant simultanément un ensemble de critères de performance en lien avec les préférences d'un décideur. Ce projet inclut aussi une mise en application comparant cinq compositions de murs extérieurs pour un bâtiment résidentiel à Québec, selon six contextes décisionnels

différents. Dans un premier temps (chapitre 3), une structuration du problème par une approche vers le bas a identifié les contraintes de conception et les critères de performance qui nécessitent d'être considérés. Des méthodes d'évaluation pour chacun des critères ont ensuite été choisies. Quoique plusieurs outils soient disponibles dans différents champs d'expertise pour évaluer de telles compositions de murs selon un critère spécifique, les résultats ont souvent dû être interprétés afin d'établir un indice de performance approprié et une échelle adaptée permettant leur considération dans un cadre d'évaluation globale. Ainsi pour l'évaluation des impacts sur l'environnement, qui est une science relativement récente, une étude (chapitre 4) a permis d'approfondir l'analyse du cycle de vie en comparant les indicateurs d'impacts de trois différents modèles. Finalement (chapitre 5), quatre procédures d'agrégation multicritères ont été comparées pour le rangement de compositions de murs selon différents contextes possibles. Cette analyse s'est aussi penchée sur les forces et les faiblesses de chacune de ces procédures dans le cadre étudié.

Le développement de ce cadre d'évaluation a montré la contribution possible des approches multicritères d'aide à la décision dans les étapes de conception des compositions de murs. D'une part, elles offrent des outils permettant de bien structurer le problème décisionnel. D'autre part, elles permettent d'agréger des évaluations qualitatives ou quantitatives selon plusieurs critères en un rangement global qui intègre les préférences d'un ou des décideurs. Globalement, ce projet de recherche confirme l'importance des modèles multidisciplinaires qui, en créant des ponts entre les différents champs d'expertise, peuvent amener une nouvelle perspective sur un problème de conception en ingénierie. Ils rendent ainsi possible le développement de solutions, non seulement, optimisées techniquement mais aussi adaptées aux demandes des utilisateurs dans un contexte donné.

Limites de l'étude:

- Quoique visant à établir un cadre d'analyse général permettant le choix de compositions de murs à ossature légère dans un contexte international, l'exemple d'application développé dans ce projet de recherche ne représente qu'un contexte géographique spécifique et ne peut être jugé représentatif de tout autre contexte.

- L'étude ne fait que la comparaison de constructions à ossature légère en bois, elle ne compare pas celle-ci avec d'autres types de constructions intégrant e.g. la maçonnerie de béton ou autre matériau structural.
- L'exemple d'application inclut la définition de six contextes décisionnels possibles. Le choix de la pondération des différents critères utilisés pour mener les agrégations multicritères dans cet exemple sont des choix plausibles estimés selon certains paramètres contextuels. Ces choix ne sont pas basés sur une analyse scientifique ou sociologique des contextes de décision choisis.
- Les évaluations selon les différents critères de performance sont basées sur des simulations utilisant des bases de données ou sur de l'information disponible dans la littérature. Dans certains cas, des hypothèses ont dû être posées pour approximer des informations manquantes. Ces évaluations, malgré qu'elles aient été faites selon les règles de l'art, représentent tout de même une estimation limitée de la réalité.
- Les simulations de transfert de masse et de chaleur ont été réalisées, comme cela se fait généralement, à l'aide d'une simulation unidimensionnelle utilisant les bases de données disponibles et ne considérant pas l'ensemble du mur, ni la présence de l'ossature en bois.
- L'étude des impacts environnementaux est soumise aux limites de l'outil utilisé et aux hypothèses sous-jacentes au développement de sa base de données d'inventaire et de ses processus intégrés. De plus, les comparaisons établies et la justification de l'utilisation de l'indicateur de changement climatique comme indice environnemental est basé sur les résultats obtenus. Ces résultats incluent la portion des émissions dans l'air et dans l'eau, ainsi que de l'utilisation de ressources, fournie dans l'inventaire d'ATHENA et pouvant être caractérisée par les modèles d'impact utilisés. D'autres impacts environnementaux, comme le changement d'utilisation des terres, ne sont pas inclus dans cette étude.
- L'indicateur d'impact sur la santé humaine utilisé dans l'analyse du cycle de vie n'étant pas localisé, l'analyse du cycle de vie ne permet pas d'évaluer la qualité de l'air dans les maisons.

- Les émissions de gaz à effet de serre n'ayant pas de valeur définie, liée par exemple à une bourse du carbone, dans la juridiction étudiée, la valeur économique des gaz à effet de serre n'a pas pu être comparée directement aux autres coûts du bâtiment dans le rangement des diverses options à l'étude.
- L'ensemble du projet de recherche se concentre sur la comparaison de compositions de murs, et ne vise pas à évaluer la performance d'un bâtiment entier, qui impliquerait, entre autres, une étude globale de la demande énergétique incluant le chauffage, la climatisation et la ventilation, ainsi que des modèles sur le comportement des occupants.
- Quatre procédures d'agrégation multicritère ont été retenues pour cette étude. Ceci n'exclut pas la possibilité que d'autres procédures auraient pu être des outils pertinents pour ce type d'étude.

Recherches futures:

Ce travail de recherche a soulevé plusieurs avenues de recherches possibles:

- La continuation de l'approche méthodologique pour permettre le développement d'un outil pouvant être directement utilisé par les concepteurs. Cette démarche pourrait inclure le développement d'un outil informatique, l'intégration des outils d'évaluation, l'ajout de facteurs stochastiques et l'étude des impacts des interactions entre les préférences.
- L'application du cadre d'analyse dans un autre contexte géographique permettrait d'adapter l'ensemble de contraintes de conception et de critères de préférence. Les modes d'évaluation devraient être réévalués pour s'assurer qu'ils soient adaptés au contexte choisi. Ainsi la méthode requise pour évaluer la demande énergétique liée au mur pourrait varier en fonction du climat.
- L'intégration d'autres types de constructions comme l'ossature légère en acier ou les murs en panneaux de bois massif contrecollé pourrait élargir les possibilités de

comparaison. Il semble cependant important que les critères ne deviennent pas trop larges afin de continuer à respecter les spécificités de chaque type de construction.

- L'adaptation du cadre d'évaluation à d'autres éléments d'une construction à ossature en bois, tel que les planchers ou la toiture, permettrait éventuellement une intégration de ces différents cadres dans une évaluation globale des bâtiments à ossature en bois.
- L'intégration des différentes propriétés de nouveaux matériaux dans les banques de données faciliterait le développement de compositions innovantes.
- L'évaluation de la gestion de l'humidité pourrait intégrer les résultats d'une analyse en 3D qui tiendrait compte des montants d'ossature dans les transferts hygrothermique. Le développement d'une échelle de mesure pertinente pourrait être étudiée plus en détail, spécialement comment les résultats des études de charges différentes (e.g. avec et sans infiltration d'eau) peuvent être comparées.
- Le développement scientifique concernant la caractérisation des impacts environnementaux permettrait d'inclure une information plus globale concernant ce critère de performance. Entre autres, la différenciation des lieux d'émission de substances nocives pour la santé humaine permettrait d'identifier les émissions émises dans un espace restreint, et éventuellement de faire un lien entre l'indicateur de santé humaine et la qualité de l'air dans les bâtiments. Une autre avancée pertinente serait une meilleure caractérisation de l'utilisation des terres, permettant d'évaluer l'impact environnemental réel d'une exploitation forestière écosystémique versus l'exploitation d'une mine.
- Plusieurs bases de données et facteurs de normalisation utilisés en analyse du cycle de vie (LCA) sont actuellement adaptés à l'Europe. Il serait intéressant de : Permettre l'utilisation de bases de données adaptées, comme celle d'ATHENA, par des logiciels de recherche en LCA comme Sima-Pro; développer des processus liés aux différents matériaux de construction et adaptés régionalement en Amérique du nord, qui pourraient être intégrés à des logiciels de recherche en LCA; développer des facteurs de normalisation pour l'Amérique du nord.

- Parallèlement, il serait important, autant pour les chercheurs que pour les concepteurs en bâtiment, de rendre le logiciel ATHENA plus transparent afin de permettre une analyse de sensibilité plus complète supportant la confiance de l'utilisateur dans les résultats obtenus.
- Le choix des critères considérés pour l'analyse multicritère pourrait être élargi pour inclure, par exemple: la résistance structurale au transport et à la manutention de murs préfabriqués; une étude de l'efficacité énergétique plus complète, incluant entre autres l'influence de la capacité thermique et du rayonnement solaire; l'appréciation esthétique des revêtements, etc.
- L'incertitude et la variabilité des données d'entrée pointent vers le besoin d'une capacité de tenir en compte stochastiquement des propriétés de matériaux, des charges climatiques, des inventaires utilisés dans l'analyse du cycle de vie, etc.
- Certains matériaux, comme l'isolation à la fibre de cellulose, sont avantageux selon plusieurs aspects de la performance du mur, mais peuvent nécessiter une logistique et des équipements spéciaux pour la pose. Une étude plus poussée des possibilités que peuvent offrir la préfabrication utilisant de l'équipement industriel dans un environnement manufacturier pourrait permettre d'élargir la gamme des améliorations envisagées.

Bibliographie

- Abi-Zeid, I., Lamontagne, L. & Nilo, O. (2005) MCDM - Multi-criteria Decision Making Software. 1.3 Beta ed., Université Laval.
- Aboussouan, L., Meent, D. V. D., Schönnenbeck, M., Hauschild, M., Delbeke, K., Struijs, J., Russell, A., Haes, H. U. D., Atherton, J., Tilborg, W. V., Karman, C., Korenromp, R., Sap, G., Baukloh, A., Dubreuil, A., Adams, W., Heijungs, R., Jolliet, O., Koning, A. D., Chapman, P., Ligthart, T., Verdonck, F., Loos, R. V. D., Eikelboom, R. & Kuyper, J. (2004) Declaration of Apeldoorn on LCIA of Non-Ferrous Metals. Apeldoorn, *Netherlands*.
<http://lcinitiative.unep.fr/includes/file.asp?site=lcinit&file=38D1F49D-6D64-45AE-9F64-578BA414E499>.
- AEE (2003) *Novoclimat - Exigences techniques générales*. Agence de l'efficacité énergétique du Québec, Québec, Canada.
- Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Roland Hischier, Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M. & Wernet, G. (2007) Ecoinvent - Overview and Methodology - Data v2.0. Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Anon (2005) *The Housing Quality Assurance Act and Japan Housing Performance Indication Standards*. The Building Center of Japan, Tokyo, Japan.
- Antretter, F., Karagiozis, A., Tenwolde, A. & Holm, A. (2007) Effects of Air Leakage of Residential Buildings in Mixed and Cold Climates. *Building X Conference Proceedings*. Oak Ridge National Laboratory, december 2-7, Clearwater Beach, Florida, USA.
- ASHRAE (2005) *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- ASHRAE (2006) BSR/ASHRAE Standard 160P - Design criteria for moisture control in buildings. Public Review Draft ed. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA
- ASTM (2003) E1332 - Standard Classification for Determination of Outdoor-Indoor Transmission Class. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2004) E413 - Classification for Rating Sound Insulation. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2003) E779 - Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ATHENA (2004) ATHENA Environmental Impact Estimator software - version 3.0.3 - Database version 2.0 (janvier 2005). Athena Sustainable Materials Institute, Merrickville, Canada. www.athenasmi.org.
- ATHENA (2008) ATHENA Impact Estimator for Buildings - Software and Database Overview. Athena Sustainable Materials Institute, Merrickville, Canada. www.athenasmi.org.

- ATHENA (2009) ATHENA Environmental Impact Estimator software - version 4.0.51. Athena Sustainable Materials Institute, Merrickville, Canada. www.athenasmi.org.
- Au, H. M. (2007) The development and application of a multi-criteria optimization method to the design of a 20-seat regional jet airliner. Doctoral Thesis, University of Kansas, Kansas, USA.
- Ayrilmis, N., Korkut, S., Tanritanir, E., Winandy, J. E. & Hiziroglu, S. (2006) Effect of various fire retardants on surface roughness of plywood. *Building and Environment*, 41(7): 887-892.
- Bana E Costa, C. A., De Corte, J.-M. & Vansnick, J.-C. (2005a) Chapter X - On the mathematical foundations of MACBETH. In: Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (Eds.) *multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Springer Science + Business Media. Boston, USA.
- Bana E Costa, C. A., De Corte, J.-M. & Vansnick, J.-C. (2005b) M-MACBETH software, version 1.1.2.0. www.m-macbeth.com.
- Banaitiene, N., Banaitis, A., Kaklauskas, A. & Zavadskas, E. K. (2008) Evaluating the life cycle of a building: A multivariant and multiple criteria approach. *Omega-International Journal of Management Science*, 36: 429-441.
- Bare, J. C., Norris, G. A., Pennington, D. W. & Mckone, T. (2003) TRACI - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6 (3-4): 49-78.
- Bayart, J.-B. (2008) Quantification des impacts reliés à l'utilisation de la ressource eau en analyse du cycle de vie : définition d'un cadre d'étude et développement de facteurs de caractérisation. *Mémoire de maîtrise*, Département de génie chimique, École polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Bayart, J.-B., Bulle, C., Deschênes, L., Margni, M., Pfister, S., Vince, F. & Koehler, A. (2009) A Framework for Assessing Off-Stream Freshwater Use in LCA. submitted to *International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A. & Aghdasi, M. (2009) PROMETHEE: A Comprehensive Literature Review on Methodologies and Applications. *European Journal of Operational Research*, accepted manuscript, doi:10.1016/j.ejor.2009.01.021.
- Belton, V. & Stewart, T. J. (2002) *Multiple Criteria Decision Analysis, An Integrated Approach*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- Benichou, N. & Sultan, M. A. (2005) Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 29(3): 165-179.
- Bérubé-Dufour, M., Derome, D. & Zmeureanu, R. (2005) Quantification of Air Leaks through Building Envelopes using Infrared Thermography Laboratory

- Measurements. Proceedings of the *10th Canadian Conference on Building Science and Technology*. Ottawa, Canada.
- Biblis, E. J. (2005) Experimental determination of the energy requirements for cooling and heating different single-story residential structures. *Forest Products Journal*, 55(3): 81-85.
- Bilec, M. M. (2007) A hybrid life cycle assessment model for construction processes. *Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering*. University of Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Blocken, B., Derome, D. & Carmeliet, J. (2005) Towards a Catalogue for the Assessment of Wind-driven Rain Impact on Building Facades. Proceedings of the *10th Canadian Conference on Building Science and Technology*, Ottawa, Canada.
- Blondeau, P., Sperandio, M. & Allard, F. (2002) Multicriteria analysis of ventilation in summer period. *Building and Environment*, 37(2): 165-176.
- Bojorquez-Tapia, L. A., Sanchez-Colon, S. & Florez, A. (2005) Building Consensus in Environmental Impact Assessment through Multicriteria Modeling and Sensitivity Analysis. *Environmental Management*, 36(3): 469-481.
- Borg, M. (2001) Environmental assessment of materials, components and buildings. Doctoral Thesis. Kungliga tekniska Högskolan, Stockholm, Sweden.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., & Vincke, P. (2006) *Evaluation and decision models with multiple criteria* (chap. 5), Springer, Boston, USA.
- Bradley, J. S. (2004) Sound insulation issues. *Joint NSC-NRC Workshop on Construction Technologies*. Taipei, Taiwan.
- Bradley, J. S. & Birta, J. A. (2000) Laboratory Measurements of the Sound Insulation of Building Facade Elements. IRC-IR-818. Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.
- Bradley, J. S., Lay, K. & Norcross, S. G. (2002) Measurements of the Sound Insulation of a Wood Frame House Exposed to Aircraft Noise. IRC-IR-831. Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.
- Brans, J.-P. & Mareschal, B. (2005) Chapter V - PROMETHEE methods. In: Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (Eds.) *multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Springer Science + Business Media, Boston, USA.
- BREEAM (2005) EcoHomes 2005 – The environmental rating for homes: The Guidance. 1.1 ed., BREEAM Office, Watford, UK.
- Burnett, E., Straube, J. & Karagiozis, A. N. (2004) Development of Design Strategies for Rainscreen and Sheathing Membrane Performance in Wood Frame Walls - Final Report. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, USA
- Cachim, P. B. & Franssen, J. M. (2009) Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. *Fire and Materials*, 33(3): 129-143.

- CAGBC (2009) LEED Green Building Rating System - LEED® Canada for Homes 2009. Canada Green Building Council, Ottawa, Canada.
- CAGBC (2004) *LEED Canada NC1.0 - Système d'évaluation des bâtiments écologiques*. Conseil de bâtiment durable du Canada, Ottawa, Canada.
- Caldas, L. (2006) GENE_ARCH: An evolution-based generative design system for sustainable architecture. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Ascona, Switzerland. Springer Verlag, Heidelberg, Germany.
- CAN/CSA-O86-01 (2005) *Engineering Design in Wood*, National Standard of Canada, Ottawa, Canada.
- CANMET (2005) Norme R-2000. Ressources naturelles Canada, Ottawa, Canada. www.nrcan.gc.ca.
- CANMET (2005) HOT 2XP software version 2.74. Ressources naturelles Canada, Ottawa, Canada. www.nrcan.gc.ca.
- Chan, W. Y. R., Nazaroff, W. W., Price, P. N., Sohn, M. D. & Gadgil, A. J. (2005) Analyzing a database of residential air leakage in the United States. *Atmospheric Environment*, 39(19) 3445-3455.
- Citherlet, S., Clarke, J. A. & Hand, J. (2001) Integration in building physics simulation. *Energy and Buildings*, 33(5): 451-461.
- Citherlet, S. & Defaux, T. (2007) Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span. *Building and Environment*, 42(2): 591-598.
- CNRC (1997) Model National Energy Code of Canada for Houses. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- CNRC (2005) National Building Code of Canada. National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- Cornick, S. (2006) Results of the HAMSTAD Benchmarking Exercises Using hygIRC 1-D version 1.1. IRC-RR-222. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- Coulombe, G., Huot, J., Arsenault, J., Bauce, É., Bernard, J.-T., Bouchard, A., Liboiron, M. A. & Szaraz, G. (2004) Rapport de la commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. Québec, Canada. www.commission-foret.qc.ca.
- Craft, S. T., Isgor, B., Hadjisophocleous, G. & Mehaffey, J. R. (2008) Predicting the thermal response of gypsum board subjected to a constant heat flux. *Fire and Materials*, 32(6): 333-355.
- Crocker, M. J. & Price, A. J. (1975) *Noise and noise control, volume 1*. CRC Press, Cleveland, USA.
- Curran, M. A. (2006) Report on activity of task force 1 in the life cycle inventory programme: Data registry - Global life cycle inventory data resources. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(4): 284-289.

- CWC (2000) La sécurité incendie dans les bâtiments résidentiels. *Bulletin sur la performance du bâtiment*. Conseil canadien du bois, Ottawa, Canada.
- CWC (2002) Wood-Frame Housing - A North American Marvel. *Bulletin sur la performance du bâtiment*. Canadian Wood Council, Ottawa, Canada. www.cwc.ca.
- CWC (2004) *Engineering Guide for Wood Frame Construction*, Canadian Wood Council, Ottawa, Canada. www.cwc.ca.
- CWC (2005) *Wood Design Manual*, Canadian Wood Council, Ottawa, Canada. www.cwc.ca.
- D'cruz, N. A. & Radford, A. D. (1987) A Multicriteria Model for Building Performance and Design. *Building and Environment*, 22(3): 167-179.
- Da Graca, V. A. C., Kowaltowski, D. & Petreche, J. R. D. (2007) An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimisation of aspects of environmental comfort for the school system of the State Sao Paulo in Brazil. *Building and Environment*, 42(2): 984-999.
- Derome, D. (2000) Moisture occurrence in roof assemblies containing moisture storing insulation and its impact on the durability of building envelope. Doctoral Thesis, Concordia University, Montréal, Canada.
- Derome, D. (2005) Moisture accumulation in cellulose insulation caused by air leakage in flat wood frame roofs. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 28(January): 269-287.
- Derome, D. & Fazio, P. (2000) Large-Scale Testing of Two Flat Roof Assemblies Insulated with Cellulose. *Journal of Architectural Engineering*, 6(1): 12-23.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. & Kolokotsa, D. (2008) Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40(9): 1747-1754.
- Dimoudi, A., Androutsopoulos, A. & Lykoudis, S. (2004) Experimental work on a linked, dynamic and ventilated, wall component. *Energy and Buildings*, 36(5): 443-453.
- Ding, G. K. C. (2008) Sustainable construction - The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86(3): 451-464.
- Doshi, H. (2005) Rain Water on Building Cladding: Two Case Studies. In Proceedings of the 10th Canadian Conference on Building Science and Technology. Ottawa, Canada.
- Doudak, G. & Smith, I. (2009) Capacities of OSB-Sheathed Light-Frame Shear-Wall Panels with or without Perforations. *Journal of Structural Engineering*, 135(3): 326-329.
- Durham, J., Lam, F. & Prion, H. G. L. (2001) Seismic resistance of wood shear walls with large OSB panels. *Journal of Structural Engineering*, 127(12): 1460-1466.
- EC (2008) Canadian Climate Normals or Averages 1971-2000, *National Climate Data and Information Archive*. Environment Canada. <http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/>

- Ehrgott, M. & Wiecek, M. M. (2005) Chapter XVII - Multiobjective Programming. In: Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (Eds.) *multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Springer Science + Business Media, Boston, USA.
- Ellingwood, B. R., Rosowsky, D. V. & Pang, W. C. (2008) Performance of light-frame wood residential construction subjected to earthquakes in regions of moderate seismicity. *Journal of Structural Engineering*, 134(8): 1353-1363.
- Enertia® Building Systems (2005) Enertia® Building Systems "Homes" Page. www.enertia.com.
- FAO (2006) Global Forest Resources Assessment : Progress towards sustainable forest management. *FAO Forestry Paper* 147: 320.
- Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (2005a) Introduction. In: Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (Eds.) *multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Springer Science + Business Media, Boston, USA.
- Figueira, J., Mousseau, V. & Roy, B. (2005b) Chapter IV - ELECTRE methods. In: Figueira, J., Greco, S. & Ehrgott, M. (Eds.) *multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. Springer Science + Business Media, Boston, USA.
- Finnveden, G., Hofstetter, P., Bare, J. C., Basson, L., Citroth, A., Mettier, T., Seppälä, J., Johansson, J., Norris, G. & Vlokwein, S. (2002) Normalisation, Grouping and Weighting in Life-Cycle Impact Assessment. *Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Brussels, Belgium.
- Firmanti, A., Subiyanto, B. & Kawai, S. (2006) Evaluation of the fire endurance of mechanically graded timber in bending. *Journal of Wood Science*, 52(1): 25-32.
- Fischer, C. & Kasal, B. (2009) Analysis of light-frame, low-rise buildings under simulated lateral wind loads. *Wind and Structures*, 12(2): 89-101.
- Fraisse, G., Johannes, K., Trillat-Berdal, V. & Achard, G. (2006) The use of a heavy internal wall with a ventilated air gap to store solar energy and improve summer comfort in timber frame houses. *Energy and Buildings*, 38(4): 293-302.
- Frenette, C. D., Abi-Zeid, I., Beauregard, R., Derome, D. & Salenikovich, A. (2009) Multicriteria decision analysis applied to the design of light-frame wood wall assemblies. submitted to: *Journal of Building Performance Simulation*, 31p.
- Frenette, C. D., Derome, D., Beauregard, R. & Salenikovich, A. (2008) Identification of multiple criteria for the evaluation of light-frame wood wall assemblies. *Journal of Building Performance Simulation*, 1(4): 221-236.
- Gero, J. S., D'cruz, N. & Radford, A. D. (1983) Energy in Context - A Multicriteria Model for Building Design. *Building and Environment*, 18(3): 99-107.
- Ginevicius, R., Podvezko, V. & Raslanas, S. (2008) Evaluating the alternative solutions of wall insulation by multicriteria methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(4): 217-226.

- Goedkoop, M. & Spriensma, R. (2000) The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for the Life Cycle Impact Assessment - Methodology report. Product ecology consultants, Amersfoort, Netherlands. www.pre.nl.
- Greiner, D., Winter, G. & Emperador, J. M. (2006) Enhancing the multiobjective optimum design of structural trusses with evolutionary algorithms using DENSEA. In: *Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Reston, VA. USA.
- Guitouni, A. & Martel, J.-M. (1998) Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109: 501-521.
- Haapio, A. & Viitaniemi, P. (2006) Building Environmental Assessment Tools. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering*. Portland, Oregon, USA.
- Hagentoft, C.-E., Kalagasidis, A. S., Adl-Zarrabi, B., Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Grunewald, J., Funk, M., Becker, R., Shamir, D., Adan, O., Brocken, H., Kumaran, K. & Djebbar, R. (2004) Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27(24): 327-352.
- Hameury, S. (2005) Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study. *Building and Environment*, 40(10): 1400-1412.
- Hameury, S. & Lundstrom, T. (2004) Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings*, 36(3): 281-292.
- Hauschild, M. Z., Huijbregts, M., Joliet, O., Macleod, M., Margni, M., Van De Meent, D. V., Rosenbaum, R. K. & Mckone, T. E. (2008) Building a model based on scientific consensus for life cycle impact assessment of chemicals: The search for harmony and parsimony. *Environmental Science & Technology*, 42(19):7032-7037.
- He, M., Lam, F. & Foschi, R. O. (2001) Modeling three-dimensional timber light-frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 127(8): 901-913.
- Herneoja, A. (2004) Wooden Image in Interior Colourings - The Finnish post-war home. In: *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering*. Lahti, Finland.
- Hertwich, E. G., Pennington, D. W. & Bare, J. C. (2002) Introduction. *Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Brussels, Belgium.
- Hietaniemi, J. (2007) Probabilistic simulation of fire endurance of a wooden beam. *Structural Safety*, 29(4): 322-336.
- Horvat, M. (2005) Protocol and Assessment Tool for Performance Evaluation of Light-Frame Building Envelopes used in Residential Buildings. *Doctoral Thesis*,

Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montréal, Canada.

- Horvat, M. & Fazio, P. (2005) Comparative Review of Existing Certification Programs and Performance Assessment Tools for Residential Buildings. *Architectural Science Review*, 48(1): 69-80.
- HQE (2001) Definition explicite de la qualite environnementale - Referentiels des caracteristiques, Association HQE, Paris, France. www.assohqe.org.
- Hu, L. J., Desjardins, R. & Jones, E. (2006) Systems Approach for Optimizing Wood-Based Floor Construction. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering*. Portland, Oregon, USA.
- Humbert, S., Abeck, H., Bali, N. & Horvath, A. (2007) Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) - A critical evaluation by LCA and recommendations for improvement. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(special issue 1): 46-57.
- Hussein, R. & Denzli, N. (2005) The effects of fire retardant treatments on mechanical properties of wood and wood composites. *Wood Research*, 50(3): 85-94.
- IPCC (2007) Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Working Group III "Mitigation of Climate Change" - Technical Summary. www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm.
- ISO (2006) ISO 14040 to ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment. 2006 ed., International organization for standardization, Geneva, Switzerland.
- Jaggs, M. & Palmer, J. (2000) Energy performance indoor environmental quality retrofit - a European diagnosis and decision making method for building refurbishment. *Energy and Buildings*, 31(2): 97-101.
- Janssen, R. (2001) On the use of multi-criteria analysis in environmental impact assessment in The Netherlands. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 10(2): 101-109.
- Johnston, A. R., Dean, P. K. & Iii, H. W. S. (2006) Effects of vertical load and hold-down anchors on the cyclic response of wood framed shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 132(9): 1426-1434.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. & Rosenbaum, R. (2003) IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6): 324-330.
- Jolliet, O., Muller-Wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, R., Itsubo, N., Pena, C., Pennington, D., Potting, J., Rebitzer, G., Stewart, M., De Haes, H. U. & Weidema, B. (2004) The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(6): 394-404.
- Jolliet, O., Saadé, M. & Crettaz, P. (2005) *Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse.

- Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., Raslanas, S., Ginevicius, R., Komka, A. & Malinauskas, P. (2006) Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. *Energy and Buildings*, 38(5): 454-462.
- Kalay, Y. E. (2001) Enhancing multi-disciplinary collaboration through semantically rich representation. *Automation in Construction*, 10(6): 741-755.
- Känzig, J. & Jolliet, O. (2006) Consommation respectueuse de l'environnement: Décisions et acteurs clés, modèles de consommation. *Connaissance de l'environnement no 0616*. Office fédéral de l'environnement, Berne, Suisse. www.environnement-suisse.ch/publications.
- Karacabeyli, E., Dolan, J. D., Ceccotti, A. & Ni, C. (1999) Comparison of Static and Dynamic Response of Timber Shear Walls - Discussion. *Journal of Structural Engineering*, 124(6): 796-797.
- Karagiozis, A., Künzle, H. M. & Holm, A. (2001) WUFI-ORNL/IBP - A North American Hygrothermal Model. In: *Proceedings of Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII Conference*. Clearwater Beach, Florida, USA.
- Karagiozis, A. N., Burnett, E. & Straube, J. (2005) The Hygrothermal Performance of Ventilated, Vented and Non-vented Brick and Vinyl Wall Claddings for Two North American Climates. In: *Proceedings of 10th Canadian Conference on Building Science and Technology*. Ottawa, Canada.
- Kassab, M., Zmeureanu, R. & Derome, D. (2003) Life-cycle analysis of improvements to an existing energy-efficient house in Montreal. *Architectural Science Review*, 46(4): 341-352.
- Kaveh, A. & Shahrouzi, M. (2008) *Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach*, Emerald Group Publishing Ltd, W Yorkshire, England.
- Keeney, R. L. (1992) *Value Focused Thinking: A Path to Creative Decision Making*, Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- KERN (2005) DÄMMWERK Building physics Software. KERN ingenieurkonzepte, Berlin, Germany. www.bauphysik-software.de.
- Kim, J. & Rosowsky, D. (2005) Incorporating nonstructural-finish effects and construction quality in a performance-based framework for wood shearwall design. *Structural Engineering And Mechanics*, 21(1): 83 - 100.
- Kim, S. S., Yang, I. H., Yeo, M. S. & Kim, K. W. (2005) Development of a housing performance evaluation model for multi-family residential buildings in Korea. *Building and Environment*, 40(8): 1103-1116.
- Kodur, V. K. R. & Sultan, M. A. (2000) Performance of wood stud shear walls exposed to fire. *Fire and Materials*, 24(1): 9-16.
- Kohler, N., Wagner, A., Luetzkendorf, T. & König, H. (2005) Life cycle assessment of passive buildings with LEGEP[®] – A LCA-tool from Germany. In *Proceedings of*

- the 2005 World Sustainable Building Conference in Tokyo (SB05Tokyo) Tokyo, Japan. www.legoe.de/download/Germany_SB05_LEGEP_Report.pdf.
- Konig, J. (2005) Structural fire design according to Eurocode 5 - design rules and their background. *Fire and Materials*, 29(3): 147-163.
- Koroneos, C. & Kottas, G. (2007) Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in Thessaloniki--Greece. *Building and Environment*, 42(1): 122-138.
- Kumaran, M. K. (2002) A Thermal and Moisture Transport Property Database for Common Building and Insulating Materials. RP-1018. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, USA.
- L.R.Q. (2008) Règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments. 23 janvier 2008 ed., Éditeur officiel du Québec, Québec, Canada.
- LAMSADE (1994) ELECTRE III/IV, version 3.1b Demo. Paris, Université Paris-Dauphine.
- Lemaire, S. (2006) Aide au choix des produits de construction sur la base de leurs performances environnementales et sanitaires. Thèse de Doctorat, *Génie civil*. INSA de Lyon, Lyon, France.
- Li, Y. & Ellingwood, B. R. (2007) Reliability of woodframe residential construction subjected to earthquakes. *Structural Safety*, 29(4): 294-307.
- Madsen, B. (1992) *Structural Behaviour of Timber*, Timber Engineering Ltd., North Vancouver, Canada.
- Manzello, S. L., Gann, R. G., Kukuck, S. R. & Lenhart, D. B. (2007) Influence of gypsum board type (X or C) on real fire performance of partition assemblies. *Fire and Materials*, 31: 425-442.
- Marks, W. (1997) Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Building and Environment*, 32(4): 331-339.
- Marney, D. C. O. & Russell, L. J. (2008) Combined fire retardant and wood preservative treatments for outdoor wood applications - A review of the literature. *Fire Technology*, 44(1): 1-14.
- Matasci, C. (2006) Life Cycle Assessment of 21 buildings: analysis of the different life phases and highlighting of the main causes of their impact on the environment. Thèse de Master, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- Mateus, R., Ferreira, J. A. & Carreira, J. (2008) Multicriteria decision analysis (MCDA): Central Porto high-speed railway station. *European Journal of Operational Research*, 187(1): 1 - 18.
- Maystre, L. Y., Pictet, J. & Simos, J. (1994) *Méthodes multicritères ELECTRE*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse.

- Meil, J., Lucuik, M., O'connor, J. & Dangerfield, J. (2006) A life cycle environmental and economic assessment of optimum value engineering in houses. *Forest Products Journal*, 56(9): 19-25.
- Mettier, T. M. & Hofstetter, P. (2005) Survey Insights into Weighting Environmental Damages: Influence of Context and Group. *Journal of Industrial Ecology*, 8(4): 189-209.
- Mi, H., Ni, C., Chui, Y. H. & Karacabeyli, E. (2004) Lateral Resistance of Tall Unblocked Shearwalls. In: *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering*. Lahti, Finland.
- Milà I Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Freiermuth Knuchel, R., Gaillard, G., Michelsen, O., Müller-Wenk, R. & Rydgren, B. (2007) Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(1): 5-15.
- Milota, M., West, C. & Hartley, I. (2005) Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood lumber production. *Wood and Fiber Science*, 37(Special Issue): 47 - 57.
- Minergie (2005) Règlement d'utilisation de la marque de qualité Minergie. Minergie, Berne, Suisse. www.minergie.ch.
- Morrison Hershfield Ltd (2002) Maintenance Repair and Replacement Effects for Building Envelope Materials. Athena Sustainable Materials Institute, Merrickville, Canada. www.athenasmi.org.
- Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Rousseau, M., Tariku, F., Van Reenen, D. & Dalglish, W. A. (2003) Application of hygrothermal analyses to optimize exterior wall design. Institut de recherche en construction, Ottawa, Canada. NRCC-46100. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.
- Munoz, W. T., Salenikovich, A., Mohammad, M. & Beauregard, R. (2006) Racking and Bending Tests for Prefabricated Wall Panel. *Maderas : Ciencia y Tecnología*. 9(1): 3-14.
- NAHB (2006) NAHB Model Green Home Building Guidelines. National Association of Home Builders, Washington, DC, USA.
- Nassar, K. (2003) A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. *Automation in Construction*, 12(5): 543-560.
- Ni, C. & Karacabeyli, E. (2002) Capacity of shear wall segments without hold-downs. *Wood Design Focus.*, 12(2): 10-17.
- Ni, C. & Karacabeyli, E. (2004) Deflections of Nailed Shearwalls and Diaphragm. In: *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering*, Lahti, Finland.
- Nightingale, T. R. T., Halliwell, R. E. & Quirt, J. D. (2002) Vibration response of floors and the effectiveness of toppings to control flanking transmission. In: *Proceedings of the Inter-Noise 2002*. Dearborn, MI, USA.

- Nightingale, T. R. T. & Mayr, A. (2004) On transmission of structure borne power from wood studs to gypsum board mounted on resilient metal channels - Part 1: Force and moment transmission. *Canadian Acoustics*, 32(3): 164-165.
- Nishioka, Y., Levy, J. I., Norris, G. A., Wilson, A., Hofstetter, P. & Spengler, J. D. (2002) Integrating Risk Assessment and Life Cycle Assessment: A Case Study of Insulation. *Risk Analysis*, 22(5): 1003-1017.
- NIST (2007) BEES software - version 4.0e. National Institute of Standards and Technology - Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, MD. USA.
- Norris, G. A. & Notten, P. (2002) Current Availability of LCI Databases in the World. Working Draft 2a. May 2002.
- Oduor, S. O. (1999) Simultaneous air, heat and moisture transfer in fibrous building insulation. Doctoral Thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada.
- OEE (2005) 2003 Survey of Household Energy Use (SHEU): Detailed Statistical Report. Office of Energy Efficiency (OEE), Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.
- Olutimayin, S., Simonson, C. J., O'connor, J., O'connor, J., Salonvaara, M. & Ojanen, T. (2005) Effect of Moisture Storage on Indoor Humidity and Vapor Boundary Layer Thickness. In: *Proceedings of the 10th Canadian Conference on Building Science and Technology*, Ottawa, Canada.
- Olutimayin, S. O. & Simonson, C. J. (2005) Measuring and modeling vapor boundary layer growth during transient diffusion heat and moisture transfer in cellulose insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(16): 3319-3330.
- Onysko, D. M., Karpinski, K. F., Ruest, K., Lawton, M., Miller, D., Fraser, B. & Dale, R. (2005) Biological Contaminants and House Characteristics: An interim analysis of data from the PEI Study. In: *Proceedings of the 10th Canadian Conference on Building Science and Technology*, Ottawa, Canada.
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T. & Rebitzer, G. (2004) Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5): 721-739.
- Pereyra, A. M. & Giudice, C. A. (2009) Flame-retardant impregnants for woods based on alkaline silicates. *Fire Safety Journal*, 44(4): 497-503.
- Perez-Garcia, J., Lippke, B., Briggs, D., Wilson, J., Bowyer, J. & Meil, J. (2005) The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction. *Wood and Fiber Science*, 37(Special Issue): 3 - 17.
- Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Gonzalez, R. & Maestre, I. R. (2009) A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. *Energy and Buildings*, 41(3): 272-278.
- Peuportier, B. (2009) EQUER - Outil de simulation du cycle de vie des bâtiments, IZUBA Energies, Paris, France. www.izuba.fr.
- Peuportier, B. & Putzeys, K. (2005) Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. PRESCO - www.etn-presco.net.

- Peuportier, B. L. P. (2001) Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and Buildings*, 33(5): 443-450.
- Pfafferott, J., Herkel, S. & Wapler, J. (2005) Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models. *Energy and Buildings*, 37(8): 844-852.
- Pierquet, P., Bowyer, J. L. & Huelman, P. (1998) Thermal performance and embodied energy of cold climate wall systems. *Forest Products Journal*, 48(6): 53-60.
- Popovski, M. & Karacabeyli, E. (2004) Lateral Load Resisting Systems in Timber Structures: Code and Research Issues. Presentation at the *LLRS Connections Workshop*. Mississauga, Ontario, Canada.
- PRÉ (2004) SimaPro 6 User manual - Introduction to LCA with SimaPro. Product ecology consultants, Amersfoort, Netherlands. www.pre.nl.
- ProHolz (2003) dataholz.com – Katalog bauphysikalisch ökologisch geprüfter Holzbauteile. Proholz Austria, Wien, Austria. www.dataholz.com.
- Puettmann, M. & Wilson, J. (2005) Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. *Wood and Fiber Science*, 37 (Special Issue): 18 - 29.
- Quenneville, J. H. P. & Mohammad, M. (2000) On the failure modes and strength of steel-wood-steel bolted timber connections loaded parallel-to-grain. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4): 761-773.
- Quirt, J. D., Nightingale, T. R. T. & Halliwell, R. E. (2003) Dealing with flanking transmission in wood framed construction. *Canadian Acoustics*, 31(3): 52-53.
- Rabl, A., Benoist, A., Dron, D., Peuportier, B., Spadaro, J. V. & Zoughaib, A. (2007) How to account for CO2 emissions from biomass in an LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5): 281-281.
- Rey, E. (2004) Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue. *Energy and Buildings*, 36(4): 367-372.
- Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H. F., Macleod, M., Margni, M., Mckone, T. E., Payet, J., Schuhmacher, M., Meent, D. V. D. & Hauschild, M. Z. (2008) USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7): 532–546.
- Roucoult, J. M., Douzane, O. & Langlet, T. (1999) Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings*, 29(2): 129-133.
- Roulet, C.-A., Flourentzou, F., Foradini, F., Bluysen, P., Cox, C. & Aizlewood, C. (2006) Multicriteria analysis of health, comfort and energy efficiency in buildings. *Building Research and Information*, 34(5): 475-482.

- Roulet, C. A. (2004) *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse.
- Roulet, C. A., Flourentzou, F., Labben, H. H., Santamouris, M., Koronaki, I., Dascalaki, E. & Richalet, V. (2002) ORME: A multicriteria rating methodology for buildings. *Building and Environment*, 37(6): 579-586.
- RSMMeans (Ed.) (2007) *Building Construction Cost Data*. Robert Snow Means Company, Kingston, MA, USA.
- Sakuragawa, S., Miyazaki, Y., Kaneko, T. & Makita, T. (2005) Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses. *Journal of Wood Science*, 51(2): 136-140.
- Salenikovich, A. J. (2000) The racking performance of light-frame shear walls. Doctoral Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, USA.
- Schulz, T. & Krug, D. (2005) Improving the fire-resisting properties of solid wood through impregnation with SiO₂-sols. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, 63(1): 78-80.
- Seppala, J., Basson, L. & Norris, G. A. (2002) Decision Analysis Frameworks for Life-Cycle Impact Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 5(4): 45-68.
- Shea, K., Sedgwick, A. & Antonunotto, G. (2006) Multicriteria optimization of paneled building envelopes using ant colony optimization. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, 4200: 627-636.
- Soebarto, V. I. & Williamson, T. J. (2001) Multi-criteria assessment of building performance, theory and implementation. *Building and Environment*, 36(6): 681-690.
- Stewart, M. & Jolliet, O. (2004) User needs analysis and development of priorities for life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3): 153-160.
- Sultan, M. A. & Lougheed, G. D. (2002) Results of Fire Resistance Tests on Full-Scale Gypsum Board Wall Assemblies. IRC-IR-833, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.
- Taylor, G. W., Prion, H. G. L., Ventura, C. E. & Kharrazi, M. (2003) Static and Dynamic Earthquake Testing of Rainscreen Stucco Systems for British Columbia Residential Wood Frame Construction. *Research Highlights*, Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, Canada. www.cmhc-schl.gc.ca.
- Teasdale-St-Hilaire, A. & Derome, D. (2005) Investigating the Role of the Vapour Retarder in the Drying Response of Wood-Frame Walls Wetted by Simulated Rain Infiltration. In: *Proceedings of the 10th Canadian Conference on Building Science and Technology*, Ottawa, Canada.
- Tenwolde, A. (2001) Manual Analysis Tools. In: Trechsel, H. R. (Ed.) *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. pp.107-115.

- Thivierge, C. (2008) Evaluation of wetting and drying processes of different wall assemblies submitted to water penetration. Master Thesis, *Department of Building, Civil & Environmental Engineering*, Concordia University, Montréal, Canada.
- Trusty, W. B. (2000) Introducing assessment tools classification system. *Advanced Building Newsletter #25*. Royal Architectural Institute of Canada, Ottawa, Canada. www.raic.org.
- Trusty, W. B. (2003) Sustainable Building: a Materials Perspective. *Continuing education series for architects*, Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, Canada. www.cmhc-schl.gc.ca.
- Trusty, W. B. & Horst, S. (2002) Integrating LCA Tools in Green Building Rating Systems. Published in "The Austin Papers: Best of the 2002 International Green Building Conference", Compiled by the Editors of Environmental Building News, Published by BuildingGreen, Inc., pp53-57.
- Van De Lindt, J. W. & Liu, H. Y. (2007) Nonstructural elements in performance-based seismic design of wood frame structures. *Journal of Structural Engineering*, 133(3): 432-439.
- Vieira, P. M. D. S. (2007) Environmental assessment of office buildings. Doctoral Thesis, University of California, Berkeley, USA.
- Viitanen, H. (1996) Factors affecting the development of mold and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Vincke, P. (1989) Chapitre V: Les méthodes de surclassement. *L'aide multicritère à la décision*. Éditions de l'université de Bruxelles, Bruxelles, Belgique.
- Visual Decision (2007) Decision Lab 2000, demo version 1.01.0386. Visual decision Inc., Montréal, Canada.
- Warnock, A. C. C. (2001) Des critères en matière d'acoustique dans les bâtiments. *Solution constructive no 50*, Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada.
- Werner, F. & Richter, K. (2007) Wooden building products in comparative LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7): 470-479.
- Wilson, J. (2005) Documenting the environmental performance of wood building materials. *Wood and Fiber Science*, 37(Special Issue): 1 - 2.
- Winistorfer, P., Chen, Z., Lippke, B. & Stevens, N. (2005) Energy consumption and greenhouse gas emissions related to the use, maintenance, and disposal of a residential structure. *Wood and Fiber Science*, 37(Special Issue): 128 - 139.
- WUFI (2007) WUFI Pro software, version 4.1 IBP. Fraunhofer Institute Bauphysik, Germany. www.ibp.fraunhofer.de.
- Yang, T. H., Wang, S. Y., Tsai, M. J., Lin, C. Y. & Chuang, Y. J. (2009) Effect of fire exposure on the mechanical properties of glued laminated timber. *Materials & Design*, 30(3): 698-703.

Zavadskas, E., Raslanas, S. & Kaklauskas, A. (2008) The selection of effective retrofit scenarios for panel houses in urban neighborhoods based on expected energy savings and increase in market value: The Vilnius case. *Energy and Buildings*, 40(4): 573-587.

Annexe 1
Collecte de données

Rencontres avec fabricants de maisons préfabriquées et de composantes de murs

Freneco - 30 septembre 2008

Contact: Gerald Frenette, arch. (poste 202)
Cell: (418) 570-8357

261 St-Louis
Notre Dame de Portneuf, Québec
G0A 2Z0
Tél.: (418) 286-3341
Fax: (418) 286-3545
Email: freneco@globetrotter.net

Structures Ultratec - 7 octobre 2008

Contact: André Houle (poste #23)
Michel Beaudoin (président)

235, de la Station
Laurier-Station, Québec
G0S 1N0
Tél.: (418) 728-3449
Fax: (418) 728-3516
<http://www.ultratec.qc.ca>

TBS - Technological Building Structures - 7 octobre 2008

Contact: Michel Timperio
Jacques Hudon (poste 211)

1100-A Montée Ste-Julie
Ste-Julie, Québec
J3E 1X8
Tel. : (450) 649-1661 (1-877-849-1661)
Fax : (450) 649-4036
<http://www.buildingsystems.ca>

Modulex - 18 octobre 2008

Contact: Martin Deschênes
Paul Bussièeres (744-3344)

3040 Boulevard Hamel
Québec, Québec
G1P 2J1
tel: 418-681-0133
sans frais: 1-800-MODULEX (663-8539)
fax: 418-681-3080
<http://www.modulex-international.com/>

Benolec (fournisseur d'isolation en cellulose) - 24 octobre 2008

Contact: Yvon Martin

1451, rue Nobel,
Sainte-Julie, Québec
J3E 1Z4
Tel: (450) 922-2000
Télécopieur: (450)
<http://www.benolec.com>

rencontre téléphonique

Maisons Laprise - 25 octobre 2008

Contact: Jean-Pierre Chanut
(ingénieur)

166 4e Rue
Montmagny, Québec
G5V 3L5
Téléphone: (418) 248-0401
Télécopieur: (418) 248-8415
<http://www.maisonlaprise.com/>

Maisons Alouette - 7 décembre 2008

Maison Alouette
Contact: Martin Stebenne
Mario Lamarche

200, Rue des Alouettes
St-Alphonse, Québec
J0E 2A0
Téléphone: (450) 539-3100
Télécopieur: (450) 539-0335
www.maisonalouette.com

Objectif

Le but de ces rencontres est de connaître les techniques de préfabrication actuelles pour les bâtiments résidentiels à ossature en bois et d'identifier les principales préoccupations des fabricants et des utilisateurs, ce qui concerne la performance en service de l'enveloppe extérieure des bâtiments résidentiels.

Sujet de discussion**Assemblage de murs standard:**

Revêtement extérieur, pare-pluie, pare-air, panneau de revêtement intermédiaire, pare-vapeur, revêtement intérieur

Structure - ossature, Isolation

Ouvertures: Type de portes et fenêtres, Joint d'étanchéité avec ouverture

Résistance structurelle:

Panneaux structuraux (OSB, contreplaqué) vs panneau fibre de bois et gypse intérieur

Assemblage des composants

Résistance au vent, résistance sismique, déformation, ancrages

Impact des composants non-structuraux: stucco, gypse, etc

Étanchéité à l'air:

Assemblage des composants, ouverture

Possibilité d'une étanchéité à l'air extérieure à l'enveloppe

Durabilité, humidité, moisissure:

Pare-pluie, Pare-vapeur, Capacité de séchage

Performance à long-terme

Impact de l'humidité sur les autres aspects de la performance: structure, isolation, qualité de l'air, etc.

Nécessité d'une étude intégrée du système (assemblage de l'enveloppe, ventilation)

Efficacité énergétique et isolation:

Isolation d'hiver vs isolation d'été

Isolation demandée vs réglementation

Laine de verre, laine de roche, cellulose, polyuréthane, quel matériau est surtout utilisé

Apport solaire

Fenêtres et cadres isolés

Orientation des fenêtres

Inertie thermique - ventilation nocturne

Isolation acoustique:

Bruit aériens, bruits d'impact

Isolation demandée vs réglementation

Utilisation de système particulier: structure décalées, fourrure d'insonorisation (resilient channel), double gypse (intérieur, extérieur)

Environnement:

Analyse du cycle de vie (LCA)

Demande clients

Recherche de matériaux ayant un impact réduit sur l'environnement

Durée d'utilisation - Durabilité vs réhabilitation

Qualité de l'air:

Émanation selon matériau utilisés (VOC, etc)

Moisissure, etc

Résistance au feu:

Double gypse

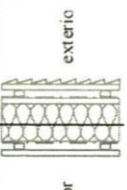
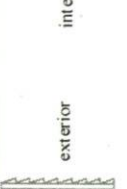

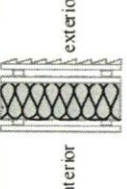


Type d'isolation

Analyse intégrée de la performance en service et interaction entre les critères

Formations, séminaires et conférence scientifiques

Workshop - Mitigating Housing Losses In Extreme Natural Events: 2005 University of Western Ontario, Toronto	21 février 2005
10 th Canadian Conference on Building Science and Technology BECOR, Ottawa	12-13 mai 2005
Atelier de formation LEED Conseil du bâtiment durable du Canada (CaGBC)	16 juin 2005
Séminaire sur les principes d'insonorisation Owens Corning	24 octobre 2005
Formation Novoclimat Agence de l'efficacité énergétique du Québec	10-11 Novembre 2005
Séminaire - Maisons usinées et composants préfabriqués Q-WEB, Québec	1er décembre 2005
Heat and mass transport in building materials, components and whole buildings (Cours intensif) KU Leuven, Belgique	5-23 juin 2006
3 rd International Building Physics Conference IABP, Montréal	27-31 août 2006
Wood Structures Symposium University of Massachusetts, Amherst	1-2 novembre 2007
Salon Solution en Bois Conseil canadien du bois, Montréal Conseil canadien du bois, Ottawa	27 septembre 2007 2 novembre 2005
Colloque annuel Forac - Pensez client - Pensez planification... FORAC, Québec	28 mars 2007
NRCan's HOT 3000 workshop	20 mai 2008
eSim Conference IPSCA - Canada, Quebec	21-22 mai 2008
Construction bois: éco construction et bâtiments du futur Colloque Québec-Aquitaine, Quebec	22-23 mai 2008
Le matériau bois dans la construction verte : Une synergie entre l'architecte et l'ingénieur forestier Colloque conjoint OAQ-OIFQ, Boucherville	5-6 février 2009

Récapitulatif de l'influence des composants sur la performance d'un mur à ossature légère en bois

External cladding	Sheathing and water resistive membrane	Framing	Insulation	Interior finishing and vapour barrier	Air-barrier system
 <p>Standard</p> <ul style="list-style-type: none"> · Wood and wood composite siding · Vinyl siding · Brick or stone veneer · Stucco siding · Asbestos cement-board <p>Alternatives</p> <ul style="list-style-type: none"> · Stucco siding made with lime · Other siding from the commercial bldg industry <p>Affected properties</p> <ul style="list-style-type: none"> · bending resistance of the cladding · drying capacity through air layer ventilation · durability · surface reflectance, · surface roughness · sound attenuation (mass and flexibility of the connection to the main structure) · environmental impact related to material and maintenance · flammability and fire propagation · Ease of construction · Aesthetic 	 <p>Standard</p> <ul style="list-style-type: none"> · Water resistive membrane · Spun-bonded polyolefin · Building paper <p>Sheathing</p> <ul style="list-style-type: none"> · Plywood or OSB · Asphalt coated wood fiberboard <p>Sheathing + water resist m</p> <ul style="list-style-type: none"> · Extr. polystyrene with laminated water resist. m. · Rigid insulation, w/ or w/o air-barrier <p>Alternatives</p> <ul style="list-style-type: none"> · Rigid wood fibre panels <p>Affected properties</p> <ul style="list-style-type: none"> · bracing strength of the wall · bending strength between the studs · moisture transfer including drying capacity · air-tightness · thermal resistance, thermal capacity · sound attenuation (mass and flexibility of the connection to the main structure) · environmental impact related to material and fire propagation · Ease of construction 	 <p>Standard</p> <p>Studs</p> <ul style="list-style-type: none"> · 2x4, 2x6, 2x8 · D-fir, SPF <p>Spacing</p> <ul style="list-style-type: none"> · 12" c/c, 16" c/c, 24" c/c, · 1 bottom plate · 1 or 2 top plates <p>with or without: hold-down connection metal cross-strapping</p> <p>Alternatives</p> <ul style="list-style-type: none"> · light steel studs (not considered in this project) <p>Affected properties</p> <ul style="list-style-type: none"> · stud strength to combined bending-compress. stress · in-plane shear strength · connections to global structural system · moisture absorption, drying capacity, durability · thermal resistance, thermal bridges · sound attenuation (layout, flexibility of the connexion to other elements) · environmental impact related to material and fire propagation · Ease of construction 	 <p>Standard</p> <ul style="list-style-type: none"> · Mineral wool batt · Glass fiber batt · Cellulose insulation · Expanded or extruded polystyrene · Polyurethane foam <p>Alternatives</p> <ul style="list-style-type: none"> · Wood fiber · Straw or straw-adobe · Cellular glass, Cork · Hemp wool, Sheep wool <p>Affected properties</p> <ul style="list-style-type: none"> · bracing strength of the wall · - in some cases · moisture transfer including moisture absorption and drying capacity · durability · air-tightness - in some cases · thermal resistance, thermal capacity · sound attenuation · environmental impact related to material and fire propagation · Ease of construction 	 <p>Standard</p> <p>Vapour-barrier</p> <ul style="list-style-type: none"> · Polyethylene film · Polyethylene matt w/ or w/o aluminium film · Kraft paper · Aluminium coated wood fibre panel · Low permeance paint <p>Interior finishing</p> <ul style="list-style-type: none"> · Gypsum board · Wood siding · Wood composite finishing <p>Alternatives</p> <ul style="list-style-type: none"> · Interior finishing fibre reinforced gypsum board <p>Affected properties</p> <ul style="list-style-type: none"> · bracing strength of the wall · - in some cases · moisture transfer · durability · air-tightness - in some case · thermal resistance, thermal capacity · sound attenuation (mass and flexibility of the connexion to main struct.) · environmental impact - material and maintenance · flammability and fire propagation · contaminants emanation · Ease of construction · Aesthetic 	 <p>Standard</p> <p>Exterior side</p> <ul style="list-style-type: none"> · Spun-bonded polyolefin · Plywood or OSB · Polyurethane · Bituminous membrane <p>or</p> <p>Interior side</p> <ul style="list-style-type: none"> · Polyethylene film · Aluminium film · Kraft paper · Gypsum board <p>Alternatives</p> <p>Affected properties</p> <ul style="list-style-type: none"> · air-tightness · sound attenuation · moisture transfer · durability · thermal resistance, · thermal capacity · environmental impact - material and maintenance · flammability and fire propagation · contaminants emanation · Ease of construction

Annexe 2
Définition de l'exemple d'application

Géométrie du bâtiment résidentiel pour l'exemple d'application

bâtiment résidentiel situé à Québec

murs de facade

1er étage	longueur 12,5 m	1 porte	2 m ²
	hauteur 2,44 m	2 fenêtres	1,5 m ² chacune
2e étage	longueur 12,5 m	2 fenêtres	1,0 m ² chacune
	hauteur 2,44 m	2 fenêtres	1,5 m ² chacune

murs de pignon

1er étage	longueur 8,0 m	sans fenêtre
	hauteur 2,44 m	
2e étage	longueur 8,0 m	sans fenêtre
	hauteur 2,44 m	

2 étages de 100 m² = 200 m²

surface de mur
ouvertures 200 m²
20 m²
10% d'ouverture

toiture pignon longitudinal
pente 30°

hauteur totale 7,4 m
hauteur milieu de toiture 6,13 m

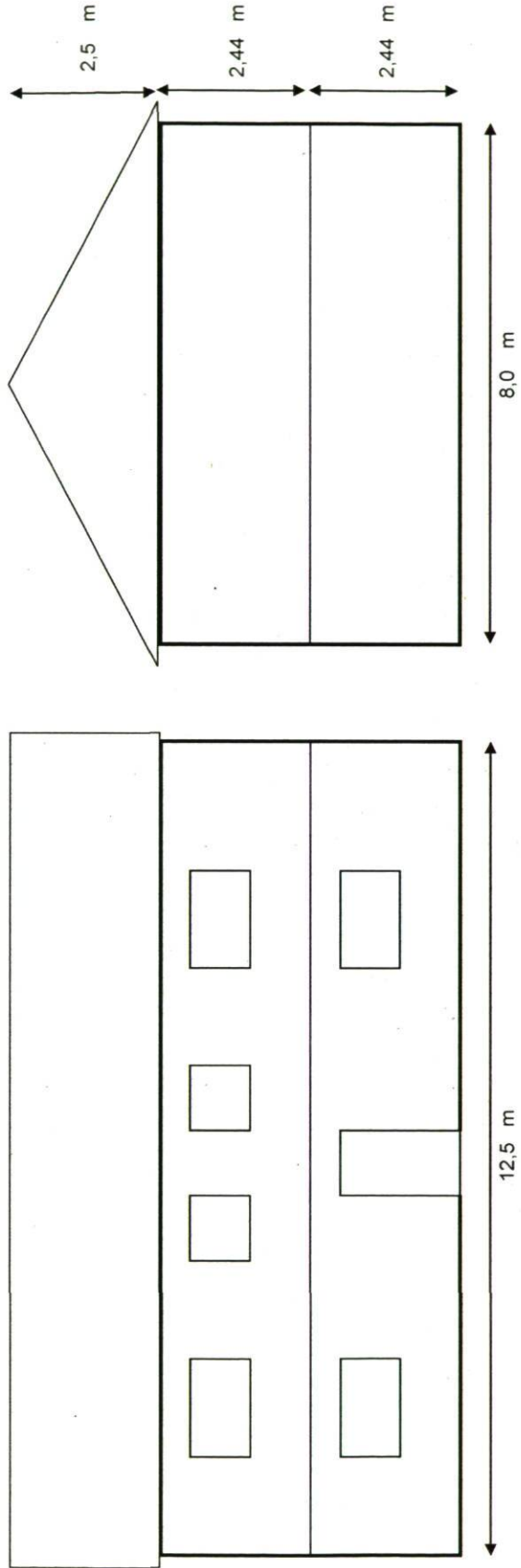
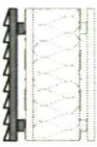
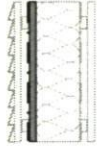

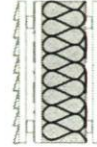



Table 3.7 - Définition des compositions de l'exemple d'application

	External Cladding	Water-resistive membrane and sheathing	Framing	Insulation	Vapour barrier and interior finishing
Assemblies					
1	vinyl siding + furring	building paper + OSB	SPF stud 38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	glass fibre batt (140 mm)	polyethylene + furring + gypsum board
2	brick veneer	spun-bonded polyolefin membrane + plywood	SPF stud 38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	extruded polystyrene (140 mm)	polyethylene + furring + gypsum board
3	brick veneer	spun-bonded polyolefin membrane + 25 mm extruded polystyrene	SPF stud 38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	glass fibre batt (140 mm)	polyethylene + furring + gypsum board
4	wood siding + furring	building paper + asphalt-coated wood fibreboard	SPF stud 38mm x 140 mm @ 400mm o.c.	blown cellulose (140 mm)	reinforced kraft paper + furring + gypsum-fibre board
5	wood composite siding + furring	spun-bonded polyolefin membrane + 25 mm extruded polystyrene + OSB	SPF stud 38mm x 140 mm @ 600mm o.c.	blown cellulose (140 mm)	aluminium-coated fibreboard + furring + gypsum board

Évaluation des contraintes de conception

Table 3.8 -

Constraint		Measure	Assembly 1	Assembly 2	Assembly 3	Assembly 4	Assembly 5	Target
A	Studs resistance to combined loading	$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r}$	0.40	0.40	0.40	0.40	0.61	≤ 1.0 (CSA O86-01 2005)
B	In-plane shear resistance of the wall	minimum length of braced panel	8m ≥ 1.2m acceptable	8m ≥ 1.2m acceptable	8m ≥ 2.4m acceptable	8m ≥ 2.4m acceptable	8m ≥ 1.2m acceptable	according to Engineering Guide (CWC 2004)
C	Fire performance	fire rating	45 min	45 min	45 min	45 min	45 min	no requirement for single family housing
D	Thermal resistance	RSI	4.1 m ² ·K/W	5.8 m ² ·K/W	4.9 m ² ·K/W	4.6 m ² ·K/W	5.4 m ² ·K/W	3.6 m ² ·K/W (L.R.Q. 2008)
E	Air permeance of air-barrier components	air leakage characteristic	0 L /s·m ²	0 L /s·m ²	0 L /s·m ²	0.02 L /s·m ²	0 L /s·m ²	≤ 0.02 L /s·m ² @75 Pa (CNRC 2005)
F	Mandatory moisture management measures (cold climate)	MC of wood at construction	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	kiln-dry wood	≤ 19% (CNRC 2005)
		Rain screen	✓	✓	✓	✓	✓	included (CNRC 2005)
		Vapour barrier	3.4 ng/Pa·s·m ²	3.4 ng/Pa·s·m ²	3.4 ng/Pa·s·m ²	55 ng/Pa·s·m ²	2.9 ng/Pa·s·m ²	≤ 60 ng/Pa·s·m ² (CNRC 2005)
		Max RH	71%	60%	61%	77%	68%	≤ 100% (CNRC 2005)

CHARGES PERMANENTES	N/m²	kPa	Notes
Toiture (pente = 30°)			
<i>Manuel de calcul des charpentes en bois (MCCB)</i>			
Bardeaux d'asphalte (/cos 30°)	139	0,14	Table 11.31a
Contreplaqué 20 mm (5 N/m ² par mm) (/cos 30°)	115	0,12	Table 11.33
Fermes de toit espacées de 400mm	100	0,10	Table 11.31a (approx.)
Isolant en vrac 250 mm (0.5 N/m ² par mm)	125	0,13	Table 11.31b
Contrelattes en bois 38x64 espacée de 610 mm	20	0,02	Table 11.31b
Panneaux de gypse 12 mm	100	0,10	Table 11.31b
Autres	50	0,05	Approx.
Total	649	0,65	
Plancher			
Carreaux de ceramique (10 mm)	300	0,30	Table 11.31a
contreplaqué 20 mm (5 N/m ² par mm)	100	0,10	Table 11.33
Solives ÉPS 38x235 espacées de 400mm	120	0,12	Table 11.32
Fibre de verre en nattes 235 mm (0.2 N/m ² par mm)	50	0,05	Table 11.31b
Panneau de gypse 12 mm	100	0,10	Table 11.31b
Autres	100	0,10	Approx.
Cloisons	1000	1,00	CNB par. 4.1.4.1.3
Total	1770	1,77	
Murs de façade			
Panneau de gypse 12 mm	100	0,10	Table 11.31b
Colombage ÉPS 38x140 @400 mm	80	0,08	Table 11.31b
Fibre de verre en nattes 140 mm (0.2 N/m ² par mm)	28	0,03	Table 11.31b
OSB 12 mm (7 N/m ² par mm)	84	0,08	Table 11.33
Revêtement de cèdre 19 mm	70	0,07	Table 11.33
Autres	50	0,05	Approx.
Total	412	0,41	

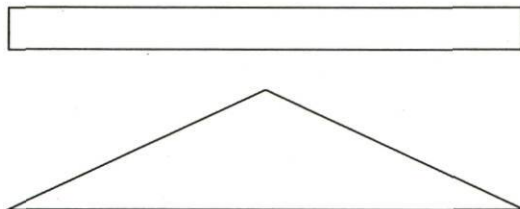
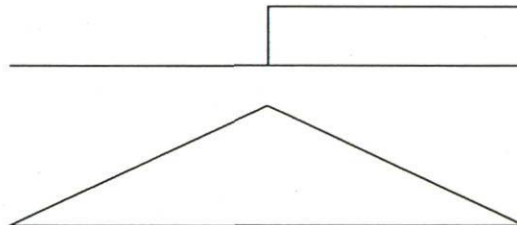
CHARGES D'UTILISATION

	kPa	Notes
Toiture	1,0	CNB Table 4.1.5.3 pas en combinaison avec la neige
Plancher	1,9	CNB Table 4.1.5.3

CHARGE DUE À LA NEIGE ET PLUIE

$$S = I_s (S_s (C_b C_w C_s C_a) + S_r)$$

I_s	=	1,0	(Ultime)	coefficient de risque
	=	0,9	(Service)	
S_s	=	3,6	kPa	charge de neige au sol à Québec (CNBC 2005 - Annexe C)
S_r	=	0,6	kPa	charge correspondante due à pluie
C_b	=	0,55		coefficient de charge de neige sur le toit <i>note : $C_b=0,55$ au lieu de $0,8$ (partie 4 - CNBC 2005)</i>
C_w	=	1,0		coefficient d'exposition au vent
C_s	=	1,0		coefficient de pente (pente = $30^\circ < 30^\circ$)
C_a	=	1,0	Cas I	coefficient de forme
		1,25	Cas II	$\alpha \geq 20^\circ$

Cas I**Cas II****Ultime:**

$$SI = 1,0 (3,6 (0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0) + 0,6)$$

$$= 2,58 \text{ kPa}$$

$$SII = 1,0 (3,6 (0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,25) + 0,6)$$

$$= 3,08 \text{ kPa}$$

Service:

$$SI = 0,9 (3,6 (0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0) + 0,6)$$

$$= 2,32 \text{ kPa}$$

$$SII = 0,9 (3,6 (0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,25) + 0,6)$$

$$= 2,77 \text{ kPa}$$

CHARGE DUE AU VENT

$P = I_w q C_e C_g C_p$ pression extérieure spécifiée

$I_w = 1,0$ (Ultime) coefficient de risque
 $= 0,75$ (Service)

$q_{1/50} = 0,53$ kPa pression dynamique de référence à Québec

$C_e = 0,70$ coefficient d'exposition = $\max(0,7 \text{ ou } 0,7 (h/12)^{0,3})$

C_g cf. croquis coefficient de rafale

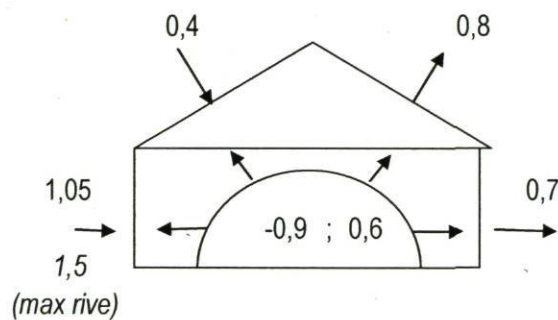
C_p cf. croquis coefficient de pression extérieure

$P_i = I_w q C_e C_{g_i} C_{p_i}$ pression intérieure spécifiée

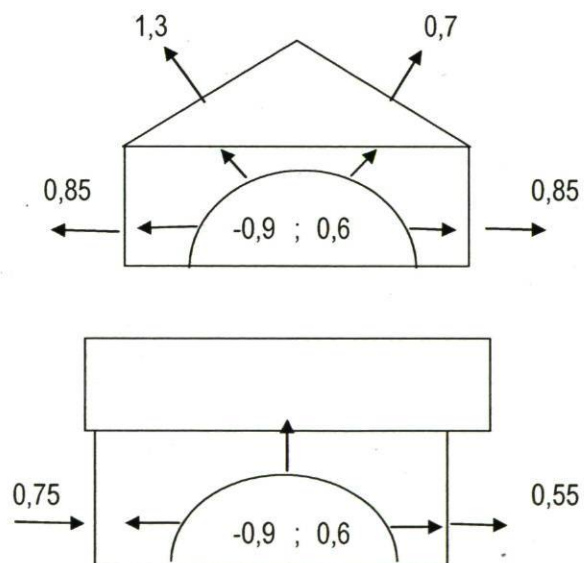
$C_{p_i} C_{g_i} = -0,45 \times 2,0 = -0,9$ bâtiment de catégorie 2 $C_{p_i} \text{ min} = -0,45$ $C_{g_i} = 2,0$
 $= 0,30 \times 2,0 = 0,6$ $C_{p_i} \text{ max} = 0,30$

Cp Cg

Cas A (vent perpendiculaire)



Cas B (vent parallèle)



$C_g C_p$ et $C_{g_i} C_{p_i}$

Note: pour les effets de rive: pression perpendiculaire max mur = 1,5 kPa

Ultime: P total $P = 1,0 * 0,53 * 0,7 * (C_p C_g + C_{p_i} C_{g_i}) =$

Murs de façade: $P = 1,0 * 0,5 * 0,7 * [1,5 + 0,90] = 0,89$ kPa

rive vers l'interieur

Service: P total $P = 0,8 * 0,53 * 0,7 * (C_p C_g + C_{p_i} C_{g_i}) =$

Murs de façade: $P = 0,8 * 0,5 * 0,7 * [1,5 + 0,90] = 0,668$ kPa

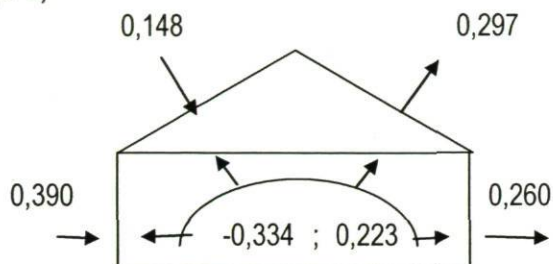
rive vers l'interieur

Charge pour les murs de cisailment

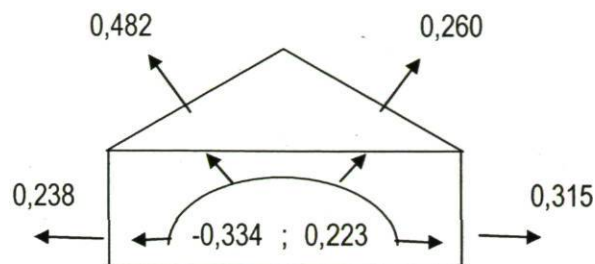
Ultime: $P_{\text{total}} = 1,0 * 0,53 * 0,7 * (C_p C_g + C_{pi} C_{gi}) = 0,371 (C_p C_g + C_{pi} C_{gi})$

Cas A (vent perpendiculaire)

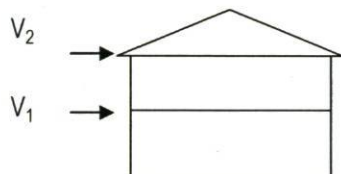
(kPa)



Cas B (vent parallel)



Vent perpendiculaire au faitage



$$V_1 = \frac{12,5 \text{ m}}{2} * \frac{2,44 \text{ m}}{2} * (0,390 + 0,260) = 5,0 \text{ kN}$$

$$V_2 = V_{2\text{mur}} + V_{2\text{toit}}$$

$$V_{2\text{mur}} = \frac{12,5 \text{ m}}{2} * 2,44 \text{ m} * (0,390 + 0,260) = 9,9 \text{ kN}$$

$$V_{2\text{toit}} = \frac{12,5 \text{ m}}{2} * 2,50 \text{ m} * (0,148 + 0,297) = 7,0 \text{ kN}$$

$$V_2 = 9,9 + 7,0 = 16,9 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_f &= V_1 + V_2 \quad (\text{mur inférieur}) \\ &= 5,0 + 16,9 = 21,8 \text{ kN par mur de pignon} \end{aligned}$$

CHARGE DUE AU SÉISME

par la méthode de la force statique équivalente (CNB 4.1.8.11)

$$S_a(0,2) = 0,59 \quad \text{condition sismique pour la ville de Québec}$$

$$S_a(0,5) = 0,30$$

$$S_a(1,0) = 0,14$$

$$S_a(2,0) = 0,05$$

$$PGA = 0,37$$

Structure: structure en bois - mur travaillant en cisaillement cloués - bois et platre

$$R_d = 2,0 \quad \text{CNB Tableau 4.1.8.9}$$

$$R_o = 1,7$$

Catégorie de sol C Sol dense ou roche tendre

(cette option est choisi car elle représente une caractéristique moyenne)

$$F_a = 1,0 \quad S_a(0,2) = 0,59 \quad \text{CNB Tableau 4.1.8.4.B}$$

$$F_v = 1,0 \quad S_a(1,0) = 0,30 \quad \text{CNB Tableau 4.1.8.4.C}$$

structure régulière selon CNB 4.1.8.6 donc calcul selon méthode 4.1.8.11

$$V = S(T_a) * M_v * I_E * W / (R_d * R_o)$$

$$\text{et } \leq S(2,0) * M_v * I_E * W / (R_d * R_o)$$

Période du bâtiment

$$T_a = 0,05 (h_n)^{3/4} = \text{mur en cisaillement} \quad \text{CNB 4.1.8.11(3c)}$$

$$= 0,05 (6,13)^{3/4} =$$

$$= 0,195 \text{ s} \leq 2 \quad \text{donc } S(T_a) = S(0,2)$$

$$S(T_a) = 0,59$$

$$M_v = 1,0 \quad \text{car } T_a \leq 1,0 \quad \text{CNB Tableau 4.1.8.11}$$

$$I_E = 1,0 \quad \text{état limite ultime} \quad \text{commentaire CNB Tableau A-2}$$

$$W = \text{charge permanente} + 25\% \text{ de la neige} \quad \text{commentaire CNB - par 168}$$

$$W_{\text{toit}} = (0,65 + 25\% * 2,58) * 8,5 * 13 = 143 \text{ kN} \quad \text{D toit} + 25\% \text{ neige}$$

$$W_{\text{étage}} = 1,77 * 8 * 12,5 + 0,41 * 41 * 2,44 = 218,2 \text{ kN} \quad \text{D plancher} + \text{D mur}$$

$$\Sigma W = 361,2$$

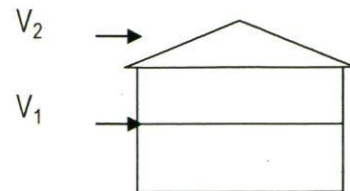
$$V = 0,59 * 1,0 * 1,0 * 361,2 / 2,0 * 1,7$$

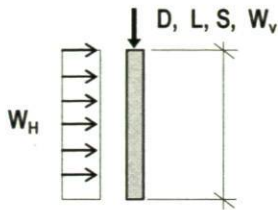
$$= 62,68 \text{ kN} \leq 0,05 * 1,0 * 1,0 * 361,2 / 2,0 * 1,7 = 5,099 \text{ kN}$$

$$V_2 = 62,68 * \frac{143}{361,2} * \frac{1}{2} = 12,41 \text{ kN par mur}$$

$$V_1 = 62,68 * \frac{218,2}{361,2} * \frac{1}{2} = 18,93 \text{ kN par mur}$$

$$V_1 + V_2 = 31,34 \text{ kN par mur}$$



COMBINAISONS DES CHARGES POUR LE MUR DE FAÇADE (Rez-de-chaussée)

poids propre du mur

$$D = 0,41 \text{ kPa} * 4,88 \text{ m} = 2,011 \text{ kN/m}$$

Largeur tributaire d'un mur de façade:

$$8,0 / 2 + 0,3 = 4,3 \text{ m pour le toit}$$

$$8,0 / 4 + 0 = 2 \text{ m pour le plancher}$$

en considérant une poutre intermédiaire

Ultime:	toit	plancher	mur	
D	= 0,65 * 4,3	+ 1,77 * 2	+ 2,011	= 8,34 kN/m ↓
L	=	1,90 * 2		= 3,80 kN/m ↓
S ₁	= 2,58 * 4,3			= 11,09 kN/m ↓
W _v	= négligé			= 0,00 kN/m ↓
W _H	= négligé		+ 0,89	= 0,89 kPa ⇒⇒

Service:	toit	plancher	mur	
D	= 0,65 * 4,3	+ 1,77 * 2	+ 2,011	= 8,34 kN/m ↓
L	=	1,90 * 2		= 3,80 kN/m ↓
S ₁	= 2,32 * 4,3			= 9,98 kN/m ↓
W _v	= négligé			= 0,00 kN/m ↓
W _H	= négligé		+ 0,67	= 0,67 kPa ⇒⇒

note: Le vent agissant sur la toiture est négligé car étant, en soulèvement pour ce cas de charge, il réduirait les forces gravitaires

ÉTATS ULTIMES

1	1.4 D	= 1,4 * 8,34	= 11,68 kN/m ↓
2	1.25 D + 1.5 L	= 1,25 * 8,34 + 1,5 * 3,80	= 16,13 kN/m ↓
2a	1.25 D + 1.5 L + 0.5 S	= 1,25 * 8,34 + 1,5 * 3,80 + 0,5 * 11,09	= 21,67 kN/m ↓
2b	1.25 D + 1.5 L + 0.4 W	= 1,25 * 8,34 + 1,5 * 3,80	= 16,13 kN/m ↓
		= + 0,4 * 0,89	= 0,356 kPa ⇒⇒
3	1.25 D + 1.5 S ₁	= 1,25 * 8,34 + 1,5 * 11,09	= 27,1 kN/m ↓
3a	1.25 D + 1.5 S ₁ + 0.5 L	= 1,25 * 8,34 + 1,5 * 11,09 + 0,5 * 3,80	= 28,97 kN/m ↓
3b	1.25 D + 1.5 S ₁ + 0.4 W	= 1,25 * 8,34 + 1,5 * 11,09	= 27,1 kN/m ↓
		= + 0,4 * 0,89	= 0,356 kPa ⇒⇒
4b	1.25 D + 1.4 W + 0.5 S	= 1,25 * 8,34	= 16,0 kN/m ↓
		= + 1,4 * 0,89	= 1,247 kPa ⇒⇒

TENUE EN SERVICE

4b	1.0 D + 1.0 W + 0.5 S	= 1 * 8,34	= 13,3 kN/m ↓
		= + 1 * 0,67	= 0,668 kPa ⇒⇒

Résistance en compression-flexion des montants

38 x 140 EPS stud
espacement = 400 mm

ÉTATS ULTIMES

3a	1.25 D + 1.5 S ₁ + 0.5 L	= 29 kN/m	*	0,4 m	=	11,6 kN
3b	1.25 D + 1.5 S ₁ + 0.4 W	= 27,1 kN/m	*	0,4 m	=	10,8 kN
		= 0,36 kPa	*	0,4 m	=	0,14 kN/m
4b	1.25 D + 1.4 W + 0.5 S	= 16 kN/m	*	0,4 m	=	6,39 kN
		= 1,25 kPa	*	0,4 m	=	0,5 kN/m

TENUE EN SERVICE

4b	1.0 D + 1.0 W + 0.5 S	= 13,3 kN/m	*	0,4 m	=	5,33 kN
		= 0,67 kPa	*	0,4 m	=	0,27 kN/m

Montant

Longueur L = 2,4 m

selon b retenu lateralement par le panneau OSB

selon d K_e = 1,0 poteau rotulé au deux extrémité

Longueur effective L_e = K_e * L = 1,0 * 2,4 = 2,4 m (selon d)

En résumé

Résistance en compression - flexion du montant

Pour combinaison N°3, charges de durée normale.

$$P_r = 31,8 \geq P_f = 11,6 \text{ kN}$$

Pour combinaison N°3b

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} = 0,4 \leq 1,0 \quad \checkmark \quad V_f = 0,2 \leq V_r = 9,4 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Pour combinaison N°4

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} = 0,4 \leq 1,0 \quad \checkmark \quad V_f = 0,6 \leq V_r = 9,4 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Résistance en compression de flanc de la lisse basse - cas 3a

$$Q_r = 32,4 \geq P_f = 11,6 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Tenue en service - ELS

$$\Delta_w = 1,5 \text{ mm} \leq \frac{L}{360} = 6,67 \text{ mm} \quad \checkmark$$

38 x 140 EPS stud est satisfaisant

Dimensionnement avec les tables du MCCB

Pour combinaison N°3a, charges de durée normale.

MCCB p107

ÉPS stud

38 x 140

L = 2,4

 $P_r = 31,8 \text{ kN}$ $\geq 11,6 \text{ kN}$

✓

liste de contrôle:

- charge de durée normale ✓
- milieu sec ✓
- sans incision ou produit ignifuge ✓
- colombage retenu latéralement ✓
- partage de charge :cas N°2 ✓
- charge concentrique ✓

Pour combinaison N°3b et N°4b, avec charges de courte durée.

MCCB p204

ÉPS stud

38 x 140

L = 3 m

 $P_r'/P_r = 0,5$ $P_r = 14,4 \text{ kN}$ $\geq 10,8 \text{ kN}$

✓

 $w'_r = 0,65 \text{ kN/m}$ $\geq 0,14 \text{ kN/m}$

✓

et

 $P_r'/P_r = 0,3$ $P_r = 8,65 \text{ kN}$ $\geq 6,4 \text{ kN}$

✓

 $w'_r = 0,99 \text{ kN/m}$ $\geq 0,50 \text{ kN/m}$

✓

liste de contrôle:

- charge de courte durée ✓
- milieu sec ✓
- sans incision ou produit ignifuge ✓
- colombage retenu latéralement ✓
- partage de charge :cas N°2 ✓
- charge concentrique ✓

38 x 140 SPF stud est adéquat

Calculs avec effet P-Δ

Pour combinaison N°3b et N°4b, avec charges de courte durée.

Résistance en compression

liste de contrôle p.107:

- charge de durée normale × $K_D = 1,15$ la valeur est donc conservatrice
- milieu sec ✓
- sans incision ou produit ignifuge ✓
- colombage retenu latéralement ✓
- partage de charge :cas N°2 ✓
- charge concentrique ✓

L = 2,4

 $P_r = 31,8 \text{ kN}$

Résistance en flexion

$$M_r = \phi * F_b * S * K_{zb} * K_L \geq M_f \quad \text{CSA-O86 5.5.4.1}$$

$$\phi = 0,9$$

$$F_b = f_b (K_D * K_H * K_{Sb} * K_T)$$

$$f_b = 7 \text{ MPa EPS stud} \quad \text{CSA-O86 tab 5.3.1 A}$$

$$K_D = 1,15 \text{ durée normal} \quad \text{CSA-O86 4.3.2.2}$$

$$K_H = 1,4 \text{ cas no2} \quad \text{CSA-O86 5.4.4, tab 5.4.4}$$

$$K_{Sb} = 1,0 \text{ milieu sec} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.2}$$

$$K_T = 1,0 \text{ bois non-traité} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.3}$$

$$F_b = 7 * 1,15 * 1,4 * 1 * 1 = 11,3 \text{ MPa}$$

$$S = \frac{b d^2}{6} = \frac{38 * 140^2}{6} = 1,24E+05 \text{ mm}^3$$

$$K_{zb} = 1,4 \quad \frac{38 \times 140}{38 \times 140} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.5}$$

$$K_L = 1,0 \quad \frac{d}{b} = \frac{140}{38} = 3,68 \leq 6,5 \quad \text{CSA-O86 tab 5.5.4.2 montants retenues par OSB}$$

$$M_r = 0,9 * 11,3 * 124133 * 1,4 * 1,0 = 1762718 \text{ Nmm}$$

$$M_r = 1,76 \text{ kNm}$$

Pour combinaison N°3b

$$P_f = 11 \text{ kN} \quad w_f = 0,14 \text{ kN/m} \quad M'_f = \frac{w_f L^2}{8} = \frac{0,14 * 2,4^2}{8} = 0,10 \text{ kNm}$$

$$\text{Effet P-}\Delta \quad E_s I = 78,20 \text{ kN.m}^2 \quad K_{SE} = 1,0 \text{ milieu sec}$$

(MCCB p176)

$$K_T = 1,0 \text{ bois non-traité}$$

$$\Delta_{wf} = \frac{5 * w_f * L^4}{384 * E_s I} = \frac{5 * 0,14 * 2,4^4 * 10^3}{384 * 78,2} = 0,8 \text{ mm}$$

$$P_E = \frac{\pi^2 * E_s I}{(K_e L)^2} = \frac{\pi^2 * 78,2}{2,4^2} = 134 \text{ kN}$$

$$\Delta_T = \Delta_L \left(\frac{1}{1 - \frac{P_f}{P_E}} \right) = 0,79 * \left(\frac{1}{1 - \frac{11}{134}} \right) = 0,86 \text{ mm}$$

Moment amplifié par l'effet P-Δ

$$M_f = M'_f + P_f \Delta_T = 0,10 + 11 * 0,0009 = 0,11 \text{ kNm}$$

$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} = \frac{11}{32} + \frac{0,1}{1,8} = 0,34 + 0,06 = 0,4 \leq 1,0 \checkmark$

$$V_f = \frac{w_f L}{2} = \frac{0,14 * 2,4}{2} = 0,17 \text{ kNm}$$

$V_f = 0,2 \leq V_r = 9,38 \text{ kN}$
--

Pour combinaison N°4b

$$P_f = 6,4 \text{ kN} \quad w_f = 0,50 \text{ kN/m} \quad M'_f = \frac{w_f L^2}{8} = \frac{0,50 * 2,4^2}{8} = 0,36 \text{ kNm}$$

$$\text{Effet P-}\Delta \quad E_s I = 78,20 \text{ kN.m}^2 \quad K_{SE} = 1,0 \text{ milieu sec} \\ K_T = 1,0 \text{ bois non-traité}$$

$$\Delta_{wf} = \frac{5 * w_f * L^4}{384 * E_s I} = \frac{5 * 0,50 * 2,4^4 * 10^3}{384 * 78,2} = 2,75 \text{ mm}$$

$$\Delta_T = \Delta_L \left(\frac{1}{1 - \frac{P_f}{P_E}} \right) = 2,75 * \left(\frac{1}{1 - \frac{6}{134}} \right) = 2,89 \text{ mm}$$

Moment amplifié par l'effet P-Δ

$$M_f = M'_f + P_f \Delta_T = 0,36 + 6,4 * 0,0029 = 0,38 \text{ kNm}$$

$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} = \frac{6,4}{32} + \frac{0,38}{1,8} = 0,2 + 0,21 = 0,42 \leq 1,0 \checkmark$

$$V_f = \frac{w_f L}{2} = \frac{0,50 * 2,4}{2} = 0,60 \text{ kNm}$$

$V_f = 0,6 \leq V_r = 9,4 \text{ kN}$

Résistance en compression de flanc de la lisse basse - cas 3a

$$Q_r = \phi * F_{cp} * A_b * K_B * K_{Zcp} \geq R_f \quad \text{CSA-O86 5.5.7}$$

$$\phi = 0,8$$

$$F_{cp} = f_{cp} (K_D * K_{Scp} * K_T)$$

$$f_{cp} = 5,3 \text{ MPa} \quad \text{EPS Stud} \quad \text{CSA-O86 tab 5.3.1 A}$$

$$K_D = 1,0 \quad \text{durée normal} \quad \text{CSA-O86 4.3.2.2}$$

$$K_{Scp} = 1,0 \quad \text{milieu sec} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.2}$$

$$K_T = 1,0 \quad \text{bois non-traité} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.3}$$

$$F_v = 5,3 * 1 * 1 * 1 = 5,3 \text{ MPa} = 5,3 \text{ N/mm}^2$$

$$A_b = b L_b = 38 * 140 \text{ mm}^2 \quad \text{aire d'appui}$$

$$K_B = 1,25 \quad b=38\text{mm} \quad \text{CSA-O86 5.5.7.6}$$

$$K_{Zcp} = 1,15 \quad \frac{b}{d} = \frac{140}{38} = 3,68 \geq 2,0 \quad \text{CSA-O86 tab 5.5.7.5}$$

$$R_f = 11,6 \text{ kN}$$

$$Q_r = 0,8 * 5,3 * 38 * 140 * 1,25 * 1,15 = 32425 \text{ N} \geq 11587 \text{ N} \quad \checkmark$$

Tenue en service - ELS

$$\text{Module d'élasticité} \quad E_s = E (K_{SE} K_T) \quad E_s I = 78,2 \text{ kN.m}^2 \quad \text{EPS Stud} \quad \text{CSA-O86 tab 5.3.1 A}$$

$$K_{SE} = 1,0 \quad \text{milieu sec} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.2}$$

$$K_T = 1,0 \quad \text{bois non-traité} \quad \text{CSA-O86 tab 5.4.3}$$

$$\text{cas de charge 4b} \quad w_w = 0,27 \text{ kN/m}$$

$$\text{Flèche} \quad \Delta_w \leq L/360 \quad \text{CSA-O86 tab 4.5.2} \quad \Delta_w = \frac{5 * w_w * L^4}{384 E_s I} = \frac{5 * 0,27 * 2,4^4}{384 * 78,2 * 10^3} = 1,48 \text{ mm}$$

$1,5 \text{ mm} \leq \frac{2400}{360} = 6,67 \text{ mm} \quad \checkmark$

Résistance en compression-flexion des montants

38 x 140 EPS stud
espacement = 600 mm

ÉTATS ULTIMES

3a	1.25 D + 1.5 S ₁ + 0.5 L	= 29 kN/m	*	0,6 m	=	17,4 kN
3b	1.25 D + 1.5 S ₁ + 0.4 W	= 27,1 kN/m	*	0,6 m	=	16,2 kN
		= 0,36 kPa	*	0,6 m	=	0,21 kN/m
4b	1.25 D + 1.4 W + 0.5 S	= 16 kN/m	*	0,6 m	=	9,58 kN
		= 1,25 kPa	*	0,6 m	=	0,75 kN/m
TENUE EN SERVICE						
4b	1.0 D + 1.0 W + 0.5 S	= 13,3 kN/m	*	0,6 m	=	8 kN
		= 0,67 kPa	*	0,6 m	=	0,4 kN/m

Montant

Longueur L = 2,4 m

selon b retenu lateralement par le panneau OSB

selon d K_e = 1,0 poteau rotulé au deux extrémité

Longueur effective L_e = K_e * L = 1,0 * 2,4 = 2,4 m (selon d)

En résumé

Résistance en compression - flexion du montant

Pour combinaison N°3, charges de durée normale.

$$P_r = 31,8 \geq P_f = 17,4 \text{ kN}$$

Pour combinaison N°3b

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} = 0,61 \leq 1,0 \quad \checkmark \quad V_f = 0,3 \leq V_r = 9,4 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Pour combinaison N°4

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} = 0,61 \leq 1,0 \quad \checkmark \quad V_f = 0,9 \leq V_r = 9,4 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Résistance en compression de flanc de la lisse basse - cas 3a

$$Q_r = 32,4 \geq P_f = 17,4 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Tenue en service - ELS

$$\Delta_w = 2,2 \text{ mm} \leq \frac{L}{360} = 6,67 \text{ mm} \quad \checkmark$$

38 x 140 EPS stud est satisfaisant

Résistance en contreventement du mur

mur de facade = 12,5 m - 4 m (ouvertures) = 8,5 m

mur de pignon = 8 m

mur de refend de 8 m rez-de chaussée $V_f = 31,3 \text{ kN}$

selon CSA O86

panneau de gypse $V_r = 0,84 \text{ kN/m} * 8 = 6,72 \text{ kN}$ (400mm)

selon clouage prescrit $V_r = 0,5 \text{ kN/m} * 8 = 4,00 \text{ kN}$ (600mm)

OSB 11mm $V_r = 4,19 \text{ kN/m} * 8 = 33,5 \text{ kN}$ > 31,3 kN (séisme)

selon clouage prescrit > 21,8 kN (vent)

selon " Engineering guide for wood frame construction" (EGWFC)

$K_D = 1,25$

EGWFC 3.4.2

$V_{rs} = \phi * v_{dg} * J_{hd}$ tableau 10.2.10B

$V_{rs} = 0,7 * 1,2 * 1 = 0,84$

panneau de gypse $V_r = 0,84 \text{ kN/m} * 8 = 6,72 \text{ kN}$ (400mm)

clouage 200mm $V_r = 0,5 \text{ kN/m} * 8 = 4,03 \text{ kN}$ (600mm)

$V_{rs} = \phi * v_d * J_{sp} * K_D * K_{SF} * J_{ub} * J_{hd}$

$V_{rs} = 0,7 * 6,5 * 0,8 * 1,25 * 1 * 1 * 1 = 4,55$ tableau 10.2.10A

OSB 11mm $V_r = 4,55 \text{ kN/m} * 8 = 36,4 \text{ kN}$ > 31,3 kN (séisme)

clouage 150mm > 21,8 kN (vent)

selon " Engineering guide for wood frame construction" (EGWFC) - Table C1a

$Q_{1/50} = 0,53 \text{ kPa} \leq 0,65 \text{ kPa}$ Donc table C1a est applicable

$S_a(0,2) = 0,59 \leq 0,65 \text{ kPa}$

For the first and the second storey of 2 storey building

plywood or OSB minimum length = 1,2 m \leq 8 m ✓

12,7mm gypsum board on one side minimum length = 2,4 m \leq 8 m ✓

12,7mm fibreboard sheathing minimum length = 2,4 m \leq 8 m ✓

NB: Les patrons de clouage et les angrages devront respectés la réglementation

Résistance au feu

selon CNBC 2005 - 9.10

batiment de groupe: C occupation résidentielle

résistance au feu des planchers	45 min	tableau 9.10.8.1.
résistance au feu des murs soutenant ces planchers	45 min	CNBC 9.10.8.3.

mais ceci ne s'applique au maison unifamiliale CNBC 9.10.8.10.

fire-stop CNBC 9.10.16.

selon tableau A-9.10.3.1.A

W1

ossature 38x89 (ou 38x140)

avec matériau absorbant

plaque de plâtre ordinaire 12,7 mm	30 min
------------------------------------	--------

ou

avec ou sans matériau absorbant

plaque de plâtre de type X 12,7 mm	45 min
------------------------------------	--------

avec matériaux absorbant de type supérieur (laine de roche)

plaque de plâtre de type X 12,7 mm	60 min
------------------------------------	--------

Isolation thermique minimale

CNBC 2005

matériaux s'opposant aux transfert de chaleur:

CNBC 5.3.1.2.

- réduire le formation de condensation du coté chaud, et à l'intérieur de l'assemblage
- permettre de maintenir les températures intérieures de calcus pour l'usage prévu
- réduire au minimum la condensation à l'intérieur de la paroi (voir gestion de l'humidité)

Reglement quebecois sur l'économie d'énergie des nouveaux batiments (RQEENB)

Résistance thermique totale minimale

quebec

Zone B

isolation murs hors-terre

RQEENB version 2008

résistance thermique totale minimale

3,6 m².°C/W

article 34

		Assembly 1	Assembly 2	Assembly 3	Assembly 4	Assembly 5	Code
résistance thermique totale	RSI	4,1	5,8	4,9	4,6	5,4	3.6 (Quebec)
résistance thermique effective	RSI	3.6	4.6	4.4	4.1	5.1	

la résistance thermique totale n'inclut pas l'influence des ponts thermiques causés par l'ossature

la résistance thermique effective est réduite pour inclure l'influence des ponts thermiques causés par l'ossature

Autres valeurs de résistances thermiques recommandées mais pas obligatoires selon le code du Québec

selon le Code modèle national de l'énergie pour les habitations - Canada 1997 (CMNEH)

resistance thermique effective minimale

4,1 m².°C/W

Tableau A-3.3.1.1.

selon la certification Novoclimat - Exigences techniques générales 2003

resistance thermique totale minimale

4,31 m².°C/W

art. 3.1

NOTE: Pour le calcul des valeurs RSI, voir l'annexe 5

Étanchéité à l'air minimale

selon CNBC 2005 - 5.3

air leakage characteristic of air-barrier components
 $\leq 0.02 \text{ L /s.m}^2 \text{ @75 Pa}$

CNBC A- 5.4.1.2.

max air leakage rate of opaque system (RH>55%)
 $\leq 0.05 \text{ L /s.m}^2 \text{ @75 Pa}$

CNBC A- 5.4.1.2.

membrane de polyoléfine	0,02 L /s.m ² @75 Pa
polyéthylène	0 L /s.m ² @75 Pa
contreplaqué	0 L /s.m ² @75 Pa
plaque de plâtre	0,02 L /s.m ² @75 Pa
polystyrene extrudé	0 L /s.m ² @75 Pa
pellicule d'aluminium	0 L /s.m ² @75 Pa

	assembly 1	assembly 2	assembly 3	assembly 4	assembly 5	Code
<i>air-barrier</i>	polyéthylène	polyéthylène	polyéthylène	plaque de plâtre	pellicule d'aluminium	
<i>L /s.m² @75 Pa</i>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	≤ 0.02

Mesures obligatoires pour la gestion de l'humidité (climat froid)

selon CNBC 2005 - 9.3.2.5

la teneur en eau du bois de construction ne doit pas être supérieure à 19% lors de la mise en œuvre

selon CNBC 2005 - 9.27

deuxième plan de protection exigé avec un écran pare-pluie

selon CNBC 2005 - 9.25.4 ou 5.5.1

pare-vapeur avec une perméance $\leq 60 \text{ ng /Pa.m}^2.\text{s}$

polyéthylène	3,4 ng /Pa.m ² .s
papier kraft	55 ng /Pa.m ² .s
film d'aluminium	2,9 ng /Pa.m ² .s

selon CNBC 2005 - 9.25.4.3 et 5.3.1.2

Le pare-vapeur doit être posé suffisamment près du côté chaud pour réduire au maximum la formation de condensation dans la paroi aux conditions de calculs (voir pages suivantes)

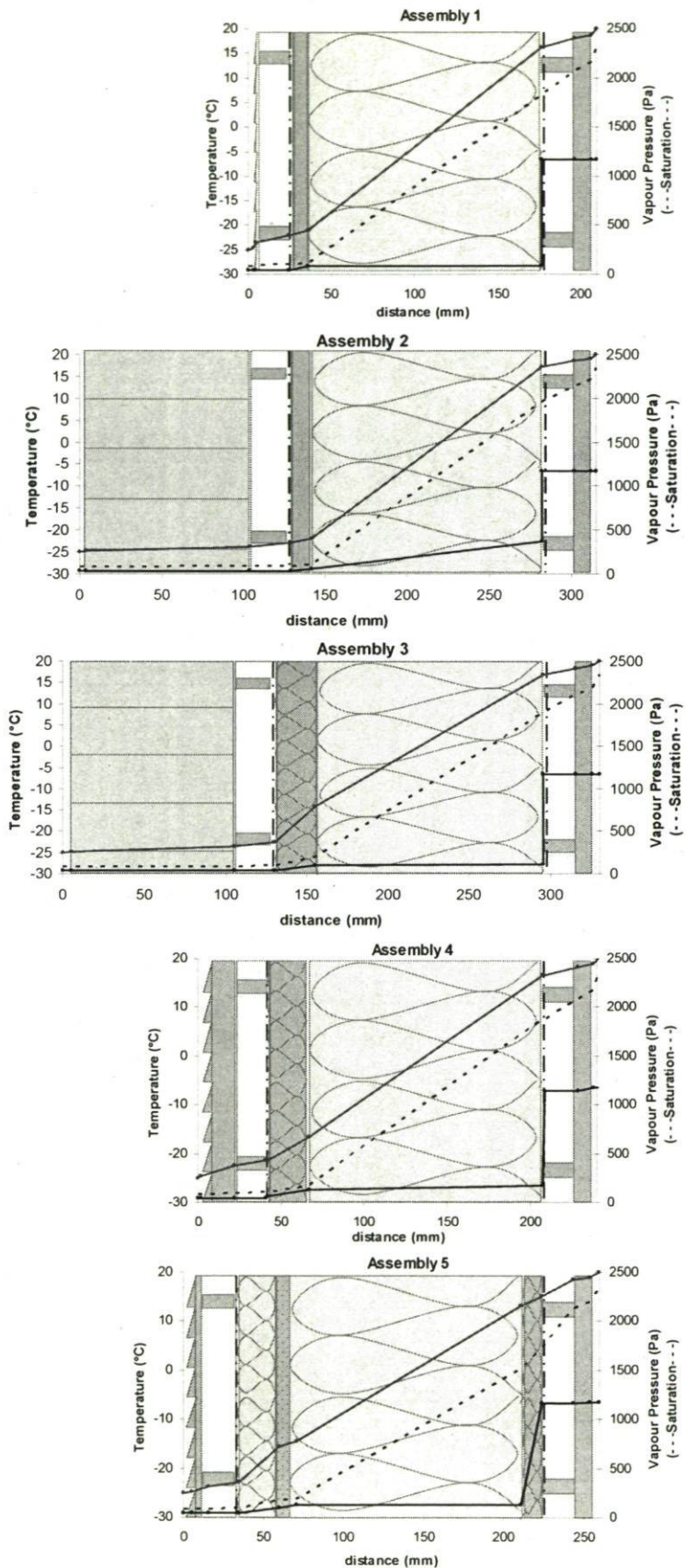
	assembly 1	assembly 2	assembly 3	assembly 4	assembly 5	Code
teneur en eau du bois	kiln-dry	kiln-dry	kiln-dry	kiln-dry	kiln-dry	$\leq 19\%$
pare-pluie	building paper	spun-bonded polyolefin membr.	spun-bonded polyolefin membr.	building paper	spun-bonded polyolefin membr.	inclus
pare-vapeur <i>ng /Pa.m².s</i>	polyéthylène 3,40	polyéthylène 3,40	polyéthylène 3,40	papier kraft 55,00	film d'aluminium 2,90	≤ 60
<i>RH max</i>	71%	60%	61%	77%	68%	$\leq 100\%$

Pour le calcul de l'humidité relative à l'intérieur de mur, voir pages suivantes

Calcul de l'humidité relative à l'intérieur de l'assemblage par la méthode du point de rosée

	thermal resistance			Temperature		saturation vapour pressure	Vapor pressure				Relative humidity RH			
	thickness (mm)	X	RSI K.m ² /W	U W/K.m ²	ΔT		$T_{ext} = -25^{\circ}C$	$T_{int} = 20^{\circ}C$	vapor permeability ng/(s.m.Pa)	vapor permeance ng/(s.m ² .Pa)		vapor resistance (Pa.m ² .s)/ng	Δp	vapor pressure Pa
Assembly 1		0				-25	81					40,5	50%	
film d'air extérieur	3,35		0,030	33,33	0,33									
		3,35				-24,67	83					40,50	49%	
vinyl siding	1		0,110	9,09	1,21									
		4,35				-23,46	93					40,50	44%	
air layer	20		0,120	8,33	1,32									
		24,35				-22,14	104							
building paper (60min) RH=50% OSB (RH=50%)	1		0,000		0,00				2440	0,00041	1,51	40,50	39% ok	
		25,35				-22,14	104					42,01	40% ok	
	11,1		0,109	9,19	1,20			1,0	90	0,01110	40,83	82,84	71% ok	
		36,45				-20,94	116							
fiber glass batt	140		3,360	0,30	36,98							85,84	5% ok	
		176,5				16,04	1823							
polyethylene	0,15		0,000		0,00				3,4	0,29412	1081,99	1167,83	64% ok	
		176,6				16,04	1823							
air layer	20		0,180	5,56	1,98						0,00000	0,00	1167,83	56% ok
		196,6				18,02	2067							
gypsum board	10		0,060	16,67	0,66				2200	0,00045	1,67	1169,50	54% ok	
		206,6				18,68	2154							
film d'air intérieur	3,35		0,120	8,33	1,32						0,00	1169,50	50% ok	
		210				20,00	2339					1169,50	50% ok	
						20	2339					1169,5		
total RSI			4,089							0,30690		RH max	71%	
Assembly 2		0				-25	81					40,5	50%	
film d'air extérieur	4		0,030	33,33	0,23									
		4				-24,77	83					40,50	49%	
brick siding	100		0,120	8,33	0,93			10	100	0,00000	0,00	40,50	45% ok	
		104				-23,84	90							
air layer	25		0,120	8,33	0,93						0,00000	0,00	40,50	41% ok
		129				-22,90	98							
spun-bonded polyol	0,15		0,000		0,00							40,50	41% ok	
		129,2				-22,90	98							
Plywood (RH=50%)	12,5		0,147	6,80	1,14			1,46	116,80	0,00856	23,12	41,12	42% ok	
		141,7				-21,76	108							
Extr. Polystyrene	140		5,018	0,20	38,97			1,22	8,71	0,11475	309,86	64,24	59% ok	
		281,7				17,20	1963							
polyethylene	0,3		0,000		0,00				3,40	0,29412	794,18	1168,27	60% ok	
		282				17,20	1963							
air layer	20		0,180	5,56	1,40						0,00000	0,00	1168,27	54% ok
		302				18,60	2144							
gypsum board	10		0,060	16,67	0,47				2200,00	0,00045	1,23	1169,50	53% ok	
		312				19,07	2207							
film d'air intérieur	3		0,120	8,33	0,93						0,00	1169,50	50% ok	
		315				20,00	2339					1169,50	50% ok	
						20	2339					1169,5		
total RSI			5,795							0,41812		RH max	60%	
Assembly 3		0				-25	81					40,5	50%	
film d'air extérieur	5		0,030	33,33	0,28									
		5				-24,72	83					40,50	49%	
brick siding	100		0,120	8,33	1,11			10	100	0,00000	0,00	40,50	44% ok	
		105				-23,62	92							
air layer	25		0,120	8,33	1,11						0,00000	0,00	40,50	40% ok
		130				-22,51	101							
spun-bonded polyol	0,2		0,000		0,00							40,50	40% ok	
		130,2				-22,51	101							
Extruded polystyrer	25		0,896	1,12	8,25			1,46	58,40	0,01712	61,82	41,33	41% ok	
		155,2				-14,26	203							
fiber glass batt (or v	140		3,360	0,30	30,95							103,14	51% ok	
		295,2				16,68	1900							
polyethylene	0,3		0,000		0,00				3,4	0,29412	1061,78	106,08	6% ok	
		295,5				16,68	1900							
air layer	20		0,180	5,56	1,66						0,00000	0,00	1167,86	61% ok
		315,5				18,34	2109							
gypsum board	10		0,060	16,67	0,55				2200,00	0,00045	1,64	1167,86	55% ok	
		325,5				18,89	2183							
film d'air intérieur	4,5		0,120	8,33	1,11						0,00	1169,50	54% ok	
		330				20,00	2339					1169,50	50% ok	
						20	2339					1169,5		
total RSI			4,886							0,31274		RH max	61%	

	thermal resistance			Temperature		saturation vapour pressure	Vapor pressure					Relative humidity		
	thickness (mm)	X	RSI K.m ² /W	U W/K.m ²	ΔT		$T_{ext} = -25^{\circ}C$	$T_{int} = 20^{\circ}C$	vapor permeability ng/(s.m.Pa)	vapor permeance ng/(s.m ² .Pa)	vapor resistance (Pa.m ² .s)/ng		Δp	vapor pressure Pa
Assembly 4		0					-25	81					40,5	50%
film d'air exterieur	2		0,030	33,33	0,29		-24,71	83					40,50	49%
Cedar siding	20	2	0,222	4,50	2,18		-22,52	101	48,5	2425	0,00000	0,00	40,50	40% ok
air layer	19	41	0,120	8,33	1,18		-21,34	112			0,00000	0,00	40,50	36% ok
building paper	1	42	0,000		0,00		-21,34	112		2440	0,00041	21,81	62,31	56% ok
asphalt coated fibre	25,4	67,4	0,488	2,05	4,80		-16,54	168	20	787,40	0,00127	67,59	129,90	77% ok
cellulose	140	207,4	3,360	0,30	33,01		16,46	1873	156	1114	0,00090	47,76	177,66	9% ok
kraft paper	1	208,4	0,000		0,00		16,46	1873		55,0	0,01818	967,65	1145,31	61% ok
air layer	20	228,4	0,180	5,56	1,77		18,23	2095			0,00000	0,00	1145,31	55% ok
gypsum fibre board	10	238,4	0,060	16,67	0,59		18,82	2173		2200,00	0,00045	24,19	1169,50	54% ok
film d'air interieur	2	240,4	0,120	8,33	1,18		20,00	2339				0,00	1169,50	50% ok
							20	2339					1169,5	
total RSI			4,581								0,02121		RH max	77%
Assembly 5		0					-25	81					40,5	50%
film d'air exterieur	5	5	0,030	33,33	0,25		-24,75	83					40,50	49%
Wood composite si	10,5	15,5	0,110	9,09	0,91		-23,85	90	4,7	448	0,00000	0,00	40,50	45% ok
air layer	19	34,5	0,120	8,33	0,99		-22,86	98			0,00000	0,00	40,50	41% ok
spun-bonded polyol	0,2	34,7	0,000		0,00		-22,86	98		4370	0,00023	0,69	41,19	42% ok
Extruded polystyrer	25,4	60,1	0,896	1,12	7,39		-15,47	184	1,46	57,48	0,01740	52,39	93,58	51% ok
OSB	11,1	71,2	0,109	9,19	0,90		-14,57	198	1,0	90	0,01110	33,43	127,01	64% ok
cellulose (or wood s	140	211,2	3,360		27,70		13,12	1510	156	1114	0,00090	2,70	129,71	9% ok
Al coated fibreboard	12,7	223,9	0,244	4,09	2,01		15,14	1721		2,9	0,34483	1038,42	1168,13	68% ok
air layer with 1 refle	20	243,9	0,410	2,44	3,38		18,52	2132			0,00000	0,00	1168,13	55% ok
gypsum board	10	253,9	0,060	16,67	0,49		19,01	2199		2200,00	0,00045	1,37	1169,50	53% ok
film d'air interieur	6,1	260	0,120	8,33	0,99		20,00	2339				0,00	1169,50	50%
							20	2339					1169,5	
total RSI			5,459								0,37491		RH max	68%



Annexe 3
Propriétés hygrothermiques et
résultats des simulations avec WUFI 4.1

WUFI analyses

The analyses are performed with the 1D simulation tool WUFI 4.1 heat and moisture transport simulation tool (Karagiozis *et al.* 2001, WUFI 2007).

Assemblies

The material properties used for the assemblies are presented the following tables. The properties are taken from the WUFI North America Database, based on ASHREA RP-1018 (Kumaran 2002), completed with NIST and ONRL publications.

Properties were difficult to evaluate for some materials, such as vinyl siding, wood siding and aluminium coated fiberboard. For vinyl siding, the heat capacity is taken from ASHRAE fundamentals. The other properties come from polyethylene membrane, with a thickness of 1mm. After verification, these values do not affect significantly the results due to the ventilation of the air layer. Eastern white cedar properties from the database were used for the wood siding. Regarding the aluminium coated fiberboard in assembly 5, it has been divided in 2 materials in the simulation: regular wood fiberboard and an aluminium film. The fiberboard properties come from the WUFI database. The properties of the aluminium film were calculated from the manufacturer values for the EMCO-Enermax product. The reflexive property of the aluminium film could not be integrated directly in the WUFI analysis because the minimum possible thermal conductivity in WUFI is 0.001. The thickness of the layer was adapted to ensure that the assembly of the two layers provides the adequate thermal conductivity of the Enermax product. The bulk density of aluminium was adjusted accordingly to this virtual thickness. The water vapour diffusion resistance factor was also adjusted to this virtual thickness from the conductance value found in ASHRAE fundamentals. This value was chosen even though the resistance factor of the two layers was greater than the vapour resistance factor calculated from the vapour permeability of the Enermax product. The air layer between the exterior siding and the rain barrier is ventilated with 100 ACH, which represent an upper limit for ventilated air layer behind exterior siding (Burnett *et al.* 2004).

Assembly 2	Brick	20 mm air layer	Polyolefine	Plywood	Extruded Polystyrene	Polyethylene 0,15mm	20 mm air layer	Gypsum board
	WUFI ASHRAE-1018	100 CAH ASHRAE-1018	WUFI ASHRAE-1018	WUFI ASHRAE-1018	WUFI ASHRAE-1018	WUFI ASHRAE-1018	ASHRAE-1018	WUFI ASHRAE-1018
	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³
	DWS m²/s	DWS m²/s	DWS m²/s	DWS m²/s	DWS m²/s	DWS m²/s	DWS m²/s	DWS m²/s
	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³	MC kg/m³
	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K	Thermal cond W/m.K
	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis
	RH	RH	RH	RH	RH	RH	RH	RH
BASIC PROPERTIES	104	20	448	470	140	1	20	20
thickness	1670	1,3	0,001	0,69	28,6	130	1,3	1,3
Bulk density	0,196	0,999	0,001	0,99	0,99	0,001	0,999	0,706
Porosity	840	1500	1880	1880	1470	2300	1000	870
Specific Heat Capacity - dry	0,4	0,13	2,4	0,084	0,025	2,3	0,13	0,16
Thermal conductivity - dry	16	0,56	328,4	1078	170,56	50000	0,56	7,03
Permeability								
Water vapour diffusion resistance	3,34	0		64,4	0	0	0	10
APPROXIMATION PARAMETER				550				
Reference MC				0,0042				
Free-water saturation				70				
Water absorption coefficient								
Typical bulk-in moisture								
moisture storage function								
	RH	RH	RH	RH	RH	RH	RH	RH
	MC	WC	MC	MC	MC	WC	WC	WC
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
	DWS	DWS	DWS	DWS	DWS	DWS	DWS	DWS
	m²/s	m²/s	m²/s	m²/s	m²/s	m²/s	m²/s	m²/s
	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
	Thermal cond	Thermal cond	Thermal cond	Thermal cond	Thermal cond	Thermal cond	Thermal cond	Thermal cond
	W/m.K	W/m.K	W/m.K	W/m.K	W/m.K	W/m.K	W/m.K	W/m.K
	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis	WVD resis
	RH	RH	RH	RH	RH	RH	RH	RH
Liquid transport coefficient - suction	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,34	1,10E-08	5,01	2,80E-08	0,1	0,009	0,505	4,34
	5,01	2,80E-08	55,11	3,60E-07	0,5	0,06	0,71	6,16
	101,87	6,60E-07	177,02	1,30E-06	0,8	0,31	0,896	11,31
	195,39	2,50E-06	195,39	2,50E-06	0,9	0,66	0,99	93
					0,97	1,95	1	430,63
					0,99	3,94		
Liquid transport coefficient - redistribution	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,34	1,10E-09	5,01	2,80E-09	0	0	0	0
	5,01	2,80E-09	55,11	3,60E-08	0	0	0	0
	101,87	6,60E-07	177,02	1,30E-06	0	0	0	0
	195,39	2,50E-06	195,39	2,50E-06	0	0	0	0
					0	0	0	0
					0	0	0	0
Thermal conductivity	0	0	0	0	0	0	0	0
	196	0,776	1078,2	64,4	170,56	2,3	0	0
	0,1	15,39	1078,2	550	170,56	2,3	0	0
	0,9	6,68	1078,2	550	170,56	2,3	0	0
	0,98	4,85	1078,2	550	170,56	2,3	0	0
Water vapour diffusion resistance	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,1	15,39	1078,2	550	170,56	2,3	0	0
	0,9	6,68	1078,2	550	170,56	2,3	0	0
	0,98	4,85	1078,2	550	170,56	2,3	0	0

Assembly 3	Brick WUFI	20 mm air layer 100 CAH ASHRAE-1018	Polyoléfine WUFI ASHRAE-1018	Extruded Polystyrene WUFI ASHRAE-1018	Fiberglass Batt WUFI	Polyethylene 0,15mm WUFI ASHRAE-1018	20 mm air layer ASHRAE-1018	Gypsum board WUFI ASHRAE-1018
BASIC PROPERTIES	104	20	448	25	140	1	20	12,5
thickness	1670	1,3	0,001	28,6	30	130	1,3	625
Bulk density	0,196	0,999	0,001	0,99	0,99	0,001	0,999	0,706
Porosity	840	1000	1500	1470	840	2300	1000	870
Specific Heat Capacity - dry	0,4	0,13	2,4	0,025	0,035	2,3	0,13	0,16
Thermal conductivity - dry	16	0,56	328,4	170,56	1,3	50000	0,56	7,03
Permeability								
Water vapour diffusion resistance								
APPROXIMATION PARAMETER								
Reference water content	3,34	0	0	0	0	0	0	10
Free-water saturation	0	0	0	0	0	0	0	0
Water absorption coefficient	0,6	0,1	0,009	0,1	0,009	0	0,1	0,505
Typical built-in moisture	1,67	0,5	0,08	0,5	0,08	0	0,5	4,34
moisture storage function	0,8	0,8	0,31	0,8	0,31	0	0,8	0,71
	0,93	0,9	0,66	0,9	0,66	0	0,9	0,896
	0,96	0,975	1,95	0,97	1,95	0	0,99	1
	0,985	1,0187	3,94	0,99	3,94	0	1	430,63
	0,99	131,93				0		
	0,997	177,02				0		
	1	195,39				0		
Liquid transport coefficient - suction	water content kg/m³	DWS m²/s	water content kg/m³	DWS m²/s	water content kg/m³	DWS m²/s	water content kg/m³	DWS m²/s
	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,34	1,10E-08	0	0	0	0	0	0
	5,01	2,80E-08	0	0	0	0	0	0
	55,11	3,60E-07	0	0	0	0	0	0
	101,87	6,60E-07	0	0	0	0	0	0
	177,02	1,30E-06	0	0	0	0	0	0
	195,39	2,50E-06	0	0	0	0	0	0
Liquid transport coefficient - redistribution	water content kg/m³	DWW m²/s	water content kg/m³	DWW m²/s	water content kg/m³	DWW m²/s	water content kg/m³	DWW m²/s
	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,34	1,10E-09	0	0	0	0	0	0
	5,01	2,80E-09	0	0	0	0	0	0
	55,11	3,60E-08	0	0	0	0	0	0
	101,87	6,60E-08	0	0	0	0	0	0
	177,02	1,30E-07	0	0	0	0	0	0
	195,39	2,50E-07	0	0	0	0	0	0
Thermal conductivity	water content kg/m³	Thermal con- W/m.K	water content kg/m³	Thermal con- W/m.K	water content kg/m³	Thermal con- W/m.K	water content kg/m³	Thermal con- W/m.K
	0	0	0	0	0	0	0	0
	196	0,776	0	0,025	50	0,035	0	0
	0	0	0	0	100	0,049	0	0
	0,1	15,39	0	0	300	0,1	0	0
	0,9	6,68	0	0	500	0,2	0	0
	0,98	4,85	0	0	800	0,44	0	0
			0	0	900	0,55	0	0
			0	0	950	0,6	0	0
			0	0,61	990	0,61	0	0
Water vapour diffusion resistance	RH	WVD resis	RH	WVD resis	RH	WVD resis	RH	WVD resis
	0	16	0	170,56	0	1,3	0	7,03
	0,1	15,39	0	328,4	0	50000	0	10
	0,9	6,68	0		0		0	20
	0,98	4,85	0		0		0	30
			0		0		0	40
			0		0		0	50
			0		0		0	60
			0		0		0	70
			0		0		0	80
			0		0		0	90
			0		0		0	100

Assembly 5	Composite wood siding		20 mm air layer		Polyolefine		Extruded Polystyrene		OSB		Cellulose insulation		Fibreboard (low)		Aluminum foil		20 mm air layer		Gypsum board	
	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	MEWS	WUFI	ENERMAX	WUFI	ASHRAE-1018	WUFI	ASHRAE-1018
BASIC PROPERTIES	mm	10.5	20	448	25	650	140	12.5	0.38	20	12.5	0.38	20	12.5	0.38	20	12.5	0.38	20	12.5
Thickness	kg/m ³	740	1.3	0.001	28.6	0.99	30	237.75	639	1.3	639	0.99	1.3	639	0.99	1.3	639	0.99	1.3	639
Bulk density	m ² /m ³	0.666	0.999	0.001	0.001	0.99	0.99	0.95	0.001	0.99	0.95	0.001	0.99	0.95	0.001	0.99	0.95	0.001	0.99	0.95
Porosity	J/kg.K	1880	1500	1470	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880
Specific Heat Capacity - dry	W/m.K	0.094	0.13	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Thermal conductivity - dry	ng/s m.Pa	53.1	328.4	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56	170.56
Water vapour diffusion resistance																				
APPROXIMATION PARAMETER																				
Reference MC	kg/m ³	75.5																		
Free-water saturation	kg/m ³	347																		
Water absorption coefficient	kg/m ² .s ^{0.5}	0.00072																		
Typical built-in moisture	kg/m ³	75																		
moisture storage function																				
	MC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW	74.0E-14	54.02	0.5	0.08	0.693	59.15	0.722	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	347	0.694	0.8	0.31	0.895	104.65	0.881	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	1.60E-11	98.42	0.9	0.66	0.998	407.55	1	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWW		281.2	0.97	1.95	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MC	1	347	0.99	3.94	1	470	1	470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	DWS	75.5	34.04	0.1	0.009	0.494	43.55	0.504	1.68	0	0									

Calculation for aluminised fiberboard

	thickness(mm)	fibresboard	al film	air layer	together	Enermax EMCO
thickness(mm)	mm	12,5	0,38	20		12,7
Bulk density	kg/m ³	237,75	639		253,1	253,01
Bulk density (real) for 0,09mm	kg/m ³		2700			
Porosity	m ³ /m ³	0,95	0,001			
Specific Heat Capacity - dry	J/kg.K	1880	900			
Thermal conductivity	W/m.K	0,045	0,001	0,13		
RSI	K.m ² /W	0,278	0,380	0,154	0,812	0,81
Permeability	ng/s.m.Pa		0,0000261			0,02159
Water vapour diffusion resistance		5,72	6896552			
sd pour 0,009mm	mm	71,5	62069		62140	
Water vapour diffusion resistance pour 0,38m			163339			
Water vapour diffusion resistance	mm	5,72	4100			8708
sd		71,5	1558		111397	110588

For the WUFI analyses, a medium-size grid was chosen to be automatically generated by the software for the analysis.

The conditions are monitored at 5 specific locations:

- 1- exterior of the wall
- 2- between water-resistive membrane and sheathing
- 3- between the sheathing and the main insulation
- 4- between the insulation and the vapour barrier
- 5- interior of the wall.

Orientation

The wall, in vertical position, was oriented in north-east direction since it represents the maximum wind-driven rain according the climate analysis. The wind-driven rain will be calculated for a short building, less than 10m height.

Surface transfer coefficient:

Exterior Surface

Heat resistance: 0,0588 m²K/W (not Wind dependant)

Sd-value: 0 m (No additional coating)

Short-wave radiation absorptivity: according to the siding material (but it has a limited impact for north-east oriented wall)

Long-wave radiation emissivity: according to the siding material (but it has a limited impact for north-east oriented wall)

Rain water absorption factor: 0,7 (according to inclination and construction type)

Interior Surface

Heat resistance: 0,125 m²K/W

Sd-value: 0 m (No coating)

Initial conditions:

Initial RH: 80%

Initial temperature 20°C

Indoor climate:

The indoor climate suggested in WUFI for low moisture load was chosen.

Temperature:

Annual sine wave with a mean of 21°C, an amplitude of 1°C and a maximum on June 3rd.

Relative**humidity:**

Annual sine wave with a mean of 45%, an amplitude of 15% and a maximum on August 16th.

Outdoor climate:

The outdoor climate was chosen from the climate file of the coldest year in Quebec City.

Calculation period and numeric calculation:

The simulation were performed for a period a 3 years starting oct.1st 2006.

Include heat and moisture transport calculations

Increased accuracy and adapted convergence

Results

To compare the results, the relative humidity taken at the monitoring position between the intermediate sheathing and the insulation cavity was compared. From the 3 monitoring positions inside the wall cavity, it had the maximal relative humidity in the analyses.

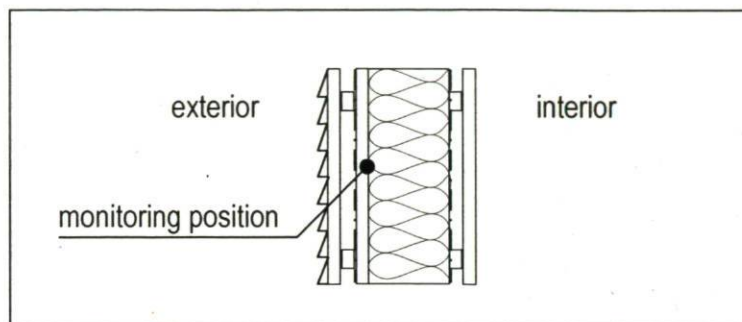


Figure 1 - Monitoring position between the intermediate sheathing and the insulation cavity

Following the SPC 160P ASHRAE Standard, the 24 hours, 7 days and 30 days running averages of surface RH were compared, under normal conditions and with accidental wetting.

"In order to prevent problems associated with mould growth on the surfaces of components of building envelope assemblies, all of the following conditions shall be met:^{C-22}

- (a) 30-day running average surface RH < 80% when the 30-day running average surface temperature is between 5 °C (41 °F) and 40 °C (104 °F), and,
- (b) 7-day running average surface RH < 98% when the 7-day running average surface temperature is between 5 °C (41 °F) and 40 °C (104 °F), and,
- (c) 24-h running average surface RH < 100% when the 24-h running average surface temperature is between 5 °C (41 °F) and 40 °C (104 °F).

Materials which are naturally resistant to mould growth (e.g., concrete, masonry, glass and metals) or have been chemically treated to resist mould growth (e.g., fungicide-treated cellulose based materials) may be able to resist higher surface relative humidity and/or to resist for longer periods as specified by the manufacturer. The criteria used in the evaluation shall be stated in the report"

from ASHRAE SPC 160P Paragraph 6.1 (ASHRAE 2006)

Normal Conditions

From the simulation result, the 24 hour-, 7 day- and 30 day-running averages are calculated for the 2nd and the 3rd years. The 7 day- and 30 day- running averages are only written when the temperature was between 5° and 40°C. The graphs include all the data for the 24 hr-average to enable the observation of the global behaviour, even though only relative humidity with a temperature over 5°C is considered for mould growth in this analysis.

As an example, figure 2 shows the the 24 hour-, 7 day- and 30 day-running averages and their respective thresholds of 100%, 98% and 80% RH (pink, yellow and aqua dotted lines), for the 2nd and the 3rd year of simulation under normal conditions, when temperature is between 5° and 40°C.

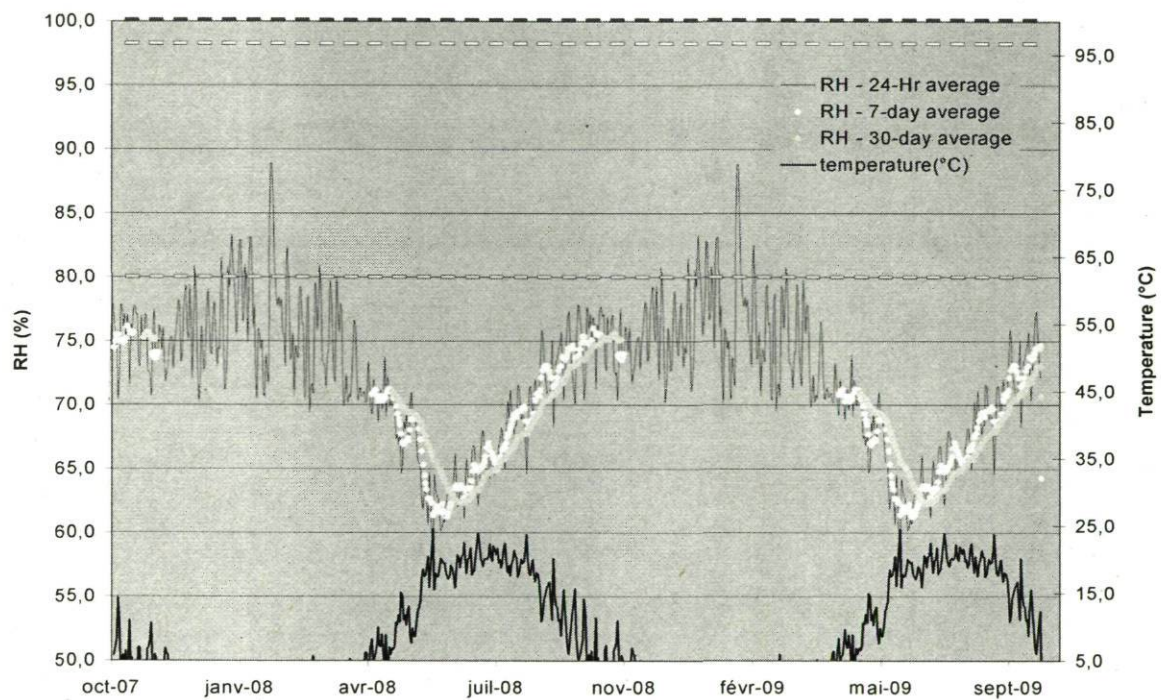


Figure 2 - 24 hour-, 7 day- and 30 day- running averages for assembly 1 under normal conditions

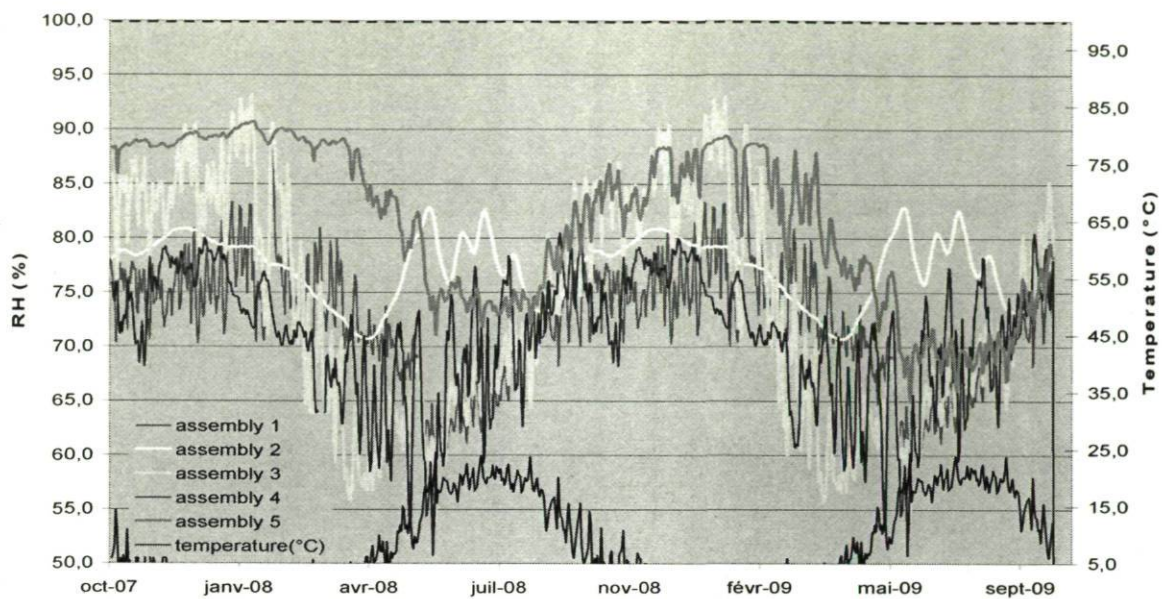


Figure 3 - 24 hour-running averages for the 5 assemblies under normal conditions

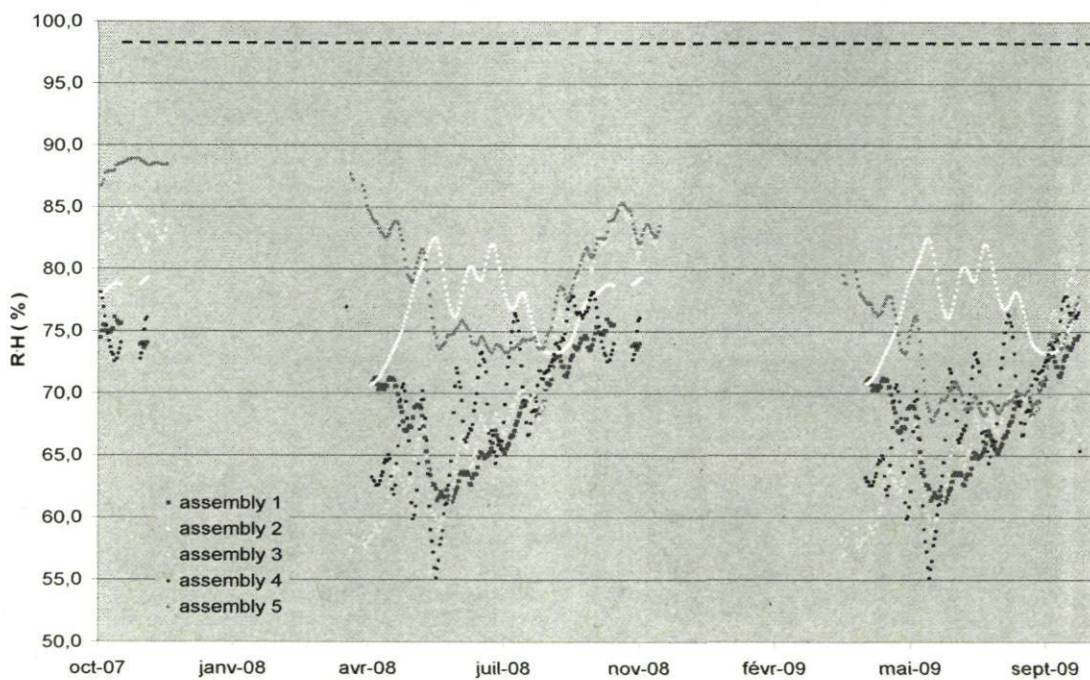


Figure 4 - 7 day-running averages for the 5 assemblies under normal conditions when temperature is between 5° and 40°C

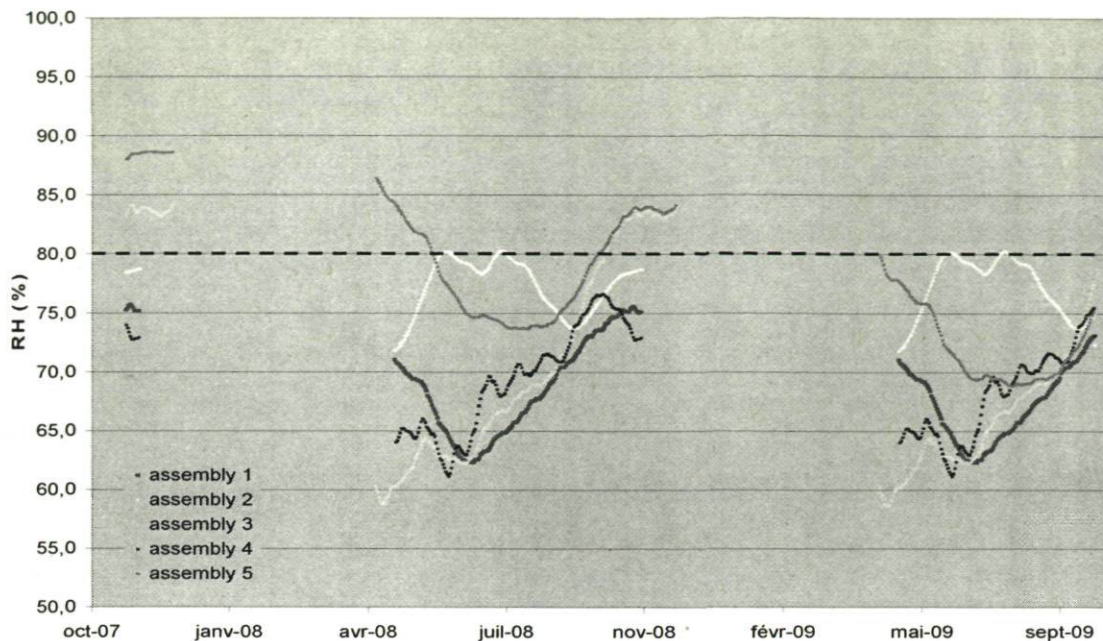


Figure 5 - 30 day-running averages for the 5 assemblies under normal conditions, when temperature is between 5° and 40°C

Accidental wetting

To simulate leaks in the assembly, an additional case is calculated with 1% rain entering between the rain barrier and the sheathing, and 1% rain entering the insulation in the stud cavity.

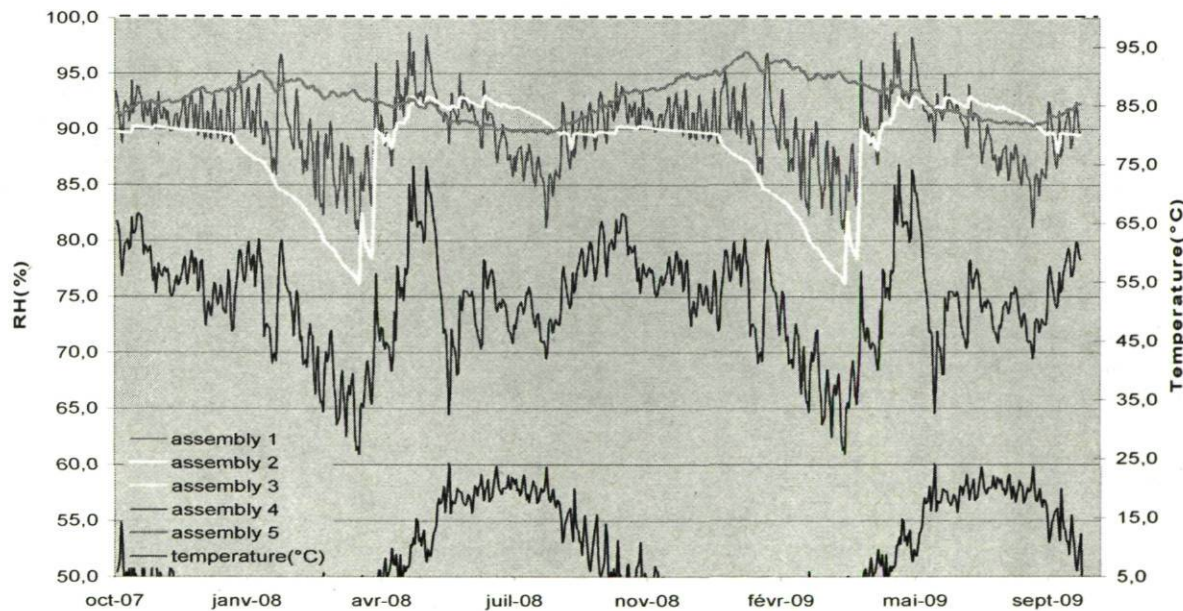


Figure 6 - 24 hour-running averages for the 5 assemblies under wetting conditions

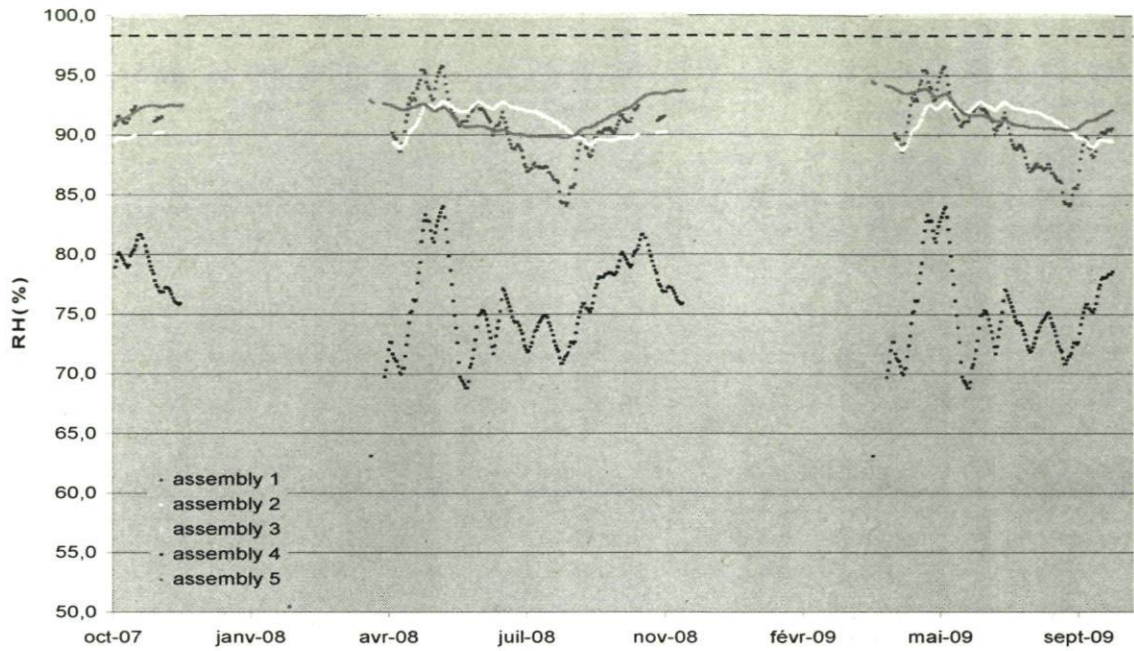


Figure 7 - 7 day-running averages for the 5 assemblies under wetting conditions when temperature is between 5° and 40°C

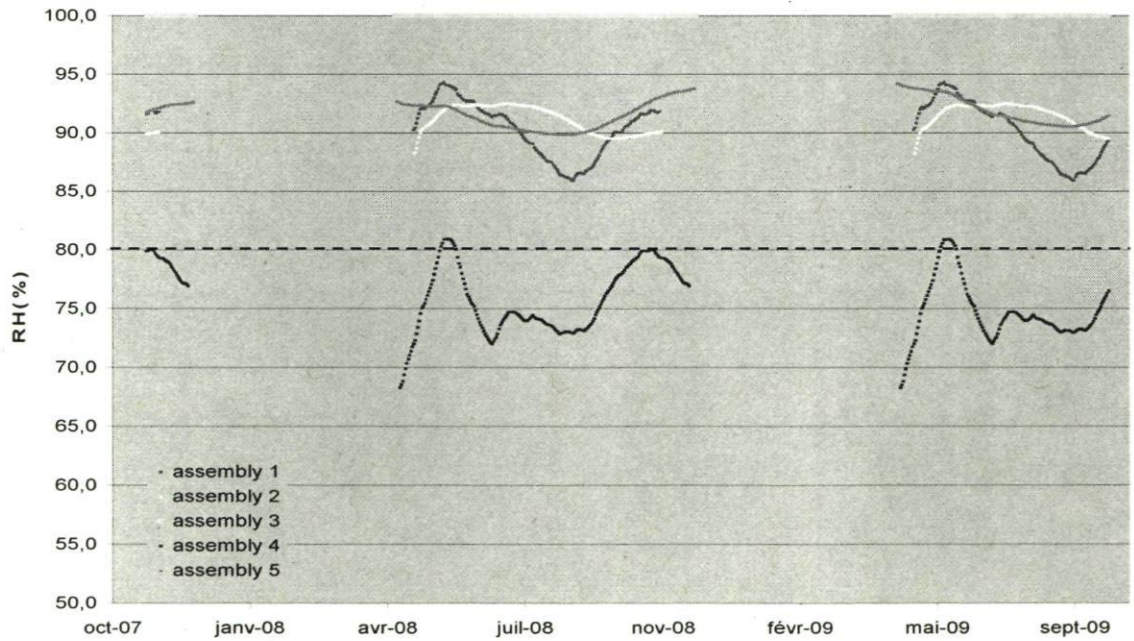


Figure 8 - 30 day-running averages for the 5 assemblies under wetting conditions when temperature is between 5° and 40°C

Annexe 4
Calculs des coûts de construction
et d'entretien

RSMEANS 2007		US National average costs				Costs for Quebec City					
Location factor (Quebec City)		no	material	installation	total (incl O&P)	ratio	units	material	installation	total (incl O&P)	units
Assembly 1											
vinyl siding		07 46 33.10 0020	0.78	1.15	1.93	1.37	/ft ²	0.94	1.13	2.14	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.17	0.31	0.48	1.40	/ft ²	0.20	0.31	0.53	/ft ²
building paper		07 26 10.10 0400	0.04	0.0795	0.1195	1.42	/ft ²	0.05	0.08	0.13	/ft ²
OSB 1/2"		06 16 26.10 0600	0.37	0.42	0.79	1.33	/ft ²	0.44	0.41	0.87	/ft ²
wood framing 2x6@400		06 11 10.26 0805	5.2	5.45	10.65	1.33	/linear ft	6.23	5.37	11.79	/linear ft
blocking		06 11 10.26 1500	0.58	0.98	1.56	1.38	/linear ft	0.70	0.97	1.73	/linear ft
fiber glass batt 6"		07 21 16.20 0860	0.05	0.26	0.31	1.24	/ft ²	0.68	0.26	0.92	/ft ²
polyethylene (6 mil)		07 26 10.10 0900	0.05	0.08	0.13	1.35	/ft ²	0.06	0.08	0.14	/ft ²
gypsum board		09 29 10.30 0490	0.46	0.76	1.22	1.39	/ft ²	0.55	0.75	1.35	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.17	0.31	0.48	1.40	/ft ²	0.20	0.31	0.53	/ft ²
Assembly 2											
brick siding		04 21 13.13 2020	3.85	6.25	10.1	1.36	/ft ²	4.62	6.16	11.18	/ft ²
spun-bonded polyolefin membrane		07 26 10.10 0480	0.13	0.07	0.2	1.25	/ft ²	0.16	0.07	0.22	/ft ²
Plywood 1/2"		06 13 36.10 0605	0.47	0.42	0.89	1.33	/ft ²	0.56	0.41	0.99	/ft ²
wood framing 2x6@400		06 11 10.26 0805	5.2	5.45	10.65	1.33	/linear ft	6.23	5.37	11.79	/linear ft
blocking		06 11 10.26 1500	0.58	0.98	1.56	1.38	/linear ft	0.70	0.97	1.73	/linear ft
Extruded polystyrene 5.5"		07 21 13.10 1960	2.46	0.4	2.86	1.15	/ft ²	2.95	0.39	3.17	/ft ²
polyethylene (6 mil)		07 26 10.10 0900	0.05	0.08	0.13	1.35	/ft ²	0.06	0.08	0.14	/ft ²
gypsum board		09 29 10.30 0490	0.46	0.76	1.22	1.39	/ft ²	0.55	0.75	1.35	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.17	0.31	0.48	1.40	/ft ²	0.20	0.31	0.53	/ft ²
Assembly 3											
brick siding		04 21 13.13 2020	3.85	6.25	10.1	1.36	/ft ²	4.62	6.16	11.18	/ft ²
spun-bonded polyolefin membrane		07 26 10.10 0480	0.13	0.07	0.2	1.25	/ft ²	0.16	0.07	0.22	/ft ²
Extruded polystyrene 1"		07 21 13.10 1900	0.47	0.37	0.84	1.09	/ft ²	0.56	0.36	0.93	/ft ²
wood framing 2x6@400		06 11 10.26 0805	5.2	5.45	10.65	1.33	/linear ft	6.23	5.37	11.79	/linear ft
blocking		06 11 10.26 1500	0.58	0.98	1.56	1.38	/linear ft	0.70	0.97	1.73	/linear ft
fiber glass batt 6"		07 21 16.20 0860	0.05	0.26	0.31	1.24	/ft ²	0.68	0.26	0.92	/ft ²
polyethylene (6 mil)		07 26 10.10 0900	0.05	0.08	0.13	1.35	/ft ²	0.06	0.08	0.14	/ft ²
gypsum board		09 29 10.30 0490	0.46	0.76	1.22	1.39	/ft ²	0.55	0.75	1.35	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.17	0.31	0.48	1.40	/ft ²	0.20	0.31	0.53	/ft ²
Assembly 4											
Cedar siding		07 46 23.10 3200	3.05	1.17	4.22	1.23	/ft ²	3.66	1.15	4.67	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.17	0.31	0.48	1.40	/ft ²	0.20	0.31	0.53	/ft ²
building paper		07 26 10.10 0400	0.04	0.0795	0.1195	1.42	/ft ²	0.05	0.08	0.13	/ft ²
asphalt coated fibre board (1")		06 16 36.10 3800	0.36	0.49	0.85	1.18	/linear ft	0.43	0.48	0.94	/linear ft
wood framing 2x6@400		06 11 10.26 0805	5.2	5.45	10.65	1.33	/linear ft	6.23	5.37	11.79	/linear ft
blocking		06 11 10.26 1500	0.58	0.98	1.56	1.38	/linear ft	0.70	0.97	1.73	/linear ft
cellulose (+ wall patching)		07 21 26.10 0030	0.37	1.03	1.4	1.68	/ft ²	0.44	1.01	1.55	/ft ²
kraft paper (reinforced)		07 26 10.10 2400	0.06	0.08	0.14	1.31	/ft ²	0.07	0.08	0.15	/ft ²
gypsum board		09 29 10.30 0490	0.46	0.76	1.22	1.39	/ft ²	0.55	0.75	1.35	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.17	0.31	0.48	1.40	/ft ²	0.20	0.31	0.53	/ft ²
Assembly 5											
Wood composite siding (ex:Canaxel®)		07 46 26.10 0051	1.13	0.93	2.06	1.30	/ft ²	1.35	0.92	2.28	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.11	0.21	0.32	1.41	/ft ²	0.13	0.21	0.35	/ft ²
spun-bonded polyolefin membrane		07 26 10.10 0480	0.13	0.07	0.2	1.25	/ft ²	0.16	0.07	0.22	/ft ²
Extruded polystyrene 1"		07 21 13.10 1900	0.47	0.37	0.84	1.09	/ft ²	0.56	0.36	0.93	/ft ²
OSB 1/2"		06 16 26.10 0600	0.37	0.42	0.79	1.33	/linear ft	0.44	0.41	0.87	/linear ft
wood framing 2x6@600		06 11 10.26 0905	4.03	4.26	8.29	1.11	/linear ft	4.83	4.20	9.18	/linear ft
blocking		06 11 10.26 1500	0.58	0.98	1.56	1.38	/linear ft	0.70	0.97	1.73	/linear ft
cellulose (+ wall patching)		07 21 26.10 0030	0.37	1.03	1.4	1.68	/ft ²	0.44	1.01	1.55	/ft ²
fiber board (1/2")		07 22 16.10 0020	0.55	0.49	1.04	1.20	/ft ²	0.66	0.48	1.15	/ft ²
aluminum foil		07 21 16.20 1900	0.06	0	0.06	1.17	/ft ²	0.07	0.00	0.07	/ft ²
gypsum board		09 29 10.30 0490	0.46	0.76	1.22	1.39	/ft ²	0.55	0.75	1.35	/ft ²
furring		06 11 10.42 0605	0.11	0.21	0.32	1.41	/ft ²	0.13	0.21	0.35	/ft ²

Annexe 5
Calculs des pertes énergétiques
et des coûts de chauffage

Heat loss

In this analysis, heat transfer is calculated using the effective RSI value of the wall, in combination with climate data.

Air-tightness also affects directly heat loss, but the air-permeability of the opaque air barrier is negligible compared to global air leakage of the whole house (2%). Once an air-barrier layer has been included in the wall design, as required in building codes, the global air-tightness of the building is mainly related to construction details. It is therefore barely influenced by the choice of wall assembly materials.

Comparing air-transfer through wall air-barrier and total air transfer of a house								
	reference	air-permeability	Pressure	wall area	change of units		total air transfer	
Required air-barrier	CNBC 2005	0,05 l/s.m ²	@ 75 Pa	200 m ²	3600 s/h =		36000 l/h	@ 75 Pa
				volume				
global air-tightness (new construction)	R 2000	3,25 CAH	@ 50 Pa	474 m ³	1000 l/m ³ =		1540500 l/h	@ 50 Pa
								2,3%

Calculation of effective RSI-values

Thermal conductivity of the layers

The thermal resistance RSI-value, in m².K/W, combines the thermal conductivity, in W/m.K, with the thickness of each material, in m. The metric RSI-value (m².K/W) equals 0,1761 R-value (°F.ft².h/Btu). A summary of the RSI values found from various sources as well as the values retained are presented in next Table. It includes data from Novoclimat (AEE 2003), MNECH Appendix (CNRC 1997), and ASHRAE handbook (ASHRAE 2005), material database found in software (WUFI 2007), Research reports (Kumaran 2002), and manufacturer's technical publications. For each layer, the retained value should be the most scientifically reliable, the most recent and the most representative of the specific product used. For the case example, most values retained come from Kumaran's research report, ASHRAE handbook or the MNECH.

Air layer

The thermal resistances of the air layers within the assemblies need to be quantified. To consider the film of static air close to wall, ASHRAE (2005) and MNECH (1997) recommend respectively 0.03 m².K/W and 0.12 m².K/W for the exterior and the interior of the wall. This exterior value considers a wind of 24km/h.

For non-vented air layer, such as the one between the vapour barrier and the interior finishing, the thermal resistance greatly depends on the direction of the heat flow, the air temperature, and the reflectivity of each surface. For vertical air space, a mean temperature of -17.8°C and non-reflective surface (surface emittance $\epsilon_{\text{eff}}=0.82$) ASHRAE (2005) recommends a value of 0.21 m².K/W. When this air layer has one reflective surface, such as an aluminium coated vapour barrier, the value increases due to reflection of radiation

heat through the air layer. In this case ($\epsilon_{\text{eff}}=0.20$), the RSI-value of $0.41 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ recommended by ASHRAE (2005) is retained.

For the vented air layer between the water resistive membrane and the exterior siding, no direct reference were found. The value of this thermal resistance should be between $0.06 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, which is the 2 times the exterior air film value of $0.03 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, and $0.21 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, which is used for still air layer. Examples in Novoclimat (2003) and MNECH (1997) uses respectively $0.17 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ and $0.18 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ for a vertical air layer behind a brick siding, but have no indications for other siding materials. For an air layer of 20 mm, the WUFI database suggests a RSI-value of $0.154 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. A conservative value of $0.12 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (used for interior air film) is chosen for this analysis.

Non-uniform walls - stud effect

The effective thermal resistance of the wall must include the thermal bridges caused by the structural elements, such as wood studs and lintels. Stud spacing influences the importance of these thermal bridges. In Novoclimat calculations, effective RSI-value, which includes the thermal bridges of the structural elements, is calculated as a ratio of the total RSI-value that considers only the insulated section. For 2x6 wood studs, a ratio of 0.86 is recommended for 400 mm stud spacing, and a ratio of 0.94 for 600 mm stud spacing. This ratio considers that respectively 16% and 6% of the wall area is filled with wood instead of insulation material for 400 mm and 600 mm spacing. ASHRAE (2005) gives also an example of such calculation considering 25% of the area occupied by the wood structural elements (p.25.2). Appendix C of the MNECH (1997) recommends respectively 19% and 11% of the area occupied by wood for stud spacing under and over 500 mm.

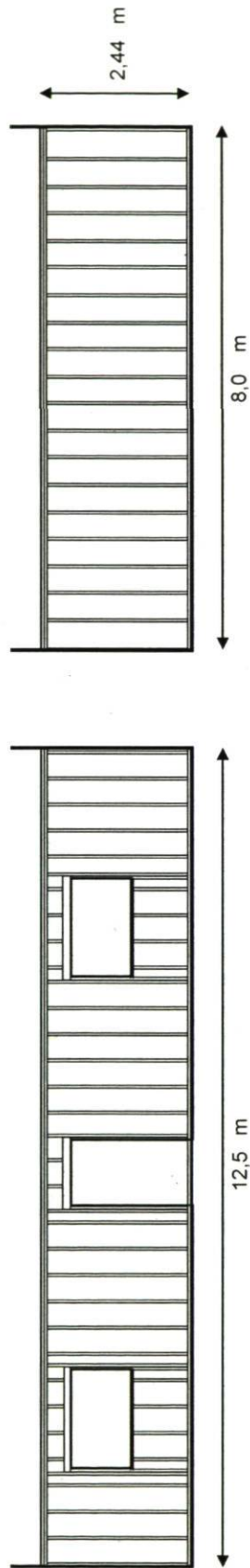
In this analysis, according to my own approximation for a typical 2 storeys-200 m^2 house, respectively 18% and 15% of the area is occupied by wood for 400 mm and 600 mm stud spacing. In this calculations, each storey is composed of 2 walls ($12.5\text{m} \times 2.44\text{m}$), with 2 windows ($1.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$) and 1 door ($1.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$), and 2 walls ($8\text{m} \times 2.44\text{m}$) without opening. Structural wood elements includes wood studs 1 bottom plate 2 top plates 1 set of blocking, double studs on each side and lintel on top of openings.

The effective thermal resistance of a wood frame wall can be calculated by assuming either parallel heat flow paths through areas with different thermal resistances or by assuming isothermal planes. This analysis uses the parallel heat flow path method, assuming that no heat transfer occurs laterally between the parallel paths. The thermal transmittance factor (U-value) of each path, being the inverse of RSI-value, can be added according to its surface fractions (ASHRAE 2005) p23.4. The effective thermal resistance (RSI-value) of the assembly is then the inverse of the global thermal transmittance (U-value). This method would not be appropriate for a steel stud since lateral heat flows are more important.

Résumé des valeurs de résistance thermique selon différentes sources

thickness (mm)	Documentation Novoclimat RSI/mm K.m ² /W	WUFI database k W/mK	RSI=t/k K.m ² /W	Kumaran RP 1061 k W/mK	RSI=t/k K.m ² /W	ASHRAE Fundamentals 1/k mK/W	Code modele national de l'énergie k W/mK	RSI=t/k K.m ² /W	R K.m ² /W	Manufacturier RSI K.m ² /W source	Valeur retenue
external vertical air layer	-	-	0,03	-	-	0,03	0,03	-	-	-	0,03
vinyl siding	-	-	-	-	-	0,11	0,11	-	-	-	0,11
brick siding	100	0,40"	0,05	0,4100	0,24	1,2	1,400	0,07	-	-	0,12
cedar siding	20	0,091	0,15	0,0900	0,22	0,18	0,18	0,18	-	-	0,22
wood composite siding	10,5	0,094	0,11	0,0950	0,11	0,12	0,12	0,12	-	-	0,11
vertical ventilated air layer	20	0,13	0,17	0,154	-	-	0,18	0,18	-	-	0,12
vertical ventilated air layer	25	0,155	0,17	0,161	-	-	0,18	0,18	-	-	0,12
building paper 60min	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
spun-bonded polyolefin membrane	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OSB	11,1	0,0087	0,097	0,1020	0,11	11,0	0,091	0,12	0,11	OSB Guide	0,11
plywood	12,5	0,0087	0,109	0,0850	0,15	0,11	0,110	0,11	0,11	OSB Guide	0,15
asphalt coated fibre board	25,4	0,016	0,406	0,0520	0,49	0,41	0,061	0,41	0,53	EMCO	0,49
extruded polystyrene	25	0,035	0,875	1,000	0,90	34,7	0,290	0,88	5	Owens Corning	0,90
extruded polystyrene	140	0,035	4,900	5,600	5,02	34,7	0,290	4,90	28	Owens Corning	5,02
fiber glass batt	140	0,024	3,360	4,000	3,26	3,36	0,042	3,36	19	Owens Corning	3,36
cellulose projetée	140	0,024	3,360	3,889	4,13	24,0	0,041	3,41	19	Owens Corning	3,36
wood stud	140	1,220	1,220	0,0900	1,56	8,5	0,120	1,17	-	-	1,56
polyethylene	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
kraft paper	1	-	-	0,42	0,002	-	-	-	-	-	-
vertical air layer	20	0,170	0,170	0,13	0,154	0,18	0,18	0,18	-	-	0,18
vertical air layer -1 reflective surface	20	0,410	0,410	-	-	0,41	0,41	0,41	-	-	0,41
gypsum board	10	0,080	0,080	0,1600	0,06	0,08	0,160	0,06	-	-	0,06
fermacell	10	0,120	0,120	0,32	0,031	0,04	0,041	0,04	-	-	0,04
internal vertical air layer	-	-	-	0,125	0,13	0,12	0,12	0,12	-	-	0,12
Enermax (fibreboard with Al film)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	EMCO	-
" varies with moisture content											

Calcul du pourcentage de la surface opaque occupé par l'ossature (espacement 400)



1 lisse basse = 1 x 0,038 x 12,5 = 0,48 m²
 2 lisses hautes = 2 x 0,038 x 12,5 = 0,95 m²
 lisses sous fenêtre = 2 x 0,038 x 1,5 = 0,11 m²
 linteaux sur porte et fenêtre = 3 x 0,140 x 1,5 = 0,63 m²
 montants complets = 34 x 0,038 x 2,3 = 2,97 m²
 montants coupés = 8 x 0,038 x 1,3 = 0,40 m²

 5,5 m²

fenêtres = 2 x 1,0 x 1,5 = 3,0 m²
 portes = 1 x 2,0 x 1,0 = 2,0 m²

 5,0 m²

isolation = (12,5 x 2,44) - 5,5 - 5,0 = 20,0 m²

surface opaque = 5,5 + 20,0 = 25,5

pourcentage de bois = $\frac{5,5 + 2,7}{25,5 + 19,5} = 18\%$

pourcentage d'isolation = $\frac{20,0 + 16,8}{25,5 + 19,5} = 82\%$

= 1 x 0,038 x 8,0 = 0,30 m²
 = 2 x 0,038 x 8,0 = 0,61 m²

 = 21 x 0,038 x 2,3 = 1,84 m²

 2,7 m²

= 8,0 x 2,44 - 2,7 = 16,77 m²

= 2,7 + 16,8 = 19,5

Calcul du pourcentage de la surface opaque occupé par l'ossature (espacement 600)



1 lisse basse = 1 x 0,038 x 12,5 = 0,48 m²
 2 lisses hautes = 2 x 0,038 x 12,5 = 0,95 m²
 lisses sous fenêtre = 2 x 0,038 x 1,5 = 0,11 m²
 linteaux sur porte et fenêtre = 3 x 0,140 x 1,5 = 0,63 m²
 montants complets = 24 x 0,038 x 2,3 = 2,10 m²
 montants coupés = 4 x 0,038 x 1,3 = 0,20 m²
 4,5 m²

fenêtres = 2 x 1,0 x 1,5 = 3,0 m²
 portes = 1 x 2,0 x 1,0 = 2,0 m²
 5,0 m²

isolation = 12,5 x 2,44 - 4,5 - 5,0 = 21,0 m²

surface opaque = 4,5 + 21,0 = 25,5

pourcentage de bois = $\frac{4,5 + 2,2}{25,5 + 19,5} = 15\%$

pourcentage d'isolation = $\frac{21,0 + 17,3}{25,5 + 19,5} = 85\%$

= 1 x 0,038 x 8,0 = 0,30 m²
 = 2 x 0,038 x 8,0 = 0,61 m²
 = 15 x 0,038 x 2,3 = 1,31 m²
 2,2 m²

= 8,0 x 2,44 - 2,2 = 17,3 m²

= 2,2 + 17,3 = 19,5

Calculs des résistances thermiques totales et effectives

	with insulation		with	Effective	
	thickness (mm)	RSI K.m ² /W	wood element RSI K.m ² /W	U W/K.m ²	RSI K.m ² /W
Assembly 1					
film d'air extérieur	-	0,030	0,030		
vinyl siding	-	0,110			
air layer	20	0,120	0,120		
building paper	1	-	-		
OSB	11,1	0,109	0,109		
fiber glass batt (or wood stud)	140	3,360	1,556		
polyethylene	0,3	-	-		
air layer	20	0,180	0,180		
gypsum board	10	0,060	0,060		
film d'air intérieur		0,120	0,120		
total RSI		4,089	2,174		
total U		0,245	0,460		
proportion in standard wall	400	82%	18%	0,283	3,536
Assembly 2					
film d'air extérieur	-	0,030	0,030		
brick siding	100	0,120	0,120		
air layer	25	0,120	0,120		
spun-bonded polyolefin membrar	0,2	-	-		
Plywood	12,5	0,147	0,147		
Extr. polystyrene (or wood stud)	140	5,018	1,556		
polyethylene	0,3	-	-		
air layer	20	0,180	0,180		
gypsum board	10	0,060	0,060		
film d'air intérieur		0,120	0,120		
total RSI		5,795	2,333		
total U		0,173	0,429		
proportion in standard wall	400	82%	18%	0,218	4,585
Assembly 3					
film d'air extérieur	-	0,030	0,030		
brick siding	100	0,120	0,120		
air layer	25	0,120	0,120		
spun-bonded polyolefin membrar	0,2	-	-		
Extruded polystyrene	25	0,896	0,896		
fiber glass batt (or wood stud)	140	3,360	1,556		
polyethylene	0,3	-	-		
air layer	20	0,180	0,180		
gypsum board	10	0,060	0,060		
film d'air intérieur		0,120	0,120		
total RSI		4,886	3,082		
total U		0,205	0,325		
proportion in standard wall	400	82%	18%	0,226	4,426
Assembly 4					
film d'air extérieur	-	0,030	0,030		
Cedar siding	20	0,222	0,222		
air layer	19	0,120	0,120		
building paper	1	-	-		
asphalt coated fibre board	25,4	0,488	0,488		
cellulose (or wood stud)	140	3,360	1,556		
kraft paper	1	-	-		
air layer	20	0,180	0,180		
gypsum fibre board	10	0,060	0,060		
film d'air intérieur		0,120	0,120		
total RSI		4,581	2,776		
total U		0,218	0,360		
proportion in standard wall	400	82%	18%	0,244	4,106
Assembly 5					
film d'air extérieur	-	0,030	0,030		
Wood composite siding	10,5	0,110	0,110		
air layer	19	0,120	0,120		
spun-bonded polyolefin membrar	0,2	-	-		
Extruded polystyrene	25,4	0,896	0,896		
OSB	11,1	0,109	0,109		
cellulose (or wood stud)	140	3,360	1,556		
fibreboard BP	12,7	0,244	0,244		
air layer with 1 reflective face	20	0,410	0,410		
gypsum board	10	0,060	0,060		
film d'air intérieur		0,120	0,120		
total RSI		5,429	3,625		
total U		0,184	0,276		
proportion in standard wall	600	85%	15%	0,198	5,056

Heat transfer calculation

Heat loss through a surface, such an exterior wall, is calculated as:

$$E [\text{kW.h}] = U [\text{W/m}^2 \cdot \text{°K}] * A [\text{m}^2] * \text{DDSI} [\text{°K.day}] * 24 [\text{h/day}] * 0.001 [\text{kW/W}]$$

E - Energy loss through the wall [kW.h]

U - Global thermal transmittance factor of the wall [W/m².°K]

A - Area of the wall [m²]

DDSI - degree-day data for temperature below 18°C

Climate data

For the QUEBEC/JEAN LESAGE INTL Airport location, the yearly DDSI is 5200 (EC 2007). This value, also recommended by the Appendix C of the CNBC (CNRC 2005), is used in the calculations.

HOT 2XP

HOT 2XP (CANMET 2005) is used to calculate the energy consumption for the case example considering a 100 m² - 2-storey-house located in Quebec City. The RSI calculated previously for each assembly is entered as the exterior walls thermal resistances. The thermal resistances of all other house components are set to Novoclimat standard (AEE 2003), with a global air-tightness of the building of 1.5 ACH. The simulation uses the climate data file provided by the software package and does not include electricity use and hot water production.

The analysis report makes it possible to identify the amount of energy loss specifically related to the walls. It considers a wall area of 193.14 m² with the specified RSI and 9.10 m² with reduced RSI of 1.97 m².K/W for the floor height. The energy loss through all exterior walls is available in Joule. Energy loss calculations using the DDSI for the same wall area is compared with the HOT 2XP results. The comparison shows that a DDSI of 5300 degree-day must be used to obtain the same results between the 2 analyses. The use of the measured DDSI of 5200 degree-day below 18°C leads to a 2% difference between the two analyses. The results differences are constant for the 5 assemblies, showing that the hand calculation using DDSI is consistent with HOT 2XP results and can be used for further analyses, with changing RSI values.

Comparaison du calcul DDSI avec les résultats de HOT 2XP

les valeurs RSI ont changé par la suite... ce fichier compare seulement le calcul DDSI au résultats obtenus avec HOT 2XP.

Par la suite, seulement le calcul DDSI sera utilisé.

	with insulation			with	Ensemble		DDSI - degre-jour < 18°C °K	Area m²	time hour/day	Heating energy per year kWh	HOT 2XP murs
	thickness (mm)	RSI K.m²/W	U	wood stud RSI K.m²/W	RSI K.m²/W	U W/K.m²					
Assembly 1											
film d'air extérieur	-	0,030		0,030							
vinyl siding	-	0,110		0,110							
air layer	20	0,060		0,060							
building paper	1	-		-							
OSB	11,1	0,109		0,109							
fiber glass batt (or wood stud)	140	3,360		1,556							
polyethylene	0,3	-		-							
air layer	20	0,210		0,210							
gypsum board	10	0,079		0,079							
film d'air intérieur		0,120		0,120							25 611 MJ
total		4,078	0,245	2,273	3,753	0,266	5200,0	193,14	24	6423	7114
hauteur de plancher					1,970	0,508	5200,0	9,10	24	576	
proportion in standard wall	400	82%		18%						6999	1,6%
Assembly 2											
film d'air extérieur	-	0,030		0,030							
brick siding	100	0,120		0,120							
air layer	25	0,060		0,060							
spun-bonded polyolefin membrai	0,2	-		-							
Plywood	12,5	0,147		0,147							
Extr. polystyrene (or wood stud)	140	5,018		1,556							
polyethylene	0,3	-		-							
air layer	20	0,210		0,210							
gypsum board	10	0,079		0,079							
film d'air intérieur		0,120		0,120							19 249 MJ
total		5,784	0,173	2,322	5,161	0,194	5200,0	193,14	24	4671	5347
hauteur de plancher					1,970	0,508	5200,0	9,10	24	576	
proportion in standard wall	400	82%		18%						5247	1,9%
Assembly 3											
film d'air extérieur	-	0,030		0,030							
brick siding	100	0,120		0,120							
air layer	25	0,060		0,060							
spun-bonded polyolefin membrai	0,2	-		-							
Extruded polystyrene	25	0,896		0,896							
fiber glass batt (or wood stud)	140	3,360		1,556							
polyethylene	0,3	-		-							
air layer	20	0,210		0,210							
gypsum board	10	0,079		0,079							
film d'air intérieur		0,120		0,120							21 526 MJ
total		4,875	0,205	3,071	4,550	0,220	5200,0	193,14	24	5297	5979
hauteur de plancher					1,970	0,508	5200,0	9,10	24	576	
proportion in standard wall	400	82%		18%						5874	1,8%
Assembly 4											
film d'air extérieur	-	0,030		0,030							
Cedar siding	20	0,222		0,222							
air layer	19	0,060		0,060							
building paper	1	-		-							
asphalt coated fibre board	25,4	0,488		0,488							
cellulose (or wood stud)	140	3,360		1,556							
kraft paper	1	-		-							
air layer	20	0,210		0,210							
gypsum fibre board	10	0,079		0,079							
film d'air intérieur		0,120		0,120							22 908 MJ
total		4,570	0,219	2,765	4,245	0,236	5200,0	193,14	24	5678	6363
hauteur de plancher					1,970	0,508	5200,0	9,10	24	576	
proportion in standard wall	400	82%		18%						6255	1,7%
Assembly 5											
film d'air extérieur	-	0,030		0,030							
Wood composite siding	10,5	0,110		0,110							
air layer	19	0,060		0,060							
spun-bonded polyolefin membrai	0,2	-		-							
Extruded polystyrene	25,4	0,896		0,896							
OSB	11,1	0,109		0,109							
cellulose (or wood stud)	140	3,360		1,556							
fibreboard BP	12,7	0,244		0,244							
air layer with 1 reflective face	20	0,410		0,410							
gypsum board	10	0,079		0,079							
film d'air intérieur		0,120		0,120							19 770 MJ
total		5,278	0,189	3,474	5,007	0,200	5200,0	193,14	24	4814	5492
hauteur de plancher					1,970	0,508	5200,0	9,10	24	576	
proportion in standard wall	600	85%		15%						5390	1,8%

Energy cost

Once the energy loss related to the walls is quantified, the cost of replacing this energy loss has to be assessed. The efficiency of the heating system, the energy source (electricity, fuel oil, natural gas, propane, etc) and its actual cost in a given area influence the cost to replace a specified energy loss.

Appendix F of the MNECH (1997) indicates cost per Gigajoule of energy for the different energy source and province in Canada. This information is however 10 years old.

For the case example, it is chosen to consider an electric heating system, with 100% efficiency as suggested by HOT2XP for electric systems. The energy consumption related to the walls equals thus the energy loss calculated for each assembly.

Moreover, the present value of energy cost considering a given time period is calculated. According the Appendix F of the MNECH (1997), the present value of energy cost during n years can be predicted as:

$$TC = A \cdot \frac{1 - (1 + a)^{-n}}{a} \quad \text{with} \quad a = \frac{i - e}{1 + e}$$

TC = the present value of heating cost during n years [\$/can]

C = the annual heating cost for the first year [\$/can]

a = the effective interest rate

e = the projected energy cost increase (including inflation)

i = the interest rate, or discount rate (including inflation)

n = the number of years considered.

For the case example, the residential electricity rate in Quebec of 0.08\$/CAN/kWh is used as energy cost, with an electricity cost increase 2% per year, as suggested by Stephane Gendron, Marketing coordinator at Hydro-Quebec². Moreover, the case example considers a 20 year period, as used in previous research (Meil *et al.* 2006), with an interest rate of 6%.

² Communication personnelle 28/06/2007 avec Stephane Gendron, Responsable de marché - Commercial, Hydro-Québec Distribution Marketing, *Commercialisation et Partenariats d'affaires*, Hydro-Québec, Montréal, Canada.

Calcul des coûts de chauffage

Effective		DDSI -	Area	time	Energy loss	Annual	efficiency	Annual	First year	Total
RSI	U	< 18°C	m ²	hour/day	per year	energy	of heating	consump-	cost (A)	cost (TC)
K.m ² /W	W/K.m ²	°K			kWh	loss	system	tion		
Assembly 1										
wall	3,536	0,283	200,00	24	7060					
floor height	1,970	0,508	200,00	24	0					
total					7060	7 060	100%	7 060	565 \$	7 729 \$
Assembly 2										
wall	4,585	0,218	200,00	24	5443					
floor height	1,970	0,508	200,00	24	0					
total				difference	5443	5 443	100%	5 443	435 \$	5 959 \$
				difference	-1616					-1 769 \$
Assembly 3										
wall	4,426	0,226	200,00	24	5640					
floor height	1,970	0,508	200,00	24	0					
total				difference	5640	5 640	100%	5 640	451 \$	6 175 \$
				difference	-1420					-1 554 \$
Assembly 4										
wall	4,106	0,244	200,00	24	6078					
floor height	1,970	0,508	200,00	24	0					
total				difference	6078	6 078	100%	6 078	486 \$	6 655 \$
				difference	-981					-1 074 \$
Assembly 5										
wall	5,056	0,198	200,00	24	4937					
floor height	1,970	0,508	200,00	24	0					
total				difference	4937	4 937	100%	4 937	395 \$	5 405 \$
				difference	-2123					-2 324 \$

$$TC = A \cdot \frac{1 - (1 + a)^{-n}}{a}$$

0,08\$/kWh
 $a = \frac{i - e}{1 + e}$
 i = 6%
 e = 2%
 a = 3,9%
 20 ans

Annexe 6
Calculs des indicateurs de
dommage environnementaux (LCIA)

Exemple de résultats d'ATHENA 3.0.3 pour le mur 1

(résultats utilisés pour la 1^{ière} étude, section 3.6.6)

Athena Hard Copy Table Report

assembly 1 - oct 07

Project Number

Project City Quebec City

Floor Area 200.000000

Project Description

assembly 1 - oct 07 - Summary Measures by Life Cycle Stages (Total Op.En.) - TABLE

	Primary Energy Consumption MJ	Solid Waste kg	Air Pollution Index	Water Pollution Index	Global Warming Potential kg	Weighted Resource Use kg
Manufacturing						
Material:	105934	1089	1283	0	4022	20221
Transportation:	1517	0	0	0	3	38
Total:	107451	1089	1283	0	4025	20259
Construction						
Material:	61	479	8	0	37	12
Transportation:	4161	0	1	0	7	94
Total:	4222	479	9	0	44	106
Operations & Maintenance						
Material:	9916	8	54	0	149	502
Transportation:	168	0	0	0	0	4
Total:	10084	8	54	0	149	506
End-Of-Life						
Material:	3	0	0	0	0	0
Transportation:	438	0	0	0	1	10
Total:	441	0	0	0	1	10
Embodied impact						
Material:	115914	1576	1345	0	4208	20735
Transportation:	6284	0	1	0	11	146
Total:	122198	1576	1346	0	4219	20881
Operating Energy (Electricity - 20 yrs)						
Total Op. Energy:	51431	108	352	0	1275	10008
Total Life Cycle						
Total Life Cycle:	173629	1684	1698	0	5494	30889

Exemple de calcul des indicateurs selon les modèles LCIA pour le mur 1
(résultats de la 2^{ème} étude plus approfondie, chapitre 4)

1. Données LCI fournies par ATHENA 4.0.51

Resource Use Absolute Value Table By Life Cycle Stages

Project assembly1_feb09

	Manufacturing			Construction			Maintenance			End - Of - Life			Operating Energy			Total		
	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Annual	Total	Material	Transportation	Total	
Limestone Kg	627,3317	0	627,3317	0	0	0	59,61383	0	59,61383	0	0	0	0	0	686,9456	0	686,9456	
Clay & Shale Kg	189,6709	0	189,6709	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	189,6709	0	189,6709	
Iron Ore Kg	46,16843	0	46,16843	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46,16843	0	46,16843	
Sand Kg	875,8726	0	875,8726	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	875,8726	0	875,8726	
Ash Kg	0,295739	0	0,295739	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,295739	0	0,295739	
Other Kg	2585,033	0	2585,033	0	0	0	1024,573	0	1024,573	0	0	0	0	0	3609,606	0	3609,606	
Gypsum Kg	3305,347	0	3305,347	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3305,347	0	3305,347	
Water L	101445,8	0	101445,8	0	0	0	43502,34	0	43502,34	0	0	0	0	0	144948,1	0	144948,1	
Obsolete Scrap Steel Kg	32,21988	0	32,21988	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32,21988	0	32,21988	
Coal Kg	416,8822	0	416,8822	0,005923	0	0,005923	139,9465	0	139,9465	0	0	0	-0,3411	20,466	556,8346	0	577,301	
Wood Fiber Kg	6865,085	0	6865,085	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6865,085	0	6865,085	
Phenol Form. Resins Kg	32,38099	0	32,38099	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32,38099	0	32,38099	
Uranium Kg	92,27188	0	92,27188	0,365718	0	0,365718	25,8348	0	25,8348	0	0	0	21,06145	1263,69	118,4724	0	1382,16	
Natural Gas m3	2747,223	0	2747,223	0,052617	0	0,052617	661,9494	0	661,9494	0	0	0	3,030195	181,812	3409,225	0	3591,04	
Crude Oil L	1577,249	0	1577,249	0,214837	0	0,214837	675,9556	0	675,9556	0	0	0	12,3723	742,338	2253,419	0	2995,76	
Metallurgical Coal Kg	14,90476	0	14,90476	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,90476	0	14,90476	
Prompt Scrap Steel Kg	18,63699	0	18,63699	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,63699	0	18,63699	

Energy Consumption Absolute Value Table By Life Cycle Stages

Project assembly1_feb09

	Manufacturing			Construction			Maintenance			End - Of - Life			Operating Energy			Total		
	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Annual	Total	Material	Transportation	Total	
Electricity kWh	4184,516	0	4184,516	122,5922	0	122,5922	682,4774	0	682,4774	0	0	0	7060	423600	4989,586	0	428590	
Hydro MJ	12158,34	0,03065	12158,4	456,0654	0,086079	456,151	1507,304	0,014705	1507,32	0,009474	0,01095	0,01095	26264,49	1575869	14121,71	0,140908	1589591	
Coal MJ	8083,449	0,447261	8083,9	0,120359	1,256088	1,376445	2801,416	0,214587	2801,63	0,021577	0,138242	0,15982	6,931381	415,883	10885,01	2,056179	11302,9	
Diesel MJ	5807,181	2688,953	8496,13	8,030571	7617,928	7625,96	400,7393	1291,037	1691,78	3,262008	829,0721	832,334	462,475	27748,5	6219,213	12426,99	46394,7	
Feedstock MJ	64895,98	0	64896	0	0	0	32390,54	0	32390,5	0	0	0	0	0	97286,52	0	97286,5	
Gasoline MJ	339,6345	0	339,6345	0	0	0	14,4191	0	14,4191	0	0	0	0	0	354,0536	0	354,0536	
Heavy Fuel Oil MJ	14942,1	1,477419	14943,6	0,175545	4,149183	4,32473	4831,191	0,708837	4831,9	0,071005	0,456649	0,52765	10,1095	606,57	19773,54	6,792087	20386,9	
LPG MJ	79,64053	0,066908	79,7074	0,00847	0,187904	0,19637	26,97565	0,032101	27,0077	0,003216	0,02068	0,0239	0,487763	29,2658	106,6279	0,307593	136,201	
Natural Gas MJ	83434,39	2,731692	83437,1	1,983957	7,671686	9,65564	15274,08	1,310613	15275,4	0,13132	0,844326	0,97565	114,2547	6855,28	98710,58	12,55832	105578	
Nuclear MJ	5389,344	0,118111	5389,46	21,36057	0,331199	21,6918	1508,939	0,056581	1509	0,005439	0,03645	0,04189	1230,14	73808,4	6919,648	0,542341	80728,6	
Wood MJ	12373,08	0	12373,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12373,08	0	12373,1	

Emissions To Air Absolute Value Table By Life Cycle Stages

Project assembly1_feb09

	Manufacturing			Construction			Maintenance			End - Of - Life			Operating Energy			Total		
	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Annual	Total	Material	Transportation	Total	
2-Chloroacetophenone g	0,000622	0	0,000622	0	0	0	0,000252	0	0,000252	0	0	0	0	0	0,000875	0	0,000875	
Acenaphthene g	7,25E-05	0	7,25E-05	0	0	0	2,62E-05	0	2,62E-05	0	0	0	0	0	9,87E-05	0	9,87E-05	
Acenaphthylene g	3,55E-05	0	3,55E-05	0	0	0	1,29E-05	0	1,29E-05	0	0	0	0	0	4,84E-05	0	4,84E-05	
Acetaldehyde g	1,567254	0	1,567254	0	0	0,061953	0,001074	0	0,061953	0,001074	0	0,001074	0	0	1,630281	0	1,630281	
Acetophenone g	0,001333	0	0,001333	0	0	0,000541	0	0,000541	0	0	0	0	0	0,001874	0	0,001874		
Acrolein g	21,48341	0	21,48341	0	0	0,014836	0,000129	0	0,014836	0,000129	0	0,000129	0	0	21,49838	0	21,49838	
Aldehydes g	0,004687	0	0,004687	1,98E-05	0	1,98E-05	0,001319	0	0,001319	0	0	0	0,001139	0,068368	0,006025	0	0,074339	
Ammonia g	9,592758	0,031895	9,624653	0,005322	0,089573	0,094896	2,44468	0,015302	2,459982	0,001533	0,009858	0,011391	0,306507	18,39043	12,04429	0,146629	30,5813	
Ammonium chloride g	1,275347	0	1,275347	0,005384	0	0,005384	0,358961	0	0,358961	0	0	0	0,310082	18,60489	1,639692	0	20,2446	
Anthracene g	2,99E-05	0	2,99E-05	0	0	0	1,08E-05	0	1,08E-05	0	0	0	0	0	4,07E-05	0	4,07E-05	
Antimony g	0,044571	0	0,044571	0	0	0,000926	0	0,000926	0	0,000926	0	0	0	0	0,045496	0	0,0455	
Arsenic g	0,229255	0	0,229255	3,29E-05	0	3,29E-05	0,036934	0	0,036934	0	0,036934	0	0,001892	0,113537	0,266221	0	0,37976	
Benzene g	32,7987	0	32,7987	6,6E-06	0	6,6E-06	3,521974	0	3,521974	0,001306	0	0,001306	0,00038	0,022797	36,32198	0	36,3448	
Benzene, chloro- g	0,001955	0	0,001955	0	0	0,000793	0	0,000793	0	0,000793	0	0	0	0,002749	0	0,002749		
Benzene, ethyl- g	0,008355	0	0,008355	0	0	0,003389	0	0,003389	0	0,003389	0	0	0	0,011744	0	0,01174		
Benzofuran g	1,14E-05	0	1,14E-05	0	0	4,11E-06	0	4,11E-06	0	4,11E-06	0	0	0	1,55E-05	0	1,55E-05		
Benzofuran, pyrene g	5,4E-06	0	5,4E-06	0	0	1,95E-06	0	1,95E-06	0	1,95E-06	0	0	0	7,36E-06	0	7,36E-06		
Benzofuran, perylene g	1,56E-05	0	1,56E-05	0	0	5,66E-06	0	5,66E-06	0	5,66E-06	0	0	0	2,13E-05	0	2,13E-05		
Benzofuran, perylene g	3,84E-06	0	3,84E-06	0	0	1,39E-06	0	1,39E-06	0	1,39E-06	0	0	0	5,23E-06	0	5,23E-06		
Benzyl chloride g	0,062219	0	0,062219	0	0	0,025234	0	0,025234	0	0,025234	0	0	0	0,087453	0	0,08745		
Beryllium g	0,010033	6,97E-07	0,010033	6,97E-07	0	0,001369	0	0,001369	0	0,001369	0	0	4,01E-05	0,002408	0,011403	0	0,01381	
Biphenyl g	0,000242	0	0,000242	0	0	8,74E-05	0	8,74E-05	0	8,74E-05	0	0	0	0,000329	0	0,000329		
Bromoform g	0,003467	0	0,003467	0	0	0,001406	0	0,001406	0	0,001406	0	0	0	0,004872	0	0,00487		
Butadiene g	0,077316	0	0,077316	0	0	0,002111	0	0,002111	0	0,002111	5,47E-05	0	0,000607	0,03644	0,079481	0	0,07948	
Cadmium g	0,084066	0	0,084066	1,05E-05	0	1,05E-05	0,015761	0	0,015761	0	0	0	0	0,099838	0	0,099838		
Carbon dioxide, biogenic kg	1036,999	0	1036,999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1036,999	0	1036,999		
Carbon dioxide, fossil kg	9125,602	5,139409	9130,742	23,99496	14,44049	38,43545	2627,261	2,466974	2629,728	0,227493	1,589288	1,816781	39,42641	2365,584	11777,09	23,63616	14166,3	
Carbon disulfide g	0,011555	0	0,011555	0	0	0,004686	0	0,004686	0	0,004686	0	0	0	0,016241	0	0,01624		
Carbon monoxide g	11847,93	0	11847,93	21,82127	1398,487	21,82127	1398,487	0	1398,487	0	0	0	0	13268,24	0	13268,2		
Carbon monoxide, fossil g	10952,46	28,40377	10980,86	2,575694	79,69544	82,27114	2300,033	13,61387	2313,647	2,152463	8,769953	10,92242	148,3324	8899,945	13257,22	130,483	22287,6	
Chlorine g	4,201176	0	4,201176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,201176	0	4,20118		
Chloroform g	0,005244	0	0,005244	0	0	0,002127	0	0,002127	0	0,002127	0	0	0	0,007371	0	0,00737		
Chromium g	0,223208	2,18E-05	0,223208	2,18E-05	0	0,030761	0	0,030761	0	0,030761	0	0	0,001256	0,07538	0,25399	0	0,32937	
Chromium VI g	0,011231	0	0,011231	0	0	0,004062	0	0,004062	0	0,004062	0	0	0	0,015293	0	0,01529		
Chrysene g	1,42E-05	0	1,42E-05	0	0	5,14E-06	0	5,14E-06	0	5,14E-06	0	0	0	1,94E-05	0	1,94E-05		
Chrysene, 5-methyl- g	3,13E-06	0	3,13E-06	0	0	1,13E-06	0	1,13E-06	0	1,13E-06	0	0	0	4,26E-06	0	4,26E-06		
Cobalt g	0,306499	0	0,306499	0,000149	0	0,088069	0	0,088069	0	0,088069	0	0	0,008601	0,516039	0,394718	0	0,91076	
Copper g	0,000257	0	0,000257	0	0	7,49E-05	0	7,49E-05	0	7,49E-05	0	0	0	0,000332	0	0,00033		
Cumene g	0,000471	0	0,000471	0	0	0,000191	0	0,000191	0	0,000191	0	0	0	0,000662	0	0,00066		
Cyanide g	0,222212	0	0,222212	0	0	0,09012	0	0,09012	0	0,09012	0	0	0	0,312332	0	0,31233		
Dinitrogen monoxide g	71,89085	0,127579	72,01843	0,004336	0,360344	0,364681	28,59561	0,061557	28,65716	0	0,039659	0,039659	0,249727	14,98362	100,4908	0,589139	116,064	
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCF	0,00182	1,48E-07	0,00182	1,74E-08	4,16E-07	4,33E-07	0,000732	7,1E-08	0,000732	7,08E-09	4,58E-08	5,28E-08	1E-06	6,01E-05	0,002552	6,81E-07	0,00261	
Ethane, 1,2-dibromo- g	0,000107	0	0,000107	0	0	4,33E-05	0	4,33E-05	0	4,33E-05	0	0	0	0,00015	0	0,00015		

Ethane, 1,2-dichloro- g	0.003555	0	0.003555	0	0.001442	0	0.001442	0	0	0	0	0.004497	0	0.004997	0	0.00525
Ethane, chloro- g	0.003733	0	0.003733	0	0.001514	0	0.001514	0	0	0	0	0.005247	0	0.005247	0	0.00525
Ethane, tetrachloro- g	0.009109	1.89E-06	1.89E-06	0.003178	0	0.003178	0	0.003178	0	0.000109	0.006537	0.0001289	0	0.001289	0	0.01883
Fluoranthene g	0.000101	0	0.000101	0	3.65E-05	0	3.65E-05	0	0	0	0	0.000137	0	0.000137	0	0.00014
Fluorene g	0.000129	0	0.000129	0	4.68E-05	0	4.68E-05	0	0	0	0	0.000176	0	0.000176	0	0.00018
Fluoride g	3.992388	0.000121	0.000121	1.615589	0	1.615589	0	1.615589	0	0.006966	0.417966	5.608098	0	5.608098	0	6.02606
Formaldehyde g	30.10949	0.000864	0.000864	1.192591	0	1.192591	0.001652	0	0.001652	0.049783	2.986988	31.3046	0	31.3046	0	34.2916
Furan g	2.66E-07	0	0.005955	0	7.69E-08	0	7.69E-08	0	0	0	0	3.4E-07	0	3.4E-07	0	3.4E-07
Hexane g	0.005955	0	0.005955	0	0.002415	0	0.002415	0	0	0	0	0.008371	0	0.008371	0	0.00837
Hydrazine, methyl g	0.01511	0	0.01511	0	0.006128	0	0.006128	0	0	0	0	0.021239	0	0.021239	0	0.02124
Hydrocarbons, unspecified g	3579.926	0.031077	0.031077	736.4676	0	736.4676	0	736.4676	0	1.789675	107.3805	4316.424	0	4316.424	0	4423.8
Hydrogen chloride g	262.3626	0.017345	0.017345	50.18572	0	50.18572	0	50.18572	0	0.998876	59.93257	312.5656	0	312.5656	0	372.498
Hydrogen fluoride g	70.87911	0	0.080237	0	6.080237	0	6.080237	0	0	0	0	76.95935	0	76.95935	0	76.95935
Indeno(1,2,3-cd)pyrene g	8.67E-06	0	3.14E-06	0	3.14E-06	0	3.14E-06	0	0	0	0	1.18E-05	0	1.18E-05	0	1.2E-05
Isophorone g	0.051553	0	0.051553	0	0.020908	0	0.020908	0	0	0	0	0.072461	0	0.072461	0	0.07246
Kerosene g	0.610798	0.002579	0.002579	0.171916	0	0.171916	0	0.171916	0	0.148507	8.910392	0.785293	0	0.785293	0	9.69569
Lead g	0.675302	3.78E-05	0.158888	0	0.158888	0	0.158888	0	0	0.002174	0.130454	0.834227	0	0.834227	0	0.96468
Magnesium g	1.563821	0	0.565599	0	0.565599	0	0.565599	0	0	0	0	2.12942	0	2.12942	0	2.12942
Manganese g	8.705943	7.46E-05	7.46E-05	0.063755	0	0.063755	0	0.063755	0	0.004298	0.257866	8.769773	0	8.769773	0	9.02764
Mercaptans, unspecified g	19.28804	0	7.822416	0	7.822416	0	7.822416	0	0	0	0	27.11046	0	27.11046	0	27.11046
Mercury g	0.152427	2.96E-06	0.051506	0	0.051506	0	0.051506	0	0.000171	0.010235	0.203936	0	0.203936	0	0.21417	
Metals, unspecified g	227.4701	0	8.09E-06	0	8.09E-06	0	8.09E-06	0	0	0	0	227.4701	0	227.4701	0	227.47
Methacrylic acid, methyl ester	0.001778	0	0.000721	0	0.000721	0	0.000721	0	0	0	0	0.002499	0	0.002499	0	0.0025
Methane g	33485.6	0.347434	81.96152	0	81.96152	0	81.96152	0	0	20.0085	1200.51	41682.1	0	41682.1	0	42882.6
Methane, bromo-, Halon 100	0.014222	0	0.005768	0	0.005768	0	0.005768	0	0	0	0	0.019989	0	0.019989	0	0.01999
Methane, dichloro-, HCC-30 g	1.788788	0.000111	0.081284	0	0.081284	0	0.081284	0	0	0.006388	0.383289	1.870183	0	1.870183	0	2.23347
Methane, dichlorodifluoro-, Cl	5.29E-05	2.15E-08	5.06E-07	1.34E-05	8.65E-08	8.76E-09	5.57E-08	6.45E-08	1.24E-06	7.44E-05	6.61E-05	8.29E-07	0	8.29E-07	0	0.00014
Methane, fossil g	4513.609	5.735511	4519.345	0.723282	16.10522	16.8285	946.2478	2.751343	948.9992	1.772464	2.055335	2499.199	5460.863	26.36453	7986.43	7986.43
Methane, monochloro-, R-40	0.047109	0	0.047109	0	0.019105	0	0.019105	0	0	0	0	0.066214	0	0.066214	0	0.06621
Methane, tetrachloro-, CFC-11	0.239313	1.94E-08	0.239313	2.15E-09	5.43E-08	5.64E-08	1.34E-06	9.27E-09	1.34E-06	6.85E-09	1.24E-07	7.44E-06	0.239314	0.239314	0	0.23932
Methyl ethyl ketone g	0.034665	0	0.034665	0	0.014059	0	0.014059	0	0	0	0	0.048724	0	0.048724	0	0.04872
Naphthalene g	0.584799	2.84E-05	0.019636	0	0.019636	0	0.019636	0	0	0.001635	0.098125	0.604463	0	0.604463	0	0.70259
Nickel g	3.867821	0.002097	1.86134	0	1.86134	0	1.86134	0	0	0.120753	7.245173	5.056052	0	5.056052	0	12.3012
Nitrogen oxides g	19952.66	35.371	19988.03	79.30122	97.83811	177.1393	7469.99	16.69242	7486.683	0.029802	10.74566	107.7546	51.29424	3077.654	27501.98	160.6472
Organic acids g	0.004687	0	0.004687	1.98E-05	0.001319	0	0.001319	0	0	0.001139	0.068368	0.006025	0	0.006025	0	0.07439
Organic substances, unspecified	0.861143	0	0.861143	0	0.311457	0	0.311457	0	0	0	0	1.1726	0	1.1726	0	1.1726
Other g	1688.216	0	1688.216	0	0	0	0	0	0	0	0	1688.216	0	1688.216	0	1688.22
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons, > 2.5 um, and <	3545.3	0.608243	3545.908	0.031392	1.66707	1.698461	223.6687	0.284196	223.9529	0.138998	0.182867	3769.139	2.742375	3769.139	2.742375	3880.35
Particulates, unspecified g	42973.46	0.364523	42973.82	0.200573	1.023726	1.224299	6708.813	0.174891	6708.988	0.017519	0.112669	693.0528	49682.49	1.675808	50377.2	50377.2
Phenanthrene g	0.000384	0	0.000384	0	0.000139	0	0.000139	0	0	0	0	0.000523	0	0.000523	0	0.00052
Phenol g	499.7346	0	499.7346	0	0.000577	0	0.000577	0	0	0	0	499.7352	0	499.7352	0	499.735
Phenols, unspecified g	0.428223	0	0.428223	8.36E-05	0.050833	0	0.050833	0	0	0.005833	0.004814	0.288816	0.47914	0.47914	0	0.76796
Phthalate, diethyl- g	0.006489	0	0.006489	0	0.002632	0	0.002632	0	0	0	0	0.00912	0	0.00912	0	0.00912
Propanal g	0.033776	0	0.033776	0	0.013698	0	0.013698	0	0	0	0	0.047475	0	0.047475	0	0.04747
Propene g	5.101582	0	5.101582	0	0.139283	0.003612	0	0.139283	0.003612	0	0.003612	0	5.244476	5.244476	0	5.24448
Pyrene g	4.69E-05	0	1.7E-05	0	1.7E-05	0	1.7E-05	0	0	0	0	6.39E-05	0	6.39E-05	0	6.4E-05
Radioactive species, unspecified	3.05683	2.25E-05	0.882313	0	0.882313	0	0.882313	0	0.001298	0.077879	3.939165	0	4.01704	4.01704	0	4.01704
Radionuclides (including Radt	34.15635	0.144204	9.613693	0	9.613693	0	9.613693	0	0.304607	498.2764	43.91424	0	0.304607	498.2764	0	542.191
Selenium g	0.230044	1.7E-05	0.076522	0	0.076522	0	0.076522	0	0	0.000976	0.058577	0.306584	0	0.306584	0	0.30651
Styrene g	0.002222	0	0.002222	0	0.000901	0	0.000901	0	0	0	0	0.003123	0	0.003123	0	0.00312
Sulfur dioxide g	39966.64	1.150679	8102.122	0	8102.122	0	8102.122	0	66.26681	3976.009	48069.91	0	66.26681	3976.009	48069.91	52045.9
Sulfur oxides g	4.701025	14565.55	215.7132	13.20383	228.917	6035.39	2.25571	6037.646	0.221954	1.45318	1.675134	32.00683	1920.41	20812.17	21.61374	22754.2
Sulfuric acid, dimethyl ester g	0.004266	0	0.004266	0	0.00173	0	0.00173	0	0	0	0	0.005997	0	0.005997	0	0.006
t-Butyl methyl ether g	0.003111	0	0.003111	0	0.001262	0	0.001262	0	0	0	0	0.004373	0	0.004373	0	0.00437
TOC, Total Organic Carbon g	21.75039	0	21.75039	0	0	0	0	0	0	0	0	21.75039	0	21.75039	0	21.75039
Toluene g	0.830073	0	0.830073	0	0.030732	0.000573	0	0.030732	0.000573	0	0.000573	0	0.861377	0.861377	0	0.86138
Toluene, 2,4-dinitro- g	2.49E-05	0	1.01E-05	0	1.01E-05	0	1.01E-05	0	0	0	0	3.5E-05	0	3.5E-05	0	3.5E-05
Vinyl acetate g	0.000676	0	0.000676	0	0.000274	0	0.000274	0	0	0	0	0.000949	0	0.000949	0	0.00095
VOC, volatile organic compound	4649.702	1.709701	4651.412	2.221731	4.749859	6.97159	21.24325	0.811948	21.25137	0.113865	0.52313	105.3124	6776.363	7.794638	6889.47	6889.47
Xylene g	0.566843	0	0.566843	0	0.01672	0.000399	0	0.01672	0.000399	0	0.000399	0	0.583962	0.583962	0	0.58396
Zinc g	0.000171	0	0.000171	0	4.99E-05	0	4.99E-05	0	0	0	0	0.000221	0	0.000221	0	0.00022

Emissions To Water Absolute Value Table By Life Cycle Stages

Project assembly1_feb09

	Manufacturing			Construction			Maintenance			End - Of - Life			Operating Energy			Total		
	Material	Transport-ation	Total	Material	Transport-ation	Total	Material	Transport-ation	Total	Material	Transport-ation	Total	Annual	Total	Material	Transport-ation	Total	
2-Hexanone mg	52,40308	0,036452	52,43953	0,005121	0,102373	0,10749	10,27506	0,017489	10,2925	0,01752	0,011267	0,01302	0,294891	17,6935	62,68501	0,167581	80,546	
Acetone mg	80,25582	0,055826	80,31164	0,007842	0,156781	0,16462	15,73632	0,026784	15,7631	0,002683	0,017255	0,01994	0,451619	27,0972	96,00266	0,256645	123,356	
Acids, unspecified mg	133321,3	0	133321,3	0	0	0	111219,0	0	111220,0	0	0	0	0	0	244541,1	0	244541,1	
Aluminum mg	270644,8	500,5572	271145,3	61,41447	1405,765	1467,18	58487,9	240,1577	58728,1	24,05682	154,7149	178,772	3536,816	212209	329218,2	2301,195	543728	
Ammonia mg	109805	106,3572	109911,3	14,10054	298,6937	312,794	22155,68	51,02815	22206,7	5,11536	32,87347	37,995	812,0401	48722,4	131979,9	488,9525	181191	
Ammonium, ion mg	112211,9	0	112212,0	0	0	0	583,9534	0	583,9534	0	0	0	0	0	112795,8	0	112795,8	
Antimony mg	162,5397	0,312791	162,853	0,038343	0,878443	0,91679	36,03908	0,150071	36,1891	0,015033	0,096679	0,11171	2,208157	132,489	198,6321	1,437985	332,56	
Arsenic, ion mg	1863,947	1,543389	1865,49	0,210003	4,337262	4,54726	370,6498	0,740968	371,391	0,074223	0,477348	0,55157	12,09394	725,636	2234,881	7,099966	2967,62	
Barium mg	3807542	6853,392	3814395	844,9144	19247,07	20092	834335,5	3288,126	837624	329,3746	2118,284	2447,66	48658,03	2919482	4643051	31506,87	7594040	
Benzene mg	13463,68	9,365208	13473	1,315573	26,30126	27,6168	2639,915	4,933247	2644,41	0,450093	2,894649	3,34474	75,76295	4545,78	16105,36	43,05436	20694,2	
Benzene, 1-methyl-4-(1-	801,9995	0,557864	802,557	0,078366	1,566705	1,64507	157,2535	0,267652	157,521	0,026811	0,172428	0,19924	4,513023	270,781	959,3582	2,564649	1232,7	
Benzene, ethyl- mg	757,3637	0,526816	757,891	0,074004	1,479509	1,55351	148,5015	0,252756	148,754	0,025319	0,162831	0,18815	4,261848	255,711	905,9645	2,421912	1164,1	
Benzene, pentamethyl- µg	601,4968	0,418406	601,915	0,058775	1,175051	1,23383	117,9398	0,200743	118,141	0,020109	0,129323	0,14943	3,384815	203,089	719,5155	1,923523	924,528	
Benzene, alkylated,	142,407	0,274409	142,681	0,033634	0,77065	0,80428	31,58267	0,131656	31,7143	0,013188	0,084816	0,099	1,936986	116,219	174,0365	1,261531	291,517	
Benzoic acid mg	8141,564	5,66313	8147,23	0,795527	15,90434	16,6999	1596,371	2,717061	1599,09	0,272117	1,750391	2,02256	45,81387	2748,83	9739,003	26,03492	12513,9	
Beryllium mg	89,28138	0,086632	89,368	0,011482	0,243298	0,25478	18,01798	0,041564	18,0595	0,004164	0,026777	0,03094	0,661261	39,6756	107,315	0,398271	147,389	
Biphenyl µg	9220,428	17,76677	9238,2	2,176888	49,89622	52,0739	2044,875	8,524157	2053,4	0,853873	5,491451	6,34532	125,4115	7524,69	11266,33	81,6786	18874,7	
BOD5, Biological Oxygen	11987404	1023,585	12089753	142,646	2874,918	3017,56	328709,3	491,1445	329200	49,1984	316,4062	365,605	8214,885	492893	12316305	4706,154	13614,07	
Boron mg	25189,4	17,52178	25206,9	2,461356	49,20817	51,6695	4939,063	8,406614	4947,47	0,842098	5,415727	6,25782	141,7478	8504,87	30131,76	80,55229	38717,2	
Bromide mg	1719884	1196,026	1721080	168,0199	3358,92	3526,94	337222,9	573,8303	337797	57,4811	369,6742	427,155	9676,147	580569	2057332	5498,45	2643399	
Cadmium, ion mg	272,3003	0,227954	272,528	0,030942	0,640187	0,67113	54,19629	0,109368	54,3057	0,010956	0,070457	0,08141	1,781919	106,915	326,5385	1,047967	434,502	
Calcium, ion mg	25793053	17933,24	25812386	2519,393	50363,73	52883,1	5057250	8604,026	5065854	861,8731	5542,904	6404,78	145090,1	8705405	30853685	82443,91	4E+07	
Chloride mg	3,88E+08	20161,5	3,9E+08	28323,35	566222,6	594546	80296610	96732,19	8E+07	9689,752	62317,02	72006,8	1631122	9,8E+07	4,69E+08	926889,3	5,7E+08	
Chromium mg	3863,806	13,35578	3877,16	1,577248	37,50839	39,0856	980,2688	6,407848	986,677	0,64188	4,128078	4,76996	90,83295	5449,96	4846,294	61,4001	10357,6	
Chromium VI µg	16257,49	56,19628	16313,7	6,636484	157,8216	164,458	1424,614	26,96189	164,558	2,700797	17,36945	20,0702	382,1905	22931,4	20391,44	258,3493	43581,2	
Chromium, ion mg	3496,912	0,86574	3497,78	0,16551	2,431343	2,59685	652,9638	0,415365	653,379	0,041608	0,267587	0,30919	9,531578	571,895	4150,083	3,9800036	4725,96	
Cobalt mg	177,8081	0,123681	177,932	0,01374	0,347346	0,36472	34,86404	0,05934	34,9234	0,005944	0,038228	0,04417	1,000556	60,0336	212,6955	0,568595	273,298	
COD, Chemical Oxygen	4001463	1955,303	4003418	266,8525	5491,274	5758,13	933404	938,1169	934342	93,97202	604,3557	698,328	15367,85	922071	4935228	8989,05	5866288	
Copper, ion mg	1384,65	1,606595	1386,26	0,207366	4,511962	4,71933	287,0822	0,770813	287,853	0,077213	0,496575	0,57379	11,94208	716,525	1672,016	7,385946	2395,93	
Cyanide mg	18179,86	0,000403	18179,9	5,66E-05	0,001132	0,00119	0,113573	0,000193	0,11377	1,94E-05	0,000125	0,00014	0,003259	0,19557	18179,98	0,001852	18180,2	
Decane mg	233,9437	0,162733	234,106	0,02286	0,457018	0,47988	45,9491	0,078076	45,9491	0,007821	0,050298	0,05812	1,316473	78,9884	279,8454	0,748125	359,582	
Detergents, oil mg	7734,436	6,648917	7739,08	0,673538	13,05602	13,7296	1501,285	2,230461	1503,51	0,223427	1,436913	1,66034	36,78859	2327,32	9236,617	21,37231	11585,3	
Dibenzofuran µg	1526,049	1,061499	1527,11	0,149114	2,981115	3,13023	299,2227	0,509287	299,732	0,051016	0,328094	0,37911	8,587358	515,242	1825,471	4,879995	2345,59	
Dibenzothiophene µg	1003,479	0,054836	1003,53	0,025724	0,154002	0,17973	183,3347	0,026309	183,361	0,002635	0,016949	0,01958	1,4814	88,884	1186,842	0,252097	1275,98	
Dissolved organic matter mg	2124384	0	2124384	0	0	0	962093,2	0	962093,2	0	0	0	0	0	308647,7	0	308647,7	
Dissolved solids mg	3,62E+08	248668,9	3,6E+08	34934,38	698361,8	733296	71680572	119306,6	7,2E+07	11951,05	76859,92	88811	2011846	1,2E+08	4,33E+08	1143197	5,6E+08	
Docosane µg	8588,17	5,973769	8594,14	0,839165	16,77674	17,6159	1683,94	2,8661	1686,81	0,2871	1,846405	2,1335	48,32692	2899,61	10273,24	27,46301	13200,3	
Dodecane mg	443,8748	0,308755	444,184	0,043372	0,867108	0,91048	87,03357	0,148135	87,1817	0,014839	0,095432	0,11027	2,497777	149,867	530,9666	1,41943	682,253	
Eicosane mg	122,211	0,085008	122,296	0,011942	0,238737	0,25068	23,96273	0,040785	24,0035	0,004086	0,026275	0,03036	0,687703	41,2622	146,1898	0,390805	187,843	
Fluorene, 1-methyl- µg	913,3884	0,635351	914,024	0,08925	1,78432	1,87357	179,0944	0,304829	179,399	0,030535	0,196378	0,22691	5,139872	308,392	1092,603	2,920878	1403,92	
Fluorenes, alkylated,	8252,966	15,90262	8268,87	1,949197	44,66093	46,6101	1830,315	7,629772	1837,95	0,764281	4,915268	5,67955	112,2529	6735,17	10085,99	73,10859	16894,3	
Fluoride mg	5,610649	0	5,61065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,610649	0	5,61065	
Fluorine µg	4503,944	7,828499	4511,77	0,968144	21,98556	22,9537	981,1257	3,755964	984,882	0,376238	2,419675	2,79591	55,75473	3345,28	5486,414	35,9897	8867,69	
Halogenated organics µg	7,75E-05	0	7,8E-05	0	0	0	6,65E-05	0	6,6E-05	0	0	0	0	0	0,000144	0	0,000144	
Hexadecane mg	484,4845	0,337008	484,822	0,047341	0,946454	0,99379	94,9963	0,16169	95,158	0,016137	0,104164	0,12036	2,72633	163,58	579,5444	1,549316	744,673	

Hexanoic acid mg	1686.025	1.172783	1687.2	0.164746	3.293644	3.45839	330.5904	0.562679	331.153	0.056364	0.36249	0.41885	9.487616	569.257	2016.836	5.391596	2591.49
Hydrocarbons, unspecified µg	8.63177	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.63177	0	8.63177
Iron mg	80679.5	991.4246	80767.1	124.3313	2784.317	2908.65	141122.5	475.6665	141598	47.64795	306.4349	354.083	7160.154	429609	947973.9	4557.843	138141
Lead mg	2986.62	3.28449	2989.9	0.427569	9.224162	9.65173	610.7996	1.575835	612.375	0.157853	1.015188	1.17304	24.62339	1477.4	3598.005	15.09967	5090.51
Lead-210/kg µg	0.000834	5.79E-07	0.00083	8.15E-08	1.63E-06	1.7E-06	0.000164	2.78E-07	0.00016	2.79E-08	1.79E-07	2.1E-07	4.69E-06	0.00028	0.000997	2.66E-06	0.00128
Lithium, ion mg	6883555	5.992272	6883561	134.8277	16.8301	151.658	1249893	2.875217	1249896	0.288013	1.852279	2.14029	7764.633	465878	8133583	27.55037	8599489
Magnesium mg	5042540	3505.769	5046045	492.521	9845.604	10338.1	9888878	1682.001	990370	168.4876	1083.582	1252.07	28363.94	1701837	6031888	16.116.96	7749842
Manganese mg	9757.704	5.586962	9763.29	0.786698	15.69043	16.4771	2182.367	2.680517	2185.05	0.26851	1.726848	1.99536	45.30539	2718.32	11941.13	25.68475	14685.1
Mercury µg	2845.811	5.483624	2851.29	0.672132	15.40021	16.0723	631.1354	2.630938	633.766	0.263543	1.694908	1.95845	38.7076	2322.46	3477.882	25.20968	5825.55
Metallic ions, unspecified mg	5.61065	0	5.61065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.610649	0	5.61065
Methane, monochloro-, R-40	32.03392	0.224703	32.3264	0.031565	0.631057	0.66262	63.34052	0.107808	63.4483	0.010799	0.069453	0.08025	1.817812	109.069	386.4221	1.033022	496.524
Methyl ethyl ketone µg	646.0537	0.449391	646.503	0.063128	1.26207	1.3252	126.6762	0.215609	126.892	0.021598	0.1389	0.1605	3.635495	218.13	772.8146	2.065971	993.01
Molybdenum mg	184.4938	0.128333	184.622	0.018027	0.36041	0.37844	36.17497	0.061572	36.2365	0.006168	0.039666	0.04583	1.03819	62.2914	220.693	0.58998	283.574
m-Xylene mg	243.1669	0.16914	243.336	0.02376	0.475013	0.49877	47.67929	0.08115	47.7604	0.008129	0.052279	0.06041	1.368322	82.0993	290.878	0.777582	373.755
Naphthalene mg	145.8493	0.101732	145.951	0.014283	0.285705	0.29999	28.60353	0.048809	28.6523	0.004889	0.031444	0.03633	0.822543	49.3526	174.472	0.46769	224.292
Naphthalene, 2-methyl- mg	127.1231	0.088426	127.212	0.012422	0.248334	0.26076	24.9259	0.042425	24.9683	0.00425	0.027331	0.03158	0.715348	42.9209	152.0657	0.406516	195.393
Naphthalenes, alkylated,	2333.572	4.496581	2338.07	0.551149	12.6282	13.1794	517.5325	2.157373	519.69	0.216106	1.389828	1.60593	31.7403	1904.42	2851.872	20.67198	4776.96
n-Hexacosane µg	5357.823	3.726892	5361.55	0.523532	10.46661	10.9901	1050.546	1.788091	1052.33	0.179115	1.151928	1.33104	30.14986	1808.99	6409.071	17.13352	8235.2
Nickel mg	1565.93	1.534667	1567.46	0.203102	4.30996	4.51306	316.3395	0.736304	317.076	0.073756	0.474343	0.5481	11.6955	701.79	1882.546	7.055275	2591.39
Nitrate mg	36906.82	0	36906.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36906.82	0	36906.8
Nitrogen, total µg	690.5414	0	690.541	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	690.5414	0	690.541
Non-halogenated Organics	12601904	0	1.3E+07	0	0	0	1200861	0	1200861	0	0	0	0	0	13802764	0	1.4E+07
o-Cresol mg	230.8794	0.160597	231.04	0.02256	0.45102	0.47358	45.27009	0.077051	45.3471	0.007718	0.049638	0.05736	1.299201	77.9521	276.1798	0.738306	354.87
Octadecane mg	119.6931	0.083257	119.776	0.011696	0.233819	0.24551	23.46904	0.039945	23.509	0.004001	0.025734	0.02973	0.673536	40.4122	143.4778	0.382755	183.973
Olis, unspecified mg	917788.1	129.7259	917918	17.83003	364.3222	382.152	74093.46	62.23998	74155.7	6.234636	40.09638	46.331	1026.819	61609.1	991905.7	596.3844	1054111
Other mg	50565368	0	5.1E+07	0	0	0	4815909	0	4815909	0	0	0	0	0	55381277	0	5.5E+07
Other metals mg	5110422	0	5.110422	0	0	0	38652.45	0	38652.45	0	0	0	0	0	5149074	0	5.149074
p-Cresol mg	249.1068	0.17327	249.28	0.02434	0.486613	0.51095	48.84395	0.083132	48.9271	0.008327	0.053555	0.06188	1.401738	84.1043	297.9834	0.79657	382.884
Pentadecane, methyl- mg	33.7278	0.023461	33.7513	0.003296	0.065889	0.06918	6.613252	0.11256	6.62451	0.001128	0.007252	0.00838	0.189797	11.3878	40.34547	0.107858	51.8412
Phenanthrene µg	182.068	1.592618	183.66	0.204087	4.472709	4.6768	266.0115	0.764107	266.776	0.076541	0.492255	0.5688	11.75321	705.192	1548.36	7.321689	2260.87
Phenanthrenes, alkylated,	967.594	1.864467	969.458	0.228529	5.23617	5.4647	214.59	0.894535	215.485	0.089606	0.57628	0.66589	13.16083	789.65	1182.502	8.571451	1980.72
Phenol µg	949941.8	2487.003	952429	293.7019	6984.5	7278.2	204165.4	1193.216	203559	119.5256	768.6963	888.222	16914.09	1014845	1154520	11433.42	2180799
Phenol, 2,4-dimethyl- mg	224.805	0.156372	224.961	0.021966	0.439156	0.46112	44.07905	0.075024	44.1541	0.007519	0.048332	0.05585	1.265024	75.9014	268.9135	0.718884	345.534
Phenols, unspecified mg	2969.129	0.349336	2969.48	0.097151	0.981076	1.07823	546.3618	0.167605	546.529	0.016789	0.107975	0.12476	5.594835	335.69	3515.605	1.605992	3852.9
Phosphate mg	30701.73	0	30701.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30701.73	0	30701.7
Phosphorus mg	7130.841	0	7130.84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7130.841	0	7130.84
Polynuclear Aromatic	39.4477	0	39.4477	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39.4477	0	39.4477
Radium-226/kg µg	0.29011	0.000202	0.29031	2.83E-05	0.000567	0.0006	0.056884	9.88E-05	0.05698	9.7E-06	6.24E-05	7.2E-05	0.001633	0.09795	0.347032	0.000928	0.44591
Radium-228/kg µg	0.001484	1.03E-06	0.00149	1.45E-07	2.89E-06	3E-06	0.000291	4.94E-07	0.00029	4.96E-08	3.18E-07	3.7E-07	8.35E-06	0.0005	0.001775	4.74E-06	0.00228
Selenium µg	31782.41	60.65328	31843.1	7.440269	170.3387	177.779	7036.322	29.10038	7065.42	2.915002	18.74705	21.662	428.4799	25708.8	38829.09	278.8393	64816.7
Silver mg	16825.47	11.7272	16837.2	1.646713	32.93468	34.5814	3299.576	5.626486	3305.2	0.56361	3.624707	4.18832	94.83306	5689.98	20127.25	53.91307	25871.1
Sodium, ion mg	81762083	56849.59	8.2E+07	7986.575	159656.4	167643	16031164	27275.34	1.6E+07	2732.196	17571.38	20303.6	459941.3	2.8E+07	97803966	261352.7	1.3E+08
Strontium mg	437519.2	304.3422	437824	42.75211	854.7147	897.467	85787.55	146.0175	85933.6	14.62671	94.06773	108.694	2462.064	147724	523364.1	1399.142	672487
Sulfate mg	15213999	405.7163	1.5E+07	57.11088	1139.414	1196.52	2625779	194.6549	2625974	19.49876	125.401	144.9	3288.976	197339	17839654	1865.186	1.8E+07
Sulfide mg	54651.03	0.288575	54651.3	0.034079	0.810433	0.84451	21.8039	0.138453	21.3188	0.013869	0.089194	0.10306	1.962594	117.756	54672.26	1.326654	54791.3
Sulfur mg	21263.54	14.790073	21278.3	2.07772	41.53828	43.616	4169.287	7.096306	4176.38	0.710843	4.571598	5.28244	119.6548	7179.27	25435.61	67.99691	32682.9
Suspended solids,	13846749	15381.03	1.4E+07	1895.842	43196.1	45091.9	2987867	7379.525	2995247	739.2137	4754.053	5493.27	109180.2	6550813	16837252	70710.71	2.3E+07
Tetradecane mg	194.5328	0.135315	194.668	0.019008	0.380019	0.39903	38.14337	0.064922	38.2083	0.006503	0.041824	0.04833	1.094677	65.6806	232.7017	0.62208	299.004
Thallium µg	34299.78	65.90809	34365.7	8.080268	185.0963	193.177	7603.051	31.62143	193.177	3.167548	20.37123	23.5388	485.3387	27920.2	41914.08	302.9971	70137.3
Tin mg	1068.941	1.255154	1070.2	0.161983	3.524976	3.68696	220.2729	0.602199	220.875	0.060323	0.38795	0.44827	9.328488	559.709	1289.436	5.770279	1854.92
Titanium, ion mg	2497.724	4.803452	2502.53	0.588858	13.49002	14.0789	553.7406	2.304604	556.045	0.230854	1.484677	1.71553	33.91193	2034.72	3052.284	22.08275	5109.08
Toluene mg	12720.18	8.848051	12729	1.242926	24.84887	26.0918	2494.132	4.245125	2498.38	0.425238	2.734804	3.16004	71.57921	423475	15215.98	40.67685	19551.4
Vanadium mg	217.9348	0.151593	218.086	0.021295	0.425734	0.44703	42.73196	0.072731	42.8047	0.007286	0.046855	0.05414	1.226363	73.5818	260.6953	0.696914	334.974
Xylene mg	1482.669	4.636354	1487.31	0.550284	13.02074	13.571	365.9612	2.224433	368.186	0.222824	1.433059	1.65585	31.69049	1901.43	1849.404	21.31455	3772.15
Yttrium mg	54.08515	0.037622	54.1228	0.005285	0.105658	0.11094	10.60487	0.01805	10.6229	0.001808	0.011628	0.01344	0.304356	18.2614	64.69711	0.17296	83.1314
Zinc mg	6499.477	11.53199	6511.01	1.423517	32.38645	33.81	1420.731	5.532828	1426.26	0.554228	3.564371	4.1186	81.97935	4918.76	7922.186	53.01564	12894

2. Agrégation selon TRACI - résultats fournis par ATHENA

Summary Measure Table By Life Cycle Stages

Project assembly1_feb09

	Manufacturing			Construction			Maintenance			End - Of - Life			Operating Energy		Total Effects
	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Material	Transportation	Total	Annual	Total	
Primary Energy Consumption	195345	2694	198039	32	7632	7663	57248	1293	58542	3	831	834	1824	109464	374541
Weighted Resource Use kg	33083,1	69,2	33152,3	0,8	173,7	174,5	3017,9	29,5	3047,4	0,1	18,9	19,0	48,0	2880,4	39273,6
Global Warming Potential (kg)	9917,4	5,2	9922,5	24,0	14,5	38,6	2824,4	2,5	2826,8	0,2	1,6	1,8	40,0	2397,7	15187,5
Acidification Potential (moles)	3586,8	1,7	3588,4	14,2	4,6	18,8	1020,1	0,8	1020,9	0,0	0,5	0,5	7,1	427,1	5055,8
HH Respiratory Effects	36,437	0,002	36,439	0,004	0,006	0,010	6,357	0,001	6,358	0,000	0,001	0,001	0,026	1,530	44,338
Eutrophication Potential (kg)	0,02101	0,00001	0,02102	0,00000	0,00004	0,00004	0,00263	0,00001	0,00263	0,00000	0,00000	0,00000	0,00010	0,00578	0,02948
Ozone Depletion Potential	0,00018	0,00000	0,00018	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00018
Smog Potential (kg NOx eq /	27,26	0,04	27,30	0,08	0,10	0,18	9,78	0,02	9,80	0,00	0,01	0,01	0,06	3,37	40,66

3. Agrégation selon IMPACT 2002+ et Eco-indicator 99

Les prochains tableaux présentent la procédure utilisée pour l'agrégation des inventaires (fournis par ATHENA) selon les modèles LCIA impacts 2002+ et Eco-indicator 99. Seulement quelques résultats des émissions dans l'eau et dans l'air sont inclus pour limiter la longueur des tableaux. L'exemple de calcul suivant permet de mieux comprendre ces tableaux.

Émissions d'arsenic dans l'air

Quantité émise selon les LCI fournis par ATHENA: $0.38\text{g} \times 0.001\text{ kg/g} = 0.00038\text{ kg}$

IMPACT 2002+

Facteurs de caractérisation de l'arsenic dans l'air pour l'indicateur d'effets cancérigènes:
 $= 1\,240\text{ kgeq Chloroethylene dans l'air} / \text{kg d'arsenic dans l'air}$

Contribution de cette émission d'arsenic à l'indicateur d'effets cancérigènes:
 $= 0.00038\text{ kg} \times 1\,240 = 0.473\text{ kgeq Chloroethylene dans l'air}$

Total de toutes les émissions dans l'air pour l'indicateur d'effets cancérigènes:
 $= 0.561\text{ kgeq Chloroethylene dans l'air}$

Facteurs d'impact de l'indicateur d'effets cancérigènes pour l'indicateur de dommage de santé humaine:

$= 2.8 \times 10^{-6}\text{ DALY/kgeq Chloroethylene dans l'air}$

Contribution des émissions dans l'air pour l'indicateur d'effets cancérigènes à l'indicateur de dommage de santé humaine:

$= 0.561 \times 2.8 \times 10^{-6} = 1.57 \times 10^{-6}\text{ DALY}$

Eco-indicator 99

Facteurs de caractérisation de l'arsenic dans l'air pour l'indicateur d'effets cancérigènes:
 $= 0.046\text{ DALY} / \text{kg d'arsenic dans l'air}$

Contribution de cette émission d'arsenic à l'indicateur d'effets cancérigènes:
 $= 0.00038\text{ kg} \times 0.046 = 9.34 \times 10^{-6}\text{ DALY}$

Total de toutes les émissions dans l'air pour l'indicateur d'effets cancérigènes:
 $= 2.87 \times 10^{-5}\text{ DALY}$

Contribution des émissions dans l'air pour l'indicateur d'effets cancérigènes à l'indicateur de dommage de santé humaine:

$= 2.87 \times 10^{-5}\text{ DALY}$

Facteurs de caractérisation selon les indicateurs midpoint pour IMPACT 2002+

LCI results		Facteurs de caractérisation selon les indicateurs midpoint pour IMPACT 2002+																			
Substance	quantité	Substance	Unit	Carcinogenic effects into ylene into air/Unit	Non-carcinogenic effects into ylene into air/Unit	Respiratory effects (inorganic) into air/Unit	Ionizing radiations into air/Unit	Ozone layer depletion into air/Unit	Respiratory effects (organic) into air/Unit	Aquatic ecotoxicity into air/Unit	Terrestrial ecotoxicity into air/Unit	Aquatic ecotoxicity into air/Unit	Terrestrial acidification into air/Unit	Photochemical oxidation into air/Unit	Land occupation into air/Unit	Global warming into air/Unit	Total Climate Change	Non-renewable energy	Mineral extraction	Total Resources	
Resource Use	total	facteur	[]	[kgqeq Chloroethyene into air/Unit]	[kgqeq Chloroethyene into air/Unit]	[kgqeq PM2.5 into air/Unit]	[Bqeq Carbon-14 into air/Unit]	[kgqeq CFC-11 into air/Unit]	[kgqeq Ethylene into air/Unit]	[kgqeq Triethyleneglycol into air/Unit]	[kgqeq Triethyleneglycol into air/Unit]	[kgqeq Triethyleneglycol into air/Unit]	[kgqeq SO2 into air/Unit]	[kgqeq N/A]	[m2qeq organic arable land/Unit]	[kgqeq CO2 into air/Unit]	[Points/Unit]	[MJ prim non-renewable energy/Unit]	[MJ surplus energy/Unit]	[Points/Unit]	
Limestone Kg	6.87E+02																				
Clay & Shale Kg	1.90E+02																				
Iron Ore Kg	4.62E+01	1																			
Sand Kg	8.76E+02																				
Ash Kg	2.96E+01																				
Other Kg	3.61E+03																				
Gypsum Kg	3.31E+03																				
Water L	1.45E+05																				
Obsolete Scrap Steel Kg	3.22E+01																				
Coal Kg	5.77E+02																				
Wood Kg	6.87E+03																				
Phenol Form. Resins Kg	3.24E+01																				
Uranium Kg	1.38E+03																				
Natural Gas m3	3.59E+03																				
Crude Oil L	3.00E+03																				
Metallurgical Coal Kg	1.49E+01																				
Prompt Scrap Steel Kg	1.95E+01																				
sous-total Resource Use																					
Air Emissions																					
2-Chloroacetonophenone g	8.75E-04	0.001																			
Acenaphthene g	9.87E-05	0.001																			
Acenaphthylene g	4.84E-05	0.001																			
Acetaldehyde g	1.63E-00	0.001																			
Acetophenone g	1.87E-03	0.001																			
Acrolein g	2.15E-01	0.001																			
Aldehydes g	7.14E-02	0.001																			
Ammonia g	3.06E+01	0.001																			
Ammonium chloride g	2.02E+01	0.001																			
Anthracene g	4.07E-05	0.001																			
Antimony g	4.55E-02	0.001																			
Arsenic g	3.80E-01	0.001																			
etc....																					
sous-total Air Emissions																					
Water Emissions																					
2-Hexanone mg	8.05E+01																				
Acetone mg	1.23E+02	1E-06																			
Acids, unspecified mg	2.45E+05	1E-06																			
Aluminum mg	5.44E+05	1E-06																			
Ammonia mg	1.81E+05	1E-06																			
Ammonium, ion mg	1.13E+05	1E-06																			
etc....																					
sous-total Water Emissions																					
Energy																					
Electricity kWh	4.29E+05	1																			
Hydro MJ	1.59E+05	1																			
Coal MJ	1.13E+04	1																			
Diesel MJ	4.64E+04	1																			
Feedstock MJ	9.73E+04	1																			
Gasoline MJ	3.54E+02	1																			
Heavy Fuel Oil MJ	2.04E+04	1																			
LPG MJ	1.36E+02	1																			
Natural Gas MJ	1.06E+05	1																			
Nuclear MJ	8.07E+04	1																			
Wood MJ	1.24E+04	1																			
sous-total Energy																					

LCI results

résultats LCI multipliés par les facteurs de caractérisation selon les indicateurs midpoint pour IMPACT 2002+																	
Substance	quantité	Carcinogenic effects	Non-carcinogenic effects	Respiratory effects (inorganic)	Respiratory effects (organic)	Ozone layer depletion	Ionizing radiations	Aquatic ecotoxicity	Terrestrial ecotoxicity	Aquatic acidification	Aquatic eutrophication (P-limited watershed)	Terrestrial acidification/nitrification	Photochemical oxidation	Land occupation	Global warming	Non-renewable energy	Mineral extraction
	total	facteur	kggeq Chloroethylen into air/Unit	kggeq Chloroethylen into air/Unit	kggeq PM2.5 into air/Unit	kggeq CFC-11 into air/Unit	Bqeq Carbon-14 into air/Unit	kggeq Triethylene glycol into water/Unit	kggeq Triethylene glycol into soil/Unit	N/A	N/A	kggeq SO2 into air/Unit	N/A	(m2eq organic arable land/Unit)	kggeq CO2 into air/Unit	[MJ prim non-renewable energy/Unit]	[MJ surplus energy/Unit]
Resource Use																	
Limestone Kg	6.87E+02																
Clay & Shale Kg	1.90E+02																
Iron Ore Kg	4.62E+01	1															
Sand Kg	8.76E+02																
Ash Kg	2.96E+01																
etc...																	
sous-total Resource Use																	
	total	facteur															1,34E+00
2-Chloroacetonaphenone g	8,75E-04	0,001															
Acenaphthene g	9,87E-05	0,001															
Acenaphthylene g	4,84E-05	0,001															
Acetaldehyde g	1,63E+00	0,001	1,11E-04														
Acetonaphenone g	1,87E-03	0,001															
Acrolein g	2,15E+01	0,001															
Aldehydes g	7,44E-02	0,001															
Ammonia g	3,06E+01	0,001															
Ammonium chloride g	2,02E-01																
Anthracene g	4,07E-05	0,001															
Antimony g	4,55E-02	0,001															
Arsenic g	3,80E-01	0,001	4,73E-01														
etc...																	
sous-total Air Emissions																	
	total	facteur	5,61E-01	6,06E+00	1,98E+01	4,02E-06	1,84E-04	2,43E+00	3,21E+03	8,48E+03	9,64E+01	2,44E+02	1,46E+04		1,46E+04		1,34E+00
Water Emissions																	
2-Hexanone mg	8,05E+01																
Acetone mg	1,23E+02	1E-06															
Acids, unspecified mg	2,45E+05																
Aluminium mg	5,44E+05	1E-06															
Ammonia mg	1,81E+05	1E-06															
Ammonium, ion mg	1,13E+05	1E-06															
etc...																	
sous-total Water Emissions																	
	total	facteur	3,96E+00	4,11E+02					2,63E+06	4,23E-03	1,82E-01						
Energy																	
Electricity kWh	4,28E+05	1															
Hydro MJ	1,39E+06	1															
Coal MJ	1,13E+04	1															
Diesel MJ	4,64E+04	1															
Feedstock MJ	9,73E+04	1															
Gasoline MJ	3,54E+02	1															
Heavy Fuel Oil MJ	2,04E+04	1															
LPG MJ	1,36E+02	1															
Natural Gas MJ	1,06E+05	1															
Nuclear MJ	8,07E+04	1															
Wood MJ	1,24E+04	1															
etc...																	
sous-total Energy																	
	total	facteur	5,61E-01	6,06E+00	1,98E+01	4,02E-06	1,84E-04	2,43E+00	3,21E+03	8,48E+03	9,64E+01	2,44E+02	1,46E+04		1,46E+04		1,34E+00
sous-total Resource Use																	
sous-total Air Emissions																	
sous-total Water Emissions																	
sous-total Energy																	

Facteurs de caractérisation selon les indicateurs midpoint pour Eco-indicator 99

LCI results		Facteurs de caractérisation selon les indicateurs midpoint pour Eco-indicator 99													
Substance	quantité	Facteurs de caractérisation													
		total	facteur	Name of the substance	CAS	Carcinogenes	Respiratory organics	Respiratory inorganics	climate change	Radiation	ozone layer	Ecotoxicity	Acidification/Eutrophication	Non-renewable energy	Mineral extraction
Resource Use						DALY / kg	DALY / kg	DALY / kg	DALY / kg	DALY / Bq	DALY / kg	PDF-m ² yr / kg	MJ surplus / kg MJ	MJ surplus / kg	
Limestone Kg	6.87E+02			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Clay & Shale Kg	1.90E+02			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Iron Ore Kg	4.62E+01	1		iron ore, in ground											
Sand Kg	8.76E+02			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Ash Kg	2.96E-01			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Other Kg	3.61E+03			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Gypsum Kg	3.31E+03			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Water L	1.45E+05			en développement											
Obsolete Scrap Steel Kg	3.22E+01			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Coal Kg	5.77E+02	1		Coal, hard, unspecified, in ground									1.32E+00		
Wood Fiber Kg	6.87E+03			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Phenol Form. Resins Kg	3.24E+01			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Uranium Kg	1.38E+03	0.001		pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
Natural Gas m3	3.58E+03	1		Gas, natural, in ground											
Crude Oil L	3.00E+03	1		Oil, crude, in ground											
Metallurgical Coal Kg	1.49E+01	1		Coal, hard, unspecified, in ground											
Prompt Scrap Steel Kg	1.86E+01			pas de FC - procédé d'extraction déjà inclus											
sous-total Resource Use															
Air Emissions		total	facteur												
2-Chloroacetophenone g	8.75E-04			pas de FC pour ecoinicator 99											
Acenaphthene g	9.87E-05			pas de FC pour ecoinicator 99											
Acenaphthylene g	4.84E-05			pas de FC pour ecoinicator 99											
Acetaldehyde g	1.63E+00	0.001		000075-07-0		2.16E-07	1.38E-06								
Acetophenone g	1.87E-03			Acetaldehyde											
Acrolein g	2.15E+01	0.001		000107-02-8			1.70E-06								
Aldehydes g	7.44E-02	0.001		Acrolein			1.40E-06								
Ammonia g	3.06E+01	0.001		Aldehydes, unspecified				8.50E-05							
Ammonium chloride g	2.02E+01			Ammonia											
Anthracene g	4.07E-05			pas de FC											
Antimony g	4.55E-02			pas de FC pour ecoinicator 99											
Arsenic g	3.80E-01	0.001		pas de FC pour ecoinicator 99											
etc...				Arsenic											
sous-total Air Emissions															
Water Emissions		total	facteur												
2-Hexanone mg	8.05E+01			pas de FC											
Acetone mg	1.23E+02			pas de FC pour ecoinicator 99											
Acids, unspecified mg	2.45E+05			pas de FC (mélange)											
Aluminum mg	5.44E+05			pas de FC pour ecoinicator 99											
Ammonia mg	1.81E+05			pas de FC pour ecoinicator 99											
Ammonium, ion mg	1.13E+05			pas de FC pour ecoinicator 99											
Antimony mg	3.33E+02			pas de FC pour ecoinicator 99											
Arsenic, ion mg	2.97E+03	1.E-06		Arsenic, ion											
Barium mg	7.59E+06			pas de FC pour ecoinicator 99											
Benzene mg	2.07E+04	1.E-06		pas de FC pour ecoinicator 99											
Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)- µg	1.23E+03			Benzene											
etc...				pas de FC											
sous-total Water Emissions															
Energy		total	facteur	considéré dans "ressource use"											

Damage categories - Eco-indicator 99

Classes	Air			Soil			Water			Total
	wall 1	factor	TOTAL	wall 1	factor	TOTAL	wall 1	factor	TOTAL	
Human Health										
Carcinogens	2.87E-05	1	2.87E-05		1		2.26E-04	1	2.26E-04	[DALY]
Respiratory organics	1.19E-05	1	1.19E-05		1			1		[DALY]
Respiratory inorganics	1.38E-02	1	1.38E-02		1			1		[DALY]
Climate change	3.44E-03	1	3.44E-03		1			1		[DALY]
Radiation	8.44E-16	1	8.44E-16		1			1		[DALY]
Ozone layer	3.17E-07	1	3.17E-07		1			1		[DALY]
Total Human Health										[DALY]
Ecosystem Quality										
Ecotoxicity	9.28E+02	0,1	9.28E+01		0,1		2.26E+00	0,1	2.26E+00	[PDF*m2*yr]
Acidification/ Eutrophication	2.54E+02	1	2.54E+02		1			1		[PDF*m2*yr]
Land use		1			1			1		[PDF*m2*yr]
Total Ecosystem Quality										[PDF*m2*yr]
Climate Change										
Global Warming	3.44E-03	1	3.44E-03		1			1		3.44E-03
Total Climate Change										[DALY]
Resources										
Non-renewable energy										2.25E+04 [MJ]
Mineral extraction										1.34E+00 [MJ]
Total Resources										2.25E+04 [MJ]

Comparaison des résultats pour les cinq murs

Damage categories - IMPACT 2002+

normalised to maximal endpoint indicator

Classes	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall 4	Wall 5		Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall 4	Wall 5
Human Health											
Carcinogenic effects	1,27E-05	2,03E-05	1,88E-05	6,28E-06	6,69E-06	[DALY]	0%	0%	0%	0%	0%
Non-carcinogenic effects	1,17E-03	1,76E-03	1,41E-03	6,37E-04	6,80E-04	[DALY]	6%	9%	7%	3%	4%
Respiratory (inorganic)	1,38E-02	1,73E-02	1,75E-02	6,12E-03	7,34E-03	[DALY]	72%	91%	92%	32%	38%
Ionizing radiation	8,44E-16	1,74E-15	1,73E-15	2,26E-16	2,50E-16	[DALY]	0%	0%	0%	0%	0%
Ozone layer depletion	1,93E-07	1,20E-07	7,21E-08	2,54E-07	3,47E-07	[DALY]	0%	0%	0%	0%	0%
respiratory effect (organic)	5,17E-06	3,08E-06	3,16E-06	1,93E-06	1,30E-06	[DALY]	0%	0%	0%	0%	0%
Total Human Health	1,50E-02	1,91E-02	1,89E-02	6,77E-03	8,03E-03	[DALY]	79%	100%	99%	35%	42%
Ecosystem Quality											
Aquatic ecotoxicity	1,32E+02	2,24E+02	1,81E+02	7,36E+01	7,82E+01	[PDF*m2*yr]	19%	33%	27%	11%	11%
Terrestrial ecotoxicity	6,71E+01	9,03E+01	5,69E+01	4,07E+01	4,38E+01	[PDF*m2*yr]	10%	13%	8%	6%	6%
Aquatic acidification*	0,00E+00	1,46E+02	1,22E+02	2,48E+01	3,13E+01	N/A	0%	21%	18%	4%	5%
Aquatic eutrophication*	0,00E+00	2,07E-01	1,78E-01	4,30E-02	7,96E-02	N/A	0%	0%	0%	0%	0%
Terrestrial acidif./nutrific.	2,54E+02	3,68E+02	2,40E+02	5,54E+01	8,55E+01	[PDF*m2*yr]	37%	54%	35%	8%	13%
Land occupation	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	[PDF*m2*yr]	0%	0%	0%	0%	0%
Total Ecosystem Quality	4,53E+02	6,82E+02	4,78E+02	1,70E+02	2,07E+02	[PDF*m2*yr]	66%	100%	70%	25%	30%
Climate Change											
Global Warming	1,46E+04	2,26E+04	1,78E+04	4,81E+03	5,86E+03	[kgeq CO2]	64%	100%	79%	21%	26%
Total Climate Change	1,46E+04	2,26E+04	1,78E+04	4,81E+03	5,86E+03	[kgeq CO2]	64%	100%	79%	21%	26%
Resources											
Non-renewable energy	3,62E+05	5,50E+05	4,46E+05	1,94E+05	2,00E+05	[MJ]	66%	100%	81%	35%	36%
Mineral extraction	1,34E+00	3,57E+00	4,04E+00	1,14E+00	1,48E+00	[MJ]	0%	0%	0%	0%	0%
Total Resources	3,62E+05	5,50E+05	4,46E+05	1,94E+05	2,00E+05	[MJ]	66%	100%	81%	35%	36%

*Aquatic acidification and Aquatic eutrophication are not included in the total Ecosystem quality indicator

Comparaison des résultats des différentes études LCA

Indicateur de changement climatique
(Climate change ou global warming potential)

Résultats de la 1^{ère} étude sur les impacts environnementaux
(présentés au chapitre 3 et utilisés au chapitre 5)

	émissions de gaz à effet de serre					Ratio				
	mur 1	mur 2	mur 3	mur 4	mur 5					
20 ans d'opération	5 495	11 840	9 305	2 453	3 149	46%	100%	79%	21%	27%
40 ans d'opération	6 769	12 823	10 326	3 552	4 036	53%	100%	81%	28%	31%

Résultats de la 2^{ème} étude plus approfondie sur les impacts environnementaux (présentés au chapitre 4)

	émissions de gaz à effet de serre					Ratio				
	mur 1	mur 2	mur 3	mur 4	mur 5					
TRACI										
60 ans d'opération	15 103	23 290	18 558	4 888	5 940	65%	100%	80%	21%	26%
IMPACT 2002+										
60 ans d'opération	14 595	22 630	17 831	4 815	5 856	64%	100%	79%	21%	26%
Eco-indicator 99										
60 ans d'opération	0,00343	0,00507	0,00400	0,00135	0,00168	68%	100%	79%	27%	33%

Selon l'ACV, on devrait prendre une durée de vie réaliste, exemple 60 ans, et diviser l'impact total par 60 pour obtenir le portion imputable à chaque an. Alors que dans la première étude, la durée de vie du bâtiment était établie à 20 ans ou 40 ans.

Annexe 7
Calculs selon les méthodes
d'agrégation multicritères (MCDA)

Somme pondérée**Contexte 1**

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6
limite inférieure	0	24	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000
limite supérieure	5	44	-15 000	0	0	0
mur 1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495
mur 2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840
mur 3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305
mur 4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453
mur 5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149
ratio						
mur 1	0,60	0,05	0,96	1,00	0,36	0,63
mur 2	0,40	0,80	0,26	1,00	0,50	0,21
mur 3	0,20	0,80	0,43	1,00	0,49	0,38
mur 4	0,80	0,10	0,81	1,00	0,45	0,84
mur 5	0,20	0,40	0,75	1,00	0,55	0,79

pois des critères	20%	20%	20%	0%	20%	20%	
mur 1	0,12	0,01	0,19	0,00	0,07	0,13	52,0%
mur 2	0,08	0,16	0,05	0,00	0,10	0,04	43,6%
mur 3	0,04	0,16	0,09	0,00	0,10	0,08	45,9%
mur 4	0,16	0,02	0,16	0,00	0,09	0,17	59,9%
mur 5	0,04	0,08	0,15	0,00	0,11	0,16	53,8%
	0,44	0,43	0,64	0,00	0,47	0,57	

Contexte 2

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6
limite inférieure	0	24	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000
limite supérieure	5	40	-15 000	0	0	0
mur 1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495
mur 2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840
mur 3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305
mur 4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453
mur 5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149
ratio						
mur 1	0,60	0,06	0,96	1,00	0,36	0,63
mur 2	0,40	1,00	0,26	1,00	0,50	0,21
mur 3	0,20	1,00	0,43	1,00	0,49	0,38
mur 4	0,80	0,13	0,81	1,00	0,45	0,84
mur 5	0,20	0,50	0,75	1,00	0,55	0,79

pois des critères	20%	20%	15%	10%	10%	25%	
mur 1	0,12	0,01	0,14	0,10	0,04	0,16	57,0%
mur 2	0,08	0,20	0,04	0,10	0,05	0,05	52,3%
mur 3	0,04	0,20	0,06	0,10	0,05	0,09	54,8%
mur 4	0,16	0,03	0,12	0,10	0,04	0,21	66,0%
mur 5	0,04	0,10	0,11	0,10	0,05	0,20	60,5%
	0,44	0,54	0,48	0,50	0,23	0,71	

Somme pondérée**Contexte 3**

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	
limite inférieure	0	24	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000	
limite supérieure	5	44	-15 000	0	0	0	
mur 1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495	
mur 2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840	
mur 3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305	
mur 4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453	
mur 5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149	
ratio							
mur 1	0,60	0,05	0,96	1,00	0,36	0,63	
mur 2	0,40	0,80	0,26	1,00	0,50	0,21	
mur 3	0,20	0,80	0,43	1,00	0,49	0,38	
mur 4	0,80	0,10	0,81	1,00	0,45	0,84	
mur 5	0,20	0,40	0,75	1,00	0,55	0,79	
pois des critères	5%	10%	45%	20%	20%	0%	
mur 1	0,03	0,01	0,43	0,20	0,07	0,00	73,8%
mur 2	0,02	0,08	0,12	0,20	0,10	0,00	51,9%
mur 3	0,01	0,08	0,19	0,20	0,10	0,00	58,0%
mur 4	0,04	0,01	0,37	0,20	0,09	0,00	70,4%
mur 5	0,01	0,04	0,34	0,20	0,11	0,00	69,7%
	0,11	0,22	1,45	1,00	0,47	0,00	

Contexte 4

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	
limite inférieure	0	29	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000	
limite supérieure	5	44	-15 000	0	0	0	
mur 1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495	
mur 2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840	
mur 3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305	
mur 4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453	
mur 5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149	
ratio							
mur 1	0,60	-0,27	0,96	1,00	0,36	0,63	
mur 2	0,40	0,73	0,26	1,00	0,50	0,21	
mur 3	0,20	0,73	0,43	1,00	0,49	0,38	
mur 4	0,80	-0,20	0,81	1,00	0,45	0,84	
mur 5	0,20	0,20	0,75	1,00	0,55	0,79	
pois des critères	5%	30%	30%	15%	15%	5%	
mur 1	0,03	-0,08	0,29	0,15	0,05	0,03	47,3%
mur 2	0,02	0,22	0,08	0,15	0,08	0,01	55,5%
mur 3	0,01	0,22	0,13	0,15	0,07	0,02	60,1%
mur 4	0,04	-0,06	0,24	0,15	0,07	0,04	48,2%
mur 5	0,01	0,06	0,23	0,15	0,08	0,04	56,7%
	0,11	0,36	0,96	0,75	0,35	0,14	

Somme pondérée**Contexte 5**

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	
limite inférieure	0	29	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000	
limite supérieure	5	44	-15 000	0	0	0	
mur 1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495	
mur 2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840	
mur 3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305	
mur 4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453	
mur 5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149	
ratio							
mur 1	0,60	-0,27	0,96	1,00	0,36	0,63	
mur 2	0,40	0,73	0,26	1,00	0,50	0,21	
mur 3	0,20	0,73	0,43	1,00	0,49	0,38	
mur 4	0,80	-0,20	0,81	1,00	0,45	0,84	
mur 5	0,20	0,20	0,75	1,00	0,55	0,79	
ponds des critères	2,5%	45%	20%	15%	15%	2,5%	
mur 1	0,02	-0,12	0,19	0,15	0,05	0,02	30,6%
mur 2	0,01	0,33	0,05	0,15	0,08	0,01	62,3%
mur 3	0,01	0,33	0,09	0,15	0,07	0,01	65,3%
mur 4	0,02	-0,09	0,16	0,15	0,07	0,02	33,0%
mur 5	0,01	0,09	0,15	0,15	0,08	0,02	49,7%
	0,06	0,54	0,64	0,75	0,35	0,07	

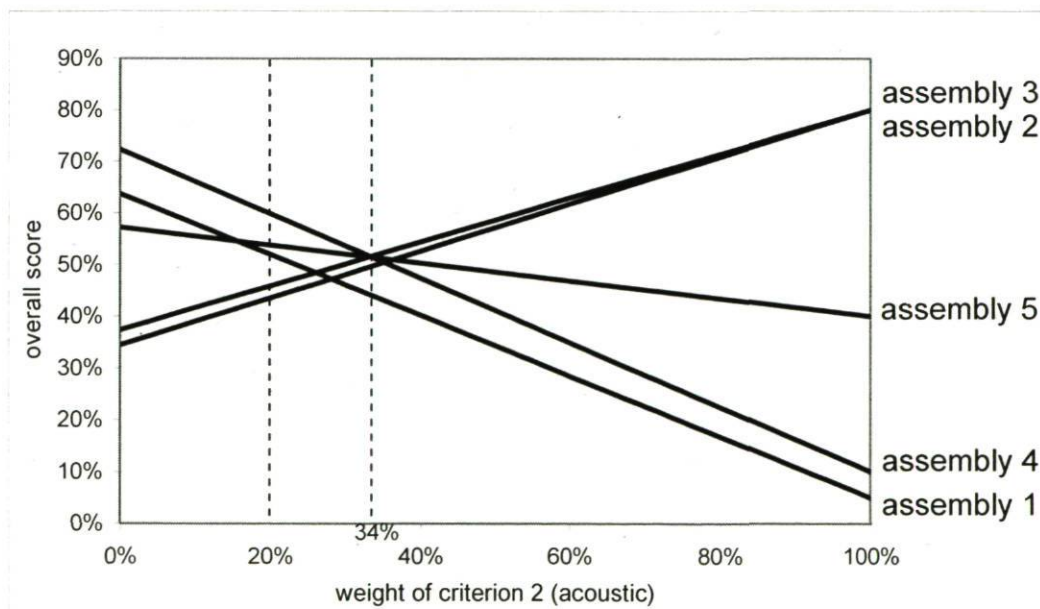
Contexte 6

	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5	Critère 6	
limite inférieure	0	24	-50 000	-10 000	-12 000	-15 000	
limite supérieure	5	44	-15 000	0	0	0	
mur 1	3	25	-16 406	-3 500	-11 084	-6 769	
mur 2	2	40	-40 774	0	-8 546	-12 823	
mur 3	1	40	-34 962	0	-8 855	-10 326	
mur 4	4	26	-21 594	-3 500	-9 543	-3 552	
mur 5	1	32	-23 744	-3 500	-7 751	-4 036	
ratio							
mur 1	60%	5%	96%	65%	8%	55%	
mur 2	40%	80%	26%	100%	29%	15%	
mur 3	20%	80%	43%	100%	26%	31%	
mur 4	80%	10%	81%	65%	20%	76%	
mur 5	20%	40%	75%	65%	35%	73%	
ponds des critères	20%	10%	10%	20%	20%	20%	
mur 1	0,12	0,01	0,10	0,13	0,02	0,11	47,6%
mur 2	0,08	0,08	0,03	0,20	0,06	0,03	47,3%
mur 3	0,04	0,08	0,04	0,20	0,05	0,06	47,8%
mur 4	0,16	0,01	0,08	0,13	0,04	0,15	57,5%
mur 5	0,04	0,04	0,08	0,13	0,07	0,15	50,2%
	0,44	0,22	0,32	0,79	0,24	0,50	

Somme pondérée

Exemple d'analyse de sensibilité - Contexte 1

poils critère 2	mur 1	mur 2	mur 3	mur 4	mur 5
0%	64%	34%	37%	72%	57%
5%	61%	37%	40%	69%	56%
10%	58%	39%	42%	66%	56%
15%	55%	41%	44%	63%	55%
20%	52%	44%	46%	60%	54%
25%	49%	46%	48%	57%	53%
30%	46%	48%	50%	54%	52%
35%	43%	50%	52%	51%	51%
40%	40%	53%	54%	47%	50%
45%	37%	55%	57%	44%	49%
50%	34%	57%	59%	41%	49%
55%	31%	59%	61%	38%	48%
60%	28%	62%	63%	35%	47%
65%	26%	64%	65%	32%	46%
70%	23%	66%	67%	29%	45%
75%	20%	69%	69%	26%	44%
80%	17%	71%	71%	22%	43%
85%	14%	73%	74%	19%	43%
90%	11%	75%	76%	16%	42%
95%	8%	78%	78%	13%	41%
100%	5%	80%	80%	10%	40%



MACBETH

Rapport d'analyse avec M-MACBETH - Contexte 1



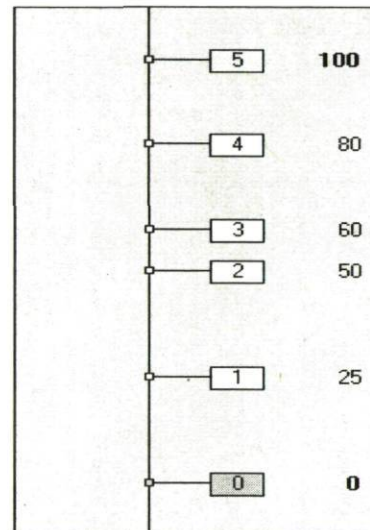
Moisture performance management (Moisture)

Basis for comparison :

5	30 day RH (rain penetration) < 80%
4	30 day RH (rain penetration) < 90%
3	30 day RH < 80%
2	no yearly increase
1	7-day RH < 98%
0	RH < 100%

References :

- 5 : 30 day RH (rain penetration) < 80%
- 0 : RH < 100%



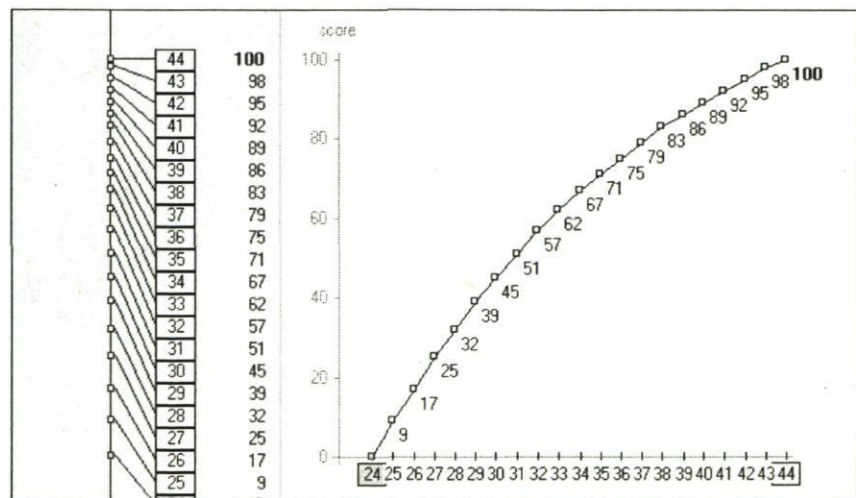
Sound Attenuation index (OITC)

Basis for comparison :

- 24...44
- 43

References :

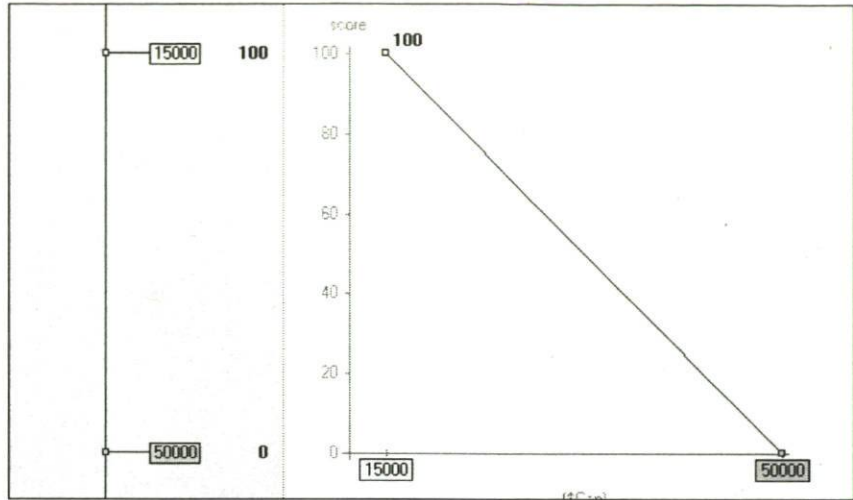
- 44
- 24



Construction Cost
(Construction)

Basis for comparison :
15000
50000

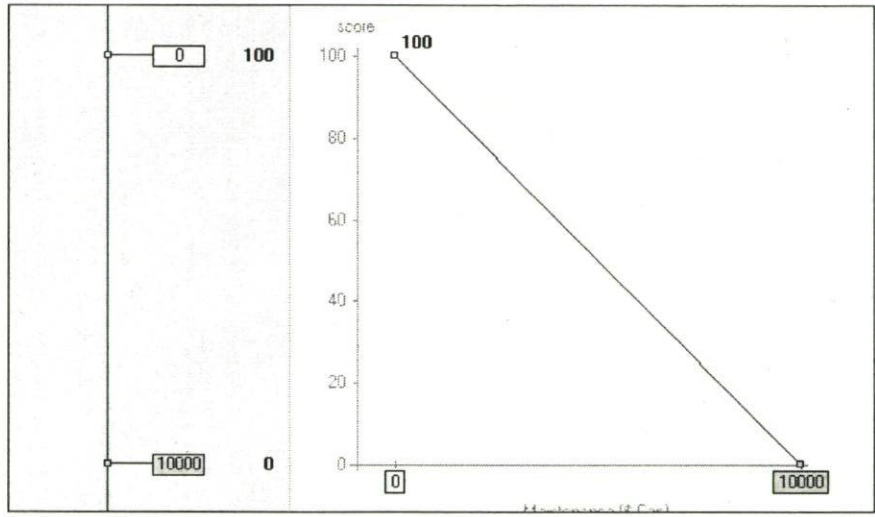
References :
15000
50000



Maintenance Cost
(Maintenance)

Basis for comparison :
0
10000

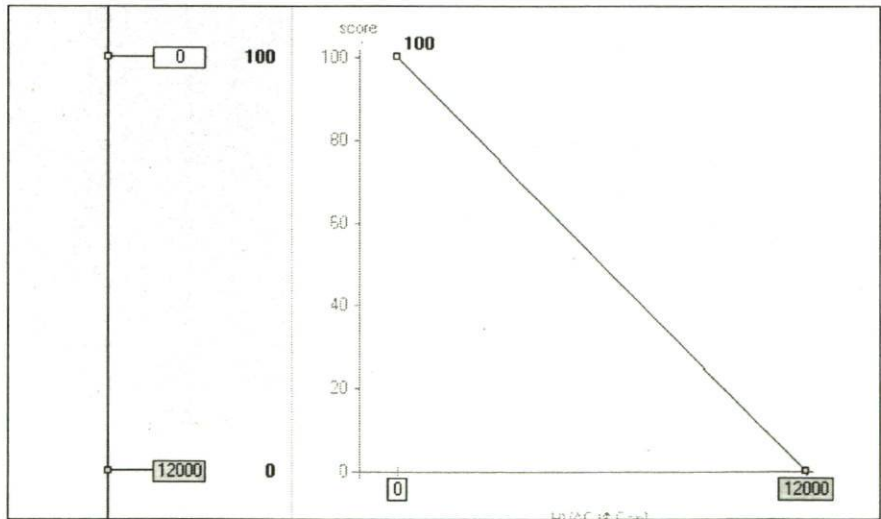
References :
0
10000



HVAC-Energy Cost
(HVAC)

Basis for comparison :
0
12000

References :
0
12000



Environmental impact
(GWP) (GWP)

Basis for comparison :

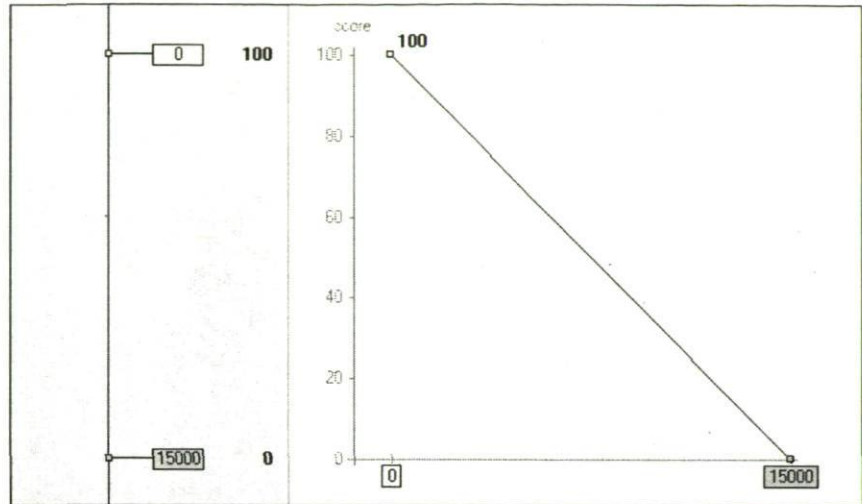
0

15000

References :

0

15000



Weighting

Judgements :

	[GWP]	[OITC]	[Moisture]	[Construction]	[HVAC]	[Maintenance]	[all lower]
[GWP]	no 0	no 0	no 0	no 0	no 0	positive 20	positive 20
[OITC]	no 0	no 0	no 0	no 0	no 0	positive 20	positive 20
[Moisture]	no 0	no 0	no 0	no 0	no 0	positive 20	positive 20
[Construction]	no 0	no 0	no 0	no 0	no 0	positive 20	positive 20
[HVAC]	no 0	no 0	no 0	no 0	no 0	positive 20	positive 20
[Maintenance]						no 0	no 0
[all lower]						no 0	no 0

Consistent judgements

Scales :

	Current scale	MACBETH anchored	MACBETH basic
[GWP]	20	20.00	1.00
[OITC]	20	20.00	1.00
[Moisture]	20	20.00	1.00
[Construction]	20	20.00	1.00
[HVAC]	20	20.00	1.00
[Maintenance]	0	0.00	0.00
[all lower]	0	0.00	0.00

Options :

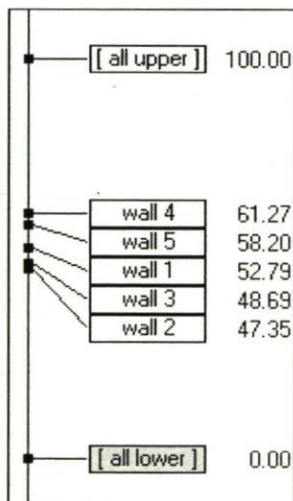
Name	Short name
wall assembly 1	wall 1
wall assembly 2	wall 2
wall assembly 3	wall 3
wall assembly 4	wall 4
wall assembly 5	wall 5

Table of performances :

	Moisture	OITC	Construction	Maintenance	HVAC	GWP
wall 1	± 3	± 25	± 16406	0	± 7729	± 5495
wall 2	± 2	± 40	± 40774	0	± 5959	± 11840
wall 3	± 1	± 40	± 34962	0	± 6175	± 9305
wall 4	± 4	± 26	± 21594	0	± 6655	± 2453
wall 5	± 1	± 32	± 23744	0	± 5405	± 3149

Table of scores :

Options	Overall	Moisture	OITC	Construction	Maintenance	HVAC	GWP
[all upper]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
wall 4	61.27	80.00	17.00	81.16	100.00	44.54	83.65
wall 5	58.20	25.00	57.00	75.02	100.00	54.96	79.01
wall 1	52.79	60.00	9.00	95.98	100.00	35.59	63.37
wall 3	48.69	25.00	89.00	42.97	100.00	48.54	37.97
wall 2	47.35	50.00	89.00	26.36	100.00	50.34	21.07
[all lower]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Weights :		0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.2000	0.2000



Robustness analysis :

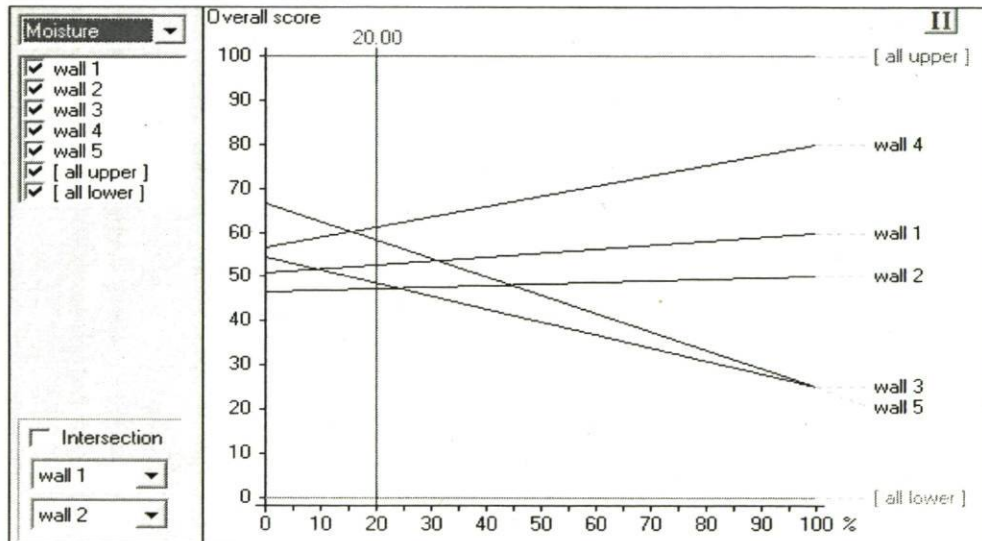
☐	wall 1	wall 2	wall 3	wall 4	wall 5	[all upper]	[all lower]
wall 1	=	+	+				▲
wall 2		=					▲
wall 3		+	=				▲
wall 4	+	+	+	=	+		▲
wall 5	+	+	+		=		▲
[all upper]	▲	▲	▲	▲	▲	=	▲
[all lower]							=

Local information			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Moisture	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅
OITC	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅
Construction	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅
Maintenance	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅
HVAC	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅
GWP	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅

Global information			
ordinal	MACBETH	cardinal	
<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> ±0% ⇅	

±↑ | Diff

Sensitivity analysis on weight :



ELECTRE II avec MCDM software

Fichier de base - contexte 1 à 6

```
# PROPERTY FILE FOR THE MCDM FRAMEWORK
# NB: The characters ! or # can be used to place comments in a property file
in Java
#     However properties and comments can not be declared on the same line

# MULTICRITERIA TABLE
# The name of the file containing the description of the MCDM Table.
# This property is mandatory to make the system work

mcdmTableFile = Composition.mtab

# DECISION METHOD
# The type of decision algorithm being used by the system.
# Only ElectreII is implemented at the moment

decisionMethod = ElectreII

# Concordance thresholds - ElectreII has 3 of those

concThreshold = 0.80 0.7 0.55

# SENSITIVITY ANALYSIS
# First the user should indicate if a sensitivity analysis can be conducted
# If so, the value is on. Otherwise, it is not possible to use this function.
sensitivityanalysis = off
```

Fichier de données (composition.mtab) - contexte 1

Criteria	f1	1.0	3.0	0.2
Criteria	f2	5.0	20.0	0.2
Criteria	f3	5000.0	25000.0	0.2
Criteria	f4	0.0	5000.0	0.0
Criteria	f5	2000.0	5000.0	0.2
Criteria	f6	2000.0	10000.0	0.2
Action	a1			
Action	a2			
Action	a3			
Action	a4			
Action	a5			
Eval a1	f1	3.0		
Eval a1	f2	25.0		
Eval a1	f3	-16406.0		
Eval a1	f4	0.0		
Eval a1	f5	-7729.0		
Eval a1	f6	-5495.0		
Eval a2	f1	2.0		
Eval a2	f2	40.0		
Eval a2	f3	-40774.0		
Eval a2	f4	0.0		
Eval a2	f5	-5959.0		
Eval a2	f6	-11840.0		
Eval a3	f1	1.0		

```

Eval a3 f2 40.0
Eval a3 f3 -34962.0
Eval a3 f4 0.0
Eval a3 f5 -6175.0
Eval a3 f6 -9305.0
Eval a4 f1 4.0
Eval a4 f2 26.0
Eval a4 f3 -21594.0
Eval a4 f4 0.0
Eval a4 f5 -6655.0
Eval a4 f6 -2453.0
Eval a5 f1 1.0
Eval a5 f2 32.0
Eval a5 f3 -23744.0
Eval a5 f4 0
Eval a5 f5 -5405.0
Eval a5 f6 -3149.0

```

Fichiers de résultats - contexte 1

New Decisions Made With Method ELECTREII

For Multicriteria Table: Compositions
With Concordance Thresholds: 0.8 0.7 0.55

---- The MCDM Multicriteria Table ----

	f1	f2	f3	f4	f5	f6
a1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495
a2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840
a3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305
a4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453
a5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149

---- The Concordance Matrix ---

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	1	0,6	0,6	0,2	0,4
a2	0,4	1	0,6	0,4	0,4
a3	0,4	0,6	1	0,4	0,4
a4	0,8	0,6	0,6	1	0,6
a5	0,6	0,6	0,8	0,4	1

---- The Discordance Matrix (f1) ---

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	0	0	1	0
a2	1	0	0	2	0
a3	2	1	0	3	0
a4	0	0	0	0	0
a5	2	1	0	3	0

---- The Discordance Matrix (f2) ---

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	15	15	1	7
a2	0	0	0	0	0
a3	0	0	0	0	0
a4	0	14	14	0	6
a5	0	8	8	0	0

---- The Discordance Matrix (f3) ----

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	0	0	0	0
a2	24 368	0	5 812	19 180	17 030
a3	18 556	0	0	13 368	11 218
a4	5 188	0	0	0	0
a5	7 338	0	0	2 150	0

---- The Discordance Matrix (f4) ----

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	0	0	0	0
a2	0	0	0	0	0
a3	0	0	0	0	0
a4	0	0	0	0	0
a5	0	0	0	0	0

---- The Discordance Matrix (f5) ----

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	1 770	1 554	1 074	2 324
a2	0	0	0	0	554
a3	0	216	0	0	770
a4	0	696	480	0	1 250
a5	0	0	0	0	0

---- The Discordance Matrix (f6) ----

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	0	0	3 042	2 346
a2	6 345	0	2 535	9 387	8 691
a3	3 810	0	0	6 852	6 156
a4	0	0	0	0	0
a5	0	0	0	696	0

---- The Outranking Matrix ----

	a1	a2	a3	a4	a5
a1	0	1	1	0	0
a2	0	0	0	0	0
a3	0	0	0	0	0
a4	2	1	1	0	1
a5	1	1	2	0	0

----- Resulting Ranking Of Actions -----

Action	Direct	Inverse	Mean
a1	3	3	3
a2	4	4	4
a3	4	4	4
a4	1	1	1
a5	2	2	2

ELECTRE II avec Tableur

Contexte 1		critères					
Assemblies	1	2	3	4	5	6	
1	3	25	-16 406	0	-7 729	-5 495	
2	2	40	-40 774	0	-5 959	-11 840	
3	1	40	-34 962	0	-6 175	-9 305	
4	4	26	-21 594	0	-6 655	-2 453	
5	1	32	-23 744	0	-5 405	-3 149	
etendue	3	15	24 368	0	2 324	9 387	
v1	1	5	5 000	1 000	2 000	2 000	
v2	3	15	25 000	5 000	2 500	10 000	
poids	20%	20%	20%	0%	20%	20%	

Matrice de concordance transposée

	1	2	3	4	5
1	1	0,4	0,4	0,8	0,6
2	0,6	1	0,6	0,6	0,6
3	0,6	0,6	1	0,6	0,8
4	0,2	0,4	0,4	1	0,4
5	0,4	0,4	0,4	0,6	1

Matrices de discordance

critère 1

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	1	0
2	1	0	0	2	0
3	2	1	0	3	0
4	0	0	0	0	0
5	2	1	0	3	0

critère 2

	1	2	3	4	5
1	0	15	15	1	7
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	14	14	0	6
5	0	8	8	0	0

critère 3

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	24368	0	5812	19180	17030
3	18556	0	0	13368	11218
4	5188	0	0	0	0
5	7338	0	0	2150	0

critère 4

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

critère 5

	1	2	3	4	5
1	0	1770	1554	1074	2324
2	0	0	0	0	554
3	0	216	0	0	770
4	0	696	480	0	1250

critère 6	5	0	0	0	0	0
		1	2	3	4	5
	1	0	0	0	3042	2346
	2	6345	0	2535	9387	8691
	3	3810	0	0	6852	6156
	4	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	696	0

Outranking matrix

c1	0,8	si \geq c1, alors	3	si $>$ v2, alors	2
c2	0,7	si \geq c2, alors	2	si \leq v1, alors	1
c3	0,55	si \geq c3, alors	1	si \leq v2, alors	0 ou 1
		si $<$ c3, alors	0		

C(ab) transposé

		1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	3	1
2	1	0	0	0	1	1
3	1	0	0	0	1	3
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0

dj(ab)-critère 1

		1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0
3	1	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	1	0

dj(ab)-critère 2

		1	2	3	4	5
1	0	0	1	1	0	1
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	1	0	1
5	0	0	1	1	0	0

dj(ab)-critère 3

		1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	1	1	1
3	1	0	0	0	1	1
4	1	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0

dj(ab)-critère 4

		1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

dj(ab)-critère 5

		1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

dj(ab)-critère 6

		1	2	3	4	5
--	--	----------	----------	----------	----------	----------

	1	0	0	0	1	1
	2	1	0	1	1	1
	3	1	0	0	1	1
	4	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
dj(ab)≤v2						
	1	2	3	4	5	
1	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
2	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
3	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
4	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
5	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
dj(ab)≤v1						
	1	2	3	4	5	
1	VRAI	FAUX	FAUX	FAUX	FAUX	FAUX
2	FAUX	VRAI	FAUX	FAUX	FAUX	FAUX
3	FAUX	VRAI	VRAI	FAUX	FAUX	FAUX
4	FAUX	FAUX	FAUX	VRAI	FAUX	FAUX
5	FAUX	FAUX	FAUX	FAUX	VRAI	VRAI
C(ab)						
	1	2	3	4	5	
1	0	1	1	0	0	
2	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	
4	3	1	1	0	1	
5	1	1	3	0	0	
surclassement						
	1	2	3	4	5	
1	0	1	1	0	0	
2	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	
4	2	1	1	0	1	
5	1	1	2	0	0	

Le rangement se fait ensuite selon le logiciel MCDM

ELECTRE II - analyse de sensibilité avec tableur

Résultats de l'analyse de sensibilité sur les facteurs de concordance - Contexte 1 poids

w1= 20%	v1= etendue
w2= 20%	v2= etendue
w3= 20%	
w4= 0%	
w5= 20%	
w6= 20%	0,5<c3<c2<c1≤1,0

variation c1
0,52<c1<0,99 451(23) aucune influence

variation c2
0,51<c2<0,98 451(23) aucune influence

variation c3

0,5<c3<0,6	451(23)
0,6<c3<0,8	(45)2(13)
0,8<c3<0,99	incomparable

Résultats de l'analyse de sensibilité sur les facteurs de discordance - Contexte 1

c1= 0,8

c2= 0,7

c3= 0,6

0 < v1 < v2 ≤ étendue des résultats

critère 1

étendue =	3
<u>variation v1</u>	
1<v1<3	451(23)
<u>variation v2</u>	
v2 = 1	4(51)(23)
2 ≤ v2	451(23)

critère 2

étendue =	15
<u>variation v1</u>	
1<v1<15	451(23)
<u>variation v2</u>	
v2 = 1	incomparable
2<v2<5	(45)2(13)
6<v2<7	4(52)(13)
8<v2<14	45(213)
15 ≤ v2	451(23)

critère 3

étendue =	24 368
<u>variation v1</u>	
1<v1<25000	451(23)
<u>variation v2</u>	
v2 < 7338	4(15)(23)
7338 ≤ v2	451(23)

critère 5

étendue =	2 324
<u>variation v1</u>	
1<v1<2500	451(23)
<u>variation v2</u>	
v2 < 1250	(45)(123)
1250 ≤ v2 < 1554	45(123)
1554 ≤ v2 < 1770	45123
1770 ≤ v2	451(23)

critère 6

étendue =	9 387
<u>variation v1</u>	
1<v1<10000	451(23)
<u>variation v2</u>	
1<v2<10000	451(23)

Résultats de l'analyse de sensibilité sur les poids des critères - Contexte 1

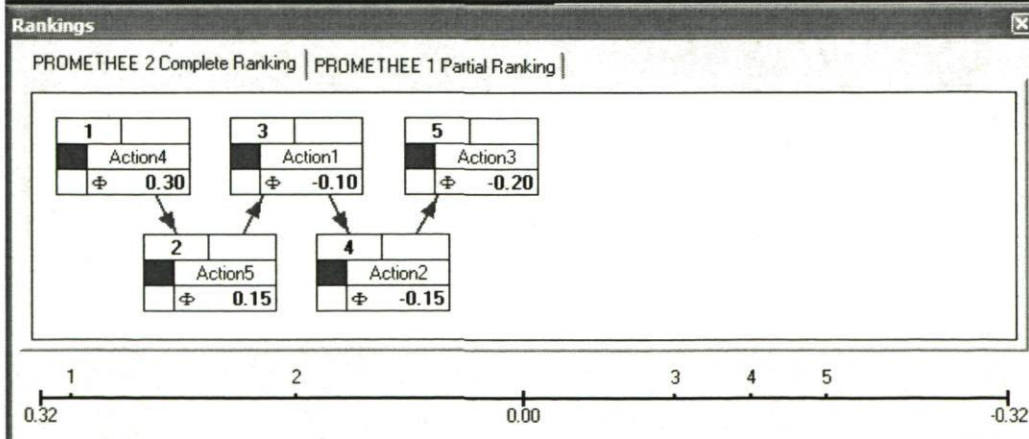
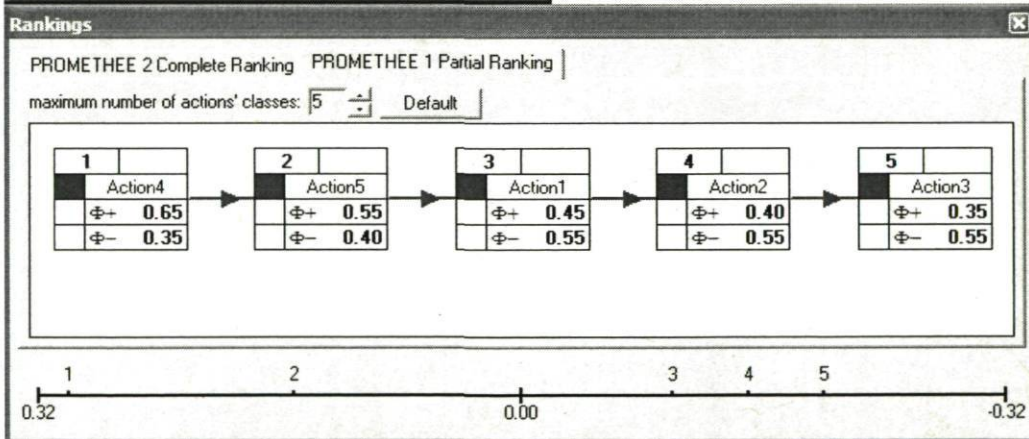
weight of criterion 1	final ranking	weight of criterion 2	final ranking	weight of criterion 3	final ranking
w ₁ =0%	5, 4, 3 1 2	w ₂ =0%	4, (1-5), (2-3)	w ₃ =0%	(2-4-5), (1-3)
0%<w ₁ <34%	4, 5 1, (2-3)	0%<w ₂ <34%	4, 5 1, (2-3)	0%<w ₃ <33%	4, 5 1, (2-3)
34%<w ₁	4 1 2, 5, 3	34%<w ₂	(2-3), 5, 4 1	33%<w ₃ <50%	4 1, 5, (2-3)
				50%<w ₃	1, 4, 5, (2-3)

PROMETHEE avec Decision Lab (version démo 1.01.0386)
 contexte1

	Criterion1	Criterion2	Criterion3	Criterion4	Criterion5	Criterion6
Min/Max	Maximize	Maximize	Minimize	Minimize	Minimize	Minimize
Weight	20.0000	20.0000	20.0000	0.0000	20.0000	20.0000
Preference Funct	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Indifference Thres	-	-	-	-	-	-
Preference Thres	-	-	-	-	-	-
Gaussian Threshi	-	-	-	-	-	-
Threshold Unit	Absolute	Absolute	Absolute	Absolute	Absolute	Absolute
Unit	-	OITC	SCAN	SCAN	SCAN	Kg Co2
Action1	2	25	16406	0	7729	5495
Action2	1	40	40774	0	5959	11840
Action3	0	40	34962	0	6175	9305
Action4	3	26	21594	0	6655	2453
Action5	0	32	23744	0	5405	3149

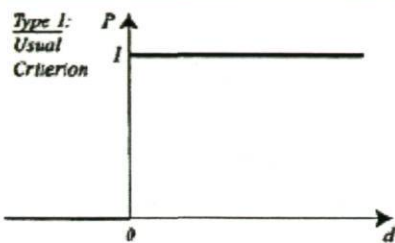
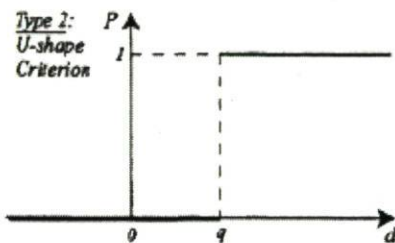
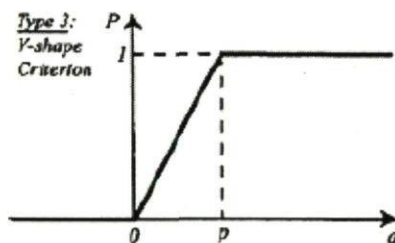
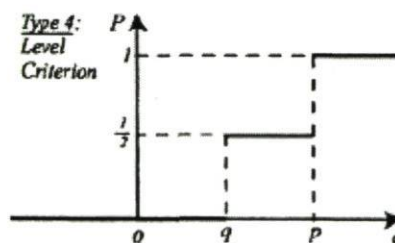
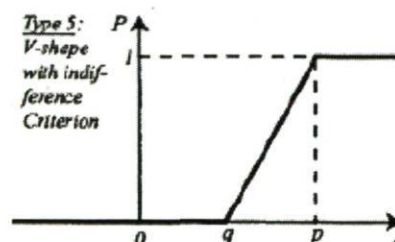
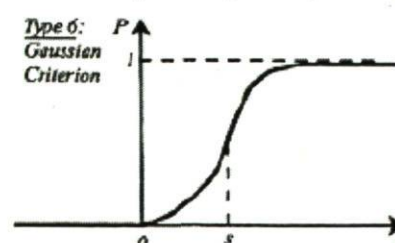
Preference Flows

	$\Phi+$	$\Phi-$	Φ
Action1	0.4500	0.5500	-0.1000
Action2	0.4000	0.5500	-0.1500
Action3	0.3500	0.5500	-0.2000
Action4	0.6500	0.3500	0.3000
Action5	0.5500	0.4000	0.1500



PROMETHEE avec Decision Lab (version démo 1.01.0386)

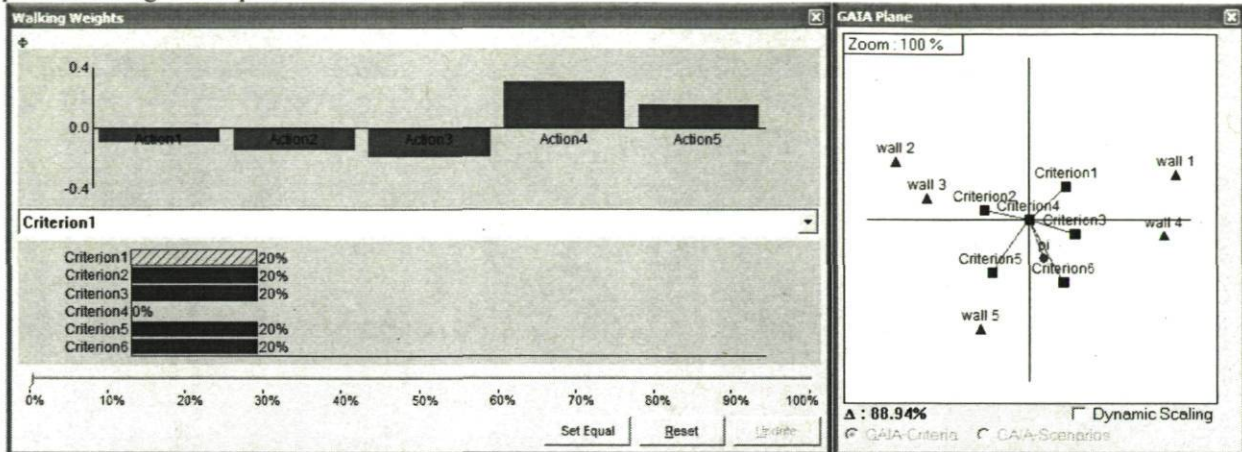
Fonctions de préférence proposées (tiré de BRANS, J.-P. & MARESCHAL, B. 2005)

Generalised criterion	Definition	Parameters to fix
<p>Type 1: Usual Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	-
<p>Type 2: U-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
<p>Type 3: V-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
<p>Type 4: Level Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
<p>Type 5: V-shape with indif- ference Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
<p>Type 6: Gaussian Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

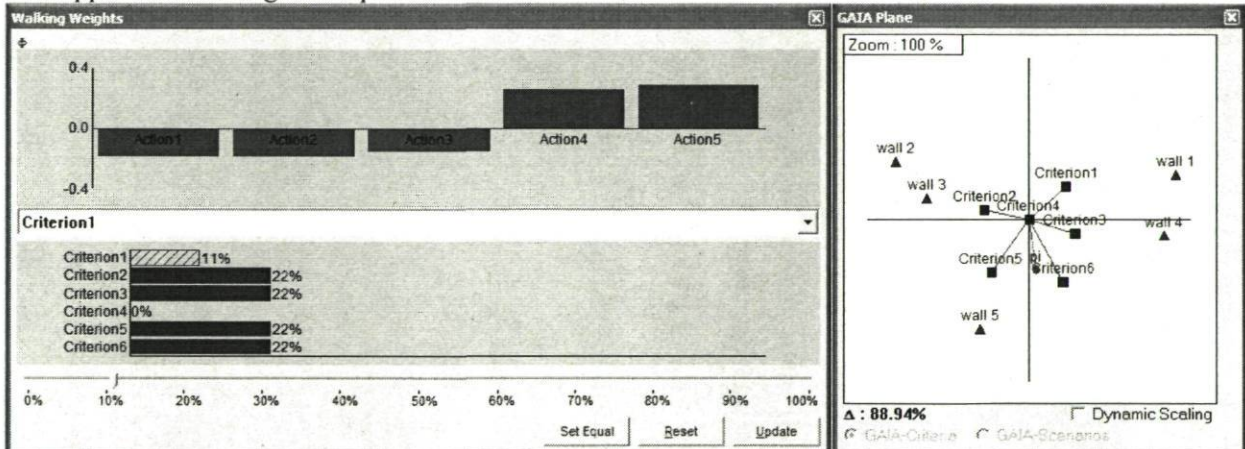
PROMETHEE avec Decision Lab (version démo 1.01.0386)

Aperçu de l'analyse de sensibilité sur le poids accordé au critère 1 dans le contexte 1

Au départ le poids du critère est de 20%, le mur 4 est préféré. Sur la plan GAIA, l'indicateur "pi" est plus prêt du triangle indiquant le mur 4.



Si le poids du critère est descendu à 11%, le mur 5 est alors préféré. Sur le plan GAIA, l'indicateur "pi" s'est rapproché du triangle indiquant le mur 5.



Si le poids du critère est augmenté, le mur 4 reste toujours au premier rang mais le mur 1 est alors au deuxième rang. Sur le plan GAIA, l'indicateur "pi" s'est rapproché du triangle indiquant le mur 1.

