

Développement d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un processus de conception intégrée

par

Alexandre DAOUST

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE, CONCENTRATION ÉNERGIES
RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 25 OCTOBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Alexandre Daoust, 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Danielle MONFET, directrice de mémoire
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel FORGUES, codirecteur de mémoire
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw KAJL, président du jury
Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mathias GLAUS, membre du jury
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 25 SEPTEMBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La complétion de ce mémoire de maîtrise a nécessité énormément d'efforts et de rigueur, mais n'aurait pas été possible sans le support de plusieurs personnes qui m'ont entouré et supporté durant les deux dernières années

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice et codirecteur de recherche Mme. Danielle Monfét et M. Daniel Forgues pour votre encadrement, support et précieux conseils.

Je remercie le GRIDD, Groupe de Recherche en Intégration et Développement Durable, de m'avoir accueilli dans son équipe de recherche et de m'avoir permis de bénéficier du grand bassin d'expertise s'y rattachant, ainsi que de son grand réseau de contacts et de partenaires. À cet effet, je remercie Isabelle Jutras pour son aide dans la révision de mon mémoire. Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux partenaires ayant participé à cette recherche et accepté d'intégrer un volet recherche à leurs activités. Je remercie donc la Ville de Montréal, M. Patrice Poulin, la Société québécoise des infrastructures, Espace pour la vie, Mme. Glenda Rivera ainsi que l'UQAM et M. Mark Poddubiuk.

Merci à mes compagnons aux cycles supérieurs Aida, Maxime et Marie-Hélène, vous avez su agrémenter ce parcours.

Finalement, je tiens à remercier mes proches sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Merci, à mes amis et anciens camarades d'étude pour m'avoir encouragé lors de ce cheminement. Je remercie particulièrement ma famille pour leur support et leur encouragement sans faille. Enfin, je dédie un merci tout spécial à Marilyse, ma douce, pour son aide dans la rédaction de ce mémoire et son support inconditionnel.

DÉVELOPPEMENT D'UN CADRE D'UTILISATION D'OUTILS DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE AU SEIN D'UN PROCESSUS DE CONCEPTION INTÉGRÉE

Alexandre DAOUST

RÉSUMÉ

Le processus de conception intégrée (PCI) est reconnu pour favoriser la conception de bâtiments visant une meilleure performance. Ce processus encourage la collaboration au sein de l'équipe de conception pour la formulation de solutions synergiques et innovantes menant entre autres à une performance énergétique améliorée à moindre coût. Néanmoins, il est observé dans la pratique que les professionnels s'appuient peu sur la comparaison d'options issue de l'utilisation d'outils de simulation énergétique pour la sélection de la solution la plus pertinente. En général, l'utilisation des outils de simulation énergétique se limite à valider l'atteinte d'une certification en bâtiment durable en fin de conception. Pourtant, les avancées technologiques permettent, dès les phases initiales du PCI, de comparer différentes options et de développer de meilleures stratégies énergétiques.

Pour encourager l'utilisation des outils de simulation énergétique au sein d'un PCI, un cadre d'utilisation de ceux-ci est proposé. Ce cadre s'appuie à la fois sur des pratiques documentées dans la littérature et sur des observations réalisées sur des projets réels en PCI. Il définit un processus facilitant la prise de décision collaborative, au sein d'un PCI, par l'utilisation de la simulation énergétique pour comparer divers options et scénarios. Le cadre proposé a aussi fait l'objet d'une mise en application à l'intérieur d'un cours universitaire portant sur le PCI. Cette mise en application a permis d'illustrer le potentiel du cadre proposé pour assister le processus d'utilisation des outils de simulation énergétique au sein d'un PCI et ainsi améliorer la performance énergétique des bâtiments.

Mots-clés : Processus de conception intégrée (PCI), outils de simulation énergétique, performance énergétique, bâtiment durable.

DEVELOPMENT OF A FRAMEWORK FOR THE USE OF ENERGY SIMULATION TOOLS WITHIN AN INTEGRATED DESIGN PROCESS

Alexandre DAOUST

ABSTRACT

The Integrated Design Process (IDP) is recognized to enhance the design of buildings with improved performance. This process encourages collaboration within the design team to develop synergistic and innovative solutions, including improved energy performance at lower cost. Nevertheless, it is observed in practice that professionals rely sparsely on the comparison of options resulting from the use of energy simulation tools for the selection of the most relevant solutions. In general, the use of energy simulation tools is limited to validating that the requirements of a sustainable building certification are met at the end of the design. Yet technological advancement allows us to compare different options and develop better energy strategies from the early design phases.

To encourage the use of energy simulation tools within IDP, a framework for the use of energy simulation tools is proposed. This framework is based on both documented practices in the literature and observations of actual IDP projects. It defines a process that facilitates collaborative decision making, within an IDP, by using energy simulation to compare various options and scenarios. This proposed framework has also been implemented within a university course on IDP. This implementation has illustrated the potential of the proposed framework to assist the process of using energy simulation tools within IDP and thus improving the energy performance of buildings.

Keywords: Integrated design process (IDP), energy simulation tools, energy performance, sustainable buildings.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Mode de conception traditionnel versus intégrée	5
1.1.1 Description générale de la conception intégrée (CI).....	8
1.1.2 Description générale du processus de conception intégrée (PCI).....	9
1.1.3 Approches de PCI proposées	12
1.1.4 Charrettes de conception.....	14
1.1.4.1 Enjeux du travail collaboratif.....	17
1.1.4.2 Efficacité du travail collaboratif	20
1.2 Amélioration de la performance énergétique des bâtiments.....	21
1.2.1 Stratégies passives	24
1.2.2 Stratégies actives.....	25
1.2.3 Production d'énergie renouvelable	26
1.2.4 Bâtiments Net Zéro.....	27
1.3 Outils de simulation énergétique du bâtiment dans la conception.....	29
1.3.1 Codes de référence.....	30
1.3.2 Utilisation d'outils de simulation énergétique sur un PCI.....	31
1.3.3 Paramètres de simulation énergétique	33
1.3.4 Sélection des outils de simulation.....	35
1.3.5 Approches d'utilisation d'outils de simulation en PCI.....	36
1.4 Perspectives.....	38
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	41
2.1 Méthodologie de la recherche.....	41
2.2 Investigation des pratiques.....	42
2.2.1 Identification de la problématique	42
2.2.2 Identification des cas d'étude en PCI.....	42
2.2.3 Analyse des résultats d'observations	45
2.3 Développement du cadre d'utilisation	46
2.4 Application et évaluation du cadre d'utilisation	46
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSES DES OBSERVATIONS	51
3.1 Déroulement et particularités des projets observés.....	51
3.1.1 Descriptifs des PCI	52
3.1.1.1 PCI 1	52
3.1.1.2 PCI 2	54
3.1.1.3 PCI 3	55
3.1.2 Composition des équipes de conception.....	56
3.1.3 Distribution des rencontres de CI au cours du processus	57
3.1.4 Utilisation de la simulation énergétique	58

3.1.5	Sommaire des particularités des projets observés.....	60
3.2	Résultats des études de cas	61
3.2.1	Distributions des sujets au cours des charrettes.....	61
3.2.2	Distributions des efforts au cours des charrettes.....	63
3.2.3	Distribution de la participation au cours du processus	68
3.3	Analyse	70
CHAPITRE 4	CADRE PROPOSÉ D'UTILISATION D'OUTILS DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE AU SEIN D'UN PCI.....	73
4.1	Présentation du cadre proposé	73
4.2	Planification et déroulement proposé.....	76
4.2.1	Préconception.....	76
4.2.1.1	Modélisation de préconception	77
4.2.1.2	1 ^{ère} Rencontre de coordination.....	78
4.2.2	Esquisse.....	78
4.2.2.1	1 ^{ère} Simulation préparatoire (Bioclimatique)	78
4.2.2.2	1 ^{ère} charrette (Emplacement et volumétrie)	79
4.2.3	Dossier préliminaire.....	80
4.2.3.1	2 ^e Simulation préparatoire (Systèmes passifs).....	80
4.2.3.2	2 ^e charrette (Matériaux et enveloppe).....	81
4.2.3.3	3 ^e Simulation préparatoire (Systèmes actifs).....	82
4.2.3.4	3 ^e charrette (Systèmes mécaniques et sources d'énergie).....	83
4.2.3.5	Simulation complète	84
4.2.3.6	2 ^e Rencontre de coordination.....	85
4.3	Limites du cadre d'utilisation proposé.....	85
4.4	Outils suggérés.....	86
CHAPITRE 5	APPLICATION DU CADRE PROPOSÉ	87
5.1	Présentation du cadre proposé ajusté	88
5.2	Évaluation de l'application du cadre proposé.....	90
5.2.1	Processus préparatoire à la charrette 1	90
5.2.2	Charrette 1.....	91
5.2.3	Charrette 2.....	94
5.3	Bilan de l'utilisation du cadre proposé	96
CHAPITRE 6	DISCUSSION	99
CONCLUSION	107
ANNEXE I	APPROCHE DE PCI DE LARSSON.....	111
ANNEXE II	LISTE D'OUTILS DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE	115
ANNEXE III	GRILLE D'OBSERVATION DE PCI (SOCIOGRAMME).....	121
ANNEXE IV	GRILLE D'OBSERVATION DU GROUPE TÉMOIN.....	123

ANNEXE V QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION DES CHARRETTES.....125

ANNEXE VI QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE129

ANNEXE VII ARTICLE DE CONFÉRENCE131

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....133

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Présentation des approches et des processus de CI.....	9
Tableau 1.2	Indentification des potentiels de réduction énergétique du bâtiment selon le niveau de conception architectural	23
Tableau 1.3	Caractéristiques d'un bâtiment Net Zéro	28
Tableau 1.4	Paramètres à simuler dans les phases de conception initiales.....	34
Tableau 2.1	Résumé du contenu de la grille d'observation d'étude de cas	44
Tableau 2.2	Rôles et mandats des participants aux charrettes du cours portant sur la CI.....	48
Tableau 2.3	Résumé du contenu de la grille d'observation du groupe témoin.....	49
Tableau 3.1	Composition des équipes des projets observés	57
Tableau 3.2	Utilisation de la simulation énergétique sur les projets observés	59
Tableau 3.3	Sommaire des particularités des projets observés.....	61
Tableau 3.4	Proportion et fréquence d'occurrences des tâches au cours des charrettes du PCI.....	66
Tableau 4.1	Présentation des étapes du cadre d'utilisation	75
Tableau 5.1	Grille d'observation et des constats du processus préparatoire à la charrette 1.....	90
Tableau 5.2	Grille d'observation et des constats de la charrette 1	91
Tableau 5.3	Grille d'observation et des constats de la charrette 2	95
Tableau 5.4	Grille d'entrevues à la suite des charrettes 1 et 2.....	98

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Distribution des efforts et impact d'une décision au cours d'un processus de conception.....	7
Figure 1.2	Organisation des intervenants en PCI.....	14
Figure 1.3	Distribution de la consommation énergétique pour le secteur du bâtiment au Québec.....	22
Figure 1.4	Utilisation de la simulation énergétique en conception	32
Figure 2.1	Phases et étapes de la recherche.....	42
Figure 3.1	Déroulement et composition du PCI 1	53
Figure 3.2	Déroulement et composition du PCI 2.....	54
Figure 3.3	Déroulement et composition du PCI 3.....	55
Figure 3.4	Proportion du temps passé par sujet par PCI	62
Figure 3.5	Distribution du temps passé par sujet par charrettes.....	63
Figure 3.6	Répartition des tâches au cours des charrettes du PCI.....	64
Figure 3.7	Répartition des tâches au cours des charrettes du PCI selon les sujets traités.....	65
Figure 3.8	Distribution des tâches au cours des charrettes du PCI	67
Figure 3.9	Proportion de la participation par spécialité au cours des charrettes traitant principalement de la performance énergétique du projet	69
Figure 4.1	Cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI	73
Figure 4.2	Flot d'informations nécessaires à la première rencontre de coordination et à la première charrette.....	77
Figure 4.3	Flot d'informations nécessaires à la deuxième charrette	81
Figure 4.4	Flot d'informations nécessaires à la troisième charrette.....	83

Figure 4.5	Flot d'informations nécessaires à la deuxième rencontre de coordination	84
Figure 5.1	Cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique ajusté au PCI du cours	88
Figure 5.2	Distribution des réponses du questionnaire 1	93
Figure 5.3	Distribution des réponses du questionnaire 2	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building Information Modeling
BEM	Building Energy Modeling
CI	Conception Intégrée
CT	Conception Traditionnelle
CMNÉB	Code Modèle National de l'Énergie pour les Bâtiments
CNEB	Code National de l'Énergie pour les Bâtiments
CVCA	Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'Air
ÉTS	École de Technologie Supérieure
iiSBE	International Initiative for Sustainable Built Environment
IUE	Intensité d'Utilisation Énergétique
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MEBD	Méthode d'Évaluation de Bâtiment Durable
PCI	Processus de Conception Intégrée
PCT	Processus de Conception Traditionnelle
PFT	Programme Fonctionnel et Technique
RSI	Retour Sur Investissement
UQAM	Université du Québec à Montréal

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

kWh	Kilowatt heure
kBtu/pi ² ·an	Kilo Btu par pied carré par année
GJ/m ² ·an	Giga Joules par mètre carré par année
kWh/m ² ·an	Kilowattheure par mètre carré par année

INTRODUCTION

Compte tenu des grands enjeux énergétiques mondiaux de plus en plus importants, il devient nécessaire de miser sur une performance énergétique améliorée pour la conception, la construction et l'opération des bâtiments (Whitmore et Pineau, 2016). D'ailleurs, la demande pour des bâtiments affichant une performance énergétique améliorée est croissante au Canada, notamment au Québec. En effet, les professionnels prévoient une augmentation de la proportion des contrats concernant des bâtiments affichant une performance énergétique améliorée : elle serait de l'ordre de 60 % en 2017 par rapport à 30 % en 2014 (McGrawHill., 2014). Également, les sommes investies dans la construction de ce type d'ouvrages ont bondi de 30 % pour la période 2011–2013 au Canada (McGrawHill., 2014).

Malgré cette perspective encourageante, les projets qui visent des cibles de performance énergétique représentent néanmoins des défis en termes de conception et d'innovation. L'atteinte de ces cibles requiert, dès les phases initiales de conception, des efforts d'itération du concept et l'utilisation d'outils de simulation énergétique (Lindsey, 2007). Le processus de conception couramment utilisé par l'industrie, le mode traditionnel, n'est pas considéré comme optimal pour atteindre un haut niveau d'efficacité énergétique en raison de sa structure linéaire et de la fragmentation des mandats des professionnels (Cole, 2007; Zimmerman, 2006). En effet, le travail séquentiel de conception utilisé en mode traditionnel par les professionnels rend difficile la mise en place des procédés itératifs d'évolution du concept dans un but d'amélioration énergétique du projet.

Pour arriver à atteindre des cibles énergétiques, un autre mode de conception du bâtiment est préconisé ; il s'agit du processus de conception intégrée (PCI). Ce processus exige entre autres de rassembler, dès les phases initiales de la conception, tous les intervenants clés du projet autour d'ateliers de travail intensif appelés charrettes. Le PCI vise à créer un contexte favorable à la collaboration, au développement itératif du concept et à l'élaboration de stratégies d'efficacité énergétique (Busby, 2007; Reed, 2009). Il est maintenant de plus en plus reconnu que le PCI est un gage de succès et serait dans certains cas essentiel à

l'élaboration de projets visant un haut niveau d'efficacité énergétique (Knapp, Guénard et Kerrigan, 2014).

Les efforts d'innovation et de collaboration, dans les phases initiales du PCI, visent entre autres à générer des solutions comportant un assemblage optimal des composantes et des systèmes du bâtiment pour offrir la meilleure performance. Un moyen efficace d'évaluer des solutions proposées par l'équipe de conception pendant les charrettes est l'utilisation d'outils de simulation énergétique (Larsson, 2009). Ces outils ont un grand potentiel pour l'évaluation des différentes options et peuvent améliorer la qualité des décisions en fournissant des données de comparaison quantifiables. Toutefois, deux problèmes importants peuvent être soulevés au sein du PCI : (1) la faible utilisation des outils de simulation énergétique et (2) l'utilisation tardive de ces outils dans le PCI. Ils sont habituellement employés quand la conception est avancée et que les décisions affectant la performance sont déjà prises (Hemsath, 2013). Ils sont souvent utilisés pour valider l'atteinte d'une certification en fin de conception alors qu'ils devraient être utilisés pour évaluer la performance des solutions de l'équipe de conception. Les résultats et les analyses issues de ces outils n'apportent ainsi que peu d'impacts ou d'améliorations du concept lors des phases initiales du processus (Bambardekar et Poerschke, 2009). Un processus de conception intégrée favorisant l'utilisation des outils de simulation énergétique permettrait aux concepteurs d'évaluer et de comparer plusieurs options afin de choisir celles offrant la meilleure solution d'efficacité énergétique à un coût compétitif.

La question de recherche est donc la suivante : *Comment intégrer dans le PCI les outils de simulation énergétique pour améliorer la performance énergétique du bâtiment ?*

Il n'existe pas de cadre détaillé dans la littérature scientifique encourageant l'utilisation d'outils de simulation au cours d'un PCI. De ce constat émerge l'objectif principal de ce mémoire : établir un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI afin de favoriser la conception de bâtiments performants. Ce cadre est établi de façon à s'inscrire dans les pratiques actuelles de l'industrie québécoise en ce qui a trait au PCI. Les

deux objectifs secondaires sont : 1) d'analyser le niveau et le mode d'utilisation de la simulation énergétique dans un PCI dans l'industrie, et 2) d'évaluer la mise en application du cadre d'utilisation proposé sur un groupe témoin représentatif de la réalité industrielle.

La démarche de recherche utilisée pour bâtir ce cadre s'appuie sur l'étude de nombreuses publications scientifiques et d'observations basées sur des projets réels. La démarche proposée a permis d'observer le déroulement du PCI et d'identifier les paramètres d'efficacité énergétique importants au processus. Finalement, une application de ce cadre d'utilisation a été testée dans le cadre d'un cours universitaire. Un des objectifs de cette démarche vise à vérifier le potentiel d'application de la proposition du cadre dans un PCI en ayant recours à l'utilisation d'outils de simulation énergétique pour assister l'équipe de conception intégrée dans la prise de décisions.

Ce mémoire de recherche est structuré autour de six chapitres. Le chapitre 1 dresse une revue de la littérature sur la conception intégrée, l'efficacité énergétique du bâtiment et les outils de simulation énergétique. Le chapitre 2 décrit la méthodologie de recherche nécessaire à la définition des objectifs de la recherche, de la collecte de données et l'application des résultats. Le chapitre 3 identifie et analyse les constats basés sur l'observation de projets réels en PCI. Le chapitre 4 propose un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI. Le chapitre 5 présente les résultats et l'évaluation de l'application de ce cadre d'utilisation auprès d'un groupe académique. Enfin, le chapitre 6 présente une discussion sur l'utilisation de ce cadre dans un PCI pour l'industrie et les principales recommandations s'y rattachant.

La principale contribution de ce mémoire est un cadre encourageant une meilleure utilisation des outils de simulation énergétique au sein d'un PCI dans une optique de concevoir des bâtiments présentant une meilleure performance énergétique à coût compétitif.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La distribution des investissements effectués sur un bâtiment commercial et institutionnel au cours de sa vie utile est la suivante : 5% dans sa planification et sa conception, 20% dans sa construction et 75% dans son exploitation et sa maintenance (MIQCP, 2006). Il est compréhensible que des efforts déployés au cours d'une conception plus intensive soient orientés vers un objectif de diminution de la consommation énergétique du bâtiment, principal facteur de ses coûts opérationnels et de son impact environnemental (Office de l'efficacité énergétique, 2015). L'utilisation d'un processus de conception intégrée, les connaissances acquises dans le milieu de l'efficacité énergétique et l'utilisation d'outils de simulation énergétique et de modélisation sont des facteurs facilitant la conception de bâtiments performants (Löhnert, 2003).

Ce chapitre présente d'abord une description des processus de conception traditionnelle et intégrée. La deuxième partie traite ensuite de l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Enfin, la dernière partie présente l'utilisation et le potentiel des outils de simulation énergétique en conception.

1.1 Mode de conception traditionnel versus intégrée

Le mode de conception traditionnel d'un bâtiment comprend habituellement les phases de préconception, d'esquisse, de dossier préliminaire et de dossier définitif (Institut Royal d'Architecture du Canada, 2009). Ces quatre phases sont détaillées par le code de pratique de l'architecte et reconnues dans la pratique au Canada (Institut Royal d'Architecture du Canada, 2009). La phase de préconception vise à établir les fondements du projet selon les besoins du client, et de les traduire en exigences dans un Programme Fonctionnel et Technique (PFT). La phase d'esquisse est l'étape du design où les exigences du PFT sont interprétées dans une géométrie sous forme d'esquisses. La configuration spatiale, la volumétrie et la composition architecturale du bâtiment y sont explorées pour déterminer

l'option qui répond à la fois aux aspirations du client et aux exigences du PFT. C'est dans la phase du dossier préliminaire que les décisions les plus importantes touchant la performance énergétique seront prises : orientation et volumétrie, performance de l'enveloppe, configuration des ouvertures (fenestration) et conceptualisation des systèmes. La phase du dossier définitif vise à détailler les composantes du bâtiment et ses systèmes, tels que le dimensionnement de l'enveloppe et des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA). Elle représente aussi l'étape du projet où sont produits les plans et devis aux fins de construction.

Ce mode de conception traditionnelle (CT) est caractérisé par une division du travail en lots et par spécialités. L'intervention séquentielle des professionnels selon l'avancement du concept en fait un processus linéaire et fragmenté (Zimmerman, 2006). Enfin, seuls les architectes sont habituellement mobilisés dans les phases initiales du projet, l'intervention des autres professionnels étant amorcée à la fin du dossier préliminaire ce qui cause un manque de collaboration entre les professionnels. Un des principaux manques de collaboration entre les disciplines en CT concerne l'architecte et l'ingénieur. Les ingénieurs mécaniques arrivent ordinairement aux étapes de développement du design et de la production des documents aux fins de construction lorsque le dimensionnement des systèmes CVCA est requis. Sur le plan de la performance énergétique, cela n'est pas favorable, car l'architecte a déjà établi le concept du projet sans être informé de son impact sur les systèmes CVCA, et sur la manière dont il aurait pu réduire leurs dimensionnements. En CT, l'ingénieur mécanique est généralement exclu des phases de préconception et d'esquisse. Lorsqu'il est appelé à introduire des stratégies d'efficacité énergétique, les décisions importantes ont déjà été prises.

Il est proposé par plusieurs auteurs d'adresser une partie de ces problèmes par une conception intégrée (CI) (Busby, 2007; Cole, 2007; Larsson, 2009). La CI consiste en un mode de conception collaboratif qui regroupe, dès les phases initiales de la conception, les intervenants clés au cours d'ateliers intensifs de conception appelés charrettes (Cole, 2007). De plus, la CI permet un développement du projet par une succession d'itérations du concept.

La principale différence entre la CT et la CI apparaît au niveau de la concentration des efforts au cours des phases de conception (CURT, 2004). La figure 1.1 présente la distribution des efforts au cours des phases de conception entre la CT (courbe 3) et la CI (courbe 4).

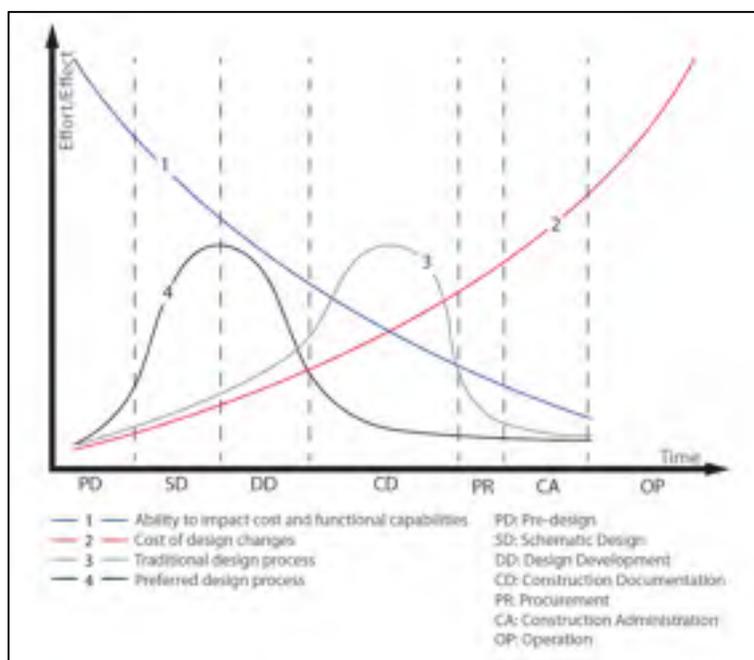


Figure 1.1 : Distribution des efforts et impact d'une décision au cours d'un processus de conception
Tiré de CURT (2004)

Une répartition stratégique des efforts de l'équipe de conception au cours des différentes phases du processus est nécessaire afin de favoriser l'atteinte de la performance énergétique désirée et que les stratégies proposées fonctionnent à leur plein potentiel. L'approche séquentielle de la CT (courbe 3) regroupe progressivement les ressources et les intervenants au cours du processus de conception. Le gros de l'effort se fait au moment où ces efforts apportent le moins de bénéfices sur le projet et que les coûts associés au changement sont les plus élevés. À l'inverse, la CI (courbe 4) permet une concentration des efforts et des ressources en début de conception, principalement pendant les phases de l'esquisse et du dossier préliminaire. La concentration de tous les spécialistes en amont crée un contexte favorable pour établir des synergies concernant les stratégies développées lors de la

conception et ainsi maximiser l'impact des solutions proposées pour augmenter la performance du projet à moindre coût (CURT, 2004; Forgues et Dionne, 2014).

Cela s'explique qu'en conception, plus une décision est prise de façon tardive dans le processus moins elle aura d'impact sur le projet. La figure 1.1 présente également l'impact d'une décision ou d'une stratégie prise au cours du processus de conception (courbe 1 et courbe 2). Effectivement, en fonction de l'avancement du projet, plus une décision est prise en aval dans le processus de conception, plus elle entraînera des délais et elle obligera une chaîne successive de changements (Forgues et Dionne, 2014). De plus, il sera plus onéreux de l'implanter.

De plus, les efforts en CT sont habituellement centrés sur les procédures de construction, les règles de l'art et les aspects techniques dits les aspects « hard ». Les aspects dits « soft » représentant l'innovation, l'idéation, la création et la collaboration sont ignorés au cours d'un mode de CT (Smulders, Lousberg et Dorst, 2008). Ces aspects « soft » sont pourtant déterminants à un processus d'innovation et d'amélioration énergétique. Une CI peut favoriser la manifestation de ces aspects au sein d'une équipe de conception (Cole, 2007).

1.1.1 Description générale de la conception intégrée (CI)

La conception intégrée (CI) se définit comme l'ensemble des efforts déployés par les professionnels au sein d'une équipe de conception afin de concevoir le projet dans son ensemble selon une vision holistique du projet et de ses systèmes (Busby, 2007). Deux approches principales sont suivies en conception intégrée : l'approche intégrée et l'approche intégrative. L'approche intégrée vise à améliorer la performance du bâtiment et ainsi à diminuer son impact dans l'environnement. Pour sa part, l'approche intégrative ne vise pas seulement à diminuer l'impact du bâtiment dans son environnement, mais bien de régénérer et de restaurer les écosystèmes dans lequel le bâtiment se trouve (Reed, 2009). Également, la CI peut être encadré selon deux processus : collaboratif et prescriptif. Un CI suivant un processus collaboratif signifie que le processus de conception est établi par l'équipe de

conception en fonction des particularités du projet identifiées par l'équipe et par consensus. À l'inverse, un CI suivant un processus prescriptif ou PCI (processus de conception intégrée) suivra une approche formalisée sous forme d'un chaîne de processus, méthodes et outils (Löhnert, 2003). Le tableau 1.1 indique où se situe les principaux guides de la littérature portant sur la CI et le PCI selon leurs processus et approches.

Tableau 1.1 : Présentation des approches et des processus de CI

	Approche Intégrée	Approche Intégrative
Processus collaboratif	Busby (2007)	Reed (2009)
Processus prescriptif	Löhnert (2003) Zimmerman (2006) Larsson (2009)	

Le processus de conception intégrée (PCI) représente donc l'ensemble des processus qui encadrent la CI dans le déroulement des rencontres de coordination, de charrettes et de boucles d'itération du concept. Également, il se poursuit à travers l'ensemble du cycle de vie du projet.

1.1.2 Description générale du processus de conception intégrée (PCI)

Il n'existe pas de définition précise du PCI, mais beaucoup s'entendent pour dire que ce processus favorise la collaboration au sein de l'équipe de conception et l'itération du concept, basé sur des objectifs de performances (Busby, 2007; Cole, 2007; Larsson, 2009). La définition retenue dans ce mémoire est dérivée de celle formulée par Busby (2007) et l'International Initiative for Sustainable Built Environment (iiSBE), (iiSBE, 2004), une organisation internationale qui a pour but de promouvoir la pratique du développement durable principalement pour le secteur des bâtiments :

« Le processus de conception intégrée (PCI) est un processus de conception permettant par sa structure d'impliquer dès les phases initiales de la conception les parties intéressées à l'optimisation du concept et proposant des boucles d'itération. Ce processus n'est pas différent du processus de conception traditionnel (PCT) dans le déroulement des phases de conception, mais engage l'équipe à participer à des charrettes de conception intensive afin d'obtenir une meilleure collaboration entre les professionnels et de rechercher une complémentarité dans la conceptualisation des systèmes du projet. Ce mode de conception vise à assister l'équipe de conception à penser de façon holistique quant à l'adoption de stratégie de performance améliorée du bâtiment. Ce processus permet d'éviter l'élaboration de solutions sous-optimales et favorise la conception de bâtiment à haute performance. »

Le PCI a été introduit au Canada dans les années 1990 par le ministère des Ressources naturelles du Canada avec le programme C2000. Les objectifs du programme visaient notamment une amélioration de la performance énergétique du bâtiment, de l'empreinte environnementale et de son opérabilité (Zimmerman, 2006). L'utilisation de la conception intégrée était exigée auprès des entreprises participantes au programme. À terme, les projets ayant adhéré au programme ont présenté un design performant et ont respecté le budget alloué à la conception de plus ou moins 10%. Des interventions portées en début du cheminement de conception telle que l'amélioration de la résistance thermique de l'enveloppe et de son étanchéité, l'utilisation de vitrages performants et des stratégies d'économie en intégrant de l'éclairage naturel, ont permis d'améliorer l'efficacité du bâtiment. Ces interventions bien intégrées dans le concept ont entraîné une réduction du dimensionnement des systèmes et des coûts opérationnels des bâtiments. Larsson (2009) explique que les projets du programme C2000 ayant suivi un PCI obtenaient une performance énergétique supérieure et à un coût moindre que les projets réalisés suivant un PCT. Les synergies apportées en PCI sur le projet et la recherche de solutions novatrices sont les principales raisons de cette différence de coût. Le PCI a été depuis reconnu comme une méthode améliorant la probabilité d'optimisation du design à un coût d'investissement égal à un autre processus de conception (Larsson, 2009).

Effectivement, les recherches montrent que les discussions interdisciplinaires ouvertes et une approche recherchant la synergie des systèmes conduisent souvent à une amélioration du cycle d'exploitation du bâtiment (Busby, 2007; Cole, 2007; Larsson, 2009).

Afin de bien appliquer un PCI, Zimmerman (2006) indique que le processus doit être guidé par des objectifs, facilités, inclusif et collectif, systémique et itératif. La mise en application de ces caractéristiques est essentielle afin de profiter de la valeur ajoutée de ce type de conception.

- **Processus guidé par des objectifs** : La méthode du PCI est basée sur l'atteinte d'objectifs sélectionnés en début du processus. Ils peuvent correspondre à des cibles de réduction de la consommation énergétique, à une amélioration opérationnelle du bâtiment ou à l'obtention d'une certification de bâtiment durable.
- **Processus facilité** : La planification et le déroulement des charrettes au sein du processus nécessitent la coordination par un spécialiste ayant le rôle d'un facilitateur. Ses tâches consistent principalement à encourager le groupe à prendre des décisions innovantes, à s'assurer d'une participation générale de chacun des membres du groupe à la prise de décision, à structurer le processus et à orchestrer le déroulement efficace des charrettes.
- **Processus inclusif et collectif** : Le travail collaboratif d'un PCI se fait par une équipe de conception regroupant tous les intervenants au projet. Il s'agit ordinairement du client, d'architectes, d'ingénieurs, d'estimateurs, de futurs utilisateurs, d'opérateurs du futur bâtiment et d'experts externes spécialisés dans ce type de projet. Il est important que, pendant les charrettes, chaque intervenant s'exprime le plus possible lors de la prise de décisions pour établir une bonne interrelation des systèmes. Bien que certains intervenants soient appelés à être plus actifs au cours du processus, il ne doit pas y avoir une monopolisation des échanges et de la prise de décisions entre une minorité des participants. L'attitude des participants est un élément essentiel à la réussite d'un PCI. Si les participants ne sont pas motivés et ne s'impliquent pas suffisamment dans le processus, la proposition de stratégies innovantes sera réduite.
- **Processus systémique** : Le PCI permet par sa structure que les acteurs qui sont en interactions au sein du processus évoluent dans un même but. Les itérations du concept

sont conduites en équipe de façon holistique et sont encadrées selon des objectifs clairs. L'un des avantages principaux du PCI est la probabilité qu'une réduction des frais de consommation énergétique d'exploitation du bâtiment soit atteinte en raison d'une conception plus intensive. Cet attrait peut être mesuré par l'instauration dès la conception d'un plan de mise en service améliorée (MESA) et de mesure et vérification (M&V).

- Processus itératif: L'équipe garde tout au long de la conception un objectif d'amélioration et effectue la conception du projet selon différents scénarios de conception.

1.1.3 Approches de PCI proposées

L'utilisation d'un PCI est encouragée par plusieurs instances telles que le gouvernement du Canada, l'iiSBE, Hydro-Québec et tout dernièrement par le Conseil du bâtiment durable du Canada (CBDCa) par son système de certification LEED V4, la méthode d'évaluation de bâtiment durable (MEBD) la plus répandue dans le monde et suggérant des cibles de réduction énergétique (Rietveld, 2014). De nombreux guides détaillant le déroulement d'un PCI proposent différentes approches, qui s'appuient principalement sur celle proposée par Reed (2009) et celle de Larsson (2009). Ces approches, très bien détaillées, décrivent le déroulement d'un PCI pour des projets composés d'une équipe de conception solide et recherchant un haut niveau d'innovation du concept, voire une exemplarité.

L'approche de Reed (2009), le « Integrative Design Collaborative » est fondé sur la conception intégrative, c'est-à-dire la pratique d'une conception ayant pour fondement la restauration de l'impact du futur bâtiment sur l'environnement et le développement des interactions entre le projet et les écosystèmes. Cette approche collaborative et plus organique se caractérise par la définition d'un plan de conception bâti par l'équipe du projet en début de processus et structurant l'ensemble du PCI, en définissant notamment les cibles et les livrables. La phase de préconception est mise en importance selon l'approche Reed (2009) et il s'agit du moment où l'équipe concentre ses efforts d'innovation du concept suivant un modèle d'apprentissage divergent-convergent (Forgues et Dionne, 2014). L'approche

d'apprentissage divergent-convergent se déroule comme suit : l'équipe de conception va commencer la conception du projet selon une élaboration individuelle du projet, soit des idées divergentes. Il est alors possible, pendant les charrettes d'établir un scénario unique selon les différentes perspectives du projet apporté par les membres de l'équipe par consensus, il s'agit de l'aspect convergent. C'est en développant les différentes contradictions entre les différents scénarios de l'équipe que peut être obtenu un effort créatif pendant les charrettes.

L'approche de Larsson (2009) est beaucoup plus systématique que l'approche de Reed (2009). Cette approche vise principalement une amélioration de la performance énergétique globale du bâtiment et se concentre sur l'optimisation de six aspects du bâtiment : (1) l'orientation, (2) la volumétrie, (3) les matériaux, (4) la ventilation naturelle, (5) le chauffage passif, (6) l'éclairage et l'énergie (Forgues et Dionne, 2014). L'approche de Larsson (2009) établit les livrables à atteindre tout au long du processus selon une séquence d'amélioration du concept et validés à l'aide de simulations énergétiques ou d'analyse de cycle de vie. La séquence d'amélioration de la performance énergétique de Larsson (2009) vise l'évaluation de trois scénarios de conception : (1) un scénario de référence, (2) un scénario amélioré, mais conservateur et (3) un scénario amélioré et ambitieux. Cette approche est d'autant plus structurée, car elle est intégrée à SBtool, une MEBD régie par l'iiSBE. Elle permet d'établir un système d'étalonnage et de pointage propre à chaque projet suite à une étude des priorités régionales du projet (Larsson, 2016). Cependant, le système d'étalonnage assez complexe du SBtool est peu utilisé dans l'industrie en raison des coûts importants que nécessite l'étude des priorités régionales effectuée par l'iiSBE. De plus, suivre cette MEBD ainsi que l'approche de PCI de Larsson (2009) nécessite un haut niveau d'expertise de l'équipe de conception.

La représentation du déroulement du PCI de Larsson (2009) est présentée en annexe (*voir ANNEXE I p. 111*). Il y est défini les tâches de l'équipe de conception, les tâches du client ainsi que des opérateurs et indique la tenue des charrettes.

De nombreuses ressemblances peuvent être observées entre les deux méthodes, notamment l'importance de la charrette de conception et l'itération du concept. Néanmoins, suivant une approche de conception de bâtiment visant une performance énergétique améliorée, l'approche de Larsson (2009) se distingue par le fait que la simulation énergétique est exigée comme outil essentiel au PCI.

1.1.4 Charrettes de conception

Nonobstant l'approche de PCI suivi, plusieurs auteurs s'entendent pour dire que la valeur ajoutée d'un PCI réside dans la tenue des charrettes de conception (Busby, 2007; Cole, 2007; Reed, 2009). Cole (2007) propose un guide de facilitation pendant les charrettes et indique que les charrettes devraient débiter dès les phases initiales de la conception. D'une durée allant d'un jour à plusieurs, c'est pendant les charrettes que les différents scénarios et stratégies sont pensés et évalués par l'équipe de conception. La figure 1.2 représente les intervenants pouvant être appelés à travailler sur un PCI pendant les charrettes.

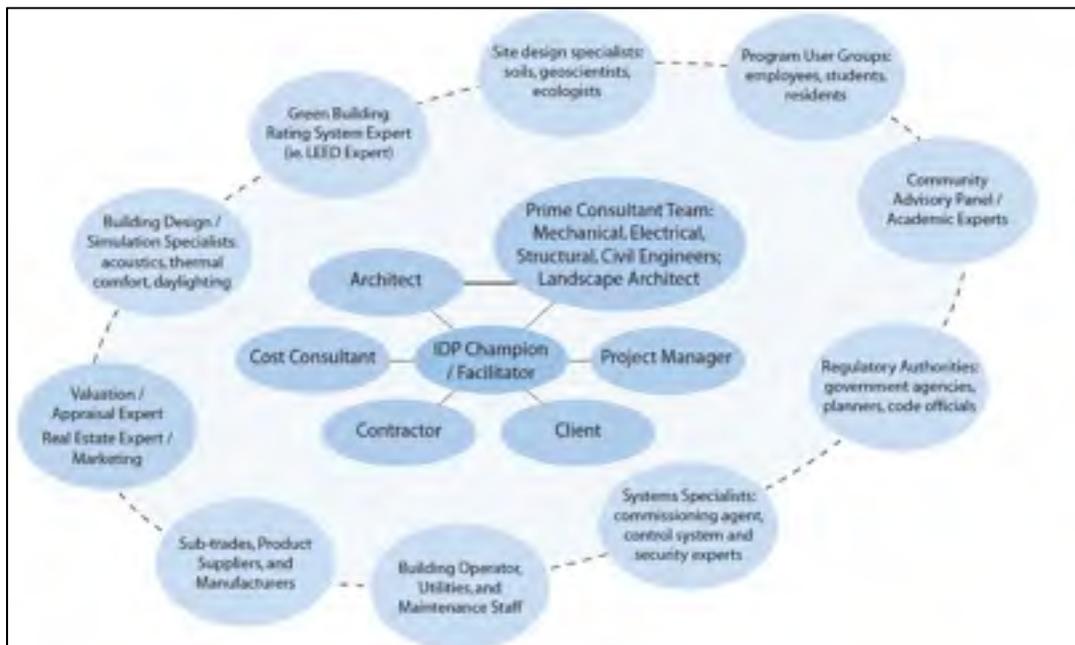


Figure 1.2 : Organisation des intervenants en PCI
Tirée de Busby (2007)

Le PCI offre deux principaux avantages pour une amélioration de la performance énergétique : (1) permettre une meilleure collaboration entre l'architecte et les ingénieurs et (2) intégrer des intervenants clés ordinairement peu consultés sur un PCT (Busby, 2007). L'intégration en amont de l'ingénieur spécialisé en mécanique du bâtiment au sein de l'équipe permet à l'architecte concepteur de bénéficier de ses connaissances au moment de la phase d'esquisse. L'ingénieur peut, dès le début de la schématisation du concept, sensibiliser l'architecte et les opérateurs à l'impact que peut avoir le concept proposé sur le dimensionnement des systèmes CVCA requis et sur la consommation énergétique du bâtiment (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016a). Certains auteurs identifient l'importance d'inclure ces six groupes d'intervenants sur un PCI : (1) le client, (2) les opérateurs et les utilisateurs, (3) le modelleur, (4) l'économiste de construction, (5) l'agent de mise en service et (6) les experts externes au cours des charrettes (Knapp, Guénard et Kerrigan, 2014). Un client impliqué est essentiel au succès d'un PCI et à l'élaboration de solutions optimales, puisqu'il est le décideur principal pour les choix financiers et temporels et il a le pouvoir de faciliter l'instauration de stratégies innovantes sur le projet. L'implication des opérateurs et des utilisateurs est aussi très importante à l'atteinte d'objectifs d'amélioration de la performance énergétique en PCI (Knapp, Guénard et Kerrigan, 2014). Dodgson, Gann et Salter (2005) affirment dans leur étude que près de 50% des innovations sur le concept général du bâtiment peuvent être attribuables à leur participation au processus de conception. L'opérateur est un intervenant très bien placé pour sensibiliser le client sur les impacts et les coûts opérationnels que peut avoir une décision de conception sur l'utilisation du bâtiment. La participation des utilisateurs et des opérateurs pendant les charrettes du processus de conception permet également de les sensibiliser aux stratégies appliquées dans le bâtiment, et ainsi de faciliter la pérennité efficace de celles-ci au cours de la phase d'opération du projet. Le rôle du modelleur est déterminant dans le succès d'un PCI. Il est chargé d'effectuer la simulation énergétique qui aide la prise de décision de l'équipe de conception. Le modelleur peut assister le groupe en leur indiquant les meilleures solutions potentielles basées sur l'évaluation de divers scénarios et d'options. Les analyses effectuées à partir de logiciels de simulations énergétiques peuvent aider à sensibiliser le client à investir davantage sur certaines stratégies lors de la construction s'il est convaincu qu'il pourrait retirer des

bénéfices durant la vie opérationnelle du bâtiment (Knapp, Guénard et Kerrigan, 2014). Le rôle de l'économiste de construction est entre autres d'effectuer l'analyse de coût global des options retenues pour en évaluer la viabilité financière. Cette analyse permet d'assister l'équipe quant à l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016a). Ce ne sont pas toutes les stratégies d'amélioration énergétique qui peuvent s'appliquer à un projet et certaines ont un retour sur investissement (RSI) long et élevé. À l'inverse, l'économiste de construction peut convaincre le client d'investir davantage sur certaines stratégies d'amélioration énergétique afin de diminuer le coût opérationnel du bâtiment (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016b). L'implication d'un agent de mise en service favorise la validation des stratégies choisies en conception et assure qu'elles seront judicieuses. De plus, cet intervenant peut assurer une bonne collaboration entre les professionnels et les opérateurs quant à l'exploitation des systèmes CVCA (Forgues et Dionne, 2014). La sélection de certains experts est déterminée par les aspects du design nécessitant une expertise spécifique et présentant des particularités conceptuelles. Il est conseillé d'intégrer des experts en enveloppe et en efficacité énergétique dans un projet visant l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment. (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016a).

Hormis les charrettes de conception intégrée, un PCI est également composé d'ateliers appelés rencontres de coordination (Larsson, 2009). Ces rencontres se démarquent des charrettes, car elles ne concernent pas un avancement du concept, mais plutôt une coordination au niveau du processus de conception en général. La première rencontre d'un PCI est en fait une rencontre de coordination. Elle est importante, car c'est à ce moment que l'équipe choisit les cibles du projet, que le PFT est évalué et que le quotient technologique de l'équipe de conception est établi. Le quotient technologique du groupe concerne le choix des outils qui seront utilisés par l'équipe au cours du projet, notamment les outils de simulation énergétique. La charrette, qui dure habituellement un à deux jours, représente un atelier intensif où les mandats et les livrables à atteindre sont très importants par rapport au temps de conception. Le but d'une rencontre de coordination vise à donc éviter que des tâches de nature organisationnelle et de coordination ralentissent le déroulement efficace des

charrettes. Ces rencontres peuvent réunir un nombre moins important de professionnels puisqu'elles ne concernent pas la conception du bâtiment, mais bien l'organisation du processus de conception.

La tenue de charrettes peut s'avérer très dispendieuse due à la mobilisation d'un grand nombre d'intervenants sur le projet. Une attention particulière quant à l'efficacité du travail collaboratif, de la planification des rencontres et un processus bien facilité est nécessaire afin de rentabiliser les efforts déployés au cours des charrettes.

1.1.4.1 Enjeux du travail collaboratif

Les principales barrières à une utilisation répandue du PCI sont une méconnaissance du processus tant au niveau des professionnels que des donneurs d'ouvrage et une résistance au changement de culture de la part de l'industrie (Forgues et Courchesne, 2008). Un problème de nature sociotechnique au niveau du travail collaboratif peut être observé (ou peut ressortir ou émerger) pendant les charrettes. Il s'agit d'une faible participation des professionnels au travail collaboratif au cours des charrettes. Il en résulte donc un manque de vision globale dans le développement des stratégies proposées sur le projet. Selon l'étude de Druskat et Pescosolido (2002), trois causes distinctes seraient attribuables au problème sociotechnique de la performance d'une équipe de travail intégrée. Il s'agit de (1) l'inertie cognitive qui apparaît au sein d'un groupe de travail (2) le manque d'autorégulation de l'équipe et (3) les différents niveaux de connaissances entre les membres du groupe.

- L'inertie cognitive concerne le comportement et la perception d'un professionnel en interaction avec des professionnels de spécialités différentes. Ce comportement se présentera alors sous deux formes : une pensée de groupe ou une pensée de cloisonnement. Ces comportements se révèlent lorsque le travail d'équipe fait face à une situation nécessitant une expertise élevée. Le phénomène de la pensée de groupe apparaît lorsque confronté à un problème technique, une exclusion de certains membres de l'équipe s'effectue par les individus les plus spécialisés ainsi qu'une fermeture d'esprit vers des idées provenant de l'extérieur de ce nouveau sous-groupe. La pensée de

cloisonnement se définit comme la monopolisation de la connaissance ou de la proposition des solutions par quelques professionnels qui ne jugent pas utile d'élaborer leurs intentions auprès de l'équipe.

- Le manque d'autorégulation de la collaboration en groupe de travail intégrée est causé par le manque de normes de référence ou de rôle clair préétabli pour chaque participant. Ce manque est causé par le fait que les professionnels de l'industrie de la construction sont habitués aux cadres contractuels rigides du mode traditionnel ainsi qu'au séquençement des tâches.
- Les différents niveaux de connaissances forment une barrière entre les membres du groupe. Il peut en résulter que la possession d'information et de connaissances par certains professionnels du groupe est utilisée par ceux-ci afin de modifier le projet et d'imposer leur propre vision. Cette attitude, parfois involontaire ou inconsciente, ne concorde pas avec l'objectif collaboratif des charrettes qui vise entre autres à favoriser l'échange de connaissances et à réfléchir en groupe à diverses propositions.

Une étude d'Ancona (2004) portant sur les charrettes d'un projet de construction d'un bâtiment canadien suivant un PCI a également souligné ces problématiques sociotechniques. L'étude relève que l'équipe travaillait dans l'optique du travail par spécialité et certains professionnels craignaient de perdre le contrôle décisionnel de leur design.

Forgues (2009) explique que l'attachement des professionnels au PCT et au travail séquentiel renforce les barrières sociocognitives des membres d'une équipe de conception et a l'effet d'entraver l'efficacité de l'équipe. Également, Forgues (2009) identifie cinq aspects majeurs de ces problèmes sociotechniques ayant occurrence au cours d'un PCI :

1. les professionnels des équipes de conception en sont souvent à leurs premières expériences du PCI et du travail collaboratif avec d'autres spécialités ;
2. les professionnels sont réticents à se prononcer hors de leurs champs de compétence et ne participent donc que peu aux discussions traitant en dehors de leurs spécialités ;
3. les professionnels préfèrent être assignés sur des projets dont leur participation au processus est limitée et où leurs mandats de conception sont clairement définis ;

4. les professionnels proviennent d'entreprises ayant différentes méthodes de travail et d'organisation ;
5. les intervenants aux projets ne peuvent s'appuyer sur un code de la pratique reconnue pour soutenir le travail collaboratif effectué en CI et identifier les rôles de tous en dehors de leur spécialité.

Druskat et Pescosolido (2002) présentent également que les objectifs établis en début de PCI peuvent freiner la performance du travail collaboratif en ce qui a trait à la recherche de solutions optimales. Les cibles étant décidées et connues de tous fragmentent et polarisent le travail entre les rôles des intervenants et ne favorisent pas une réelle réflexion de groupe. Le même effet est attribué aux MEBD tels que la certification LEED qui peut avoir pour effet de freiner le processus d'itération et d'innovation que le PCI instaure (Cole, 2007). Les professionnels ont tendance à se contenter à l'atteinte des points de la certification sans viser une optimisation de ces points. Pour pallier à cette contrainte, l'équipe de conception doit davantage déployer ses efforts à dépasser les objectifs et les cibles établis en début de projet que simplement essayer de les rencontrer. La sélection de cibles ambitieuses en début de projet peut être un moyen de motiver les professionnels. L'équipe peut ensuite intégrer une MEBD au cours de la partie conception et construction dans une optique d'évaluation du concept (Forgues et Dionne, 2014).

L'enjeu apparent du travail collaboratif du PCI ne se trouve pas dans la structure du processus, mais bien que ce processus est dépendant de la performance de l'équipe. Pour atténuer cette contrainte sociocognitive, l'utilisation de technologies de l'information et de communication (TIC) est proposée (Forgues et Dionne, 2014). Les TIC regroupent les outils permettant d'améliorer la communication comme des tableaux interactifs ou bien des outils plus techniques comme des logiciels de simulation énergétique ou d'analyse de valeur. Ils peuvent faciliter les interactions entre les membres de l'équipe pendant la charrette.

1.1.4.2 Efficacité du travail collaboratif

Amener tous les professionnels en amont à collaborer dans des charrettes peut être un exercice coûteux dont il est difficile de juger la rentabilité. Il y a donc un intérêt à trouver des méthodes pour mesurer la performance du travail collaboratif pour en améliorer l'efficacité. Cette performance peut être mesurée par la proportion de temps passée par l'équipe de conception sur certaines tâches de conception. Quatre types de tâches distincts sont identifiables au cours de charrettes (Liston, Fischer et Kunz, 2000) :

1. les tâches descriptives : Il s'agit de présenter ou de décrire des informations sur le projet;
2. les tâches explicatives : Ce sont des tâches reliées à l'explication des informations sur le projet. Elles étayent souvent les tâches descriptives;
3. les tâches évaluatives : Il s'agit de tâches visant l'évaluation de stratégies relatives au projet et aux objectifs fixés au PFT du projet. Ce type de tâches peut aussi être une intervention de nature critique qui apporte un aspect constructif à l'amélioration du concept;
4. les tâches prédictives : Ce sont des tâches visant à prévoir l'impact qu'auront les stratégies de conception proposées sur le projet à long terme. Elles sont souvent associées à la proposition et l'élaboration de stratégies innovantes apportant une amélioration au concept du projet.

Les tâches évaluatives et surtout prédictives sont les principales tâches qui permettent l'amélioration du concept dans un PCI et l'ajout de valeur ajoutée au projet (Liston, Fischer et Kunz, 2000). Ces tâches sont liées à l'innovation et permettent une évaluation ou une itération de certaines stratégies du projet vers des solutions plus efficaces. Les travaux de Liston, Fischer et Kunz (2000) identifient qu'en PCT la proportion de temps attribué aux tâches prédictives est de l'ordre de 10 % et de 30 % pour les tâches évaluatives. Les tâches explicatives représentent environ 20 % de la proportion de temps attribué en conception et les tâches descriptives représentent 40 %. Bien que le PCI permet de créer un environnement facilitant l'apparition des tâches de type évaluatif et prédictif au sein de l'équipe de conception, le processus doit intégrer des stratégies permettant de favoriser les efforts de

conception de nature évaluative et prédictive. L'analyse de différents scénarios de conception, l'intégration d'intervenants motivés et expérimentés en CI ainsi que l'utilisation d'outils de simulation énergétique sont des mesures pouvant favoriser les efforts collaboratifs orientés vers ces deux types de tâches (Kolokotsa et *al.*, 2011; Löhnert, 2003).

Les travaux de recherche de Forgues et *al.* (2017) ont utilisé l'approche d'évaluation de Liston, Fischer et Kunz (2000) afin d'évaluer la performance du travail collaboratif au cours des charrettes d'un PCI.

1.2 Amélioration de la performance énergétique des bâtiments

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est un phénomène de plus en plus encouragé par des instances gouvernementales, par Hydro-Québec et Gaz Métro notamment, et des MEBD (BEIE, 2016; Hydro-Québec, 2015). Les termes efficacité énergétique ou amélioration de la performance énergétique peuvent être utilisés pour qualifier un bâtiment affichant une consommation énergétique en dessous des cibles de consommation prescrites par les codes de construction. La figure 1.3 présente la répartition de la consommation énergétique selon les usages du bâtiment. Les sources d'énergie y sont également présentées.

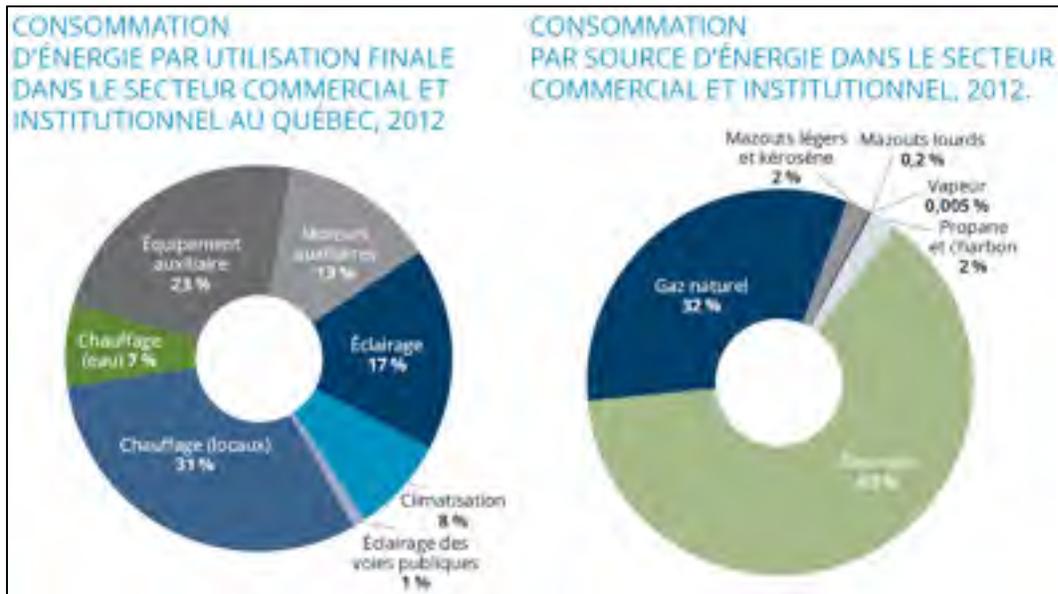


Figure 1.3 : Distribution de la consommation énergétique pour le secteur du bâtiment au Québec
Tirée de Whitmore et Pineau (2015)

Dans une zone de climat froid tel que le Québec, le principal besoin énergétique des bâtiments concerne le chauffage. Par la suite, ce sont les systèmes CVCA des bâtiments qui sont les plus énergivores, suivis par les équipements auxiliaires nécessaires à la circulation de l'air (Office de l'efficacité énergétique, 2015).

Dans une optique de conception d'un bâtiment affichant une performance énergétique améliorée, les décisions prises en début de conception sont celles ayant le plus d'impact sur la performance énergétique du projet. En effet, les décisions peuvent influencer de façon importante la conception du bâtiment (*voir* section 1.1 p. 5). Ces décisions prises en amont sont encore plus déterminantes puisqu'elles représentent les potentiels de réductions énergétiques les plus importants. Lechner (2008) identifie le potentiel d'économie d'énergie possible basé sur l'approche architecturale à trois niveaux. Cette approche confirme que les décisions les plus importantes concernant l'amélioration de la performance énergétique du projet concernent des éléments de niveau architectural décidé lors des phases initiales de la conception. Cette approche et ces potentiels sont reportés au tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Indentification des potentiels de réduction énergétique du bâtiment selon le niveau de conception architectural
Adapté de Lechner (2008)

Niveau de conception architecturale	Approche d'efficacité énergétique	Stratégies d'efficacité énergétique	Potentiel de réduction de la consommation énergétique
Niveau 1	Conception du bâtiment	Rétention de la chaleur Rejet de la chaleur	60 %
Niveau 2	Systèmes passifs	Énergie naturelle	20 %
Niveau 3	Systèmes actifs	Chauffage, climatisation et énergies renouvelables	8 %

Les stratégies pouvant apporter une amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment sont classées en deux catégories : les stratégies passives et les stratégies actives (Kesik, 2015). De l'approche architecturale à trois niveaux de Lechner (2008), l'optimisation de niveaux 1 et 2 se rattache à l'application de stratégies passives, alors que l'approche de niveau 3 nécessite la mise en place de stratégies actives. La mise en place de stratégies d'amélioration énergétique vise à diminuer l'importance de la demande énergétique de trois aspects du bâtiment : le chauffage, la climatisation et l'éclairage. L'efficacité de ces stratégies et l'innovation nécessaire à leur opération efficace sont souvent considérées comme la valeur ajoutée sur un bâtiment au cours de son exploitation. Néanmoins, avant de commencer la conception de ces niveaux architecturaux, la première étape à effectuer dans une démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment consiste à effectuer une analyse du PFT et des besoins du projet (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016c). Le but de cette analyse est de réduire au minimum l'espace d'occupation nécessaire au projet sans nuire à son exploitation. Sur un PCI, le client pourra bénéficier de l'expérience de l'équipe de conception pour réévaluer le PFT du projet afin qu'il n'ait pas à opérer un bâtiment présentant une consommation énergétique plus importante que ses besoins.

1.2.1 Stratégies passives

Les stratégies passives sont celles permettant d'améliorer la consommation énergétique d'un bâtiment tout en ne représentant aucune demande sur la consommation énergétique et sont considérées comme durables. Toutefois, comme leur mise en place est propre à chaque projet, ces stratégies nécessitent des efforts de conception plus importants. Leurs buts premiers sont de réduire la taille des équipements mécaniques de même que leur consommation. Ces trois aspects sont le chauffage passif, le refroidissement passif et l'éclairage naturel.

L'architecture bioclimatique est une approche reconnue d'optimisation des stratégies passives au sein d'un bâtiment. Cette approche, encadrée par la European Commission (1997) englobe directement les trois aspects des stratégies passives et propose les concepts schématiques que devrait présenter le bâtiment pour intégrer efficacement ces aspects. Elle propose également un aspect plus global des systèmes passifs du bâtiment par l'étude du projet dans son environnement. Il s'agit d'effectuer une analyse climatique du projet basé sur les données météorologiques du projet, le potentiel d'ensoleillement au site, la direction des vents dominants et l'implantation du bâtiment. Tzikopoulos, Karatza et Paravantis (2005) proposent une approche visant à établir les paramètres nécessaires à la modélisation énergétique d'un bâtiment suivant une approche bioclimatique.

Anderson (2014) et Lechner (2008) présentent, dans leurs ouvrages destinés aux architectes, l'amélioration de ces trois aspects des stratégies passives. Selon ces auteurs, la mise en place du chauffage passif est atteinte par une amélioration du potentiel de conservation de la chaleur au sein du bâtiment et de l'utilisation efficace des gains solaires passifs. Des mesures concrètes telles que la compacité du bâtiment, l'étanchéité de l'enveloppe, l'amélioration de l'isolation thermique, l'utilisation de la masse et l'inertie thermique du bâtiment, et l'orientation du projet coordonné avec une répartition efficace de la fenestration vers le sud permettent d'atteindre des cibles de chauffage passif. En plus d'apporter une réduction de la consommation électrique consacrée à l'éclairage artificiel, l'implantation de stratégies de

fenestration efficace peut grandement minimiser le besoin en chauffage des surfaces périmétriques d'un bâtiment grâce au chauffage passif (Tzempelikos et *al.*, 2009). Le guide de Morrison Hershfield et *al.* (2016) présente différentes approches de conception et de dimensionnement de l'enveloppe du bâtiment dans un objectif de performance thermique amélioré.

Le refroidissement passif pour la saison estivale vise à contrôler les gains de chaleur passif par l'utilisation de stratégies d'ombrages aux ouvertures du bâtiment et par l'isolation de l'enveloppe. Le refroidissement passif peut également être intégré dans un projet par des stratégies de ventilation naturelle permettant le refroidissement de la masse thermique du bâtiment. L'utilisation de la ventilation naturelle sur un projet est décrite par le guide du « Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) » CIBSE (2005). Ce type de ventilation représente de nombreux défis de conception. Il exige entre autres que le bâtiment soit conçu de façon à permettre la circulation de l'air dans le bâtiment, par effet de cheminée par exemple, ce qui nécessite donc de grands espaces ouverts au sein du bâtiment, tels que des atriums. La ventilation naturelle doit également être couplée à un système hybride (passif et actif) pour parvenir aux économies d'énergie escomptées.

L'éclairage naturel au sein du bâtiment provient de la lumière naturelle et de la fenestration. Une coordination efficace doit être effectuée entre les gains solaires désirés pour le chauffage passif et l'éclairage passif pour éviter des problèmes d'éblouissement ou de surchauffe.

1.2.2 Stratégies actives

Les stratégies actives sont des mesures visant à améliorer la performance des trois principaux aspects actifs du bâtiment ; les systèmes de chauffage, les systèmes de refroidissement et l'éclairage artificiel. Les stratégies actives visent principalement la récupération ou le contrôle de la chaleur et du refroidissement. La récupération de chaleur demeure l'élément principal quant à l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment. L'utilisation de récupérateur de chaleur à haute efficacité sur un système de ventilation, comme une roue

thermique ou un échangeur thermique à plaque afin de préchauffer l'air neuf, permet de réduire la demande en chauffage (Hydro-Québec, 2015). La récupération de chaleur des eaux grises est également un système suggéré, mais présentant de grandes limitations. L'usage d'un système de boucle d'eau mitigé couplé à un système de géothermie représente un système présentant des avantages, tant au niveau du chauffage que de la climatisation.

Il est important de prendre en compte les variabilités au niveau des scénarios d'occupation. Des stratégies de contrôle des systèmes disposés dans le bâtiment peuvent permettre d'améliorer l'opérationnalité des systèmes (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016a). Une bonne élaboration des scénarios de contrôle peut permettre de faire fonctionner les systèmes en dehors des heures de pointe de consommation électrique, que ce soit pour réchauffer ou refroidir la masse thermique du bâtiment en prévision d'une augmentation de l'occupation ou pour charger une banque de glace.

Les stratégies actives au niveau de l'éclairage artificiel sont pour la plupart des mesures de contrôle telles que des capteurs de présence ou des capteurs ajustant la luminosité intérieure du bâtiment selon l'ensoleillement extérieur. L'emplacement efficace des luminaires dans le bâtiment et l'utilisation d'ampoules affichant un meilleur rendement comme le DEL sont d'autres stratégies actives concernant cet aspect.

1.2.3 Production d'énergie renouvelable

Les stratégies de production d'énergie renouvelable se distinguent des stratégies actives, car elles sont développées dans un objectif de production d'énergie complémentaire au bâtiment plutôt que dans un objectif de récupération ou de réduction. Le bilan de consommation énergétique d'un bâtiment peut être amélioré par la production, sur le site du projet, d'énergie renouvelable électrique ou thermique. À cet effet, plusieurs ouvrages recommandent l'implantation de stratégie de production d'énergie renouvelable à même le site du projet (Löhnert, 2003). Des ouvrages normatifs reconnaissent que l'énergie produite de source renouvelable sur le site peut être déduite de la consommation annuelle totale, et ainsi

permettre de présenter un bilan théorique de consommation énergétique amélioré (ASHRAE, 2010; Office de l'efficacité énergétique, 2012). Ces ouvrages prennent en compte que la majorité de l'énergie produite dans le monde provient de sources fossiles (Office de l'efficacité énergétique, 2015). L'implantation de panneaux photovoltaïques représente la méthode la plus employée et suggérée afin de produire de l'électricité verte à même le site du projet (Larsson, 2002). En ce qui concerne le pré chauffage de l'air neuf, de l'eau ou du glycol, la géothermie est la stratégie la plus fréquemment adoptée, suivie par l'utilisation de panneaux thermiques (Hydro-Québec, 2015).

1.2.4 Bâtiments Net Zéro

L'approche de conception de bâtiment Net Zéro présente des nombreuses interrelations entre un bâtiment affichant une performance énergétique améliorée, un processus de conception collaboratif et l'utilisation d'outils de simulation énergétique dès les phases initiales de la conception. Il existe plusieurs définitions de ce qu'est un bâtiment Net Zéro et des objectifs qu'il doit atteindre. Selon la définition la plus répandue, un bâtiment Net Zéro est un bâtiment dont le bilan de production d'électricité annuelle est égal à la quantité d'électricité consommée annuellement par un bâtiment (Crawley, Pless et Torcellini, 2009). Un bâtiment Net Zéro peut consommer de l'électricité provenant du réseau public à certaines périodes où sa production ne satisfait plus la demande, mais il doit produire suffisamment de surplus au cours de l'année pour atteindre un rendement neutre entre sa production et sa consommation d'énergie.

Tout projet Net Zéro doit avoir sur son site des moyens de production d'électricité issus de sources renouvelables, mais des solutions pour diminuer la demande énergétique du projet doivent être appliquées (Van Moeseke, 2012). Cette approche est basée en grande partie sur l'optimisation des stratégies solaire, soit l'éclairage naturel, le chauffage passif et l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Une amélioration de la performance énergétique du projet dans son ensemble est essentielle pour arriver à atteindre l'objectif Net Zéro. Athienitis et O'Brien (2015) soulignent que les bâtiments Net Zéro sont un exemple de collaboration entre les

professionnels du bâtiment vers un objectif commun dans un contexte spécifique (Attia et De Herde, 2011). L'implication marquée et la bonne entente entre les professionnels sur un projet de conception Net Zéro est justifié par la convergence des efforts de tous vers un objectif précis, l'atteinte d'un bâtiment affichant une consommation énergétique nulle. Athienitis et O'Brien (2015) proposent un ouvrage présentant une approche de conception et de modélisation de bâtiment Net Zero décrivant l'utilisation d'outils de simulation énergétique dans le processus. Le tableau 1.3 présente certaines particularités d'un bâtiment Net Zéro en comparaison avec un bâtiment traditionnel.

Tableau 1.3 : Caractéristiques d'un bâtiment Net Zéro
Adapté d'Athienitis et O'Brien (2015)

Systèmes du bâtiment	Bâtiment traditionnel	Bâtiment Net Zéro
Matériaux et enveloppe	Rencontre les codes de base	Améliorés et facilitent l'intégration de stratégies solaires passives
Chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA)	De grands systèmes mécaniques surdimensionnés	Composés de petits systèmes de CVCA contrôlés de façon optimale. Intégrés dans le dimensionnement des systèmes solaires, de chauffage et de puissance combinée. Anticipation d'un stockage saisonnier.
Éclairage naturel et énergies renouvelables	Aucune intégration aux systèmes du bâtiment	Entièrement intégrés : éclairage naturel, chauffage passif, énergie photovoltaïque et géothermique
Systèmes d'automatisation du bâtiment	Systèmes d'automatisation utilisés inefficacement	Système de contrôle prédictif pour optimiser le confort et la performance énergétique : prévision de la demande journalière et objectif de réduction de l'appel de puissance
Conception et opération	Conception et exploitation du bâtiment qui ne sont généralement pas considérées ensemble	Conception et exploitation des bâtiments entièrement intégrés et optimisés dans un souci de confort. Conception intégrée des systèmes d'opération du bâtiment à long terme

Ces particularités du bâtiment Net Zéro représentent les objectifs et les défis de conception sur lesquels l'équipe d'un PCI doit se pencher lors des charrettes. Un autre aspect extrêmement important de la conception de bâtiments Net Zéro est l'intégration et l'apport d'outils de simulation énergétique dans le processus conceptuel dès ses phases initiales (Attia et *al.*, 2013). Les recherches de Brahme et *al.* (2009) et Athienitis et *al.* (2010) soulignent la

nécessité d'utiliser ces outils dans la prise de décision et le dimensionnement de bâtiments Net Zéro. Ils mentionnent également les paramètres à évaluer et à itérer au cours des étapes de conception, tout en évaluant l'efficacité de différents outils de simulation énergétique adaptés à ce type de projet.

1.3 Outils de simulation énergétique du bâtiment dans la conception

La simulation énergétique d'un bâtiment représente la prédiction de son comportement de consommation énergétique, pour une année et selon son emplacement climatique, afin de satisfaire les critères de confort des occupants (Hensen et Lamberts, 2011). Les principaux résultats issus de la simulation énergétique du bâtiment concernent la prédiction de la consommation globale du bâtiment, les charges énergétiques de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel ainsi que l'estimation de la consommation des systèmes CVCA, des systèmes mécaniques secondaires et des équipements (Nall et Crawley, 2011). Ces résultats permettent de connaître l'intensité d'utilisation énergétique (IUE) du projet. Les unités utilisées pour mesurer l'IUE d'un projet sont habituellement des kBtu/pi²·an, des GJ/m²·an ou des kWh/m²·an (ASHRAE, 2010). La simulation énergétique permet également d'évaluer l'impact énergétique des différents paramètres architecturaux et des stratégies de performance énergétique sur le concept, ce qui permet d'évaluer leur rentabilité (ASHRAE, 2013).

La complexité, la précision et la fiabilité des résultats de simulation sont grandement dépendantes de la méthode de calcul du logiciel. Les méthodes de calcul utilisées sont : la méthode degré-jour, la méthode par casier, la méthode de transfert et la méthode des bilans (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016a). Présentement, les logiciels DOE-2 et EnergyPlus sont les moteurs de calcul les plus utilisés dans l'industrie en raison de leurs nombreuses interfaces de simulation destinées à des usages et à des cadres de simulations spécifiques (Forgues, Monfet et Gagnon, 2016a). CanQuest, eQuest, SIMEB et EE4 sont des interfaces de DOE 2 qui utilisent la méthode de transfert. OpenStudio, Design Builder et Simergy sont quant à eux des interfaces de simulation énergétique du logiciel EnergyPlus qui utilisent la

méthode des bilans. Ces logiciels de simulation, les méthodes de calculs utilisés et la structure des rapports de simulation fournie est encadrée par la norme ANSI/ASHRAE 140 « Standard Method of Test » (ASHRAE, 2014). De plus en plus, les logiciels de simulation énergétique incorporent également des notions de modélisation géométrique du bâtiment. Ces efforts de modélisation fournissent non seulement une représentation graphique du projet, mais également une banque de données impactant les paramètres simulés et évalués du projet. Les travaux de Reeves, Olbina et Issa (2015) présentent une évaluation de différents outils de modélisation énergétique, tandis que les travaux de Barbour et *al.* (2016) présentent un cadre d'utilisation de la modélisation énergétique en conception et des outils s'y rattachant.

1.3.1 Codes de référence

Afin d'évaluer la performance énergétique d'un projet, valider l'atteinte des cibles de réduction ou valider l'obtention d'une certification d'une MEBD, une comparaison de l'IUE simulé du projet de conception doit être effectuée selon l'IUE d'un modèle de référence. Un modèle de référence est une simulation énergétique du projet, mais dont l'enveloppe et les systèmes représentent les exigences minimales prescrites par un code. Ces exigences minimales concernent l'enveloppe du bâtiment et l'efficacité de consommation des équipements de chauffage et de refroidissement de l'air et de l'eau sanitaire, ainsi que de l'éclairage artificiel nécessaire pour assurer le confort des occupants. Les deux codes les plus fréquemment utilisés et reconnu par l'industrie sont le Code national de l'énergie pour les bâtiments CNEB 2011 (Office de l'efficacité énergétique, 2012) et la norme ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2010).

Anciennement le Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CMNÉB 1997), le CNEB 2011 est actuellement la référence canadienne en termes d'atteinte d'objectifs d'efficacité énergétique qui sont établis selon une méthode normative qui s'inscrit dans le programme écoÉNERGIE sur l'efficacité énergétique pour les bâtiments du ministère des Ressources naturelles Canada (Office de l'efficacité énergétique, 2012). La norme ASHRAE

90.1 2010 est la norme américaine présentant les standards de composition et de consommation des bâtiments par type d'usage. Elle est très utilisée au Canada et dans le monde en plus d'être sélectionnée comme code de référence pour la certification LEED. Ces codes sont néanmoins proportionnels quant à leurs exigences et leurs cibles normatives. À titre d'exemple, un écart de la performance énergétique de 20 % selon l'ASHRAE 90.1 2010 ou 20 % selon le CNEB 2011 ou 40 % selon le CMNÉB 1997 s'équivalent (Office de l'efficacité énergétique, 2012).

1.3.2 Utilisation d'outils de simulation énergétique sur un PCI

La mise en place de stratégies d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment est complexe et nécessite de déployer de grands efforts en conception de la part de l'équipe. Malgré tout, l'intégration efficace de ces stratégies sur le projet nécessite l'utilisation d'outils de simulation énergétique dès les phases initiales de la conception comme outil d'aide à la décision (De Wilde, Augenbroe et Van Der Voorden, 1999; Nengdahl et Nielsen, 2015; Schlueter et Thesseling, 2009). La figure 1.4 représente l'utilisation souhaitée de la simulation énergétique par rapport à son utilisation traditionnelle dans l'industrie.

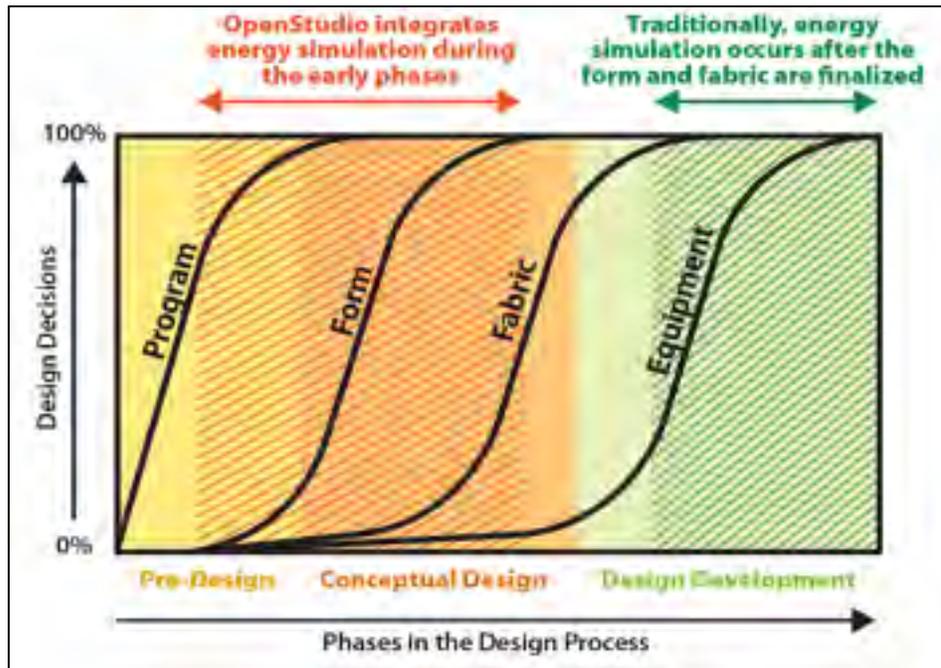


Figure 1.4 : Utilisation de la simulation énergétique en conception
Tirée de Lindsey (2007)

L'utilisation de la simulation énergétique à la fin de la phase de conception apporte peu d'impacts sur les décisions de conception quant à la performance énergétique du projet. L'architecte est responsable d'optimiser la conception de niveaux 1 et 2 (voir tableau 1.2 p. 23). Traditionnellement, il est observé que les architectes ne basent pas assez leurs décisions conceptuelles sur des analyses quantifiables issues de la simulation énergétique, mais les prennent plutôt de façon intuitive et selon leur expérience (Bambardekar et Poerschke, 2009; Pedrini et Szokolay, 2005). L'utilisation d'outils de simulation énergétique n'est pas une pratique usuelle pour les architectes qui confient généralement cette étape à des ingénieurs et à des modeleurs spécialisés qui interviennent tardivement dans le processus de conception (Hemsath, 2013). Également, Lindsey (2007) et Larsson (2009) soulignent que ces outils ne devraient pas seulement être utilisés dès les phases initiales de la conception, ils devraient plutôt faire partie intégrante du processus de conception.

Reprenant les recherches de Xia, Zhu et Lin (2008) et de Bambardekar et Poerschke (2009), Hemsath (2013) a identifié, le moment et la manière dont la simulation énergétique doit être

utilisée au cours des phases de conception : d'abord à la phase de préconception pour établir les objectifs et cibles énergétiques, puis à la phase d'esquisse afin de valider des décisions conceptuelles, telles que la forme du bâtiment, sa compacité et son orientation. La simulation devrait aussi être appliquée durant le dossier préliminaire pour détailler le modèle énergétique et au dossier définitif afin de valider une certification. De plus, Xia, Zhu et Lin (2008), Bambardekar et Poerschke (2009) et Hemsath (2013) affirment qu'un outil de simulation peut être utilisé de deux façons : l'évaluation des stratégies de performance énergétique sur les paramètres du projet ou la démonstration de la consommation énergétique du bâtiment par rapport aux cibles de réductions visées.

1.3.3 Paramètres de simulation énergétique

Pour obtenir une simulation énergétique représentative du projet, de nombreux paramètres ayant un impact sur la performance énergétique du bâtiment doivent être pris en compte. Elle permet d'évaluer l'impact de ces paramètres sur la consommation énergétique et de juger de leur utilité sur le projet, ce qui se définit par une analyse paramétrique. La liste complète des paramètres à évaluer sur un bâtiment n'est pas définie dans le milieu de la conception, elle est souvent dépendante de la palette d'analyse offerte par un outil de simulation (Nall et Crawley, 2011). Néanmoins, Hemsath (2013) a identifié les principaux paramètres de simulation énergétique à évaluer au cours des phases d'esquisse et du dossier préliminaire selon six recherches portant sur l'analyse des paramètres architecturaux à évaluer. Cette liste d'identification est présentée au tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Paramètres à simuler dans les phases de conception initiales
Tiré de Hemsath (2013)

	Warren (2002)	Hayter et al. (2000)	Xia et al. (2008)	Attia (2011)	Bambardekar et al. (2009)	Gero (1984)
<i>Orientation</i>	X	X	X		X	X
<i>Massing</i>			X	X	X	X
<i>Function</i>			X			
<i>Geometry/Shape</i>		X	X	X	X	X
<i>Envelope</i>	X	X		X	X	X
<i>Window to Wall Ratio</i>		X		X		X
<i>Interior Space</i>	X	X	X		X	
<i>Shading</i>		X		X	X	
<i>Natural ventilation</i>	X	X	X	X	X	
<i>Thermal Mass</i>		X		X	X	
<i>Daylight</i>	X	X		X	X	
<i>Renewable Energy</i>	X			X	X	
<i>Infiltration</i>				X		

Ces paramètres ont une incidence sur les stratégies passives d'amélioration de la performance énergétique et leur optimisation représente les principaux potentiels de réduction de la consommation énergétique du projet. Les paramètres passifs et bioclimatiques sont par contre plus complexes à simuler que des systèmes mécaniques et nécessitent une analyse plus poussée. Par exemple, Tzempelikos et *al.* (2009) définissent les paramètres d'une approche de simulation d'enveloppe et de fenestration d'un bâtiment visant une optimisation du chauffage passif et de l'éclairage naturel. Panitz et Garcia-Hansen (2013) quant à eux présentent les principaux paramètres nécessaires à la simulation de l'éclairage naturel et de la chaleur passive dans le bâtiment, ainsi qu'une évaluation des outils pouvant effectuer ce type de simulation.

Le guide d'utilisation d'outils de simulation de l'ASHRAE (2016) présente également une liste de paramètres à évaluer au cours des phases de la conception. Le guide détaille les systèmes du bâtiment en sept catégories : (1) la performance énergétique globale, (2) l'enveloppe, (3) l'éclairage naturel, (4) l'éclairage artificiel, (5) la plomberie, (6) les systèmes CVCA et (7) autres, incluant les énergies renouvelables.

1.3.4 Sélection des outils de simulation

L'essor croissant des technologies de simulation énergétique et de modélisation ces dernières années a conduit à la création et la mise à jour de nombreux logiciels de simulation énergétique. L'« International Building Performance Simulation Association (IBSPA) » répertorie les logiciels de simulation énergétique les plus utilisés et les catégorise selon leur capacité d'analyse. Présentement, le répertoire sur le site internet de l'IBSPA identifie 155 outils de simulation énergétique destinés à la conception. Le nombre important d'outils de simulation énergétique disponibles et la grande variabilité d'analyse qu'ils peuvent effectuer rendent leur sélection complexe. Les travaux de recherches sur la question présentent deux méthodes de sélection d'outils de simulation énergétique : (1) la sélection selon l'évaluation de certains outils basés sur des critères évaluant leur capacité d'analyse ou (2) la sélection selon la méthode d'analyse visée entre l'évaluation et la validation.

Crawley et *al.* (2008) proposent une approche d'évaluation de 20 outils de simulation énergétique selon 14 critères. La plupart de ces critères concernent l'efficacité d'analyse des paramètres de simulation comme l'enveloppe, l'éclairage naturel, les systèmes CVCA et les systèmes de production d'énergie renouvelable. Attia et De Herde (2011) présentent une évaluation complète de dix outils de simulation énergétique fréquemment utilisés dans l'industrie basée sur cinq critères : (1) la facilité d'utilisation, (2) l'intelligence, (3) l'interopérabilité, (4) l'adaptabilité du logiciel dans le processus de conception et (5) sa précision. Ils ont conclu qu'un bon outil doit pouvoir servir d'aide à la décision en début de projet et ne doit pas être trop précis dans ces résultats. Attia et De Herde (2011) mentionnent que les outils de simulation sont généralement conçus selon une fonction de validation des cibles du projet, plutôt que d'évaluation de différents scénarios de conception ou des paramètres de performance énergétique. Les outils de simulation énergétique permettant d'effectuer des analyses paramétriques devraient être favorisés dans les phases initiales de la conception (Hemsath, 2013; Hetherington et *al.*, 2011). L'utilisation de plusieurs outils de simulation énergétique complémentaire est parfois nécessaire sur un projet de conception puisque chaque outil est conçu dans un objectif d'analyse précis.

Quatre méthodes de sélection sont proposées pour choisir les outils de simulation énergétique en fonction des types d'analyses à compléter sur le projet : (1) Usability and Information Management (UIM), (2) Integration of Intelligent design Knowledge-Base (IIKB), (3) Accuracy of tools and Ability to simulate Detailed & Complex building Components (AADCC) et (4) Interoperability of Building Modeling (IBM). Les travaux d'Attia et *al.* (2012) présentent l'utilisation de ces méthodes de sélection d'outils et identifient les différences entre les préoccupations et les priorités de l'architecte et des ingénieurs en ce qui concerne la sélection de leurs outils de simulation énergétique. Toujours selon Attia et *al.* (2012), les architectes ont davantage tendance à utiliser la méthode du IIKB qui sélectionne les outils basés selon leur capacité d'assistance dans la prise de décision et leur capacité à présenter des rapports de performance comparatifs. Quant aux ingénieurs, ils utilisent plutôt la méthode du AADCC qui vise la sélection d'outils de simulation énergétique en fonction de leur précision dans l'analyse des systèmes CVCA et dans l'analyse post-occupation.

Une description des logiciels les plus fréquemment utilisés au sein de l'industrie québécoise et pouvant être utilisés au cours d'un PCI est proposée (*voir* ANNEXE II p. 115).

1.3.5 Approches d'utilisation d'outils de simulation en PCI

Plusieurs guides tels que ceux de Busby (2007) et Reed (2009) permettent de comprendre comment devrait se dérouler un PCI, mais ceux-ci ne présentent pas clairement comment l'utilisation d'outils de simulation énergétique doit être intégrée au processus.

À l'inverse, Goldfarb (2012) et Anderson (2014) présentent tous deux des approches détaillées sur l'utilisation de la simulation énergétique par les architectes dès les phases initiales de la conception et suggèrent l'utilisation de certains outils. L'ASHRAE (2011) montre comment l'utilisation de la modélisation énergétique du bâtiment peut faciliter la conception de bâtiment présentant une amélioration de la performance énergétique et propose des cibles à atteindre. Le guide d'utilisation d'outils de simulation de l'ASHRAE (2016) présente, étape par étape, les analyses et les résultats nécessaires à la conception complète

d'un bâtiment. Ces guides et approches présentent tous les impacts et les bénéfices que l'utilisation d'outils de simulation énergétique peut apporter sur le concept, mais ne spécifient pas leurs modes d'utilisation au sein d'un PCI. À ce propos, Knapp, Guénard et Kerrigan (2014) soulignent les retombées bénéfiques du programme « Savings by Design » d'Enbridge. Il était exigé dans ce programme d'utiliser un outil de simulation énergétique, eQuest, et des modélisateurs responsables d'effectuer les simulations énergétiques du projet en temps réel pendant les charrettes au sein d'un PCI. Toutefois, ce programme ne spécifie pas une approche d'utilisation de ces outils pendant le processus. De plus, cette approche nécessite l'intégration d'un haut niveau d'expertise de la part des professionnels de modélisation énergétique en raison de la complexité à effectuer des simulations sur un délai très court pendant les charrettes et d'arriver à présenter des résultats.

Depuis avril 2015, la société d'État Hydro-Québec (2015) présente une approche de conception intégrée associée à un programme de soutien aux projets d'efficacité énergétique pour le marché commercial et institutionnel. Le programme offre un appui financier dès l'étape de conception afin d'encourager les donneurs d'ouvrage à concevoir leur bâtiment en suivant un PCI. Cet appui financier est par la suite bonifié selon l'atteinte de cibles de réduction de la consommation énergétique et selon l'atteinte de critères d'optimisation de quatre catégories de paramètres architecturaux : (1) les éléments architecturaux (isolation thermique, vitrage performant), (2) les éléments architecturaux innovateurs (éclairage naturel, chauffage solaire passif, ventilation naturelle), (3) intégration de technologies performantes (récupérateur de chaleur pour les systèmes de ventilation, ventilation par déplacement d'air, régulation de l'éclairage artificiel de type adaptatif), (4) intégration d'une source d'énergie renouvelable (géothermique, système solaire de préchauffage de l'air neuf ou de l'eau domestique). L'approche prescrit l'utilisation de trois charrettes et de SIMEB comme principal outil de simulation à utiliser. Néanmoins, le document d'information attaché à la conduite du PCI d'Hydro-Québec (2015) ne décrit pas le déroulement du processus ni une méthode d'utilisation des outils de simulation. En somme, il donne peu d'information sur la tenue d'un PCI en général et il réfère au guide de Forgues et Dionne (2014) du Centre d'études et de recherche pour l'avancement de la construction au Québec

(CÉRACQ). Par contre, ce guide ne définit pas de méthode d'utilisation des outils de simulation énergétique au cours de la conception. De plus, l'approche Hydro-Québec (2015) exige simplement que la simulation énergétique soit effectuée en fin de conception dans une optique de validation de la performance énergétique finale du concept, et non dans une optique d'évaluation des paramètres et stratégies du concept.

1.4 Perspectives

Il a été présenté dans la littérature que les principaux efforts de conception de l'équipe et l'utilisation d'outils de simulation énergétique sont concentrés au cours des dernières phases du processus de conception. Certains auteurs ont tenté d'adresser l'enjeu d'orienter, en amont du processus, les efforts collaboratifs de l'équipe de conception en détaillant la conduite d'un PCI (Busby, 2007; CURT, 2004; Forgues et Dionne, 2014; Löhnert, 2003; Reed, 2009). Cependant, leur cadre est limité quant à l'utilisation des outils de performance énergétique dans un PCI. À ce niveau, d'autres auteurs couvrent l'utilisation d'outils de simulation en conception, mais ils ne proposent pas de cadre cadencé selon une logique de niveau architectural (*voir* tableau 1.2 p. 23) pour améliorer la performance énergétique d'un projet suivant un PCI (Cole, 2007; Goldfarb, 2012). Il y a donc un besoin dans l'industrie d'établir un cadre qui permettrait d'identifier les moments d'un PCI où la simulation énergétique devrait être utilisée, ainsi que les résultats qu'elles pourraient apporter à l'équipe de conception.

L'intégration efficace de stratégies passives dans les premières phases de la conception constitue le plus grand potentiel d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment. Une approche voulant obtenir les bénéfices combinés de l'approche bioclimatique et de l'approche de conception Net Zéro nécessite deux aspects importants, un PCI et l'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein de ce processus.

La structure d'un PCI permet d'établir un contexte favorisant l'amélioration de la performance énergétique du projet en raison de plusieurs facteurs. D'abord en raison de son

approche holistique, ensuite grâce à son aspect collaboratif entre les principaux intervenants, ce qui a un impact sur la conception énergétique du projet. L'amélioration énergétique du projet est également attribuable à la concentration des efforts de l'équipe de conception lors des phases initiales de la conception. Un moyen efficace d'évaluer les stratégies proposées par l'équipe passe notamment par l'utilisation d'outils de simulation énergétique.

Cependant, des barrières sont déjà perceptibles au sein de l'industrie tant au niveau du travail collaboratif que de l'utilisation des outils de simulation énergétique. Cela est en partie causé par l'absence de cadre reconnu et adapté à l'industrie.

Il existe différentes approches décrivant la tenue d'un PCI, mais l'approche de Larsson (2009) est celle proposant davantage une utilisation des outils de simulation énergétique dès les phases initiales de la conception en plus d'être encadrée par le SBtool (Larsson, 2016). Or, cette approche demande un haut niveau de maturité de l'équipe de conception et n'est pas adaptée aux réalités de l'industrie québécoise. Quoiqu'il en soit, la vraie valeur d'un PCI réside dans la charrette de conception. C'est au cours de ces rencontres que les résultats issus de la simulation énergétique doivent être utilisés et évalués. Présentement, les phases initiales de conception, notamment la phase d'esquisses, sont les phases où la simulation énergétique est la moins utilisée.

Un cadre encourageant l'utilisation des résultats quantifiables provenant des outils de simulation énergétique dans les phases initiales de la conception faciliterait l'évaluation de stratégies d'efficacité énergétique pour l'équipe de conception et l'atteinte de cible de performance énergétique d'un bâtiment. De plus, leur utilisation au cours d'un PCI devrait générer une augmentation des tâches de type prédictif et évaluatif de la part des membres de l'équipe de conception pendant les charrettes (Liston, Fischer et Kunz, 2000).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

La présente recherche vise à proposer un cadre permettant d'intégrer l'utilisation des outils de simulation énergétique dans la prise de décision dans un processus de conception intégrée afin de vérifier les hypothèses et les options pour améliorer la performance énergétique du bâtiment.

2.1 Méthodologie de la recherche

La méthodologie de recherche proposée s'appuie sur la recherche-action (Avison et *al.*, 1999; Goldenhar et *al.*, 2001). La recherche-action est une méthode interventionniste, puisqu'elle vise d'abord à identifier une problématique pour ensuite agir sur un phénomène en proposant une solution ou un artefact pour la résoudre (Chiocchio et Lebel, 2012; Melrose, 2001). Les étapes de recherche s'inscrivent dans les cinq phases principales de la recherche-action identifiée par Catroux (2002) Susman (1983): (1) l'identification du problème, (2) l'établissement d'un plan d'action, (3) la mise en place de l'action, (4) l'évaluation des effets de l'action et (5) la communication des conclusions de la recherche.

Le déroulement du processus de cette recherche s'inspire des cinq phases de la recherche-action car elle s'inscrit également dans une séquence de quatre étapes : (1) le design de la recherche, (2) l'investigation des pratiques, (3) le développement du cadre d'utilisation et (4) l'application et l'évaluation du cadre d'utilisation. Les étapes du processus de recherche de ce mémoire, ainsi que leurs positionnements selon les phases de la recherche-action sont présentés à la figure 2.1.

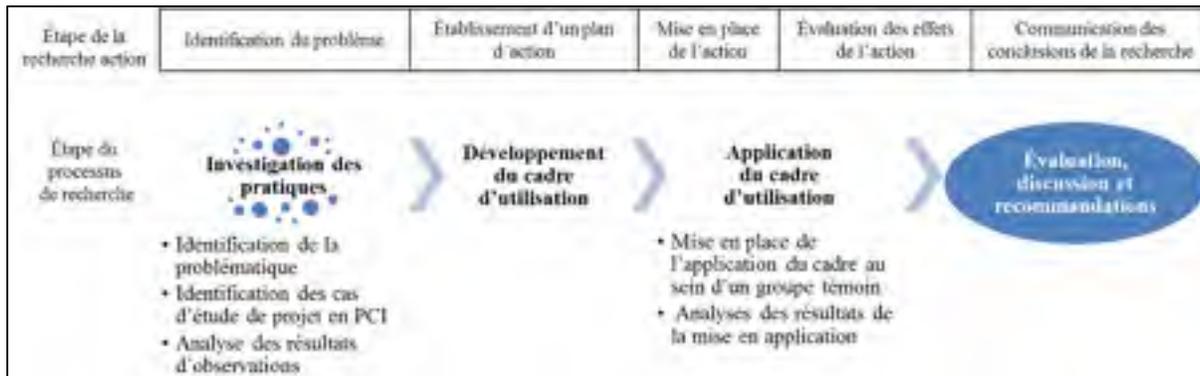


Figure 2.1 : Phases et étapes de la recherche

2.2 Investigation des pratiques

Le but de cette étape de recherche est de recueillir l'information et les données nécessaires afin de cerner la problématique industrielle de recherche. Les données obtenues au cours de l'étape d'investigation des pratiques proviennent d'une approche d'observation de trois projets suivant un PCI.

2.2.1 Identification de la problématique

Les perspectives présentées à la section 1.4 ont permis de clairement d'identifier les limites des approches proposées dans la littérature et de formuler un objectif clair, soit intégrer dans le PCI les outils de simulation énergétique pour améliorer la performance énergétique du bâtiment. La proposition d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI est la solution proposée par cette recherche à cette problématique.

2.2.2 Identification des cas d'étude en PCI

Les observations portées sur des projets réels sont appuyées sur l'étude de cas comme méthode de recherche. Cette méthode, qui est appuyée par des règles déontologiques, vise à assurer la validité des résultats (Gagnon, 2005; Laurencelle, 2005; Yin, 2013). Une sélection de cas pertinents pour notre recherche a été établie selon entre autres les paramètres identifiés

dans la revue de littérature, mais aussi en fonction des objectifs de recherche. Afin d'être considérée comme pertinente pour notre processus de recherche, la sélection des projets visés a été établie selon les critères suivants :

- les projets devaient se faire selon une approche basée sur un PCI ;
- les projets devaient présenter des charrettes de conception intensives ;
- les charrettes de conception intégrée devaient regrouper les principaux intervenants au projet : architectes, ingénieurs, professionnels, client, opérateur, facilitateur, etc. ;
- les projets devaient viser une amélioration de la consommation énergétique du bâtiment ;
- la présence d'un observateur pendant les charrettes de conception du processus était autorisée.

Brièvement, le premier projet (PCI 1) prévoit l'addition d'un centre de traumatologie, d'une unité mère-enfant et d'un service d'endoscopie pour un hôpital de Montréal. Le PCI 1 a été composé d'une charrette divisée en trois sous-charrettes. Elle a nécessité la présence de trois observateurs au processus d'observations. Le second projet (PCI 2) concerne la construction d'un grand refuge animalier à Montréal. Un observateur a assisté aux sept charrettes de ce PCI. Le troisième projet (PCI 3) vise la reconstruction d'un insectarium à Montréal. Un observateur a assisté aux trois charrettes de conception planifiées pour ce PCI. Le processus de conception de ces trois projets s'est fait suivant un PCI et les charrettes ont toutes duré une journée, en moyenne.

Les données tirées et observées sur les projets PCI 1, PCI 2, et PCI 3 sont de deux types. Les données de premier type proviennent de l'étude de la documentation organisationnelle détaillant et structurant les PCI des projets. Les données de deuxième type sont les informations obtenues par le biais d'observations portées sur les équipes de conception intégrée pendant les charrettes.

Une analyse des documents de planification des charrettes, tels que les ordres du jour, les échéanciers du processus et les comptes rendus de charrettes visent à établir le cadre, l'organisation et les acteurs des PCI observés.

Les données obtenues par l'étude de cas ont été reportées dans une grille d'observation (*voir* ANNEXE III p. 121). Afin d'assurer la validité des données d'observation et de pouvoir les comparer, une grille d'observation a été préétablie afin d'uniformiser les informations recueillies. Les contenus et la forme de la grille d'observation sont résumés au tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Résumé du contenu de la grille d'observation d'étude de cas

Tâches (1-descriptive, 2-explicative, 3-évaluative et 4-prédictive)	Heure	Durée (minutes)	Intervenants	Thématique (Général ou Performance énergétique)	Sujet de discussion

Les données recueillies dans la grille par l'étude de cas sont de nature qualitative. Une fois analysées, elles permettent d'évaluer l'impact de l'utilisation de la simulation énergétique au cours des charrettes des projets observées.

Cette grille permet de faciliter l'analyse et l'association des données aux prémisses à l'étude (Yin, 2013). La grille d'observation se concentre sur deux aspects. Le premier aspect vise à identifier les différents sujets de discussion abordés au cours de la charrette ainsi que les intervenants ayant pris part à ces discussions. Il permet donc de classer ces discussions entre deux thématiques principales : (1) les discussions traitant du projet en général et (2) les discussions portant sur la performance énergétique du bâtiment ainsi que de l'utilisation de la simulation énergétique. Le deuxième aspect identifié au sein de la grille d'observation est la distribution des tâches dans le temps, et par discussion selon la démarche de Liston, Fischer et Kunz (2000) (*voir* section 1.1.4.2 p. 20). Cette démarche a pour but de mesurer l'efficacité du travail collaboratif en charrette par l'évaluation de la distribution du temps passé par l'équipe de conception entre quatre types de tâches (descriptive, explicative, évaluative et prédictive).

De façon à mieux comprendre les échanges entre les intervenants et à identifier les approches d'utilisation de supports de communication, les observations se sont concentrées sur ces aspects : le geste, la navigation, l'annotation et la visualisation (Tory *et al.* (2008).

Les données ont été compilées par un observateur prenant place au sein de l'équipe de conception pendant les charrettes. Un journal de bord contenant les remarques et les descriptions de l'observateur a été complété suite à chaque rencontre afin d'établir une constante dans la détermination des données observées (Yin, 2013). Pendant les observations, des mesures ont été prises pour atténuer l'effet d'Hawthorne sur les projets en dissimulant le plus possible le dispositif d'observation aux yeux des sujets (Laurencelle, 2005). L'effet d'Hawthorne se résume par une modification des comportements des participants à une étude lorsqu'ils se savent observés et évalués. Les interventions de l'observateur ont donc été minimales afin de capter le plus possible le processus réel de conception.

2.2.3 Analyse des résultats d'observations

La proportion de temps passé en charrette entre les tâches de Liston, Fischer et Kunz (2000) et par thème de discussion vise à vérifier l'impact de l'utilisation d'outils de simulation énergétique pendant les tâches évaluatives et prédictives, et si cette utilisation favorise une augmentation de la durée de ces tâches. L'analyse des discussions en charrettes permet également d'évaluer si l'utilisation d'outils de simulation énergétique apporte un impact sur le processus décisionnel en charrette. Également, l'analyse des discussions des équipes de conception permet de connaître la distribution de la participation entre les intervenants pendant les charrettes et selon les deux principales thématiques étudiées.

Les constats issus de l'analyse de ces observations permettent d'établir une discussion sur l'interrelation entre l'utilisation d'outils de performance énergétique en charrette et l'amélioration du processus décisionnel, du processus collaboratif et de l'occurrence de tâches évaluatives et prédictives. Le but de cette discussion est d'établir les fondements sur lesquels le cadre proposé sera bâti.

2.3 Développement du cadre d'utilisation

L'analyse des données et des constats établis pendant l'étape d'investigation des pratiques permet la formulation d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI adapté aux pratiques de l'industrie. Le développement de ce cadre vise à établir le flot d'informations nécessaires à un processus voulant intégrer l'utilisation d'outils de simulation énergétique, de façon à permettre une meilleure préparation des charrettes de conception. Également, les informations issues de l'étape d'investigation des pratiques auront permis d'identifier les moments opportuns du processus, où l'utilisation d'outils de simulation pourrait assister l'équipe dans sa prise de décision en ce qui a trait à la performance énergétique du projet.

Un cadre est donc proposé de façon à intégrer l'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein du processus afin d'assister les décisions de l'équipe de conception (Mougin, 2011). En complément à ce cadre, une schématisation des flots d'information est utilisée afin de détailler l'échange d'informations entre les professionnels et d'identifier les paramètres clés au processus. La schématisation de ces flots de travail est établie selon le processus normalisé de « Information Delivery Manuals » (IDM) et par la méthode uniformisée BPMN « Business Process Modelling Notation » (Liebich et *al.*, 2013).

2.4 Application et évaluation du cadre d'utilisation

L'application du cadre d'utilisation proposé, sur un groupe témoin représentatif du terrain d'action de la problématique est nécessaire afin d'observer et d'évaluer son influence (McKay et Marshall, 2001). L'application du cadre d'utilisation a été effectuée auprès d'un groupe témoin de niveau universitaire dans le cadre d'un cours¹ portant sur la conception intégrée. Le cours regroupait des étudiants en génie de la construction et en génie mécanique

¹ Sigle du cours pour l'ÉTS : CTN736 Conception intégrée de bâtiments durables
MEC735 Conception intégrée des systèmes mécaniques dans les bâtiments
Sigle du cours pour l'UQAM : DES663X - Atelier synthèse

de l'ÉTS, ainsi que des étudiants en design de l'environnement de l'UQAM. Deux charrettes de conception intensives d'une durée de deux jours chacune à raison de 7 heures par jour ont été planifiées. Une coordination entre les professeurs des trois disciplines a été établie afin d'assurer l'intégration du volet de la recherche dans le cours et un déroulement représentatif du cadre de PCI proposé.

Avant le début des charrettes, des présentations auprès des étudiants de chaque discipline ont été effectuées afin de présenter le déroulement du cadre d'utilisation. Au cours de ces présentations, les étudiants ont été informés des retombées que permet l'utilisation d'outils de simulation énergétique avant les charrettes et au flot d'informations, entre les membres de l'équipe de conception, nécessaires pour obtenir ces résultats.

Le projet de conception du groupe témoin visait la construction d'un ensemble de bâtiments présentant des usages hybrides représentant 140 000 m² de plancher et construit selon des phases distinctes sur un terrain de 1.4 hectare. Les principaux usages des bâtiments incluent des logements résidentiels (70 000 m²), des espaces de bureaux (20 000 m²), une micro-brasserie (10 000 m²), des serres de production alimentaire hydroponique (5 000 m²), des espaces de production alimentaire aquaponique (5 000 m²) ainsi qu'une centrale de production d'énergie et de gestion des déchets (10 000 m²).

Les six équipes de conception étaient composées de deux représentants de génie de la construction, de trois représentants de génie mécanique et de trois à quatre représentants en design. Les rôles et mandats des étudiants participants aux charrettes se retrouvent au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Rôles et mandats des participants aux charrettes du cours portant sur la CI

Discipline	Design de l'environnement	Génie mécanique	Génie de la construction
Rôles	Architecte Urbaniste	Ingénieur mécanique Modeleur	Facilitateur Chargé de projet
Mandat	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Établir la volumétrie du bâtiment. ◦ Établir la composition de l'enveloppe du projet. ◦ Développer le bâtiment en conformité avec son environnement et des notions d'urbanisme. 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Assurer la synergie des systèmes et établir un réseau au sein des phases du concept. ◦ Effectuer les simulations énergétiques du projet. ◦ Dimensionner les systèmes mécaniques. 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Coordonner et planifier le déroulement des charrettes de conception. ◦ Assurer la constructibilité du projet. ◦ Favoriser la communication et les échanges au sein de l'équipe.
Nombre de participants	21	18	12

L'utilisation d'un groupe témoin est appropriée pour effectuer l'évaluation de la mise en application du cadre puisqu'il est reconnu que des étudiants de disciplines différentes plongés dans un contexte simulé, présentant les mêmes contraintes et réalités que l'industrie, vont agir de la même manière que s'ils étaient en situation réelle dans l'industrie (Chiocchio, 2008). De plus, les étudiants universitaires représentent un groupe témoin ouvert au changement comparativement à des professionnels de l'industrie qui sont, en général, plus réticent à un changement de leur pratique de travail.

Quatre méthodes ont été utilisées pour évaluer le cadre d'utilisation proposé : l'observation, le questionnaire, un groupe de discussion (focus group) et l'entrevue.

Le processus d'observation a pour but de permettre d'établir des constats qualitatifs afin d'évaluer l'impact du cadre d'utilisation proposé sur le processus de travail collaboratif et sur le processus décisionnel en charrette. Les observations utilisées pour identifier ces impacts ont été effectuées auprès des six équipes du groupe témoin lors du processus préparatoire de la charrette 1, lors de la charrette 1 et lors de la charrette 2. Les observations recueillies au cours de ces rencontres ont porté sur l'impact de l'utilisation des outils de simulation énergétique proposés par le cadre et elles ont été reportées dans la grille d'observations, présentée au tableau 2.3 (voir ANNEXE IV p. 123).

Tableau 2.3 : Résumé du contenu de la grille d'observation du groupe témoin

	Processus de travail collaboratif	Processus décisionnel	
Variables observées	Travail de collaboration	Utilisation des résultats de simulation énergétique	Décisions et modifications des paramètres de simulation
Questions	<ul style="list-style-type: none"> • L'intégration d'un outil de simulation énergétique a-t-elle développé la transdisciplinarité des membres de l'équipe ? (Passer d'un mode proactif à réactif) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendant la charrette, les résultats issus de la simulation énergétique ont-ils été utilisés dans un objectif d'évaluation ou de validation du concept ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Les résultats issus de la simulation énergétique ont-ils eu un impact sur les décisions prises lors de la conception du projet ?

Le questionnaire a pour but de dresser un portrait général de l'application du cadre proposé et de connaître le point de vue des utilisateurs. Il comporte sept questions réparties en quatre thèmes principaux : (1) l'impact général de la charrette sur le concept, (2) l'impact de l'utilisation du cadre d'utilisation sur le processus collaboratif en charrette, (3) l'évaluation des efforts de travail déployés pour effectuer les simulations préparatoires et (4) l'impact du cadre proposé sur le processus décisionnel en charrette. Le questionnaire 1 distribué après la première charrette a été répondu par 50 participants et le questionnaire 2 transmis après la charrette 2 a été répondu par 48 participants (voir ANNEXE V p. 125).

Pour évaluer et discuter de la contribution d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique sur leurs PCI, un groupe de discussion a été tenu avec les représentants de génie de la construction après la charrette 1. Le déroulement du groupe de discussion vise d'abord à présenter aux représentants du groupe témoin les constats obtenus suite à l'analyse des

grilles d'observations et des résultats des questionnaires. Puis, suite à la présentation de ces constats, de nouveaux constats ont été formulés par consensus avec la contribution des participants du groupe témoin (Baribeau, 2009; Hallas, 2014).

Les entrevues réalisées après la charrette 2 avaient pour objectif d'effectuer une rétroaction permettant de valider les résultats des observations des charrettes du groupe témoin et des résultats des questionnaires. Elles ont été réalisées auprès de trois représentants de génie mécanique et de trois représentants d'architecture. Les entrevues comportaient deux questions et plusieurs questions de relance afin de pouvoir comparer les constats établis sur l'impact du cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique sur le travail collaboratif et sur le processus décisionnel en charrette. L'appréciation générale du cadre d'utilisation a également été évaluée (*voir* ANNEXE VI p. 129).

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSES DES OBSERVATIONS

Le processus d'observation effectué sur trois projets suivant un PCI a permis d'examiner l'état de la pratique dans l'industrie et d'évaluer l'utilisation et l'impact de la simulation énergétique sur le travail conceptuel. Ces observations s'appuient sur une investigation basée sur l'analyse de la performance des approches de PCI et utilisent la grille de tâches de Liston, Fischer et Kunz (2000) couplée à un sociogramme pour établir la distribution de la participation des membres de l'équipe de conception. Ce chapitre présente une description des projets observés et les principaux résultats et constats obtenus.

3.1 Dérroulement et particularités des projets observés

Trois projets suivant un PCI ont été observés et étudiés. Le premier vise l'agrandissement d'un centre hospitalier existant (PCI 1). Ce projet d'environ 8000 m² est divisé sur 7 étages. De nombreux usages, correspondant au standard d'aménagement d'un centre de traumatologie, regroupent des salles de réveil, un service d'endoscopie, une zone de refuge mère-enfant et des salles d'opération. Le deuxième projet porte sur la construction d'un refuge animalier (PCI 2). Ce centre accueillera près de 14 000 animaux par année et un personnel à temps plein d'une quarantaine de personnes. Le centre est divisé en deux sections principales soit la section d'accueil des pensionnaires et la section dédiée à leur adoption. Le troisième vise la reconstruction d'un insectarium (PCI 3). Les superficies de ce projet sont divisées principalement entre les espaces de musée (1300 m²), les serres de production et d'exposition (1000 m²), l'accueil et les services aux visiteurs (600 m²), des espaces mécaniques (400 m²) ainsi que des espaces administratifs (300 m²). La superficie intérieure brute totale du projet est d'environ 4400 m². Les observations prises sur ces projets ont été effectuées auprès des deux plus grands donneurs d'ouvrage de projet en PCI au Québec, soit la SQI et la ville de Montréal.

3.1.1 Descriptifs des PCI

Chaque projet observé a suivi une planification de PCI distinct, tant au niveau du nombre de charrettes que dans le déroulement de celles-ci. Les PCI 1 et PCI 2 ont suivi une planification établie par le facilitateur en collaboration avec son client de façon à représenter les besoins conceptuels des projets tandis que le PCI 3 a suivi l'approche de PCI d'Hydro-Québec (2015). De plus, certaines caractéristiques propres à chaque projet et déterminantes quant à l'amélioration énergétique du concept sont à souligner. Le recensement de ces caractéristiques permet d'établir le contexte particulier par rapport à l'utilisation de la simulation énergétique propre à chaque projet.

3.1.1.1 PCI 1

L'approche suivie par le PCI 1 a débuté par la tenue d'une rencontre de coordination afin de présenter le PCI aux membres de l'équipe de conception, d'évaluer le PFT et de choisir les cibles et les objectifs du projet. Pour la charrette 1, l'équipe de conception s'est divisée en trois groupes qui travaillaient sur une thématique distincte dans le cadre de sous-charrettes. Les thèmes des trois sous-charrettes étaient (1) la structure, (2) les services électromécaniques, et (3) l'organisation spatiale. Les trois sous-groupes présentaient une composition homogène quant à la diversité des intervenants et des spécialités présents sur le projet. À la fin de la charrette 1, les solutions proposées par chacun des sous-groupes ont été présentées et évaluées par l'équipe de conception complète. Un consensus a alors été établi. Une deuxième charrette présentant encore trois sous-charrettes sous les thèmes (1) de l'enveloppe, (2) du confort et de la performance et (3) de la fonctionnalité était planifiée au processus, mais n'a pas eu lieu pour des raisons contractuelles et en raison de l'état d'avancement du projet. La figure 3.1 présente la composition du PCI 1 dans le temps.

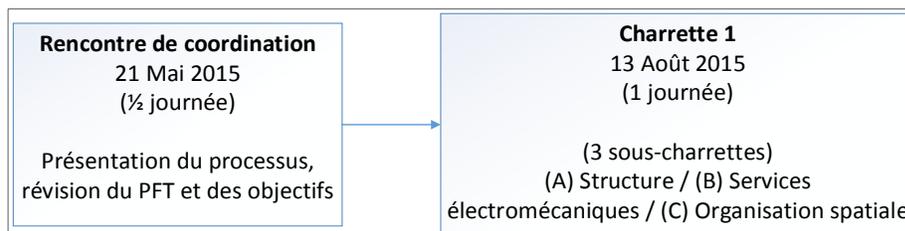


Figure 3.1 : Déroulement et composition du PCI 1

Le projet PCI 1 présentait d'importantes contraintes de volumétrie et d'orientation parce qu'il s'agissait d'un projet d'extension d'un bâtiment existant se situant dans un secteur densément développé. Le PFT du projet a été évalué par les professionnels lors de la première rencontre de coordination comme étant trop rigide et précis pour permettre la proposition de solutions innovantes ou originales. Il est fréquent de voir sur un projet hospitalier un PFT très détaillé, surtout dans le cas d'une salle de traumatologie pour des maladies pulmonaires. À titre d'exemple, pour des raisons sanitaires, les exigences au PFT sur les systèmes CVCA sur le projet exigeaient un très grand nombre de changements d'air à l'heure. Cet air distribué par les systèmes CVCA devait être composé de 100 % d'air neuf et devait répondre à des exigences précises quant à son humidité pour ne pas favoriser la transmission de contaminants. De plus, il fallait assurer un contrôle strict du confort des patients, nécessaires à leur guérison. Ces exigences ont une incidence certaine sur le dimensionnement des systèmes CVCA et complexifient l'objectif de réduction de la taille des systèmes et de la consommation énergétique générale du projet.

La conception intégrée a eu tout son sens sur ce projet. La collaboration des ingénieurs mécanique et des architectes sur le processus a permis dans la sous-charrette sur les services électromécaniques d'évaluer l'organisation spatiale du projet dans un objectif de grouper les pièces dont l'utilisation est complémentaire ou fonctionnent sur un même horaire. De plus, le positionnement de la salle mécanique dans le bâtiment a été une thématique de réflexion de tous les sous-groupes. Il a été identifié qu'une réduction énergétique importante pouvait être obtenue quant à la distribution des systèmes CVCA et sur le dimensionnement des équipements secondaires. Les cibles du projet fixées dans le PFT demandaient une réduction de la consommation énergétique de l'ordre de 20 % par rapport au CNEB 2011.

3.1.1.2 PCI 2

Le PCI 2 a suivi un PCI composé d'une rencontre de coordination en début de conception et de sept charrettes. La rencontre de coordination a permis de présenter les notions de base du PCI aux membres de l'équipe et de réviser le PFT en groupe. Le déroulement dans le temps et les thématiques composant les charrettes du PCI 2 sont présentées à la figure 3.2.

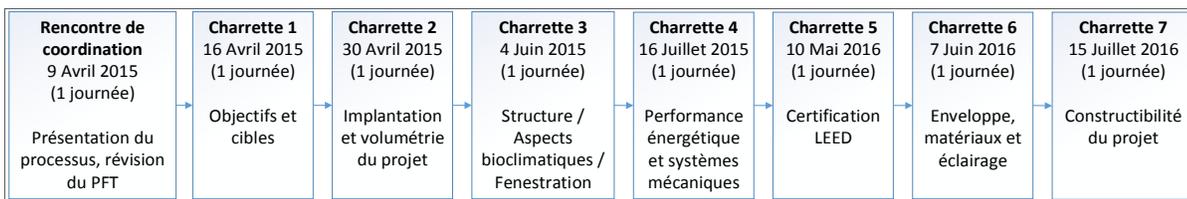


Figure 3.2 : Déroulement et composition du PCI 2

Les thématiques des charrettes ont été choisies de manière à couvrir tous les aspects de la conception du bâtiment de façon intégrée et non pas dans un objectif d'améliorer seulement un aspect spécifique du projet. Pour les charrettes 2, 3 et 4, l'équipe de conception a été divisée en deux sous-groupes. La composition des deux sous-groupes était représentative et homogène quant aux spécialités des intervenants sur le projet. Chaque sous-groupe a travaillé sur un scénario de conception répondant à la thématique de la charrette. Les deux scénarios de conception ont été alors présentés au cours de la charrette et un scénario final a été choisi par consensus.

Le PCI 2 est caractérisé par un effort marqué de la part du facilitateur afin de favoriser le travail collaboratif pendant les charrettes. À titre d'exemple, la première charrette du processus, moment où les cibles et objectifs du projet furent choisis, s'est déroulée sous forme d'un atelier collaboratif axé vers l'idéation et la découverte. Les objectifs et cibles du projet ont été sélectionnés par un consensus de l'équipe de conception et classés par ordre d'importance. Une charte de projet a alors été présentée aux membres de l'équipe de conception afin qu'ils s'engagent à rencontrer les cibles de performances du projet. Les cibles énergétiques sélectionnées incluent entre autres que 5 % de l'énergie consommée

provient de l'utilisation de panneaux solaires sur le site, que la certification LEED NC Or soit visée et que le projet présente une réduction de la consommation énergétique de l'ordre de 60 % par rapport au CMNÉB 1997.

Parmi les objectifs énergétiques évalués au cours de ce projet, s'inscrit un effort d'amélioration de la résistance thermique de l'enveloppe. Cet aspect a été traité lors de la charrette 6 portant sur l'enveloppe, les matériaux et l'éclairage. L'intégration de stratégie de contrôle de la lumière naturelle aux ouvertures et ainsi de la chaleur passive dans le bâtiment, l'utilisation de vitrage performant en fonction de l'orientation des façades, l'évaluation de différentes compositions d'enveloppe présentant des résistances thermiques nominales améliorées sont parmi les stratégies évaluées et discutées au cours de cette charrette.

3.1.1.3 PCI 3

L'approche suivie par le PCI 3 s'est fait selon le PCI proposé par Hydro-Québec (2015) qui mandate la tenue de trois charrettes, mais ne spécifie pas leurs thématiques. Ces thématiques, au nombre de six, étaient : (1) objectifs et cibles du projet, (2) site, volumétrie ainsi qu'enveloppe et matériaux pour la charrette 1, (3) énergie du bâtiment principal et (4) énergie des serres pour la charrette 2, et (5) résultats des analyses énergétiques et (6) mise en service et opération pour la charrette 3. Deux thématiques principales du projet étaient évaluées par charrette. La figure 3.3 présente le déroulement et les thématiques des rencontres de CI dans le temps.

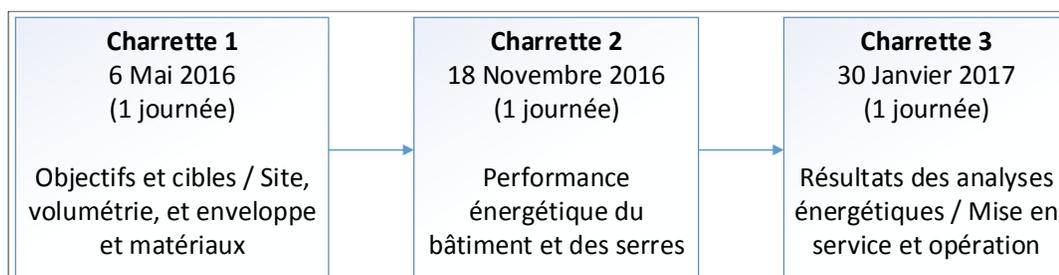


Figure 3.3 : Déroulement et composition du PCI 3

Également, l'approche de PCI proposée par Hydro-Québec (2015) mandate l'utilisation d'un outil de simulation énergétique et propose des cibles de réduction énergétique. Lors de la première charrette, l'équipe de conception a décidé de viser la certification LEED NC argent et une réduction de la consommation énergétique de l'ordre de 40 % par rapport au CMNEB 1997. Le PCI 3 a débuté suite à l'acceptation d'un concept du projet proposé lors d'un concours architectural tenu à l'international. Lors de la première charrette, il a été noté auprès de certains intervenants que le contexte du concours peut selon eux compliquer l'itération du concept et crée une certaine rigidité sur un concept bien établi. En contrepartie, il a également été souligné qu'en raison de cette particularité, la CI prenait tout son sens justement afin de concentrer les efforts de l'équipe de conception pour élaborer des solutions d'amélioration énergétique du concept sans altérer les principales caractéristiques architecturales qui l'ont démarqué dans le contexte du concours. De plus, la présence au concept de serre végétale intégrée au centre du bâtiment principal a entraîné une certaine complexité quant aux dimensionnements des systèmes passifs et actifs. Fonctionnant préférentiellement selon un principe de ventilation naturelle, les serres sont des éléments complexes en ce qui a trait à leurs besoins énergétiques en chauffage et en distribution de l'air nécessaire à leur efficacité de production. Pour favoriser la croissance des végétaux, l'utilisation d'un verre simple proposant, une très faible résistance thermique et une faible émissivité est nécessaire afin de faciliter l'entrée de la lumière et de la chaleur naturelle. Les principales stratégies d'amélioration de la performance énergétique proposée sur le PCI 3 ont été orientées vers des stratégies actives. L'étude de l'utilisation de verre double pour les murs périphériques des serres, l'utilisation de toile solaire rétractable pour isoler les serres la nuit, l'amélioration de la résistance de l'enveloppe de 25 % par rapport au CNEB 2011, l'implantation d'une roue thermique et une boucle de géothermie comptent parmi les principales stratégies proposées.

3.1.2 Composition des équipes de conception

Les principaux intervenants appelés à participer aux équipes de conception des charrettes et de façon récurrente dans le processus sont présentés au tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition des équipes des projets observés

PCI 1 (29 participants)			PCI 2 (16 participants)	PCI 3 (11 participants)
Groupe de sous-charrette			Équipe de charrette	Équipe de charrette
(Structure)	(Services électromécaniques)	(Organisation spatiale)		
Architecte	Architecte	Arch. Chargé de projet	Arch. Chargé de projet	Arch. Chargé de projet
Architecte	Architecte	Architecte	Architecte	Architecte
Client	Client. Ing. Électrique	Architecte	Architecte paysagiste	Client. Chargé de projet
Client	Client. Ing. Mécanique	Architecte	Client. Chargé de projet	Coordinateur LEED
Exp ext. Estimation	Ing. Électrique	Architecte	Coordinateur LEED	Exp ext. Bâtiment durable
Ing. Chargé de projet	Ing. Mécanique	Client	Exp ext. Enveloppe	Exp ext. Bâtiment durable
Ing. Structure	Opérateur	Exp ext. Estimation	Exp ext. Enveloppe	Ing. Mécanique
Ing. Structure	Opérateur	Ing. Civil	Exp ext. Estimation	Ing. Mécanique
		Ing. Mécanique	Ing. Civil	Ing. Sim. Énerg.
		Utilisateur	Ing. Mécanique	Opérateur
		Utilisateur	Ing. Mécanique	Facilitateur
			Ing. Sim. Énerg.	
			Opérateur	
			Utilisateur	
			Utilisateur	
			Facilitateur	
Arch. : Architecte	Exp ext. : Expert externe			
Ing. : Ingénieur	Sim. Énerg. : Simulation Énergétique			

Toutes les équipes de conception ont été composées d'au moins un opérateur, d'un représentant du client et des principaux professionnels impliqués en conception. La présence d'experts en estimation et analyse de coût a été demandée sur les PCI 1 et PCI 2. Toutefois, leurs efforts sur le processus ont été plus orientés vers une analyse de la construction globale du bâtiment plutôt que sur une analyse du retour sur investissement des stratégies d'efficacité énergétique proposées. Le PCI 2 se distingue par l'intégration d'expert du Conseil et laboratoire en enveloppe du bâtiment (CLEB) à leur équipe de conception lors des charrettes. Le PCI 2 et PCI 3 se différencient du PCI 1 par l'intégration à l'équipe de conception d'un ingénieur responsable d'effectuer la simulation énergétique et d'en analyser les résultats. Le PCI 3 a fait appel à deux experts externes ayant une connaissance du PCI et des MEBD. Le rôle de ces experts a été d'assurer la conformité du PCI quant aux cibles et exigences de l'approche proposée par Hydro-Québec (2015). Une certaine homogénéité peut être observée entre les équipes de charrette intégrant une dizaine de personnes chacune.

3.1.3 Distribution des rencontres de CI au cours du processus

Il a été observé, sur tous les projets, un allongement de la durée totale du PCI initialement prévu et de très nombreux changements dans la planification des rencontres de CI. En observant les dates de déroulement des rencontres de CI, il est noté des intervalles importants

entre la tenue de certaines charrettes (*voir* section 3.1.1 p. 20). La charrette 4 et la charrette 5 du PCI 2 sont distancées d'environ 9 mois et les charrettes 2 et 3 du PCI 3 sont distancés de près de 5 mois. La planification des rencontres de CI en fonction de l'avancement variable de la conception a été la principale cause de restructuration dans le déroulement du processus. La production d'esquisses, les demandes de changements quant aux exigences du client et les délais décisionnels de la part du client sont parmi les causes identifiées expliquant ces intervalles importants entre charrettes.

Dû à l'allongement des PCI et de l'intervalle de temps entre les charrettes, il a été noté auprès d'intervenants sur les projets un certain détachement au processus et une diminution de la motivation générale au cours du travail collaboratif. L'apparition de tel comportement peut avoir un impact direct sur la performance et l'innovation des solutions proposées par l'équipe. Le manque d'une structure reconnue par l'industrie et établissant clairement le déroulement d'un PCI est également un facteur attribué à la restructuration des rencontres de CI.

3.1.4 Utilisation de la simulation énergétique

Une des principales particularités observées sur les trois projets a été au niveau de l'utilisation des outils de simulation énergétique au cours du processus et de leur impact pendant les charrettes. Le tableau 3.2 présente le nombre de charrettes observées, les objectifs de performance visés par projet et l'utilisation de la simulation énergétique par projet.

Le projet PCI 1 et le projet PCI 2 ont utilisé les données issues de la simulation à des fins de vérification de la performance énergétique dans un objectif d'assurer l'atteinte de la cible de réduction souhaitée pour la phase du dossier préliminaire. Les résultats des simulations réalisées à l'extérieur des charrettes ont été peu présentés pendant les charrettes.

Tableau 3.2 : Utilisation de la simulation énergétique sur les projets observés

Projets conçus en PCI	Agrandissement d'un centre hospitalier (PCI 1)	Construction d'un refuge animalier (PCI 2)	Construction de l'Insectarium (PCI 3)
Objectif de performance	20% p/r au CNEB 2011	60% p/r au CMNEB 1997	40% p/r au CMNEB 1997
Utilisation de la simulation énergétique	Validation (En parallèle des charrettes)	Validation (En parallèle des charrettes)	Validation et évaluation (En préparation des charrettes)

Pour le projet PCI 3, les simulations énergétiques ont été préparées de façon à être utilisées durant les charrettes pour évaluer les différentes stratégies actives étudiées par l'équipe afin de réduire la consommation énergétique du projet. Des simulations énergétiques ont également été effectuées pendant les charrettes de conception, mais ont apporté des résultats discutables, vu les délais de modélisation et de sélection des paramètres que ce processus demandait. Le caractère imprécis des données a été soulevé par les ingénieurs en mécanique en charrette. Cependant, il a été observé sur le PCI 3 que l'utilisation d'un seul outil de simulation énergétique limitait certaines analyses du concept à cause des particularités du projet notamment au niveau de la simulation d'usages spécialisés du bâtiment tel que des serres végétalisées. Ces efforts de simulation ont eu lieu au cours de la phase de conception du dossier préliminaire. L'utilisation de la simulation pendant la phase d'esquisse, notamment au niveau de l'orientation et de la forme du bâtiment, est non documentée et ne fut pas traitée au cours des charrettes du PCI 3. Ces aspects du projet avaient été décidés précédemment, lors du concours d'architecture à la base de ce projet.

Le niveau d'utilisation de la simulation énergétique sur les projets est dépendant du responsable chargé d'effectuer cette tâche. Le PCI 1 n'intégrait pas d'intervenant responsable de la simulation énergétique sur l'équipe de conception. L'intervenant responsable de la simulation énergétique sur le PCI 2 a été présent à quelques charrettes dans le but de connaître les informations nécessaires afin de compléter la simulation énergétique, après ces charrettes, pour vérifier l'atteinte des cibles énergétiques. L'outil de simulation énergétique

utilisé pour ce projet a été eQuest. L'ingénieur responsable de la simulation énergétique sur le PCI 3 est celui qui se rapproche le plus au rôle d'un modéleur. Les simulations énergétiques, effectuées sur le logiciel SIMEB, ont été présentées, utilisées et modifiées pendant les charrettes. Des résultats de simulation énergétique de la consommation et du comportement des systèmes CVCA obtenus avec le logiciel HAP ont également été présentés par l'ingénieur mécanique du projet pour corroborer les résultats entre les deux outils.

Les observations sur ces trois projets quant à l'utilisation des outils de simulation énergétique ont permis d'établir les constats suivants :

- les processus observés présentent peu d'étapes impliquant l'utilisation des outils de simulation énergétique pendant les charrettes ;
- les outils de simulation énergétique sont principalement utilisés afin de vérifier un résultat plutôt que de comparer des scénarios conceptuels ;
- la simulation énergétique du projet n'est pas utilisée de façon à pouvoir assister la prise de décision selon le thème de la charrette ;
- la prise de décision doit être effectuée pendant les charrettes alors que les résultats issus de la simulation énergétique ne sont pas disponibles.

3.1.5 Sommaire des particularités des projets observés

Le sommaire des particularités des trois projets est présenté au tableau 3.3. Il permet de regrouper le type, la superficie, le nombre de charrettes, la durée des processus, le nombre d'intervenants et l'objectif d'utilisation d'outil par processus.

Tableau 3.3 : Sommaire des particularités des projets observés

Projets conçus en PCI	Agrandissement d'un centre hospitalier (PCI 1)	Construction d'un refuge animalier (PCI 2)	Construction de l'Insectarium (PCI 3)
Type de projet	Institutionnel	Institutionnel	Institutionnel
Superficie (m ²)	env. 8 000	-	env. 3 600
Nombre de charrettes	1	7	3
Durée du processus (mois)	env. 4	env. 28	env. 9
Nombre d'intervenants	29	16	11
Utilisation de la simulation énergétique	Validation (En parallèle des charrettes)	Validation (En parallèle des charrettes)	Validation et évaluation (En préparation des charrettes)

3.2 Résultats des études de cas

Plusieurs informations sur les projets PCI 1, PCI 2 et PCI 3 ont été compilées pendant le travail collaboratif effectué en charrette. Ces observations ont permis d'établir le type d'efforts déployés par l'équipe de conception selon les tâches de Liston, Fischer et Kunz (2000), le temps passé sur ces tâches, les intervenants ayant pris part à ces efforts et les sujets discutés au cours de la charrette. En raison de la nature organisationnelle des rencontres de coordination, les informations recueillies au niveau de la distribution des tâches de Liston, Fischer et Kunz (2000) n'ont pas été analysées avec les informations prises au cours des charrettes. Toutefois, les données recueillies au cours de ces rencontres furent utilisées pour compléter l'analyse et la planification des processus.

3.2.1 Distributions des sujets au cours des charrettes

Une analyse des tâches et sujets conceptuels discutés au cours des charrettes a permis de départir les sujets traitant de la performance énergétique du bâtiment et de l'utilisation de la simulation énergétique des autres sujets généraux de conception. La figure 3.4 présente la

distribution de ces deux catégories de sujets sur le temps total passé en charrette entre les projets.

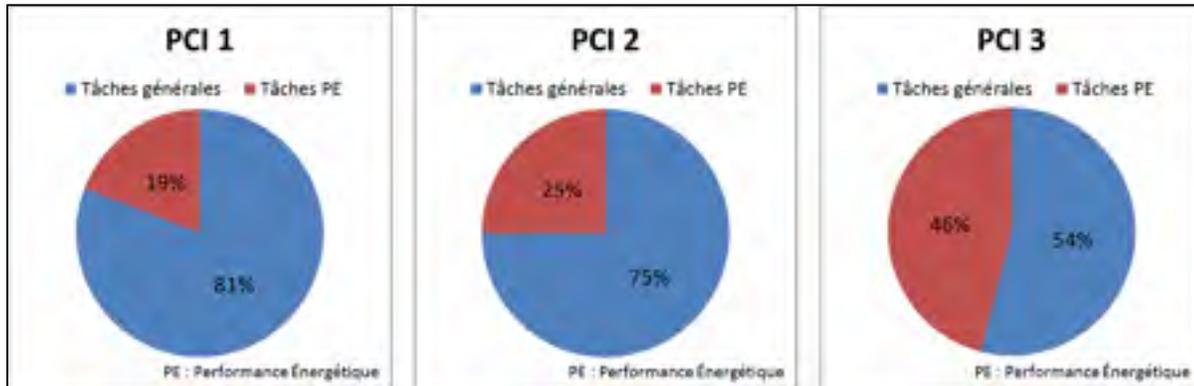


Figure 3.4 : Proportion du temps passé par sujet par PCI

La différence est notable entre des PCI suivant une approche générale de conception du bâtiment comme le PCI 1 et PCI2 à un PCI suivant une approche proposée d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment comme le PCI 3. Il est possible de constater que l'approche du PCI utilisé est déterminante au développement d'aspect précis du concept, notamment sa performance énergétique.

Une analyse de la distribution du temps passé en charrette par l'équipe de conception entre les tâches conceptuelles portant sur le projet en général et les tâches portant sur la performance énergétique du projet présente que le sujet de la performance énergétique du bâtiment n'est pas pris en compte dans les charrettes initiales du processus. La figure 3.5 présente la distribution du temps passé par sujet de tâches au cours des charrettes par PCI. Il y est remarqué que le temps passé par l'équipe de conception à l'évaluation de la performance énergétique du bâtiment arrive en milieu ou en fin du PCI.

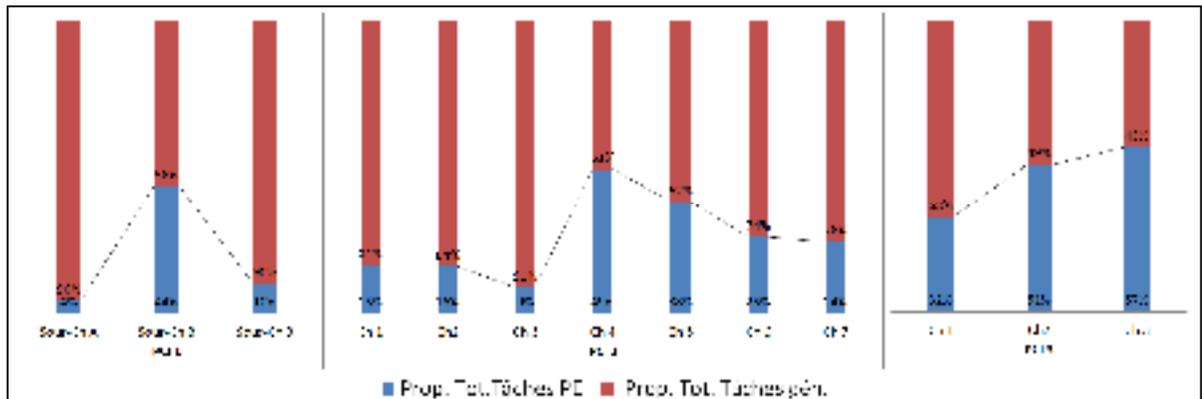


Figure 3.5 : Distribution du temps passé par sujet par charrettes

Les résultats démontrent que même sur un PCI, l'utilisation de la simulation énergétique et le sujet de la performance énergétique du projet n'est pas entrepris dès les phases initiales de la conception, mais lorsque le projet est bien établi vers le milieu du processus. L'utilisation des résultats issus de la simulation énergétique, par les équipes des projets observés, se faisait en général principalement à la fin du dossier préliminaire.

3.2.2 Distributions des efforts au cours des charrettes

Une analyse quant à la répartition des types de tâches de Liston, Fischer et Kunz (2000) permet d'évaluer la distribution et les efforts de l'équipe dans le temps au terme du processus (voir section 1.1.4.2 p. 20). La figure 3.6 illustre cette distribution et la proportion de temps auquel l'équipe s'y est concentrée.

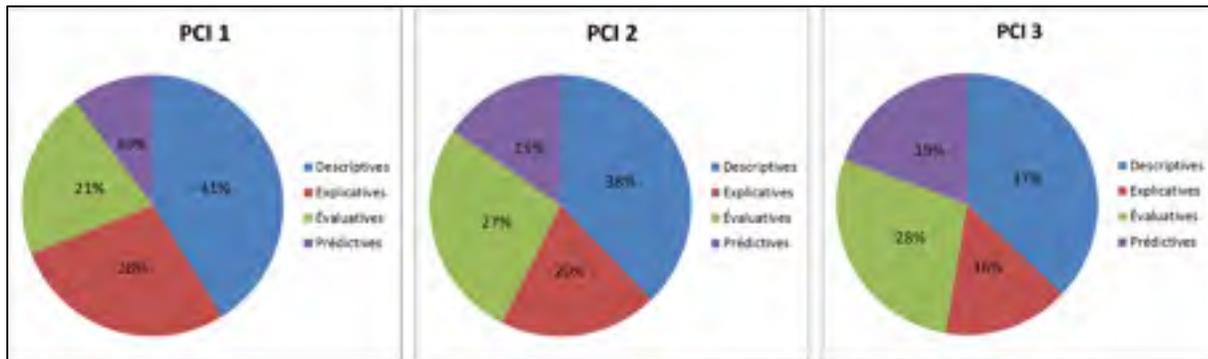


Figure 3.6 : Répartition des tâches au cours des charrettes du PCI

De manière générale, une plus grande proportion de tâches de type prédictives au cours du processus complet du projet PCI 3 par rapport au PCI 1 et PCI 2 est notée. Dans un objectif d'évaluation de l'impact de l'utilisation de la simulation énergétique et du développement de la performance énergétique du projet sur les efforts conceptuels en charrette, la proportion des tâches évaluatives et prédictives a été divisée en fonction du sujet des efforts qu'elle représente. Les deux sujets étant : la performance énergétique du projet ou le projet en général. Seules les tâches de nature évaluatives et prédictives du concept furent départies, car ce sont les tâches ayant un impact réel sur la proposition finale du concept notamment en ce qui a trait à la performance énergétique du futur bâtiment. La répartition des tâches effectuées dans le temps selon les sujets traités en charrette et sur l'ensemble des PCI observés est présentée à la figure 3.7.

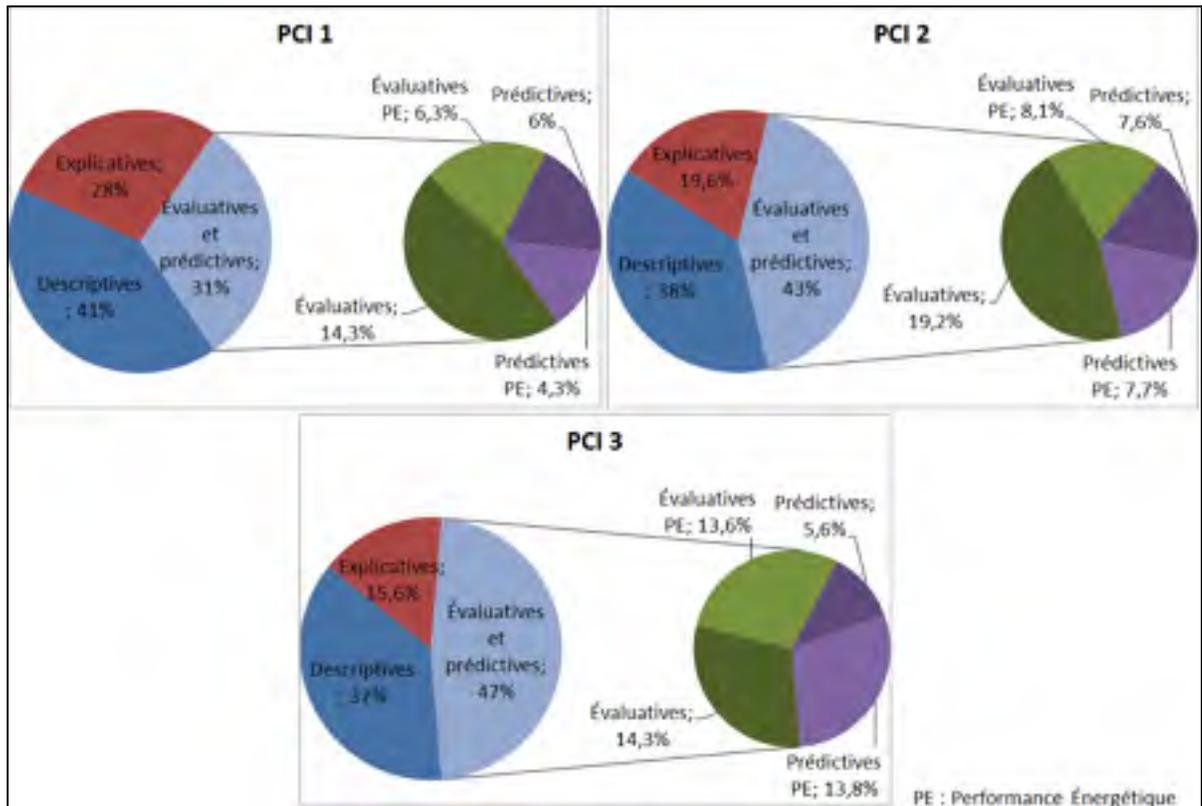


Figure 3.7 : Répartition des tâches au cours des charrettes du PCI selon les sujets traités

Une analyse des tâches prédictives et évaluatives identifiées sur le PCI 3 a révélé qu'elles étaient plus axées sur la performance énergétique du bâtiment que sur le projet en général et qu'elles apparaissaient en plus grand nombre que sur les autres projets. Également, il fut observé que le processus décisionnel de l'équipe s'appuyait sur les résultats et analyses issus de la simulation énergétique. Selon les observations faites, l'intégration d'un outil de simulation énergétique aux charrettes de conception est imputable à l'orientation des tâches évaluatives et prédictives de l'équipe vers une amélioration de la performance énergétique. Le tableau 3.4 présente la distribution des efforts conceptuels des équipes de conception dans le temps au cours des charrettes ainsi que la fréquence d'occurrences de ces tâches.

Tableau 3.4 : Proportion et fréquence d'occurrences des tâches au cours des charrettes du PCI

PCI 1		Ch1 - Struc.		Ch1 - Méc.		Ch1 - Arch.		Total	
Tâches	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	
Descriptives	35%	28	39%	33	48%	71	41,1%	132	
Explicatives	31%	24	27%	29	26%	55	28,0%	108	
Évaluatives	18%	13	4%	5	20%	38	14,3%	59	
Évaluatives PE	1%	7	16%	20	3%	3	6,3%	27	
Prédicatives	14%	10	2%	2	2%	8	6,0%	20	
Prédicatives PE	1%	1	12%	15	0%	0	4,3%	16	
PCI 2		Ch 1		Ch 2		Ch 3		Ch 4	
Tâches	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	
Descriptives	38%	38	34%	27	43%	40	29%	31	
Explicatives	16%	21	31%	21	17%	20	26%	24	
Évaluatives	29%	27	14%	13	18%	21	10%	7	
Évaluatives PE	3%	2	5%	4	4%	5	16%	19	
Prédicatives	11%	7	6%	4	14%	13	4%	3	
Prédicatives PE	3%	5	10%	9	4%	4	15%	16	
		Ch 5		Ch 6		Ch 7		Total	
Tâches	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	
Descriptives	40%	25	44%	34	35%	23	37,8%	218	
Explicatives	12%	12	11%	11	25%	15	19,6%	124	
Évaluatives	21%	17	21%	19	20%	10	19,2%	114	
Évaluatives PE	10%	5	8%	8	12%	13	8,1%	56	
Prédicatives	5%	6	9%	8	3%	2	7,6%	43	
Prédicatives PE	12%	4	7%	7	5%	6	7,7%	51	
PCI 3		Ch 1		Ch 2		Ch 3		Total	
Tâches	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	%	Fré. Occ.	
Descriptives	37%	37	40%	41	34%	48	37,1%	126	
Explicatives	15%	21	14%	19	17%	26	15,6%	66	
Évaluatives	21%	24	10%	9	11%	8	14,3%	41	
Évaluatives PE	14%	11	15%	19	12%	14	13,6%	44	
Prédicatives	7%	10	3%	3	6%	5	5,6%	18	
Prédicatives PE	6%	5	17%	21	20%	19	13,8%	45	

Fré. Occ. : Fréquences d'occurrences PE : Performance Énergétique

Sur l'ensemble des projets observés, les proportions de temps passé sur les différents types de tâches équivalent à la proportion de la fréquence d'occurrence de ces tâches. Dans l'ensemble, le temps passé sur une tâche est représentatif d'un projet à l'autre. Il y est remarqué que les tâches prédictives en lien avec la performance énergétique du projet apparaissent principalement lors des charrettes traitants de l'énergie et des systèmes mécaniques. Cela est notable pour la sous-charrette 1 pour le PCI 1, la charrette 4 et la charrette 5 pour le PCI 2, et la charrette 2 et la charrette 3 pour le PCI 3. C'est aussi au cours

de ces charrettes qu'étaient identifiées les variables et les paramètres pour la vérification de la consommation énergétique du projet par la simulation énergétique pour le PCI 1 et PCI 2. Pour le PCI 3, c'est pendant les charrettes 2 et 3 que les résultats de différents concepts simulés obtenus par la simulation énergétique ont été évalués. La répartition des tâches effectuée dans le temps par charrettes est présentée à la figure 3.8.

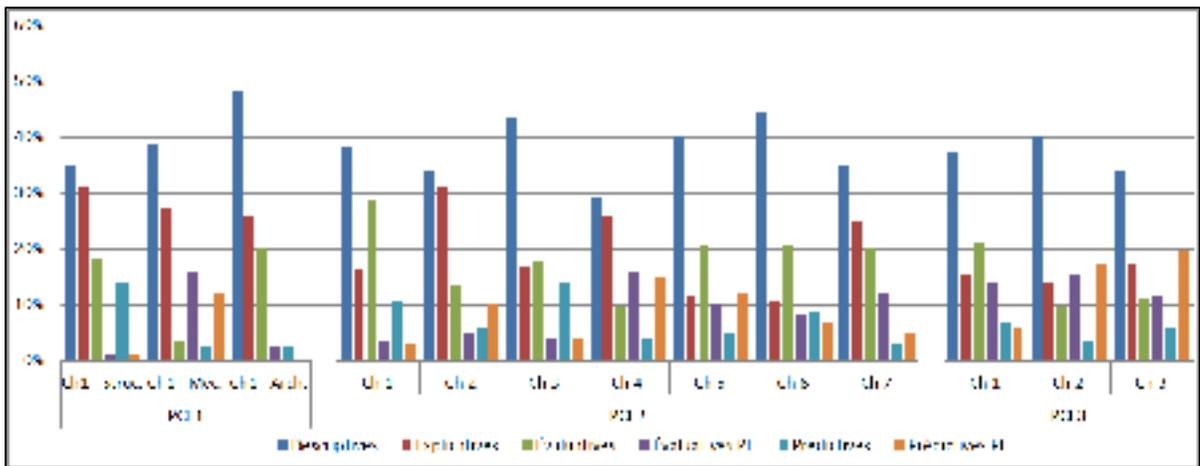


Figure 3.8 : Distribution des tâches au cours des charrettes du PCI

Pour donner suite à ces observations, l'intégration d'outils de simulation énergétique en PCI permet de mieux orienter les efforts des membres de l'équipe de conception vers des tâches qui apportent une amélioration du concept telle que des tâches prédictives et évaluatives. Également, il peut être souligné que plus un processus utilise les résultats issus des outils de simulation énergétique, plus les tâches prédictives et évaluatives de l'équipe de conception portent sur la thématique de la performance énergétique du projet. Les résultats issus de nombreux outils de performance énergétique peuvent permettre aux membres de l'équipe d'un PCI de mieux analyser et évaluer l'efficacité de leur concept et de les amener à chercher des solutions innovantes tout en augmentant la proportion de ces efforts.

3.2.3 Distribution de la participation au cours du processus

Cette section présente les analyses effectuées sur les PCI observées quant à la distribution des interventions entre les participants dans le temps au cours des charrettes. Dans une optique d'évaluer la participation de l'équipe en ce qui a trait à l'aspect de l'amélioration de la performance énergétique du projet, les interventions au cours de charrettes ont été catégorisées en deux types : (1) les interventions ayant eu cours lors de la charrette et (2) les interventions ayant eu cours lors de la charrette, mais portant spécifiquement sur les sujets de la performance énergétique du projet et de l'utilisation d'outils de simulation énergétique. La figure 3.9 présente la distribution de la participation par spécialité en rapport avec les différents sujets évalués en charrette. Les charrettes analysées pour évaluer cette participation sont celles où les résultats de la simulation énergétique ont été présentés et ont porté sur la thématique de l'amélioration de la performance du concept.

Il est remarqué au cours du processus général que les interventions décisionnelles et conceptuelles en charrette sont majoritairement orientées et tenues par l'architecte. De plus, sur la totalité des processus, la majorité des interventions est tenue par une minorité d'intervenants. Néanmoins, il est observé qu'au cours des charrettes portant sur la thématique de l'efficacité énergétique du projet et de l'analyse des résultats des simulations énergétiques, il y a une participation plus importante de l'ingénieur mécanique que de l'architecte sur les projets PCI 2 et PCI 3. Une participation importante du client et de l'opérateur est observable sur le PCI 1. Également, dans le cas du PCI 1, l'augmentation de la participation du client est associée à deux ingénieurs en mécanique et en électrique représentant le client sur la charrette du dimensionnement des services électromécaniques. Une augmentation de la participation est observable auprès des ingénieurs, des opérateurs et des ingénieurs responsables de la simulation énergétique en charrette lorsque sont traités les sujets de la performance énergétique du projet et de l'utilisation d'outils de simulation énergétique.

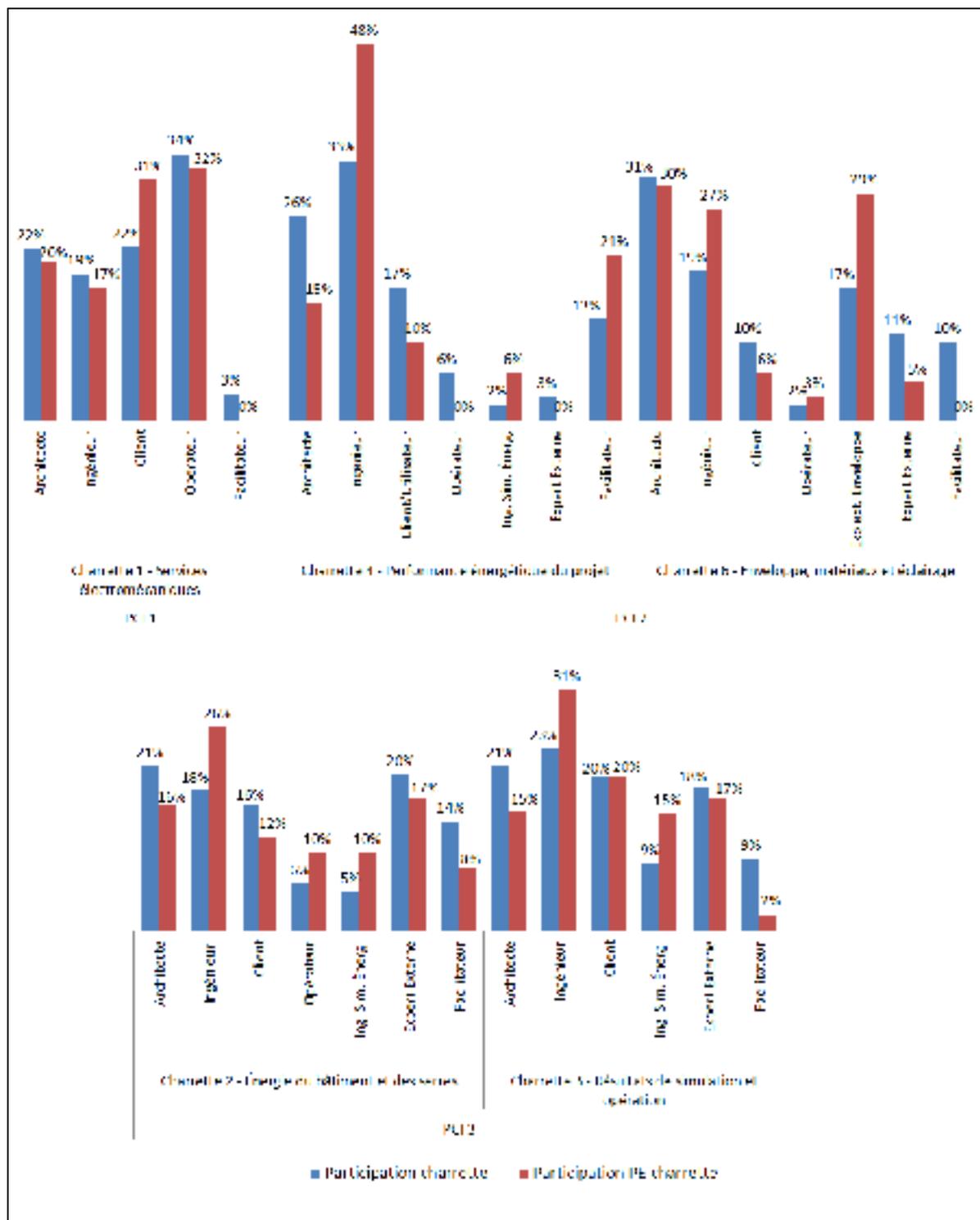


Figure 3.9 : Proportion de la participation par spécialité au cours des charrettes traitant principalement de la performance énergétique du projet

La proportion de participation des ingénieurs mécaniques, des opérateurs et des modelers au sein de l'équipe de conception augmente lors des tâches conceptuelles portant sur la performance énergétique supportée par des outils de simulation énergétique.

3.3 Analyse

Les analyses des trois projets observés et suivant un PCI laissent préjuger qu'il n'y a pas d'approche d'utilisation des outils de simulation énergétique suivie par l'industrie lors d'un PCI. De plus, l'évaluation de la performance énergétique du projet et l'utilisation d'outils de simulation énergétique ne débutent pas avec les charrettes initiales.

L'utilisation de la simulation énergétique débute, au plus tôt, à la fin de la phase du dossier préliminaire, principalement pour valider le concept final ou pour évaluer des stratégies de performances énergétiques actives. Cette approche prive l'équipe de conception du potentiel des outils de simulation énergétique dans l'évaluation de scénarios conceptuels intégrant des stratégies passives et bioclimatiques lors des charrettes initiales traitant des aspects architecturaux de niveau 1 et 2 (Lechner, 2008). C'est au cours de ces phases que les potentiels de réductions énergétiques sont les plus élevés.

Également, il a été remarqué que l'utilisation de la simulation énergétique et d'une approche favorisant les efforts portés sur l'amélioration de la performance énergétique a un impact sur la proportion du type de tâches conceptuelles effectuées en charrette. Une interrelation est observable quant à l'augmentation de la proportion des tâches du type prédictif et évaluatif et l'utilisation d'outils de simulation énergétique. Cependant, le travail collaboratif effectué au cours des charrettes initiales du PCI 2 nécessitant la conception, l'évaluation et l'itération de différents scénarios conceptuels au cours des charrettes représente une piste à suivre quant à l'élaboration d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique dans un PCI.

L'utilisation d'outils de simulation sur le PCI 3 afin d'évaluer différents scénarios et stratégie d'efficacité énergétique ainsi que l'approche proposée par Hydro-Québec (2015) structurée en trois charrettes représente un cadre propice à l'amélioration énergétique d'un projet.

CHAPITRE 4

CADRE PROPOSÉ D'UTILISATION D'OUTILS DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE AU SEIN D'UN PCI

Le cadre proposé d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI s'appuie sur les pratiques documentées dans la littérature et les constats établis suite aux observations réalisées sur trois projets réels suivant un PCI. Le présent cadre est proposé pour tout projet de types commercial et institutionnel pour l'industrie de la construction au Québec. Il suggère un processus d'utilisation des résultats issus d'outils de simulation énergétique afin d'assister l'équipe de conception dans l'analyse de stratégies d'amélioration de la performance énergétique du projet. Le présent chapitre présente le cadre proposé à la section 4.1. La section 4.2 détail le déroulement du cadre ainsi que ses limites à la section 4.3. La section 4.4 propose certains outils de simulation énergétique.

4.1 Présentation du cadre proposé

Le cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI proposé est illustré à la figure 4.1.

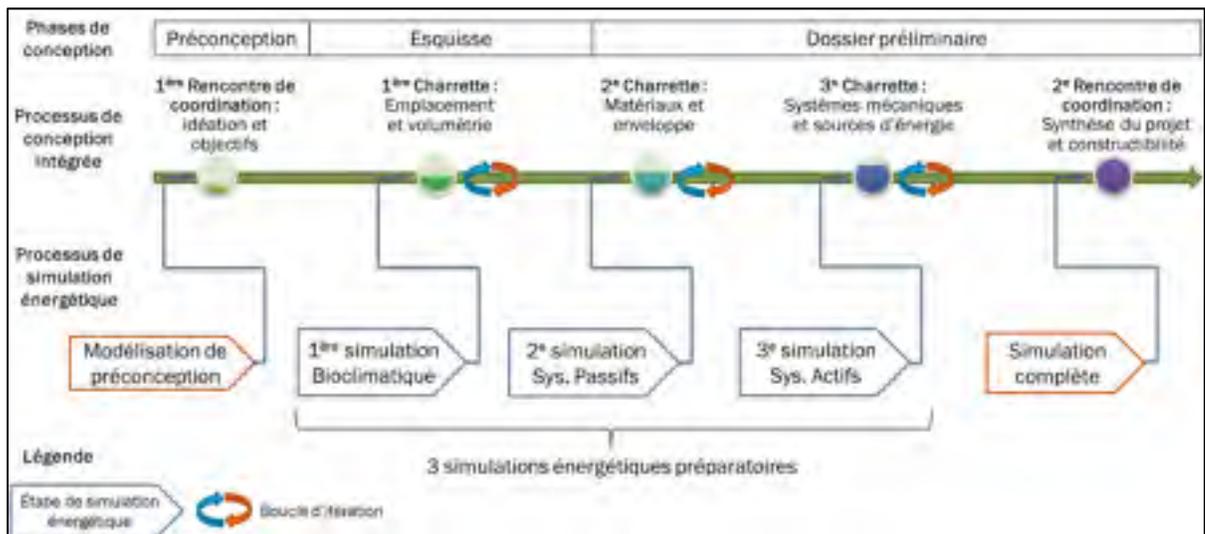


Figure 4.1 : Cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI

Le cadre propose la tenue de 3 charrettes. Les thèmes des trois charrettes ont été choisis afin de permettre un meilleur survol des paramètres de conception nécessaires à l'élaboration d'un bâtiment à haute performance énergétique. Les thématiques des 3 charrettes sont : (1) emplacement et volumétrie, (2) matériaux et enveloppe, et (3) systèmes mécaniques et sources d'énergie. Elles permettent également de couvrir l'approche des trois niveaux de conception de la performance énergétique identifiée par Lechner (2008) (*voir* section 1.2 p. 21).

Des simulations préparatoires sont prévues avant chacune des trois charrettes. Les informations produites lors de ces simulations préparatoires sont destinées à assister l'équipe de conception dans sa prise de décision. Les simulations préparatoires doivent être bâties en fonction de l'état d'avancement du concept et des connaissances disponibles sur le projet à chacune des étapes de la conception. Le nombre de simulations énergétiques et leurs portées sont assujettis à la précision et à la complexité de l'information désirée nécessaire à l'avancement du projet.

À la fin de chaque charrette, l'équipe de conception intégrée doit décider si le concept modifié au cours de la charrette nécessite encore un effort d'itération et si la tenue d'une autre charrette portant sur cette thématique est nécessaire. Il s'agit des étapes présentées par les boucles de rétroaction.

Ce cadre d'utilisation se concentre sur les phases initiales du processus de conception, car ce sont les phases où le potentiel d'amélioration énergétique est le plus grand et où les outils de simulation énergétique sont traditionnellement les moins utilisés (Lechner, 2008). Les étapes du cadre présentées à la figure 4.1 sont décrites au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Présentation des étapes du cadre d'utilisation

Étape du processus	Description	Type de simulation
Modélisation de préconception		Caractéristiques et variables permanentes du site (Vent / Ensoleillement)
1 ^{ère} Rencontre de coordination : idéation et objectifs	Sélection des cibles de réduction énergétique et des objectifs du projet / Analyse et révision du PFT	
1 ^{ère} Simulation préparatoire (Bioclimatique)		Orientation / Compacité / Ratio de fenestration / Chauffage passif / Refroidissement passif
1 ^{ère} Charrette : Emplacement et volumétrie	Recherche du meilleur accord du projet avec son environnement	
2 ^e Simulation préparatoire (Systèmes Passifs)		Stratégies passives / Enveloppe / Éclairage naturel / Masse thermique
2 ^e Charrette : Matériaux et enveloppe	Sélection des matériaux / Identification du meilleur compromis entre la résistance de l'enveloppe et le ratio de fenestration	
3 ^e Simulation préparatoire (Systèmes Actifs)		Éclairage artificiel / Systèmes mécaniques / Stratégie de contrôle / Énergies renouvelables
3 ^e Charrette : Systèmes mécaniques et sources d'énergie	Dimensionnement des systèmes mécaniques du projet / Sélection des stratégies de production d'énergie renouvelable	
Simulation énergétique complète		Simulation énergétique complète / Bilan énergétique / Simulation de l'opération du projet
2 ^e Rencontre de coordination : Synthèse du projet et constructibilité	Revue du design et vérification de l'atteinte des cibles de performance	

La présence du modelleur responsable des étapes de simulation énergétique est fortement suggérée au sein de l'équipe de conception. Son rôle est de présenter au groupe les résultats et les particularités des simulations énergétiques préparatoires en lien avec la thématique de la charrette de conception. Au cours de la rencontre, il doit se prononcer sur les impacts

potentiels que pourrait avoir une décision sur le concept en s'appuyant sur les résultats quantifiables de la simulation énergétique. Son apport peut permettre à l'équipe de conception de proposer des solutions et des suggestions pour améliorer la conception du projet. Dans le cas, où un modelleur ne serait pas désigné pour effectuer la simulation complète du projet, les étapes de simulation énergétique préparatoires peuvent être effectuées par les différents professionnels du projet dépendamment de leur spécialité et de la thématique abordée. À cet égard, la modélisation de préconception, c'est-à-dire la première et la deuxième simulation préparatoire, seraient la responsabilité de l'architecte. La troisième simulation préparatoire et la simulation complète du projet seraient pour leur part la responsabilité de l'ingénieur mécanique.

La coordination et l'échange d'informations, entre les professionnels sur le projet et l'intervenant responsable d'effectuer la simulation énergétique, sont très importants pour le succès du processus. Les données nécessaires aux simulations énergétiques préparatoires du cadre ainsi que les livrables sont présentés à la section 4.2.

4.2 Planification et déroulement proposé

Les étapes de simulations énergétiques préparatoires, le flot d'informations nécessaires à la préparation des simulations énergétiques préparatoires et les rencontres et les charrettes sont détaillés dans cette section.

4.2.1 Préconception

La phase de préconception a pour objectif de permettre à l'équipe de conception d'évaluer les alternatives et les hypothèses de base sur lesquelles l'équipe veut concevoir le projet tout en étant conforme au PFT. Le PFT est évalué et révisé au cours de cette phase.

4.2.1.1 Modélisation de préconception

Une modélisation sommaire du site du projet peut renseigner l'équipe dès le début de la conception sur plusieurs particularités du site ayant un impact sur la performance énergétique du projet. La trajectoire du soleil, le potentiel d'ensoleillement disponible sur le site et les effets d'ombrage des bâtiments et de la végétation en périphérie peuvent être simulés. Également, une analyse des données climatiques et des vents dominants de la zone à l'étude est effectuée. Le flot d'informations nécessaires à cette étape est présenté à la figure 4.2.

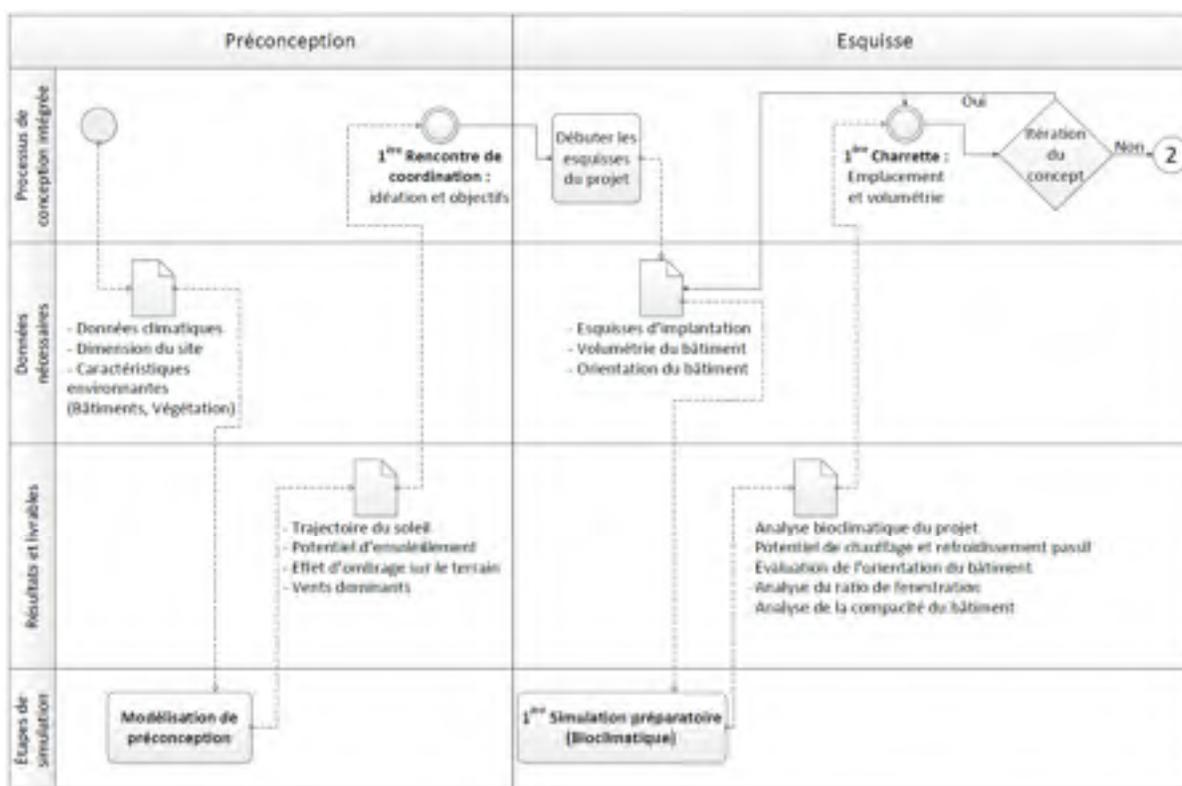


Figure 4.2 : Flot d'informations nécessaires à la première rencontre de coordination et à la première charrette

4.2.1.2 1^{ère} Rencontre de coordination

La première rencontre de coordination a pour objectif de réunir l'équipe de conception afin qu'elle se familiarise avec le projet et le fonctionnement du PCI. C'est pendant la rencontre de coordination que le PFT est évalué et modifié au besoin. Tout en respectant les besoins du client, des efforts devraient être déployés afin de diminuer l'espace d'occupation planifié au projet. Ces efforts peuvent entraîner une diminution de la consommation énergétique du projet tout en éliminant des surcoûts de construction et d'opération. Également, les codes de référence énergétique et les cibles de réduction énergétique visés sont choisis. Les points importants du projet, ses contraintes et la vision des participants du projet sont identifiés. Les contraintes climatiques du site du projet identifiées suite à la modélisation de préconception sont présentées à l'équipe de conception. Une réflexion d'équipe devrait être faite quant aux synergies possibles du projet avec les bâtiments avoisinants soit par la création d'une boucle de récupération d'énergie ou de façon à maximiser les parois mitoyennes du projet avec ces autres bâtiments.

4.2.2 Esquisse

C'est pendant l'esquisse que débute la schématisation de la forme du bâtiment et de son implantation au site. Plusieurs scénarios de volumétrie et d'implantation au site devraient être étudiés lors de cette phase. De plus, l'approche bioclimatique est évaluée, de même que l'implantation de stratégies passives sur le projet.

4.2.2.1 1^{ère} Simulation préparatoire (Bioclimatique)

Lors de la planification de la première charrette, une simulation énergétique préparatoire doit être effectuée selon les principes de l'approche bioclimatique. Elle débute par la simulation d'un scénario servant de modèle de référence. Par la suite, diverses orientations et ratios de fenestration par façade sont simulés de façon à connaître leurs impacts sur la performance du projet. L'amélioration du potentiel de chauffage passif est le principal paramètre à l'étude lors de l'évaluation de l'orientation et du ratio de fenestration du projet. Également,

différentes options portant sur la compacité et la volumétrie du projet sont évaluées en fonction de leurs impacts sur les charges du bâtiment de référence. Le potentiel de ventilation naturelle selon la volumétrie du bâtiment est simulé. Le flot d'informations nécessaires pour effectuer cette première simulation et les livrables qu'elle peut fournir sont présentés à la figure 4.2.

4.2.2.2 1^{ère} charrette (Emplacement et volumétrie)

Le thème de cette charrette de conception traite de l'aménagement du site et de la volumétrie du bâtiment. C'est lors de cette charrette que sont présentés les résultats des différents scénarios de simulation énergétique et l'analyse paramétrique des stratégies de performance énergétique bioclimatique simulés en fonction du modèle de référence. Cette analyse paramétrique des aspects bioclimatiques du projet peut présenter l'impact de différentes formes du bâtiment et de l'orientation du projet sur les charges internes. Un scénario est sélectionné en équipe afin de déterminer l'implantation et la volumétrie du projet. Le scénario sélectionné peut également être envisagé en fonction des points positifs identifiés par la simulation énergétique préparatoire des différents scénarios étudiés. Une fois le scénario sélectionné par l'équipe, celle-ci est davantage en mesure de visualiser l'impact de l'orientation et du ratio de fenestration sur le potentiel de chauffage passif du projet. L'équipe peut également mieux évaluer l'impact de la forme du bâtiment sur le potentiel de refroidissement passif et sur le potentiel de la ventilation naturelle au sein du bâtiment.

À la fin de la charrette, l'équipe statue sur la nécessité d'effectuer une autre charrette qui porterait sur l'implantation et la volumétrie du projet. La tenue de cette charrette serait envisagée si le scénario sélectionné lors de cette 1^{ère} charrette diverge beaucoup des scénarios simulés lors de la première étape de simulation préparatoire. Dans ce cas, une autre étape de simulation préparatoire devrait être effectuée sur le nouveau scénario proposé. Cela éviterait à l'équipe de conception de développer davantage un concept du projet dont la performance énergétique selon les stratégies bioclimatiques n'aurait pas été simulée.

4.2.3 Dossier préliminaire

C'est au cours du dossier préliminaire que les principaux systèmes du bâtiment sont dimensionnés et détaillés. C'est donc à cette étape que la composition du bâtiment et sa volumétrie sont décidées. La composition de l'enveloppe est évaluée et le dimensionnement des systèmes passifs continu. Avec une volumétrie du concept établie, le dimensionnement des systèmes actifs débute.

4.2.3.1 2^e Simulation préparatoire (Systèmes passifs)

Les résultats recherchés à cette étape de simulation énergétique visent principalement à permettre à l'équipe d'évaluer l'impact de différents scénarios de résistance thermique de l'enveloppe sur les charges du bâtiment. Des itérations paramétriques peuvent être effectuées pour connaître l'impact de différents isolants, matériaux et des compositions de vitrages performants sur les charges du bâtiment, mais aussi leurs impacts financiers sur le projet. Puisque le potentiel de chauffage passif du projet a été amélioré, une évaluation de la surchauffe des zones périphériques du projet et de l'éblouissement des utilisateurs doit être réalisée pour établir des stratégies de contrôle du rayonnement solaire. Différents scénarios d'utilisation de matériaux ayant une masse thermique élevée dans le bâtiment peuvent être effectués afin d'évaluer le potentiel de rétention de chaleur et de refroidissement passif. Le flot d'informations nécessaires à la simulation préparatoire de la deuxième charrette est présenté à la figure 4.3. Les impacts de ces paramètres et ces stratégies de performance énergétique sur l'intensité d'utilisation énergétique (IUE) des scénarios évalués peuvent être comparés au modèle de référence afin de connaître la performance énergétique du projet.

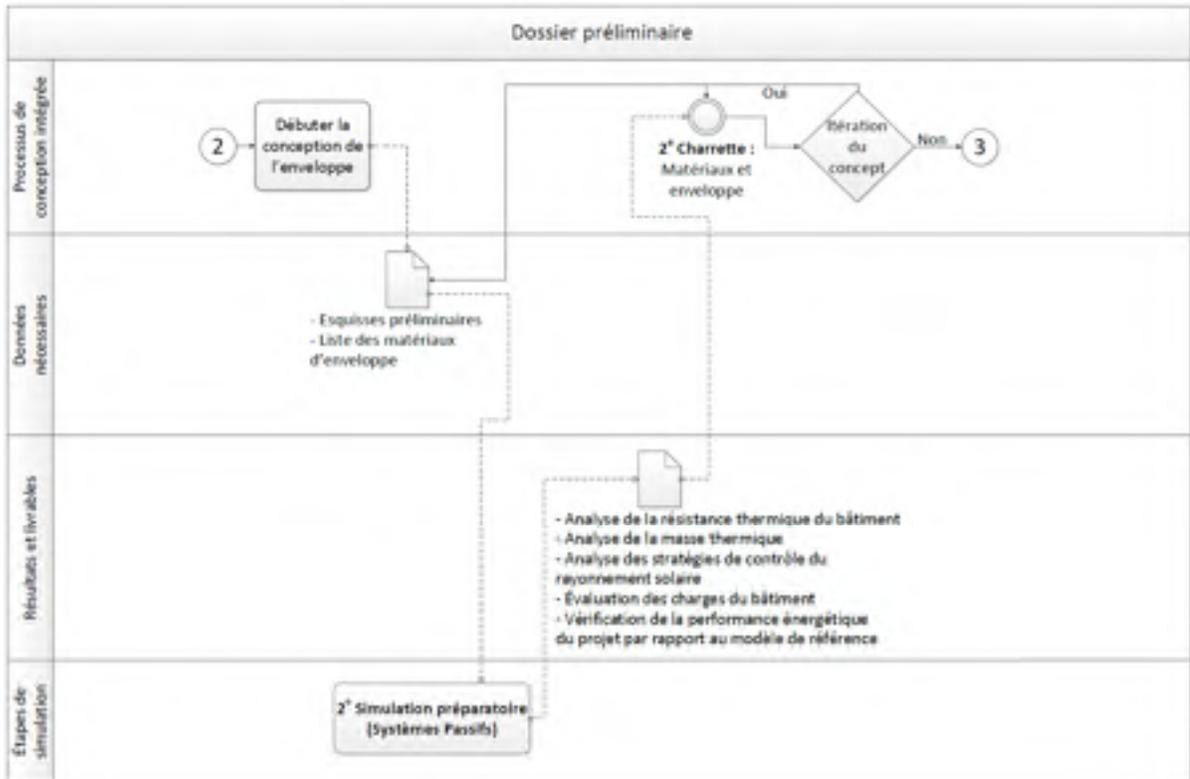


Figure 4.3 : Flot d'informations nécessaires à la deuxième charrette

4.2.3.2 2^e charrette (Matériaux et enveloppe)

Les principaux systèmes passifs qui peuvent être intégrés au projet sont déterminés au cours de cette charrette soit : une enveloppe performante, l'implantation de stratégies de rétention et de contrôle de la chaleur, ainsi que l'amélioration de l'éclairage naturel dans le bâtiment. Les résultats de la deuxième étape de simulation préparatoire sont présentés à l'équipe. C'est à cette étape que le groupe décide de la résistance thermique de l'enveloppe, de ses différents matériaux et compositions selon l'analyse énergétique des différents scénarios. L'évaluation de la constructibilité de l'enveloppe est effectuée afin de maximiser son étanchéité et de diminuer les ponts thermiques. Plusieurs stratégies de contrôle du rayonnement solaire dans le bâtiment sont envisagées pour contrôler la surchauffe et l'éblouissement des usagers aux endroits identifiés par l'analyse de la simulation énergétique. Des matériaux présentant une forte inertie thermique sont choisis pour l'intérieur du bâtiment afin de stocker la chaleur ou pour favoriser le refroidissement passif, en plus de permettre de déphaser les variations

rapides de la température extérieure. La performance énergétique du projet simulée et présentée au début de la charrette par rapport à un modèle de référence permet d'identifier si le concept atteindra les cibles établies au début de processus. À la fin de la charrette, il est important que l'équipe de conception s'assure que les efforts conceptuels adéquats ont été déployés quant à l'intégration des stratégies passives sur le concept. Cette vérification vise à assurer que le dimensionnement des systèmes CVCA évalués lors de la prochaine charrette sera effectué en fonction des charges internes du bâtiment les plus réduites possible. C'est à ce moment que l'équipe de conception décide si une autre itération du concept, une autre charrette sur l'enveloppe et les matériaux et une autre simulation énergétique préparatoire sur les systèmes passifs sont nécessaires.

4.2.3.3 3^e Simulation préparatoire (Systèmes actifs)

Le modèle de référence du projet est retravaillé et actualisé afin de représenter les derniers avancements du concept choisis lors de la deuxième charrette. Les principaux résultats visés par cette simulation énergétique sont la consommation d'énergie totale préliminaire du bâtiment, notamment celle des systèmes CVCA, des équipements du projet, de l'éclairage artificiel et du potentiel de production d'énergies renouvelables sur le projet. Au cours de cette étape de simulation préparatoire, différents scénarios d'opération des systèmes CVCA sont simulés selon les horaires d'occupation du projet. Les impacts des stratégies de récupération de chaleur sur le préchauffage de l'air et sur les équipements doivent aussi être pris en compte dans la simulation énergétique du projet. Le potentiel de production d'énergie des différentes stratégies de production d'énergies renouvelables sur le projet est simulé. Le retour sur investissement des stratégies actives et de production d'énergies renouvelables est estimé. L'IUE du projet, plus représentatif que lors de la dernière étape de simulation préparatoire, peut être comparée à l'IUE du modèle de référence afin de connaître l'évolution de la performance énergétique du projet. Le flot d'informations nécessaires à la simulation préparatoire de la troisième charrette est présenté à la figure 4.4.

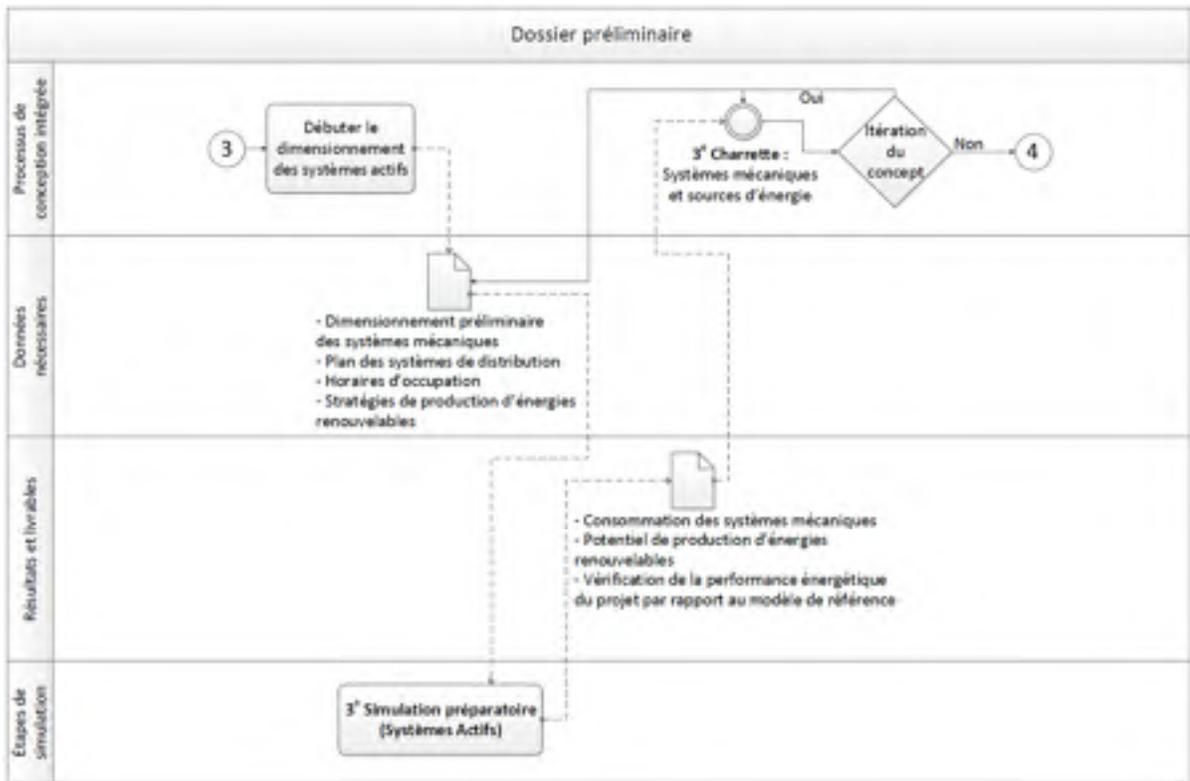


Figure 4.4 : Flot d'informations nécessaires à la troisième charrette

4.2.3.4 3^e charrette (Systèmes mécaniques et sources d'énergie)

Le but de cette charrette vise à évaluer la consommation d'énergie prévue pour le bâtiment. L'équipe de conception choisit les stratégies actives et les stratégies de production d'énergies renouvelables à intégrer au projet. Également, la sélection et le dimensionnement des systèmes CVCA sont évalués par l'équipe de conception. L'emplacement de la salle mécanique ainsi que les différents scénarios d'opération des systèmes CVCA sont finalisés lors de cette charrette. Les stratégies actives de contrôle par rapport à l'éclairage artificiel, comme des capteurs de présence et la sélection d'ampoules performantes, sont également effectuées à cette étape. La performance énergétique du projet simulée et comparée selon un modèle de référence permet à l'équipe de conception de vérifier l'atteinte des cibles et des objectifs de conception. Une autre charrette de conception portant sur les systèmes mécaniques et les stratégies actives ainsi qu'une autre étape de simulation préparatoire serait

à prévoir si les cibles du projet ne sont pas rencontrées et que l'intégration de stratégies actives plus importantes est à prévoir pour atteindre ces cibles.

4.2.3.5 Simulation complète

À cette étape est réalisée une simulation énergétique complète représentant le concept développé lors des trois charrettes de conception. L'opération du projet est simulée et sa consommation totale est connue ainsi que la performance énergétique complète du projet par rapport au modèle de référence du projet. Le flot d'informations nécessaires à la simulation énergétique finale avant la rencontre de coordination synthèse du projet est présenté à la figure 4.5.

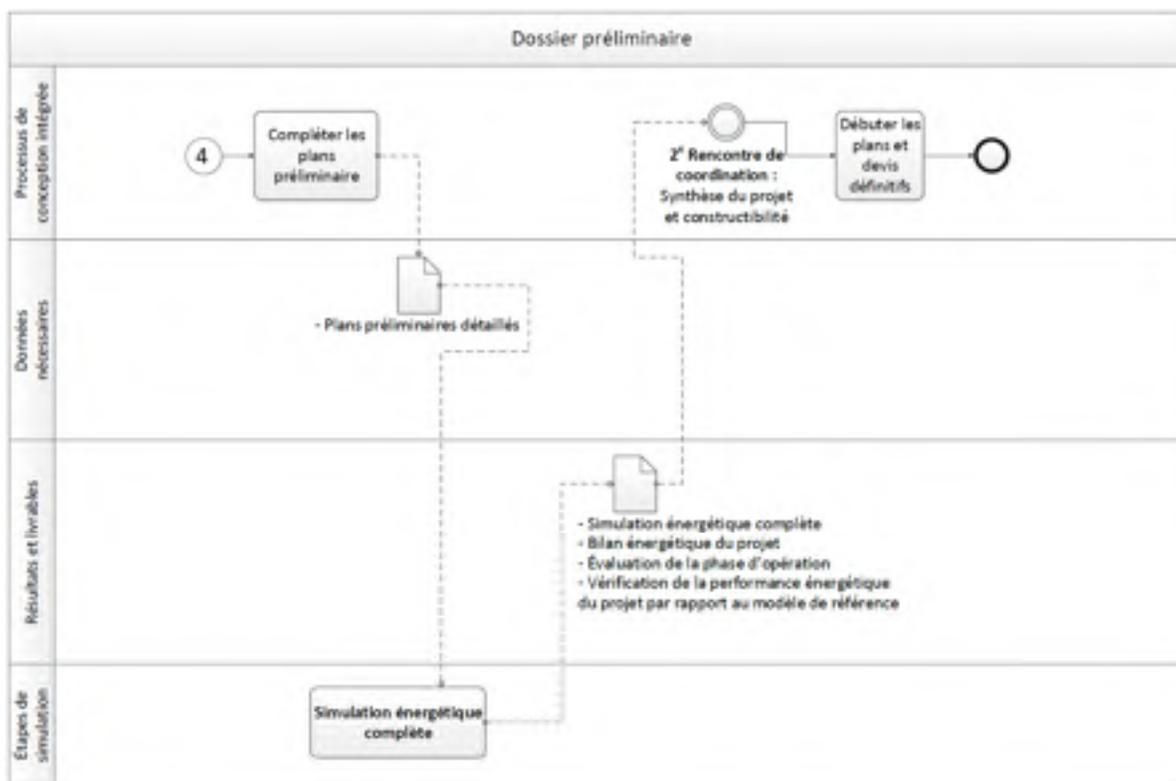


Figure 4.5 : Flot d'informations nécessaires à la deuxième rencontre de coordination

4.2.3.6 2^e Rencontre de coordination

La deuxième rencontre de coordination, c'est l'occasion de réviser certains aspects du projet. Un bilan énergétique du bâtiment est d'abord réalisé pour évaluer non seulement sa consommation totale, mais aussi sa constructibilité. Ensuite, une validation finale des cibles choisies au début de la conception du projet est faite par l'équipe. Également, cette réunion sert à mettre fin au processus de conception en charrette et vise à coordonner la mise en plan définitif du projet et la rédaction des documents techniques pour l'étape de construction.

4.3 Limites du cadre d'utilisation proposé

À la fin de la 2^e rencontre de coordination, si l'équipe de conception statue, avec l'accord du client, qu'aucune nouvelle itération du concept n'est nécessaire, le processus de conception peut passer à la prochaine étape, soit à la phase du dossier définitif. Les professionnels peuvent alors compléter l'élaboration des plans et devis aux fins de soumission. La transition entre la phase du dossier préliminaire et du dossier définitif peut être amorcée par une vérification des trois éléments suivants :

1. l'atteinte des cibles de performance énergétique choisies par l'équipe est confirmée par la simulation énergétique complète du projet ;
2. la conformité du concept avec le plan de mise en service amélioré (MESA) du projet ;
3. une analyse de valeur positive quant au ratio coût/bénéfice du design. Cette analyse permet d'établir que les stratégies intégrées au projet sont rentables et ajoutent une valeur ajoutée au bâtiment.

Selon le niveau d'intégration du groupe de conception au terme des phases de conception, le projet passe au processus de réalisation de projet de conception-soumission-construction classique.

4.4 Outils suggérés

Une liste et une description des outils les plus fréquemment utilisés au sein de l'industrie sont présentées en annexe (*Voir* ANNEXE II p.115). Également, cette liste catégorise les outils selon leur capacité d'effectuer les cinq types de simulations préparatoires aux rencontres de projet. Ils sont aussi catégorisés selon les principaux paramètres de simulations identifiées par Attia et *al.* (2012).

CHAPITRE 5

APPLICATION DU CADRE PROPOSÉ

Une mise en application du cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI proposé a été effectuée au sein d'un groupe témoin. Cette application s'est déroulée dans le cadre d'un cours universitaire sur la conception intégrée. Le cours regroupait des étudiants en génie de la construction et en génie mécanique de l'ÉTS, ainsi que des étudiants en design de l'environnement de l'UQAM. Deux charrettes intensives d'une durée de deux jours chacune à raison de 7 heures par jour ont été organisées, dans l'objectif de concevoir un ensemble de bâtiments. Le groupe témoin représentait donc six équipes de conception composées de façon uniforme quant aux disciplines des participants. Pour faciliter l'utilisation d'un outil de simulation énergétique de façon préparatoire aux charrettes, le cadre proposé et le volet de recherche intégrée au cours ont été présentés auprès des représentants de chaque discipline afin de les encourager à suivre cette approche.

Cette mise en application au sein de ce groupe témoin permet d'évaluer l'impact que peut avoir l'utilisation de la simulation énergétique préparatoire sur le processus de travail collaboratif et sur le processus décisionnel au cours des charrettes. Les résultats obtenus lors de l'application du cadre proposé permettent d'établir une discussion quant à l'impact de ce cadre et de formuler des recommandations quant à son utilisation. Ce chapitre présente le cadre proposé utilisé par le groupe témoin à la section 5.1. Les résultats obtenus par les observations ainsi que les questionnaires portés sur celui-ci sont présentés à la section 5.2. Par la suite, la section 5.3 dresse le bilan d'utilisation du cadre proposé appuyé par les résultats obtenus par le biais d'entrevues et d'un groupe de discussion tenus avec les participants du groupe témoin.

5.1 Présentation du cadre proposé ajusté

Le cadre proposé au chapitre 4 (*voir* figure 4.1 p. 73) a été ajusté afin de s'inscrire dans le déroulement du PCI du cours qui spécifiait la tenue de deux charrettes. Ce cadre proposé ajusté est présenté à la figure 5.1.

Les thématiques des deux charrettes du processus du cours sont très représentatives des deux premières du cadre d'utilisation proposé. La première charrette du processus visait à établir l'emplacement et la volumétrie des bâtiments sur le site de façon à profiter des différentes synergies selon leurs usages. La seconde charrette visait à choisir les paramètres composant l'enveloppe du concept et d'effectuer le dimensionnement préliminaire des systèmes CVCA. Cette seconde charrette représente donc une combinaison des charrettes 2 et 3 du cadre proposé au chapitre 4 (*voir* figure 4.1 p. 73).

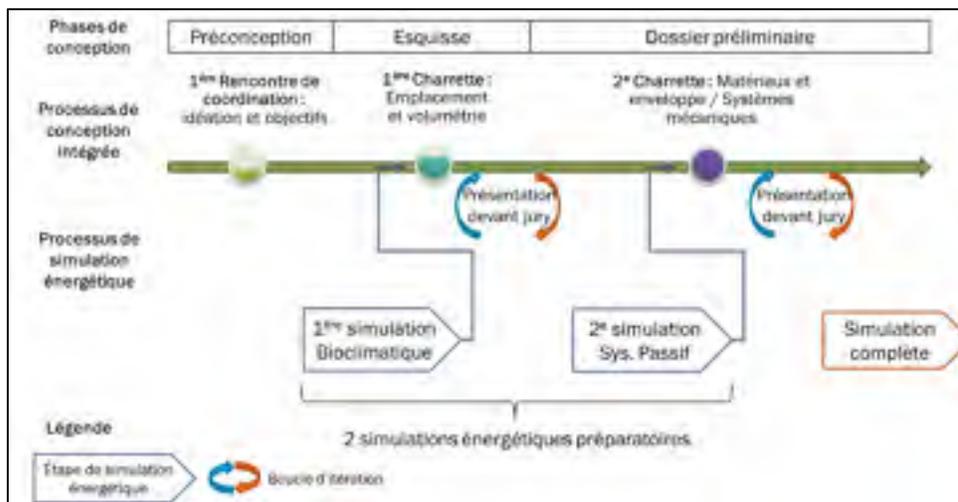


Figure 5.1 : Cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique ajusté au PCI du cours

La pertinence en début de processus d'une rencontre de coordination et d'idéation afin d'établir les visées et les cibles du projet a été présentée aux différentes disciplines des équipes de conception. La tenue de cette rencontre était cependant optionnelle et à la discrétion des équipes puisque le déroulement et la coordination de cette rencontre étaient de leur ressort.

De manière à suivre l'approche du cadre proposé ajusté, des simulations énergétiques préparatoires ont été demandées aux représentants de génie mécanique de façon à appuyer les efforts de conception pendant les charrettes. Le mandat de la première simulation énergétique préparatoire visait à effectuer la simulation énergétique de référence du projet afin d'en connaître les charges thermiques. Une analyse bioclimatique de l'impact qu'ont l'orientation, la compacité et le ratio de fenestration de différents scénarios d'esquisses sur ces charges de référence a été effectuée lors de cette étape de simulation préparatoire à la charrette 1. Le mandat de la deuxième simulation énergétique préparatoire prévoyait la simulation énergétique des charges du concept choisi afin de faciliter le dimensionnement des systèmes mécaniques et d'évaluer la performance énergétique du projet par rapport à son référent. Des analyses paramétriques des systèmes passifs du bâtiment permettant de connaître l'impact de différentes compositions d'enveloppe et type de vitrage sur les charges internes de référence étaient effectuées lors de cette étape de simulation.

L'outil choisi par les professeurs du cours pour effectuer la simulation énergétique du projet a été l'interface OpenStudio. Cette interface fonctionne avec le logiciel de calcul énergétique EnergyPlus et utilise le logiciel Google SketchUp pour faire une modélisation géométrique du projet. OpenStudio est identifié comme facile d'utilisation et offre la possibilité d'effectuer la simulation énergétique préliminaire du concept, soit les charges du projet ainsi que des analyses paramétriques de base nécessaires aux charrettes du processus (Attia et De Herde, 2011).

Des présentations devant jury ont permis aux équipes de recueillir des commentaires sur leur concept et de servir d'étape de rétroaction quant à leurs décisions conceptuelles. À la suite de la seconde présentation devant jury et d'une dernière itération du concept par l'équipe de conception, les représentants de génie mécanique ont complété le dimensionnement des systèmes mécaniques et des systèmes d'énergies renouvelables. Une simulation énergétique finale du projet peut alors être effectuée.

5.2 Évaluation de l'application du cadre proposé

L'analyse des résultats issus des observations faites au cours des charrettes, de questionnaires, d'entrevues et d'un groupe de discussion a permis d'évaluer l'impact du cadre proposé sur le processus de travail collaboratif et sur le processus décisionnel en charrette au cours des différentes étapes du processus. Les étapes du processus observées ont été : le processus préparatoire de la charrette 1, la charrette 1 et la charrette 2.

5.2.1 Processus préparatoire à la charrette 1

Des observations ont été effectuées au cours d'un atelier dédié au montage du modèle énergétique préparatoire regroupant les représentants de génie mécanique. Les observations ont été reportées à la grille d'observation au tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Grille d'observation et des constats du processus préparatoire à la charrette 1

Impact évalué	Processus de travail collaboratif	Processus décisionnel	
Variables observées	Flot d'information	Objectifs et stratégies de performance énergétique	Préparation de la modélisation énergétique
Constats	Les informations nécessaires à la préparation de la modélisation énergétique du projet ont été partagées.	Les cibles et principales stratégies de performance énergétique visées ont été établies avant la première charrette.	Une modélisation énergétique de référence du projet est planifiée en préparation à la première charrette.
Équipe 1		√	
Équipe 2	√		√
Équipe 3	√	√	√
Équipe 4	√	√	√
Équipe 5	√		
Équipe 6	√		√

Le flot d'informations nécessaires à l'élaboration d'une modélisation préparatoire à la charrette a été suffisant pour l'ensemble des équipes. Au moins une esquisse présentant la volumétrie du projet a été considérée. Les équipes 4 et 6 ont reçu de la part des représentants d'architecture des esquisses schématiques de différents scénarios d'implantation et de volumétrie pour comparer leurs performances par la modélisation énergétique de chaque scénario. En général, les équipes mécaniques, mis à part l'équipe 3,

n'avaient pas effectué de rencontre de coordination et d'idéation avant la charrette 1. Cela pourrait s'expliquer par une méconnaissance des stratégies bioclimatiques et passives évaluées au cours de la première charrette. Les équipes 1, 3 et 4 ont principalement identifié les synergies actives potentielles entre les bâtiments, notamment afin d'établir un réseau de récupération de chaleur efficace en fonction de l'éloignement entre les différents bâtiments du projet. Une évaluation des paramètres clés de la première charrette, telle que l'orientation du projet, son ratio de fenestration en fonction de l'orientation de ses façades, et sa compacité n'ont pas été mis de l'avant lors de la modélisation énergétique du projet par la majorité des équipes. Leurs modélisations énergétiques présentaient plutôt les concepts schématiques fournis par les représentants d'architecture pour établir une simulation énergétique de référence.

5.2.2 Charrette 1

Les impacts de la modélisation énergétique préparatoire déterminés par les observations faites sur le processus de travail collaboratif et le processus décisionnel à la charrette 1 sont présentés au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Grille d'observation et des constats de la charrette 1

Impact évalué	Processus de travail collaboratif	Processus décisionnel	
		Évaluation de scénarios	Prise de décision
Variables observées	Developpement de la transdisciplinarité		
Constats	L'utilisation des résultats issues de la modélisation énergétique a permis aux représentants de génie mécanique d'être proactif quant à la conception initial du projet.	L'utilisation des résultats issues de la modélisation énergétique l'a été dans un objectifs d'évaluation du concept.	L'utilisation des résultats issues de la modélisation énergétique a eu un impact sur la prise de décision de l'équipe de CI.
Équipe 1	√		
Équipe 2	√		
Équipe 3	√		√
Équipe 4	√	√	√
Équipe 5			
Équipe 6	√	√	√

Une participation importante au travail collaboratif de la part des représentants de génie mécanique à la conception du projet en phase d'esquisse a été observée au cours de la charrette 1. Néanmoins, il a été observé auprès des équipes 1, 2, 3 et 4 que la modélisation énergétique préparatoire à la charrette ne reflétait plus la réalité du concept proposé selon la progression de la charrette. La raison de cette contrainte sur la modélisation énergétique est que le travail des équipes de conception a modifié énormément les esquisses initiales reçues lors du processus préparatoire à la charrette. Les décisions basées sur l'évaluation de la modélisation énergétique préparatoire ont donc été limitées. Des efforts de modélisation énergétique ont été déployés pendant les charrettes par les équipes 2, 3, 4 dans l'objectif d'effectuer une simulation énergétique de référence du nouveau concept proposé afin de valider les décisions prises au cours de la charrette. L'apport de la modélisation énergétique dans le processus de prise de décision et d'évaluation de scénario a donc été limité pour la plupart des équipes.

Ces observations sont également appuyées par les résultats d'un questionnaire distribué à la fin des deux jours de la charrette 1. Les résultats sont présentés à la figure 5.2.

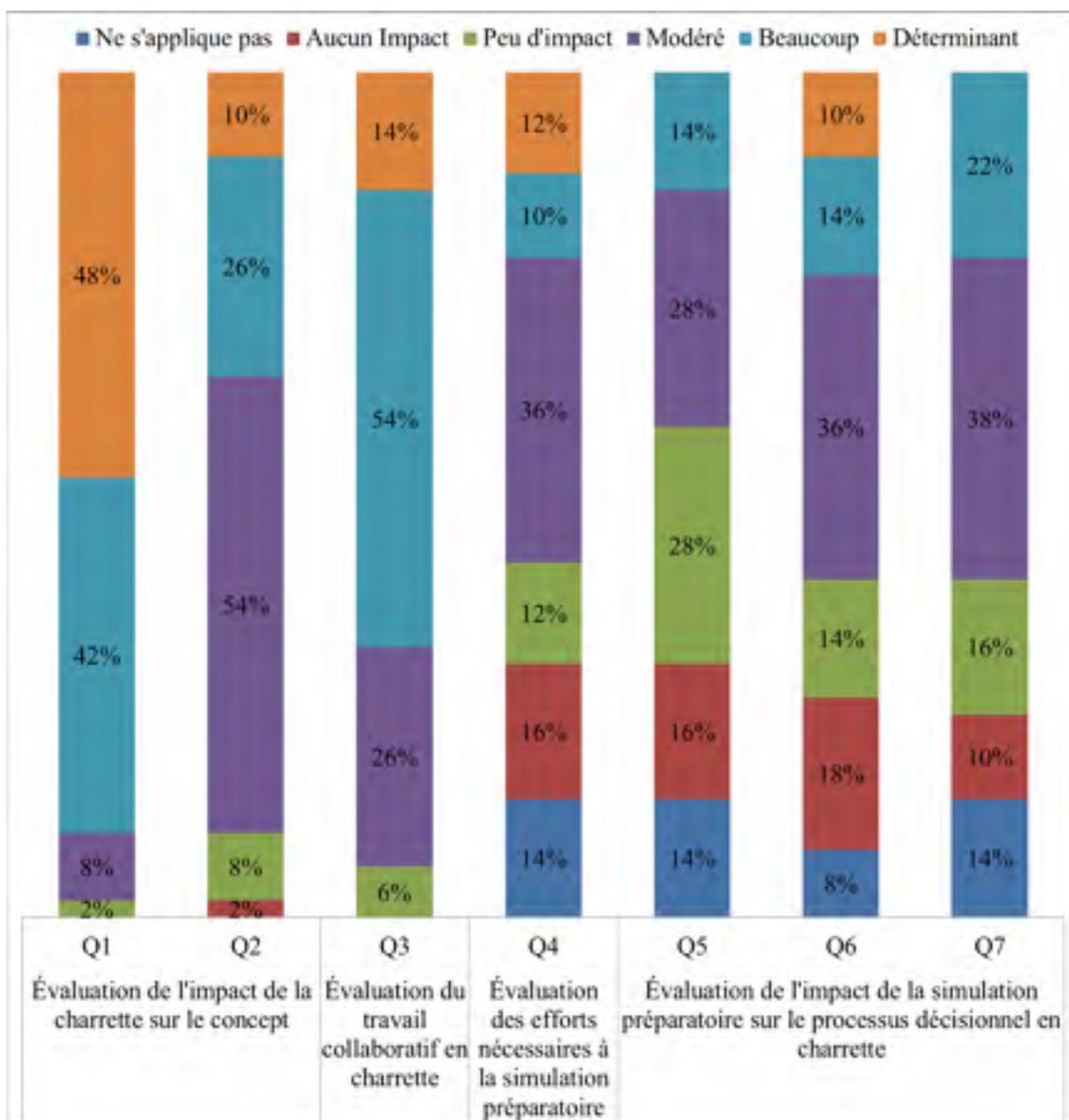


Figure 5.2 : Distribution des réponses du questionnaire 1

L'impact général de la charrette 1 sur le projet (Q1) est évalué comme très important et déterminant sur le développement du projet. Le travail collaboratif (Q3) effectué au cours de la charrette sur l'amélioration du concept a été important et déterminant au sein des équipes de conception et cela auprès des trois disciplines. Néanmoins, les efforts de modélisation énergétique préparatoire à la charrette (Q4) et l'impact de l'utilisation de ces résultats de

modélisation (Q5, Q6, Q7) sur le processus décisionnel ont été principalement identifiés comme modérés.

5.2.3 Charrette 2

Les résultats d'observation quant à l'utilisation des résultats issus de la simulation énergétique sur les processus de travail collaboratif et décisionnel au cours de la charrette 2 sont présentés au tableau 5.3.

L'évaluation d'un concept plus clairement établi, en phase du dossier préliminaire, a eu pour effet de diminuer la collaboration et la transdisciplinarité au sein des équipes de conception. Effectivement, avec le concept architectural établi et itéré suite à la charrette 1 et après la présentation devant jury, le travail collaboratif entre les représentants d'architecture et de génie mécanique a diminué en général au sein des équipes de conception. Une approche de travail en silo entre les disciplines s'est installée pendant la charrette. Les représentants de génie mécanique s'efforçaient surtout de finaliser la modélisation énergétique du concept afin de connaître les charges de chauffage et de climatisation pour entreprendre le dimensionnement des systèmes mécaniques et pour vérifier la performance du projet. Toutefois, des analyses paramétriques sur la résistance thermique de l'enveloppe et du type de vitrage ont permis une utilisation de la simulation énergétique dans un objectif d'évaluation des scénarios et d'aide à la prise de décision. Cependant, pour la moitié des équipes, la modélisation énergétique préparatoire ne fut pas un facteur déterminant au processus décisionnel de l'équipe de conception.

Tableau 5.3 : Grille d'observation et des constats de la charrette 2

Impact évalué	Processus de travail collaboratif	Processus décisionnel	
		Évaluation de scénarios	Prise de décision
Variables observées	Developpement de la transdisciplinarité	Évaluation de scénarios	Prise de décision
Constats	L'utilisation des résultats issues de la modélisation énergétique a permis aux représentants de génie mécanique d'être proactif quant à la conception initial du projet.	L'utilisation des résultats issues de la modélisation énergétique l'a été dans un objectifs d'évaluation du concept.	L'utilisation des résultats issues de la modélisation énergétique a eu un impact sur la prise de décision de l'équipe de CI.
Équipe 1		√	
Équipe 2			
Équipe 3	√	√	√
Équipe 4	√	√	√
Équipe 5			
Équipe 6	√	√	√

Les résultats d'un questionnaire pour évaluer les impacts de l'utilisation de la modélisation énergétique, en préparation à la charrette 2, par les membres des équipes de conception consolident les résultats observés. Ces résultats sont présentés à la figure 5.3. L'impact général de la charrette 2 sur le développement du projet (Q1) et sur l'efficacité du travail collaboratif (Q2) ont été jugés comme modéré par la plupart des répondants. Les réponses sur l'impact de la simulation énergétique sur le processus décisionnel en charrette (Q5, Q6, Q7) ne font pas consensus, mais la plupart des répondants considèrent toutefois que la simulation énergétique a eu peu d'impact sur leur design ou qu'elle fut modérée. Il en va de même quant à l'évaluation des efforts de modélisation énergétique déployés en préparation de la charrette (Q3, Q4). Ces résultats montrent que ces efforts ont eu peu d'impact, ou un impact modéré, une fois utilisé au cours de la charrette.

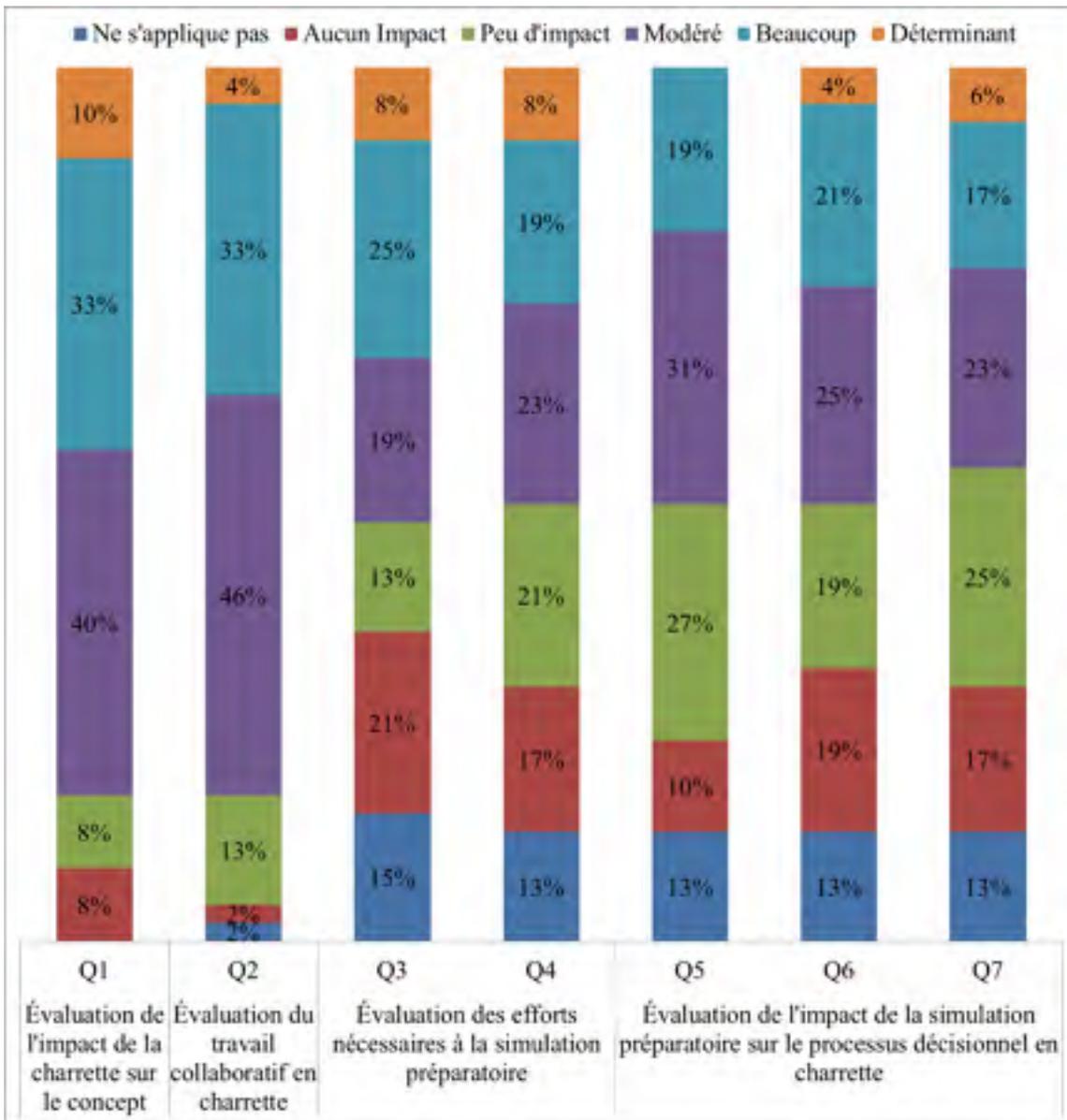


Figure 5.3 : Distribution des réponses du questionnaire 2

5.3 Bilan de l'utilisation du cadre proposé

Les constats observés lors des charrettes 1 et 2 ont été corroborés lors de la tenue d'un groupe de discussion regroupant les représentants de construction et au cours d'entrevues réalisées avec 3 représentants en architecture et 3 représentants en mécanique. Cette étape

d'investigation a permis d'établir des constats quant à l'application du cadre proposé et adapté aux réalités académiques du groupe témoin.

Pour établir un bilan de la mise en application du cadre d'utilisation proposé auprès de chaque discipline des équipes de conception, un groupe de discussion a été tenu avec les représentants de construction. Ce groupe de discussion a permis d'établir par consensus les constats suivants :

1. le concept en phase d'esquisse est sujet à être rapidement modifié et impacté par des changements apportés dans les phases initiales de la conception. Il est alors difficile d'effectuer une modélisation énergétique préparatoire, à la charrette 1, qui soit représentative du dernier concept proposé par les architectes.
2. les modèles énergétiques créés de façon préparatoire à la charrette ne sont plus représentatifs du concept proposé par l'équipe de conception en raison que ce concept est rapidement modifié au courant de la charrette.
3. les résultats issus de la modélisation énergétique préparatoire n'ont pas été très utilisés pendant les charrettes, mais cette préparation a permis aux représentants de mécanique d'acquérir le bagage de connaissances nécessaires pour assister les représentants d'architecture dans la conception initiale du projet. De plus, les autres disciplines étaient plus réceptives à leurs suggestions lorsqu'ils se prononçaient hors de leurs champs de spécialité.
4. le travail de modélisation énergétique est trop complexe pour être effectué pendant les charrettes. Il doit être fait avant les charrettes et de manière à assister l'équipe selon la thématique de la charrette.
5. les modèles énergétiques montés en fin de charrette l'ont été dans le but de préparer l'analyse paramétrique de la thématique de la prochaine charrette.
6. la performance énergétique du projet et la modélisation énergétique sont des sujets prédominants au sein des équipes de conception.

Les constats identifiés lors des entrevues sont présentés au tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Grille d'entrevues à la suite des charrettes 1 et 2

Impact évalué	Processus de travail collaboratif	Processus décisionnel		Application du cadre
		Prise de décision	Évaluation de scénarios	Bilan
Variables observées	Développement de la transdisciplinarité			
Constats	L'utilisation préparatoire de la modélisation énergétique encourage les membres de l'équipe de CI à adopter une attitude proactive quant à l'amélioration de la performance énergétique.	L'utilisation des résultats issus de la modélisation énergétique apporte pendant les charrettes des résultats quantifiables pour assister la prise de décision.	La modélisation énergétique du projet fut d'abord utilisée afin d'évaluer différents scénarios de conception.	Le travail de modélisation énergétique préparatoire aux charrettes est pertinent et utiles au processus.
Rep. Arch. 1				√
Rep. Arch. 2	√	√	√	√
Rep. Arch. 3	√		√	√
Rep. Méc. 1	√		√	
Rep. Méc. 2	√	√	√	√
Rep. Méc. 3	√	√		

Les réponses obtenues lors des entrevues présentent une certaine homogénéité entre les constats auxquels adhèrent les représentants d'architecture et de mécanique en ce qui a trait à l'impact de la modélisation énergétique préparatoire aux charrettes. Les résultats présentent que le travail collaboratif est amélioré par cette approche préparatoire. Les résultats quantifiables issus de la modélisation énergétique ont cependant un impact modéré sur la prise de décision de l'équipe de conception. Concernant le bilan de l'utilisation du cadre d'utilisation adapté dans le processus, les opinions entre les deux disciplines divergent. Les représentants d'architecture affirment qu'il est justifié de suivre un tel cadre, principalement pour leur permettre d'établir des bases lors de la charrette 1. À l'inverse, les représentants de mécanique considèrent que d'effectuer le travail de modélisation énergétique avant la première charrette représente des défis et des contraintes trop importants pour les bénéfices qu'elle pourrait apporter en charrette en raison du degré d'avancement du design.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

Les résultats des études de cas montrent que même sur un PCI, l'utilisation de la simulation énergétique se fait en fin de projet, principalement à la fin du dossier préliminaire. Lors des premières charrettes du processus, il y a peu de discussions portant sur la performance énergétique du projet et l'utilisation des résultats issus de la simulation énergétique pour supporter les décisions. Toutefois, selon Larsson (2009) et Löhnert (2003), la performance énergétique du projet devrait être étudiée de façon holistique tout au long des charrettes. Cette performance devrait être soutenue par l'utilisation de la simulation énergétique au cours de la phase de l'esquisse et au dossier préliminaire puisqu'une absence ou une utilisation limitée, comme observée lors des premières charrettes, est généralement caractéristique d'un PCT (Lindsey, 2007). D'ailleurs, Forgues et Courchesne (2008) avaient constaté, lors de leurs observations sur des PCI, un attachement des professionnels pour le mode de conception traditionnelle. Ce constat peut également être appliqué aux études de cas effectuées lors de cette recherche. Les observations sur les trois projets de l'étude de cas confirment ce que Forgues (2009) soutient en affirmant que les ingénieurs mécaniques sont hésitants à se prononcer sur les questions de performance énergétique du projet dans les phases initiales de la conception quand le concept du projet n'a pas encore clairement été établi.

En ce qui concerne la répartition des tâches, les tâches de nature prédictive représentent environ 10% des efforts sur un PCT (Liston, Fischer et Kunz, 2000), ce qui est comparable aux résultats observés pour le PCI 1. Par contre, pour le PCI 2 et PCI 3, la tenue d'un PCI a permis une augmentation des tâches prédictives à 15% et 19%, respectivement. Ceci démontre que le PCI permet d'améliorer la proportion et l'occurrence des tâches de type prédictif au sein d'une équipe de conception, observations qui ont aussi été soulignées par Forgues et *al.* (2017).

Dans le cas du PCI 2 et plus particulièrement pour le PCI 3, l'utilisation d'outils de simulation énergétique a favorisé les tâches de type prédictive et évaluative ayant trait à la performance énergétique du projet dans les phases initiales du PCI. Une proportion de tâches de type évaluative et surtout prédictive sont associées à un travail collaboratif efficace au sein d'une équipe de conception et à l'élaboration de propositions innovantes (Liston, Fischer et Kunz, 2000). L'utilisation d'outils de simulation énergétique afin de comparer des scénarios conceptuels basés sur des résultats quantifiables et lors des phases initiales de la conception est également associée à une amélioration du concept proposé (Larsson, 2009; Löhnert, 2003). Les résultats du PCI 2 et PCI 3, comparativement au PCI 1, laissent préjuger l'impact positif que l'utilisation d'outils de simulation énergétique a sur la répartition des tâches lors d'un PCI.

Conséquemment, un cadre balisant l'utilisation des outils de simulation énergétique lors d'un PCI pourrait augmenter la proportion de temps passé par l'équipe de conception sur la thématique de l'amélioration de la performance énergétique du projet. De plus, dans les phases initiales du PCI, l'utilisation de résultats quantifiables issus d'outils de simulation énergétique facilite la participation de certains intervenants déterminants dans le processus d'analyse et d'amélioration de la performance énergétique du projet basée sur des résultats quantifiables (Hemsath, 2013).

Le cadre proposé vise à indiquer les moments d'un PCI où l'analyse des résultats issus d'outils de simulation énergétique peut assister l'équipe de conception. La mise en application du cadre proposé, et ajusté afin de répondre au contexte académique du groupe témoin, a permis d'en évaluer son impact. Le cadre proposé ajusté se situe pendant les charrettes 1 et 2 du cadre complet proposé et c'est au cours de ces phases de conception que la simulation énergétique est habituellement le moins utilisée (Bambardekar et Poerschke, 2009). Également, c'est au cours des phases initiales de la conception que sont établis les éléments architecturaux présentant les plus grands potentiels de réduction énergétique tels que défini par Lechner (2008). Cette mise en application du cadre proposé sur un groupe témoin a permis d'en reconnaître les limites et de proposer des recommandations.

Tout d'abord, lors de mise en application du cadre sur le groupe témoin, il a été observé que l'absence d'une première rencontre de coordination obligatoire en début du processus a freiné le montage efficace de la modélisation en préparation à la première charrette. Cette rencontre permet de développer le modèle afin d'effectuer une simulation énergétique et d'acquérir une meilleure compréhension des objectifs et des stratégies visés par l'équipe de conception. Il est alors possible de mieux modéliser le projet afin de permettre une évaluation des thèmes et stratégies à considérer au cours de la première charrette du processus. D'ailleurs, deux équipes avaient procédé à une rencontre de coordination avant le début des charrettes. Les observations faites sur ces équipes du groupe témoin révèlent un impact plus important de l'outil de la simulation énergétique sur leur concept et le processus décisionnel. De plus, la simulation énergétique fut plus utilisée dans un objectif d'évaluation de scénario que simplement pour connaître la consommation énergétique totale d'un concept de référence.

Les premières simulations ont peu été utilisées pour comparer différents scénarios en préparation à la première charrette. Cette observation portée sur le groupe témoin pourrait être à prévoir et observer dans la pratique. À cette étape préparatoire, il s'agit de la modélisation des paramètres de l'approche bioclimatique, qui en cas de modification nécessitent des changements majeurs du modèle énergétique. Pour cette raison, l'analyse paramétrique de certaines stratégies passives comme la composition d'enveloppe du projet et sa résistance thermique sont des pratiques moins répandues en simulation énergétique, car elles nécessitent des étapes de modification de la modélisation et des paramètres des bâtiments moins importants que lors de l'évaluation de stratégies bioclimatiques. L'évaluation des stratégies bioclimatiques nécessite la modification de façon itérative de la forme, de l'orientation et du ratio de fenestration ce qui représente un travail schématique et de modélisation important afin d'établir différents scénarios. L'ampleur du projet du groupe témoin, ayant une superficie de plus de 140 000 m² divisée en plusieurs bâtiments, a été un élément impactant l'utilisation de la simulation énergétique dans un objectif d'évaluation de différents scénarios conceptuels. Il a été observé que dû à la complexité du projet, de nombreuses équipes de conception ont principalement choisi d'utiliser la simulation

énergétique afin de vérifier la performance énergétique du projet par rapport à un scénario de référence plutôt que d'évaluer différents scénarios. Cette approche a été favorisée afin d'éviter l'évaluation itérative de différents scénarios et différents bâtiments qui aurait demandé un travail de simulation énergétique préparatoire très important. Néanmoins, peu importe la taille du projet à évaluer, les simulations énergétiques en début de projet seront toujours des simulations importantes et demandant de plus grands efforts. Il est donc recommandé que lors de la première rencontre de coordination, à l'image de la séquence d'amélioration de la performance énergétique de Larsson (2009), qu'au moins trois scénarios conceptuels soient évalués. La proposition d'effectuer la modélisation énergétique (1) d'un scénario de référence, (2) d'un scénario amélioré, mais conservateur et (3) un scénario amélioré et ambitieux peut très bien s'intégrer à l'étape de la première simulation préparatoire du cadre proposé. L'utilisation de la simulation énergétique afin d'effectuer une analyse paramétrique de l'enveloppe du bâtiment est une approche recommandée par Hemsath (2013) et qui fut utilisé par une majorité des équipes du groupe témoin à la deuxième charrette. Cette utilisation de la simulation énergétique a eu un impact modéré sur le processus décisionnel des équipes lors de la deuxième charrette, tel qu'identifié par les entrevues avec des représentants de chaque discipline.

Dans son ensemble, le cadre proposé bâtit une séquence d'utilisation des outils de simulation énergétique afin qu'ils soient utilisés en préparation des charrettes et non pas en parallèle du processus ou bien pendant les charrettes. Il serait très difficile que des résultats de simulation soient demandés et obtenus pendant ces rencontres de conception. Toutefois, dépendamment des outils, de légères modifications peuvent être effectuées sur des modèles de simulation et les résultats rapidement connus. Par contre, sur un court délai, tel que pendant une charrette, le temps et le processus de modélisation du projet afin de compléter une simulation énergétique est très variable. Il est très difficile de planifier et d'intégrer l'utilisation d'outils de simulation énergétique pendant les charrettes. De plus, cela pourrait conduire à une certaine stagnation du travail collaboratif de l'équipe de conception puisque les échanges et les ateliers seraient dépendants de l'aboutissement des résultats de simulation. Il ne serait pas non plus bénéfique à l'équipe de conception de prendre des décisions basées sur des études

incomplètes et bâties rapidement au cours de l'atelier même. C'est pourquoi la planification des étapes de simulation préparatoire, faite avant la première rencontre de coordination du processus, est nécessaire. Cet aspect a également été confirmé au cours de groupes de discussion et des entrevues avec les représentants de chaque discipline du groupe témoin. Ils perçoivent que d'effectuer la simulation énergétique du projet pendant les charrettes n'est pas réalisable puisque le temps disponible en charrette est trop court et que le travail de simulation énergétique doit impérativement être effectué en préparation de la charrette. De plus, les représentants de chaque discipline perçoivent l'utilisation et la modification de la modélisation énergétique pendant les charrettes comme un frein à l'innovation et à la collaboration, car elle prive le groupe de l'apport des connaissances du modéleur et place tout le contrôle de l'information entre ses mains.

Certaines limites quant à l'évaluation de la mise en application du cadre proposé sur le groupe témoin sont néanmoins à souligner. Pour des raisons de logistique et en présence de six équipes de conception, il n'a pas été possible d'évaluer l'impact de l'utilisation de ce cadre sur la proportion des tâches de types prédictive et évaluative selon l'approche de Liston, Fischer et Kunz (2000). Une interrelation entre l'utilisation d'outils de simulation énergétique et une augmentation de ces types de tâches observée sur les projets de l'étude de cas est également proposée en ce qui concerne le travail collaboratif des équipes du groupe témoin.

L'apport du cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique proposé pour ce groupe témoin a été évalué selon son impact sur le processus collaboratif et sur le processus décisionnel au cours des charrettes. Il est remarqué que le processus de simulation préparatoire décrit par le cadre proposé permet d'améliorer le travail collaboratif et la transdisciplinarité des intervenants en charrette et principalement des représentants de génie mécanique. Le principe de la charrette de conception et l'apport de l'intégration des intervenants nécessaires à la conception du processus sont parmi les éléments les plus appréciés des représentants du groupe témoin. En ce qui a trait au processus décisionnel au cours des charrettes, une résistance à ce qui est suggéré par le cadre est remarquée auprès des

membres des équipes de conception, toutes disciplines confondues. Ils préfèrent prendre des décisions basées sur l'expérience et l'intuition plutôt que sur une analyse de résultats quantifiables (Pedrini et Szokolay, 2005). Cette particularité est également assez répandue dans la pratique. Dans le cas d'un PCI, il en reviendrait principalement au facilitateur et au responsable de la simulation énergétique du projet d'encourager l'équipe de conception à appuyer ses décisions sur des résultats quantifiables fournis par les résultats de la simulation énergétique.

Dans la pratique, comme dans le cas d'application, la maîtrise de l'outil de modélisation énergétique est déterminante au déroulement efficace du cadre proposé tel que présenté par Crawley et *al.* (2008). En ce qui a trait au groupe témoin, selon les réalités du processus et les visées conceptuelles, l'utilisation de l'interface de modélisation OpenStudio était appropriée pour le projet. Néanmoins, il a été observé qu'il existait certaines contraintes d'interopérabilité entre l'interface OpenStudio et les logiciels de modélisation utilisés par les représentants d'architecture. Ces problèmes d'interopérabilité entre logiciels s'appliqueraient également à un projet dans l'industrie.

Finalement, il a été souligné par la collecte de données sur le groupe témoin que dû au flot d'informations entre les intervenants, des modélisations énergétiques préparatoires aux charrettes ont été effectuées selon des esquisses qui n'étaient plus celles à jour pour les représentants d'architecture au moment de commencer le travail en charrette. Il en résultait que les simulations énergétiques étaient établies selon des esquisses différentes de celles évaluées en charrette. Une concentration des efforts de l'équipe doit être déployée au niveau du partage du flot d'informations nécessaires au montage de la modélisation énergétique préparatoire. L'équipe de conception doit prendre en considération le temps et les efforts qu'ont les impacts d'une modification des schémas du projet sur le travail de simulation préparatoire. À cet effet, l'utilisation de l'approche du « Building Information Modeling » (BIM) fonctionne selon la conception d'un modèle unique créé par les professionnels du projet de façon intégrée, ce qui en fait une méthode pouvant s'intégrer très bien au sein d'un PCI et améliorer l'échange d'informations au sein de l'équipe (GSA, 2012; Laine, Bäckström

et Järvinen, 2012). Toujours, dans le cas du groupe témoin, il est signalé, par le biais d'entrevues, que la présentation en début de charrette d'un modèle énergétique, même s'il ne représentait plus les derniers changements architecturaux en début de charrette, pouvait être utilisé comme scénarios de comparaison et offrir des informations très utiles à l'équipe de conception. Néanmoins, la simple introduction de ce modèle énergétique de référence au cours des premières charrettes représente déjà une utilisation plus intégrée de la simulation énergétique au cours des phases initiales d'un PCI que ce qu'il se fait traditionnellement dans la pratique (Lindsey, 2007).

CONCLUSION

Ce travail de recherche a porté sur les interrelations entre un PCI et l'utilisation de la simulation énergétique au cours des phases initiales de la conception. Le contexte collaboratif entre les professionnels et le développement du concept par une succession d'itérations, dès les phases initiales de la conception, font du PCI un mode de conception favorisant l'amélioration de la performance énergétique du projet. Toutefois, les outils de simulation énergétique, ordinairement peu utilisés lors de ces phases, sont déterminants à l'évaluation efficace des stratégies de performance énergétique choisies par l'équipe de conception en charrette.

Deux volets ont principalement orienté le déroulement de cette recherche : l'exploration et l'intervention. La littérature présente peu l'impact qu'a l'utilisation de la simulation énergétique sur le travail collaboratif et sur le processus décisionnel de l'équipe de conception en charrette. Le volet exploratoire de cette recherche a permis d'étudier cet impact sur trois projets suivant un PCI. Il a été observé que les outils de simulation énergétique sont principalement mis à contribution dans un objectif de validation de la proposition finale, plutôt pour l'évaluation des stratégies composant cette proposition. Il a également été possible de valider les constats de la littérature quant à l'utilisation tardive de la simulation énergétique dans les phases du processus de conception et de son apport limité en charrette de conception. Le volet interventionniste de cette recherche s'est manifesté par la proposition d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI et son application sur un groupe témoin.

La proposition de ce cadre d'utilisation représente la réponse de ce mémoire à la question de recherche soulevée en introduction sur l'intégration d'outils de simulation énergétique dans un processus de conception pour assister l'équipe de conception en charrette. L'utilisation d'outils de simulation énergétique suggérée par un cadre d'utilisation permet d'établir un contexte favorable à l'évaluation de la performance énergétique du projet dès les phases initiales de la conception. Il favorise également le développement du processus de travail

collaboratif en charrette et le développement de la transdisciplinarité des représentants de génie mécanique et des professionnels responsables d'effectuer la simulation énergétique quant à l'évaluation du concept.

Cependant, l'application du cadre d'utilisation proposé a démontré un impact modéré quant à l'utilisation de la simulation énergétique de façon préparatoire sur le processus décisionnel en charrette. En effet, il s'avère difficile pour les professionnels responsables d'effectuer une simulation préparatoire représentative et ciblant très exactement les thèmes évalués lors de la charrette à venir. Afin de rectifier les manques ou de préciser les résultats d'une simulation énergétique pré-charrette, il est nécessaire de déployer des efforts rapides de production et de correction durant la charrette. Toutefois, en raison du court délai et de l'intensité de l'exercice, ces résultats appuient une démarche de validation du concept final par rapport à son référent et ne permettent pas l'évaluation des stratégies proposées. Ces défis d'exécution renforcent la nécessité d'une collaboration efficace entre professionnels et modelleur, ainsi que l'importance de l'échange de l'information en préparation aux charrettes. La pertinence du cadre d'utilisation proposé, la nécessité d'effectuer le travail de simulation en préparation des charrettes et l'apport que peut apporter l'utilisation d'outil de simulation énergétique sur le processus décisionnel sont des constats majoritairement appuyés par les participants du groupe témoin.

D'ailleurs, en raison des limites de la recherche, l'application du cadre sur un groupe témoin est principalement exploratoire et vise à découvrir les enjeux de l'implémentation d'un tel cadre, les possibilités d'amélioration et les recommandations pour sa mise en place plutôt qu'une validation dans l'industrie.

La contribution principale de cette recherche est la proposition d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI. La publication d'un article de conférence sur ce cadre et le processus de recherche nécessaire à son élaboration s'inscrit également dans un effort de diffusion et de sensibilisation quant à l'utilisation d'outils de simulation énergétique dès les phases initiales du PCI (*voir* ANNEXE VII p.131).

Également, cette recherche présente l'état de l'utilisation de la simulation énergétique dans des PCI au sein de l'industrie au Québec, un aspect qui n'est pas, à l'heure actuelle, détaillé dans la littérature.

Deux pistes pourraient être explorées au cours de futurs travaux de recherche portant sur l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments sur un PCI.

Premièrement, l'intégration de plusieurs outils de simulation énergétique préparatoires représente un défi d'interopérabilité entre les logiciels et la coordination entre les intervenants du projet. Les interrelations entre le PCI et l'approche du BIM et plus précisément de l'approche du « Building Energy Modeling » (BEM) peuvent être une solution à ces contraintes d'interopérabilité et de coordination. Cette approche présente une démarche visant l'évaluation complète du comportement énergétique du bâtiment par l'utilisation d'outils de modélisation énergétique compatible au sein d'un modèle unique pour l'ensemble des concepteurs. L'utilisation d'un seul modèle énergétique maîtrisé par tous les concepteurs du projet fait du BEM un outil permettant d'appuyer efficacement un processus de conception collaboratif comme le PCI.

Deuxièmement, l'utilisation d'une MEBD est devenue de plus en plus fréquente pour encadrer le processus de conception d'un bâtiment recherchant une performance énergétique améliorée. De plus en plus, ces méthodes recommandent la tenue d'un PCI et l'utilisation d'outils de simulation énergétique. À titre d'exemple, la certification LEED V4, en vigueur depuis octobre 2016, attribue désormais des points aux projets suivant un PCI. Cependant, elles ne décrivent pas et n'encadrent pas le déroulement d'un processus de conception intégrée. La mise en application de certaines MEBD comme Passivhaus, qui vise une optimisation importante de l'isolation de l'enveloppe et une utilisation rigoureuse des principes de l'architecture bioclimatique, au sein d'un PCI pourrait renforcer le suivi d'un cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI dès les phases initiales de la conception.

ANNEXE I

APPROCHE DE PCI DE LARSSON

Cette annexe regroupe une représentation du déroulement du PCI de Larsson (2009). Il y est défini les tâches de l'équipe de conception, les tâches du client ainsi que des opérateurs et indique la tenue des charrettes.

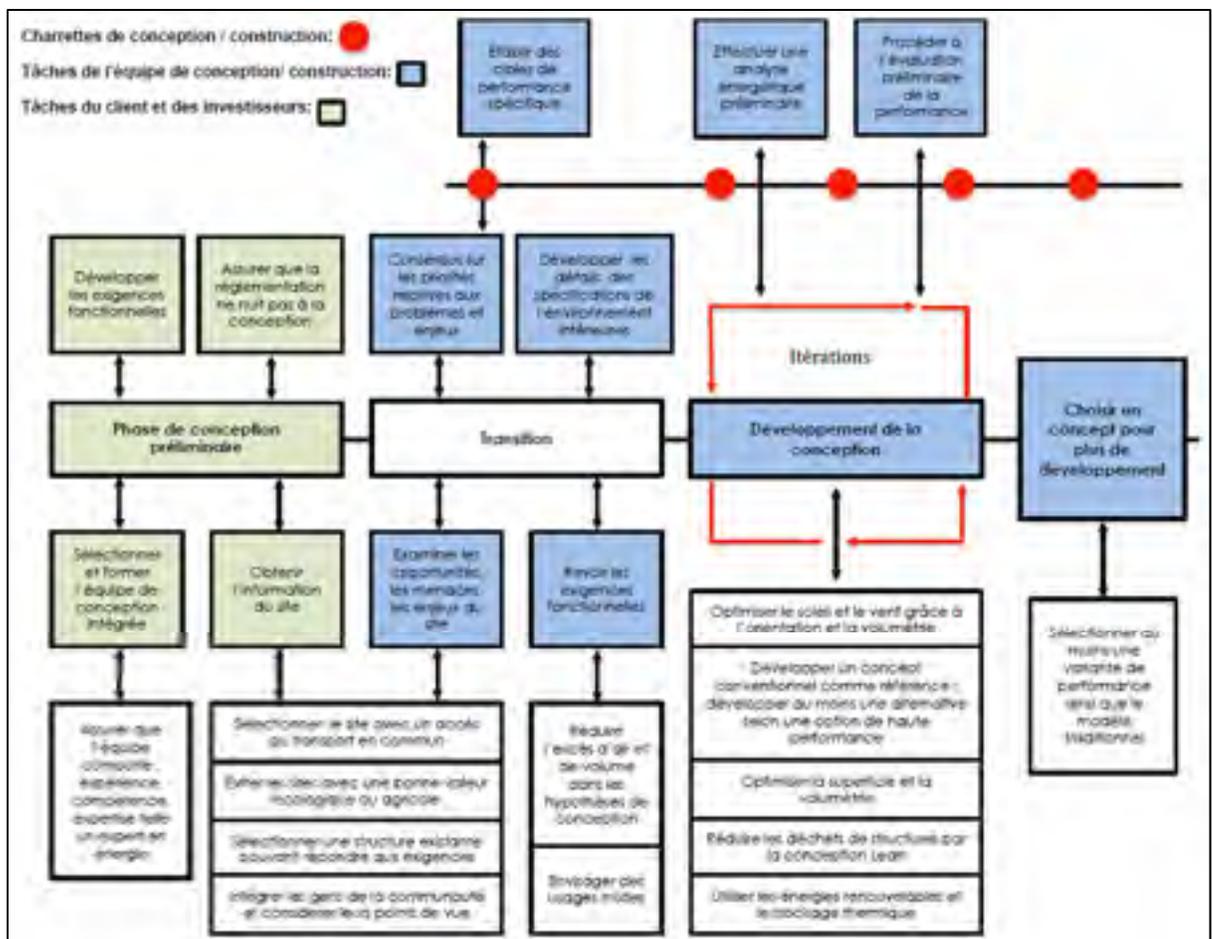


Figure-A I-1 Approche du PCI de Larsson (2009) – Partie 1 de 3
Adapté et traduit par Forgues et Dionne (2014)

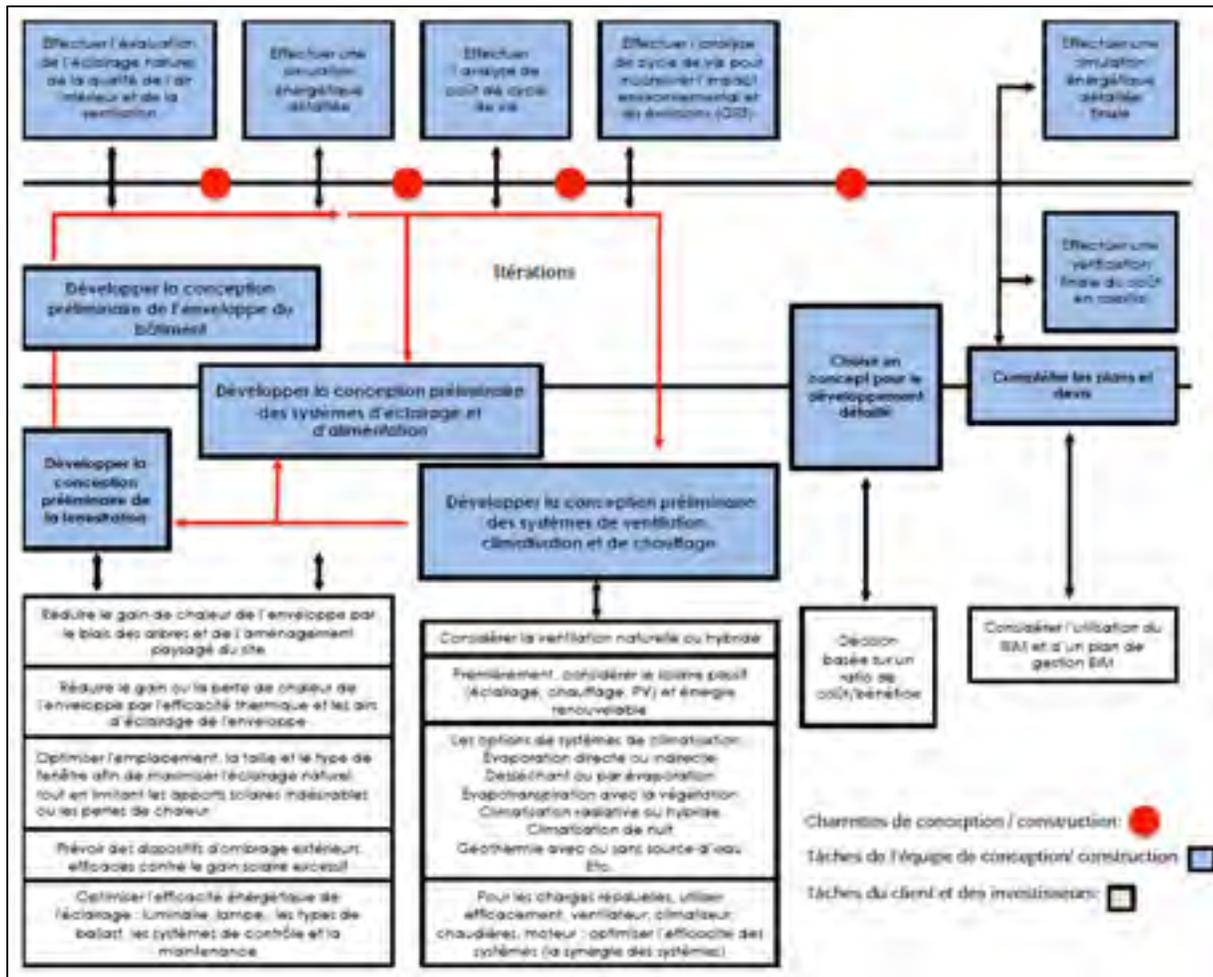


Figure-A I-2 Approche du PCI de Larsson (2009) – Partie 2 de 3
Adapté et traduit par Forgues et Dionne (2014)

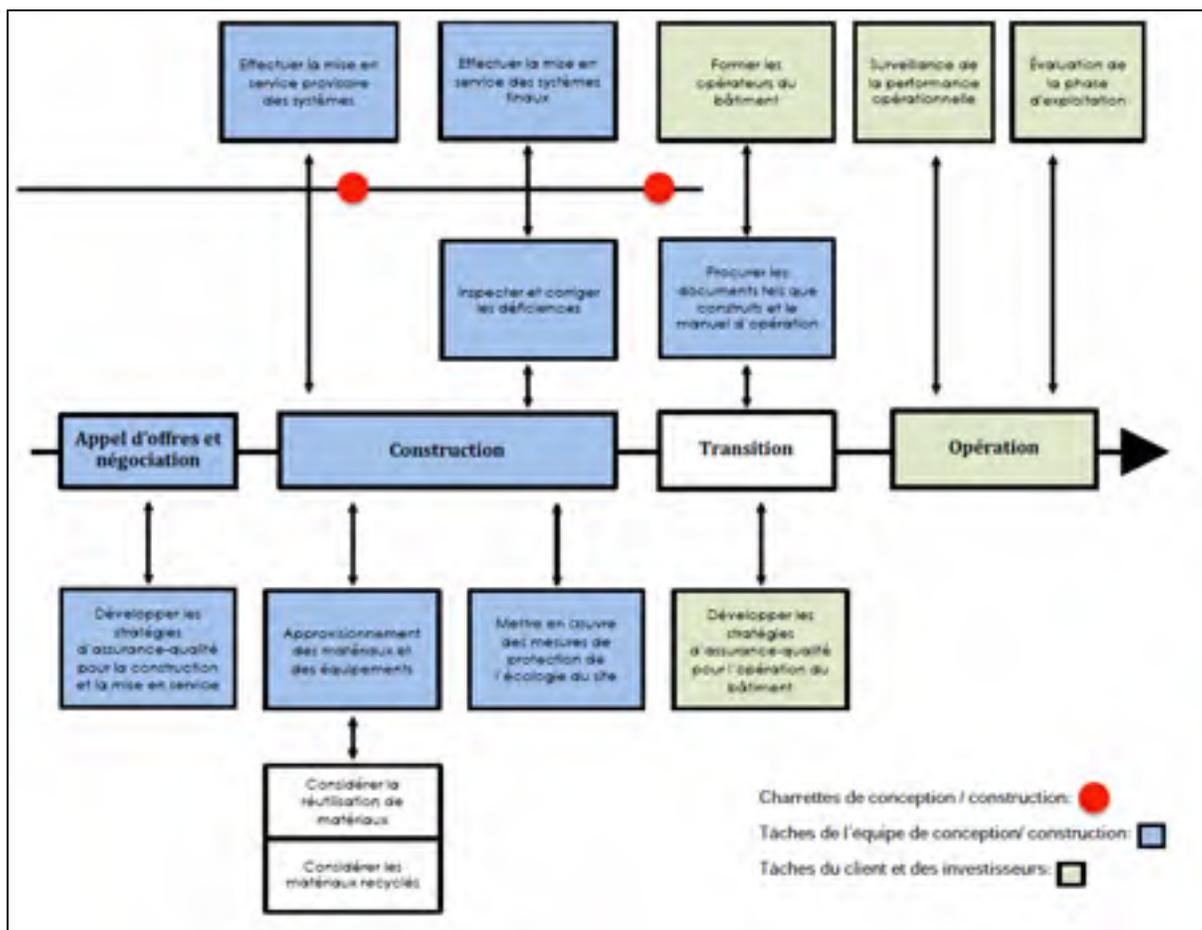


Figure-A I-3 Approche du PCI de Larsson (2009) – Partie 3 de 3
Adapté et traduit par Forgues et Dionne (2014)

ANNEXE II

LISTE D'OUTILS DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE

Cette annexe répertorie et décrit brièvement les principaux outils de simulation énergétique utilisés dans l'industrie québécoise.

Il est également présenté pour quelle étape de simulation préparatoire, du cadre d'utilisation d'outils de simulation énergétique au sein d'un PCI proposé au chapitre 4, l'outil présenté pourrait être utilisé. Les cinq étapes sont :

1. Modélisation de préconception;
2. 1ère Simulation préparatoire (Approche Bioclimatique);
3. 2e Simulation préparatoire (Systèmes Passifs);
4. 3e Simulation préparatoire (Systèmes Actifs);
5. Simulation énergétique complète.

EnergyPlus

EnergyPlus est le moteur de simulation énergétique intégral du bâtiment développé et utilisé par le département de l'Énergie des États-Unis. Il est reconnu pour simuler l'ensemble des paramètres d'un projet, dont le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, la ventilation et d'autres flux d'énergie au sein du bâtiment. Ce logiciel ne propose pas d'interface de modélisation graphique et tridimensionnelle. Pour cela, l'utilisation d'OpenStudio est recommandée par EnergyPlus. EnergyPlus utilise la méthode de calculs des bilans.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

OpenStudio

Openstudio est un logiciel de simulation énergétique complet et présentant un très grand répertoire d'analyse possible. Il utilise le moteur de simulation EnergyPlus et est compatible avec le logiciel Google Sketchup, un logiciel de modélisation 3D, pour effectuer des modélisations énergétiques. La modélisation Sketchup est simple et permet de schématiser un

modèle rapidement. De plus, OpenStudio est un logiciel gratuit proposant une grande bibliothèque de composantes et système du bâtiment dans un format « open source », c'est-à-dire qu'il permet de créer et de distribuer ces composantes. OpenStudio Parametric Analysis Tool est une interface complémentaire à OpenStudio. Il s'agit d'une interface d'analyse paramétrique. Il permet la modification de paramètres précis d'un projet OpenStudio existant et présente l'impact de ces paramètres sur le projet. Cet outil propose un grand potentiel d'itération et de comparaison de scénario.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

Design Builder

L'interface DesignBuilder est un logiciel de simulation énergétique complet qui utilise le moteur de simulation EnergyPlys. Il propose deux versions du logiciel, l'une conçue pour les architectes et une pour les ingénieurs. La version pour architecte permet de modéliser le projet et d'évaluer différentes volumétries tant au niveau de l'orientation, de la forme que de la composition. La version pour ingénieur permet de simuler la consommation de différentes compositions de systèmes CVCA selon divers scénarios d'opération. Elle permet également d'effectuer la simulation de consommation de l'éclairage artificiel et de production d'énergie renouvelable. Les dernières mises à jour majeures du logiciel en 2015 l'ont été faite dans un objectif d'améliorer l'interopérabilité du logiciel avec d'autres logiciels de modélisation afin de favoriser son utilisation selon l'approche BIM et BEM.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

Radiance

Radiance est un logiciel de simulation de lumière naturelle. Le moteur de calcul de Radiance utilise la méthode de tracé de lumière Monte-Carlo pour calculer le rayonnement et l'irradiation de la lumière naturelle dans le bâtiment. Ce logiciel peut simuler l'éclairage naturel dans le bâtiment, la qualité de l'éclairage, la pénétration des rayons dans le bâtiment, l'éblouissement et des stratégies de contrôle de l'éclairage. Ce logiciel est très réputé dans la catégorie des logiciels de simulation de l'éclairage naturel et est utilisé par de nombreux bureaux d'architecte et d'ingénierie. De plus, il est compatible avec les outils EnergyPlus,

OpenStudio, DesignBuilder et IESve. Radiance est un logiciel gratuit et dont les paramètres de simulation sont en format de partage « open source ».

Utilisation au sein du cadre : 1^{ère} Simulation préparatoire (Approche Bioclimatique) et 2^e Simulation préparatoire (Systèmes Passifs)

DOE-2

DOE-2 est un logiciel gratuit de simulation énergétique développé par le département de l'Énergie des États-Unis. Son moteur de simulation énergétique est repris par d'autres interfaces sur le marché et utilise la méthode des facteurs de transfert. Dans son calcul de simulation énergétique, DOE-2.3 prend en compte la volumétrie du bâtiment, la composition de l'enveloppe et les systèmes CVCA et permet de connaître la consommation énergétique du bâtiment sur une base horaire et de présenter les coûts associés à cette consommation. Néanmoins, son utilisation est réputée pour nécessiter un certain niveau d'expertise dans le domaine de la simulation énergétique. La version DOE-2.3 est présentement la version la plus à jour et devrait remplacer prochainement la version la plus employée, DOE-2.2, comme version officielle.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

eQUEST

eQUEST est réputé comme un outil de simulation énergétique limitée, mais facile d'utilisation et permettant d'obtenir rapidement des résultats de simulation énergétique. Il permet de simuler sur un modèle l'impact de l'orientation, de la composition de l'enveloppe, des propriétés du vitrage, de la lumière naturelle, des systèmes CVCA et diverses stratégies de contrôle des systèmes sur les charges internes du projet. Ce logiciel utilise le moteur de simulation énergétique de DOE-2. CAN-QUEST est la version canadienne bilingue du logiciel eQUEST selon le code CNÉB 2011 plutôt que la norme ASHRAE 90.1 et est celle utilisée dans la pratique au Canada.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

EE4

EE4 est un logiciel d'assistance à la validation d'un projet, selon le CMNÉB 1997. Le but du logiciel est d'assister la conception de bâtiment voulant respecter le programme de conception de bâtiments neufs de Ressources naturelles Canada (RNCCan) qui stipule de présenter un projet ayant une performance énergétique 25 % plus basse que le CMNÉB 1997. EE4 permet d'effectuer la simulation énergétique des charges internes, solaires, de transmission et de ventilation en plus de proposer des options de modélisation des systèmes CVCA et secondaires. La démarche de validation du programme RNCCan et la production de rapports détaillés de EE4 sont reconnues par la certification LEED et par la Société canadienne d'hypothèques et de logement. EE4 reprend le moteur de simulation énergétique de DOE-2.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

SIMEB

SIMEB est un logiciel conçu par la société d'État Hydro-Québec pour effectuer la simulation énergétique de bâtiment commercial et institutionnel. Cet outil offre la possibilité d'utiliser le moteur de simulation énergétique de DOE-2 ou de Energy-Plus pour effectuer la simulation énergétique du projet. SIMEB prend en compte des paramètres du bâtiment tels que la volumétrie, la composition de l'enveloppe, l'éclairage artificiel et les systèmes CVCA selon différents scénarios d'occupation. Il s'agit de l'outil reconnu par Hydro-Québec et qu'un projet doit utiliser pour se classer dans les programmes de subventions et d'encouragement de l'efficacité énergétique de la société d'État. Il s'agit d'un logiciel gratuit. Néanmoins, SIMEB ne propose pas d'interface graphique permettant de modéliser le projet.

Utilisation au sein du cadre : 2^e Simulation préparatoire (Systèmes Passifs) et 3^e Simulation préparatoire (Systèmes Actifs)

HAP

HAP est un logiciel permettant une simulation énergétique rapide du bâtiment dans le but de connaître les charges internes du projet. Son moteur de simulation utilise la méthode de calcul de transfert. Il permet de faciliter, pour les ingénieurs en mécanique du bâtiment, le

dimensionnement des systèmes CVCA et l'évaluation de la consommation énergétique horaire totale du projet sur l'échelle d'une année.

Utilisation au sein du cadre : 3^e Simulation préparatoire (Systèmes Actifs)

SEFAIRA

Sefaira est un logiciel de modélisation énergétique et compatible avec d'autres logiciels de modélisation comme Revit et SketchUp. Il propose deux versions, l'une pour les architectes et l'une pour les ingénieurs. Les deux versions présentent, attachées à l'interface de modélisation du projet, une interface présentant en temps réel l'impact de certains paramètres modélisés sur les charges internes du projet. Les principaux paramètres pris en compte en temps réel par la version pour architecte, Sefaira Architecture, sont la géométrie du projet, l'éclairage naturel et la composition de l'enveloppe du projet. Cette version est principalement destinée à assister l'architecte au cours des phases initiales de la conception. La version pour ingénieur, Sefaira Systems, permet l'analyse de différentes options de systèmes CVCA sur le modèle. Les versions de SEFAIRA sont identifiées comme pouvant être utilisées au sein d'une approche BIM.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

IES Virtual Environment

IES Virtual Environment (IESve) est un logiciel de modélisation énergétique du bâtiment s'inscrivant dans les logiciels spécialement conçus pour l'approche BIM. Il peut encadrer les phases de construction et de conception de bâtiment performant. Il permet aux concepteurs de tester différents scénarios, d'identifier les meilleures stratégies passives, de comparer les technologies de production d'énergie renouvelable et d'établir la consommation énergétique totale du projet.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

Autodesk Insight 360

Autodesk Insight 360 est un logiciel complet de simulation énergétique du bâtiment. Il utilise le moteur de simulation EnergyPlus pour calculer les charges internes du projet. Ce logiciel

est complémentaire au logiciel de modélisation Revit. De plus, il est conçu spécialement pour être utilisé et intégré au sein d'une approche BIM.

Utilisation au sein du cadre : Tout au long du processus

Grille d'observation des charrettes 1 et 2

Observation des charrettes du PCI CTN736/MEC735

Date : 17 - 18 février 2017

But : Est-ce que les simulations préparatoires aident l'équipe de conception à prendre des décisions éclairées et quantifiées dans un objectif de performance énergétique ?

Exemple de questions

Sur quels éléments du design les résultats issus de la simulation ont eu le plus grand impact de changement?
Le travail de simulation préparatoire effectué en amont/avant la charrette a-t-il été suffisante ?

	<i>Processus de travail</i>		<i>Processus décisionnel</i>
Variables observées	Travail de collaboration	Utilisation des résultats de simulation énergétique	Décisions et modification de paramètres de simulation
Questions	<ul style="list-style-type: none"> L'intégration de résultat de simulation énergétique vous a-t-elle permis au membre de l'équipe hors de son champ de compétence et développé votre transdisciplinarité ? (Passer d'un <u>mode proactif</u> à <u>réactif</u>) 	<ul style="list-style-type: none"> Comment est-elle utilisée pendant la charrette ? Les résultats issus de la simulation énergétique ont-ils été utilisés dans un objectif d'<u>évaluation ou de validation</u> ? 	<ul style="list-style-type: none"> Quels paramètres simulés ont-ils eu les plus grands impacts sur les décisions prises lors de la conception du projet ?
Équipe No ____	Observation : Description :	Observation : Description :	Observation : Description :

ANNEXE V

QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION DES CHARRETTES

QUESTIONNAIRE

Charrette 1 (17-18 février 2017)

Date : 2017-02-20

Identification du groupe

Rôle professionnel (Architecture / Construction / Mécanique) :

Autres informations pertinentes :

0 Ne s'applique pas / 1 Aucun impact / 2 Peu d'impact / 3 Modéré / 4 Beaucoup / 5
Déterminant

Trouvez-vous la tenue de charrettes au cours du processus de conception pertinente à l'amélioration du concept du projet ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que la planification des charrettes a été adéquate et a permis le développement du concept ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que le travail collaboratif de votre charrette a été efficace ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que le travail de simulation préparatoire effectué en amont/avant la charrette a été suffisant ?	0 1 2 3 4 5
L'utilisation mandatée d'un logiciel de simulation énergétique au cours du processus vous a-t-elle permis d'influencer votre prise de décision quant à des éléments clés du design ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que l'intégration de la simulation énergétique vous a permis de vous prononcer sur des sujets hors de votre champ de compétence et développer votre transdisciplinarité ?	0 1 2 3 4 5
Les données reçues provenant des résultats de la simulation énergétique vous permettent-elles d'influencer le concept du projet et de baser vos décisions sur des résultats quantifiables ?	0 1 2 3 4 5

Sur quels éléments du design les résultats issus des outils de simulation eurent-ils le plus grand impact de changement?

Parmi les informations importantes pour le projet quelles ont été celles obtenues par l'utilisation d'outils de simulation ?

Que pensez-vous du moment dans le processus où ces outils interviennent ?

Que pensez-vous de l'impact de cette charrette sur votre projet ?

Commentaire :

QUESTIONNAIRE

Charrette 2 (10-11 mars 2017)

Date : 2017-03-13

Identification du groupe

Rôle professionnel (Architecture / Construction / Mécanique) :

Autres informations pertinentes :

0 Ne s'applique pas / 1 Aucun impact / 2 Peu d'impact / 3 Modéré / 4 Beaucoup / 5 Déterminant

Que pensez-vous de l'impact de cette deuxième charrette sur votre projet en général ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que le travail collaboratif de votre charrette a été efficace ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que le travail de simulation préparatoire effectué avant la charrette a été suffisant ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que les résultats issus des simulations énergétiques furent présentés et utilisés pendant la charrette de conception ?	0 1 2 3 4 5
L'utilisation mandatée d'un logiciel de simulation énergétique au cours du processus vous a-t-elle permis d'influencer votre prise de décision quant à des éléments clés du design ?	0 1 2 3 4 5
Jugeriez-vous que l'intégration de la simulation énergétique vous a permis de vous prononcer sur des sujets hors de votre champ de compétence et développer votre transdisciplinarité ?	0 1 2 3 4 5
Les données reçues provenant des résultats de la simulation énergétique vous permettent-elles d'influencer le concept du projet et de baser vos décisions sur des résultats quantifiables ?	0 1 2 3 4 5

Quels paramètres issus de la simulation énergétique préparatoire avez-vous le plus évalués au cours de cette seconde charrette ?

Au cours de cette charrette, quelles informations importantes pour le projet ont été obtenues par l'utilisation d'outils de simulation ?

Quelles informations auriez-vous nécessité à l'avancement de votre projet et dont la simulation préparatoire aurait pu vous fournir ? Ces informations vous étaient-elles disponibles au cours de la charrette ?

L'utilisation de la simulation énergétique au sein de votre charrette l'a-t-elle été dans un esprit d'évaluer les différentes stratégies proposées ou de valider la proposition finale ?

Commentaire :

ANNEXE VI

QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE

Date de l'entrevue :

Entrée en matière

Nom :

Rôle professionnel :

Autres informations pertinentes :

Question 1

Voyez-vous une utilité au travail de simulation énergétique préparatoire aux charrettes effectuer dans les phases initiales de la conception ?

Relance

Quelles sont vos espérances quant à ses retombées ?

Comment ce travail vous a-t-il aidé au sein de votre projet ?

Trouvez-vous que ces simulations énergétiques vous apportaient des résultats quantifiables sur lesquelles vous pouviez prendre des décisions ?

Question 2

Comment les résultats issus des outils de simulation énergétique furent-ils utilisés au sein de votre processus ? Dans un effort d'évaluation ou de validation ?

Relance

Vous ont-ils permis d'évaluer différents scénarios de conception ?

Quelle devrait être la fréquence d'utilisation des outils sur le processus ?

L'utilisation de ces outils vous a-t-elle encouragé à adopter une approche proactive plutôt que réactive quant au concept du projet en général ?

(Énoncé à l'intention des représentants de génie mécanique)

Les efforts faits au niveau de la simulation énergétique vous ont-ils aidés à prendre des décisions en ce qui a trait à l'amélioration de l'efficacité énergétique de votre bâtiment ?

(Énoncé à l'intention des représentants d'architecture)

ANNEXE VII

ARTICLE DE CONFÉRENCE

Leadership in Sustainable Infrastructure

Leadership en Infrastructures Durables



Vancouver, Canada

May 31 – June 3, 2017/ *Mai 31 – Juin 3, 2017*

PROPOSITION D'UN CADRE D'UTILISATION D'OUTILS DE SIMULATION ÉNERGÉTIQUE AU SEIN D'UN PROCESSUS DE CONCEPTION INTÉGRÉE

Daoust, Alexandre^{1,2}, Forgues, Daniel¹ et Monfet, Danielle¹

¹ École de technologie supérieure, Canada

² alexandre.daoust.2@ens.etsmtl.ca

Résumé: Le processus de conception intégrée (PCI) est une approche reconnue supportant la conception de bâtiments visant une meilleure performance énergétique. Ce processus bonifie la collaboration au sein de l'équipe de conception et favorise l'élaboration de stratégies énergétiques complexes. Néanmoins, il est observé dans la pratique québécoise que les outils de simulation énergétique sont peu utilisés, et ce, de façon tardive dans le processus de conception. Dès les phases initiales du PCI, des extrants quantifiables issus de la simulation énergétique devraient permettre la comparaison de scénarios afin d'élaborer des stratégies énergétiques. Il n'existe pas de recherche proposant un cadre appliqué au PCI et qui intègre l'utilisation d'outils de simulation au cours du processus. Cet article a pour objectif de proposer un cadre qui définit l'utilisation d'outils de simulation énergétique des bâtiments au sein d'un PCI. Ce cadre s'appuie à la fois sur des pratiques documentées dans la littérature et d'observations réalisées sur des projets réels en PCI. Il y est décrit un processus facilitant la prise de décisions collaboratives par l'utilisation de scénarios de comparaisons issus de la simulation énergétique au sein d'un PCI. Une étape d'itération et de validation a été effectuée par une expérimentation du cadre proposé au sein d'un groupe académique. La mise en application de ce cadre pourrait avoir comme retombées des choix plus judicieux dans l'analyse des options pour améliorer la performance énergétique des bâtiments.

Mots-clés : Processus de conception intégrée, outils de simulation énergétique, performance énergétique du bâtiment.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ancona, D. G., Kochan, T. A., Scully, M. & J.V., M. 2004. « Managing for the future: organizational behavior & processes ». *South-Western College Publishing.*, n° Cincinnati, Ohio.
- Anderson, K. 2014. *Design Energy Simulation for Architects: Guide to 3D Graphics*. New York & Londres: Routledge.
- ASHRAE. 2010. *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1 - 2010 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 388 p.
- ASHRAE. 2011. *Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings, in achieving 50% Energy Savings Toward a Net Zero Energy Building*. Atlanta, Georgia: ASHRAE.
- ASHRAE. 2013. *ASHRAE Green Guide: Design, Construction, and Operation of Sustainable buildings*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- ASHRAE. 2014. *Standard 140 - Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (ANSI Approved)*. Atlanta GA: ASHRAE, 72 p.
- ASHRAE. 2016. « Energy Simulation Aided Design for Buildings except Low-Rise Residential Buildings ». *BSR/ASHRAE Standard 209P*, p. 28.
- Athienitis, A., et W. O'Brien. 2015. « *Modeling, Design, and optimization of Net-Zero Energy Buildings* ». Berlin, Germany: Wiley, 374 p.
- Athienitis, Andreas, Paul Torcellini, Adam Hirsch, William Cellura O'Brien, Maurizio, Ralf Klein, Véronique Delisle, Shady Galal, Mohamed Attia, Paul Bourdoukan et Salvatore Carlucci. 2010. « Design, Optimization, and Modelling Issues of Net-Zero Energy Solar Buildings ». *EuroSun 2010*, vol. 1, no. 1.
- Attia, S., M. Hamdy, W. O'Brien et S. Carlucci. 2013. « Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design ». *Energy and Buildings*, vol. 60, p. 110-24.
- Attia, Shady G., et Andre De Herde. 2011. « Early design simulation tools for net zero energy buildings: A comparison of ten tools ». In *12th Conference of International Building Performance Simulation Association Building Simulation 2011, BS 2011, November 14, 2011 - November 16, 2011*. (Sydney, NSW, Australia), p. 94-101. Coll. « Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International

Building Performance Simulation Association »: International Building Performance Simulation Association.

Attia, Shady, Jan L. M. Hensen, Liliana Beltran et Andre De Herde. 2012. « Selection criteria for building performance simulation tools: Contrasting architects' and engineers' needs ». *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 5, n° 3, p. 155-169.

Avison, D., F. Lau, M. Myers et P. A. Nielsen. 1999. « Action research ». *Commun. ACM*, vol. 42, p. 94.

Bambardekar, Suhas, et Ute Poerschke. 2009. « The architect as performer of energy simulation in the early design stage ». In *11th International IBPSA Conference - Building Simulation 2009, BS 2009, July 27, 2007 - July 30, 2007*. (Glasgow, United kingdom), p. 1306-1313. Coll. « IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009 »: International Building Performance Simulation Association.

Barbour, C.E., R. Zogg, E. Cross et D. Clark. 2016. *Research & Development Roadmap for Building Energy Modeling*. Coll. « Building Technologies Offices »: U.S. Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy, 96 p.

Baribeau, Colette. 2009. « Analyse des données des entretiens de groupe ». *RECHERCHES QUALITATIVES*, vol. 28, n° 1, p. 133-148.

BEIE. 2016. *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques*. Coll. « Mesures d'Exemplarité de l'État - Modalités d'Application »: Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques (BEIE). Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec.

Brahme, Rohini, Zheng O'Neill, William Sisson et Kevin Otto. 2009. « Using existing whole building energy tools for designing net-zero energy buildings - challenges and workarounds ». In *11th International IBPSA Conference - Building Simulation 2009, BS 2009, July 27, 2007 - July 30, 2007*. (Glasgow, United kingdom), p. 9-16. Coll. « IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009 »: International Building Performance Simulation Association.

Busby, Perkins, Will, Stantec. 2007. *Roadmap for the integrated design process*. British Columbia: BC Green Building, 114 p.

Catroux, Michèle. 2002. « Introduction à la recherche-action : modalités d'une démarche théorique centrée sur la pratique ». *Recherche et pratiques pédagogiques en langues de spécialité*, vol. Vol. XXI N° 3, p. 8-20.

Chiocchio, F., et P. Lebel. 2012. *Stress and Performance in Health Care Project Teams*. Project Management Institute.

- Chiocchio, François. Forgues, Daniel. 2008. « Le rôle des objets-frontières dans l'apprentissage et la performance d'équipes d'étudiants travaillant à des projets de conception de bâtiments ». *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, vol. 53, p. 6-21.
- CIBSE, The Chartered Institution of Building Services Engineers. (70). 2005. *AM10: Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings*. Coll. « Application Manual ». United Kingdom: The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).
- Cole, Lindsay. 2007. *Integrated design process facilitation resource guide*. British Columbia: Sustainability Solutions Group, 78 p.
- Crawley, D., S. Pless et P. Torcellini. 2009. « Getting to net zero ». *ASHRAE Journal*, vol. 51, n° 9, p. 18-25.
- Crawley, Drury B., Jon W. Hand, Michaël Kummert et Brent T. Griffith. 2008. « Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs ». *Building and Environment*, vol. 43, n° 4, p. 661-673.
- CURT. 2004. *Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation*. 20 p.
- De Wilde, Pieter, Godfried Augenbroe et Marinus Van Der Voorden. 1999. « Invocation of building simulation tools in building design practice ». In *Building Simulation*. Vol. 99, p. 13-15.
- Dodgson, Mark., David. Gann et Ammon. Salter (280). 2005. *Think, Play, Do - Innovation, Technology, and Organization*.
- Druskat, V, U., et A. Pescosolido. 2002. *The content of effective teamwork mental models in self-managing teams: Ownership, learning and heedful interrelating*. Human Relations, 283-314 p.
- European Commission. 1997. *Bioclimatic Architecture*. Coll. « Rational Use of Energy (RUE) »: University College Dublin, 19 p.
- Forgues, D., et J. Courchesne. 2008. *La conception intégrée au Québec : Constats*. Montréal, Québec: Agence de l'efficacité énergétique du Québec, 19 p.
- Forgues, D., et J-P. Dionne. 2014. *Processus de conception intégrée (PCI)*. Montréal, Québec: École de technologie Supérieure, ÉTS., 68 p.

- Forgues, D., D. Monfet et S. Gagnon. 2016a. *Fascicule 1 - Notions De Base Et Simulation Énergétique*. Coll. « Guide de conception d'un bâtiment performant »: Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec.
- Forgues, D., D. Monfet et S. Gagnon. 2016b. *Fascicule 2 - L'Optimisation Énergétique Dans Une Conception Intégrée*. Coll. « Guide de conception d'un bâtiment performant »: Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec.
- Forgues, D., D. Monfet et S. Gagnon. 2016c. *L'Optimisation Énergétique Dans Une Conception Intégrée*. Coll. « Guide de conception d'un bâtiment performant »: Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec.
- Forgues, Daniel, François Chiochio, Audrey Lavallée et Vincent Laberge. 2017. « Performance de la conception intégrée et intégration des technologies de l'information dans un contexte de travail multidisciplinaire: une étude exploratoire ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 44, n° 2, p. 129-137.
- Forgues, Daniel. Koskela, Lauri. 2009. « The influence of a collaborative procurement approach using integrated design in construction on project team performance ». *International Journal of Managing Projects in Business*, p. 17.
- Gagnon, Y.C. 2005. *L'Étude de Cas Comme Méthode de Recherche: Guide de Réalisation*. Presses de l'Université du Québec.
- Goldenhar, Linda M., Anthony D. LaMontagne, Theodore Katz, Catherine Heaney et Paul Landsbergis. 2001. « The Intervention Research Process in Occupational Safety and Health: An Overview From the National Occupational Research Agenda Intervention Effectiveness Research Team ». *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 43, n° 7, p. 616-622.
- Goldfarb, J., Rosenberg, B K. 2012. *An Architect's Guide to Integrating Energy Modeling in the Design Process*. The American Institute of Architects, 86 p.
- GSA, U.S. General Services Administration. 2012. *BIM Guide for Energy Performance*. Public Buildings Service, 63 p.
- Hallas, Julia. 2014. « The focus group method: Generating high quality data for empirical studies ». In *31st Annual Conference of the Australian Society for Computers in Tertiary Education, ASCILITE 2014, November 23, 2014 - November 26, 2014*. (Dunedin, New Zealand), p. 519-523. Coll. « Proceedings of ASCILITE 2014 - Annual Conference of the Australian Society for Computers in Tertiary Education »: ASCILITE.
- Hemsath, Timothy L. 2013. « Conceptual energy modeling for architecture, planning and design: Impact of using building performance simulation in early design stages ». In

13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, BS 2013, August 26, 2013 - August 28, 2013. (Chambery, France), p. 376-384. Coll. « Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association »: International Building Performance Simulation Association.

Hensen, J., et R. Lamberts. 2011. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Spon Press.

Hetherington, Robina, Robin Laney, Stephen Peake et David Oldham. 2011. « Integrated building design, information and simulation modelling: The need for a new hierarchy ». In *12th Conference of International Building Performance Simulation Association Building Simulation 2011, BS 2011, November 14, 2011 - November 16, 2011.* (Sydney, NSW, Australia), p. 2241-2248. Coll. « Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association »: International Building Performance Simulation Association.

Hydro-Québec. 2015. *Option Conception Intégrée - programme Bâtiments d'Hydro-Québec - Marchés commercial et institutionnel*. Coll. « Bâtiments - Programme de soutien aux projets d'efficacité énergétique », 20 p.

iiSBE. 2004. *The Integrated Design Process*. iiSBE - International Initiative for Sustainable Built Environment, 7 p.

Institut Royal d'Architecture du Canada. 2009. *Manuel Canadien de pratique de l'architecte*.

Kesik, Ted. 2015. *Vital Signs: Towards Meaningful Building Performance Indicators* Coll. « GREEN PAPER »: University of Toronto, 12 p.

Knapp, Daniel, Clément Guénard et Brett Kerrigan. 2014. « Savings by Design: Benefits of Live Energy Modelling in Integrated Design Charrettes ». In *IBPSA*. (Ottawa, Ontario), sous la dir. de Consulting, Arborus, p. 8.

Kolokotsa, D., D. Rovas, E. Kosmatopoulos et K. Kalaitzakis. 2011. « A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings ». *Solar Energy*, vol. 85, n° 12, p. 3067-3084.

Laine, Tuomas. , Kristian. Bäckström et Tero. Järvinen. 2012. *Series 10: Energy analysis*. COBIM, 23 p.

Larsson, Nils. 2016. *Overview of the SBTool assessment framework*. International Initiative for a Sustainable Built Environment, 11 p.

Larsson, Nils. 2009. *The Integrated Design Process; History and Analysis*. International Initiative for a Sustainable Built Environment, 16 p.

- Larsson, Nils. Poel, Bart. 2002. *Solar Low Energy Buildings and the Integrated Design Process - An Introduction - Task 23-Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings*. Rotterdam, The Netherlands: International Energy Agency - Solar Heating & Cooling Programme, 15 p.
- Laurencelle, L. 2005. *Abrégé Sur les Méthodes de Recherche et la Recherche Expérimentale*. Presses de l'Université du Québec.
- Lechner, N. 2008. *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. Wiley.
- Liebich, Thomas., Konrad. Stuhlmacher, Matthias. Weise, Romy. Guruz, Peter. Katranuschkov et Raimar J. Scherer. 2013. « Information Delivery Manual Work within HESMOS - A descriptive approach to defining Information Delivery Manuals Responsible ». In *BuildingSMART*. (30.03.2013), sous la dir. de Community, Seventh Framework Programme Of The European, p. 19. HESMOS – Integrated Virtual Energy Laboratory.
- Lindsey, G. Todd, J-A. Sheila, J. Ellis, Hayter. Peter, G. 2007. *Lindsey & Todd & Hayter - Handbook for Planning and Conducting Charrettes for High-Performance Projects 2nd*. National Renewable Energy Laboratory, 116 p.
- Liston, Kathleen, Martin Fischer et John Kunz. 2000. « Designing and evaluating visualization techniques for construction planning ». In *8th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, August 14, 2000 - August 16, 2000*. (Stanford, CA, United states) Vol. 279, p. 1293-1300. Coll. « Proceedings of the 8th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering »: American Society of Civil Engineers. < [http://dx.doi.org/10.1061/40513\(279\)169](http://dx.doi.org/10.1061/40513(279)169) >.
- Löhnert, G., Andreas, D., Werner, S. 2003. *Integrated Design Process - Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings*. Berlin, Germany: International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, 62 p.
- McGrawHill. 2014. *Canada Green Building Trends : Benefits Driving the New and Retrofit Market*. Canada Green Building Council, 58 p.
- McKay, J., et P. Marshall. 2001. « The Dual Imperatives of Action Research ». *Information Technology and people*, vol. 14, n° 1, p. 46-59.
- Melrose, Mary J. 2001. « Maximizing the Rigor of Action Research: Why Would You Want To? How Could You? ». *Field Methods*, vol. 13, n° May 2001, p. 160-180.

- MIQCP, Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques. 2006. *Ouvrages publics & Coût Global - Une approche actuelle pour les constructions publiques.*
- Morrison Hershfield, BC Hydro, Canadian Wood Council, Fortis BC, FPInnovations et Homeowner Protection Office (HPO). 2016. *Building Envelope Thermal Bridging Guide (BETB)*. Coll. « VERSION 1.1 », 37 p.
- Mougin, Y. 2011. *La cartographie des processus: Maîtriser les interfaces - La méthode de la voix du client.* Eyrolles.
- Nall, Daniel H., et Drury B. Crawley. 2011. « Energy simulation in the building design process ». *ASHRAE Journal*, vol. 53, n° 7, p. 36-43.
- Negendahl, Kristoffer, et Toke Rammer Nielsen. 2015. « Building energy optimization in the early design stages: A simplified method ». *Energy and Buildings*, vol. 105, p. 88-99.
- Office de l'efficacité énergétique. 2012. *Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada 2011 - Le programme écoÉNERGIE sur l'efficacité énergétique pour les bâtiments.* Ressources naturelles Canada, 3 p.
- Office de l'efficacité énergétique. 2015. *Guide de données sur la consommation d'énergie - 1990 à 2013.* Ressources naturelles Canada, 183 p.
- Panitz, K., et V. R. Garcia-Hansen. 2013. « Daylighting Design and Simulation: Ease of use analysis of digital tools for architects ». In *Proceedings of the 19th CIB World Building Congress, Brisbane 2013: Construction and Society.*, sous la dir. de (QUT), Queensland University of Technology.
- Pedrini, Aldomar, et Steven Szokolay. 2005. « The architects approach to the project of energy efficient office buildings in warm climate and the importance of design methods ». In *Building Simulation 2005 - 9th International IBPSA Conference, BS 2005, August 15, 2005 - August 18, 2005.* (Montreal, Canada), p. 937-944. Coll. « IBPSA 2005 - International Building Performance Simulation Association 2005 »: International Building Performance Simulation Association.
- Reed, Bill., John Boecker, Scot Horst, Tom Keiter, Andrew Lau, Marcus Sheffer, Brian Toevs. (397). 2009. *The Integrative Design Guide to Green Building: Redefining the Practice of Sustainability.* Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Reeves, T., S. Olbina et R. R. A. Issa. 2015. « Guidelines for using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings ». *Buildings*, vol. 5, n° 4, p. 1361-88.

- Rietveld, Renée. 2014. « UNE ANNÉE RECORD POUR LE BÂTIMENT DURABLE : 574 CERTIFICATIONS LEED ». < <http://batimentdurable.ca/actualites/une-annee-record-pour-le-batiment-durable-574-certifications-lead> >.
- Schlueter, Arno, et Frank Thesseling. 2009. « Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages ». *Automation in Construction*, vol. 18, n° 2, p. 153-163.
- Smulders, F., L. Lousberg et K. Dorst. 2008. « Towards different communication in Collaborative Design ». *International Journal of Managing Projects in Business*, vol. 1, p. 352-367.
- Susman, G. I. 1983. *Action Research : A Sociotechnical Systems Perspective*. Coll. « Beyond method: Strategies for social research ». London: Sage Publications.
- Tory, Melanie, Sheryl Staub-French, Barry A. Po et Fuqu Wu. 2008. « Physical and digital artifact-mediated coordination in building design ». *Computer Supported Cooperative Work*, vol. 17, n° 4, p. 311-351.
- Tzempelikos, Athanassios, Panagiota Karava, Mark Bessoudo, Luis Miguel Candanedo et Andreas K Athienitis. 2009. « Investigation of Thermal and Airflow Conditions Near Glazed Façades Using Particle Image Velocimetry and CFD Simulation-Eliminating the Need for Secondary Perimeter Heating Systems ». *ASHRAE Transactions*, vol. 115, n° 1.
- Tzikopoulos, A. F., M. C. Karatza et J. A. Paravantis. 2005. « Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings ». *Energy and Buildings*, vol. 37, n° 5, p. 529-544.
- Van Moeseke, Geoffrey ; Attia, Shady Galal Mohamed ; Massart, Catherine ; Darteville, Olivier ; De Herde, André. 2012. « Proposition de redéfinition pragmatique des bâtiments net-zéro énergie ». In *Symposium PassiveHouse*. (Bruxelles, 05/10/2012), sous la dir. de remerciements, Dépôt Institutionnel de l'Académie Louvain et.
- Whitmore, J., et P-O. Pineau. 2016. *Portrait global de l'efficacité énergétique en entreprise au Québec*. Montréal: HEC Montréal, 57 p.
- Whitmore, Johanne., et Pierre-Olivier. Pineau. 2015. *État de l'énergie au Québec - 2016*. HEC Montréal, 44 p.
- Xia, Chunhai, Yingxin Zhu et Borong Lin. 2008. « Building simulation as assistance in the conceptual design ». *Building Simulation*, vol. 1, n° 1, p. 46-52.
- Yin, R.K. 2013. *Case Study Research: Design and Methods*. SAGE Publications.

Zimmerman, A. 2006. *Guide sur le processus de conception intégré*. SCHL : Société canadienne d'hypothèques et de logement, 18 p.